

발간등록번호

74-6440000-000537-01

화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(4차년도)

2021. 12.

제 출 문

충청남도지사 귀하

본 보고서를 「화력발전소 주변지역 기후환경영향
연구(4차년)」
용역 최종보고서로 제출합니다.

2021년 12월



원 장 유 동 훈

Part 0. 연구 종합 | 1

제1장 서론	3
1. 연구배경 및 목적	5
2. 연구의 범위 및 추진일정	6
제2장 주요 연구결과	7
1. 대기환경정보구축	9
1.1. 화력발전소 대기오염배출량 조사	9
1.2. 미기후 모니터링	10
1.3. 고정측정망 운영	10
1.4. 정보 DB 시스템 구축 및 모델링 지원	11
1.5. 생활권 대기질 정보 제공	12
1.6. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정	12
1.7. 거버넌스 및 환류체계 구축	15
2. 대기질 측정분석	16
2.1. 화력발전소 현황분석	16
2.2. 화력발전소 주변지역의 지표 대기오염물질 조사	17
2.3. 시스템 개발 및 테스트베드 운영	18
2.4. 다양한 상황에서의 실시간 회처리장 시설 배출량 산정 결과 및 해석	19
2.5. 실시간 비산먼지 조기경보 시스템을 활용한 과학적 회처리장 관리방안	20
3. 사회적비용 평가	22
3.1. 개요	22
3.2. 보건의료 데이터 분석	22
3.3. 농도반응함수도출 방법론	23
3.4. 피해비용 분석 범위	25
4. 생태환경모니터링	27
4.1. 산림생태계 오염물질 모니터링	27

4.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링	29
4.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링	30
4.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링	32

제3장 세부과제별 연계성	35
----------------------------	-----------

Part 1. 대기환경정보 구축 | 41p

제1장 서론	43
---------------------	-----------

1. 연구배경	45
2. 주요 연구내용	46
3. 4차년도 주요 연구성과	47
4. 연구성과 확산	50
5. 5차년도 연구방향 검토	52
5.1. 미기후 모니터링	52
5.2. 고정측정망 운영	53
5.3. 정보 DB 시스템 구축	54
5.4. 생활권 대기질 정보 제공	55
5.5. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정	56
5.6. 거버넌스 및 환류체계 구축	57

제2장 미기후 모니터링	59
---------------------------	-----------

1. 연구개요	61
2. 미기후 모니터링	61
2.1. 측정지점 및 기준	61
2.2. 측정결과	64
3. 극한기후 분석	76
4. 이산화탄소 측정	83
4.1. 측정지점 및 기준	83
4.2 측정결과	84
5. 요약 및 소결론	86

제3장 고정측정망 운영 89

1. 연구목적	91
2. 연구개요	91
2.1. 분석 기간	91
2.2. 분석 방법	92
3. 측정망 현황	93
3.1. 측정망 개요	93
3.2. 측정망 운영	97
4. 고정측정망 분석 결과	100
4.1. 대난지도 측정소 결과	100
4.2. 기상 연계분석 및 상관성 분석	107
4.3. 청라면 측정소 결과	114
5. 요약 및 소결론	127

제4장 정보DB시스템 구축 및 모델링 지원 129

1. 연구목적	131
2. 연구개요	132
3. 기후정보 DB시스템 구축	132
3.1. 시스템 DB 설계	132
3.2. 시스템 DB 구축 방법	135
4. 기후정보서비스 시스템	143
4.1. 시스템 설계	143
4.2. 시스템 운영	147
5. 타 시스템과 연계성	148
5.1. 충남형 빅데이터 허브 플랫폼 연계	148
5.2. 충청남도 마을대기측정망 통합정보 시스템과의 차별성	149

제5장 생활권 대기질 정보 제공 151

1. 연구목적	153
2. 대기질 정보 공유	153
2.1. 대상 및 방법	153
2.2. 정보 제공	155
2.3. 4개 시군 종합분석	163
3. 요약 및 소결론	165

제6장 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정 169

1. 연구목적	171
2. 연구개요	172
2.1. 분석기간 및 분석방법	172
2.2. 외부 기여율 분석 방법과 모델 운영 기간	174
2.3. 대기모델 개요	175
2.4. 발전소 기여도 평가 개요	177
3. 분석결과	183
3.1. 대기시료 분석결과	183
3.2. 강우시료 분석결과	188
3.3. 대기-강우시료 중금속 분석결과 비교	191
4. 대기모델에 의한 기여도 결과	194
4.1 Trajectory 모델결과	194
4.2. PSCF 모델을 적용한 외부 기여율	200
5. 대기모델을 활용한 발전소 기여도 평가	207
5.1 기상모델 검증 및 배출량 자료 입력	207
5.2 발전소 기원 PM _{2.5} 기여도 평가 결과	211
5.3 발전소 기원 대기오염물질 영향범위 산정(PM _{2.5})	216
6. 요약 및 소결론	218

제7장 거버넌스 및 환류체계 구축 221

1. 연구개요	223
1.1. 연구목적	223
1.2. 협의 프로세스	224
1.3. 이해관계자 협의	225
1.4. 서면의견 조사	227
2. 통합민간환경감시단 제안	229
2.1. 환경감시기구 운영사례 분석	229
2.2. 통합민간환경감시단 운영방향 설정	232
2.3. 통합민간환경감시단 운영(안)	235
3. 요약 및 소결론	240

제8장 결론 및 신규사업 제안 243

1. 결론 및 신규사업 제안	245
1.1. 미기후 모니터링	245
1.2. 고정측정망 운영	247
1.3. 기후정보 DB 시스템	249
1.4. 생활권 대기질 정보 제공	250
1.5. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정	252
1.6. 거버넌스 및 환류체계 구축	253

Part 2. 대기질 측정분석 | 255p

제1장 서론 257

1. 연구배경 및 목적	259
2. 연구범위 및 연구내용	262
2.1. 시간적 범위	262
2.2. 공간적 범위	262
2.3. 내용적 범위	263
3. 연구추진체계	265
3.1. 화력발전소(시설) 주변지역 현황조사·분석	265
3.2. 화력발전소 주변지역의 지표 대기오염물질 조사	266
3.3. 시스템 개발 및 테스트베드 운영	267
3.4. 회처리장 시설의 비산먼지 배출량 산정 및 관리방안 도출	268
3.5. 실시간 비산먼지 조기경보 시스템	269
4. 연구성과	270
4.1. 주요 연구성과	270
4.2. 연구성과 활용 및 확산	273
5. 5차년도 주요 연구 추진계획	275
5.1. 대기질 측정 및 배출량 분석	275
5.2. 화력발전소 실측기반 비산먼지 배출량 평가 및 국가 배출량 산입 제안 ..	275
5.3. 회처리장 복토 및 작업환경에 따른 비산먼지 발생량저감 대책효과 분석	276
5.4. 화력발전소 통합 대기오염 조기경보시스템 운영방안	276

제2장 화력발전소(시설) 주변지역 현황 조사 · 분석 279

1. 연구대상 지역의 일반현황분석	281
1.1. 입지여건	281
1.2. 지형분석	281
1.3. 인구현황	281
1.4. 토지이용	283
1.5. 산업 · 경제활동	283
1.6. 기상 및 기후특성	284
1.7. 에너지 사용량	285
2. 화력발전소 현황분석	288
2.1. 지리적 특성	288
2.2. 발전사별 석탄사용량 비교	288
2.3. 굴뚝 TMS에 의한 발전사별 대기오염 배출량 비교	291
2.4. 발전사별 저탄장 운영 현황 및 환경개선 노력	294
2.5. 화력발전소 주변 바람특성 분석	295
3. 소결론	298

제3장 화력발전소(시설) 주변지역 지표 대기오염물질 조사 301

1. 주변지역 지표 대기오염물질 조사 계획	303
1.1. 대기오염물질 조사 방법	303
1.2. 간이대기측정기의 특징 및 검·보정	303
2. 주변지역 지표 대기오염물질 조사 결과	304
2.1. 조사 지점 및 기간	304
2.2. 아황산가스(SO ₂)	306
2.3. 총부유분진(TSP)	311
2.4. 미세먼지(PM ₁₀) 조사 결과	324
3. 소결론	334

제4장 시스템 개발 및 테스트베드 운영 335

1. 실시간 비산먼지 Flux 배출량 모니터링 시스템 개발	337
1.1. 데이터로거를 이용한 Flux 산정 실시간 측정자료 수집	337
1.2. 실시간 비산먼지 Flux 측정 모니터링 시스템 구현 및 운영	341

2. 테스트베드 성과	346
2.1. 데이터 누락 관리방안	346
2.2. 데이터 송·수신 안정화	349
2.3. 측정기 테스트베드 운영	353
3. 회처리장 실시간 비산먼지 Flux 배출량 측정장비 설치 및 운영	360
4. 소결론	366

제5장 실시간 회처리장 시설 배출량 산정 결과 및 해석 369

1. 회처리장 관련 국가 배출량의 산정방법	371
1.1. 회처리장 관련 국가 대기오염물질 배출량의 문제점	371
2. 실시간 회처리장 비산먼지 모니터링 시스템 구성 및 운영	372
2.1. 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템 구현 및 운영	372
3. 실시간 회처리장 Flux 배출량 조사결과	375
3.1. 당진화력 회처리장 비산먼지 PM10 Flux 배출량 측정결과	376
3.2. 서천화력 회처리장 비산먼지 배출량 평가	382
4. 소결론	388

제6장 결론 및 제언 389

1. 비산먼지 배출량 산정 개선	391
1.1. 비산먼지 배출량 산정 현황	391
1.2. 비산먼지 배출량 산정 방법 제언	393
2. 고농도 비산먼지 조기경보체계 구축	394
2.1. 비산먼지 조기경보체계 현황	394
2.2. 고농도 비산먼지 조기경보체계 구축 제언	394
3. 배출량 기반 능동적 비산먼지 관리방안	399
3.1. 회처리장 비산먼지 관리방안 현황	399
3.2. 배출량 기반 능동적 비산먼지 관리방안 제언	401

Part 3. 사회적 피해비용 | 405p

제1장 서론 407

1. 연구배경 및 목적	409
--------------------	-----

2. 연구내용	410
3. 연구성과 및 차년도 계획	411

제2장 보건의료데이터 분석 413

1. 개요	415
2. 건강위험 측정 지표	415
3. 보건의료 데이터	418
4. 건강보험 데이터	426
4.1. 개요	426
4.2. 데이터 종류	426
4.3. 데이터 수집 절차	428
5. 소결	430

제3장 농도반응함수 도출 방법론 431

1. 개요	433
2. 역학연구 방법	433
2.1. 방법별 분류	433
2.2. 분석연구 종류	435
2.3. 인과관계 입증 타당성	439
3. 코호트 연구	443
3.1. 코호트 데이터	443
3.2. 분석 모델	446
4. 선행사례	452
4.1. 개요	452
4.2. 국내 대상 연구	453
4.3. 국외 대상 연구	463
4.4. 국내 및 국외 연구 비교	477
5. 소결	482

제4장 석탄화력피해비용 분석 범위 483

1. 공간적 범위	485
2. 시간적 범위	486

3. 내용적 범위	488
3.1. 피해비용 분석 사례	488
3.2. 유럽 Clean Air Outlook	488
3.3. 미국 EPA Integrated Science Assessment	491
3.4. WHO 전세계질병부담(Global burden of disease)	494
3.5. 분석범위 설정	495
4. 분석모형 설계	498
4.1. 연구 참여자 설정	498
4.2. 건강 영향 설정	499
4.3. 대기오염물질 노출 평가	500
5. 소결	505

제5장 결론 및 향후 과제 507

Part 4. 생태환경 모니터링 | 513p

제1장 서론 515

1. 연구배경 및 목적	517
2. 연구범위 및 연구내용	518
2.1. 시간적 범위	518
2.2. 공간적 범위	518
2.3. 내용적 범위	519
3. 연구추진체계	521
3.1. 산림생태계 오염물질 모니터링	521
3.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링	521
3.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링	522
3.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링	522
4. 연구성과	523
4.1. 산림생태계 오염물질 모니터링 결과	523
4.2. 화력발전소 주변지역 중금속 모니터링 결과	524
4.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링	525
4.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링	526

5. 연구성과 활용 및 확산	528
5.1. 브로슈어 배포·확산	528
5.2. 학술대회 발표 및 논문 투고	529
6. 5차년도 연구계획	531

제2장 산림생태계 오염물질 모니터링 533

1. 화력발전소 주변지역 수목 나이테 수은농도	535
1.1. 국내 화력발전시설 기반 에너지 소비량	535
1.2. 석탄화력발전시설의 수은배출	535
1.3. 수은으로 인한 대기오염	539
1.4. 화력발전소 주변 지역 수목 나이테의 수은농도	540
1.5. 시험구 공시목 수은농도 분석	548
1.6. 요약 및 소결론	557
2. 화력발전소 주변지역 산림토양의 수은농도	561
2.1. 충남지역의 토양 수은농도	567
2.2. 요약 및 소결론	571

제3장 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링 573

1. 물환경 모니터링	575
1.1. 조사 시기 및 조사 방법	575
1.2. 당진화력발전소 주변 하천	578
1.3. 태안화력발전소 주변 하천	586
1.4. 보령화력발전소 주변 하천	594
1.5. 서천 화력발전소	600
1.6. 요약 및 소결론	604
2. 어류 중금속 모니터링	607
2.1. 조사 시기 및 조사 방법	607
2.2. 붕어 중금속 분석 결과	608
3. 포유류 중금속 모니터링	611
3.1. 조사 시기 및 조사 방법	611
3.2. 화력발전소 주변지역 포유류 중금속 농도 현황	614
3.3. 요약 및 소결론	618

제4장 화력발전소 주변지역 생태모니터링 621

1. 연구개요	623
1.1. 조사지 선정	623
2. 식물분야	626
2.1. 조사시기 및 방법	626
2.2. 식물분야 조사결과	627
2.3. 연차별 비교	635
2.4. 요약 및 소결론	639
3. 곤충분야	640
3.1. 조사 시기 및 방법	640
3.2. 곤충분야 조사결과	641
3.3. 조사지별 곤충 현황	648
3.4. 요약 및 소결론	665
4. 포유류분야	667
4.1. 조사시기 및 조사방법	667
4.2. 포유류분야 조사결과	669
4.3. 조사구-대조구 조사결과	678
4.4. 조사구-대조구 연차별 비교	685
4.5. 요약 및 소결론	690
5. 어류분야	692
5.1. 조사 시기 및 조사 방법	692
5.2. 어류분야 조사결과	696
5.3. 어류건강성 평가(FAI)를 통한 안정성 평가	730
5.4. 연차별 연구결과 비교분석	731
5.5. 요약 및 소결론	735

제5장 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링 737

1. 식물분야	739
1.1. 조사시기 및 방법	739
1.2. 대상종 및 선정사유	741
1.3. 주요종 모니터링	752
1.4. 요약 및 소결론	767

2. 곤충분야	769
2.1. 조사시기 및 방법	769
2.2. 주요종 모니터링 결과	771
2.3. 요약 및 소결론	783
3. 포유류분야	786
3.1. 조사시기 및 방법	786
3.2. 주요종 모니터링 결과	789
3.3. 연차별 비교	794
3.4. 요약 및 소결론	799
4. 어류분야	801
4.1. 조사시기 및 방법	801
4.2. 주요종 모니터링 결과	803
4.3. 요약 및 소결론	810

제6장 결론 및 제언 813

1. 결론 및 제언	815
1.1. 산림생태계 오염물질 모니터링	815
1.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링	818
1.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링	820
1.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링	823
2. 정책제언(신규사업 제안)	826
2.1. 수은 흡수 수목을 활용한 신재생에너지 발전사업	826
2.2. 시민 과학을 이용한 수달 서식 현황 모니터링 사업	829
2.3. 친환경 생태하천 복원사업	830
2.4. 환경영향평가-사후환경영향 조사 연계 모니터링 사업	833
2.5. 충남지역 토양오염실태조사 개선 방향성 제시	834

Part 0

Part 1

[표 2.1] 미기후 모니터링 지점	63
[표 2.2] 보령의 지점별 온도(℃) 변화	67
[표 2.3] 보령의 지점별 습도(%) 변화	67
[표 2.4] 당진의 지점별 온도(℃) 변화	69
[표 2.5] 당진의 지점별 습도(%) 변화	70
[표 2.6] 서천의 지점별 온도(℃)변화	72
[표 2.7] 서천의 지점별 습도(%)변화	72
[표 2.8] 태안의 지점별 온도(℃) 변화	74
[표 2.9] 태안의 지점별 습도(%) 변화	75
[표 2.10] 2019년 미기후 모니터링 지점 극한기후 분석결과	80
[표 2.11] 2020년 미기후 모니터링 지점 극한기후 분석결과	81
[표 2.12] 2021년 미기후 모니터링 지점 극한기후 분석결과	82
[표 2.13] 이산화탄소 측정 지점	84
[표 3.1] 고정측정망 분석현황	91
[표 3.2] 도시대기측정망 분석현황	92
[표 3.3] 마을대기측정망 분석현황	92
[표 3.4] 고정측정망 설치 현황(2개소)	94
[표 3.5] 충청남도 마을대기측정망 설치 현황(38개소)	96
[표 3.6] 대안지도 측정소 측정장비 정도검사 현황	99
[표 3.7] 청라면 측정소 측정장비 정도검사 현황	100
[표 3.8] 청라면 측정소 측정장비 등가성평가 현황	100
[표 3.9] 대안지도 측정소 운영기간 계절별 농도변화	102
[표 3.10] 당진시에 측정된 PM10 농도(2018년 2월~2021년 10월)	103
[표 3.11] 당진시에 측정된 PM2.5 농도(2018년 2월~2021년 10월)	104
[표 3.12] 당진시에 측정된 NO2 농도(2018년 2월~2021년 10월)	105
[표 3.13] 당진시에 측정된 오염물질 농도(2020년 9월~2021년 10월)	109
[표 3.14] 대안지도 측정소 주변 연차별 기상인자(북서풍) 분석	110

[표 3.15] 당진시의 측정소별 Pearson 상관분석 결과(2020년 9월~2021년 10월)	111
[표 3.16] 청라면 측정소 운영기간 계절별 농도변화	115
[표 3.17] 보령시에 측정된 PM10 농도(2019년 8월~2021년 10월)	116
[표 3.18] 보령시에 측정된 PM2.5 농도(2019년 8월~2021년 10월)	117
[표 3.19] 보령시에 측정된 NO2 농도(2019년 8월~2021년 10월)	118
[표 3.20] 보령시에 측정된 오염물질 농도(2020년 9월~2021년 10월)	122
[표 3.21] 청라면 측정소 주변 연차별 기상인자(남서풍) 분석	123
[표 3.22] 보령시의 측정소별 Pearson 상관분석 결과(2020년 9월~2021년 10월)	124
[표 4.1] 시스템 운영 데이터베이스 테이블 설계 목록	135
[표 4.2] 연구성과정보 공유 데이터베이스 테이블 설계 목록	136
[표 4.3] 기후정보 DB 시스템과 마을대기측정망 시스템 비교	150
[표 5.1] 2020년 마을별 충청남도 대기환경기준 초과일수 (괄호안은 2019년 초과일수)	159
[표 5.2] 2020년 오존 배출허용 초과 마을현황	163
[표 5.3] 4차년도 화력발전소 주변 오존 중점·우선 관리대상 마을	165
[표 6.1] 측정지점의 TM좌표와 화력발전소로부터의 이격거리	172
[표 6.2] 3~4차년도 대기시료 및 강우시료 분석 시기	173
[표 6.3] 기상모델 운영 기간 선정을 위한 시료 채취 기간	174
[표 6.4] 기상모델 입력자료 구성	176
[표 6.5] 기상 및 대기질 모델 영역	177
[표 6.6] 충청남도 석탄화력발전소 배출량(2019년 기준, 단위 : 톤)	179
[표 6.7] 대기 중 유기탄소 안정동위원소비 분석결과(평균값)	183
[표 6.8] 대기 중 납 안정동위원소비 분석결과(평균값)	185
[표 6.9] 대기 중 중금속 분석결과	186
[표 6.10] 대기 중 3차년도 결과 대비 중금속 증감	187
[표 6.11] 강우의 납 안정동위원소비 분석결과	188
[표 6.12] 강우의 중금속 분석결과	189
[표 6.13] 강우 중 3차년도 결과 대비 중금속 증감	190
[표 6.14] 중금속 분석결과 비교	192
[표 6.15] 대기, 강우와 하천, 저질 중금속 비율	193
[표 6.16] 트라젝토리 모델 운영 결과 요약	195
[표 6.17] 충남지역 외부 기여율 모델 결과	206
[표 6.18] 기상모델 검증 기준	207
[표 6.19] 기상 모델링 검증 결과	208
[표 7.1] 충청남도 용역 업무담당자 및 민간환경감시단 업무담당자 협의내용	226

[표 7.2] 시군별 담당자 의견조사 결과	228
[표 7.3] 거버넌스 운영사례 조사결과	231
[표 7.4] 통합민간환경감시단 운영 안별 특징	239
[표 7.5] 통합민간환경감시단 운영(안)에 대한 의견조사 결과	240

Part 2

[표 2.1] 시군별 인구현황	282
[표 2.2] 충청남도 최종에너지 원별 소비량(단위 : 천 toe)	286
[표 2.3] 2019년 기준 전력생산 1MW당 총부유먼지 발생량	293
[표 2.4] 2020년 기준 전력생산 1MW당 총부유먼지 발생량	294
[표 2.5] 화력발전소별 대기오염물질 배출량 2016년, 2020년 비교	298
[표 3.1] 화력발전소 인접지역 대기질 조사 지점의 정보	305
[표 3.2] 측정 기간별 기상현황	306
[표 3.3] IC기기를 이용한 지점별 SO ₂ 값 측정 결과	307
[표 3.4] 탁도계를 이용한 지점별 탁도값 측정 결과	313
[표 3.5] 현미경을 이용한 지점별 TSP 측정 결과	318
[표 3.6] 센서기반 광산란 측정기를 이용한 미세먼지 측정 결과	325
[표 6.1] 발전사별 회처리장의 환경관리 방안(2021년 기준)	400

Part 3

[표 2.1] 사망원인통계 구성항목	419
[표 2.2] 국내 보건 통계	422
[표 2.3] 국민건강보험 관련 데이터 비교	425
[표 3.1] 역학연구 방법 중 기술연구 방법	434
[표 3.2] 연구방법별 통계모델 비교	442
[표 3.3] 국내 대상 장기영향 농도반응함수 연구사례	455
[표 3.4] 국외 대상 장기영향 농도반응함수 연구사례	464
[표 3.5] 국내외 뇌졸중 연구 주요 내용	478
[표 3.6] 국내외 뇌졸중 연구에서 포함한 교란변수	479
[표 4.1] 유럽 Clean Air Outlook의 대기오염물질별 건강영향	490
[표 4.2] EPA ISA의 대기오염 물질별 건강영향	492
[표 4.3] WHO GBD의 대기오염 물질별 건강영향	495
[표 4.4] 선행피해비용 분석 문헌에서 고려된 건강영향	496
[표 4.5] 연도별 측정소 개수	501

Part 4

[표 1.1] 다량배출사업장 오염물질 배출량 상위 10개소 (환경부 2018)	517
[표 2.1] 2005년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준	536
[표 2.2] 2010년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준	536
[표 2.3] 2020년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준	537
[표 2.4] 2020년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준	538
[표 2.5] 환경오염분야 시험구 및 대조구 공시목 현황	542
[표 2.6] 토양 시료 및 수목 원판 채취시기	544
[표 2.7] 벌도 대상 임목 선정 기준	545
[표 2.8] 시험구 및 대조구 수목 나이테 평균 수은농도 (최소값 ~ 최대값)	547
[표 2.9] 토양측정망 및 토양오염실태조사를 위한 오염원 지역별 분류 (환경부, 2020)	561
[표 2.10] 국내 토양 내 수은 오염 기준 (토양환경보전법 제1조의 5, 제 20조 관련)	562
[표 2.11] 환경부 2020년 토양측정망토양오염실태조사 오염원 지역별 분류	565
[표 2.12] 토양 시료 채취시기	566
[표 2.12] 2020년도 환경부 시행, 충남지역 토양오염실태조사결과 중 수은농도	567
[표 2.13] 2020년도 환경부 시행, 충남지역 화력발전시설 관련 지역 토양 수은농도	568
[표 2.14] 2020년도 환경부 시행, 충남지역 화력발전시설 관련 지역 토양 수은농도	569
[표 3.1] 충남 화력발전소 주변지역 수질수체 및 저질내 중금속 조사 시기	575
[표 3.4] 당진화력발전소 조사지 현황	578
[표 3.5] 태안화력발전소 조사지 현황	586
[표 3.6] 하천 퇴적물 오염평가기준(환경부)	592
[표 3.7] 미국 · 캐나다 하천 퇴적물 오염기준	593
[표 3.8] 보령화력발전소 조사지 현황	594
[표 3.9] 서천화력발전소 조사지 현황	600
[표 3.10] 충남 화력발전소 주변지역의어류 조사 시기	607
[표 3.11] 어류 전처리 내용 및 분석방법	607
[표 3.12] 각 지역별 붕어의 중금속 분석 결과	609
[표 3.13] 충남 화력발전소 주변지역의 포유류 조사 시기	611
[표 3.14] 소형 설치류 포획 지점 및 개체 정보	612
[표 3.15] ICP-MS분석 방법	613
[표 3.16] 발전소별 설비용량, 발전량 및 유연탄 사용량 비교	614
[표 3.17] 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) ICP-MS 분석 결과	616
[표 4.1] 화력발전소 주변지역 생태모니터링 조사지 현황	624
[표 4.2] 희리산(대조구)에서 수행된 식물상 모니터링 조사	626

[표 4.3] 희리산(대조구)에서 조사된 관속식물의 종류조성	627
[표 4.4] 희리산(대조구)에서 조사된 특산식물	628
[표 4.5] 희리산(대조구)에서 조사된 식물구계학적특정종	629
[표 4.6] 희리산(대조구)에서 조사된 기후변화적응대상식물	630
[표 4.7] 희리산(대조구)에서 조사된 귀화식물	631
[표 4.8] 지역별 도시화지수 및 귀화율	634
[표 4.9] 지역별 전체 분류군 수의 연차별 비교	635
[표 4.10] 도시화지수 및 귀화율의 연차별 비교	637
[표 4.11] 충남 화력발전소 주변지역의 곤충 조사 시기 및 장소	640
[표 4.12] 당진조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록	649
[표 4.13] 태안조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록	652
[표 4.14] 보령조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록	655
[표 4.15] 서천조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록	657
[표 4.16] 서산대조구 국외반출승인대상종 곤충 목록	659
[표 4.17] 서천대조구 국외반출승인대상종 곤충 목록	662
[표 4.18] 조사구-대조구 연차별 채집된 곤충 종수	665
[표 4.19] 충남 화력발전소 주변지역의 포유류 조사 시기	667
[표 4.20] 각 지역별 흔적, 무인센서카메라 및 포획 조사 결과	673
[표 4.21] 문헌조사 결과 및 조사 결과 비교	674
[표 4.22] 1, 2, 3년차 각 지역별 포유류 조사 결과	687
[표 4.23] 충남 화력발전소 주변지역의 어류 조사 시기	692
[표 4.24] 어류를 이용한 건강성 평가 메트릭 구간 설정	695
[표 4.25] 어류를 이용한 건강성 등급	696
[표 4.26] 당진조사구 1차 조사 어류상	698
[표 4.27] 당진조사구 2차 조사 어류상	699
[표 4.28] 당진조사구 3차 조사 어류상	700
[표 4.29] 당진조사구 1~3차 조사 어류상 종합	701
[표 4.30] 당진조사구 어류 군집지수	704
[표 4.31] 당진조사구 지점별 어류건강성(FAI) 평가	706
[표 4.32] 태안조사구 1차 조사 어류상	708
[표 4.33] 태안조사구 2차 조사 어류상	709
[표 4.34] 태안조사구 3차 조사 어류상	710
[표 4.35] 태안조사구 1~3차 조사 어류상 종합	711
[표 4.36] 태안조사구 어류의 군집지수	714

[표 4.37] 태안조사구 지점별 어류건강성(FAI) 평가	715
[표 4.38] 보령조사구 1차 조사 어류상	718
[표 4.39] 보령조사구 2차 조사 어류상	719
[표 4.40] 보령조사구 2차 조사 어류상	720
[표 4.41] 보령조사구 1~3차 조사 어류상 종합	721
[표 4.42] 보령조사구 어류의 군집지수	724
[표 4.43] 보령화력발전소 지점별 어류건강성(FAI) 평가	725
[표 4.44] 서천조사구 2차 조사 어류상	726
[표 4.45] 서천조사구 3차 조사 어류상	726
[표 4.46] 서천조사구 2~3차 조사 어류상 종합	727
[표 4.47] 서천조사구 어류의 군집지수	728
[표 4.48] 서천조사구 지점별 어류건강성(FAI) 평가	730
[표 5.1] 충남 화력발전소 주변지역의 식물상 조사 시기	739
[표 5.2] 당진의 모니터링 대상종 후보	742
[표 5.3] 태안의 모니터링 대상종 후보	743
[표 5.4] 보령의 모니터링 대상종 후보	745
[표 5.5] 서천의 모니터링 대상종 후보	746
[표 5.6] 팔봉산(대조구)의 모니터링 대상종 후보	748
[표 5.7] 희리산(대조구)의 모니터링 대상종 후보	750
[표 5.8] 예비 조사결과 선정된 최종 대상종 목록	751
[표 5.9] 고란초 모니터링 조사결과	752
[표 5.10] 장구밥나무 모니터링 조사결과	753
[표 5.11] 수리딸기 모니터링 조사결과	755
[표 5.12] 팽팽나무 모니터링 조사결과	755
[표 5.13] 병꽃나무 모니터링 조사결과	757
[표 5.14] 수리딸기 모니터링 조사결과	758
[표 5.15] 검노린재나무 모니터링 조사결과	760
[표 5.16] 예덕나무 모니터링 조사결과	760
[표 5.17] 사람주나무 모니터링 조사결과	762
[표 5.18] 소사나무 모니터링 조사결과	763
[표 5.19] 검노린재나무 모니터링 조사결과	765
[표 5.20] 수리딸기 모니터링 조사결과	766
[표 5.21] 모니터링 대상종(곤충) 조사 시기	769
[표 5.22] 주요종 모니터링(곤충) 채집 결과	770

[표 5.23] 당진 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화	771
[표 5.24] 태안 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화	773
[표 5.25] 보령 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화	775
[표 5.26] 서천 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화	777
[표 5.27] 서산 대조구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화	779
[표 5.28] 서천 대조구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화	781
[표 5.29] 충남 화력발전소 주변지역의 포유류 조사 시기	787
[표 5.30] 충남 화력발전소 주변지역의 어류 조사 시기	801
[표 6.1] 화력발전소 지역별 생태하천 복원사업 검토	831

Part 0

Part 1

[그림 1.1] 한국대기환경학회 학술대회 발표 자료	50
[그림 1.2] 홍보부스 운영	51
[그림 2.1] 미기후 모니터링 지점지도	62
[그림 2.2] 미기후 측정 데이터 수집 및 현장 측정(12월 8일)	63
[그림 2.3] 발전소 인근 지역 온·습도 측정결과	65
[그림 2.4] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(보령)	66
[그림 2.5] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(당진)	69
[그림 2.6] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(서천)	71
[그림 2.7] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(태안)	74
[그림 2.8] 이산화탄소 측정지점 위치도	83
[그림 2.9] 각 지역에 따른 월별 이산화탄소 농도 분포	85
[그림 3.1] 연도별 충청남도 도시대기측정망 설치 현황	93
[그림 3.2] 충청남도 마을대기측정망 현황	94
[그림 3.3] 충청남도 마을대기측정망 통합정보센터	95
[그림 3.4] 대안지도 측정소 전경 및 측정장비	97
[그림 3.5] 대안지도 측정소 장소 이설 과정	98
[그림 3.6] 대안지도·청라면 측정소 측정장비(좌: PM10, PM2.5 / 우: NOx)	98
[그림 3.7] 청라면 측정소 전경 및 측정장비	99
[그림 3.8] 충청남도 대기환경기준 및 미세먼지 예보등급	102
[그림 3.9] 대안지도 측정소 및 당진지역의 입자상물질 농도 변화	106
[그림 3.10] 대안지도 측정소 및 당진지역의 가스상물질 농도 변화	106
[그림 3.11] 당진지역의 풍향에 따른 측정항목 농도 분석	107
[그림 3.12] 당진시 측정소별 PM10 상관관계 산점도	112
[그림 3.13] 당진시 측정소별 PM2.5 상관관계 산점도	112
[그림 3.14] 당진시 측정소별 NO2 상관관계 산점도	113
[그림 3.15] 청라면 측정소 및 보령지역의 입자상물질 농도 변화	119

[그림 3.16] 청라면 측정소 및 보령지역의 가스상물질 농도 변화	119
[그림 3.17] 보령지역의 풍향에 따른 측정항목 농도분석	120
[그림 3.18] 보령시 측정소별 PM10 상관관계 산점도	125
[그림 3.19] 보령시 측정소별 PM2.5 상관관계 산점도	125
[그림 3.20] 보령시 측정소별 NO2 상관관계 산점도	126
[그림 4.1] 기후환경 DB시스템 구축 목표	131
[그림 4.2] 데이터 표준화 구축 방안	133
[그림 4.3] 데이터 표준화 지침	134
[그림 4.4] 시스템 권한관리 ERD	137
[그림 4.5] 시스템 권한관리 ERD	138
[그림 4.6] 발전소 일반현황 정보 ERD	139
[그림 4.7] 발전소 일반현황 정보 ERD	140
[그림 4.8] 생태환경 모니터링 정보 ERD	142
[그림 4.9] 사회적 피해비용 산정 정보 ERD	142
[그림 4.10] 사회적 피해비용 산정 정보 ERD	143
[그림 4.11] 기후환경정보 서비스 메뉴 구성도	144
[그림 4.12] 각 분야별 구성 화면 모습	147
[그림 4.13] 정보DB시스템 연구소개 화면	147
[그림 4.14] 충청남도 데이터 포털 올담 초기화면	148
[그림 4.15] 마을대기 측정망 시스템 구성도(충청남도, 2020)	149
[그림 5.1] 생활권 정보 대기질 우편발송	154
[그림 5.2] 반응형 웹사이트 실시간 조회 예시	155
[그림 6.1] 현장 시료채취 모습	174
[그림 6.2] Trajectory 모델 운영 흐름	176
[그림 6.3] 기상 및 대기질 모델영역	178
[그림 6.4] 충청남도 화력발전소의 대기오염물질별 배출비율	179
[그림 6.5] SMOKE 모델 수행결과(대기오염물질 배출량 처리결과)	180
[그림 6.6] 중부권 도메인 내 모델검증을 위한 도시대기측정소 위치	181
[그림 6.7] BFM 적용 발전소 기여도(기여농도) 분석 개념도	182
[그림 6.8] 보령 측정지점 트라젝토리 모델 결과	196
[그림 6.9] 당진 측정지점 트라젝토리 모델 결과	197
[그림 6.10] 서천 측정지점 트라젝토리 모델 결과	198
[그림 6.11] 태안 측정지점 트라젝토리 모델 결과	199
[그림 6.12] 보령 측정지점 PSCF 모델 결과	200

[그림 6.13] 당진 측정지점 PSCF 모델 결과	201
[그림 6.14] 서천 측정지점 PSCF 모델 결과	202
[그림 6.15] 태안 측정지점 PSCF 모델 결과	203
[그림 6.16] 외부 기여율 분석을 위한 구역 설정	204
[그림 6.17] 대상 발전소 및 기상대 위치	208
[그림 6.18] 관측 및 WRF 모델결과의 바람장미도 비교	209
[그림 6.19] 관측치 및 WRF 결과의 시계열 분석	210
[그림 6.20] 당진 화력발전소 연간 PM _{2.5} 기여농도	212
[그림 6.21] 태안 화력발전소 연간 PM _{2.5} 기여농도	213
[그림 6.22] 보령 화력발전소 연간 PM _{2.5} 기여농도	214
[그림 6.23] 발전소 배출에 따른 지역별 PM _{2.5} 영향 분석 결과	215
[그림 6.24] 충남지역 화력발전소 기인 PM _{2.5} 영향범위 산정결과	217
[그림 7.1] 거버넌스 필요성	223
[그림 7.2] 4개 시군의 통합 거버넌스 제안을 위한 프로세스	224
[그림 7.3] 통합 거버넌스관련 업무담당자 협의 모습	227
[그림 7.4] 충청남도의 지역자원시설세 부문별 사용 현황과 계획	233
[그림 7.5] 충청남도의 환경관련 단위 사업 추진 추이	234
[그림 7.6] (1안) 주도형 통합민간환경감시단 운영(안)	236
[그림 7.7] (2안) 지역형 통합민간환경감시단 운영(안)	237
[그림 7.8] (3안) 자문형 통합민간환경감시단 운영(안)	238
[그림 8.1] 태안화력 주변 온배수 활용계획	246
[그림 8.2] 충청남도 마을대기측정망 현황	248
[그림 8.3] 오존주의보 발령 증가(좌)와 미세먼지 집중관리구역 지정예(우)	251

Part 2

[그림 1.1] 최근 5년간 전국 연도별 대기오염물질 배출량 변화	259
[그림 1.2] 전국 지역별 오염물질 배출량 비교	260
[그림 1.3] 충청남도 및 화력발전소 주변지역의 자료 분석방법	265
[그림 1.4] 화력발전소 주변 인접지역의 대기오염도 조사방법	266
[그림 1.5] 시스템 개발 및 테스트베드 운영	267
[그림 1.6] 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템 및 능동제어 관리방안 도출	268
[그림 1.7] 비산먼지 모델식 개발 및 조기경보 시스템 제안	269
[그림 1.8] 기상상황에 따른 실시간 배출량 측정결과	271
[그림 1.9] 학술적 성과(학술대회참가)	273

[그림 1.10] 학술적 성과(석사학위논문)	274
[그림 1.11] 5차년도 주요 연구 추진계획	277
[그림 2.1] 토지종별(2019년 12월 기준) 현황	283
[그림 2.2] 산업별 취업자 현황(2019년 기준)	283
[그림 2.3] 월별 기온 및 강수량 변화(2019년 기준)	284
[그림 2.4] 지역별 1차 에너지 공급량(2020 지역에너지 통계연보)	285
[그림 2.5] 충청남도의 원별 에너지 소비량(지역에너지 통계연보)	286
[그림 2.6] 보령화력발전소의 월 및 연도별 석탄사용량	288
[그림 2.7] 당진화력발전소의 월 및 연도별 석탄사용량	289
[그림 2.8] 태안화력발전소의 월 및 연도별 석탄사용량	289
[그림 2.9] 발전사별 석탄사용에 따른 수입국가 비교	290
[그림 2.10] 보령화력 연도별 굴뚝 TMS 배출량 비교	291
[그림 2.11] 당진화력 연도별 굴뚝 TMS 배출량 비교	292
[그림 2.12] 태안화력 연도별 굴뚝 TMS 배출량 비교	293
[그림 2.13] 당진 및 태안권역 바람장미 분석	296
[그림 2.14] 보령 및 서천권역 바람장미 분석	297
[그림 3.1] 신서천화력 주변지역 대기질 조사 지점	304
[그림 3.2] SO ₂ Passive Air Sampler와 IC기기를 사용한 농도 분석	306
[그림 3.3] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 SO ₂ 농도값 공간분포 비교	308
[그림 3.4] 신서천화력발전소 1차 조사 지역별 SO ₂ 공간분포 비교	309
[그림 3.5] 신서천화력발전소 2차 조사 지역별 SO ₂ 공간분포 비교	310
[그림 3.6] 탁도계를 이용한 탁도 분석	311
[그림 3.7] 현미경을 이용한 TSP분석	311
[그림 3.8] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 탁도 값 공간분포 비교	314
[그림 3.9] 신서천화력발전소 1차 조사 지역별 공간분포 비교	316
[그림 3.10] 신서천화력발전소 2차 지역별 공간분포 비교	317
[그림 3.11] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 TSP 값 공간분포 비교	319
[그림 3.12] 신서천화력발전소 1차 조사 현미경 분석 지역별 공간분포 비교	320
[그림 3.13] 신서천화력발전소 2차 조사 현미경 분석 지역별 공간분포 비교	321
[그림 3.14] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 TSP 입자상 물질 크기별 비교	322
[그림 3.15] 국외 초미세먼지 유입 당시 예보	323
[그림 3.16] 국외 초미세먼지 유입 당시 서천,당진 그래프	323
[그림 3.17] 탁도 값과 현미경 개수 간의 상관 분석 결과	324
[그림 3.18] 신서천화력발전소 주변지역의 1차 미세먼지 농도의 공간분포 비교	326

[그림 3.19] 신서천화력발전소 주변지역의 미세먼지 1차 조사결과	327
[그림 3.20] 신서천 화력발전소 주변지역 미세먼지(PM ₁₀) 조사 결과(1차)	328
[그림 3.21] 1월 16일 미세먼지 조사 결과	328
[그림 3.22] 1월 18일 미세먼지 조사 결과	329
[그림 3.23] 신서천화력발전소 주변지역의 2차 미세먼지 농도의 공간분포 비교	330
[그림 3.24] 신서천화력발전소 주변지역의 미세먼지 2차 조사결과	331
[그림 3.25] 신서천 화력발전소 주변지역 미세먼지(PM ₁₀) 조사 결과(2차)	332
[그림 3.26] 10월 27일 미세먼지 조사 결과	332
[그림 3.27] 10월 27일 조사 당시 풍속 변화	333
[그림 4.1] LoggerNet 메인 화면 예시	337
[그림 4.2] 데이터 로거에 인터넷 라인 연결 예시	338
[그림 4.3] Utilities 설정 화면	338
[그림 4.4] 데이터 전송 프로그램 예시	339
[그림 4.5] 케이웨더 측정값 관리 화면(케이웨더 제공)	339
[그림 4.6] 케이웨더 미세먼지 측정기 데이터 전송 프로그램	340
[그림 4.7] 데이터 생성 프로그램	340
[그림 4.8] 실시간 비산먼지 Flux 배출량 시스템 시작화면	341
[그림 4.9] 모니터링 시스템 메인화면	342
[그림 4.10] 모니터링 시스템 차트뷰 상,하단 화면	342
[그림 4.11] 모니터링 시스템 일별 측정현황	343
[그림 4.12] 모니터링 시스템 측정항목 데이터 화면	343
[그림 4.13] 모바일 모니터링 시스템 접속 화면	344
[그림 4.14] 모바일 모니터링 시스템 맵뷰 및 측정항목 데이터	345
[그림 4.15] 모바일 모니터링 시스템 차트뷰 및 일별 측정결과	345
[그림 4.16] 측정장비 메인보드 PCB판넬로 교체	346
[그림 4.17] 측정장비 메인보드 PCB 배치도	346
[그림 4.18] 측정장비 메인보드 PCB 회로도	347
[그림 4.19] 측정장비 메인보드 PCB 통신 연결 예시	348
[그림 4.20] 수정 데이터 전송 구성도	349
[그림 4.21] 디지털 방식의 케이블과 컨버터, 커넥터 예시	350
[그림 4.22] CR6 모습	351
[그림 4.23] CR1000x 모습	351
[그림 4.24] 기상 측정 장비 연결 모습	352
[그림 4.25] 아두이노 보드 및 데이터로거 연결 모습	352

[그림 4.26] 기상측정기 컨트롤박스	353
[그림 4.27] 측정센서 외부설치 설계도	354
[그림 4.28] 단순화된 기상측정기 예시	355
[그림 4.29] 상단부 측정장비	355
[그림 4.30] 중단부 측정장비	356
[그림 4.31] 하단부 측정장비	356
[그림 4.32] K-Weather 측정기 정상작동 결과 예시	357
[그림 4.33] 건물 외부 최종 테스트베드 운영	357
[그림 4.34] 최종 테스트베드 운영 결과 예시	357
[그림 4.35] PM10 베타선 측정기 시험성적서	358
[그림 4.36] PM10 광산란법 측정기 자체 등가성 평가 실험 전경	359
[그림 4.37] PM10 베타선법 측정기 대 광산란법 측정기 상관분석도	359
[그림 4.38] 당진화력 회처리장 타워설치 및 측정기 설치 현장 사진	360
[그림 4.39] 당진화력발전소 회처리장 배출량 조사 측정기 설치위치	361
[그림 4.40] 당진화력발전소 저탄장 배출량 조사를 위한 측정기 운영 전경	362
[그림 4.41] 신서천화력 회처리장 타워설치 및 측정기 설치 현장 사진	363
[그림 4.42] 신서천화력발전소 회처리장 배출량 조사 측정기 설치위치	364
[그림 4.43] 신서천화력발전소 회처리장 배출량 조사 측정기 설치위치	365
[그림 4.44] 웹, 모바일 기반 실시간 Flux 배출량 모니터링 시스템	366
[그림 5.1] 나대지 배출량 산정방법 및 배출계수	371
[그림 5.2] 실시간 비산먼지 Flux 배출량 시스템 시작화면	372
[그림 5.3] PM10 Flux 달력 및 Flux 배출량 DB 자료	373
[그림 5.4] 실시간 PM10 Flux 배출량 및 측정자료 표출	373
[그림 5.5] 기상측정 자료를 이용한 바람장미 표출	374
[그림 5.6] 회처리장 Flux 배출량 조사 모식도	375
[그림 5.7] 11월 당진화력 회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	377
[그림 5.8] 11월 4일~8일의 당진회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	379
[그림 5.9] 11월 14일의 당진회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	380
[그림 5.10] 11월 20일~21일의 당진회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	381
[그림 5.11] 11월 서천화력 회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	383
[그림 5.12] 비상저감 조치일의 서천화력 회처리장 상·하단 미세먼지 농도 Flux 배출량	384
[그림 5.13] 11월 4일~8일의 서천회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	385
[그림 5.14] 11월 14일 신서천회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	386
[그림 5.15] 11월 20일~21일 신서천회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도	387

[그림 6.1] 나대지 배출량 산정방법 및 배출계수	391
[그림 6.2] 비산먼지/하역 및 야적 대기오염물질 배출계수	392
[그림 6.3] Flux-Gradient Method(경도법) 산정 방법론	393
[그림 6.4] 비상저감조치 당일 모니터링 시스템 화면	395
[그림 6.5] 서쪽 해안가에 위치한 발전소 예시	396
[그림 6.6] 고농도 미세먼지 조기경보시스템 모식도	397
[그림 6.7] 고농도 조기경보체계 매뉴얼 모식도	398
[그림 6.8] 회처리장 관리방안 모식도	401
[그림 6.9] 서천화력 회처리장의 미세먼지 비상저감조치 당시 모니터링 시스템	402
[그림 6.10] 풍속에 따른 비산먼지 배출량과 미세먼지 농도 비교	403

Part 3

[그림 2.1] 건강피해단위별 범주	418
[그림 2.2] 건강보험 심사 청구절차	424
[그림 2.3] 심의면제 확인서	428
[그림 2.4] NHIS-NHID 신청 및 승인 절차	429
[그림 3.1] 역학연구방법 분류	435
[그림 3.2] 단면연구 모식도	436
[그림 3.3] 시계열 연구 모식도	436
[그림 3.4] 환자-대조군 연구 모식도	437
[그림 3.5] 전향적 코호트 연구 모식도	438
[그림 3.6] 후향적 코호트 연구 모식도	438
[그림 3.7] 연구방법별 인과관계 입증 타당도	439
[그림 3.8] 코호트 연구 방법의 종류	445
[그림 3.9] 중도절단자료 모식도	447
[그림 3.10] 국내외 연구 교란변수 선별 예시	481
[그림 4.1] 피해비용평가의 시간적 범위	487
[그림 4.2] 데이터 구성	498
[그림 4.3] 폐암 연구 대기오염물질 노출기간	503
[그림 4.4] 호흡기질환 대기오염물질 노출기간	504
[그림 4.5] 심혈관계질환 대기오염물질 노출기간	505

Part 4

[그림 1.1] 2-3차년도 연구 성과물로 화력발전소 주변지역의 동식물상에 대한 브로슈어 제작	528
[그림 1.2] 학술적 성과(학술대회 참가 및 게재 논문)	529
[그림 1.3] 학술적 성과(학술대회 참가 및 게재 논문)	529
[그림 1.4] 학술적 성과(학술대회 참가 및 게재 논문)	530
[그림 1.5] 학술적 성과(학사 학위논문)	530
[그림 2.1] 1차 에너지 공급에 사용된 석탄의 연도별 총량	535
[그림 2.2] 공시목 및 토양 시료 채취를 위한 시험구 및 대조구 선정	541
[그림 2.3] 충남 석탄화력발전소 현황	543
[그림 2.4] 충남 보령 및 서천의 공시목에서 취득한 원판	545
[그림 2.5] 전남 영광 및 진도의 공시목에서 취득한 원판	546
[그림 2.6] 보령 화력발전소 기준 원거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은농도	548
[그림 2.7] 서천 화력발전소 기준 원거리 시험구의 수목 나이테 수은농도	549
[그림 2.8] 대조구의 연도별 수목 나이테 수은농도	550
[그림 2.9] 충남 화력발전소 기준 근거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은농도	551
[그림 2.10] 충남 화력발전소 기준 원거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은 농도	552
[그림 2.11] 충남 외 지역의 화력발전소 기준 원거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은농도	554
[그림 2.12] 대조구 및 화력발전소 인근 지역 수목 나이테 수은농도	557
[그림 2.13] 환경부 보도자료 “미세먼지 배출기준 강화하니 수은도 줄었다”	558
[그림 2.14] 환경부 시행 토양측정망토양오염 실태조사 결과에 따른 전국 토양 수은농도	563
[그림 2.15] 환경부 2020년도 전국 시도별 평균 토양 수은농도	563
[그림 2.16] 환경부 2020년도 조사지역종류별 전국 평균 토양 수은농도	564
[그림 3.1] 당진화력발전소 주변 조사하천의 수온 변화	579
[그림 3.2] 당진화력발전소 주변 조사 하천의 전기전도도 변화	580
[그림 3.3] 당진화력발전소 주변 하천 염분도의 변화	581
[그림 3.4] 당진화력발전소 주변 하천의 용존산소 농도	582
[그림 3.5] 당진화력발전소 주변 하천의 용존산소 포화도의 변화	582
[그림 3.6] 당진화력발전소 주변 하천의 pH 변화	583
[그림 3.7] 당진화력발전소 주변 하천의 수체 중금속 분석 결과	584
[그림 3.8] 당진화력발전소 주변 하천 저질의 As, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등의 측정값	585
[그림 3.9] 태안화력발전소 주변 하천의 수온 변화	588
[그림 3.10] 태안화력발전소 주변 하천내 설치된 흙보(하천 내 여러 곳 있음)	588
[그림 3.11] 태안화력발전소 주변 하천의 전기전도도 변화	588
[그림 3.12] 태안화력발전소 주변 하천의 염분도 변화	589

[그림 3.13] 태안화력발전소 주변 하천의 DO 포화도 변화	589
[그림 3.14] 태안화력발전소 주변 하천의 DO 포화도 변화	590
[그림 3.15] 태안화력발전소 주변 하천의 pH 변화	590
[그림 3.16] 태안화력발전소 주변 하천의 중금속 농도 분석 결과	591
[그림 3.17] 태안화력발전소 주변 하천 퇴적물(저질)의 Pb, Fe, Cu 등 측정값	592
[그림 3.18] 보령화력발전소 주변 하천 수온의 변화	595
[그림 3.19] 보령화력발전소 주변 하천의 전기전도도 변화	596
[그림 3.20] 보령화력발전소 주변 하천의 염분도의 변화 분석	596
[그림 3.21] 보령화력발전소 주변 하천 용존산소의 변화	597
[그림 3.22] 보령화력발전소 주변 하천 용존산소포화도의 변화	597
[그림 3.23] 보령화력발전소 주변 하천 pH의 변화	598
[그림 3.24] 보령화력발전소 주변 하천 용존산소포화도의 변화	598
[그림 3.25] 보령화력발전소 주변 하천 저질의 Fe, Cr, Cu, Pb, Zn, As 등의 측정값	599
[그림 3.26] 서천화력발전소 주변 하천의 수온과 전기전도도의 변화	601
[그림 3.27] 서천화력발전소 주변 하천의 용존산소와 용존산소포화도 변화	601
[그림 3.28] 서천화력발전소 주변 하천의 염분도와 pH의 변화	602
[그림 3.29] 서천화력발전소 주변 하천의 중금속 분석	602
[그림 3.30] 서천화력발전소 주변 하천 퇴적물(저질)의 Al, Fe, As, Cr, Cu, Pb, Zn 측정값 ..	603
[그림 3.31] 붕어 개체들의 평균 전장과 무게 비교 분석	609
[그림 3.32] 중금속 분석 과정	612
[그림 4.1] 생태환경모니터링 실험구 및 대조구 위치	625
[그림 4.2] 지역별 전체 분류군수의 연차별 비교	636
[그림 4.3] 지역별 도시화지수의 연차별 비교	638
[그림 4.4] 지역별 귀화율 연차별 비교	638
[그림 4.5] 지역별, 시기별 채집된 곤충의 종수	641
[그림 4.6] 지역별, 시기별 지표배회성곤충의 종수	642
[그림 4.7] 지역별, 시기별 지표배회성곤충의 개체수	643
[그림 4.8] 지역별, 시기별 지표배회성곤충 군집의 다양도지수	644
[그림 4.9] 지역별, 시기별 천공성 곤충의 종수	645
[그림 4.10] 지역별, 시기별 천공성곤충 군집의 다양도지수	646
[그림 4.11] 2018~2021년까지 채집된 당진조사구 곤충의 목별 종수 구성비	648
[그림 4.12] 2018~2021년까지 채집된 태안조사구 곤충의 목별 종수 구성비	651
[그림 4.13] 2018~2021년까지 채집된 보령조사구 곤충의 목별 종수 구성비	654
[그림 4.14] 2018~2021년까지 채집된 서천조사구 곤충의 목별 종수 구성비	656

[그림 4.15] 서천조사구에서 확인된 애기뿔소똥구리	657
[그림 4.16] 2018~2021년까지 채집된 서산대조구 곤충의 목별 종수 구성비	659
[그림 4.17] 2019~2021년까지 채집된 서천대조구 곤충의 목별 종수 구성비	661
[그림 4.18] 수달 흔적조사	667
[그림 4.19] 무인센서카메라 설치 모습과 설치된 무인센서카메라(Browning BTC-6XD)	668
[그림 4.20] 포획된 땃쥐(좌) 및 등줄쥐(우)	668
[그림 4.21] 태안 화력발전소 인근 CT03 수달 흔적	669
[그림 4.22] 보령 화력발전소 CB02 수달 흔적	669
[그림 4.23] 보령 화력발전소 CB03 수달 흔적	670
[그림 4.24] 태안 화력발전소 CT03 삶 흔적	670
[그림 4.25] 각 지점별 야생동물 상대풍부도 지수 비교	671
[그림 4.26] 화력발전소 인근 야생동물 센서카메라 촬영 사진	675
[그림 4.27] 조사구 포유류 종별 상대풍부도 지수(RAI)	677
[그림 4.28] 대조구 포유류 종별 상대풍부도 지수(RAI) 비교	678
[그림 4.29] 당진 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)	679
[그림 4.30] 태안 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)	680
[그림 4.31] 보령 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)	681
[그림 4.32] 서천 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)	682
[그림 4.33] 서산 대조구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)	683
[그림 4.34] 서천 대조구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)	684
[그림 4.35] 2차년도(2019년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI) 비교	688
[그림 4.36] 3차년도(2020년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI) 비교	688
[그림 4.37] 4차년도(2021년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI) 비교	689
[그림 4.38] 당진조사구 차수별 출현 어종 비교풍부도	703
[그림 4.39] 당진조사구 차수별 출현 어종 비교풍부도	712
[그림 4.40] 보령조사구 차수별 출현 어종 비교풍부도	722
[그림 4.41] 서천조사구 출현 어종 비교풍부도	727
[그림 4.42] 서천화력발전소 주변 사라진 하천 구간(좌측 2016년 / 우측 2020년)	729
[그림 4.43] 서천화력발전소 옆 하천 과거 대륙송사리 채집 위치 (2020년 4월)	730
[그림 4.44] 당진, 보령, 서천, 태안조사구의 출현 어류 종수와 개체수	733
[그림 4.45] 조사구별 연차별 어류 출현 종수	734
[그림 5.1] 주요종(좌) 및 조사지(우) 라벨 표시 방법	740
[그림 5.2] 모니터링의 조사(좌) 및 지점 3의 장구밥나무 수목 라벨 표시(우)	742
[그림 5.3] 지점 1의 수리딸기 지하경 번식	744

[그림 5.4] 보령-지점 2, 3의 병꽃나무(좌)와 수리딸기(우)의 생육상태	745
[그림 5.5] 검노린재나무 표시 및 생육상태	747
[그림 5.6] 사람주나무 모니터링 현장 조사(좌)와 대상종 생육상태(우)	749
[그림 5.7] 사람주나무 생육상태(좌)와 수리딸기 대상종 표시(우)	751
[그림 5.8] 당진 1(고란초), 당진 2(장구밥나무)의 대상종 수 연차별 비교	753
[그림 5.9] 고란초와 장구밥나무 층별 분포 연차별 비교	754
[그림 5.10] 수리딸기와 팽팽나무 대상종 수 연차별 비교	756
[그림 5.11] 수리딸기와 팽팽나무 층별분포 연차별 비교	756
[그림 5.12] 병꽃나무와 수리딸기 대상종 수 연차별 비교	758
[그림 5.13] 병꽃나무와 수리딸기 층별분포 연차별 비교	759
[그림 5.14] 검노린재나무와 예덕나무 대상종 수 연차별 비교	761
[그림 5.15] 검노린재나무와 예덕나무 층별분포 연차별 비교	761
[그림 5.16] 사람주나무와 소사나무 대상종 수 연차별 비교	763
[그림 5.17] 사람주나무와 소사나무 층별분포 연차별 비교	764
[그림 5.18] 검노린재나무와 수리딸기 대상종 수 연차별 비교	766
[그림 5.19] 검노린재나무와 수리딸기 층별분포 연차별 비교	767
[그림 5.20] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(당진조사구)	772
[그림 5.21] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(태안조사구)	774
[그림 5.22] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(보령조사구)	776
[그림 5.23] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(서천조사구)	778
[그림 5.24] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(서산 팔봉산 대조구)	780
[그림 5.25] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(서천 희리산 대조구)	782
[그림 5.26] MEDIAN(1)&KRUSKAL_WALLIS(2) 쌍대검정 결과	784
[그림 5.27] 멸종위기야생생물 주요종 모니터링 센서카메라(5대) 설치 지점	786
[그림 5.28] CT03 지점에서 촬영된 수달 가족(3개체)	789
[그림 5.29] CT03 지점에서 촬영된 삶	790
[그림 5.30] CB02 지점에서 촬영된 수달 가족(3개체)	791
[그림 5.31] CB03 지점에서 촬영된 수달 가족(3개체)	792
[그림 5.32] CB03 지점에서 촬영된 조류를 사냥한 삶(1개체)	793
[그림 5.33] CD03 지점에서 촬영된 삶	794
[그림 5.34] 2차년도(2020) 수달 월별 상대풍부도 지수(RAI)	795
[그림 5.35] 3차년도(2021) 수달 월별 상대풍부도 지수(RAI)	796
[그림 5.36] 1차년도(2019) 삶 월별 상대풍부도 지수(RAI)	797
[그림 5.37] 2차년도(2020) 삶 월별 상대풍부도 지수(RAI)	798

[그림 5.38] 3차년도(2021) 삶 월별 상대풍부도 지수(RAI)	798
[그림 5.39] 내성종인 붕어(<i>C. auratus</i> / 좌)와 송사리(<i>O. latipes</i> / 우)의 사진	802
[그림 5.40] 당진 조사구 붕어 length-weight relationship과 condition factor 분석	803
[그림 5.41] 당진 조사구 송사리 length-weight relationship과 condition factor 분석	804
[그림 5.42] 태안 조사구 송사리 1차와 2차 조사 성장도와 비만도 분석	805
[그림 5.43] 태안 조사구 붕어 1차 조사 성장도와 비만도 분석	805
[그림 5.44] 보령 조사구 붕어 성장도와 비만도 분석	807
[그림 5.45] 보령 조사구 송사리 성장도와 비만도 분석	808
[그림 5.46] 서천 조사구 붕어의 성장도와 비만도 분석	809
[그림 6.1] 산물을 이용해 제작된 우드칩 및 우드펠릿	827
[그림 6.2] 최근 5년간 연도별 우드펠릿 생산량	828
[그림 6.3] 부여군 황포천 생태하천 복원사업(출처: 환경부) 사례	832

Part 0

연구 종합



제1장 서론

1. 연구배경 및 목적

2. 연구의 범위 및 추진일정

1. 연구배경 및 목적

- 4차년도 연구를 진행하면서 본 연구용역의 배경 및 필요성은 충분히 인식을 하고 있으며, 기획연구(충청남도, 2016년)를 시작으로 약 6년간 진행된 연구용역 과정에서 본 연구용역 내용 및 방향에 대해 매년 검토하고 재설정함에 따라 4차년도에는 초심으로 돌아가 기획연구에서 제시하고 있는 연구의 배경과 필요성에 대해 재검토 함
- 기획연구의 배경 및 목적에서는 ‘화력발전소 주변 기후환경 조사평가 연구’에 대한 중장기 로드맵 마련을 명시하고 있으며, ‘객관성이 확보된 기후환경 분야 주민건강영향 조사방법 등 제시’를 최종목표로 제시하고 있음
- 기획연구를 통해 제시한 본 연구용역의 주요 성과는 다음을 제시하고 있음(주민건강영향 조사는 별도 연구용역으로 추진중이므로 제외함)
 - 측정망 운영 → 통합정보센터
 - 기후환경평가 시스템
 - 사회적 피해비용 산정
 - 미기후 모니터링 및 생태모니터링(기후변화 취약종, 지표종 변화 모니터링)
 - 주변 지역 전통지식 조사·DB화(2차년도 검토 결과 과업 제외)
 - 기후환경 생태모니터링 DB 구축
 - 거버넌스 구축 및 연구결과 환류
 - 법제도 분석(기준 배출량 강화 방안 마련)(1차년도 수행 완료)
- 기획연구와 1차년도 연구보고서를 바탕으로 본 연구용역의 배경과 필요성은 ① 과학적 질문, ② 지역주민 요구, ③ 정책의 필요성으로 구분하여 검토가 가능함
 - ① 과학적 질문 : 화력발전소의 영향에 대한 과학적 궁금증을 해결하기 위한 질문으로 연구 이전 충남지역 화력발전소를 대상으로 진행되지 않았던 과학적 실증자료 축적과 분석 등이 필요함
 - ② 지역주민 요구 : 오랜 기간 지역주민들이 화력발전소로 인한 피해에 대한 우려를 제기하고, 이러한 우려를 불식시키기 위해 화력발전소와 국가, 지자체에 요구한 사항으로 건강영향이나 피해비용 등의 필요성이 제기됨

- ③ 정책의 필요성 : 충청남도과 화력발전소 소재 시·군은 지역주민의 요구를 인식하고 이를 해결하기 위한 다양한 정책 추진과 성과에 더하여 정책수요자의 요구에 대응하기 위한 기초자료(대기측정소 등)와 신규정책 등이 필요함
- 연구의 최종 목표(목적) : 화력발전소 주변지역 환경복지 구현을 위한 기후환경변화 과학적 실증자료 구축
- 4차년도 주요 목표 : 기후환경정보확대와 내외부 기여도 평가

2. 연구의 범위 및 추진일정

- 시간적 범위는 2020년 12월 ~ 2021년 12월(5년차 중 4차년도)이며, 공간적 범위는 화력발전시설 및 그 주변지역을 중심으로 충청남도 전역을 고려함
- 내용적 범위
 - 화력발전소(시설) 주변지역 정보구축
 - 대기측정(고정측정망 운영) 및 모델링
 - 미기후 모니터링 및 DB 시스템 구축
 - 지역 거버넌스 구축
 - 대기질 측정 및 배출량 분석
 - 생태환경 모니터링
 - 화력발전 피해비용 농도반응함수 개발 기초조사
 - 연구 활용과 홍보, 발전방안 모색
- 4차년도 연구용역은 3년간 연구결과를 종합검토하고 5차년도 최종연구결과물 품질제고와 활용성 확대를 위해 충청남도 주도로 연구용역 자문단을 운영하였으며, 착수계가 제출된 일정을 기반으로 자문단의 역할을 확대할 수 있도록 일정을 운영함



제2장 주요 연구결과

1. 대기환경정보 구축
2. 대기질 측정분석
3. 사회적비용 평가
4. 생태환경모니터링

1. 대기환경정보구축

1.1. 화력발전소 대기오염배출량 조사

- 본 과제는 지역주민의 의견을 수렴하여 연구에 반영하고 있으며, 주민설명회, 심층 인터뷰 과정에서 지역 화력발전소로부터 대기오염물질 배출 추이에 대한 정보공유 의견이 다수 접수되어 최근 충남지역 화력발전소 대기오염물질 배출량을 조사함
- 국가대기오염물질 배출량인 대기정책지원시스템(CAPSS)은 부문별 배출량 구분을 에너지 산업 연소, 비산업 연소, 제조업 연소, 생산공정, 도로이동오염원, 농업, 비산먼지, 생물성 연소 등 13개 부문으로 구분하고 있어 화력발전소 배출량을 직접 확인할 수 없고, 시·군별 에너지산업 연소 중 배출원 중분류의 공공발전 시설, 배출원 소분류 1,2,3종(보일러) 중 연료가 유연탄인 경우 충청남도에서는 대부분 화력발전소의 배출량으로 추정할 수 있어 연도별, 지역별 물질별 배출량을 분석함
 - 현재 가동이 중단된 서천지역을 제외한 당진, 보령, 태안 지역의 대기오염물질 배출량 감축률(2014년 대비)이 보령 40.2%, 태안 38.6%, 당진 27.4%로 나타남
- 환경부(한국환경공단)에서는 미세먼지 배출사업장 중 화력발전소를 포함한 대형사업장에서 실시간으로 측정하는 굴뚝자동측정기기의 측정값(먼지(TSP), 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 염화수소(HCl), 불화수소(HF), 암모니아(NH₃), 일산화탄소(CO))을 공개하고 있으며, 2015년~2019년 충남지역 화력발전소 배출량을 조사 분석함
 - 2019년 기준 충청남도 TMS 분석 결과 총배출량 58,755천톤 중 발전3사의 배출량은 31,476천톤으로 53.6%(당진 24.6%, 태안 19.4%, 보령 22.0%)를 차지하고 있으며, 2015년 기준(122,470천톤) 대비 2019년 52.0%(63,695천톤)을 감축함
 - 현재 가동 중단된 서천화력을 제외하고 보령화력(신보령 포함, 2017년 가동개시)은 2015년(31,916천톤)대비 2019년 63.8%(20,368천톤), 태안화력 2015년(35,320천톤) 대비 2019년 63.8%(24,528천톤), 당진화력 2015년(22,877천톤)대비 2019년 63.8%(13,740천톤)을 각각 감축함

1.2. 미기후 모니터링

- 1차년도부터 지속적으로 측정지점을 확대하여 화력발전소를 중심으로 반경 2 km 이내, 5 km 부근, 10 km 이상으로 해안(Coast)과 내륙(Land)지점을 구분하였고, 각 발전소 별로 6개 지점씩 선정 운영하였으며, 추가로 대조군인 나대지 지점 각 1개소, 4세부 생태모니터링 결과와의 연계 분석을 위한 산림조사지점 각 1개소까지 총 32개소 지점을 운영하고 있음
- 측정기간 동안 모니터링 자료를 분석한 결과 온도는 보령, 당진, 서천, 태안 순으로 각각 $13.3\pm 8.5^{\circ}\text{C}$, $13.5\pm 8.7^{\circ}\text{C}$, $13.8\pm 8.5^{\circ}\text{C}$, $13.5\pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 서천이 $13.8\pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났으며, 습도의 경우 각각 $77.3\pm 9.9^{\circ}\text{C}$, $75.7\pm 9.6^{\circ}\text{C}$, $79.1\pm 10.8^{\circ}\text{C}$, $75.7\pm 10.1^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 서천이 $79.1\pm 10.8^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타남
- 극한기후 분석결과 2021년 기준 폭염 일수는 태안에서 63회로 가장 많이 관찰되었고, 보령 48회, 당진 14회, 서천 15회이며, 최대온도와 최저온도의 온도차는 내륙 (62.4°C) 이 해안(58.8°C) 보다 크게 나타나 비열차이로 판단됨
- 4차년 부터는 기후변화 원인물질인 CO_2 를 발전소별 2기(발전소 인근과 원거리)를 설치 운영 중에 있음

1.3. 고정측정망 운영

- 본 연구용역에서는 2기(대난지도 : 당진화력 배경농도 분석, 청라면 : 보령화력 이격거리 별 실시간 변화분석)의 고정측정망을 운영 중에 있음
- 3차년도와 유사하게 거리별 대기오염물질의 농도 변화를 확인할 수 있었으며, 4차년도에는 인근 국가측정망과 마을대기측정망과의 상관분석을 실시하였으며, 분석결과 $\text{PM}_{2.5}$ (당진시청사 ↔ 송산면), NO_2 (당진시청사 ↔ 성상) 사이의 상관관계수가 0.943으로 가장 높게 나타났고, NO_2 (성상 ↔ 금천) 0.940, PM_{10} (당진시청사 ↔ 송산면) 0.916 등으로 높은 상관성을 보임($P < 0.05$)

1.4. 정보 DB 시스템 구축 및 모델링 지원

- ‘화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구’ 에서 도출된 기후환경정보를 제공할 수 있는 정보시스템을 구축하고, 동위원소 분석지원을 위한 트라젝토리 모델링 분석과 정보 DB 시스템 발전방향에 대해 검토함
- 시스템 DB를 설계하고 구축하였으며, 화면설계 등을 거쳐 서비스 시스템을 구축하였으며, 5차년도에는 구축된 정보 DB 시스템을 충청남도에서 기 구축한 ‘충남형 빅데이터 허브 플랫폼’ 연계를 고려하여 추진할 예정임
- 동위원소 분석결과 수치해석 지원을 위해 트라젝토리 모델을 운영했으며, 운영결과는 다음 표와 같음

[트라젝토리 모델 운영 결과 요약]

지역	모델시작	장거리	중거리	단거리	특징
보령	19.11.04.	NW	NW	NW	급격한 고도변화
	20.01.15.	NW	NW	N	완만한 고도변화
	20.04.22.	NE	N	E	경로에 따른 고도변화폭 큼
	20.08.18.	SE	SW	SW	저고도 이동
	20.11.11.	NW	N→S	E→NE	중거리 고도상승 후 완만한 이동
	21.01.13.	NW	SW	S	중거리 이후 저고도 이동
당진	19.10.29.	W	NW	N	중거리 이후 급격한 고도변화
	20.01.09.	NE(NW)	N	N	중거리 이후 저고도 유지
	20.04.13.	NE	NW	W	저고도 이동
	20.08.24.	SW	S	SE	저고도 이동
	20.11.23.	NW	E	SE	완만한 고도변화
	21.01.25.	NW	N	E→W	중거리 이후 저고도 유지
서천	19.11.06.	NW	N	N	완만한 고도변화
	20.01.19.	W	NW	NW	중거리 고도 유지
	20.04.27.	N	W	SW	중거리 이후 저고도 유지
	20.07.15.	-	NW	NE	저고도 완만한 고도 변화
	20.11.09.	N	W	SW	완만한 고도변화
	21.01.11.	-	NW	NE	저고도 완만한 고도 변화
태안	19.10.30.	NW	NW	N	완만한 고도변화
	20.01.13.	NW	N	NW	중거리 고도상승 후 완만한 고도변화
	20.04.27.	NW	SW	SW	중거리 까지 급격한 고도변화
	20.08.31.	E	SE	SE	단거리 고도 유지 후 급격한 변화
	20.11.24.	NW	NW	N	완만한 고도변화
	21.01.19.	NW	N	E→S	고도변화 진동

1.5. 생활권 대기질 정보 제공

- 4차년도에도 화력발전소 주변 8개면 119개 마을에 마을별 생활권 대기질 정보를 개발된 시스템을 통해 실시간으로 제공하였으며, 대기환경기준 초과현황을 분석하여 우편으로 제공함. 정보 제공결과를 요약하면 다음과 같음
 - PM10, NO2, SO2의 초과사례는 발생하지 않았으나, 태안군 포지2리가 PM10 기준 초과일수 11일이 발생함
 - 지역별 O3 배출허용 초과사례 다수 발생
 - (1) 보령 : 은포2리(32회), 은포3리(38), 송학2리(38) 등
 - (2) 당진 : 용두1리(221회), 슬항2리(133), 슬항1리(103), 대춘1리(100), 장항1리(87) 등
 - (3) 서천 : 구복리(251회), 다사리(221), 선도1리(143), 장포1리(67) 등
 - (4) 태안 : 양산1리(131회), 양산2리(36), 신두2리(35) 등
 - 오존 초과사례가 지속적으로 다수 발생함에 따라 화력발전소 주변지역 오존관리 및 노출 최소화 정책 추진이 필요함에 따라 별도로 신규정책을 제안함

1.6. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 3차년도에 이어 4차년도에도 발전소 주변 4개 지점(지역주민 요구로 보령 2개, 서천 1개 지점 변경)에 대해 유기탄소와 납 안정동위원소비, 중금속 분석을 실시하여 지역 대기오염물질의 기원을 파악하기 위한 라이브러리 구축을 진행함
 - ※ 3차년도와 마찬가지로 분석기관의 분석일정 지연으로 2차시료 결과까지만 보고서에 수록함
- 대도시료 분석결과 유기탄소 안정동위원소비는 서천군(-23.2‰) > 태안군(-24.0‰) > 당진시(-24.8‰) > 보령시(-25.2‰) 순으로 고농도로 분포하였으며, 석탄, 비철금속 제련에 의한 오염원 추적자로 주로 활용되는 납 안정동위원소비의 경향성은 3차년도와 유사하게 서로 상이하나, 지역별 특이점은 없었고, 대기 중 중금속 분석결과 지역별 상대적 고농도 성분을 제시함

- 2차년도부터 분석이 진행된 당진시 탄소안정동위원소에 대한 라이브러리는 2021년 3월 한국콘텐츠학회 논문지(KCI 등재)를 통해 발표함
 - ※ 2차년도부터 지속적으로 구축해온 대기 중 유기탄소와 납 안정동위원소비 분석결과를 종합하면 충청남도 화력발전소 주변지역 라이브러리 구축이 가능하며, 이는 4차년도 겨울철 시료(2022년 6월 예정)까지 분석이 완료된 후 5차년도 중 공식적으로 발표가 가능함
- 2020년 시료(3차년도 분석되지 않은 봄철, 여름철 분석결과 포함)에 대해 납 안정동위원소비 라이브러리를 시범적으로 구축한 결과 국내외 라이브러리와 결과 분포도를 매칭하면 국외 라이브러리 기원은 중국 상해, Beishan, Wafanggou, Guanmenshan, Jiashenpan, Binggou, Lugou 등으로 추정할 수 있으며, 국내 라이브러리 기원은 석탄 발전시설내 유연+무연탄과 비산+바닥재, 제철산업단지로 추정할 수 있었음
- 충청남도 화력발전소 주변지역 라이브러리 구축이 완료되면, 관심있는 지역의 시료를 분석하여 충청남도 라이브러리와 비교를 통해 기원에 포함될지 여부를 판단할 수 있으며, 4차년도에는 화력발전소 굴뚝시료와 비산먼지(재)에 대한 분석을 실시하여 비교·분석할 예정이었으나, 라이브러리 확정이 미뤄짐에 따라 분석결과에 대해서만 제시하고 비교·분석은 라이브러리 확정 이후 인 5차년도 중 가능할 것으로 판단되며, 또한, 대기, 강우에 대한 라이브러리 구축이 완료되면 각 시료간 비교분석도 가능함
- 대기모델에 의한 외부 기여율 평가를 위해 충청남도를 중심으로 거리별, 방향별 구역을 설정하고 구역별 기여율을 분석하였으며, 분석결과 주 영향 방향은 북서쪽으로 여름철을 제외한 모든 계절에서 영향 큰 것으로 나타나며, 영향거리는 250 km 이내에서 1.6%, 250~750 km에서 20.0%, 750~1,500 km에서 45.4%, 1,500 km 이상에서 33.1%로 나타나 750~1500 km에서 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타남

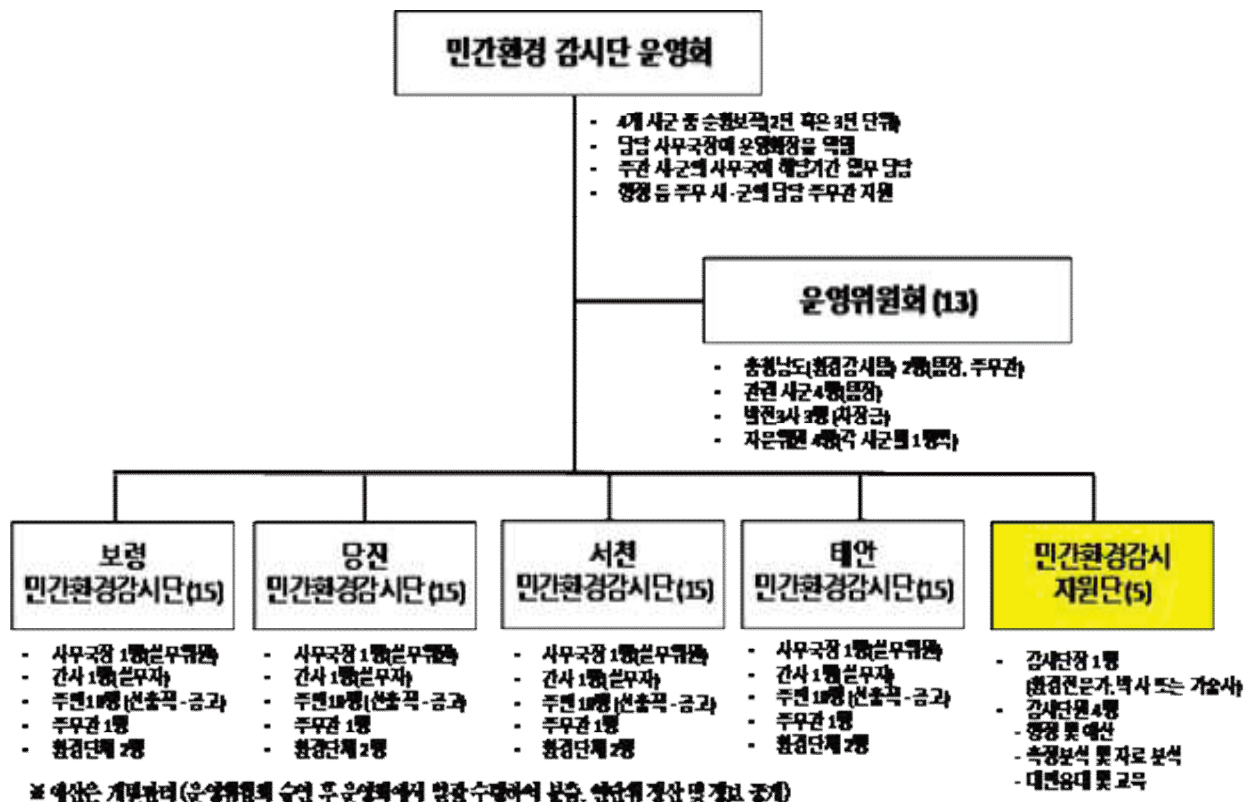
[충남지역 외부 기여율 모델 결과]

계절 구역	1차 '19년 가을	2차 '20년 겨울	3차 '20년 봄	4차 '20년 여름	5차 '20년 가을	6차 '21년 겨울	비고
N1	1.7						서울,경기
N2	3.8					19.9	지린
N3	21.2	38.5	18.4			5.6	헤이룽장
N4		4.8					다싱안링
NE1							충북,강원
NE2							동해
NE3			13.2	9.1			블라디보스도 크
NE4							-
NW1							인천, 서해
NW2	14.6						랴오닝
NW3	54.2	13.2			22.2	8.7	내몽골
NW4		38.8	23.6		68.4	25.6	몽골
E1							경북
E2				22.9			시마네
E3				14.1			히로시마
E4							태평양
W1	4.5						서해
W2			15.3	11.5	9.4		산둥성
W3		4.7	7.0				산시성
W4			1.4			35.7	닝샤후이족
S1							전북,전남
S2						1.5	남해
S3				25.0			-
S4							-
SE1						3.1	경남
SE2							후쿠오카
SE3				17.5			미야자키
SE4							-
SW1							서남해
SW2			21.1				장쑤성
SW3							-
SW4							-

- 용역 자문단 의견을 반영하여 5차년도 기여도(기여농도)를 위해 Brute-Force Method(BFM)를 적용하는 것으로 확정하고 이를 위해 기구축된 대기모델링을 업데이트함

1.7. 거버넌스 및 환류체계 구축

- 4차년도에는 통합 거버넌스 제안을 위해 실무자 협의를 진행하고 민간환경감시단 운영현황 조사와 실무자 면담 및 설문지를 거쳐 통합 민간환경감시단을 제안함
- 제안한 (안) 중 지역별 민간감시단을 지원하는 전문가 지원단을 운영하는 방안을 선호하는 것으로 나타남

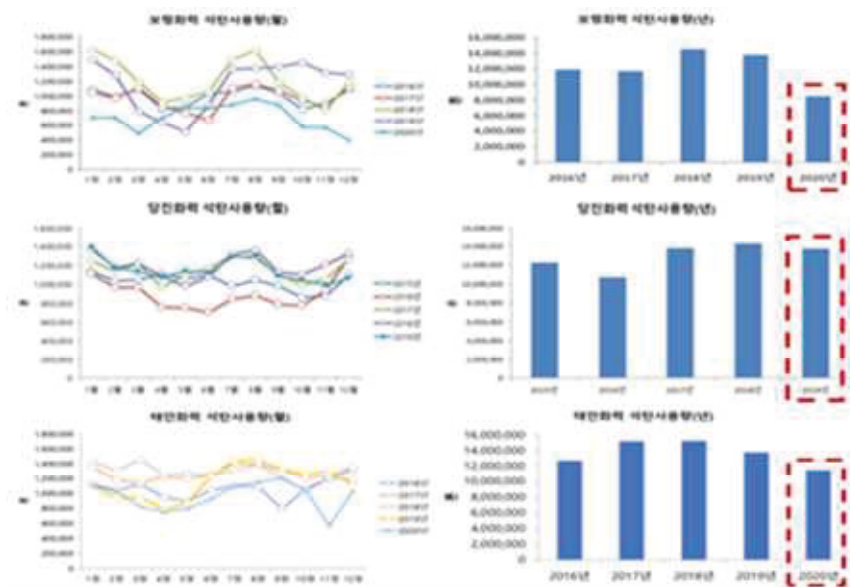


[통합 민간환경감시단 운영안 (2안)]

2. 대기질 측정분석

2.1. 화력발전소 현황분석

- 전력 소비가 많은 여름철과 겨울철에 석탄 사용량도 같이 증가하는 계절적 특성
- 석탄 사용량은 2018년 이후 전반적으로 감소하는 추세임

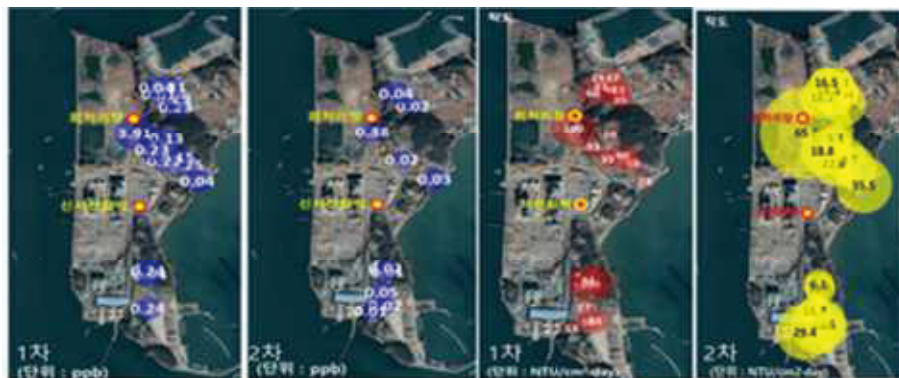


[발전사별 석탄사용량 비교]

- 대부분 발전소의 대기오염물질 배출량은 계속 감소하는 추세를 보임. 이는 그동안의 정부와 충청남도의 탈석탄 정책과 주민과 지역의 화력발전소 대기오염에 대한 경각심과 저감 노력, 그리고 발전소의 봄철 고농도 시기 가동정지와 17년~18년 발전설비 성능개선 등의 노력이 맞물려 얻은 성과라 판단됨
- 그러나, 여전히 충남지역의 대기오염물질별 배출량은 전국 상위권을 유지하고 있으며 저탄장이나 회처리장의 비산먼지를 비롯한 대기오염물질 배출량은 과소 또는 무시되는 상황에서 이를 객관적으로 평가하고 지역주민의 참여하에 과학적인 방법으로 소통하고 대응하는 노력이 지속적으로 이루어져야 할 것임

2.2. 화력발전소 주변지역의 지표 대기오염물질 조사

- 신서천화력 인접 지역 20개 지점을 대상으로 지역주민이 원하는 장소에서 주민의 참여하에 간이측정기 및 광산란법 측정기를 이용하여 지표 대기오염물질 조사를 수행
- 아황산가스(SO_2)와 비산먼지의 경우 발전소 내부와 최인접 지역이 상대적으로 높아 발전소와 회처리장을 중심으로 확산해 가는 양상을 확인할 수 있었으며, 특히 기상 상황에 따라 고농도 상황이 발생하는 현상도 확인할 수 있었음
- 앞으로도 지역협의체 등을 통하여 높은 공간해상도를 확보할 수 있고 주민이 직접 참여할 수 있는 비용-효과적인 다양한 측정 방법을 활용하도록 하여 지역 대기오염 실태를 공유하고 저감 방안에 대해 같이 소통하는 노력에 기여할 수 있음



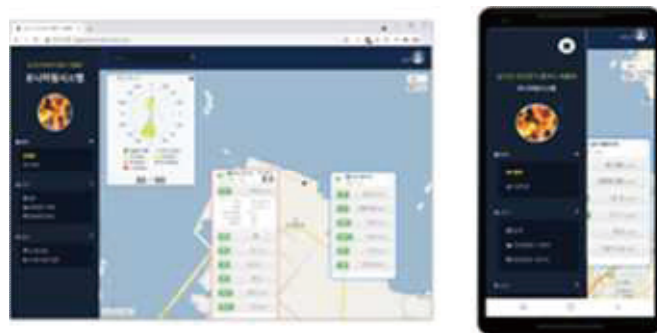
[SO_2 및 탁도 측정 회차별 공간분포도]



[TSP 및 미세먼지 측정 회차별 공간분포도]

2.3. 시스템 개발 및 테스트베드 운영

- 회처리장으로부터의 비산먼지 배출량을 측정하기 위해 현장에서 측정한 자료를 수집하여 실시간 무선으로 전송하는 기술을 접목함. 현장으로부터 받은 실시간 3차원 기상자료와 미세먼지 측정자료를 이용하여 배출량을 산정하고, 결과들을 PC나 App에 표출하는 프로그램을 개발함
- 제작이 완료된 측정기를 건물 내부에서 테스트베드 운영을 통하여 정상 가동을 확인한 후 상·중·하단 기상 측정장비를 건물 외부에 설치하여 회처리장 현장설치 전 실시간 데이터가 모두 정상적으로 수집되는 것을 확인함
- 이를 통해 시간과 장소에 구애받지 않고 실시간으로 Flux 배출량을 확인하여 고농도 발생 시 행정이나 주민에 알려 주거나 발전사에 통보하여 작업 중지 및 살수제어 장치와 연계해 비산먼지 발생을 능동적으로 제어하는데 기여할 수 있도록 함



[웹, 모바일 기반 실시간 Flux 배출량 모니터링 시스템]



[건물 외부 최종 테스트베드 운영]

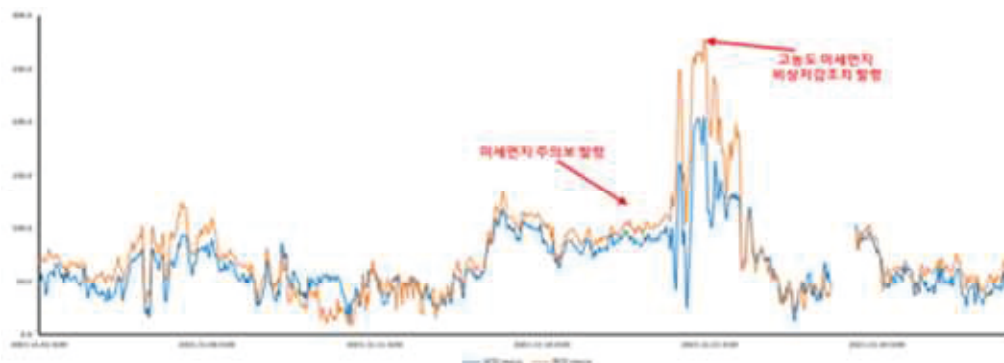
2.4. 다양한 상황에서의 실시간 회처리장 시설 배출량 산정 결과 및 해석

- 실시간 회처리장 Flux 배출량 평가를 위해 당진화력 (2021년 9월)과 신서천화력 (2021년 10월)에 배출량 측정장비를 설치하여 운영하였음



[회처리장 Flux 배출량 조사 모식도]

- 실시간 비산먼지 배출량 평가 기간 중 11월 20일 중국 발 미세먼지의 영향으로 측정기기의 상·하단 미세먼지 농도와 배출량도 높게 나타남을 확인함
- 11월 21일 비상저감조치 발령일 전후의 실시간으로 변화하는 PM₁₀ 배출량 변화를 비교 확인할 수 있는 등 회처리장 주변의 비산먼지 영향에 대한 실시간 변화와 대책 이행에 따른 저감 효과 분석 등이 가능함을 확인함



[비상저감조치 발령일의 서천 회처리장 상·하단 미세먼지 농도 Flux 배출량]

2.5. 실시간 비산먼지 조기경보 시스템을 활용한 과학적 회처리장 관리방안

- 회처리장의 실시간 배출량 측정결과, 기존에 저탄장이나 회처리장 주변의 민원에서도 나타나듯이 풍속이 강해지면서 미세먼지 농도는 낮아지나 비산먼지 배출량은 강한 바람에 의해 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과가 본 연구에서 수행한 비산먼지 실시간 측정의 중요성과 초단기적인 대응의 필요성을 방증하는 결과라 할 수 있음



[풍속에 따른 비산먼지 배출량과 미세먼지 농도 비교]

- 실시간 비산먼지 배출량 모니터링시스템을 통해 배출량과 미세먼지 농도에 대해 보통, 주의 경고 등의 상황을 정보단계 시스템으로 확인할 수 있으며, 이러한 결과를 기반으로 고농도 미세먼지 상황 발생 시 능동적 제어와 같은 회처리장 관리방안과 조기경보 시스템 활용으로 발전소 인근지역 주민의 피해 최소화 가능
- 각 발전소별로 시행 중인 회처리장에 대한 비산먼지 관리 방안은 정해진 시간대의 살수 설비 가동과 단편적인 방안으로 실시간 측정된 배출량을 고려하지 않는 상황에서 관리되고 있음
- 발전사는 실시간 배출량 모니터링시스템을 활용하여 회처리장 관리방안과 선택적 운영을 통한 비용 절감 등 주변 지역의 피해 영향을 빠르게 대처하고 최소화할 수 있으며 주민들은 고농도 미세먼지 상황 발생 시 조기 경보제를 통해 외출 자제 및 농작물 피해 예고 등의 정보를 받아 피해를 최소화할 수 있다. 나아가 면오염원(저탄장, 회처리장 등) 배출원별 실측 배출계수를 산정하여 실효성 높은 저감 대책 마련 및 비산먼지 피해 규모 해석에 활용 가능하며 정책 자료의 근거를 마련할 수 있음



[미세먼지 조기경보 시스템 활용 모식도]



[회처리장 관리방안 모식도]

- ‘측정 없이 개선 없다’ 는 말처럼, 회처리장의 비산먼지 플렉스 배출량 모니터링시스템에서 실시간으로 산정한 결과를 기반으로 회처리장의 작업으로 인한 고농도 비산먼지 발생 시 다양한 비산먼지 저감 기술을 능동적으로 투입해 향후 비산먼지로 인한 주변지역 영향을 저감할 수 있는 노력에 기여함

3. 사회적비용 평가

3.1. 개요

- 차년도 농도반응함수 도출 및 피해비용 분석을 위해 보건의료데이터 조사, 농도반응함수 도출 방법론 분석, 피해비용 분석 범위 설정을 수행하였음
 - (보건의료데이터 조사) 인구집단의 건강영향을 측정할 수 있는 보건의료데이터 현황을 검토하고 농도반응함수도출에 활용 가능한 데이터로 건강보험데이터를 선정하였으며 데이터의 제공 범위 및 수집 방법을 조사함
 - 농도반응함수 도출 방법론 분석: 대기오염농도와 건강영향 간 관계를 평가하기 위한 분석방법론 검토 및 적용 방법론 설정, 국내외 선행사례를 고찰함
 - 피해비용 분석 범위 설정: 석탄화력발전 대기오염 영향 중 피해비용을 합리적으로 주장할 수 있는 평가 범위를 설정함

3.2. 보건의료 데이터 분석

- 인구집단의 건강위험을 나타내는 지표로 사망률, 유병률, 발생률 등을 검토하고 각 지표와 연계하여 가용한 국내 보건의료데이터를 조사하였음
- 최종적으로 연구목적을 고려하여 대상자 수가 많으며, 질병정보를 다양하게 포함하는 사망원인 통계 및 건강보험 청구 데이터를 분석 대상 데이터로 결정하고 데이터 수집을 위한 제반 절차를 수행하였음
 - 통계청 사망원인통계는 매 일별 사망건수를 원인별, 시군구별로 제공함에 따라 사망률 등으로 변환하여 대기오염의 단기 및 장기영향 분석에 모두 활용할 수 있음
 - 건강보험청구 데이터는 전국민¹⁾을 대상으로 수집되기 때문에 데이터건수가 충분하며, 주 질병뿐만 아니라 부상병, 치료 비용, 내원일수 등 피해비용 평가에 활용 가능한 다양한 정보를 확인할 수 있다는 장점이 있음

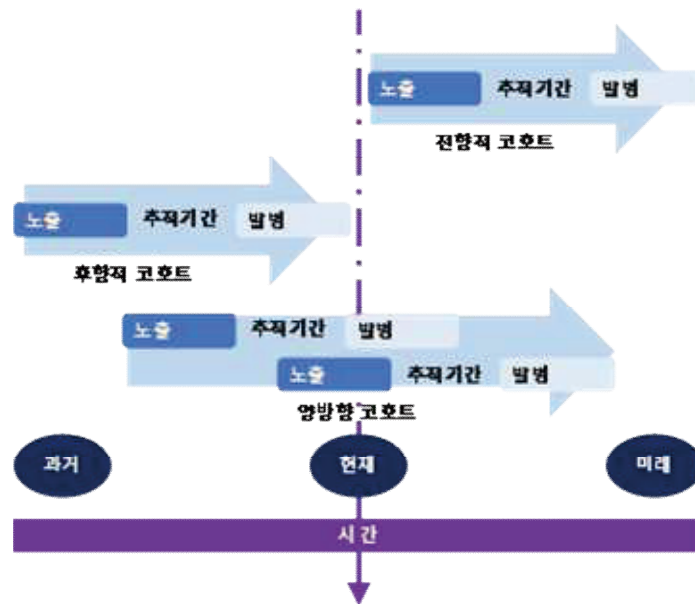
1) 2020년 기준 전체 인구 51,829,023명 (행정안전부), 건강보험적용인구 51,344,938명 (건강보험통계연보)으로 전체인구의 99.07%를 차지함.

영역	국내 통계	대상	발표주기	시간단위	공간단위	가용성 검토
사망률	통계청 사망원인 통계	전체 사망건수	매년 당해연도 8월~익년 4월까지 신고 집계하여 9월 발표	월별	시군구	사용가능
유병률	질병관리본부 국민건강영양통계 중 만성질환 유병률(고혈압, 당뇨, 고중성지방혈증, 고콜레스테롤혈증, 폐쇄성 폐질환)	1만여 가구 표본조사	8년	연별	시군구	불가. 질병진단 코드가 없고, 질병 종류가 제한적
	한국보건사회연구원 의료패널 중 만성질환 유병률(고혈압, 당뇨, 심뇌혈관, 만성하기도질환, 암)	8500가구 표본조사	매년 조사년도 익년 12월	연별	시군구(추정)	불가.
발생률	질병관리본부 법정감염병 발생보고	전체 발생건수	매년 작성년도 익년 6월	연별	시군구	불가. 법정 감염병만 제공
	고용노동부 업무상질병 발생현황	전체 발생건수	분기	월별	전국	불가. 관련성 낮음
	질병관리본부 암등록통계	전체 발생건수	매년 작성년도 익년 12월	연별	시도	불가. 암별 데이터 미제공(시계열 분석 불가)
입원/외래 건수	건강보험심사평가원 국민관심질병통계	건강보험청구건	매년	연별	전국	불가. 지역별 구분 미제공
	건강보험공단 빅데이터	건강보험 청구건	수시	월별	시군구	사용가능
	건강보험심사평가원 빅데이터	건강보험 청구건	수시	월별	시군구	사용가능
응급실 이용건수	응급의료현황통계	전체 발생건수	매년 작성년도 익년 12월	연별	시도	불가. 뇌출혈, 뇌경색등으로 질병 종류 제한적

[보건의료 데이터 비교]

3.3. 농도반응함수도출 방법론

- 활용 가능한 보건 의료데이터 현황, 연구 목적과의 적합성, 연구설계별 인과관계 입증 타당성 등을 고려하여 본 연구에서는 장기노출과 건강 간의 관계를 확인하기 위해 코호트 연구, 그중에서도 후향적 코호트 연구를 설계하였음
- 코호트 연구는 연구 설계 단계에서 위험 요인에 노출된 집단과 노출되지 않은(또는 노출 수준이 낮은) 집단을 모집하고 미래 사건 발생여부를 추적하는 연구임
 - － 연구 설계 단계에서 연구 참여자를 모집하여 추적하는 것이 아니라, 이미 구축되어있는 과거 자료(사망원인통계 및 건강보험 데이터)를 이용하는 후향적 코호트를 적용할 예정임
 - － 통계분석 기법으로 장기노출 영향을 파악하기 위한 대표적인 준모수적 생존분석 방법인 콕스비례위험모형을 사용할 예정임



[코호트 연구 설계]



[후향적 코호트 연구 모식도]

- 대기오염물질의 장기노출 영향과 건강 간의 관계를 추정한 국내외 학술논문 검토를 통해 본 연구 분석모형의 방향을 수립하였음
- 특히 대기오염물질 외 영향을 미치는 교란변수들을 세부 질병별로 조사·수집하였으며, 추후 실제 통계분석 과정에서 함께 고려함으로써 발생할 수 있는 편향을 줄이고자 함

변수명	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
연령													
성별													
교육수준													
종교													
고혈압 hypertension													
당뇨 diabetes													
이상지질혈증 dyslipidemia													
만성신부전 chronic renal failure													
말기신부전 end-stage renal disease													
뇌혈관 질환 CVD													
말초혈관 질환 peripheral arterial disease													
심장폐쇄성질환 COPD													
악성종양 malignant cancer													
고지혈증 hyperlipidemia													
고콜레스테롤혈증 hypercholesterolemia													
부정맥 arrhythmia													
천식 asthma													
관상맥류 심장병 CHD													
심장질환 heart disease													
심혈관 질환 cardiovascular													
뇌졸중													
심근경색 MI													
심근경색 기록력													
흡연													
술주													
운동													
운동량													
체중감소													
중금속 노출													
거주지역													
도시화 수준													
인구밀도													
환경질 정도													
고령인구 비율													
노년자 비율													
여성자 비율													
소수민족 비율													
노년 비율													
고령인구 비율													
고령자 비율													
종교 비율													
종교													
종교별 대역													
종교													
종교 비율													

[선행연구 교란변수(confounder) 자료 구축]

3.4. 피해비용 분석 범위

- 피해비용 분석 범위 설정범위 설정은 지역자원시설세와의 비교라는 연구목적에 대한 부합성, 신뢰도 높은 선행사례의 케이스를 바탕으로 한 평가범위 설정의 타당성, 그리고 본 연구에서 활용 가능한 데이터 가용성을 고려하여 이루어졌음
 - 분석대상 건강영향이 많아질수록 피해비용이 커지지만 피해비용 결과에 대한 합리성을 주장하기 어렵고, 건강영향 범위를 최소화할수록 실제 주변지역이 겪고 있는 피해수준을 평가한다는 연구의 목적과 맞지 않는다는 지적이 있을 수 있음
- 이에 따라 유럽, 미국EPA, WHO 등 정부 및 국제기관 차원에서 대기오염에 대한 영향 평가 및 정책비용평가가 이루어지고 있는 최신의 국외사례를 검토, 반영하여 본 연구의 피해비용 주장의 신뢰성을 뒷받침할 수 있는 근거를 수집함

[선행피해비용 분석 문헌에서 고려된 건강영향]

질병 및 사망영향	US EPA 2ndIntegrated Scientific Assessment*	US EPA Benefit and Cost analysis of Clean air act 1990-2020	Europe 2 nd Clean Air outlook**	WHO Global Burden of Disease 2019	
사망	○(단기/장기)	0	0	-	
전체 호흡기 질환	○(단기/장기)	0	0	-	
호흡기 질환	만성 기관지염	-	0	-	
	급성 기관지염	-	-	-	
	만성폐쇄성 폐질환	○(단기/장기)	0	-	0
	천식	○(단기/장기)	0	0	-
	폐렴	-	0	-	-
	상기도 증상	-	0	-	-
	하기도 증상	-	0	-	-
	감염성 호흡기 질환	○(단기/장기)	-	-	○(하기도 감염)
심혈관계 질환	전체 심혈관계 질환	○(단기)	0	0	-
	심근경색	○(단기, 장기)	0	△	-
	허혈성 심질환	0	0	-	0
	심부전	○(단기)	-	-	-
	부정맥	0	0	-	-
	울혈성 심근경색	○(단기)	0	-	-
	뇌졸중	-	-	△	0
	기타	인지행동 영향	○(장기)	-	-
신경퇴행성 질환		○(장기)	-	-	-
어린이 신경발달		○(장기)	-	-	-
폐암		○(장기)	-	-	-
기도암		-	-	-	0
기관지암		-	-	-	0
당뇨(2형)		-	-	-	0
저체중아 증가		-	-	-	0
임신주수 감소		-	-	-	0

- 분석대상 오염물질은 석탄화력발전 대기오염 농도 기여도 도출이 가능한 물질 (PM_{10} , $PM_{2.5}$)을 대상으로 함으로써 연구목적에 부합하는 범위로 한정함
- 피해비용 평가의 시간적 범위 또한 석탄화력발전 대기오염 농도 기여도 도출 시점과 동일하게 설정하여 지역자원시설세, 건강피해 및 비용, 석탄화력 기여도 간 비교가능성을 높일 수 있도록 함

4. 생태환경모니터링

4.1. 산림생태계 오염물질 모니터링

- 석탄화력발전소의 수은 배출에 따른 수목의 영향을 확인하기 위하여 충남 화력발전소를 기준으로 거리별로 시험구를 선정하였으며, 화력발전소의 영향이 적을 것이라고 예상되는 대조구와 비교하여 수목 나이테의 수은 농도를 분석함. 또한, 충남 외의 화력발전소 주변 지역의 수목 나이테의 수은 농도를 분석하여 충남 지역 시험구 내 수은 농도 변화의 양상이 화력발전시설의 영향으로 인한 것인지의 여부를 확인하였음
- 나이테 수은 분석을 위해 선정된 공시목은 리기다, 곰솔, 적송을 포함한 소나무류였음. Ericksen 외 (2004)의 연구에 따르면 대기 중으로 방출된 수은의 산림 내 순환 과정은 수은이 수목의 잎에 흡착되거나 기공을 통해 수목으로 흡수되어 낙엽 및 낙지가 부식됨에 따라 토양으로 수은이 흡수되는 것임. 따라서 잎을 포함한 수관부의 형태 및 밀도 등이 다른 침엽수와 활엽수 간의 수은 흡수 정도는 차이가 있을 수 있지만 소나무류 내의 변동성은 적을 것이라고 판단됨
- 환경부는 대기환경보전법 제 16조(배출허용기준)에 따라 대기오염물질 배출시설에 서 나오는 대기오염물질의 배출허용기준을 규제하고 있음. 수은배출허용기준을 적용하는 배출시설 중 석탄화력발전소가 명시된 것은 2005년이 최초였으며, 2005년 1월 1일부터 수은배출허용기준이 $5mg/Sm^3$ 이하였음. 해당 기준은 2009년도까지 적용되었으며, 2010

년 1월 1일부터는 0.1mg/Sm³ 이하였고, 이후 몇 차례의 규제 강화 후 2020년도부터 0.04 mg/Sm³ 이하로 수은배출이 규제되고 있음

- 수은배출허용기준 뿐 아니라 질소산화물, 황산화물 등의 미세먼지 원인물질에 대한 배출 허용기준이 2008년부터 5차례에 걸쳐 강화됨에 따라 발전시설 내 원인물질 처리를 위한 시설이 운영되고 있음
- 충남(태안, 보령, 서천) 화력발전소 근처 및 원거리 수목 나이트의 수은 농도를 분석한 결과, 최근 산업공단 및 화력발전소의 공기정화장치 설치를 포함한 국가적인 대기오염물질 저감 정책이 2000년대 후반부터 강화됨에 따라 수은 배출이 감소한 것을 확인할 수 있었음
- 실제로 충남 화력발전소의 탈질설비는 2005년부터 2017년까지 설치된 것으로 파악되어 석탄화력발전시설에서 배출되는 수은의 양이 2007년에 비해 2020년에 약 84% 감소했다는 국립환경과학원의 보고를 뒷받침할 수 있는 근거임을 확인할 수 있었음
- 화력발전소 및 산업단지에서 대기중으로 유출된 수은은 대부분 원소수은의 형태이며 이는 150일에서 1년 이상 대기 중에 체류한다고 알려짐. 따라서 바람 등에 의한 수은의 장거리 이동을 고려하여 각 시군의 화력발전소 기준 1km 이내, 약 5km, 5-10km, 10-15km, 15-20km 지점에 위치한 시험구의 수목 나이트 수은 농도를 분석함. 분석 결과, 화력발전소 기준 원거리의 공시목에서 근거리에 위치한 공시목보다 평균 수은 농도가 높아 화력발전소의 수은 배출 영향을 확인하기에 더 적합하였음
- 충남 태안 및 보령의 화력발전소 기준 근거리 시험구의 토양 수은 농도를 분석한 결과, 깊이 0~30cm 토양의 누적 평균 수은 함량은 877.03~971.91ng/cm³으로 여수국가산업공단 인근 지역의 토양 수은 함량과 유사한 경향을 나타냄
- 하지만, 토양 시료의 경우 수목 나이트와 달리 분석되는 토양 내 수은 농도가 연도별로

분석될 수 없고 시료 채취 시점의 수치로 나타남. 따라서 시험구 내의 토양 수는 농도가 과거에 비해 증가 혹은 감소했는지의 여부를 파악할 수 없음. 따라서 화력발전소의 영향을 시계열적으로 확인하기 위해서는 지속적이고 장기적인 모니터링이 필요함

4.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링

- 충남지역 4개 화력발전소의 주변 하천에 대한 수질과 수환경 그리고 저질을 조사한 결과는 다음과 같음
- 당진의 경우, 수질은 어류가 살기에 적당한 범위를 보였음. 그러나 수질내 중금속 분석에서 Pb, Cu 등은 어류폐사 기준치 내에 있어 주의를 필요로 하였으며 Fe과 Zn은 지점 1에서 어류폐사 기준치를 상회하여 어류건강성에 부정적 영향을 줌. 그리고 저질을 분석한 결과, Pb, Cu, Zn,은 일부 지점에서 3등급과 2등급으로 나타나 지속적인 모니터링 또는 정밀조사가 필요함
- 태안에서는 수질항목 중 수온이 높게 나타나 어류폐사 및 기타 생물에 악영향을 줄 가능성이 높아 지속적인 주의를 요망하며, 그 외의 다른 수질항목은 수서생물의 서식에 적당한 범위를 보이고 있음. 그리고 수체의 중금속 분석결과 Fe이 어류폐사 기준치를 1.36-3.8배 높은 것으로 나타나 지속적인 모니터링이 필요함. 한편 저질에서 Pb은 지점 2에서 2등급으로 Cd은 지점 1에서 2등급으로 나타나 지속적인 모니터링이 필요함
- 보령에서는 수질 항목 중 모든 항목이 어류 서식에 적합하였으나 작년 조사에서 수온이 매우 높게 나타난 경향성이 있어 수온에 대한 모니터링은 지속해야 됨. 수체내 중금속에 서는 Al, Pb, Zn 등은 어류폐사 기준농도 내로 나타나 주의를 요하나 Fe은 기준지에 약 3-5배 높은 것으로 나타나 이에 대한 대책이 필요한 듯함. 그리고 저질을 조사한 결과 Cu, Zn이 지점 1에서 3등급, Pbdl 지점 2에서 4등급으로 나타나 준설이 필요함을 보여주고 있음. 이러한 결과는 화력발전소 영향 보다는 올해 초 벌어진 공사의 영향일 가능성이 높으며 이에 대한 대책이 요구됨

- 서천에서는 수질은 어류살기에 적당하고 중금속 중 Al은 기준치 내, Fe는 기준치를 약간 넘어선 것으로 나타남. 저질은 Cu만 2등급으로 나타남
- 어류에 대한 중금속 분석 결과, Fe의 농도가 당진, 태안, 보령 등지에서 높은 값을 보이는 것으로 나타나, 수질, 저질 등의 결과와 일치함
- 소형설치류 중금속 분석 원소를 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 총 3개 원소로 설정하여 당진 화력발전소 인근 지역에서 등줄쥐 2마리, 땃쥐 1마리를 포획하고 대조군으로 서산 지역에서 등줄쥐 1마리를 포획하여 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 총 3개 중금속 항목을 ICP-MS를 이용하여 분석함
- 대조구 샘플과 비교했을 때, 3개의 중금속 항목 중 납(Pb)의 경우, 당진 지역 설치류의 간에서 서산 대조구 지역에 비해 비교적 높은 중금속 함량이 나왔고, 카드뮴(Cd)의 경우, 당진 지역의 설치류의 신장과 간에서 서산 대조구 지역에 비해 비교적 높은 중금속 함량이 검출됨. 비소(As)의 경우, 당진 지역의 설치류의 간에서 서산 지역에 비해 비교적 높은 중금속 함량이 확인됨
- 포유동물 중금속 분석결과 화력발전소 주변지역인 당진지역의 개체가 서산 대조구 지역의 개체보다 중금속 체내 함량이 전반적으로 높게 나타났지만 적은 샘플수로 진행되었기 때문에 보다 정확한 결과 도출을 위해 지역 및 분석 샘플수를 늘려서 분석할 필요가 있음

4.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링

- 식물분야 4차년도 지역별 모니터링 후보종 조사결과로 일부 분류군이 추가 확인되었으며 (당진 1분류군, 태안 3분류군, 보령 1분류군, 서천 6분류군), 대조구인 팔봉산(서산)은 3분류군이 추가로 확인되어 전체 분류군수는 당진-298분류군, 태안-290분류군, 보령-270분류군, 서천-261분류군, 팔봉산-495분류군, 희리산-346분류군으로 전체 분류군수가 증가하였음

- 화력발전소 일대(당진, 태안, 보령, 서천)와 팔봉산(대조구)에서 4차년도 조사 결과 귀화 식물 수에는 변화가 없었으나 전체 분류군 수가 증가하여 이를 토대로 도시화지수 및 귀화율을 산출하였음. 전국 귀화식물 중 조사지의 귀화식물 비율을 나타내는 도시화지수는 작년 조사자료 대비 소폭 상승하였고, 조사지 전체 식물 중 귀화식물 비율을 나타내는 귀화율은 약간 낮아짐
- 조사지역의 관속식물 중 귀화식물의 비율인 귀화율은 화력발전소 주변 지역(당진 12.75%, 태안 10.69%, 보령 10.00%, 서천 16.48%)에 비해 대조구인 팔봉산(서산 8.48%), 희리산(서천 9.25%)에서 낮게 분석됨. 화력발전소 주변 지역이 대조구 지역에 비하여 환경 변화가 더 많았기 때문으로 추정됨
- 곤충분야 2018년부터 2021년까지 당진조사구에서 11목 69과 191종, 태안조사구에서 11목 70과 184종, 보령조사구에서 10목 57과 114종, 서천조사구에서 11목 46과 76종, 서산대조구에서 10목 71과 199종, 서천대조구에서 11목 78과 190종의 곤충이 확인되어 보령조사구와 서천조사구에서 곤충의 다양성이 비교적 낮게 나타남
- 2021년 서천조사구에서 멸종위기 야생생물 II급인 애기뿔소똥구리가 확인되어 지속적인 모니터링 및 보호대책 수립이 필요할 것으로 판단됨
- 각 조사구의 지표배회성곤충 군집과 천공성곤충 군집의 시기별 종수, 개체수, 다양도지수는 일정한 경향성을 보이지 않았으나, 보령조사구와 서천조사구에서 비교적 낮게 나타남
- 포유동물분야 조사결과 흔적조사, 무인센서카메라 조사 및 포획 트랩을 이용한 조사를 실시한 결과 총 5목 9과 10종이 조사됨. 지역별로 당진에서 8종, 태안에서 7종, 보령에서 7종, 서천에서 5종이 조사되었고, 대조구인 서산 팔봉산에서 6종, 서천 희리산에서 5종이 조사됨
- 이 중 멸종위기야생생물 I 급이자 천연기념물 제330호인 수달 1종이 서천과 태안, 보령 화력발전소 주변에서 흔적이 확인되었고, 태안과 보령에서 무인센서카메라에 촬영되어 실체를 확인함

- 멸종위기야생생물Ⅱ급인 삶은 태안에서 흔적으로 확인되었고, 당진, 태안, 보령 및 서산 희리산에서 센서카메라에 촬영되어 실체를 확인함
 - 멸종위기야생생물Ⅰ급인 수달이 금년 조사에서 당진과 희리산에서 확인이 안되었으며, 멸종위기야생생물Ⅱ급인 삶은 서천, 서산에서 금년 확인을 못 함. 멸종위기야생생물은 개체수가 적고 환경변화에 민감하기 때문에 지속적인 모니터링이 필요하며 차년도 모니터링에도 확인이 안되면 향후 정밀 조사가 요구됨
- 충남지역 4개 화력발전소의 어류조사를 실시한 결과 총 6목 10과 27종 5,189개체가 출현한 것으로 나타남. 출현어종 중 법적보호종은 출현하지 않았고, 한국고유종은 가시납지리, 쉬리, 얼룩동사리 등 3종이 출현하였고, 외래도입어종은 떡붕어, 블루길과 배스(생태계교란어종) 3종이 출현함
- 연구지역에서 출현한 주요 어종의 length-weight relationship 및 condition factor을 분석한 결과, 당진에서는 왜물개, 붕어, 송사리 등 대부분의 어종들이 각 지점에서 성장도 b값이 3.0 이하로 나타났고, 비만도도 음(-)의 값을 나타내어 서식지 환경에 대한 교란이 있음을 반영하고 있었으며 태안에서는 송사리만 성장도 3.0 미만 그리고 비만도도 음(-)의 값을 보이나, 민물검정망둑, 그리고 민물두줄망둑 등은 성장도 3.0 이상, 비만도 포지티브(+)값을 보여 비교적 안정적인 개체군 성장이 되고 있음을 보여주었음
 - 어류건강성 평가(FAI)를 통한 하천을 살펴본 결과 당진은 비교적 양호한 편이었으나 태안, 보령 그리고 서천 모두 건강성을 높일 방안이 필요하며 또한 하천에 대한 관리방안을 마련 지속적인 관리가 필요함. 특히 보령과 태안에서의 하천은 수로 연결, 하천종적 연속성 확보 등 일부 지역 하천에서 “생태하천 복원사업”도 필요함

4.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

- 식물분야 주요종 모니터링을 위하여 3차년도에서 선발된 후보종을 대상으로 예비 조사를 2회 이상 실시함. 예비 조사결과를 토대로, 인위적 교란 및 장마, 홍수 등 훼손의 위험도

가 비교적 낮으며 지속적으로 변화 추이를 관찰할 수 있는 분류군 및 조사지점을 지역별로 각각 2분류군 2개 지점씩 선정하였음. 지역별로는 당진-고란초와 장구밥나무, 태안-수리딸기와 팡팡나무, 보령-병꽃나무와 수리딸기, 서천-검노린재나무와 예덕나무, 팔봉산-사람주나무와 소사나무, 희리산-검노린재나무와 수리딸기가 최종 선정됨

- 주요종의 모니터링을 반복 조사한 결과, 개체수 감소 추세를 보인 대상종은 서천 2(예덕나무)였으며, 덩굴성 식물의 피압으로 인한 개체수 감소로 판단됨
- 주요종의 모니터링을 반복 조사한 결과, 개체수 증가 추세를 보인 대상종은 수리딸기였으며, 지역별로는 태안 1, 보령 2, 희리산 2였음. 본 종은 지하경 번식을 통한 어린 개체 다수가 새로 출현하는 등 전체적인 개체수 증가 추세를 보였음

- 곤충분야 주요종 모니터링을 위해 6개 지역에서 채집된 지표배회성 곤충은 총 46종 2,610개체로 확인됨. 조사구와 대조구의 군집구조 유사성 분석 결과, 조사구와 대조구 사이의 유의차는 나타나지 않았으며, 태안조사구와 서천조사구 사이에 유의차가 나타나 두 군집의 군집구조 간의 차이가 큰 것으로 확인됨

- 채집된 곤충의 개체수는 태안조사구에서 326개체로 가장 많았으며, 서천조사구에서 67개체로 가장 적게 나타났는데, 이러한 종 구성의 차이가 군집구조에 영향을 미친 것으로 판단됨
- 당진조사구, 태안조사구, 서산대조구, 서천대조구의 우점종은 윤납작먼지벌레로 확인되었으며, 보령조사구와 서천조사구의 우점종은 일본칠납작먼지벌레로 나타남

- 포유류 분야 모니터링 종인 수달은 환경변화에 민감하게 반응하는 동물로서, 1950년대부터 세계 여러 곳에서 개체 수 감소가 보고되어 있으나 환경 교란 요인이 사라지면 수달의 개체수가 회복됨이 보고된 바 있음(차현기 외, 2017). 수달이 촬영된 보령(CB02)은 수달의 상대풍부도 지수(18.18)가 가장 높은 지점이었으며, 보령(CB03)은 수달의 상대풍부도 지수(RAI)가 12.40으로, 수달 가족(2-3개체)이 2020년 9월 18일부터 2021년 9월 4일 사이에 총 10회 촬영됨

- 어류분야 모니터링종으로 붕어와 송사리로 선정하였으며, 본 어종을 선정 한 이유는 환경 변화에 대한 내성이 강하기 때문임
- 당진 지역 붕어는 붕어도 성장도와 비만도를 살펴본 결과 1차에는 성장도 b값이 2.75 그리고 비만도(K) 값이 음의 값을 보여 개체수 밀도가 높거나, 서식환경이 열악함을 보여주는 결과라 판단되며, 2차시에도 성장도 b값이 2.70과 비만도(K) 값이 음(-)의 값을 보여 줌. 한편 아우점종인 송사리의 성장도와 비만도를 살펴본 결과 1차 2차 모두 성장도 b값은 2.10과 2.71로 그리고 비만화 정도를 보여주는 Condition factor(K)값의 기울기는 음(-)의 값을 보여 서식 환경이 그리 양호하지 않음
- 태안 지역 붕어 개체군의 성장도는 1차시기에 3.23으로 나타나 성장이 양호함을 보여주고 있었고, 비만도도 양의 값을 나타내어 안정화된 개체군을 보여주는 것으로 판단됨. 송사리 Length-weight relationship의 회귀계수(b)값이 1차에서는 0.63과 음의 비만도 값을 보였고 2차에는 좋아지기는 했으나 성장도 2.70 그리고 비만도도 음의 값을 나타내어 개체군의 비정상적 성장도와 비만도 값을 보여주고 있는데 이는 대륙송사리를 포식할 어종이 없어 개체군의 비정상적 크기 증가로 인한 결과로 판단됨
- 보령지역 붕어는 1차시기에 거의 출현하지 않아 성장도와 비만도를 보여줄 수 없었으며 2차조사시기에는 지점 2에서 성장도 3.0을 조금 넘었으며 비만도도 양(+)의 값을 보여 비교적 안정화된 개체군을 보이는 것으로 나타남. 송사리의 성장도 b값을 알아본 결과 1차와 2차 모두에서 3.0 이하의 값을 보였고 비만도도 모두 음(-)의 값을 나타내 높은 우점도와 기타 영향일 가능성이 높다고 판단됨
- 서천 지역 붕어의 성장도와 비만도를 살펴본 결과 붕어는 성장도 b값이 1차에 2.82로 나타났고, 비만도도 음(-)의 값을 나타냄



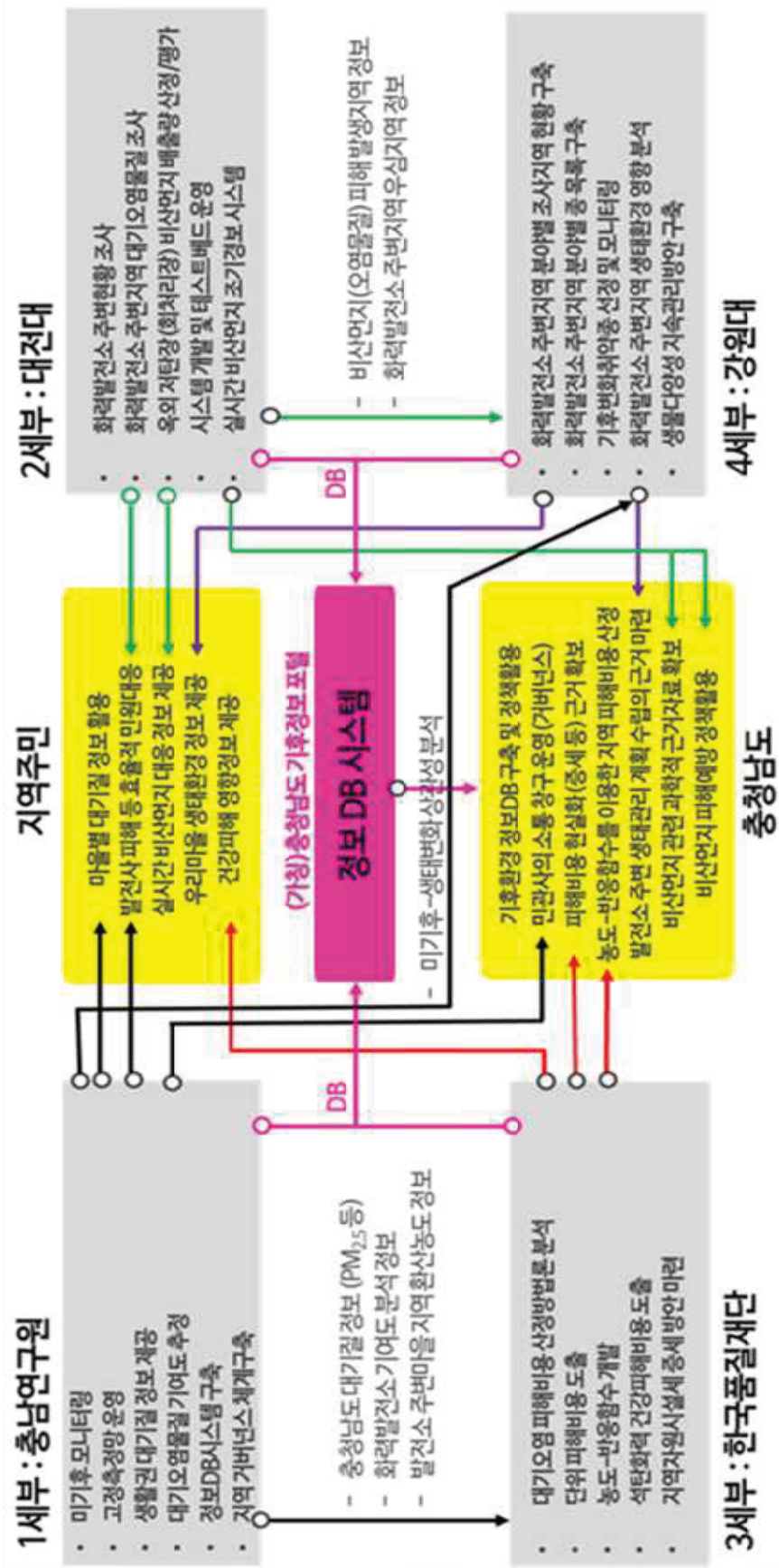
제3장 세부과제별 연계성

- 본 연구용역은 2016년 기획연구부터 약 6년간 진행되면서 여건을 반영한 연구내용 변경이 매년차별 이뤄졌으며, 2차년도에 이어 4차년도에도 연구내용 변경을 반영한 세부과제별 연계성에 대해 점검을 실시함



[2차년도 연구과제 과제별 연차별 연계도(충남연구원, 2019)]

- 화력발전소 기여도 분석 : (2세부) → (1세부)
 - － 배출량 산정 자료
- 사회적 피해비용 도출 : (1세부) → (3세부)
 - － 대기질 정보 (PM_{2.5} 등)
 - － 화력발전소 기여도 분석 정보
 - － 발전소 주변마을 지역 환산농도 정보
- (1세부, 2세부) → (4세부) : 생태환경 영향분석
 - － 미기후 모니터링
 - － 비산먼지(오염물질) 피해 발생지역 정보
 - － 화력발전소 주변지역 우심지역 정보
- 정보 DB 시스템(세부과제별 연구성과 자료) : (2세부, 3세부, 4세부) → (1세부)
- 5차년간의 최종 연구성과물인 정보 DB 시스템에 포함되는 정보 중 정책활용성이 높을 것으로 예상되는 성과는 다음과 같음
 - － (1세부) 미기후, 고정측정망, 생활권 대기질 정보, 기여도 모델링
 - － (2세부) 발전소 주변현황(배출량, 석탄사용량 등), 간이측정값, 실시간 비산먼지 배출량
 - － (3세부) 농도반응함수, 피해비용
 - － (4세부) 조사지역별 분야별 종목목과 취약종
- 연구성과에 대해 대한 수요 주체별 정책활용 방안을 다음과 같이 제안함
 - － (지역주민) 마을별대기질정보 활용, 발전사 피해 등 효율적 민원대응, 실시간 비산먼지 대응 정보 제공, 우리마을 생태환경 정보 제공, 건강피해 영향정보 제공
 - － (충청남도) 기후환경 정보DB 구축 및 정책활용, 민관사의 소통창구 운영(거버넌스), 피해비용 현실화(증세 등)근거 확보, 농도-반응함수를 이용한 지역 피해비용 산정, 발전소 주변 생태관리 계획 수립의 근거 마련, 비산먼지 관련 과학적 근거자료 확보, 비산먼지 피해예방 정책활용



[연구과제 연계성과 정책활용 계획]

Part 1

대기환경정보 구축

제1장 서론

1. 연구배경
2. 주요 연구내용
3. 4차년도 주요 연구성과
4. 연구성과 확산
5. 5차년도 연구방향 검토

1. 연구배경

- 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구용역 목적은 화력발전소가 주변지역에 미치는 기후환경영향에 대해 조사 및 분석을 통해 과학적 실증자료를 구축하고 피해 정도를 정량화하여 환경복지를 구현하는데 그 목적이 있음.
- 본 연구는 충남지역 화력발전소를 대상으로 과학적인 조사-분석-비용평가 체계를 모두 적용한 최초 연구로서 충남도의 화력발전소 주변지역 대기질 개선과 국가 온실가스 관리정책 발전에 일조하고 있음.
 - 특히, 수집·분석된 정보는 지역주민의 알 권리 충족뿐만 아니라 대기오염 및 온실가스 다배출시설인 화력발전소를 대상으로 하는 국내외 연구수요와 정부 및 충남도 정책 개발의 기초자료로 활용하거나 관리 개선에 도움이 될 수 있을 것으로 판단됨.
- 1세부 대기환경 정보구축 분야는 화력발전소 오염물질이 주변지역에 미치는 영향 정도를 과학적으로 증명하고 각 세부(2세부 대기질 측정분석, 3세부 사회적 비용평가, 4세부 생태환경 모니터링)에서 생산되는 정보를 취합하여 DB 시스템화된 정보를 도민에게 알리고 미래 수요에 대응하는 것이 주요 역할임.
- 또한, 대기질 정보 DB 구축과 더불어 주민 의견수렴을 거쳐 주민 맞춤형 실시간 정보를 제공하고 있음.
 - 대규모 온실가스 배출로 인한 전 지구적 혹은 국가단위, 지역단위 영향 예측과 주변 지역 영향에 대한 실측자료가 필요하다는 의견과 화력발전소에 의한 실시간 대기오염 물질 영향 분석을 위한 대기측정망 설치 필요에 따라,
 - 본 연구의 기획 단계였던 2016년에 대기측정망 확대가 필요(당시, 충남지역은 도시 대기 측정소 7개소 운영 중)다는 지역 요구를 반영하여 매년 1기의 대기측정망 추가 구축을 기획하였음.
 - 아울러, 매년 마을별 약 2회 이장단회의 등에 참석하여 주민 생활권(마을) 대기질 현황 정보가 필요하다는 의견을 수렴하여 3차년도에 마을별 대기질 정보제공 시스템 개발을 완료하는 한편 대기질 정보(예, 서천 소각처리시설 악취에 대한 대기질 우려로 대기질 실측 후 정보 제공 및 설명)를 수시 제공하고 있음.

- 5차년도에는 화력발전소 대내외 영향 분석에 대한 결과 도출을 위해 주변지역 대기 오염물질 이동과 기여도 및 성분 분석을 진행할 계획이며, 행정 및 발전사, 시민 사회단체 등과 협의를 거쳐 충남도 내 4개 발전사별 거버넌스 운영 지속성 및 발전성을 반영한 체계를 개선할 예정이다.

2. 주요 연구내용

- 4차년도에는 ‘통합 DB 시스템 구축’을 주요 목표로 1. 미기후 모니터링, 2. 고정측정망 운영, 3. 정보DB시스템 구축 및 모델링 지원, 4. 생활권 대기질 정보 제공, 5. 대기오염물질 기원과 기여도 추정, 5. 생활권 대기질 정보 제공, 6. 지역 거버넌스 체계 구축을 주요 내용으로 연구함.
- 1차년도 미기후 모니터링 계획에 따라 3차년도까지 확정된 32개소 지점에 대한 미기후(온도, 습도 등) 장기자료를 획득하고 분석함.
 - 미기후에 대한 극한기후(최고/최저온도)를 분석하고, 3차년도 자문의견과 용역 변경 계획을 반영하여 CO₂ 측정을 추가 운영함.
- 고정측정망 운영은 1차년도 설치된 당진 대난지도 측정소와 2차년도 설치된 보령 청라면 측정소를 운영하고 자료를 분석함.
 - 대난지도 측정소는 난지1리 마을회관 주변 신축건물 공사에 따라 지역주민들의 이전을 요구하여 당진시의 협조를 거쳐 기존 설치 위치와 직선거리로 1.1 km 떨어진 곳에 위치를 변경 이동시켜 분석을 실시함.
- 정보 DB 시스템을 구축하여 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구를 통해 수집된 정보를 수시 제공함.
 - 화력발전소 기여도 추정을 위하여 3차년도까지 구축한 대기모델링 시스템을 업데이트하고 재구성함.
 - 화력발전소 배출실태 조사의 경우 국가대기오염물질배출량 (CAPSS)은 2세부(대전대)에서 연구를 진행하고, 굴뚝자동측정기기(TMS) 분석은 매년 TMS 확정자료가 분석·발표되

어, 관련된 자료는 제외하고 정보 DB 시스템 내 표출하는 것으로 변경 추진함.

- 생활권 대기질 정보를 제공하기 위해 1차년도는 지역 주민요구에 따라 마을별 대기질 정보시스템을 개발하고, 2차년도에는 시스템 고도화 및 적용 대상마을을 확대함.
 - 2차년도까지 1일 지연하여 제공하던 정보를 3차년도에는 정보 생산 체계를 개선하여 실시간(1시간 지연) 제공하고, 4차년도에도 실시간 기후정보를 지속 제공함.
- 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정을 위하여 1차년도 원소 함량분석, 2차년도 2개 지점 동위원소비 분석을 거쳐 분석의 적용 가능성 확인 여부를 기술적으로 확인하였고, 3·4차년도에는 4개 발전소 이격거리를 고려한 화력발전소 주변지역 동위원소비 분석을 진행하였음.
 - 이런 3년간의 측정결과를 바탕으로 충남지역 4개 발전소 주변지역 동위원소비 라이브러리를 최초로 구축 중에 있음.
 - 분석결과에 대한 신뢰도 확보를 위해 정부출연연구기관인 한국기초과학지원연구원(KBSI)에 분석을 의뢰하고, KBSI 연간 분석 일정에 따라 2021년 겨울, 봄철 시료 분석 결과까지 4차년도 보고서에 수록하였음.
 - 최종 라이브러리 및 외부 기여도는 5차년도에 발표하는 동시에 3·4세부 연구와 연계 시켜 피해 정도 및 토양저질 등 중금속 분석에 활용할 계획임.
- 3차년도까지 지역 통합거버넌스 모델을 개발하고 4차년도에는 현실 적용성에 초점을 맞춰 도시군 공무원 및 주민 의견수렴을 거쳐 실제 도입 가능한 통합거버넌스 운영(안)을 제안함.

3. 4차년도 주요 연구성과

- 연구용역의 최종 목표인 “화력발전소 주변지역 환경복지 구현을 위한 기후환경변화 과학적 실증자료 구축”을 달성하기 위해 4차년도에는 장기간 미기후를 실측하고, 2개 측정소 운영 및 대기오염 기여도 분석 등 총 5가지 주요성과와 4가지 신규사업을 제안함.
- 장기간 미기후 실측자료를 축적하고 분석한 결과, 1차년도 수행한 기후변화 시나리오 전망분석과 유사성을 확인함에 따라 화력발전소 주변지역에 기후변화 관련 사업을 추진시

- 기후변화 시나리오를 근거로 추진할 수 있는 신뢰성을 확인함.
- 실측자료가 같은 기간 발전소 인근에 운영 중인 기상방재센터(AWS) 온습도 평균값 보다 모두 높게 나타나, 1차년도 연구에서 실시한 IPCC 기후변화 시나리오 분석 결과와 유사한 패턴으로 나타났음.
- 3년이라는 비교적 짧은 기간이라는 한계가 존재하나 본 연구를 통해 화력발전소 주변지역을 대상으로 분석한 기후변화 시나리오(1차년도 수행)와 3년간 실제 측정 데이터간의 유사성을 확인함으로써, 향후 화력발전소 주변지역에 기후변화 관련 정책사업을 추진함에 있어 1차년도 연구결과인 기후변화 시나리오분석 결과를 충분히 활용할 수 있음을 확인함.
- 대난지도 측정소는 실시간 배경농도 제공을, 청라면 측정소는 보령화력발전소의 이격거리별 실시간 농도변화 정보제공용으로 활용이 가능함을 확인함.
- 4차년도까지 운영한 2개소의 대기측정소는 2~3년간의 운영결과 분석을 통해 본래 목적인 실시간 배경농도 제공(대난지도)와 발전소 이격거리별 실시간 농도변화 정보제공(청라면)이 가능함을 확인함.
- 측정소의 실시간 농도변화 자료는 화력발전소 주변지역 대기모델링 수행시 감·보증 자료나 모델의 초기값으로 활용하는 실측값으로 활용이 가능하여 화력발전소 주변지역을 대상으로 하는 대기모델의 예측 능력을 향상시키는데 기여할 수 있음.
- 실시간 측정자료는 ‘충청남도 마을대기측정망 통합정보센터’에 제공하여 충청남도 대기질 정보구축에 기여하도록 함.
- 연구결과 활용성 제고와 정보공개를 위해 세부과제별 연구결과 DB 시스템을 구축하고 연구진 내부 활용을 통해 개선사항 등을 도출함
- 1~4세부 축적된 DB 정보화, 화면설계, 서비스 시스템 등 실무자들이 활용할 수 있는 정보시스템을 구축하였으며, 기존 개별적으로 관리되던 미기후모니터링 결과, 고정측정망 운영, 생활권대기질 정보 등을 통합함.
- 화력발전소 주변지역 119개 마을 생활권대기질 정보를 실시간 반응형웹을 통해 제공하고 DB를 구축하고 있으며, 마을별 연간 충청남도환경기준 초과일 분석결과를 우편으로 제공함.

- 충청남도 화력발전소 주변지역 안정동위원소 라이브러리 구축을 위한 자료를 확보하고 분석했으며, 대기오염에 대한 외부 기여율 구역 분석으로 시기별 국외 중점 오염물질 모니터링 지역을 제시하고, 대기모델링을 통해 화력발전소의 충남도내 시군별 기여율을 분석하여 미세먼지 등의 감축을 위한 정책 추진이 가능하도록 과학적 근거를 제시하였음.
- 충청남도 화력발전소 주변지역 안정동위원소 라이브러리를 최초로 발표하기 위해 2년간(3, 4차년도) 안정동위원소 시료를 분석하였고, 라이브러리 발표 후(5차년도 예정) 적용성 검토를 위해 굴뚝과 비산먼지(재)에 대한 안정동위원소를 분석함.
- 외부 기여율 구역 분석결과는 충청남도가 참여하고 있는 동아시아 미세먼지 협력사업서 본 연구결과를 바탕으로 국제협력 시 시기별 중점적으로 모니터링이 필요 지역을 검토하는데 활용할 수 있음.
- 또한, 발전사에서 국외 투자사업(국외 탄소상쇄사업 등)시 연구결과를 참조하면 국외유입 미세먼지 감축을 일부 유도할 수 있음.
- 화력발전소로 인한 PM2.5 기여도 분석결과 도내 시·군 중 홍성군이 10.5%의 영향을 받아 가장 영향을 많이 받는 것으로 나타났으며, 천안시, 보령시가 높은 영향을 논산시, 계룡시, 금산군이 상대적으로 적은 영향을 받는 것으로 나타남.
- 기여도 분석 결과를 사회적 피해비용 산정, 인체영향 평가 등의 기초 자료로 활용할 수 있도록 지원함.
- 3차년까지 개발된 모델을 검토하여 주민소통강화를 위한 효율적인 거버넌스 운영에 대한 3가지 안(1안 주도형, 2안 지역형, 3안 자문형)을 제안하고, 내외부 검토와 주민의견을 수렴을 통해 2안 지역형에 대한 예산, 인력, 수행업무 등을 확정하여 충청남도 화력발전소 통합 민간환경감시단 운영방안을 마련함.
- 신규사업 제안으로는 미기후모니터링 연구결과를 바탕으로 ‘화력발전소 주변지역 탄소중립 중점벨트 운영’을, 고정측정망 운영 결과로 ‘충청남도 마을대기측정망내 고정측정망 확대운영’을, 생활권 대기질 정보제공 연구결과로 ‘발전소 주변 오존 집중관리구역 지정·운영’을, 거버넌스 및 환류체계 구축 연구결과로 ‘발전소 연계 현장방문형 환경교육’을 제안함(세부사업 내용은 8장 참고).

4. 연구성과 확산

- 2021년 한국대기환경학회 제64회 정기학술대회에 참여하여 연구성과를 발표하고 학술대회 홍보부스를 운영하여 연구용역에 대한 홍보를 실시함.
- 2021년 10월 22일 제주신화월드에서 진행된 학술대회에서 본 연구용역 결과가 포함된 특별세션을 운영했으며, ‘고정측정망 운영에 따른 발전소 주변지역 영향 분석’에 대한 논문을 발표하고 참여 전문가와 토론을 진행함.
- 발표논문에서는 고정측정망(대난지도, 청라면) 및 국가도시대기측정망(송산면, 당진시청사, 대천2동, 주교면) 자료를 활용하여 2021년 여름철(6~8월)의 기상 조건(풍향, 풍속), 충청남도 대기환경기준 달성 여부, 풍향별 대기오염물질(PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2)의 시공간분포 특성을 발표함



[그림 1.1] 한국대기환경학회 학술대회 발표 자료

- 특별세션과 더불어 본 연구용역의 성과확산을 위한 홍보부스를 2021년 10월 20일 ~22일 운영하였으며, 홍보부스에서는 화력발전소 주변지역 기후환경변화 과학적 실증자료 구축 필요성을 공유하고 대기환경 전문가를 대상으로 연구과제의 활용

성 증대와 정책 방안 수립에 대한 의견 조사를 실시하여 연구 결과에 대한 주요 수요층인 연구자의 요구를 파악했으며, 충청남도 탈석탄정책의 당위성과 관련 정책(탈석탄·탄소중립 금고 등)을 홍보함.



[그림 1.2] 홍보부스 운영

5. 5차년도 연구방향 검토

5.1. 미기후 모니터링

- 화력발전소 주변의 기온, 풍속, 습도 등 미기후를 변화를 분석하기 위해 총 32개소 지점에 미기후를 측정하고, 관련 데이터를 분석하였음.
- 1차년도에는 지역 기후변화 전망을 분석(기온, 강수량)하여 화력발전소 주변지역의 기후변화 가속화를 확인하였으며, 10개소 지역의 미기후를 측정하였음.
- 2차년도에는 조사지역의 30년간 기후변화(대기질 영향인자인 기온, 풍속, 습도)를 분석하고 온도상승과 습도 감소 등 대기질 농도 상승 기상인자를 확인하였으며, 미기후 측정지점을 기존 10개소에서 22개소 추가 구축하여 총 32개소를 운영함.
- 3차년도에는 32개소 측정지점에서 수집된 DB를 관리하고 분석하면서, 측정지점 이격 거리에 따른 온·습도 변화 분석과 기온에 대한 극한사상을 분석하였음.
- 4차년도에는 32개소의 미기후 데이터(온도, 습도) 분석과 함께 전문가 자문의견을 반영하여 이산화탄소 농도분석을 위해 CO₂ 센서를 신규로 8개소를 설치하고 화력발전소 주변의 CO₂ 영향을 분석하였으며, 미기후를 지속 측정하였음.
- 5차년도에는 CO₂ 영향을 확인하기 위해 CO₂ 국가배경 농도인 안면도 측정자료와 비교 분석을 실시하고 중장기 모니터링 운영방안 제안과 함께, 기후 지표 물질 DB 축적을 통해 충남도의 중장기 기후 대응 정책 수립할 수 있도록 지원할 계획임.

1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
(기후변화전망) 기후변화 전망분석 (기온, 강우량)	(기후변화 현황) 지역 기후변화 분석 (풍속, 습도)		(기후변화 동향) 발전소 주변지역 기후변화 지표(CO ₂ 4개소) 조사	
(미기후 지점선정) 10개소 측정 지점 선정 구축	22개소 측정 지점 추가선정 구축		28개소 측정지점 DB 수집·관리 (온도, 지표온도, 습도)	
			(운영 관리, 분석)	

5.2. 고정측정망 운영

- 거리별·바람 방향별 실시간 농도 변화를 분석하기 위해 당진 대난지도 측정소와 보령 청라면 측정소를 설치·운영하고 자료를 분석하였음.
 - 1차년도에는 당진화력발전소 오염물질에 대해 배경농도의 실시간 변화를 분석하기 위해 당진시 대난지도에 측정소 1개를 처음 구축하였음.
 - 2차년도는 보령화력발전소 거리별 실시간 농도변화를 분석하기 위해 보령시 청라면 측정소를 구축하고, 주변 측정소와 비교 분석을 추진함.
 - 3차년도에는 고정측정망 2개소 운영을 통해 당진화력발전소 풍상·풍하 방향 농도를 비교하고 보령화력발전소 이격거리별 농도변화를 분석하였음.
 - 4차년도에는 1차년도 구축된 당진 대난지도 측정소와 2차년도 구축한 보령 청라면 측정소를 지속 운영하고 지속적으로 누적된 자료를 비교 분석하였음.
- 5차년도에는 안정적 정도관리를 실시하고 데이터 축적으로 국가 고정측정망-마을대기 측정망과 연계한 화력발전소 주변지역 미세먼지 농도변화를 분석할 예정임.
 - 향후 축적된 데이터를 통해 화력발전소 영향연구 측정소 구축 및 기상 상황별 발전소 운영방안에 대해 제안하여 화력발전소로 운영으로 인한 영향을 최소화할 수 있도록 지원할 계획임.

1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
(측정망구축) 대난지도 (당진) 측정소 구축	청라면 (보령) 측정소 구축 (운영관리)		대난지도 (당진) 측정소 위치 변경	
		2개소 측정망 유지 보수 통합시스템을 통한 실시간 데이터전송		

5.3. 정보 DB 시스템 구축

- 대기환경의 체계화된 정보 구축과 데이터 제공을 위해 1차년도부터 화력발전소 주변 지역의 대기모델링 시스템을 구축하고, 데이터 분석 및 발전소 운영에 따른 시나리오를 연구하였음.
- 1차년도에는 화력발전소 주변 대기모델링 시스템을 구축하고 발전소 가동중단 시 영향정도 및 효과를 분석하였음. 또한, 대기오염물질 고농도 사례 일과 고정측정망 위치선정을 위한 바람장을 연구하였음.
- 2차년도는 정보활용 시스템 기본 인터페이스를 제작하고, 발전소 운영 상황에 따른 시나리오를 연구하였음.
- 3차년도에는 미기후, 대기측정자료 등에 대한 DB정보 시스템 표출 프로그램을 개발하고, 발전소 운영에 따른 시나리오별 도내 영향을 분석하였음.
- 4차년도에는 그동안 축적해 온 대기환경 DB 시스템을 구축하고 대기모델링 연구를 수행하였음.
- 5차년도에는 대기환경 정보 DB 시스템을 완료하고 4차년도 1차 중간 보고서 시 제안된 전문가 의견을 반영하여 빅데이터 플랫폼과의 연계성을 확보할 예정임.
- 발전소 기여도 예측 결과를 사회적 피해비용 분석에 적용하고 충청남도화 화력발전소 간 자발적 감축 효과를 연구할 계획임.
- 또한, 사회적 피해 기여율을 분석하여 관련 분야의 정책(역제안, 국비사업 발굴, 중장기 정책 수립 등) 지원 서비스를 제공할 예정임.

1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
		(DB 시스템운영)		
		시스템 운영	정보DB시스템 구축	환경정보시스템통합
(대기모델링시스템)				
프로토타입개발	기상모델 고도화	대기모델링 지원		발전소 주변지역 기여도 예측

5.4. 생활권 대기질 정보 제공

- 화력발전소 주변지역 대기질에 대한 정보 제공을 위해 발전소 소재지 인접지역 주민들에게 1일 지연 생활권 대기질 정보를 제공하고 주민들의 신뢰도와 정보 접근성 제고를 위한 다양한 방안을 연구하였음.
- 1차년도에는 61개 마을별 변환계수를 개발하고 1일 지연 일평균 농도 생활권 대기질 정보를 제공하는 한편 인근지역 주민이 직접 참여하여 대기질을 측정하기도 하였음.
- 2차년도는 기존 61개 마을에서 119개 마을로 총 58개 마을에 추가로 생활권 대기질 정보를 제공하였고, 변환계수의 정확도와 신뢰도를 향상하기 위해 대기질 정보 데이터 정비에 노력하였음.
- 3차년도에는 반응형 웹을 개발하고 운영하여 당초 1일 지연 정보제공에서 1시간 지연(준) 실시간 정보를 제공하였음. 아울러 관련된 정보를 바탕으로 환경기준치 초과일을 분석을 하고 대상마을에 관련 내용을 제공함.
- 4차년도는 3차년도까지 완성해온 실시간(1시간 지연) 마을별 대기질 정보를 지속 제공하였음.
- 5차년도에는 도민 눈높이에 맞는 자료 생산을 통해 ‘생활권 대기질 도민 정보 접근성’을 강화하고, 홍보매체 개발·보급으로 화력발전소 주변 대기질 알권리 충족에 노력할 계획임.

1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
(대상범위) 발전소 소재지 61개 마을(4개면)		발전소 소재지+인접지역(범위 확대) 2~5차년도: 119개 마을(8개면, 희망마을 한정)		
(측정방식) 1회	4회 (결과 변환계수 적용)	2차년도 측정결과와 변환계수 적용(4회 평균)		
(정보수준) 1일 전 일평균 농도 수동 업로드		시간 지연 마을별 환경기준 초과일수 정보 제공		
(제공매체)		웹사이트 (연구소 홈페이지)		

5.5. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 화력발전소 주변지역의 대기오염물질의 기원과 기여도를 추정하기 위해 원소 함량을 분석하고, 동위원소 라이브러리 데이터베이스 구축하였음. 3~4차년도에는 지역별·원소별로 분석을 실시하여 외부 기여도를 추정함.
 - 1차년도에는 선행연구를 위한 자료를 분석하고 화력발전소 소재 4개 지점의 원소함량(C, N, S)을 연구하며, 기여도 추정연구 방법론을 수립하였음.
 - 2차년도에는 당진지역 동위원소를 활용하여 계절별 대기오염물질 기원을 추정하였고, 동위 원소 라이브러리 DB를 구축하면서 HYSPLIT-PSCF 모델링을 진행함.
 - 3차년도에는 동위원소 분석을 4개 지역으로 확대하여 중금속 및 강우 시료 분석을 추가 하였고, 대기와 강우의 상관성 분석을 실시함.
 - 4차년도에는 1차년도 수행한 원소 함량 분석과 2차년도 수행된 당진시 2개 지점 동위원소 비 분석을 바탕으로 외부 기여도를 추정하였음.
- 5차년도에는 화력발전소 주변지역 라이브러리를 확정하고 BFM을 적용하여 기여 농도 산 정 모델링과 함께 서천지역 화력발전소 가동 전후 영향을 규명할 예정임.
 - 화력발전소 대기오염 기여도와 확산에 따른 영향 규명으로 행정(국가/광역/ 기초자치단 체)·발전사·주민의 역할을 제시하고 법·제도·정책 개선(안)도 함께 제안할 계획임.

1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
(대상범위) 발전소 소재지 4개 지점	당진시 2개 지점 (시범조사)	발전소 소재지 4개 지점 (2km, 5km, 10km, 20km 지역특성 고려)		서천군 4개 지점 (발전소 영향 규명)
(측정방식) 1회	4회(연차별) 모델 입력값, 상관관계 분석 등을 위한 기초자료로 활용			라이브러리 확정
(방법론) 대기 원소함량 분석 (C, N, S)	대기 동위원소 분석 (C, Pb)	대기+강우 분석(동위원소비, 중금속, 음이온) + 모델링(PSCF 등) 4차년도 : 금속, 석탄(원료), 석탄재 분석 추가		
(결과활용) 안정동위원소 분석 가능여부 파악	대상지역(측정지점) 외부 유입 대기오염물질의 상대적 기·원기여도, 강하물질의 영향 규명 2차년도 : 기·원기여도 추정, 3~5차년도 : 기·원기여도, 강하+확산 영향 추정			

5.6. 거버넌스 및 환류체계 구축

- 화력발전소 소재지 정책수요자(시군 공무원, 마을 주민, 시민 사회단체 등)의 의견수렴을 통해 상생협력 사업을 제안하거나 본 연구결과를 환류하는 체계를 구축하였음.
 - 1차년도에는 발전소 소재 읍면 주민설명회를 개최하고 화력발전소 관련 민원 및 주민 의견을 수렴하는 과정을 거침.
 - 2차년도는 다양한 거버넌스 구조를 분석하여 분류체계를 수립하고 주민 소통 및 1차년도 연구결과를 환류하였음.
 - 3차년도에는 거버넌스 분류모델의 검증을 거쳐 거버넌스 모델 개발을 완료하고 이해관계자 의견수렴, 상생 협력사업을 제안함.
 - 4차년도에는 실제 적용 가능한 통합 거버넌스 운영(안)을 연구함.
- 5차년도에는 주민 맞춤형 거버넌스 가이드라인을 제시하고 적정 거버넌스 환류체계 방안과 함께 통합 운영방법과 후속 과제를 발굴하여 제안할 예정임.

1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도
(대상범위)				
발전소 소재지 거주 정책수요자(이장) (2차년도 대상 확대) 비영리 거버넌스 포함		발전소소재+인근 지역주민 정책결정자등	발전소 관련 거버넌스 구성원, 정책결정자 등	
(조사방식)				
심층인터뷰(설문조사, 의견수렴)		심층인터뷰+ 그룹 인터뷰(FGI)	심층인터뷰 (설문조사, 의견수렴)	
(주요내용)				
정책수요자 요구도 파악 및 의견청취	개선의견 유형 분류 주체별 역할 정립	통합거버넌스 조직 조직원 의견수렴	기존 거버넌스 운영현황 세부조사	운영 가이드라인과 성과 환류체계 제안
(결과활용)				
정책수요자와의 소통체계 도입	조직유형 기준 제시 우선지원사업 파악	거버넌스의 효율적 운영방안 제시	통합 거버넌스 운영제안	



제2장 미기후 모니터링

1. 연구개요
2. 미기후 모니터링
3. 극한기후 분석
4. 이산화탄소 측정
5. 요약 및 소결론

1. 연구개요

- 화력발전소는 대표적인 대기오염물질 배출시설인 동시에 온실가스 다량 배출시설로 주변 지역에 환경적 영향을 미치고 있음. 이에 따라 본 연구용역은 화력발전소가 주변 지역에 미치는 영향 정도를 보다 과학적으로 규명하기 위해 화력발전소 주변지역의 미기후 장기 모니터링을 추진함.
- 1차년도에는 10개소의 미기후 모니터링 지점을 선정하고 관련 지점에 미기후 DB를 확보하였고, 2차년도에는 22개소를 추가 설치·운영하여 총 32개소를 운영중에 있음.
 - 2차년도부터 총 32개소의 미기후 모니터링 측정소를 운영 및 유지 보수하고 장기 DB를 확보하였으며, 온도, 습도, 극한기후 분석 자료를 바탕으로 화력발전소 지역별 분석을 실시함.
- 3차년도의 자문내용을 반영하여 온실가스 중 이산화탄소농도 측정을 통해 발전소 인접 지역과 이격거리가 있는 지역의 이산화탄소 농도를 비교·분석함.

2. 미기후 모니터링

2.1. 측정지점 및 기준

- 온실가스 다량 배출시설인 화력발전소 주변지역의 해안 및 내륙방향 이격거리별 온·습도, 이산화탄소 등 미기후 변화에 대한 자료를 축적하고 통계를 분석하여 미기후 변화 특성을 도출함.
- 미기후 모니터링을 위해 소형 기상 데이터 로거인 HOBO 센서(U12-012, Onset)를 측정장비로 활용하였으며, 정기적으로(4~6개월) 장비 점검과 데이터를 수집·분석함.
- 1차년도부터 측정지점을 지속 확대하여 화력발전소를 중심으로 반경 2km 이내, 5km 부근, 10km 이상으로 해안(Coast)과 내륙(Land)지점을 구분하였고, 각 발전소별로 6개 지점씩 선정 운영하였음.

- 추가로 대조군인 나대지 지점 각 1개소, 4세부 생태환경 모니터링 결과와 연계 분석을 위한 산림 조사지점 각 1개소까지 총 32개소 지점을 운영함.
- 미기상 측정장비 설치를 위하여 협조공문 발송 및 사전 안내 후 상대적으로 인적이 드문 곳을 선정하였으나, 일부 장비가 분실되고 망실(보호캡을 설치하였으나 악기상과 동·식물의 영향 등)되는 경우가 발생되어 자료를 연속적으로 수집하지 못하는 문제점이 발생되었음.
- 안정적인 미기후 모니터링을 위해 손망실 의심 지점을 불시 점검하고 데이터 손실을 최소화하기 위해 수시 확인을 추진함.
- 모니터링 실험군은 화력발전소를 중심으로 해안과 내륙방향으로 2km 이내, 5km 부근, 10km 이상 지역으로 구분하여 설치하였으며, 대조군은 각 지역별 내륙 특성(상대적으로 나대지거나 숲인 경우)을 내륙방향 1km~5km 이내에 추가로 설치하여 운영함.
- 보령 및 태안지역은 내륙방향이 숲 주변 위주로 설치되어 나대지에 추가 설치하였고, 당진 및 서천지역은 내륙방향이 나대지, 논경지 주변에 설치되어 숲 지역에 추가 설치함.



[그림 2.1] 미기후 모니터링 지점지도



온습도 측정기

CO₂ 측정기

[그림 2.2] 미기후 측정 데이터 수집 및 현장 측정(12월 8일)

[표 2.1] 미기후 모니터링 지점

지 역	구 분	거 리	위치(위경도)		지점번호	비고
보 령 (BR)	해 안	2km	36.428620	126.507860	BR_C_02	
		5km	36.372003	126.525430	BR_C_05	
		10km	36.485848	126.481210	BR_C_10	
	내 륵	2km	36.400991	126.516780	BR_L_02	
		5km	36.409946	126.548867	BR_L_05	분살유려 높음
		10km	36.409925	126.604468	BR_L_10	
	대조군	—	36.409508	126.524899	BR_L_00	
	생 태	—	36.399703	126.501578	BR_G_00	
당 진 (DJ)	해 안	2km	37.033487	126.539158	DJ_C_02	
		5km	37.025780	126.570120	DJ_C_05	분살유려 높음
		10km	36.964136	126.514207	DJ_C_10	
	내 륵	2km	37.052486	126.499894	DJ_L_02	
		5km	37.011887	126.529998	DJ_L_05	
		10km	36.958170	126.552570	DJ_L_10	
	대조군	—	37.049382	126.520569	DJ_L_00	
	생 태	—	37.0491429	126.5206542	DJ_G_00	
서 천 (SC)	해 안	2km	36.152786	126.516534	SC_C_02	
		5km	36.136737	126.557387	SC_C_05	
		10km	36.099805	126.612421	SC_C_10	

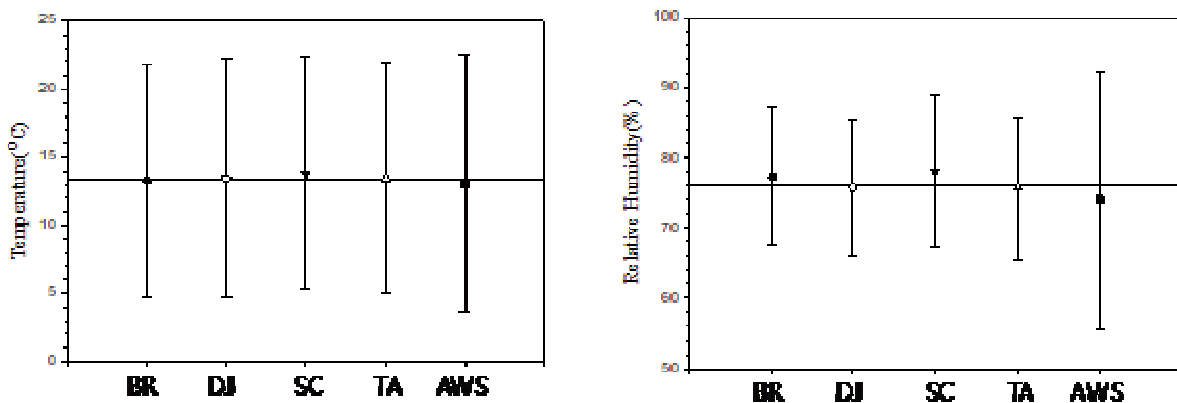
지 역	구 분	거 리	위치(위경도)		지점번호	비고
서 천 (SC)	내 룩	2km	36.155774	126.518788	SC_L_02	
		5km	36.164443	126.546441	SC_L_05	
		10km	36.150554	126.602610	SC_L_10	
	대조군	—	36.157912	126.531755	SC_L_00	
	생 태	—	36.151456	126.503478	SC_G_00	
태 안 (TA)	해 안	2km	36.901526	126.205040	TA_C_02	
		5km	36.883988	126.196449	TA_C_05	분살유려 높음
		10km	36.839106	126.192503	TA_C_10	
	내 룩	2km	36.891767	126.247681	TA_L_02	
		5km	36.852450	126.230750	TA_L_05	
		10km	36.812800	126.254810	TA_L_10	
	대조군	—	36.879505	126.222631	TA_L_00	
	생 태	—	36.897943	126.224127	TA_G_00	

2.2. 측정결과

2.2.1. 온 · 습도 종합분석

- 측정데이터는 본 과제가 수행된 2019년을 기점으로 2019년 1월 1일부터 2021년 11월 30일까지를 대상으로 분석함.
- 발전소 인근지역인 보령, 당진, 서천, 태안에서 미기후 측정결과 온도는 각각 $13.3 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$, $13.5 \pm 8.7^{\circ}\text{C}$, $13.8 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$, $13.5 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 서천이 $13.8 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타남.
- 발전소 인근지역인 보령, 당진, 서천, 태안에서 미기후 측정결과 습도의 경우 각각 $77.3 \pm 9.9\%$, $75.7 \pm 9.6\%$, $79.1 \pm 10.8\%$, $75.7 \pm 10.1\%$ 로 나타났으며, 서천이 $79.1 \pm 10.8\%$ 로 가장 높게 나타남.
- 4곳(보령, 당진, 서천, 태안)의 측정지역 온·습도를 기상청에서 운영중인 기상방재센터(AWS) 6곳(대산, 당진, 태안, 춘장대, 대천항, 만리포)의 온·습도를 비교한 결과,

- 4곳 측정지역 기온은 $13.5 \pm 8.5^\circ\text{C}$ 로 6개 비교 지역의 기온 $13.1 \pm 9.4^\circ\text{C}$ 에 비해 평균 0.4°C 더 높게 나타났고, 습도의 경우 4곳은 $77.0 \pm 10.1\%$ 로 6개 비교 지역 $74.0 \pm 18.3\%$ 보다 평균 3.0% 더 높은 것으로 확인됨.
- 3년 동안 실측 데이터에 국한하여 확인한 결과 화력발전소 주변지역의 기온상승이 높게 나타나 분석된 결과가 1차년도 기후변화 시나리오 전망결과²⁾와 유사한 것을 확인함.



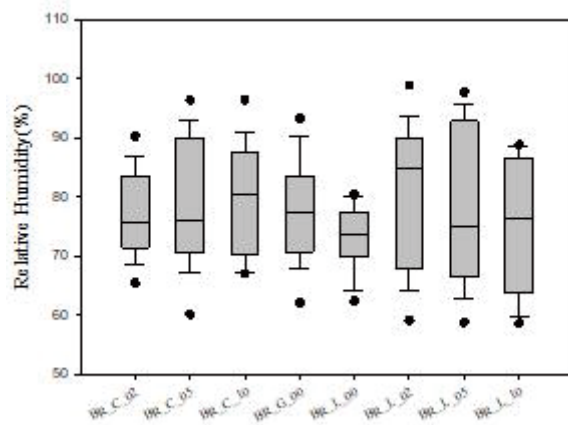
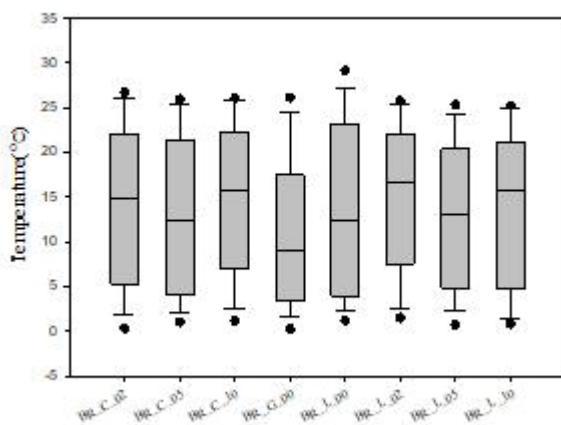
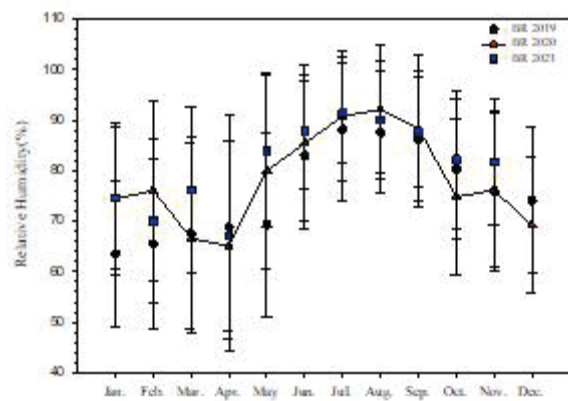
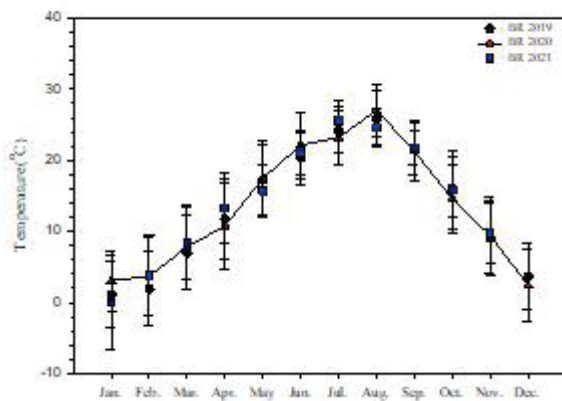
[그림 2.3] 발전소 인근 지역 온·습도 측정결과

2.2.2. 보령지역

- 보령지역 월평균 최저온도는 2021년 1월 $0.2 \pm 0.5^\circ\text{C}$ 로 나타났고, 최고온도는 2021년 8월 $26.7 \pm 1.3^\circ\text{C}$ 로 나타남.
- 이격거리별 온도는 내륙으로 2km 지점에서 $15.2 \pm 8.4^\circ\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고, 해안 10km 지점이 $14.4 \pm 8.6^\circ\text{C}$, 해안 2km 지점이 $13.9 \pm 8.8^\circ\text{C}$ 순으로 높게 측정되어 대조군(상대적 나대지)의 평균온도가 $11.1 \pm 8.2^\circ\text{C}$ 로 가장 낮게 나타남.
- 이격거리별 평균온도는 $11.1 \sim 15.2^\circ\text{C}$ 로 편차는 $8.1 \sim 9.6^\circ\text{C}$ 로 확인되었으며 가을, 겨울 보다는 봄, 여름의 온도 편차가 더 크게 나타났고, 이격거리별 온도변화 특성은 확인되지 않았음.

2) 1차년도 기후변화 시나리오전망 분석결과 충남도 규모(100km)보다 지역(발전소 주변) 규모(10km)의 기온상승률이 높게 나타남(1차년도 보고서 111쪽 참조).

- 보령지역 습도는 2020년 8월에 $94.1 \pm 7.1\%$ 로 최고치로 나타났으며, 2019년 1월이 $62.7 \pm 4.6\%$ 로 최저치로 나타남.
- 이격거리별 습도는 내륙 2km 지점이 $80.4 \pm 11.7\%$ 로 가장 높게 나타났으며, 해안 10km 지점이 $79.9 \pm 9.2\%$, 해양 5km 지점이 $78.5 \pm 10.7\%$ 순으로 높게 나타나 대조군(상대적 나대지) $72.8 \pm 5.2\%$ 로 가장 낮게 나타남.
- 이격거리별 평균습도는 $72.8 \sim 80.4\%$, 편차는 $5.2 \sim 11.7\%$ 로 확인되었으며, 가을, 겨울 보다는 봄, 여름의 습도 편차가 더 크게 나타났고 2020년 여름은 많은 강우량과 태풍에 영향으로 다른 연도보다 습도가 높게 나타남.



(a) 온도

(b) 습도

[그림 2.4] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(보령)

[표 2.2] 보령의 지점별 온도(°C) 변화

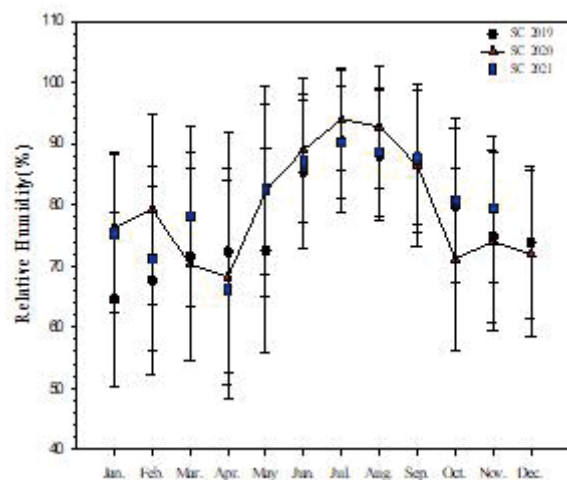
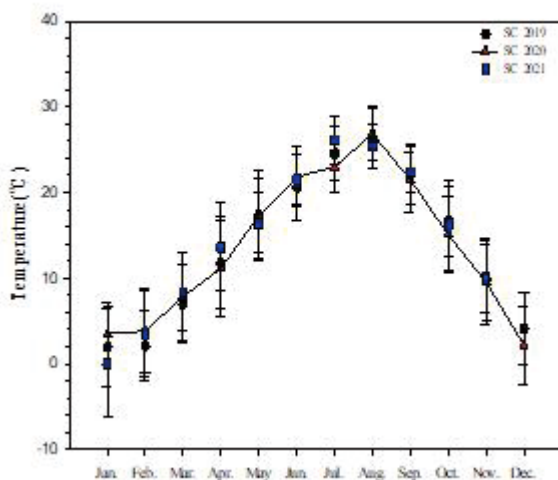
연도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	BR_C_02	0.5	1.7	6.8	11.3	17.0	20.4	24.4	26.7	22.2	16.6	9.4	3.9
	BR_C_05	1.9	2.3	6.9	11.6	16.8	19.9	23.6	25.5	21.8	16.6	9.7	4.0
	BR_C_10	1.0	1.4	6.9	12.0	17.1	20.6	24.4	26.2	21.6	16.0	8.8	3.4
	BR_G_00	1.3	1.6	6.2	10.8	16.7	19.9	23.9	25.6	21.5	15.9	9.0	3.7
	BR_L_00	1.9	2.9	7.3	12.2	19.0	22.8	26.5	28.4	23.1	16.8	9.3	4.2
	BR_L_02	1.3	2.0	7.2	12.0	16.8	19.7	23.6	25.3	21.4	15.8	8.8	3.7
	BR_L_05	0.9	2.5	8.0	12.5	16.8	19.4	23.6	25.0	21.2	15.7	8.7	3.9
	BR_L_10	0.8	1.3	6.5	11.3	17.6	20.1	23.5	25.1	21.0	15.9	9.0	2.9
2020	BR_C_02	3.2	3.7	8.0	11.0	16.7	21.5	22.8	26.9	21.4	14.7	9.6	2.1
	BR_C_05	3.5	4.0	7.5	10.0	—	—	—	26.4	21.3	14.9	9.6	2.1
	BR_C_10	2.7	3.1	7.1	10.9	16.5	21.1	22.5	25.9	—	—	—	—
	BR_G_00	2.7	3.2	6.7	8.9	—	—	—	26.4	20.6	13.9	9.1	2.0
	BR_L_00	3.3	4.5	8.9	12.5	20.1	25.0	25.4	29.6	23.3	15.6	9.8	2.4
	BR_L_02	2.9	3.7	7.8	11.1	16.7	21.0	22.2	25.9	—	—	—	—
	BR_L_05	3.5	4.6	9.2	11.5	—	—	—	25.8	20.0	13.8	9.4	2.3
	BR_L_10	2.4	3.0	7.2	9.6	—	—	—	—	—	—	—	—
2021	BR_C_02	(0.1)	3.7	8.1	13.1	16.0	21.9	26.5	25.5	22.9	16.5	10.0	—
	BR_C_05	(0.0)	3.6	8.3	13.3	15.6	20.8	25.6	24.9	22.3	16.3	10.1	—
	BR_C_10	—	3.2	7.7	13.1	15.7	21.2	25.9	25.1	22.5	16.2	10.0	—
	BR_G_00	(0.3)	3.5	7.6	12.6	15.2	—	—	—	—	15.6	9.4	—
	BR_L_00	0.8	3.0	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	BR_L_02	—	—	—	—	16.6	21.2	25.6	24.6	22.1	15.4	9.3	—
	BR_L_05	0.5	4.9	10.2	14.4	15.2	20.2	24.4	23.8	21.5	—	—	—
	BR_L_10	—	—	—	—	17.1	20.9	25.3	24.0	21.3	15.6	9.2	—

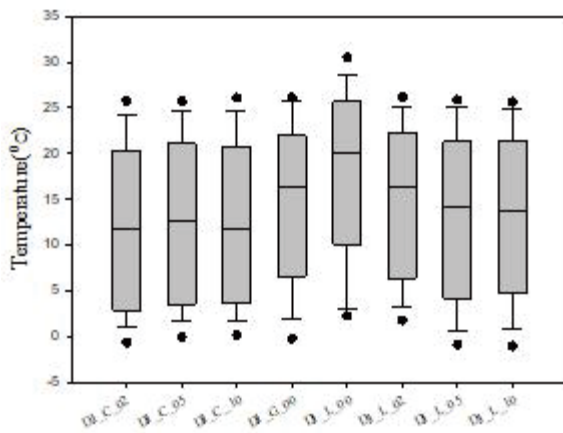
[표 2.3] 보령의 지점별 습도(%) 변화

연도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	BR_C_02	69.7	69.2	72.3	73.8	72.1	83.6	87.3	83.7	83.1	77.3	74.0	73.6
	BR_C_05	59.4	60.8	67.9	69.0	72.7	85.9	91.9	90.6	87.1	78.8	72.8	71.6
	BR_C_10	67.1	69.1	70.0	68.5	71.7	82.2	87.0	86.0	86.7	81.2	76.3	76.1
	BR_G_00	60.6	65.1	69.8	71.9	71.1	83.9	89.0	89.2	88.9	83.2	78.2	74.7
	BR_L_00	62.6	62.5	68.5	70.6	66.8	74.8	78.3	77.5	80.3	78.0	75.5	73.9
	BR_L_02	57.1	67.4	64.0	64.2	68.2	84.9	90.7	91.1	89.7	84.8	80.0	75.2
	BR_L_05	66.6	66.6	65.7	67.9	73.0	89.2	93.6	94.6	87.1	81.6	78.2	73.3
	BR_L_10	58.6	63.6	62.5	64.6	59.5	79.3	87.6	87.4	86.0	77.9	72.9	74.3
2020	BR_C_02	73.7	75.6	65.7	65.1	81.0	86.1	91.3	89.9	83.3	70.8	73.5	69.2
	BR_C_05	71.8	75.8	67.8	67.3	—	—	—	98.7	93.1	73.7	76.5	71.0
	BR_C_10	77.1	79.7	71.2	67.4	83.9	90.1	93.8	98.8	—	—	—	—
	BR_G_00	76.0	78.3	70.6	70.7	—	—	—	93.7	92.8	77.2	80.6	69.3
	BR_L_00	75.2	75.0	67.0	64.9	71.4	75.3	80.6	80.0	77.8	71.3	73.4	70.2
	BR_L_02	75.6	76.8	67.0	64.6	83.4	90.2	97.4	99.6	—	—	—	—
	BR_L_05	70.9	71.1	59.3	58.3	—	—	—	98.2	95.0	81.0	76.7	66.1
	BR_L_10	74.5	76.4	63.9	61.7	—	—	—	—	—	—	—	—
2021	BR_C_02	74.6	70.5	77.8	68.2	80.2	83.0	86.3	85.1	84.9	80.0	80.5	—
	BR_C_05	79.5	73.7	78.9	67.6	85.0	91.3	94.6	90.9	89.2	82.1	81.6	—
	BR_C_10	—	69.6	77.6	67.1	83.3	87.9	90.5	89.3	86.7	82.0	81.3	—
	BR_G_00	77.9	72.0	78.7	69.6	83.6	—	—	—	84.3	84.1	81.3	—
	BR_L_00	70.3	71.6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	BR_L_02	—	—	—	—	85.8	85.7	90.1	89.8	86.8	84.7	84.6	—
	BR_L_05	70.6	64.3	67.8	62.6	88.3	93.5	97.5	95.9	92.7	—	—	—
	BR_L_10	—	—	—	—	80.9	84.8	88.7	88.9	87.8	80.1	80.5	—

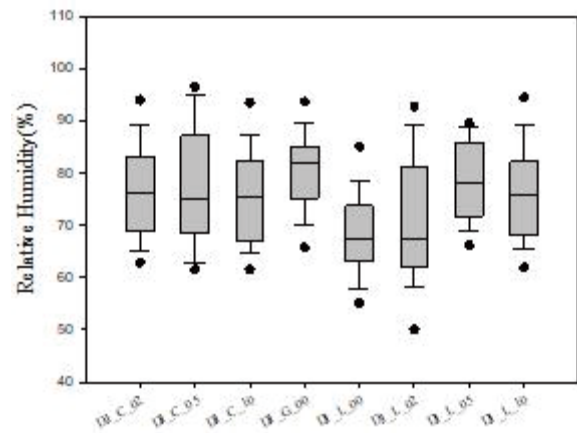
2.2.3. 당진지역

- 당진지역 월평균 최저온도는 2021년 1월 $-0.9 \pm 0.9^{\circ}\text{C}$ 로 4개 지역 중 가장 낮게 나타났으며, 최고온도는 2019년 8월에 $26.4 \pm 1.8^{\circ}\text{C}$ 로 나타남.
- 이격거리에 따른 3년(2019~2021년) 평균온도는 내륙 0km 지점에서 $18.2 \pm 9.2^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고 대조군(상대적 숲)과 내륙 2km 지점에서 각각 $14.6 \pm 9.0^{\circ}\text{C}$ 와 $14.6 \pm 8.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며 해안 2km 지점이 $12.1 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 온도를 보임.
- 이격거리별 평균온도는 $12.1 \sim 18.2^{\circ}\text{C}$, 편차는 $8.2 \sim 9.2^{\circ}\text{C}$ 로 확인되었으며, 여름철 편차가 약간 크게 나타났지만 대부분 유사한 수준으로 확인됨.
- 습도는 2020년 8월에 $93.3 \pm 4.6\%$ 로 최고치를 보였고, 2019년 1월 $62.9 \pm 4.3\%$ 로 최저치를 보였고, 이격거리별 온도와 습도에 대한 특이점이나 경향성은 확인되지 않음.
- 이격거리별 습도는 대조군이 $80.2 \pm 7.5\%$ 로 가장 높게 나타났으며, 내륙 5km와 해안 5km가 각각 $78.8 \pm 7.7\%$, $77.4 \pm 11.0\%$ 로 그 뒤를 이었으며, 내륙 0km가 $68.3 \pm 7.4\%$ 로 가장 낮게 나타남.
- 이격거리별 평균습도는 $68.3 \sim 80.2\%$, 편차는 $7.4 \sim 11.0\%$ 로 확인되었으며, 타지역에 비해 상대적으로 월별 상대습도 편차가 크게 나타났음.





(a) 온도



(b) 습도

[그림 2.5] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(당진)

[표 2.4] 당진의 지점별 온도(°C) 변화

년도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	DJ_C_02	0.1	1.1	6.3	11.2	17.3	19.9	24.1	25.4	21.6	16.4	8.6	2.6
	DJ_C_05	0.7	1.6	6.6	11.2	17.1	—	—	—	21.2	17.1	9.1	3.3
	DJ_C_10	0.8	1.6	6.8	11.8	18.1	20.8	24.7	25.9	21.7	16.3	8.7	3.6
	DJ_G_00	—	—	—	—	19.5	20.9	24.8	25.9	21.7	16.3	8.6	2.7
	DJ_L_00	2.2	3.3	8.6	13.6	20.9	24.5	28.0	30.5	24.7	20.0	11.4	5.7
	DJ_L_02	2.2	2.7	7.6	12.1	18.2	20.5	24.5	26.2	22.8	18.3	10.5	4.7
	DJ_L_05	-0.5	0.5	5.9	11.0	17.4	20.2	24.5	25.5	21.4	15.9	8.0	2.4
	DJ_L_10	-1.0	0.4	6.3	11.4	17.7	20.3	24.4	25.3	20.7	15.2	7.4	2.5
2020	DJ_C_02	2.5	2.9	7.3	11.7	16.6	20.9	22.1	26.1	21.5	15.2	8.9	1.3
	DJ_C_05	2.9	3.5	7.8	11.8	16.6	21.0	22.2	25.9	21.3	15.1	9.1	1.9
	DJ_C_10	3.1	3.7	7.8	11.6	17.0	21.8	22.5	26.3	20.9	14.6	9.0	2.5
	DJ_G_00	2.4	2.4	6.2	10.4	16.4	21.6	22.5	25.7	20.9	14.7	8.5	1.2
	DJ_L_00	—	—	—	15.7	20.1	25.5	26.0	28.2	—	—	—	—
	DJ_L_02	4.4	5.0	9.3	12.8	17.4	21.3	22.2	26.3	22.5	17.1	10.8	3.8
	DJ_L_05	1.9	2.3	6.6	10.9	16.4	21.2	22.2	26.1	20.5	14.1	8.2	1.0
	DJ_L_10	1.8	2.8	7.3	11.9	17.0	21.6	22.1	25.8	20.4	13.3	8.0	1.6
2021	DJ_C_02	-1.4	2.8	7.9	13.5	15.9	—	—	—	21.5	16.1	9.2	—
	DJ_C_05	-1.0	3.2	8.1	13.4	15.9	20.7	25.6	24.8	22.1	16.2	9.3	—
	DJ_C_10	-0.4	3.6	8.4	13.6	16.1	—	—	—	21.0	15.6	8.9	—
	DJ_G_00	-1.6	1.9	6.9	12.5	15.8	21.5	26.3	24.9	21.9	15.8	8.9	—
	DJ_L_00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	DJ_L_02	0.8	4.8	9.4	14.2	16.4	20.6	25.5	24.8	22.5	17.3	11.1	—
	DJ_L_05	-1.8	2.1	7.3	13.2	15.8	21.0	25.8	24.6	21.6	15.4	8.6	—
	DJ_L_10	-1.2	3.0	8.1	13.7	16.0	21.1	25.6	24.2	21.2	14.9	8.4	—

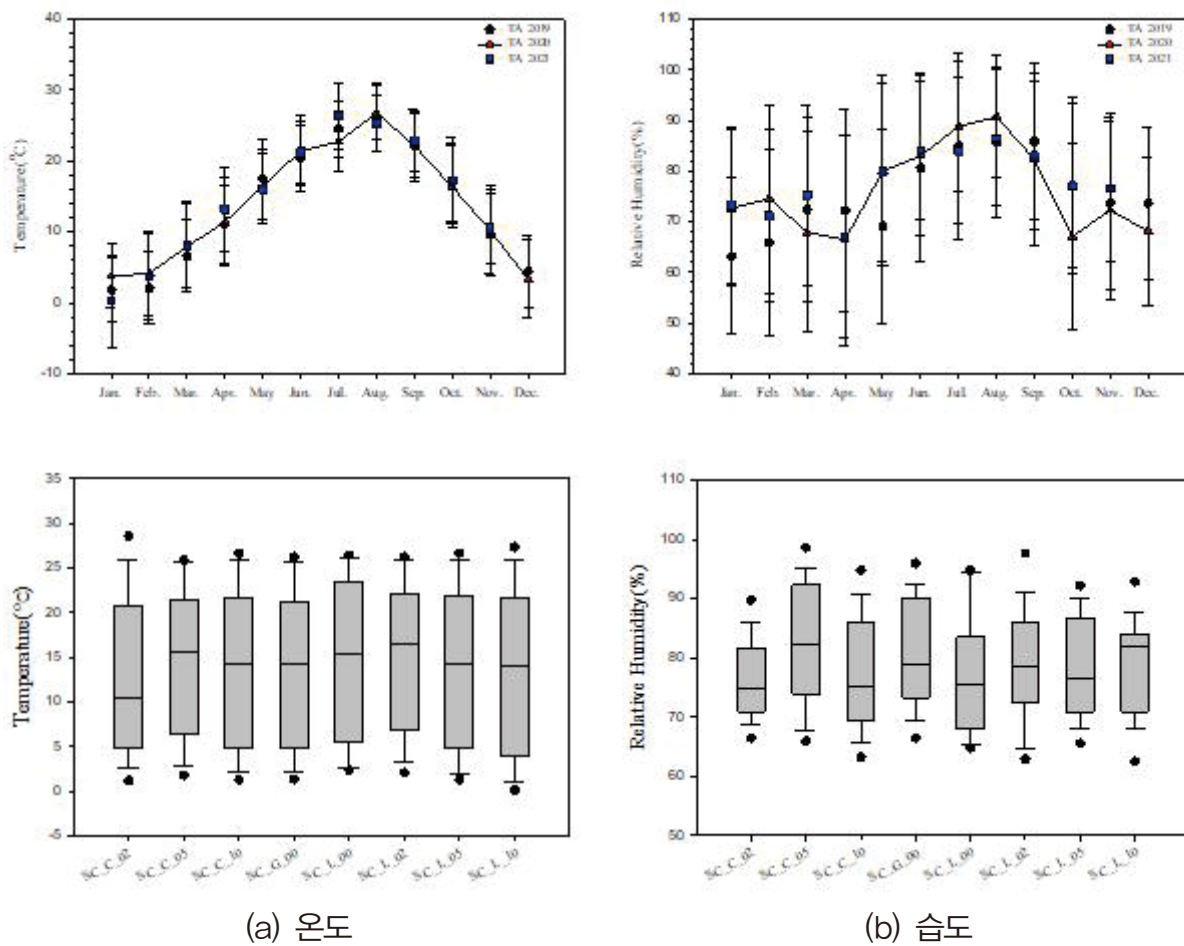
[표 2.5] 당진의 지점별 습도(%) 변화

년도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	DJ_C_02	63.7	65.1	71.0	69.7	68.5	84.4	88.1	89.1	86.8	79.2	73.9	76.8
	DJ_C_05	61.3	62.4	68.1	68.7	68.5	—	—	—	78.0	79.0	73.6	74.8
	DJ_C_10	63.0	65.9	69.4	67.0	65.9	80.5	85.7	87.5	87.3	80.0	76.5	77.9
	DJ_G_00	—	—	—	—	64.0	77.6	84.6	85.6	85.5	79.9	75.4	82.6
	DJ_L_00	58.6	61.1	65.4	64.7	61.6	70.4	75.4	72.1	75.5	66.7	65.2	67.3
	DJ_L_02	57.3	60.3	67.0	67.7	65.6	80.6	85.5	85.0	82.1	71.6	66.2	68.0
	DJ_L_05	68.2	70.2	74.6	71.9	70.3	84.6	88.2	89.6	88.3	81.5	76.4	78.0
	DJ_L_10	68.2	69.2	69.7	67.0	65.6	77.9	80.6	84.1	83.5	82.5	79.0	76.8
2020	DJ_C_02	76.8	76.6	68.2	62.1	80.8	86.7	92.9	95.2	82.2	68.6	72.7	69.1
	DJ_C_05	75.6	74.7	66.1	61.8	83.2	88.0	95.2	98.0	87.0	72.5	75.4	68.4
	DJ_C_10	75.6	75.0	67.2	60.2	80.0	84.1	92.8	94.2	85.8	72.9	75.4	67.7
	DJ_G_00	78.3	81.8	74.0	67.6	82.7	84.2	90.7	96.6	87.3	70.7	75.1	70.1
	DJ_L_00	—	—	—	55.1	68.6	70.7	77.1	85.1	—	—	—	—
	DJ_L_02	67.4	67.4	62.3	60.7	76.9	83.7	92.6	93.5	78.6	62.1	65.6	59.6
	DJ_L_05	78.3	78.1	70.8	64.9	85.8	84.8	89.5	87.5	85.3	72.6	75.4	70.4
	DJ_L_10	77.5	75.8	65.8	59.4	80.3	85.1	93.8	96.2	87.5	75.8	75.8	69.0
2021	DJ_C_02	72.7	69.5	76.2	66.5	77.8	—	—	—	82.1	76.1	77.3	—
	DJ_C_05	72.2	68.8	75.9	66.9	84.8	91.7	92.3	95.4	92.2	82.6	82.6	—
	DJ_C_10	75.1	66.6	73.8	64.8	76.5	—	—	—	88.9	84.2	83.1	—
	DJ_G_00	76.4	75.1	80.6	70.7	82.7	84.2	84.7	89.6	86.9	81.1	82.5	—
	DJ_L_00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	DJ_L_02	62.9	61.2	70.9	63.9	80.3	88.3	89.6	48.4	56.5	62.4	67.7	—
	DJ_L_05	74.6	71.5	78.5	66.7	74.7	85.1	86.1	87.6	88.4	83.0	83.3	—
	DJ_L_10	72.3	67.8	72.5	63.0	82.0	90.1	74.2	66.3	75.8	85.2	86.4	—

2.2.4. 서천지역

- 서천지역 월평균 최저온도는 2019년 1월이 $2.0 \pm 0.6^{\circ}\text{C}$ 로 나타났으며, 최고온도는 2019년 8월에 $26.3 \pm 0.5^{\circ}\text{C}$ 로 나타남.
- 이격거리별 평균온도는 내륙 0km 지점이 $14.9 \pm 8.8^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고, 내륙 2km와 해안 5km지점은 각각 $14.6 \pm 8.4^{\circ}\text{C}$, $14.0 \pm 8.4^{\circ}\text{C}$ 순으로 높게 나타났으며, 해안 2km 지점은 $12.3 \pm 8.8^{\circ}\text{C}$ 로 가장 낮은 평균온도로 나타남.
- 이격거리별 평균온도는 $12.3 \sim 14.9^{\circ}\text{C}$, 편차는 $8.4 \sim 9.1^{\circ}\text{C}$ 로 확인되었으며, 측정지점에 따른 월평균 온도와 편차가 유사하게 나타남.

- 습도는 2020년 7월에 $94.0 \pm 3.5\%$ 로 최고치를 보여, 다른 지역이 2020년 8월 최고치를 보인 것과 차이가 있었으며, 최저습도는 2019년 1월에 $64.6 \pm 1.9\%$ 로 나타남.
- 이격거리별 습도는 해안 5km가 $82.5 \pm 10.2\%$ 로 가장 높게 나타났고 내륙 10km 지점이 $78.9 \pm 8.4\%$ 순으로 나타남. 해안 5km를 제외하면 모두 습도가 80% 이하로 나타났는데 해안 2km 지점에서 $75.9 \pm 6.7\%$ 로 가장 낮은 수치를 보임.
- 이격거리별 평균습도는 75.9~82.5%, 편차는 6.7~10.2%로 확인되었으며, 해안 2km 지점의 편차가 가장 작게 나타남.



[그림 2.6] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(서천)

[표 2.6] 서천의 지점별 온도(°C)변화

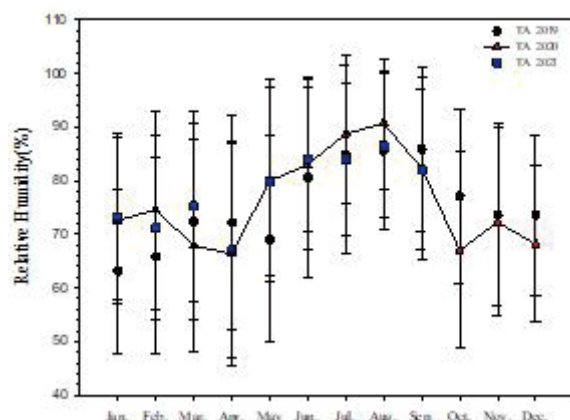
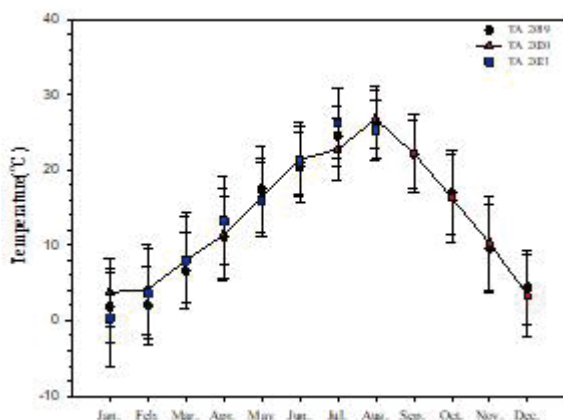
년도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	SC_C_02	2.7	2.6	7.1	11.7	17.4	20.8	24.6	26.8	22.6	17.4	10.5	4.8
	SC_C_05	1.8	1.8	6.4	11.1	16.2	19.6	23.8	25.6	21.4	16.0	9.4	3.9
	SC_C_10	2.1	2.2	7.0	11.9	17.5	20.9	24.8	26.8	22.2	16.9	10.0	4.1
	SC_G_00	2.1	2.0	6.7	11.4	16.9	20.0	24.0	26.2	21.9	16.7	10.1	4.2
	SC_L_00	2.3	2.5	8.0	13.2	19.5	22.8	26.0	26.2	22.3	17.7	10.2	4.4
	SC_L_02	2.1	2.1	6.7	11.2	17.1	20.3	24.3	26.3	22.1	16.9	9.9	4.2
	SC_L_05	1.8	2.0	6.8	11.4	16.8	20.2	24.2	25.9	21.9	16.6	9.9	4.2
	SC_L_10	0.7	1.5	7.2	12.4	17.5	20.3	24.7	26.8	21.8	15.5	8.5	2.9
2020	SC_C_02	4.2	4.8	8.4	11.2	—	—	—	29.0	22.5	16.1	10.1	2.5
	SC_C_05	3.3	3.4	7.1	10.2	16.3	21.0	22.6	25.7	—	—	—	—
	SC_C_10	3.5	4.0	7.9	11.1	17.2	21.7	22.6	26.5	21.3	15.1	9.7	1.9
	SC_G_00	3.6	3.7	7.4	10.9	16.7	21.0	22.4	26.2	21.1	15.3	9.8	2.4
	SC_L_00	3.8	4.6	8.9	12.8	18.9	23.6	24.5	26.4	—	—	—	—
	SC_L_02	3.6	3.9	7.7	10.8	17.2	21.6	22.9	25.7	—	—	—	—
	SC_L_05	3.4	3.7	7.6	10.5	17.3	21.8	23.0	26.6	21.5	15.3	9.8	2.2
	SC_L_10	2.5	2.7	7.9	11.6	17.6	21.9	23.3	28.2	21.0	13.7	8.2	0.8
2021	SC_C_02	0.9	4.2	8.6	13.9	16.8	22.0	25.7	—	22.0	16.3	10.4	—
	SC_C_05	—	3.2	7.8	12.7	15.6	21.1	26.0	25.2	22.7	15.9	9.8	—
	SC_C_10	0.1	3.6	8.3	13.4	16.3	21.7	26.2	25.5	22.3	16.4	10.2	—
	SC_G_00	0.1	3.2	7.8	13.2	16.0	21.3	25.8	25.2	22.1	16.5	10.3	—
	SC_L_00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	SC_L_02	—	4.4	9.0	14.2	16.4	21.6	26.1	25.5	22.5	16.6	10.7	—
	SC_L_05	0.3	3.5	8.0	13.3	16.5	22.1	26.6	25.7	22.5	16.5	10.3	—
	SC_L_10	-1.0	2.5	9.1	14.4	16.1	21.2	26.0	25.3	22.0	15.1	8.5	—

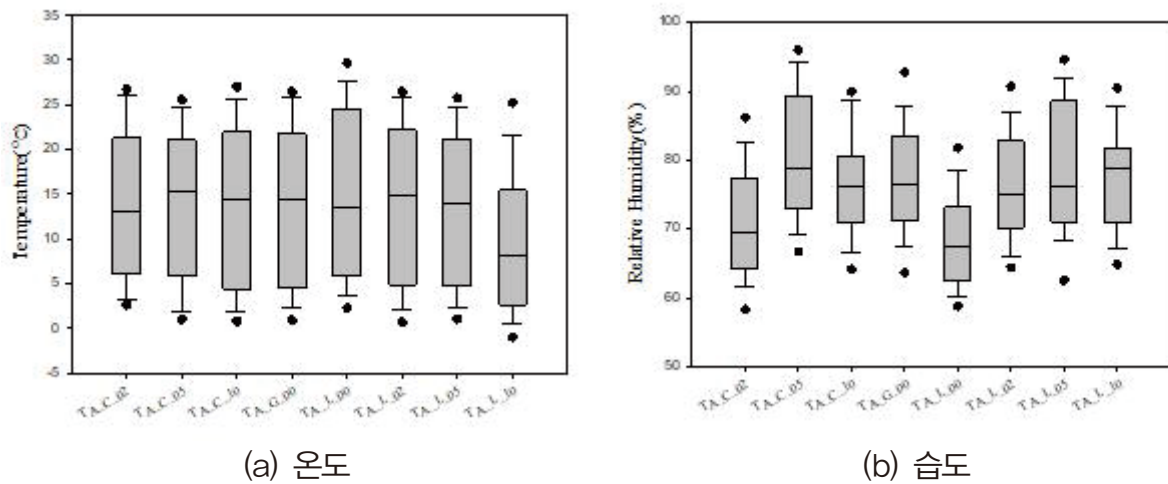
[표 2.7] 서천의 지점별 습도(%)변화

년도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	SC_C_02	66.0	69.3	74.9	75.8	75.5	86.2	90.6	85.8	85.2	77.1	72.1	71.1
	SC_C_05	64.8	67.7	73.6	74.9	77.9	89.4	93.7	92.6	92.6	85.3	77.8	75.3
	SC_C_10	61.7	64.0	69.1	69.9	70.4	81.2	87.1	83.6	84.9	77.0	71.5	70.6
	SC_G_00	64.0	67.7	73.0	73.7	73.8	87.2	91.5	87.7	88.0	80.1	74.7	73.7
	SC_L_00	64.8	66.8	68.8	68.0	65.7	83.5	93.0	94.8	83.3	75.7	72.7	72.5
	SC_L_02	64.2	67.5	73.1	74.9	73.8	86.1	90.3	87.2	86.5	78.5	74.3	72.8
	SC_L_05	63.5	66.6	71.5	73.0	74.4	86.8	90.4	89.1	87.6	79.6	72.5	70.8
	SC_L_10	68.1	71.6	68.5	68.5	68.8	82.6	86.3	83.7	87.7	85.4	82.9	83.8
2020	SC_C_02	73.4	76.1	69.4	68.4	—	—	—	84.9	81.6	69.4	72.2	70.9
	SC_C_05	77.8	82.4	73.8	73.2	88.2	94.3	97.9	99.1	—	—	—	—
	SC_C_10	73.5	76.8	67.4	65.4	81.3	88.3	95.4	94.4	86.3	69.7	70.3	69.4
	SC_G_00	76.4	80.5	72.3	69.6	84.2	91.1	95.6	96.5	91.9	72.5	75.5	73.1
	SC_L_00	75.0	76.0	67.9	65.4	76.4	81.6	87.1	94.4	—	—	—	—
	SC_L_02	75.9	79.2	71.7	70.3	83.5	90.0	94.8	99.5	—	—	—	—
	SC_L_05	75.1	78.0	70.3	69.8	79.5	86.5	91.7	93.1	84.6	68.9	71.2	69.3
	SC_L_10	82.7	84.9	68.9	63.5	83.0	90.9	95.2	82.7	87.6	75.2	81.0	77.0
2021	SC_C_02	73.1	72.8	79.6	68.6	81.0	88.0	95.2	—	80.8	78.3	75.5	—
	SC_C_05	—	68.3	79.4	67.7	86.5	89.3	91.5	92.2	93.4	83.8	83.2	—
	SC_C_10	72.3	69.3	77.9	65.7	84.9	90.1	90.8	87.1	86.7	80.1	79.5	—
	SC_G_00	77.9	75.0	83.0	69.4	86.2	91.3	92.7	90.8	92.4	82.4	81.8	—
	SC_L_00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	SC_L_02	—	64.6	72.5	62.0	78.4	84.0	85.6	85.1	84.3	79.1	75.7	—
	SC_L_05	71.9	71.0	80.4	67.8	80.4	83.4	86.7	87.3	85.4	80.5	80.3	—
	SC_L_10	81.1	76.6	73.7	61.2	80.1	83.3	89.3	—	—	—	—	—

2.2.5. 태안지역

- 태안지역 월평균 최저온도는 2021년 1월 $0.3 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타났고, 최고온도는 2020년 8월 $26.8 \pm 1.2^{\circ}\text{C}$ 로 나타남. 이격거리별 평균온도($13.3 \sim 15.2^{\circ}\text{C}$) 및 편차($8.2 \sim 9.1^{\circ}\text{C}$)는 내륙 10km 지점을 제외하고 유사하게 나타남.
- 이격거리별 평균온도는 대조군이 $15.2 \pm 9.1^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났고, 해안 2km지점이 $14.2 \pm 8.2^{\circ}\text{C}$, 내륙 2km 지점이 $13.9 \pm 8.7^{\circ}\text{C}$ 순으로 높게 나타났으며, 가장 낮은 곳은 내륙 10km 지점으로 $10.0 \pm 8.1^{\circ}\text{C}$ 로 나타남.
- 내륙 10km 지점의 경우 기기 분실로 인해 2019년 4월부터 8월까지의 자료가 없어 해당 기간동안 온도 정보가 제대로 반영되지 않아 타 측정정보와 상이한 결과가 나타난 것으로 판단됨.
- 습도는 2020년 8월 $90.7 \pm 5.3\%$ 로 측정치 중 최고치를 보였으며, 2019년 1월은 $62.7 \pm 3.9\%$ 로 최저치를 보임.
- 이격거리별 습도는 해안 5km 지점에서 $80.8 \pm 9.5\%$ 로 가장 높은 습도를 보였고, 내륙 5km 지점과 내륙 10km 지점에서 각각 $79.1 \pm 9.6\%$ 와 $77.5 \pm 7.1\%$ 순으로 높게 나타났으며, 내륙 0km 지점에서 $68.7 \pm 6.6\%$ 로 가장 낮게 나타남.
- 이격거리별 평균습도는 $68.7 \sim 80.8\%$, 편차는 $6.6 \sim 9.6\%$ 로 확인되어, 편차가 같은 군 지역인 서천과 유사하게 $7 \sim 10\%$ 범위로 나타나, 시 지역인 당진·보령보다 군지역의 편차가 더 작게 나타남.





[그림 2.7] 측정지점 및 시간에 따른 온도와 습도의 특성(태안)

[표 2.8] 태안의 지점별 온도(°C) 변화

년도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	TA_C_02	3.14	2.93	6.91	11.95	18.62	21.39	25.38	—	—	—	—	6.44
	TA_C_05	1.84	1.79	6.29	10.73	16.68	19.68	24.05	25.49	21.68	16.92	10.07	4.37
	TA_C_10	1.52	1.30	5.53	9.76	16.01	19.11	23.84	25.45	21.39	16.34	9.04	4.02
	TA_G_00	2.23	1.49	6.13	10.54	16.80	19.44	23.84	25.50	21.98	17.04	9.77	3.94
	TA_L_00	3.42	3.88	8.31	13.25	19.85	23.60	27.04	29.85	24.59	19.72	11.46	5.62
	TA_L_02	1.13	1.90	6.87	11.50	17.85	20.76	24.85	26.35	22.30	17.19	9.41	4.00
	TA_L_05	1.68	2.04	6.25	10.16	16.23	18.81	23.43	24.88	21.54	16.86	9.81	4.22
	TA_L_10	-0.05	1.10	5.74	—	—	—	—	—	20.56	14.59	7.35	2.75
2020	TA_C_02	5.99	5.77	8.79	11.71	16.49	21.00	22.84	26.99	23.61	18.84	12.92	5.68
	TA_C_05	3.80	3.63	6.95	10.03	15.06	19.47	21.35	25.66	21.01	15.75	10.23	3.00
	TA_C_10	3.15	3.49	7.34	11.52	16.52	21.78	23.17	26.94	22.25	15.69	9.42	2.75
	TA_G_00	3.11	3.42	7.13	10.74	15.77	20.53	21.80	25.88	21.54	15.82	9.81	2.62
	TA_L_00	5.08	5.96	10.16	13.96	19.18	24.79	25.96	29.39	24.64	18.24	11.61	4.32
	TA_L_02	3.29	4.23	8.24	12.07	17.05	22.00	22.76	26.65	22.24	15.96	9.52	2.51
	TA_L_05	3.41	3.67	7.23	10.36	15.50	20.74	22.16	26.22	21.30	15.63	9.85	2.77
	TA_L_10	2.18	2.86	7.64	11.13	15.73	20.91	21.96	26.32	21.04	14.57	8.45	1.37
2021	TA_C_02	2.4	5.5	8.7	13.3	16.2	21.2	26.4	26.1	24.4	19.8	13.7	—
	TA_C_05	0.1	8.4	—	—	15.6	19.8	24.7	24.3	22.0	17.0	10.8	—
	TA_C_10	-0.1	3.3	7.5	13.3	16.5	22.1	27.2	25.8	23.2	17.1	10.6	—
	TA_G_00	-0.2	3.2	7.8	13.1	16.6	22.2	27.5	25.9	23.4	17.5	10.5	—
	TA_L_00	1.6	9.1	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	TA_L_02	-0.1	3.8	8.4	13.9	16.5	21.7	26.2	25.2	22.5	16.8	10.0	—
	TA_L_05	-0.1	3.6	7.9	12.6	15.3	20.6	25.5	24.6	21.9	16.6	10.2	—
	TA_L_10	-1.3	2.6	8.0	13.2	12.2	—	—	—	20.8	15.7	8.8	—

[표 2.9] 태안의 지점별 습도(%) 변화

년도	지점	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월
2019	TA_C_02	62.90	66.03	74.87	69.52	71.97	74.06	1.00	—	—	—	—	63.27
	TA_C_05	64.86	68.17	71.49	72.23	68.92	82.67	86.95	87.72	88.70	79.97	73.57	74.96
	TA_C_10	63.33	68.28	76.35	76.94	72.47	85.14	87.86	89.06	91.02	78.10	73.33	75.53
	TA_G_00	57.20	67.25	72.63	72.66	68.05	83.55	87.96	87.48	86.65	77.86	75.45	76.84
	TA_L_00	58.18	59.96	67.13	67.36	62.68	71.17	77.04	72.84	76.68	68.95	67.21	68.01
	TA_L_02	65.27	66.23	70.70	70.82	66.34	79.60	85.06	84.25	84.31	76.17	73.56	76.13
	TA_L_05	61.19	63.25	73.95	75.93	73.35	88.20	91.31	92.24	89.45	78.94	73.86	73.90
	TA_L_10	68.97	67.76	69.49	—	—	—	—	—	81.60	80.18	79.15	80.39
2020	TA_C_02	63.31	67.88	64.55	66.36	77.37	81.45	85.39	86.75	75.25	57.52	62.10	59.43
	TA_C_05	73.48	77.55	73.16	73.36	86.96	91.86	95.65	96.40	88.35	71.47	74.33	71.42
	TA_C_10	75.03	77.55	70.22	67.25	78.89	80.78	86.73	89.37	79.75	64.58	71.37	67.23
	TA_G_00	75.56	77.51	70.65	68.48	82.44	85.98	92.29	93.63	84.44	68.29	73.97	68.87
	TA_L_00	67.31	67.70	62.09	60.26	71.74	74.01	78.01	80.09	71.89	60.89	65.75	61.71
	TA_L_02	74.92	75.13	66.85	62.84	78.53	81.35	89.58	92.70	81.26	67.88	74.69	70.03
	TA_L_05	73.33	75.41	68.94	68.21	84.38	86.86	94.24	95.40	89.96	70.24	75.19	69.49
	TA_L_10	78.19	77.74	66.90	64.15	79.81	81.81	88.14	91.29	87.51	75.28	80.88	76.80
2021	TA_C_02	65.8	64.1	72.3	66.2	75.9	80.2	79.7	81.7	75.7	65.2	65.4	—
	TA_C_05	75.0	90.5	—	—	85.4	91.9	92.8	94.2	90.2	81.5	80.0	—
	TA_C_10	72.2	70.6	75.9	66.2	76.1	78.8	78.2	81.0	77.6	72.9	73.8	—
	TA_G_00	74.5	72.7	76.2	67.1	79.5	82.9	78.6	83.6	81.3	78.4	79.8	—
	TA_L_00	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
	TA_L_02	74.7	73.6	74.3	65.7	79.8	83.2	85.9	87.2	84.3	81.5	82.2	—
	TA_L_05	76.3	70.3	76.2	69.7	82.8	87.6	88.7	91.0	88.8	82.7	78.5	—
	TA_L_10	81.8	75.2	76.5	67.6	82.9	—	—	—	—	—	—	—

3. 극한기후 분석

- 2021년 IPCC가 발간한 6차 평가보고서(Assessment Report, AR 6th) 제1실무그룹 보고서에 따르면 지구온난화로 인해 지난 21세기 첫 20년 동안(2001~2020년) 1850~1900년 대비 0.99℃가 상승하였음.
- 1901년~2018년 동안 평균 해수면은 0.2m(0.15~0.25) 상승했으며, 1901~1971년 1.3 mm/년, 1971~2006년 1.9mm/년, 2006~2008년 3.7mm/년으로 더욱 가파르게 증가하여 앞으로 해수면 상승률은 더욱 가속화될 것으로 전망함.
- IPCC 6차 평가보고서(AR6) 공통사회경제경로(SSP, Shared Socioeconomic Pathways)에 따르면 화석연료 기반 성장과 높은 인적 투자에 따라 경제적 기반 여건 향상으로 기후변화 적응 능력은 높아지겠지만, 이러한 사회경제가 유지된다면 온실가스가 지속적으로 증가하는 사회구조가 되어,
 - 21세기 말 전 지구 평균온도는 5.2℃, 해수면은 87cm가 상승하고 생태계 파괴, 폭염과 열대야 등 극한지수는 더욱 극적으로 증가할 것으로 전망하였음.
 - 한반도 기후변화 전망보고서(국립기상과학원, 2020)에 따르면 21세기말 한반도는 평균기온 최대 7.0℃(최고, 최저기온 각각 7.2℃, 7.6℃) 증가하고, 강수량은 최대 205.3mm 증가하고 강수일수 8.3일 감소하여 강수총량은 늘어난데 비해 비오는 날은 감소하여 강수일 집중에 따른 심한 홍수 또는 무강일수 증가로 인한 가뭄이 증가할 것으로 전망함.
 - 충청남도 기후변화 전망(기상청 기후정보포털, 2022)³⁾에 따르면 21세기말 평균기온은 최대 4.0℃(최고, 최저기온 각각 4.3℃, 3.7℃) 증가하고, 강수량은 최대 132.9mm 증가할 것으로 전망함.
- 기상청(기상자료개방포털, 2021) 기준에 따라 일 최고기온이 33℃ 이상일 때, 한파일수는 일 최저기온이 -12℃ 이하인 날을 대상으로 화력발전소 주변 지역을 분석함.
 - 2019년 폭염일수는 당진 41회, 서천 35회, 태안 30회, 보령 13회 순 2019년 폭염일수는 당진 41회, 서천 35회, 태안 30회, 보령 13회 순으로 나타남.
 - 2020년 폭염일수는 태안 41회, 서천 31회, 당진 23회, 보령 17회 순으로 확인되었고,

3) 충청남도에 대한 AR6 전망보고서는 발간 전으로 충청남도 전망은 AR5 결과임

- 2021년 폭염일수는 태안 42회, 보령 38회, 서천 15회, 당진 14회 순으로 보령과 태안의 폭염일수는 증가하는 반면 당진과 서천은 감소하는 것으로 나타남.
- 2019년과 2020년은 한파 일이 없었으며, 2021년은 당진 6일, 보령 5일, 서천 4일, 태안 4일 순으로 나타남.
- 최고기온과 최저기온에 대해 연도별·지역별·거리별로는 2019년도 최고기온은 서천, 최저기온은 당진, 2020년과 2021년도에는 최고기온이 태안, 최저기온은 2019년도와 마찬가지로 당진지역에서 측정되었음.
- 2019년도에는 서천 해안 10km에서 41.5℃으로 최고기온을 나타냈고, 최저기온은 당진 내륙 10km에서 -11.0℃로 측정되어 최고/최저온도 차이는 52.5℃로 나타남.
 - 2020년도 최고기온은 태안 해안 10km에서 39.2℃였고, 최저기온은 당진 내륙 10km에서 측정된 -11.5℃로 측정되어 최고/최저온도 차이는 50.7℃로 나타남.
 - 2021년도 최고기온은 태안 대조군(상대적 나대지)에서 측정된 49.4℃였고, 최저기온은 당진 내륙 10km에서 측정된 -18.1℃로 최고/최저온도 차이는 67.5℃로 나타남.
- 2019년 최고-최저기온 차이가 52.5℃로 2020년 50.7℃보다 높게 나타나는 등 3년 동안 최고와 최저 기온 차이의 경향성은 나타나지 않음.
- 그러나, 기상연보(기상청) 전국자료를 추가 분석한 결과, 평년대비 2019년 0.99℃, 2020년 0.73℃ 기온이 상승하고, 최고-최저기온 차이는 2019년 4.83℃, 2020년 4.54℃로 2019년이 0.29℃ 높게 나타나, 기온이 높을수록 최고-최저기온 차이가 크게 나타남.
- 충청남도 내 화력발전소 주변지역 미기후 측정결과 지점 전체 평균기온이 2019년 13.5℃, 2020년 13.2℃로 평균기온이 높을수록 최고-최저기온의 차이가 큰 것으로 나타나, 기상청의 ‘기온과 최고-최저기온의 차이 비례적 경향성을’ 충청남도 미기후자료를 통해서도 확인할 수 있었음. 다만, 본 경향성 분석은 2년간의 짧은 연구기간이므로, 보다 명확하고 과학적인 데이터 기반 경향성을 파악하기 위해서는 10년 이상 장기 모니터링이 필요할 것으로 판단됨.
- 내륙과 해안을 구분하여 비교할 경우 2019년 최고온도는 해안과 육지가 각각 41.5℃와

- 40.9℃로 해안이 내륙보다 더 높게 나타났고, 최저온도 역시 해안과 육지가 각각 -8.9℃와 -11.0℃로 나타나 해안이 내륙보다 더 높은 것으로 확인됨.
 - 2020년도 역시 2019년과 유사한 패턴을 보였고, 최대온도는 해안과 육지가 각각 45.4℃와 43.6℃로 해안이 더 높고, 최저온도 역시 해안과 육지가 각각 -9.7℃와 -11.5℃로 나타나 해안의 온도가 더 높은 것으로 확인됨.
 - 통상 내륙이 해안지역에 비해 최고기온은 높고, 최저기온 낮게 나타나는 것이 일반적이나, 지역 내 미기상 요인의 영향을 받을 경우 반대의 결과가 나타날 수 있으며, 화력발전소 주변 지역의 경우에는 온배수의 영향을 고려할 필요가 있음.
 - 특히, 발전소 가동이 멈춘 서천지역을 제외하고 발전소 5km 이상 지역의 최고기온 발생시간이 통상시간(12시~14시 내외)에 근접하나, 발전소 인접지역(2km 이내)의 경우에는 태안 08시, 당진 17시 보령 16시로 일정하지 않아 온배수 영향 등 발전소에 기인한 미기상 요인의 영향을 추정할 수 있음.
 - 2021년도 최고온도와 최저온도의 온도차는 내륙이 62.4℃로 해안의 58.8℃에 비해 더 높게 나타남.
- 3년간의 자료라는 한계는 있으나, 미기후 모니터링 자료를 통해 극한기후를 분석한 결과 평균기온이 기상청 기상방재센터(AWS) 보다 모든 지역에서 높게 나타났음.
- 1차년도 기후변화 시나리오 전망 분석결과 발전소 주변지역 단위 기온 상승이 높게 나타난 것에 대하여 비록 실측데이터를 확보함.
 - 해안지역이 내륙지역보다 최고기온은 높고, 최고기온 발생시간이 일정하지 않은 것으로 확인됨에 따라 발전소 온배수가 연안지역 온도상승에 영향을 미쳤을 것으로 추정할 수 있었음. 특히 태안화력발전소 주변 지역 폭염일수 지속 증가로 기후변화 적응역량 강화 사업 지원 검토가 필요할 것으로 사료됨.
- 미세먼지 농도 영향을 미치는 기온과 습도는 대체적으로 증가추세이며, 기온 상승은 미세먼지 발생 증가에 기여하나, 습도 증가는 반대로 미세먼지 발생을 억제하는 효과가 있어 3년간의 자료로 미세먼지 농도 측면의 순기능이나 역기능을 판단하기에는 다소 무리가 있음.

- 본 연구를 통해 구축된 미기후 모니터링 지점에 대해 연속적인 장기 데이터(최소 10년 이상⁴⁾)를 축적한다면, 기후변화 대응적응 분야에 활용이 가능할 것으로 판단됨.
- ① 미기후 변화에 따른 식물계절 분석, 산림 미기후와 관계 분석 등 산림 생태분야
- ② 장기미기후 결과에 따른 미기후 관리방향 설정(미기후 개선이나 활용을 통한 주거 개선 등), 기후 적응형 농업기술 개발 등 기후변화 적응분야
- ③ 미기후와 미세먼지 장기 영향분석, 미기후에 따른 열환경 변화 분석 등 환경영향 분석 분야

4) 기상청 등 기후자료는 30년간의 평균값으로 제공되며, 측정값이 부족한 경우 10년 이상의 값을 활용하고 있음

[표 2.10] 2019년 미기후 모니터링 지점 극한기후 분석결과

지점	폭염 일수	관 측 최고온도	최고온도 관측일시		한파 일수	관 측 최저온도	최저온도 관측일시	
BR_C_02	13	37.8	2019-08-10	16시	0	-6.7	2019-01-09	07시
BR_C_05	1	33.2	2019-08-11	12시	0	-6.8	2019-02-08	08시
BR_C_10	10	36.2	2019-08-10	10시	0	-7.3	2019-01-16	08시
BR_G_00	3	33.8	2019-08-10	13시	0	-6.5	2019-01-16	08시
BR_L_00	75	43.4	2019-08-02	12시	0	-9.1	2019-01-16	07시
BR_L_02	1	33.0	2019-04-17	16시	0	-7.2	2019-12-31	22시
BR_L_05	2	35.4	2019-04-22	14시	0	-8.3	2019-01-16	08시
BR_L_10	2	33.7	2019-08-03	14시	0	-8.3	2019-02-08	08시
DJ_C_02	2	33.8	2019-08-10	17시	0	-8.9	2019-01-09	08시
DJ_C_05	2	35.4	2019-09-17	15시	0	-7.3	2019-02-08	04시
DJ_C_10	6	34.7	2019-07-06	13시	0	-8.8	2019-01-03, 01-09	08시
DJ_G_00	11	36.3	2019-08-02	10시	0	-6.3	2019-12-31	09시
DJ_L_00	151	48.3	2019-08-07	11시	0	-9.4	2019-01-27	07시
DJ_L_02	41	40.9	2019-09-17	13시	0	-8.1	2019-01-09	07시
DJ_L_05	6	34.4	2019-08-06	10시	0	-8.3	2019-01-09	08시
DJ_L_10	4	34.3	2019-08-10	12시	0	-11.0	2019-01-02, 01-08	19시
SC_C_02	17	36.8	2019-09-17	11시	0	-6.2	2019-02-08	08시
SC_C_05	0	32.9	2019-08-11	13시	0	-6.5	2019-02-08	08시
SC_C_10	35	41.5	2019-08-11	12시	0	-6.4	2019-12-06	06시
SC_G_00	11	37.0	2019-08-01	12시	0	-6.5	2019-02-08	08시
SC_L_00	88	52.4	2019-08-02	21시	0	-8.4	2019-01-09	08시
SC_L_02	2	33.6	2019-08-11	13시	0	-6.3	2019-02-08	08시
SC_L_05	1	33.7	2019-08-11	13시	0	-6.4	2019-02-08	08시
SC_L_10	25	40.1	2019-08-11	13시	0	-8.1	2019-01-16	08시
TA_C_02	0	32.6	2019-06-11	08시	0	-6.3	2019-02-07	19시
TA_C_05	6	34.9	2019-08-10	15시	0	-6.5	2019-02-08	07시
TA_C_10	6	36.9	2019-08-10	15시	0	-6.3	2019-02-08	07시
TA_G_00	5	35.4	2019-09-17	12시	0	-7.1	2019-02-08	07시
TA_L_00	154	50.0	2019-08-10	16시	0	-8.9	2019-01-27	07시
TA_L_02	30	38.5	2019-07-06	14시	0	-6.7	2019-02-08	07시
TA_L_05	4	33.8	2019-08-10	09시	0	-6.5	2019-02-08	07시, 08시
TA_L_10	0	28.2	2019-09-27	14시	0	-8.1	2019-01-09	08시

[표 2.11] 2020년 미기후 모니터링 지점 극한기후 분석결과

지점	폭염 일수	관 측 최고온도	최고온도 관측일시		한파 일수	관 측 최저온도	최저온도 관측일시	
BR_C_02	0	32.2	2020-07-09	15시	0	-8.165	2020-02-06	07시
BR_C_05	0	28.9	2020-05-07	12시	0	-8.597	2020-02-06	07시
BR_C_10	0	29.2	2020-06-10	14시	0	-9.713	2020-02-06	07시
BR_G_00	0	30.5	2020-06-09	13시	0	-8.297	2020-02-06	07시
BR_L_00	54	44.2	2020-06-09	12시	0	-9.989	2020-02-06	07시
BR_L_02	0	32.6	2020-06-10	14시	0	-9.033	2020-02-06	07시
BR_L_05	2	35.9	2020-04-16	14시	0	-9.269	2020-02-06	07시
BR_L_10	0	28.6	2020-04-16	15시	0	-10.476	2020-02-06	07시
DJ_C_02	0	33.9	2020-05-07	16시	0	-9.473	2020-02-06	08시
DJ_C_05	0	30.5	2020-04-30	10시	0	-8.53	2020-02-06	07시
DJ_C_10	0	31.8	2020-06-10	14시	0	-9.473	2020-02-06	08시
DJ_G_00	0	33.6	2020-06-10	10시	0	-8.364	2020-02-06	08시
DJ_L_00	0	45.5	2020-07-17	10시	0	0.934	2020-04-15	06시
DJ_L_02	1	37.2	2020-05-01	15시	0	-9.542	2020-02-06	08시
DJ_L_05	0	33.0	2020-05-01	15시	0	-8.497	2020-02-06	08시
DJ_L_10	0	34.8	2020-04-29	15시	0	-11.505	2020-02-06	04시
SC_C_02	0	28.2	2020-04-16	14시	0	-7.575	2020-02-06	08시
SC_C_05	0	30.0	2020-06-10	13시	0	-9.168	2020-02-06	08시
SC_C_10	2	34.6	2020-06-10	13시	0	-8.231	2020-02-06	07시
SC_G_00	0	31.6	2020-06-10	13시	0	-7.64	2020-02-06	08시
SC_L_00	46	41.8	2020-07-25	16시	0	-9.679	2020-02-06	07시
SC_L_02	0	32.7	2020-06-10	11시	0	-8	2020-02-06	08시
SC_L_05	0	32.5	2020-06-10	13시	0	-7.673	2020-02-06	07시
SC_L_10	15	38.6	2020-06-10	11시	0	-9.782	2020-02-06	08시
TA_C_02	0	34.6	2020-06-10	09시	0	-6.325	2020-02-06	07시
TA_C_05	0	31.8	2020-07-25	16시	0	-6.93	2020-02-06	09시
TA_C_10	0	39.2	2020-07-11	09시	0	-8.932	2020-02-07	02시
TA_G_00	0	31.1	2020-05-07	10시	0	-8.43	2020-02-06	07시
TA_L_00	4	48.3	2020-06-09	15시	0	-9.134	2020-02-07	02시
TA_L_02	0	34.9	2020-06-10	10시	0	-6.802	2020-02-06	07시
TA_L_05	0	31.8	2020-06-22	14시	0	-7.155	2020-02-06	08시
TA_L_10	0	34.4	2020-06-22	14시	0	-8.831	2020-02-06	08시

[표 2.12] 2021년 미기후 모니터링 지점 극한기후 분석결과

지점	폭염 일수	관 측 최고온도	최고온도 관측일시	한파 일수	관 측 최저온도	최저온도 관측일시
BR_C_02	48	43.2	2021-07-21 16시	3	-15.5	2021-01-08 8시
BR_C_05	0	31.4	2021-07-26 15시	3	-15.2	2021-01-09 7시
BR_C_10	0	31.9	2021-07-21 15시	0	-6.7	2021-02-18 7시
BR_G_00	-	자료없음	-	4	-15.7	2021-01-09 5시
BR_L_00	-	자료없음	-	5	-18.0	2021-01-09 8시
BR_L_02	0	32.8	2021-08-09 12시	0	자료없음	-
BR_L_05	0	28.2	2021-07-21 13시	4	-16.0	2021-01-09 8시
BR_L_10	6	34.3	2021-07-27 11시	0	자료없음	-
DJ_C_02	-	자료없음	-	3	-14.5	2021-01-09 8시
DJ_C_05	2	33.8	2021-07-30 14시	3	-14.8	2021-01-09 8시
DJ_C_10	-	자료없음	-	3	-15.5	2021-01-09 7시
DJ_G_00	14	35.5	2021-07-27 14시	3	-14.0	2021-01-08 7시
DJ_L_00	-	자료없음	-	-	자료없음	-
DJ_L_02	5	34.2	2021-07-27 14시	3	-14.4	2021-01-08 8시
DJ_L_05	6	34.5	2021-07-27 14시	3	-15.5	2021-01-09 8시
DJ_L_10	6	34.0	2021-07-27 15시	6	-18.1	2021-01-09 6시
SC_C_02	-	자료없음	-	4	-17.3	2021-01-08 8시
SC_C_05	0	31.9	2021-07-26 13시	0	-6.2	2021-02-03 8시
SC_C_10	15	35.3	2021-08-11 14시	3	-16.5	2021-01-08 8시
SC_G_00	0	32.2	2021-07-26 12시	3	-14.7	2021-01-08 8시
SC_L_00	-	자료없음	-	-	자료없음	-
SC_L_02	0	31.6	2021-07-26 12시	0	-5.9	2021-02-03 7시
SC_L_05	5	34.8	2021-07-25 16시	3	-15.5	2021-01-08 8시
SC_L_10	4	35.5	2021-08-20 16시	4	-17.3	2021-01-08 6시
TA_C_02	39	39.0	2021-09-15 16시	1	-12.1	2021-01-08 4시
TA_C_05	4	34.7	2021-07-23 11시	2	-12.5	2021-01-09 9시
TA_C_10	55	45.2	2021-07-15 9시	3	-13.6	2021-01-09 8시
TA_G_00	63	49.4	2021-07-26 10시	2	-13.0	2021-01-08 7시
TA_L_00	-	자료없음	-	4	-17.4	2021-01-10 8시
TA_L_02	19	37.1	2021-08-05 10시	3	-12.5	2021-01-08 7시
TA_L_05	5	34.2	2021-07-21 15시	2	-12.8	2021-01-09 8시
TA_L_10	-	자료없음	-	3	-15.9	2021-01-09 8시

4. 이산화탄소 측정

4.1. 측정지점 및 기준

- 당진·태안·보령·서천 발전소 주변지역 1개소와 대조군으로 선정된 1개소 지점에 이산화탄소 측정장비를 설치하여 이산화탄소 농도 측정 및 배경대기 농도를 파악하였음.
- 화력발전소 주변지역의 이산화탄소 농도와 원거리 농도와의 비교를 통해 화력발전소 영향에 의한 이산화탄소 농도변화를 분석하기 위해 측정지점은 2km 내외(현장 상황을 고려하여 보령 약 5km)에 설치하고, 대조군은 10km를 기준으로 그 이상의 지점에 대조군 측정 장비를 설치함.



[그림 2.8] 이산화탄소 측정지점 위치도

[표 2.13] 이산화탄소 측정 지점

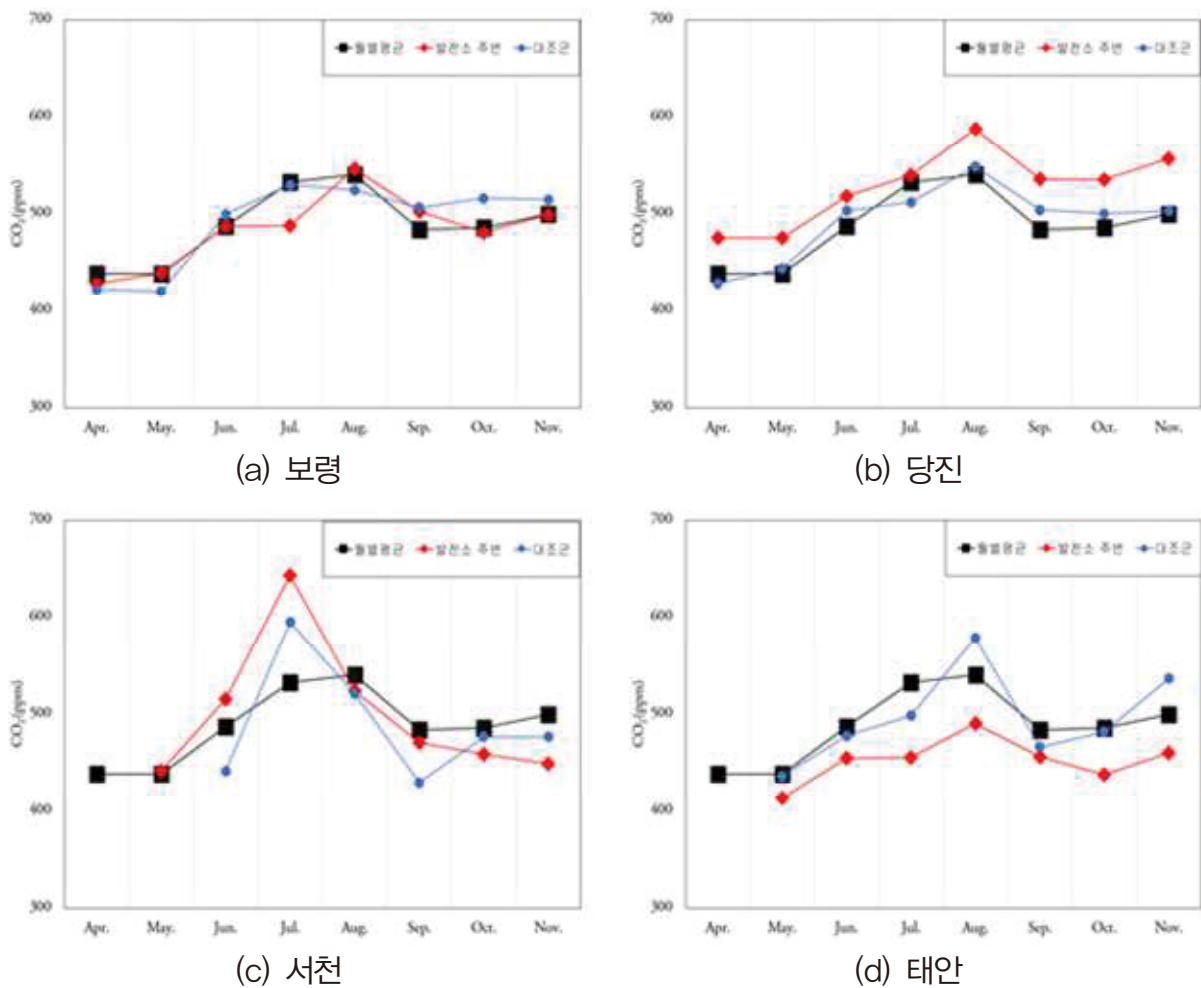
지 역	구분	거 리	위치(위경도)		기기번호	비고
보 령	발전소주변	4.8km	36.438155	126.522209	21022136	
	대조군	8.4km	36.414983	126.587980	21022137	
당 진	발전소주변	1.0km	37.0118294	126.533084	21022138	
	대조군	20.0km	36.890346	126.645777	21022139	
서 천	발전소주변	1.3km	36.147592	126.503391	21022140	
	대조군	9.5km	36.142035	126.601369	21022141	기기 이전 '21.6. 설치
태 안	발전소주변	2.5km	36.892679	126.205531	21022142	기기 이전 검토 필요
	대조군	9.05km	36.824192	126.257229	21022143	

4.2 측정결과

- 4차년도에는 이산화탄소 측정값이 8개월로 짧아 연도별 추이나 변동추이 분석을 할 수 없어 지점별로 월별 변화량에 대해 분석함.
- 측정결과 4월부터 이산화탄소 농도가 점차 증가하는 추세를 보였으며, 8월에 월평균 이산화탄소 농도가 가장 높게 나타나고 이후 감소하여 일정하게 유지됨.
 - 우리나라 이산화탄소 배경농도 지점(안면도, 고산, 울릉도, 독도)의 이산화탄소 농도가 4월에 최대값을 나타내고 8월에 최소값을 나타내는 것과는 상반된 결과로 추가 화력발전소 주변만의 특징인지에 대한 추가 검토가 필요함. (5차년도 추진)
- 8개월간의 측정결과로 경향성을 단정할 수 없으나 화력발전소 주변의 이산화탄소 농도가 대조군에 비하여 다소 높게 나타났으나, 태안의 경우 반대로 발전소 주변보다 대조군의 이산화탄소 농도가 높게 나타남.
 - 이산화탄소 농도는 화력발전소와 주변 건물, 차량 등 환경적 요인에 영향을 크게 받으며, 태안에 설치한 발전소 주변(실험군)의 측정기기가 해안국립공원내(학암포 주변)에

위치하고 있어 태안발전소의 영향을 측정하기에는 거리 (이산화탄소 측정소와 태안발전소와의 직선거리는 2.5km)와 연계성이 다소 부족한 것으로 판단됨.

- 향후 화력발전소 실험군의 정확한 이산화탄소 농도를 측정하기 위해 측정소 이전이나 추가 설치가 필요할 것으로 판단되어 5차년도 연구시 측정소를 추가 설치하여 분석할 계획임.
- 발전소 주변지역 CO₂ 농도와 국가배경농도와의 비교분석을 통해 운영결과에 대한 평가가 가능할 것이며, 5차년도 안면도 자료가 확정되고, 1년간 데이터를 확보 후 연간 변화에 대한 비교 분석을 실시할 예정임.



[그림 2.9] 각 지역에 따른 월별 이산화탄소 농도 분포

5. 요약 및 소결론

- 온실가스 대량 배출시설인 화력발전소 주변지역의 해안 및 내륙방향 이격거리별 온·습도, 극한기후에 대한 미기후 변화 자료를 축적하고 통계를 분석하여 미기후 변화 특성을 도출함.
- 미기후 측정기간(2019년~2021년) 동안 온도는 서천이 $13.8 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 가장 높게 나타났으며, 당진 $13.5 \pm 8.7^{\circ}\text{C}$, 보령 $13.3 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$, 태안 $13.5 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 순으로 분석됨. 습도는 서천이 $79.1 \pm 10.8\%$ 로 가장 높았고, 보령 $77.3 \pm 9.9\%$, 태안 $75.7 \pm 10.1\%$, 당진 $75.7 \pm 9.6\%$ 순으로 분석됨.
- 각 발전소 인근에 운영 중인 기상방재센터(AWS) 6곳(대산, 당진, 태안, 춘장대, 대천항, 만리포)의 온습도 평균값인 $13.1 \pm 9.4^{\circ}\text{C}$ 와 $74.0 \pm 18.3\%$ 보다 4개 조사구의 온습도가 모두 높게 나타났는데,
- 미기후의 실측자료는 3년간으로 비교적 짧은 기간에 해당되나, 본 용역 1차년도 연구 당시, 화력발전소 주변지역의 기후변화 예측을 위해 국가표준 기후변화시나리오인 RCP (Representative Concentration Pathways, 대표경로)을 통해 분석한 결과 화력발전소 주변지역의 온도상승이 높게 상승할 것이라는 전망과 일치하는 것을 확인하였음. (1차년도 보고서 107~114 페이지)
- 태안화력발전소 주변지역의 폭염일수 지속 증가로 인해 기후변화 적응역량 강화 사업 지원 검토가 필요할 것으로 판단되며,
- 해안지역이 내륙지역보다 최고기온이 높게 나타나고, 최고기온 발생 시간도 일정하지 않은 것으로 확인되어 바다온도 상승에 따른 영향과 함께 화력발전소 온배수가 연안지역 온도상승에 일부 영향을 미쳤을 것으로 추정됨.
- 4차년도에는 전문가 자문을 반영하여 새로이 발전소 주변지역의 이산화탄소 농도 측정을 실시하였으며, 계절별 농도변화 추이를 분석함.
- 측정결과 4월부터 이산화탄소 농도가 점차 증가하다 8월에 이산화탄소 농도가 가장 높게 나타나고 이후 감소하여 일정하게 유지되었고, 전반적으로 발전소에 가까운 측정기의 이산화탄소 농도가 대조군보다 높게 나타나는 것을 확인함.

- 국가이산화탄소 배경농도 측정지점(안면도, 고산, 울릉도, 독도)은 최대농도가 4월에, 최소농도는 8월에 확인되어, 화력발전소 주변의 특징인지에 대한 추가 검토가 필요하여 5차년도에는 연구를 확대하여 자료축적을 통해 발전소 주변지역의 기후변화 경향을 파악하는 자료로 활용할 계획임.
- 5차년도 연구에서는 연구기간 축적된 미기후 자료와 대기오염물질과의 종합분석과 화력발전소 주변지역에서의 CO₂ 영향분석을 실시할 예정임.
- 4차년도 연구결과를 바탕으로 문헌연구를 통해 대기오염물질과 미기후와의 상관 성과 영향정도를 분석하고, 화력발전소 주변지역 CO₂ 측정결과를 바탕으로 기존 선행연구들을 바탕으로 화력발전소 주변지역의 CO₂ 영향 정도를 파악함.
- 축적된 미기후 자료와 CO₂ 농도자료를 연동분석 기법을 개발하여 5차년도에는 충남도 내 관심 지역에 활용할 수 있도록 제안할 계획임.

제3장 고정측정망 운영

1. 연구목적
2. 연구개요
3. 측정망 현황
4. 고정측정망 분석 결과
5. 요약 및 소결론

1. 연구목적

- 화력발전소에 의한 대기오염물질 영향을 분석하기 위해 화력발전소를 기준으로 발전소 유입 전 대기오염물질 농도와 유입 이후 거리별 대기오염물질 농도에 대한 실시간 자료가 필요함에 따라, 마을대기측정망과, 대난지도·청라면 측정소를 자료를 분석함.
- 당진화력발전소 유입 전 배경농도 측정을 위해 당진 대난지도 측정소와 보령화력발전소 유입 후 거리별 실시간 농도변화 분석을 위한 보령 청라면 측정소를 지속 운영하고 데이터를 분석함.
- 4차년도에는 3차년도에 분석한 국가대기측정망의 마을대기측정망 데이터를 추가하고 데이터를 확대하여 분석결과의 신뢰성을 높이고자 노력함.
- 월별 대기오염물질 농도와 대기환경기준 달성 현황을 분석하고, 풍향별 대기오염 물질 농도변화와 함께 측정소 간 Pearson 상관분석을 실시하여 연구결과의 전문성 및 신뢰도를 제고하였음. 또한, 고정측정망 2기의 데이터 연속성 확보를 위한 유지보수와 자료 신뢰성 확보를 위한 정도검사 및 등가성 평가를 실시함.

2. 연구개요

2.1. 분석 기간

- 화력발전소 영향을 분석하기 위해 ① 대난지도 측정소의 경우 당진화력발전소의 배경 농도로서 주변 도시대기측정망과 연동하여 분석하고, ② 청라면 측정소는 보령화력발전소로부터 이격거리 7 km 내외로 이동거리 간 농도변화를 측정·분석함.

[표 3.1] 고정측정망 분석현황

구분	장소	발전소간 이격거리	분석기간	분석일수
대난지도 측정소	당진시 청소년수련원	약 8 km	2020년 9월 1일 ~ 2021년 10월 31일	208
청라면 측정소	소양리 익량마을회관	약 17 km	(대난지도 : 2018년 2월 청라면 : 2019년 8월)	303

- 도시대기측정망과 마을대기측정망을 비교 분석하여 자료의 신뢰성을 높였으며, 4차년도에는 마을대기측정망과 고정측정망을 비교 분석을 추가하였음.

[표 3.2] 도시대기측정망 분석현황

구분	장소	발전소간 이격거리	분석기간 (4차년도 기간)	분석일수
당진시청사 측정소	당진시청사	약 22 km	2020년 9월 1일 ~ 2021년 10월 31일	373
송산면 측정소	송산2 일반산업단지 입주기업체협의회	약 12 km	(2018년 2월 1일 ~ 2021년 10월 31일)	386
주교면 측정소	주교면사무소	약 7 km	2020년 9월 1일 ~ 2021년 10월 31일	386
대천2동 측정소	대천2동 사무소	약 10 km	(2019년 8월 1일 ~ 2021년 10월 31일)	386

[표 3.3] 마을대기측정망 분석현황

구분	장소	발전소간 이격거리	분석기간	분석일수
금천 측정소	신평면사무소	약 30 km		248
성상 측정소	면천면사무소	약 30 km	2020년 9월 1일 ~ 2021년 10월 31일	203
교성 측정소	교성1리 마을회관	약 5 km	(2020년 9월 1일 ~ 2021년 10월 31일)	365
송학 측정소	송학초등학교	약 4 km		351

2.2. 분석 방법

- 월별 대기오염물질 농도, 대기환경기준 달성 현황, 풍향별 대기오염 물질 농도, Pearson 상관분석⁵⁾을 통해 각 지점의 대기 자료를 분석함.
- 1시간 단위 측정 결과를 분석하여 당진시에 위치하는 측정소 5개소(대난지도, 송산면, 당진시청사, 금천, 성상)의 농도변화 추이를 분석하고 월별 대기오염물질 농도를 기준으로 충청남도 대기환경기준 달성 여부를 확인함.

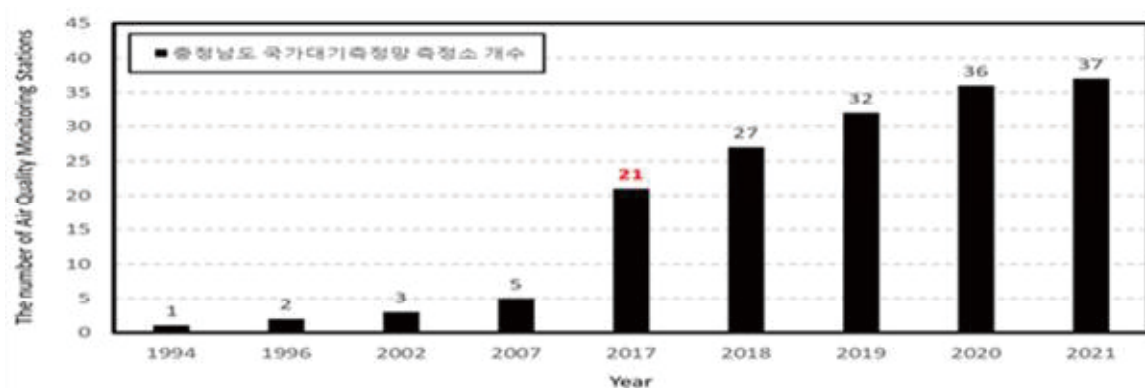
5) Pearson 상관계수에 따른 상관분석 방법으로 Pearson 상관계수는 두 변수 간의 선형 상관관계를 계량화한 수치로 -1과 1 사이의 값을 갖으며 +1은 완벽한 양의 선형 상관관계, 0은 선형 상관관계 없음, -1은 완벽한 음의 선형 상관관계를 의미함.

- 3차년도 연구(지역별 풍향 분석)결과, 당진시는 북서풍 계열이 우세하고 보령시는 서풍 계열의 비율 높은 것으로 확인되어 각각 해당 풍향일 때 고정측정망과 주변 측정소의 농도변화를 검토함.
- 각 측정소에 1년간 측정된 데이터를 바탕으로 인자 간 통계처리(Pearson correlation coefficient)를 통해 측정소 간 및 오염물질 간 상관성 분석을 실시함.

3. 측정망 현황

3.1. 측정망 개요

- 환경부 및 지방자치단체에서 운영 중인 측정망은 총 11개(도시대기, 도로변대기, 산성 강하물, 국가배정농도, 교외대기, 대기중금속, 유해대기물질, 광화학대기오염물질, 지구 대기, PM2.5성분, 대기오염집중)로 분류함.
- 충청남도에는 2021년 11월 말 기준 도시대기(37개소), 국가배정농도(2개소), 교외대기(2개소), 도로변대기(2개소), 항만(3개소)이 설치되어 있으며, 도시대기측정망에서는 대기 중 미세먼지(PM10), 초미세먼지(PM2.5), 아황산가스(SO2), 이산화질소(NO2), 오존(O3), 일산화탄소(CO) 및 풍향, 풍속, 온도, 습도 등과 같은 기상항목 등을 24시간 연속으로 측정하고 있음.
- 충청남도내 국가대기측정망 측정소 개수는 2007년 5개소에서 2017년부터 개소수가 21개소로 늘어났으며, 2021년(11월 말 기준) 37개소로 확대됨.



[그림 3.1] 연도별 충청남도 도시대기측정망 설치 현황

- 전국 59기(2021년 11월 말 기준)의 석탄화력발전소 중 29기가 위치하고 있는 충청남도는 발전소 주변 대기질 모니터링을 위해 2018년 12월 발전3사(한국중부발전(주), 한국서부발전(주), 한국동서발전(주)), 충청남도, 충남연구원 서해안기후환경연구소의 충청남도 마을대기측정망통합시스템 구축·운영 협정을 시작으로 통합시스템 설치, 통합정보센터 개소 등 마을대기측정망을 운영 중에 있음.
- 충청남도 마을대기 측정망은 서천 5개소 보령 12개소, 태안 10개소, 당진 11개소 등 총 38개소를 운영하고 있으며, PM10, PM2.5, SO2, NO2, O3, CO 기상(풍향, 풍속, 온도, 습도)을 측정하고 있음.



[그림 3.2] 충청남도 마을대기측정망 현황

- 고정측정망은 1차년도 2017년 12월에 대난지도 측정소 설치하고 2차년도 2019년 4월에 청라면 측정소 추가 설치하여 총 2개소를 운영하고 있음. 3~5차년도에는 마을대기측정망 활용방안과 국가측정망과 연계하여 분석을 추진함.

[표 3.4] 고정측정망 설치 현황(2개소)

발전소	장소	측정소명	설치시기
당진화력	당진시 청소년수련원	대난지도	2017년 12월
보령화력	소양리 익량마을회관	청라면	2019년 4월

- 화력발전소 주변지역에는 ‘충청남도 마을대기측정망 통합정보망’을 운영중에 있으며, 대기측정소 데이터와 연계하여 ‘충청남도 마을대기측정망 통합정보센터’에서 관련 정보를 준 실시간(1시간 지연)으로 제공하고 있음.



[그림 3.3] 충청남도 마을대기측정망 통합정보센터

[표 3.5] 충청남도 마을대기측정망 설치 현황(38개소)

발전소	장소	측정소명
신서천화력 (5개소)	춘장대 사택	춘장대
	홍원마을회관	홍원
	요포마을회관	요포
	내도둔마을회관	내도둔
	마량초소	마량
보령화력 (12개소)	발전소 회처리장	오포
	송학초교	송학
	삼현1리 노인회관	남포
	오천면사무소 어항출장소	신흑
	한전사옥	죽정
	주포면사무소	주포
	교성1리 마을회관	교성
	오천초교	오천
	학성1리 마을회관	학성
	천북초교	천북
	원산 마을회관	원산
	고남면사무소	고남
태안화력 (10개소)	방갈2리 마을회관	방갈
	원북초교	반계
	이원초등학교 관동분교	관리
	이원초등학교 내리분교	내리
	대기초교	대기
	이곡1리 다목적회관	이곡
	산후1리 다목적회관	산후
	안기2리 마을회관	안기
	의항리 보건진료소	의항
	평천3리 다목적회관	평천
당진화력 (11개소)	당진화력본부	교로
	석문중학교	삼봉
	석문면사무소	통정
	당진에코파워	원당
	신당진변전소	사관
	당진종합운동장	용두
	신평면사무소	금천
	합덕읍사무소	운산
	송악초등학교	중흥
	적서리마을회관	적서
	면천면사무소	성상

3.2. 측정망 운영

3.2.1. 대난지도 측정소

- 당진화력발전소 풍상(북서쪽) 지역에 설치하여 서풍-북서풍이 불 때 발전소 대기오염 물질 유입 전 대기질 측정과 발전소 오염물질 기여도 추정에 배경농도로써 근거자료를 확보하기 위해 당진시 청소년수련원(당진시 석문면 난지1길 71)에 설치함.



[그림 3.4] 대난지도 측정소 전경 및 측정장비

- 당진시 난지1리 마을회관 주변 신축건물 공사로 인하여 주민들의 대난지도 측정소 이전 요구에 따라 당진시와 협의하여 기존 설치 위치와 1.1 km 직선거리에 있는 당진시청소년수련원 소강당 옆으로 이전함.
 - 공사 기간 : '21. 05. 24. ~ 06. 10. / 용역 업체 : (주)제이에스에어텍





[그림 3.5] 대난지도 측정소 장소 이설 과정

- 대기질 측정의 정확성과 신뢰도를 제고하기 위해 대난지도 질소산화물(NO_x), 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 측정 장비에 대해 정도 검사를 실시하였음.
- PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ 는 2021년 12월 8일부터 9일까지, NO_x 는 12월에 검사를 완료하였음. 등가성평가⁶⁾는 2020년 12월에 시행하여 2021년은 등가성 평가대상이 아니었음.



[그림 3.6] 대난지도 · 청라면 측정소 측정장비(좌: PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$ / 우: NO_x)

6) 미세먼지, 초미세먼지 측정기기의 정확성과 통일성을 유지하기 위해 국가기준측정시스템(NRMs)과 단계적 비교측정을 수행하여 형식승인을 받기 위한 시험. 등가성평가 주기는 2년으로 대기오염공정시험기준에 명시됨.

[표 3.6] 대난지도 측정소 측정장비 정도검사 현황

정도검사일	검사결과	측정기기	검사기관	비고
2017.12.19. ~2017.12.20.	적합	NOx (질소산화물)	한국환경공단	최초 정도검사
2020.12.11.	적합		한국산업기술시험원	
2021.12.20	적합		한국산업기술시험원	
2017.12.19. ~2017.12.20.	적합	PM ₁₀ (미세먼지)	한국환경공단	최초 정도검사
2020.12.18.	적합		한국산업기술시험원	
2021.12.08. ~2021.12.09.	적합		한국산업기술시험원	
2017.12.19. ~2017.12.20.	적합	PM _{2.5} (초미세먼지)	한국환경공단	최초 정도검사
2020.12.18.	적합		한국산업기술시험원	
2021.12.08. ~2021.12.09.	적합		한국산업기술시험원	

3.2.2. 청라면 측정소

- 북서풍이나 서풍이 불어올 경우 보령화력발전소로부터 배출될 대기오염물질의 이격거리별 확산되는 영향을 분석하고자 보령 소량1리 익랑마을회관(보령시 청라면 나원리 749)에 설치함.



[그림 3.7] 청라면 측정소 전경 및 측정장비

- 당진시 대난지도 측정소와 마찬가지로 질소산화물(NOx), 미세먼지(PM₁₀), 초미세먼지(PM_{2.5}) 측정장비에 대해 정도검사를 실시함.
- NOx, PM₁₀, PM_{2.5}에 대해 2021년 7월 28일 검사를 완료하였고, 청라면은 등가성 평가에 해당되어 미세먼지(PM₁₀)은 2021년 6월 5일부터 6월 20일까지, 초미세먼지(PM_{2.5})는 2021년 6월 11일부터 7월 4일까지 측정장비에 대해 평가를 실시함.

[표 3.7] 청라면 측정소 측정장비 정도검사 현황

정도검사일	검사결과	측정기기	검사기관	비고
2019.05.02.	적합	NOx	한국표준과학연구원	최초 정도검사
2021.07.28.	적합	(질소산화물)	한국표준과학연구원	
2019.05.02.	적합	PM ₁₀	한국표준과학연구원	최초 정도검사
2021.07.28.	적합	(미세먼지)	한국표준과학연구원	
2019.05.02.	적합	PM _{2.5}	한국표준과학연구원	최초 정도검사
2021.07.28.	적합	(초미세먼지)	한국표준과학연구원	

[표 3.8] 청라면 측정소 측정장비 등가성평가 현황

시험기간	검사결과	측정기기	검사기관	비고
2021.06.05. ~2021.06.20.	적합	PM ₁₀ (미세먼지)	한국산업기술시험원	
2021.06.11. ~2021.07.04.	적합	PM _{2.5} (초미세먼지)	한국산업기술시험원	

4. 고정측정망 분석 결과

4.1. 대난지도 측정소 결과

- 대난지도 측정소는 한국동서발전(주) 당진발전본부 풍상 지역에 위치하고 있는 대난지도 측정소와 당진시에 설치된 송산면·당진시청사 도시대기측정망 및 금천·성상 마을대기측정망과의 자료 분석 수행을 위해 설치됨.

- 발전소와 거리별 측정소는 송학 4km, 교성 5km, 주교면 7km, 대천2동 10km 순으로, PM₁₀ 농도는 송산면 측정소가 $55 \pm 43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났고, 당진시청사 $41 \pm 36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 성상 $37 \pm 34 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대난지도 $37 \pm 26 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 금천 $35 \pm 41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 측정됨.
 - PM_{2.5} 농도는 송산면 측정소가 $28 \pm 30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났고, 당진시청사 $24 \pm 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 성상 $24 \pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대난지도 $23 \pm 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 금천 $23 \pm 15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 측정되었는데 송산면 측정소는 주변 제철산업단지 등 대규모 배출시설의 영향으로 다른 지역에 비하여 PM_{2.5}가 높게 나타난 것으로 판단됨.
 - NO₂ 농도는 PM₁₀ 및 PM_{2.5}와 마찬가지로 송산면 측정소가 $0.015 \pm 0.008 \text{ ppm}$ 으로 가장 높게 나타났고, 당진시청사 $0.014 \pm 0.009 \text{ ppm}$, 금천 $0.011 \pm 0.006 \text{ ppm}$, 성상 $0.010 \pm 0.006 \text{ ppm}$, 대난지도 $0.008 \pm 0.005 \text{ ppm}$ 순으로 측정되었으며 대난지도의 NO₂ 농도가 가장 낮은 것으로 분석됨.
- 화력발전소에서 가장 멀리 위치한 금천 측정소를 제외하고 PM₁₀ 및 PM_{2.5}는 주풍인 서풍 계열 시 가장 낮은 농도로 나타났고, 이를 통해 대난지도 측정소가 화력발전소 기여도 추정 배경농도로써 활용 가능성을 재검증함.
- 또한, 가스상 물질인 NO₂ 농도도 서풍 계열 시 가장 낮아지는 동일한 결과가 나타났으나, 경로상 광화학적 반응이 일부 발생되어 배경농도로 활용은 어려운 것으로 판단됨.
- PM₁₀의 경우 분석기간 동안 겨울철(2020년 12월 ~ 2021년 2월)과 봄철(2021년 3월~5월)에 충청남도 대기환경기준(연평균)인 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 겨울철 16.8일, 봄철 21.4일을 초과하였고, 여름철(2021년 6~8월)에는 송산면을 제외 한 모든 측정소가 대기환경기준을 만족하였음.
- PM_{2.5}는 PM₁₀과 마찬가지로 겨울철과 봄철에 농도가 높아 충청남도 대기환경기준 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 겨울철에 18.9일, 봄철에 20.1일을 초과하였고, 2021년 6~7월에는 1.0일 초과하였는데, 이는 충남지역 대기질 현상과 유사한 패턴을 보이고 있어 알려진 바와 같이 평균적인 농도값은 지역 배출량보다 기상상태에 영향을 받음을 알 수 있음.
 - NO₂의 경우 분석기간(2020년 12월~2021년 11월) 동안 충청남도 대기환경기준(연평균)인 0.02 ppm을 만족함.

충청남도 대기환경기준(제13조제3항 관련)			예보등급 및 행동요령				
항목	기준	측정방법	등급				
아황산가스(SO ₂)	연평균	0.03ppm 이하	PM ₁₀	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	0.03ppm 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	0.03ppm 이하					
아산화질소(NO ₂)	연평균	0.03ppm 이하	PM _{2.5}	0-35	36-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	0.03ppm 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	0.03ppm 이하					
일산화탄소(CO)	연평균	1ppm 이하	미세먼지(PM ₁₀ -2.5)	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	1ppm 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	1ppm 이하					
미세먼지(PM ₁₀ -2.5)	연평균	40μg/m ³ 이하	오존(O ₃)	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	50μg/m ³ 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	130μg/m ³ 이하					
초미세먼지(PM _{2.5} -2.3)	연평균	35μg/m ³ 이하	나일라	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	45μg/m ³ 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	110μg/m ³ 이하					
오존(O ₃)	연평균	0.03ppm 이하	황변	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	0.03ppm 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	0.03ppm 이하					
나일라	연평균	0.3μg/m ³ 이하	황색	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	0.3μg/m ³ 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	0.3μg/m ³ 이하					
황변	연평균	0.3μg/m ³ 이하	황색	0-30	31-50	51-100	101 이상
	24시간 평균	0.3μg/m ³ 이하		0-25	26-35	36-75	76 이상
	1시간 평균	0.3μg/m ³ 이하					

[그림 3.8] 충청남도 대기환경기준 및 미세먼지 예보등급

- 대안지도 측정소는 2018년 2월부터 자료를 생산하기 시작했으며, 4년간 운영결과 자료를 바탕으로 계절별 농도변화를 분석함.
- 전국적으로 고농도 미세먼지가 발생한 2018년 ~2019년 상대적으로 높은 농도가 나타났으며, PM₁₀은 2018년 봄·겨울과 2019년 봄의 평균농도가 대기환경기준을 초과했으며, PM_{2.5}의 경우 2018년 (여름 기기 이상으로 결측)과 2019년 봄의 평균농도가 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타남.
- 4년간의 관측결과로 연간패턴을 분석하는 것은 다소 무리가 있으나, 입자상물질인 PM₁₀, PM_{2.5}의 여름철 평균농도가 지속적으로 증가하고 있는 것으로 분석되고 있어 일시적 현상인지에 대해 지속적인 모니터링이 필요함.

[표 3.9] 대안지도 측정소 운영기간 계절별 농도변화

구분	PM ₁₀				PM _{2.5}				NO ₂			
	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021	2018	2019	2020	2021
봄	46.0	52.7	39.0	-	38.0	35.7	17.3	-	0.012	0.011	0.003	-
여름	21.7	26.3	28.0	29.3	-	15.3	15.5	22.0	0.009	0.009	0.004	0.008
가을	35.7	34.0	37.3	27.0	-	12.0	12.3	12.5	0.009	0.009	0.008	0.006
겨울	50.0	37.3	-	-	37.0	18.0	-	-	0.010	0.008	-	-

[표 3.10] 당진시에 측정된 PM10 농도(2018년 2월~2021년 10월)

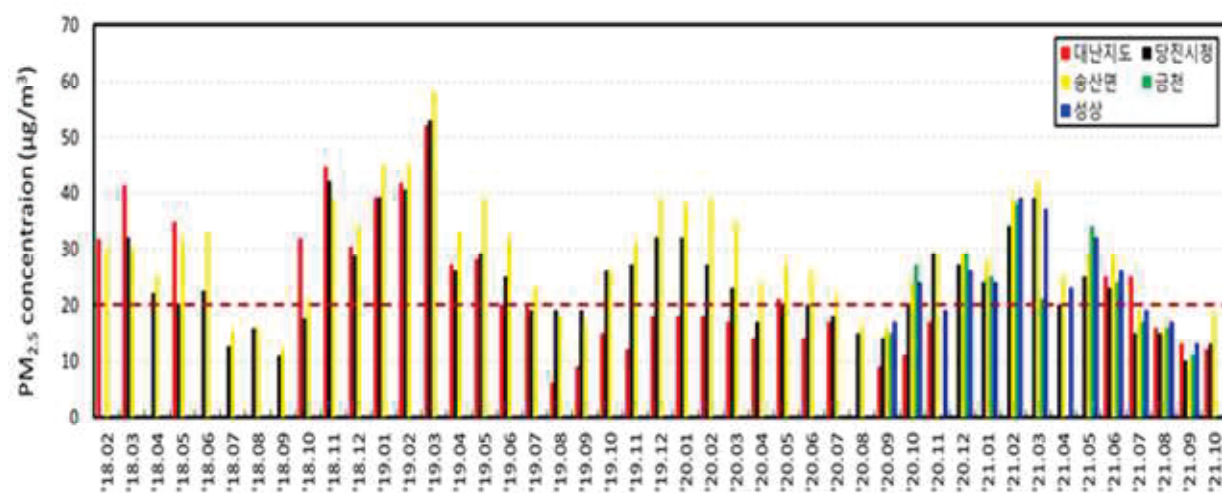
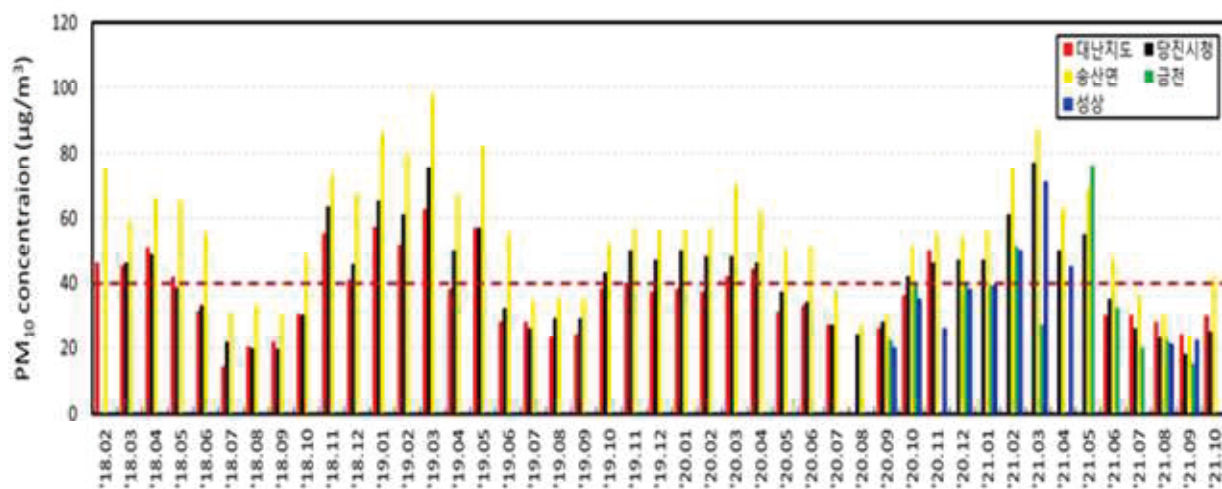
날짜	PM ₁₀ (μg/m ³)				
	대난지도	당진시청사	송산면	성상	금천
'18.02	46		75		
'18.03	45	46	59		
'18.04	51	49	66		
'18.05	42	39	65		
'18.06	31	33	55		
'18.07	14	22	31		
'18.08	20	20	33		
'18.09	22	20	30		
'18.10	30	30	48		
'18.11	55	63	73		
'18.12	41	46	67		
'19.01	57	65	86		
'19.02	52	61	80		
'19.03	63	76	98		
'19.04	38	50	67		
'19.05	57	57	82		
'19.06	28	32	55		
'19.07	28	26	34		
'19.08	23	29	35		
'19.09	24	29	35		
'19.10	38	43	52		
'19.11	40	50	57		
'19.12	37	47	56		
'20.01	38	50	56		
'20.02	37	48	57		
'20.03	42	48	70		
'20.04	44	46	62		
'20.05	31	37	50		
'20.06	33	34	51		
'20.07	27	27	37		
'20.08	24	15	27		
'20.09	26	28	30	20	22
'20.10	36	42	51	35	40
'20.11	50	46	55	26	
'20.12		47	54	38	40
'21.01		47	56	39	39
'21.02		61	75	50	51
'21.03		77	87	71	27
'21.04		50	63	45	
'21.05		55	69		76
'21.06	30	35	47		32
'21.07	30	26	36		20
'21.08	28	23	30	21	22
'21.09	24	18	23	22	15
'21.10	30	25	42		

[표 3.11] 당진시에 측정된 PM2.5 농도(2018년 2월~2021년 10월)

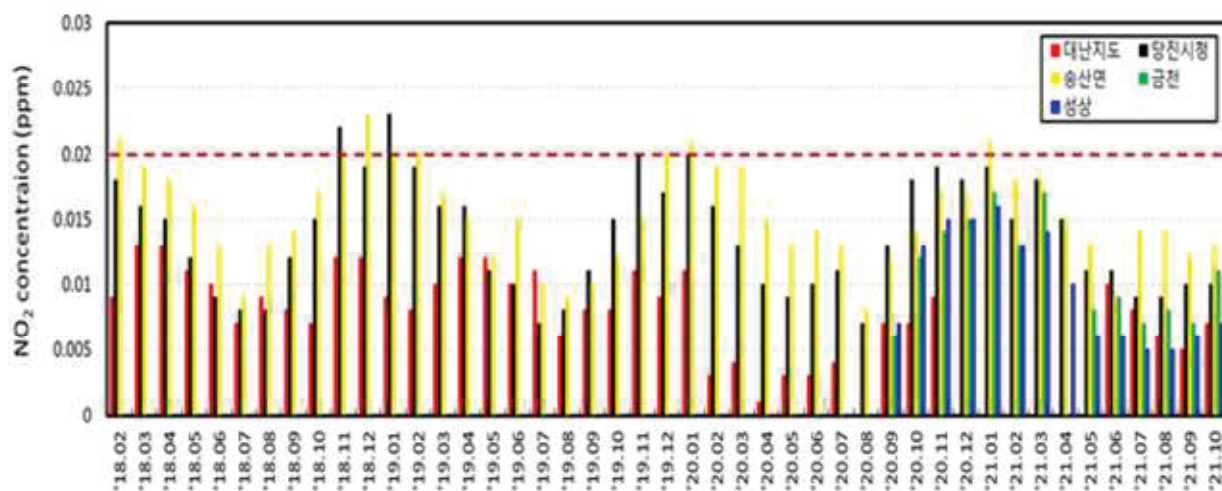
날짜	PM _{2.5} (μg/m ³)				
	대난지도	당진시청사	송산면	성상	금천
'18.02	32		30		
'18.03	41	32	30		
'18.04		22	25		
'18.05	35	20	32		
'18.06		23	33		
'18.07		13	15		
'18.08		16	16		
'18.09		11	12		
'18.10	32	18	21		
'18.11	45	42	39		
'18.12	30	29	34		
'19.01	39	39	45		
'19.02	42	41	45		
'19.03	52	53	58		
'19.04	27	26	33		
'19.05	28	29	39		
'19.06	20	25	32		
'19.07	20	19	23		
'19.08	6	19	18		
'19.09	9	19	17		
'19.10	15	26	26		
'19.11	12	27	31		
'19.12	18	32	39		
'20.01	18	32	38		
'20.02	18	27	39		
'20.03	17	23	35		
'20.04	14	17	24		
'20.05	21	20	27		
'20.06	14	20	26		
'20.07	17	18	22		
'20.08		15	16		
'20.09	9	14	16	17	15
'20.10	11	20	24	24	27
'20.11	17	29	29	19	
'20.12		27	29	26	29
'21.01		24	28	24	25
'21.02		34	39	39	38
'21.03		39	42	37	21
'21.04		20	25	23	
'21.05		25	29	32	34
'21.06	25	23	29	26	24
'21.07	25	15	19	19	17
'21.08	16	15	16	17	16
'21.09	13	10	10	13	11
'21.10	12	13	19		

[표 3.12] 당진시에 측정된 NO₂ 농도(2018년 2월~2021년 10월)

날짜	NO ₂ (ppm)				
	대난지도	당진시청사	송산면	성상	금천
'18.02	0.009	0.018	0.021		
'18.03	0.013	0.016	0.019		
'18.04	0.013	0.015	0.018		
'18.05	0.011	0.012	0.016		
'18.06	0.01	0.009	0.013		
'18.07	0.007	0.008	0.009		
'18.08	0.009	0.008	0.013		
'18.09	0.008	0.012	0.014		
'18.10	0.007	0.015	0.017		
'18.11	0.012	0.022	0.02		
'18.12	0.012	0.019	0.023		
'19.01	0.009	0.023	0.02		
'19.02	0.008	0.019	0.02		
'19.03	0.01	0.016	0.017		
'19.04	0.012	0.016	0.015		
'19.05	0.012	0.011	0.012		
'19.06	0.01	0.01	0.015		
'19.07	0.011	0.007	0.01		
'19.08	0.006	0.008	0.009		
'19.09	0.008	0.011	0.01		
'19.10	0.008	0.015	0.012		
'19.11	0.011	0.02	0.015		
'19.12	0.009	0.017	0.02		
'20.01	0.011	0.02	0.021		
'20.02	0.003	0.016	0.019		
'20.03	0.004	0.013	0.019		
'20.04	0.001	0.01	0.015		
'20.05	0.003	0.009	0.013		
'20.06	0.003	0.01	0.014		
'20.07	0.004	0.011	0.013		
'20.08		0.007	0.008		
'20.09	0.007	0.013	0.012	0.007	0.006
'20.10	0.007	0.018	0.014	0.013	0.012
'20.11	0.009	0.019	0.017	0.015	0.014
'20.12		0.018	0.017	0.015	0.015
'21.01		0.019	0.021	0.016	0.017
'21.02		0.015	0.018	0.013	0.013
'21.03		0.018	0.018	0.014	0.017
'21.04		0.015	0.015	0.01	
'21.05		0.011	0.013	0.006	0.008
'21.06	0.01	0.011	0.009	0.006	0.009
'21.07	0.008	0.009	0.014	0.005	0.007
'21.08	0.006	0.009	0.014	0.005	0.008
'21.09	0.005	0.01	0.012	0.006	0.007
'18.02	0.007	0.01	0.013	0.007	0.011



[그림 3.9] 대난지도 측정소 및 당진지역의 입자상물질 농도 변화



[그림 3.10] 대난지도 측정소 및 당진지역의 가스상물질 농도 변화

4.2. 기상 연계분석 및 상관성 분석

- 기상청 기상자료개방포털에서 제공하는 방재기상관측장비⁷⁾로부터 관측된 자료를 활용하여 분석 기간의 풍향 비율과 풍속 등을 분석하고, 당진지역의 주 풍향인 북서풍일 때 측정 항목의 농도변화를 검토함.
- 마을대기측정망과의 비교분석을 위해 데이터 축적이 시작된 시기인 2020년 9월부터 2021년 10월까지 총 14개월간의 관측 자료로 풍향 및 풍속을 비교함.



[그림 3.11] 당진지역의 풍향에 따른 측정항목 농도 분석

- 풍향의 경우 북서풍 40.6%, 남서풍 23.8%, 북동풍 26.9%, 남동풍 8.7%으로 서풍 계열이 다른 풍향에 비하여 60% 이상 우세한 것으로 분석됨.
- 계절별 풍향을 분석한 결과, 봄철은 북서풍 47.3%, 여름철은 남서풍 34.1%, 가을철은 북서풍 36.8%, 겨울철은 북서풍 54.5%로 여름철 남서풍을 제외하고 북서풍이 우세한 것으로 나타남.

7) 기상관측소가 없는 곳에 설치되어 집중호우, 우박, 뇌우, 돌풍 등과 같은 국지적인 악기상 현상을 실시간으로 감시하는 장비

- 풍향별 평균 각도와 풍속을 분석한 결과, 북서풍일 때 322.4o, 1.8 m/s로 가장 빠른 풍속을 나타냈고, 남서풍 213.7o, 1.4 m/s, 북동풍 39.9o, 1.2 m/s, 남동풍 137.3o, 1.2 m/s으로 나타나 서풍 계열이 동풍 계열에 비해 상대적으로 빠른 풍속을 보임.
- 북서풍이 불어올 때 다른 측정소의 대기오염물질 농도 비율이 대난지도 보다 높은 것으로 나타났는데, 이를 통해 발전소에서 배출된 대기오염물질이 풍하 방면에 위치한 마을에 가장 많이 영향을 미치며 발전소와의 거리가 멀어질수록 대기오염물질 농도가 낮아지는 것을 확인할 수 있었음.
- 북서풍일 때 대난지도의 PM10, PM2.5, NO2의 농도는 각각 31.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 13.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.006 ppm으로 나타났고, 이때 당진시청사는 43.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 21.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.014 ppm, 송산면이 58.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.016 ppm, 금천이 35.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 27.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.011 ppm, 성상이 41.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 26.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.011 ppm으로 나타남. 3차년도와 농도 비교 결과 PM10, PM2.5 농도는 상승한 반면 NO2 농도 저하되었음.
- PM10의 농도는 북서풍일 때, 송산면 > 당진시청사 > 성상 > 금천 > 대난지도 순으로 나타났으며, PM2.5의 농도는 금천 > 성상 > 송산면 > 당진시청사 > 대난지도 순이었고, NO2의 경우 송산면 > 당진시청사 > 금천 = 성상 > 대난지도 순으로 나타나 PM10과 NO2의 농도 경향이 유사한 것으로 확인됨.
- 측정한 대기오염물질 중 PM10, NO2는 발전소로부터 거리가 멀어질수록 농도가 감소하는 것으로 나타난 반면, PM2.5는 발전소로부터 거리가 멀어질수록 농도가 증가함.
- 송산면 측정소의 경우 당진화력발전소에서의 이격거리가 당진시청사 측정소 (12 km)에 비해 더 멀리 떨어져 있으나 (22 km) 측정소 주변의 대규모배출시설 (제철산업단지)의 영향으로 PM10, PM2.5, NO2의 농도가 더 높게 나타난 것으로 분석됨.
- 대난지도 고정측정망과 도시대기측정망(당진시청사, 송산면) 그리고 마을대기측정망(금천, 성상)을 대상으로 측정된 자료의 Pearson 상관분석을 수행한 결과,
 - PM_{2.5}(당진시청사 ↔ 송산면), NO₂(당진시청사 ↔ 성상) 사이의 상관계수가 0.943으로 가장 높게 나타났고, NO₂(성상 ↔ 금천)가 0.940, PM₁₀(당진시청사 ↔ 송산면)이 0.916 순으로 높은 상관성을 보임.

- Pearson 상관분석을 통해 측정소 간 상관성이 높은 곳은 오염물질이 상호영향을 주는 것을 예측할 수 있었으며, 대기오염물질이 많이 발생하는 장소에 체계적 관리가 이뤄진다면 상호영향을 미치는 곳의 긍정적 영향을 줄 수 있을 것으로 분석됨.
- 각 측정소의 대기오염물질간 상관관계 산점도는 모두 우상향의 경향성을 보이며 특히 PM₁₀과 NO₂의 상관성⁸⁾이 높은 것으로 나타났는데, 이는 PM₁₀ 원인물질이 NO₂ 생성기작에 관여할 수 있음을 추정할 수 있었음.

[표 3.13] 당진시에 측정된 오염물질 농도(2020년 9월~2021년 10월)

풍향	N	측정소	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppm)	평균각도	평균풍속
0~90° (북동풍)	114 (26.9%)	대난지도	36.6	20.0	0.007	39.9	1.2
		당진시청사	38.2(4%)	20.6(3%)	0.016(129%)		
		송산면	41.5(13%)	21.9(9%)	0.016(129%)		
		금천	41.5(13%)	21.9(9%)	0.016(129%)		
		성상	32.6(-11%)	22.8(14%)	0.011(57%)		
		평균	35.4	21.1	0.011		
90~180° (남동풍)	37 (8.7%)	대난지도	26.5	15.2	0.008	137.3	1.2
		당진시청사	38.9(47%)	21.1(39%)	0.014(75%)		
		송산면	40.4(52%)	21.0(38%)	0.014(75%)		
		금천	41.4(56%)	28.4(87%)	0.010(25%)		
		성상	46.4(75%)	40.3(165%)	0.009(13%)		
		평균	38.7	25.2	0.011		
180~270° (남서풍)	101 (23.8%)	대난지도	36.1	22.0	0.008	213.7	1.4
		당진시청사	51.9(44%)	26.7(21%)	0.012(50%)		
		송산면	59.5(65%)	29.0(32%)	0.013(63%)		
		금천	47.3(31%)	29.8(35%)	0.010(25%)		
		성상	54.2(50%)	27.6(25%)	0.008(0%)		
		평균	49.8	27.0	0.010		
270~360° (북서풍)	172 (40.6%)	대난지도	31.5	13.0	0.006	322.4	1.8
		당진시청사	43.0(32%)	21.5(39%)	0.014(100%)		
		송산면	58.9(76%)	25.7(58%)	0.016(125%)		
		금천	35.9(12%)	27.9(68%)	0.011(63%)		
		성상	41.0(26%)	26.6(62%)	0.011(63%)		
		평균	42.1	22.9	0.012		

※ ()안에 %는 대난지도 측정지점 대비 증가율임.

8) 3차년도 연구에서는 오염물질과 기상인자간 상관성을 분석하였으며, 가스상 오염물질인 NO₂와 기상인자간 상관성은 낮은 것으로 나타남.

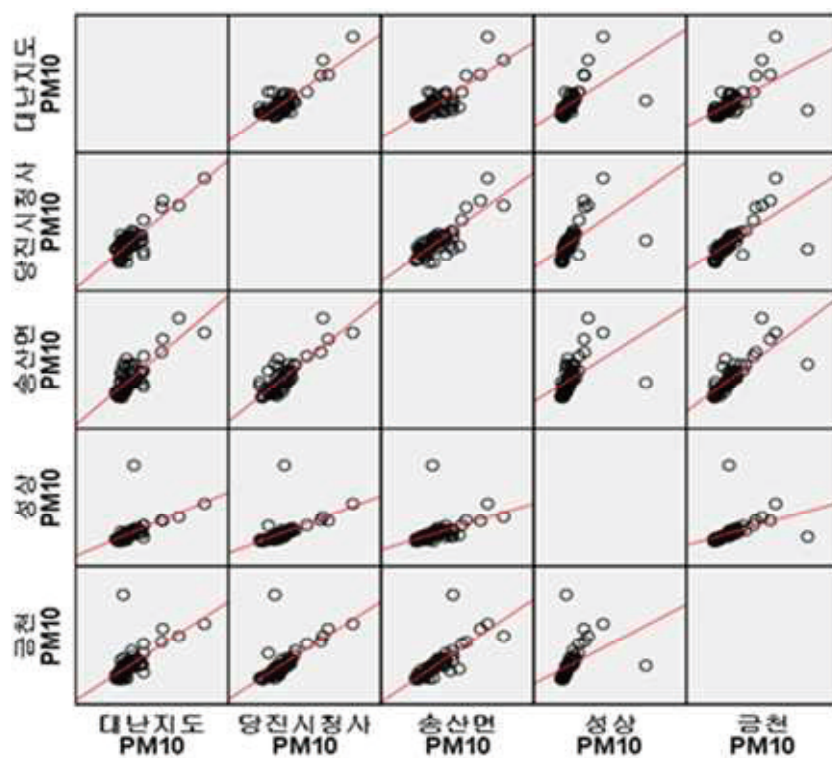
- 4차년도 기상인자 분석결과와 3차년도 기상인자 분석결과(2019년 8월 ~ 2020년 7월)를 평균풍속에 따른 이격거리별 농도 증감량에 대해 비교 분석함.
- 화력발전소의 영향을 가장 잘 확인할 수 있는 북서풍일 경우, 배경농도인 대난지도부터 이격거리별로 농도가 증가하는 것을 연구용역 기간 전체에서 확인할 수 있었으며, PM₁₀, NO₂의 경우 풍속이 감소할수록(3차년도 대비 4차년도 0.8m/s 감소) 이격거리별 농도의 증가율이 커지는 것을 확인할 수 있었음.
- 그러나, 북서풍 이외의 풍향에서는 대난지도 측정소가 배경농도를 나타낼만한 특징을 확인할 수 없었음.

[표 3.14] 대난지도 측정소 주변 연차별 기상인자(북서풍) 분석

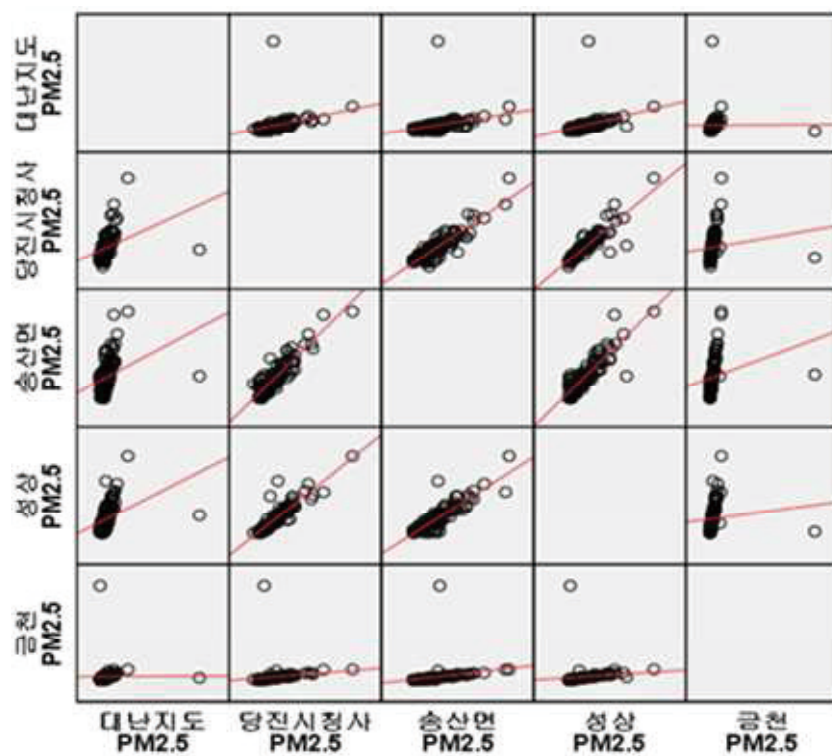
연차	N	측정소	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppm)	평균각도 (°)	평균풍속 (m/s)
3차년	48 (15.6%)	대난지도	27.6	11.8	0.009	302.4	2.6
		당진시청	30.8(12%)	19.6(66%)	0.014(56%)		
		송산면	32.6(18%)	20.5(74%)	0.015(67%)		
		평균	30.3	17.3	0.013		
4차년	172 (40.6%)	대난지도	31.5	13.0	0.006	322.4	1.8
		당진시청사	43.0(37%)	21.5(65%)	0.014(133%)		
		송산면	58.9(87%)	25.7(98%)	0.016(167%)		
		평균	44.5	20.1	0.012		

[표 3.15] 당진시의 측정소별 Pearson 상관분석 결과(2020년 9월~2021년 10월)

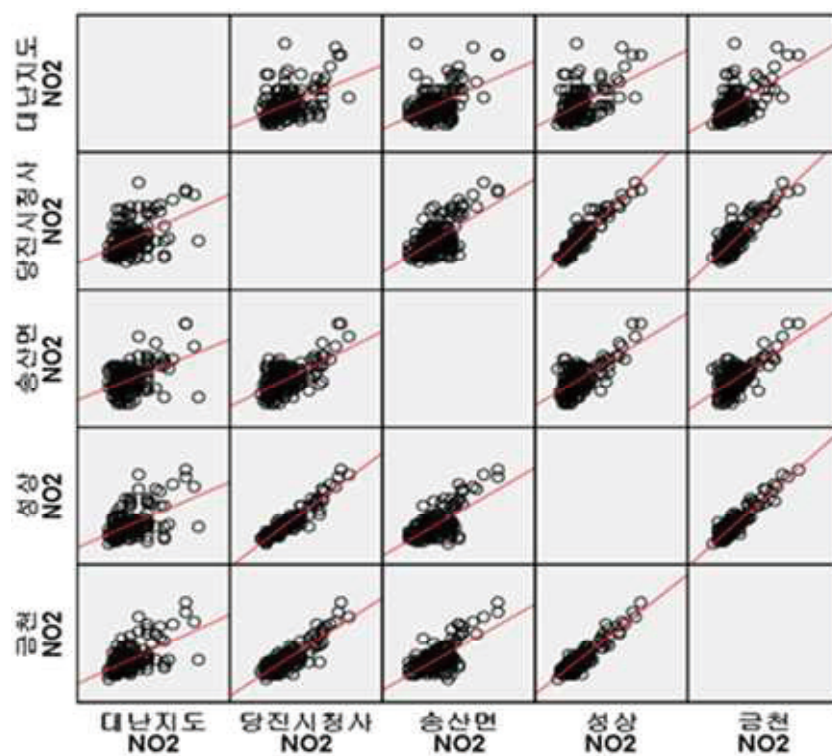
	대난지도 PM ₁₀	당진시청사 PM ₁₀	송산면 PM ₁₀	성상 PM ₁₀	금천 PM ₁₀	대난지도 PM _{2.5}	당진시청사 PM _{2.5}	송산면 PM _{2.5}	성상 PM _{2.5}	금천 PM _{2.5}	대난지도 NO ₂	당진시청사 NO ₂	송산면 NO ₂	성상 NO ₂	금천 NO ₂
대난지도 PM ₁₀	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.611** .548** 1	0.189 .176 176	0.002 .348** 75	0.115 .800** 127	0.046 .142** 198	0.052 .586** 174	0.046 .600** 186	0.709 .199** 140	0.937 .257** 126	0.225 .332** 203	0.093 .286** 174	0.111 .164** 186	0.131 .319** 204	0.130 .333** 192
당진시청사 PM ₁₀	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.611** .548** 1	0.189 .176 176	0.002 .348** 75	0.115 .800** 127	0.046 .142** 198	0.052 .586** 174	0.046 .600** 186	0.709 .199** 140	0.937 .257** 126	0.225 .332** 203	0.093 .286** 174	0.111 .164** 186	0.131 .319** 204	0.130 .333** 192
송산면 PM ₁₀	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.373 .916** 373	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.001 .177** 283	0.000 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.002 .362 362	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
성상 PM ₁₀	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.373 .916** 373	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
금천 PM ₁₀	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.115 .800** 127	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
대난지도 PM _{2.5}	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.147 .586** 181	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
당진시청사 PM _{2.5}	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.147 .586** 181	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
송산면 PM _{2.5}	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.147 .586** 181	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
성상 PM _{2.5}	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.147 .586** 181	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
금천 PM _{2.5}	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.147 .586** 181	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
대난지도 NO ₂	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.025 .332** 126	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
당진시청사 NO ₂	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.025 .332** 126	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
송산면 NO ₂	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.025 .332** 126	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
성상 NO ₂	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.025 .332** 126	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293
금천 NO ₂	Pearson 계수 유의확률 N 0.000	0.025 .332** 126	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.000 .744** 202	0.003 .166** 168	0.000 .540** 361	0.000 .568** 361	0.003 .177** 283	0.001 .232** 211	0.000 .216** 178	0.000 .111** 362	0.032 .375 375	0.000 .216** 364	0.000 .254** 293



[그림 3.12] 당진시 측정소별 PM10 상관관계 산점도



[그림 3.13] 당진시 측정소별 PM2.5 상관관계 산점도

[그림 3.14] 당진시 측정소별 NO₂ 상관관계 산점도

4.3. 청라면 측정소 결과

- 청라면 측정소는 한국중부발전(주) 보령발전본부부터 배출된 대기오염물질이 발전소와의 이격거리에 따라 이동거리가 늘어나면서 나타나는 농도변화 분석을 위해 설치됨.
- 발전소와 거리별 측정소는 송학 4km, 교성 5km, 주교면 7km, 대천2동 10km, 청라면 17km 순으로, PM₁₀ 농도는 주교면 측정소가 $41 \pm 33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고, 청라면 $33 \pm 27 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대천2동 $33 \pm 25 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 교성 $21 \pm 5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 송학 $17 \pm 3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 측정되었으며 3차년도 연구결과 (관련 보고서 132쪽 참고)와 평균농도는 유사하나 변동 폭이 최대 약 74% 증가함.
- PM_{2.5} 농도는 주교면 측정소가 $20 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고, 대천2동 $19 \pm 14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 교성 $18 \pm 18 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 청라면 $17 \pm 11 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 송학 $11 \pm 13 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 측정되었으며 PM₁₀과 마찬가지로 송학의 농도가 가장 낮은 것으로 확인됨.
- NO₂ 농도는 주교면 측정소가 $0.012 \pm 0.008 \text{ ppm}$ 으로 가장 높고, 대천2동 $0.008 \pm 0.006 \text{ ppm}$, 청라면 $0.007 \pm 0.003 \text{ ppm}$, 교성 $0.004 \pm 0.002 \text{ ppm}$, 송학 $0.003 \pm 0.002 \text{ ppm}$ 순으로 측정되어, 송학은 PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ 농도가 가장 낮은 지역으로 확인됨.
- PM₁₀의 경우 분석기간 동안 주교면 측정소의 농도가 가장 높았고 겨울철(12~2월) 15.0일, 봄철(3~5월) 18.2일이 충청남도 대기환경 기준(연평균)인 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났고, 여름철(6~8월)이 되면서 대기환경기준을 만족하는 것으로 확인됨.
- PM_{2.5}는 PM₁₀과 마찬가지로 겨울철 및 봄철에 농도가 높은 것으로 확인되었는데, 겨울철(12~2월) 12.6일, 봄철(3~5월) 11.8일이 충청남도 대기환경 기준(연평균)인 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 것으로 나타났음.
- 주교면과 대천2동은 특별한 대기오염원이 없음에도 불구하고 해당 지역이 PM_{2.5} 농도가 높은 것으로 확인되었는데, 이는 PM_{2.5}의 약 75%가 황산화물, 질소산화물, 암모니아 등에 의한 2차 미세먼지로써 점단위 배출원이 확인이 되지 않는 이 지역의 경우 면단위 배출원인 농지나 도심내 연소, 교통량 등에 의한 2차 생성 미세먼지 영향인 것으로 추정됨.
- 주교면은 주변농지의 암모니아나 교통량이 많은 서해안고속도로와 21번 국도 사이의 지리적 영향, 대천2동은 상대적인 도심지로 난방의 영향, 교통에 의한 황산화물과 질소산화물의 영향으로 추정할 수 있으나, 명확한 원인분석을 위해서는 현장 측정을 통한 모델링이 필요할 것으로 판단됨.

- 다만, 풍속, 온도 등 2차 생성 미세먼지가 전체 농도변화에 영향을 미치지 못할 정도의 조건이 포함되도록 장기 모니터링 연구가 이뤄진다면 이격거리별 농도변화를 보다 명확하게 파악할 수 있으며 반복된 실험을 통해 정확도를 제고할 수 있음.
 - NO₂의 경우 분석기간(2020년 12월~2021년 11월) 동안 충청남도 대기환경기준(연평균)인 0.02 ppm을 만족함.
- 청라면 측정소는 2019년 8월 운영을 시작하였으며, 2020년 10월까지 3년간 계절별 대기오염물질 농도변화를 확인함.
- 2021년 PM₁₀ 봄의 평균농도가 대기환경기준을 크게 초과했으며, PM_{2.5}의 경우 2019년 겨울과 2020년 겨울, 2021년 봄의 평균농도가 대기환경기준을 초과함.
 - 청라면 측정소는 2년의 짧은 연구라는 한계는 있으나, 계절별 PM₁₀과 PM_{2.5} 비율 변화를 살펴보면 봄 기간이 43.5%로 낮게 나타남을 알 수 있으며, 이를 통해 관련 지역이 상대적으로 봄 기간 2차 생성 미세먼지 발생 조건이 낮게 발생함을 알 수 있음.

[표 3.16] 청라면 측정소 운영기간 계절별 농도변화

구분	PM ₁₀			PM _{2.5}			NO ₂		
	2019	2020	2021	2019	2020	2021	2019	2020	2021
봄		37.3	51.7		17.3	21.0		0.006	0.007
여름	22.0	27.0	18.0	12.0	15.5	11.0	0.004	0.005	0.004
가을	28.7	30.7	22.0	14.7	15.0	12.0	0.007	0.007	0.005
겨울	35.3	39.5		23.3	20.0		0.008	0.009	

[표 3.17] 보령시에 측정된 PM10 농도(2019년 8월~2021년 10월)

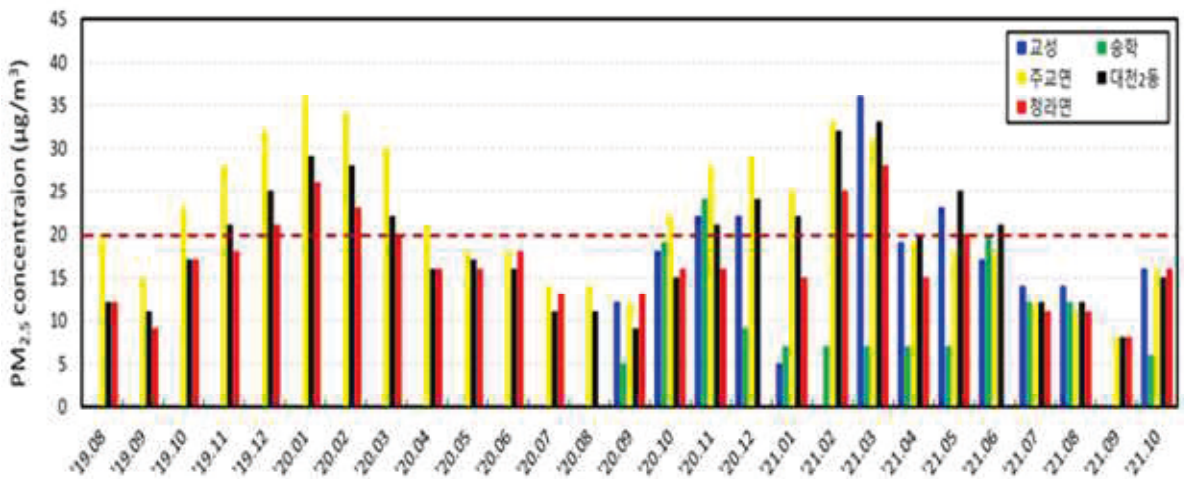
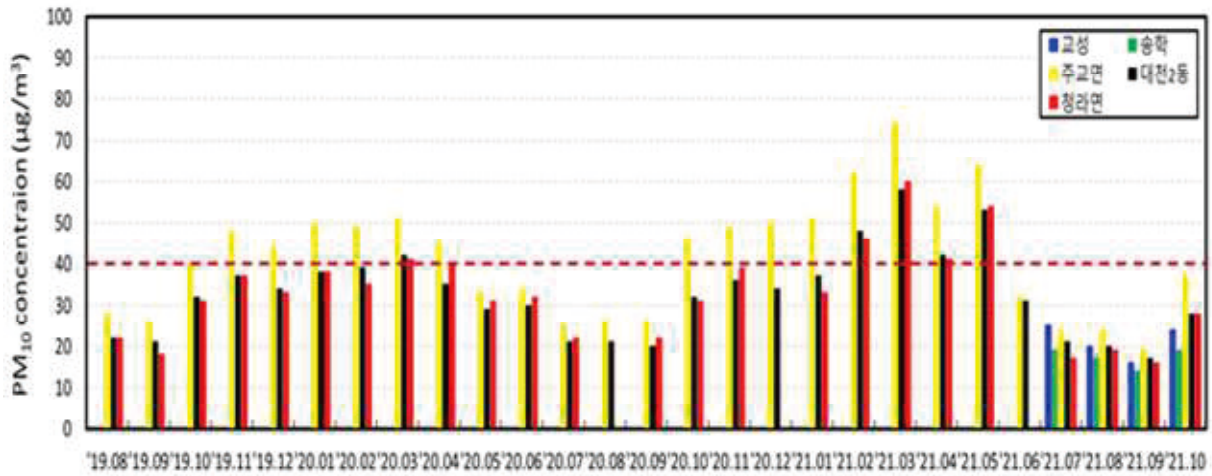
날짜	PM ₁₀ (μg/m ³)				
	교성	송학	주교면	대천2동	청라면
'19.08			28	22	22
'19.09			26	21	18
'19.10			40	32	31
'19.11			48	37	37
'19.12			44	34	33
'20.01			50	38	38
'20.02			49	39	35
'20.03			51	42	41
'20.04			45	35	40
'20.05			33	29	31
'20.06			34	30	32
'20.07			25	21	22
'20.08			26	21	
'20.09			26	20	22
'20.10			46	32	31
'20.11			49	36	39
'20.12			50	34	
'21.01			51	37	33
'21.02			62	48	46
'21.03			74	58	60
'21.04			54	42	41
'21.05			64	53	54
'21.06			32	31	
'21.07	25	19	24	21	17
'21.08	20	17	24	20	19
'21.09	16	14	19	17	16
'21.10	24	19	37	28	28

[표 3.18] 보령시에 측정된 PM_{2.5} 농도(2019년 8월~2021년 10월)

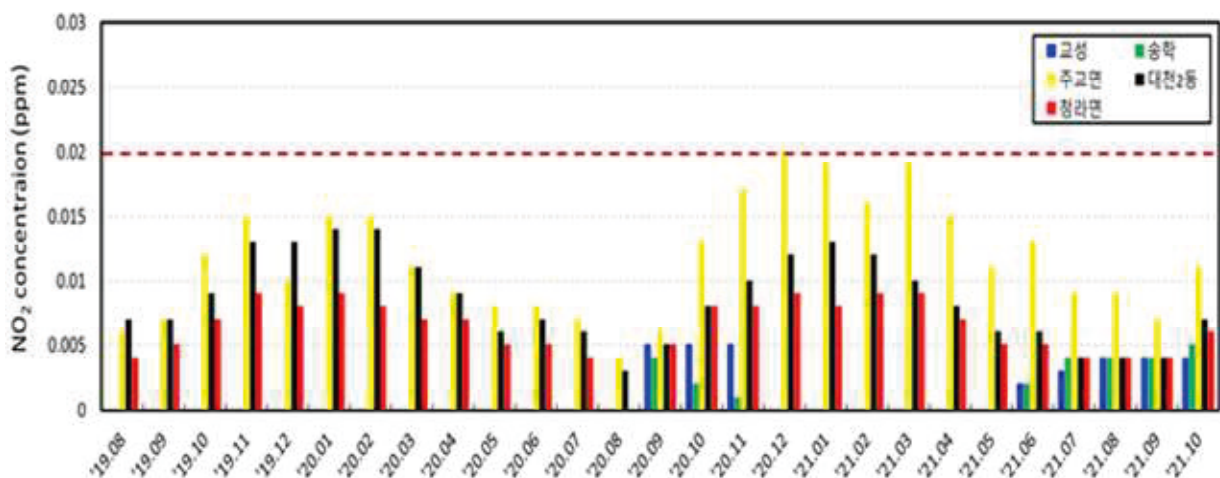
날짜	PM _{2.5} (μg/m ³)				
	교성	송학	주교면	대천2동	청라면
'19.08			20	12	12
'19.09			15	11	9
'19.10			23	17	17
'19.11			28	21	18
'19.12			32	25	21
'20.01			36	29	26
'20.02			34	28	23
'20.03			30	22	20
'20.04			21	16	16
'20.05			18	17	16
'20.06			18	16	18
'20.07			14	11	13
'20.08			14	11	
'20.09	12	5	12	9	13
'20.10	18	19	22	15	16
'20.11	22	24	28	21	16
'20.12	22	9	29	24	
'21.01	5	7	25	22	15
'21.02		7	33	32	25
'21.03	36	7	31	33	28
'21.04	19	7	19	20	15
'21.05	23	7	18	25	20
'21.06	17	20	18	21	
'21.07	14	12	12	12	11
'21.08	14	12	11	12	11
'21.09			8	8	8
'21.10	16	6	16	15	16

[표 3.19] 보령시에 측정된 NO₂ 농도(2019년 8월~2021년 10월)

날짜	NO ₂ (ppm)				
	교성	송학	주교면	대천2동	청라면
'19.08			0.006	0.007	0.004
'19.09			0.007	0.007	0.005
'19.10			0.012	0.009	0.007
'19.11			0.015	0.013	0.009
'19.12			0.01	0.013	0.008
'20.01			0.015	0.014	0.009
'20.02			0.015	0.014	0.008
'20.03			0.011	0.011	0.007
'20.04			0.009	0.009	0.007
'20.05			0.008	0.006	0.005
'20.06			0.008	0.007	0.005
'20.07			0.007	0.006	0.004
'20.08			0.004	0.003	
'20.09	0.005	0.004	0.006	0.005	0.005
'20.10	0.005	0.002	0.013	0.008	0.008
'20.11	0.005	0.001	0.017	0.01	0.008
'20.12			0.020	0.012	0.009
'21.01			0.019	0.013	0.008
'21.02			0.016	0.012	0.009
'21.03			0.019	0.010	0.009
'21.04			0.015	0.008	0.007
'21.05			0.011	0.006	0.005
'21.06	0.002	0.002	0.013	0.006	0.005
'21.07	0.003	0.004	0.009	0.004	0.004
'21.08	0.004	0.004	0.009	0.004	0.004
'21.09	0.004	0.004	0.007	0.004	0.004
'21.10	0.004	0.005	0.011	0.007	0.006



[그림 3.15] 청라면 측정소 및 보령지역의 입자상물질 농도 변화



[그림 3.16] 청라면 측정소 및 보령지역의 가스상물질 농도 변화

- 당진지역과 마찬가지로 기상청 기상자료개방포털의 대천항 기상방재센터 자료를 활용하여 서풍 계열일 때 측정항목의 농도변화를 검토한 결과 북서풍의 비율이 가장 높은 것으로 나타남.
- 북서풍 37.7%, 남서풍 20.0%, 북동풍 26.2%, 남동풍 16.0%으로 북서풍의 비율이 가장 높은 것으로 나타나 서풍 계열이 전체의 57.7%를 차지하는 것으로 나타남.



[그림 3.17] 보령지역의 풍향에 따른 측정항목 농도분석

- 계절별 풍향은 봄철(북서풍 38.0%), 여름철(남서풍 29.3%), 가을철(북서풍 38.0%), 겨울철(북서풍 52.2%)로 여름철을 제외하고 모두 북서풍이 우세한 것으로 나타나 충남 지역의 계절별 풍향 비율과 유사한 경향을 나타냄.
- 북서풍일 때 청라면보다 다른 지역의 대기오염물질 농도 비율이 높아 발전소에서 배출된 대기오염물질이 풍하 방면에 위치하고 있는 마을에 영향을 많이 미치며 발전소와의 거리가 멀어질수록 농도가 낮아지는 것을 확인하였음.
- 북서풍일 때 평균 각도와 풍속이 각각 325.2° , 3.1 m/s 로 가장 빠른 풍속을 나타냈고, 북동풍일 경우 각도와 풍속은 32.9° , 2.9 m/s , 남동풍일 경우 각도와 풍속은 144.8° , 2.9 m/s , 남서풍일 경우 각도와 풍속은 216.1° , 2.5 m/s 로 나타났으며 당진시와 비교하여 보령이 2배 이상 풍속이 빠른 것으로 확인됨.

- 서풍 계열이 57.7%로 가장 높은 비율을 나타냈고, 북서풍은 3.1 m/s, 남서풍은 2.5 m/s로 빠른 속도를 보여 발전소로부터 배출된 대기오염물질이 풍하 방향으로 빠르게 이동하는 것을 확인하였음.
- 주풍이 북서풍일 때 송학의 PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 의 농도는 각각 $26.3 \mu g/m^3$, $42.1 \mu g/m^3$, 0.005 ppm으로 나타났고, 이때 교성은 $26.3 \mu g/m^3$, $42.1 \mu g/m^3$, 0.005 ppm, 주교면이 $47.3 \mu g/m^3$, $21.3 \mu g/m^3$, 0.014 ppm으로 나타남.
 - 대천2동이 $36.5 \mu g/m^3$, $20.3 \mu g/m^3$, 0.009 ppm, 청라면이 $40.7 \mu g/m^3$, $16.5 \mu g/m^3$, 0.007 ppm으로 나타났고 풍향에 따라 주교면, 청라면으로 이동(지형상 바람골 형성) 하면서 농도가 낮아지는 경향을 보임.
- 주풍이 남서풍일 때 송학의 PM_{10} , $PM_{2.5}$, NO_2 의 농도는 각각 $16.1 \mu g/m^3$, $9.6 \mu g/m^3$, 0.004 ppm으로 나타났고, 이때 교성은 $18.0 \mu g/m^3$, $31.1 \mu g/m^3$, 0.004 ppm, 주교면이 $48.9 \mu g/m^3$, $21.1 \mu g/m^3$, 0.012 ppm으로 나타남.
 - 대천2동이 $39.3 \mu g/m^3$, $22.6 \mu g/m^3$, 0.007 ppm, 청라면이 $49.6 \mu g/m^3$, $20.4 \mu g/m^3$, 0.006 ppm으로 나타났고 NO_2 만 주교면, 청라면으로 이동하면서 농도가 낮아져 북서풍일 때와 유사한 경향을 보임.
- 북서풍일 때, PM_{10} 의 농도는 주교면>청라면>대천2동>교성>송학 순으로 나타났고, $PM_{2.5}$ 의 농도는 교성>주교면>대천2동>청라면 순, NO_2 의 농도는 주교면>대천2동>청라면>교성>송학 순으로 확인되어 $PM_{2.5}$, NO_2 는 발전소로부터 거리가 멀어질수록 농도가 낮아지고, 당진시에 비해 보령시의 경향성과 일치율이 떨어지는 것을 확인함.
- 충청남도는 여름철을 제외한 계절에서 북서풍 또는 남서풍의 비율이 높으므로 발전소에서 배출된 대기오염물질이 내륙에 위치한 마을에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, PM_{10} 및 NO_2 는 내륙으로 이동할수록 농도가 낮아지는 경향이 유사하였고, $PM_{2.5}$ 는 발전소에서 멀어도 농도가 높게 나타난 경우가 있는 것으로 보아 작은 입경으로 인해 멀리 이동할 수 있는 것을 확인할 수 있었음.

[표 3.20] 보령시에 측정된 오염물질 농도(2020년 9월~2021년 10월)

풍향	N	측정소	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppm)	평균 각도	평균 풍속
0~90° (북동풍)	111 (26.2%)	교성	20.0(24%)	28.5(166%)	0.004(0%)	32.9	2.9
		송학	16.1	10.7	0.004		
		주교면	35.4(120%)	17.0(59%)	0.012(200%)		
		대천2동	26.2(63%)	14.3(34%)	0.007(75%)		
		청라면	33.4(107%)	12.9(21%)	0.006(50%)		
		평균	26.2	16.7	0.007		
90~180° (남동풍)	68 (16.0%)	교성	20.3(22%)	44.1(307%)	0.004(25%)	144.8	2.9
		송학	16.8	11.2	0.003		
		주교면	55.9(243%)	21.9(100%)	0.014(275%)		
		대천2동	43.4(165%)	20.7(89%)	0.009(150%)		
		청라면	44.5(172%)	17.6(60%)	0.006(75%)		
		평균	36.2	23.1	0.007		
180~270° (남서풍)	85 (20.0%)	교성	18.0(12%)	31.1(201%)	0.004(0%)	216.1	2.5
		송학	16.1	9.6	0.004		
		주교면	48.9(204%)	21.1(107%)	0.012(200%)		
		대천2동	39.3(144%)	22.6(121%)	0.007(75%)		
		청라면	49.6(208%)	20.4(101%)	0.006(50%)		
		평균	34.4	21.0	0.007		
270~360° (북서풍)	160 (37.7%)	교성	26.3(37%)	42.1(281%)	0.005(50%)	325.2	3.1
		송학	20.4	12.0	0.003		
		주교면	47.3(167%)	21.3(87%)	0.014(275%)		
		대천2동	36.5(100%)	20.3(78%)	0.009(150%)		
		청라면	40.7(126%)	16.5(42%)	0.007(100%)		
		평균	34.2	22.4	0.008		

※ ()안에 %는 송학 측정지점 대비 증가율임.

- 청라면 기상인자(풍향, 풍속)에 따른 연차별 이격거리별 농도 증가/감소에 대한 변화량을 비교 분석하였으나, 화력발전소의 영향을 고려할 수 있는 남서풍의 경우, 주교면과 대천2동 주변지역은 2차 생성 미세먼지 등의 영향이 예측되어 거리별로 오염물질의 증가 또는 감소 경향 특성을 확인할 수 없음.

[표 3.21] 청라면 측정소 주변 연차별 기상인자(남서풍) 분석

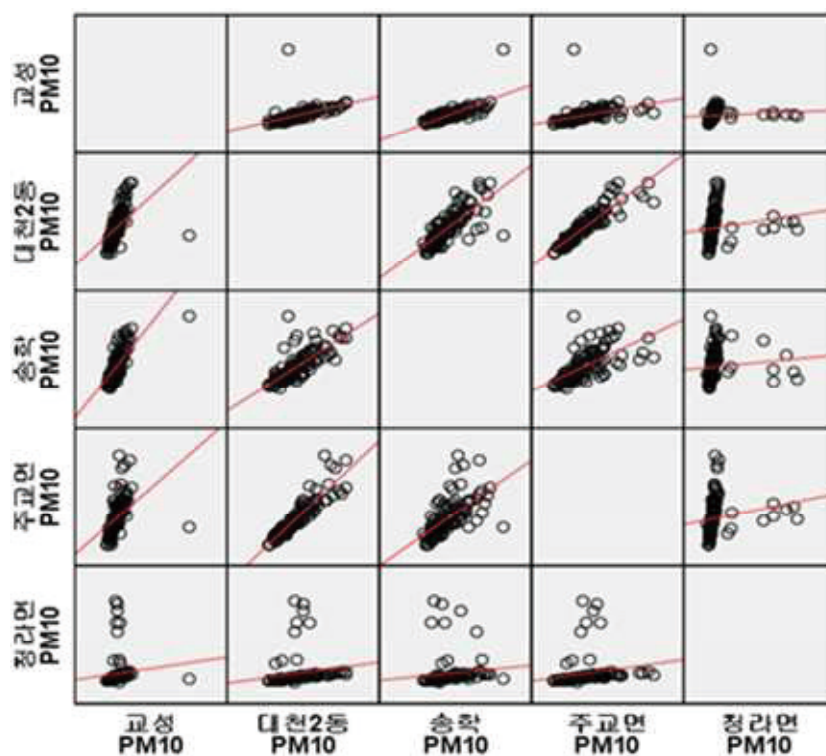
연차	N	측정소	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	NO ₂ (ppm)	평균각도 (°)	평균풍속 (m/s)
3차년	95 (26.6%)	주교면	37.6	19.9	8	232.3	2.6
		대천2동	31.8 (-15%)	17.5 (-12%)	8 (0%)		
		청라면	33.6 (-11%)	16.4 (-18%)	5 (-38%)		
		평균	34.3	17.9	7.0		
4차년	85 (20.0%)	주교면	48.9	21.1	0.012	216.1	2.5
		대천2동	39.3(-20%)	22.6(7%)	0.007(-42%)		
		청라면	49.6(-1%)	20.4(1%)	0.006(-5%)		
		평균	45.8	21.4	0.008		

- 보령시에 설치되어 있는 청라면 고정측정망, 주교면·대천2동 도시대기측정망과 교상·송학 마을대기측정망을 대상으로 Pearson 상관분석을 수행함.
- 보령시 측정을 통해 측정된 항목 모두 당진시에 비해 선형 상관관계가 낮게 나타났는데, 한국중부발전(주) 보령발전본부와 거리가 가장 가까운 송학의 NO₂와 나머지 측정소의 NO₂ 선형 상관관계가 음의 부호를 띤다는 것은 한 변수가 증가하면 다른 변수는 감소한다는 것을 의미함.
- PM₁₀(대천2동 ↔ 주교면) 사이의 상관계수가 0.974(3차년도 주교면 ↔ 청라면, 0.929로 가장 높았음⁹⁾)로 가장 높게 나타났고, 이외에도 PM_{2.5}(대천2동 ↔ 청라면)가 0.940, NO₂(대천2동 ↔ 주교면)는 0.881 등으로 높은 상관성을 보임.
- 당진시는 산점도의 추세선을 기준으로 데이터가 밀집하여 측정소 간의 상관관계가 높은 것을 확인하였고, 보령시는 데이터가 흩어져 분포하거나 경향이 뚜렷하지 않아 당진시에 비해 상관관계가 다소 낮은 것을 확인함.
- 관련 분석을 통해 당진시에 비해 보령시가 풍향에 따른 거리별 농도변화 일치율이 떨어지는 분석결과와 일치함을 확인하였음.

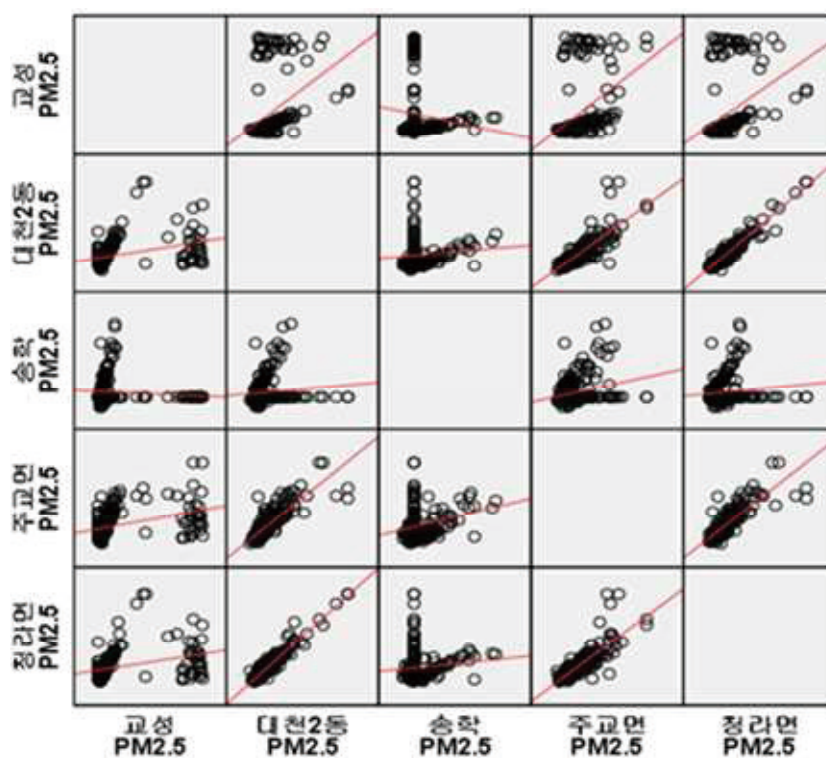
9) 3차년 대비 4차년 풍속이 상대적으로 낮아 상대적으로 무거운 입자상 물질인 PM₁₀은 가까운 거리의 측정소 간 상관성이 높은 것으로 나타남. (3차년도 보고서 134페이지 참조)

[표 3.22] 보령시의 측정소별 Pearson 상관분석 결과(2020년 9월~2021년 10월)

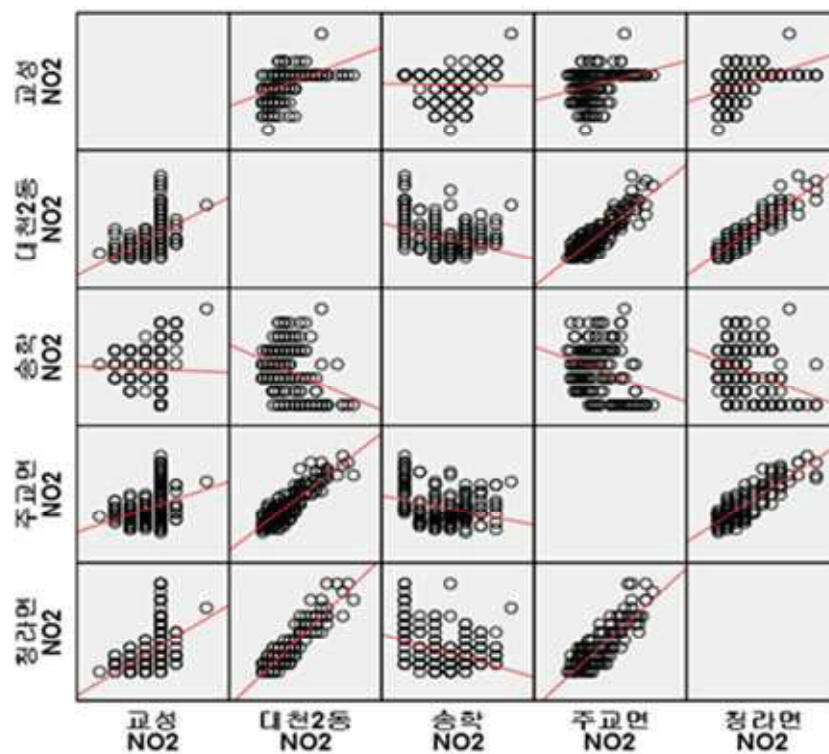
		교성 PM ₁₀	대천2동 PM ₁₀	송학 PM ₁₀	주교면 PM ₁₀	청리면 PM ₁₀	교성 PM _{2.5}	대천2동 PM _{2.5}	송학 PM _{2.5}	주교면 PM _{2.5}	청리면 PM _{2.5}	교성 NO ₂	대천2동 NO ₂	송학 NO ₂	주교면 NO ₂	청리면 NO ₂
교성 PM ₁₀	Pearson 계수	1														
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.351	0.060	0.000	0.055	0.000	0.000	0.587	0.207	0.008	0.007	0.026
대천2동 PM ₁₀	Pearson 계수	0.504**	1													
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.049	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
송학 PM ₁₀	Pearson 계수	0.750**	0.385	1												
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
주교면 PM ₁₀	Pearson 계수	0.432**	0.762**	0.631**	1											
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
청리면 PM ₁₀	Pearson 계수	0.265	0.385	0.109	0.609**	1										
	유의확률	0.060	0.000	0.263	0.000	0.115	0.000	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
교성 PM _{2.5}	Pearson 계수	0.274	0.385	0.109	0.609**	0.101	1									
	유의확률	0.055	0.000	0.263	0.000	0.115	0.000	0.000	0.088	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
대천2동 PM _{2.5}	Pearson 계수	0.381**	0.792**	0.666**	0.817**	0.567**	0.363**	1								
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
송학 PM _{2.5}	Pearson 계수	0.575**	0.323**	0.147	0.389**	0.127	0.098	0.022	1							
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
주교면 PM _{2.5}	Pearson 계수	0.447**	0.792**	0.666**	0.817**	0.567**	0.363**	0.957**	0.108	0.089	0.099	0.535	0.036	0.000	0.001	0.089
	유의확률	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
청리면 PM _{2.5}	Pearson 계수	0.053	0.323**	0.147	0.389**	0.127	0.098	0.022	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
	유의확률	0.587	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
교성 NO ₂	Pearson 계수	0.124	0.298**	0.212*	0.424**	0.063	0.296**	0.484**	0.117*	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050	0.050
	유의확률	0.207	0.000	0.029	0.000	0.273	0.000	0.000	0.036	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
대천2동 NO ₂	Pearson 계수	0.253**	0.366**	0.366**	0.305**	0.039	-0.021	-0.134	-0.389**	-0.305**	0.069	0.107	-0.353**	1	-0.297**	-0.302**
	유의확률	0.008	0.000	0.000	0.000	0.603	0.780	0.055	0.000	0.000	0.358	0.111	0.000	0.000	0.000	0.000
송학 NO ₂	Pearson 계수	0.262**	0.287**	0.336**	0.419**	0.157**	0.163**	0.481**	0.186**	0.704**	0.459**	0.327**	0.881**	-0.297**	1	0.854**
	유의확률	0.007	0.000	0.000	0.000	0.006	0.003	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
주교면 NO ₂	Pearson 계수	0.216*	0.281**	0.228*	0.402**	0.106	0.329**	0.448**	0.091	0.662**	0.434**	0.462**	0.873**	-0.302**	0.854**	1
	유의확률	0.026	0.000	0.018	0.000	0.067	0.000	0.000	0.089	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
청리면 NO ₂	Pearson 계수	0.107	0.383	0.107	0.383	0.303	0.365	0.384	0.351	0.384	0.300	0.222	0.388	0.228	0.388	0.421
	유의확률	0.107	0.000	0.018	0.000	0.067	0.000	0.000	0.089	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000



[그림 3.18] 보령시 측정소별 PM10 상관관계 산점도



[그림 3.19] 보령시 측정소별 PM2.5 상관관계 산점도



[그림 3.20] 보령시 측정소별 NO2 상관관계 산점도

5. 요약 및 소결론

- 대기오염물질의 화력발전소 유입 전 배경농도 분석과 거리별 농도변화 분석을 위해 대난지도와 청라면 2개소의 고정측정망 운영함.
 - 당진시 난지1리 마을회관 주변 신축건물 공사로 인하여 주민들의 대난지도 측정소 이전 요구에 따라 당진시청소년수련원 소강당 옆으로 이전하여 운영함.
 - 대기질 측정의 정확성과 신뢰도를 제고하기 위해 대난지도 질소산화물(NO_x), 미세먼지(PM_{10}), 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 측정 장비에 대해 정도 검사와 등가성 평가를 실시하였음.
- 당진화력발전소를 기준으로 풍상지역에 대난지도 측정소를 위치하고 풍하지역에 송산면·당진시청사 도시대기측정망이 금천·성상 마을대기측정망이 위치함.
 - 대난지도 측정소는 NO_2 의 농도는 가장 낮게 확인되었고 입자상 물질인 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 의 농도는 금천측정소를 제외하고 가장 낮은 농도를 나타냈는데, 금천측정소 특이농도는 지역특성(산업, 토지이용 등)으로 설명되지 않아 삽교호, 아산호로부터 해풍 영향 등 지역 기상 특성의 영향이 미쳤을 것으로 추측됨.
 - 측정한 대기오염물질 중 PM_{10} , NO_2 는 발전소로부터 거리가 멀어질수록 농도가 감소하는 것으로 나타났으며 $\text{PM}_{2.5}$ 는 2차 생성에 따라 동일한 주변 반응물질에 따라 상이한 결과로 나타남.
 - Pearson 상관분석 결과, $\text{PM}_{2.5}$ (당진시청사 ↔ 송산면), NO_2 (당진시청사 ↔ 성상) 사이의 상관계수가 0.943으로 가장 높게 나타났고, 이외에도 NO_2 (성상 ↔ 금천)이 0.940, PM_{10} (당진시청사 ↔ 송산면)이 0.916 등으로 높은 상관성을 나타냄.
- 보령화력발전소를 기준으로 송학 4km, 교성 5km, 주교면 7km, 대천2동 10km, 청라면 20km 순으로 위치하며, 주교면과 청라면 측정소는 지형상 바람골이 형성되어 있음.
 - 지역 측정소의 PM_{10} 과 $\text{PM}_{2.5}$ 는 겨울철 및 봄철에 농도가 높았으며 전반적으로 보령발전본부와 가까운 마을대기측정망(교성, 송학)과 도시대기측정망(주교면, 대천2동) 보다 발전소로부터 이격거리가 멀어질수록 농도가 낮은 것으로 나타나 이격거리에 따른 농도변화를 확인할 수 있었음.
 - Pearson 상관분석 결과, PM_{10} (대천2동 ↔ 주교면) 사이의 상관계수가 0.974(3차년도 주교면 ↔ 청라면, 0.929로 가장 높았음¹⁰⁾)로 가장 높게 나타났고, 이외에도 $\text{PM}_{2.5}$ (대천2

동 ↔ 청라면)가 0.940, NO₂(대천2동 ↔ 주교면)는 0.881 등으로 높은 상관성을 보였으나 당진시에 비해 전반적으로 상관성이 낮은 것으로 분석됨.

- 고정측정망이 운영 중인 주변지역의 대기환경기준 초과 여부 검토를 위해 인접 국가대기 측정망과 마을대기측정망 자료를 분석함.
 - 당진화력본부 주변지역은 PM10의 경우 겨울철 16.8일, 봄철 21.4일, PM2.5는 겨울철 15.0일, 봄철 12.6일 대기환경기준을 초과하였으며, 보령화력본부 주변지역은 PM10의 경우 겨울철 15.0일, 봄철 18.2일, PM2.5는 겨울철 12.6일, 봄철 11.8일 대기환경기준을 초과하는 것으로 나타남.
- 고정측정망 운영결과를 바탕으로 측정소별·계절별·연도별 농도변화-기상인자-대기오염물질 농도와의 상관성을 분석한 결과, 고농도 미세먼지가 발생한 2019년을 기준으로 대난지도 측정소의 4년간 계절평균 농도를 분석한 결과, PM10, PM2.5 모두 2018년 봄, 겨울, 2019년 봄에 대기환경기준을 초과했으며, 2019년 8월부터 운영한 청라면 측정소는 2021년 봄에 대기환경기준을 초과함.
 - 기상인자에 따른 이격거리별 농도분석 결과 대난지도 측정소는 북서풍의 경우 배경농도로 활용할 수 있는 특징을 보였으나, 청라면 측정소는 2차 생성 미세먼지의 영향으로 인하여 이격거리별 대기오염 증가/감소 농도변화 분석용으로 활용하기에는 다소 제한적임.
 - 대난지도 측정소는 풍속이 감소할수록 이격거리별 PM10, NO₂ 농도가 증가하여 대기정체로 인해 농도가 증가할 수 있는 지역임을 확인함.

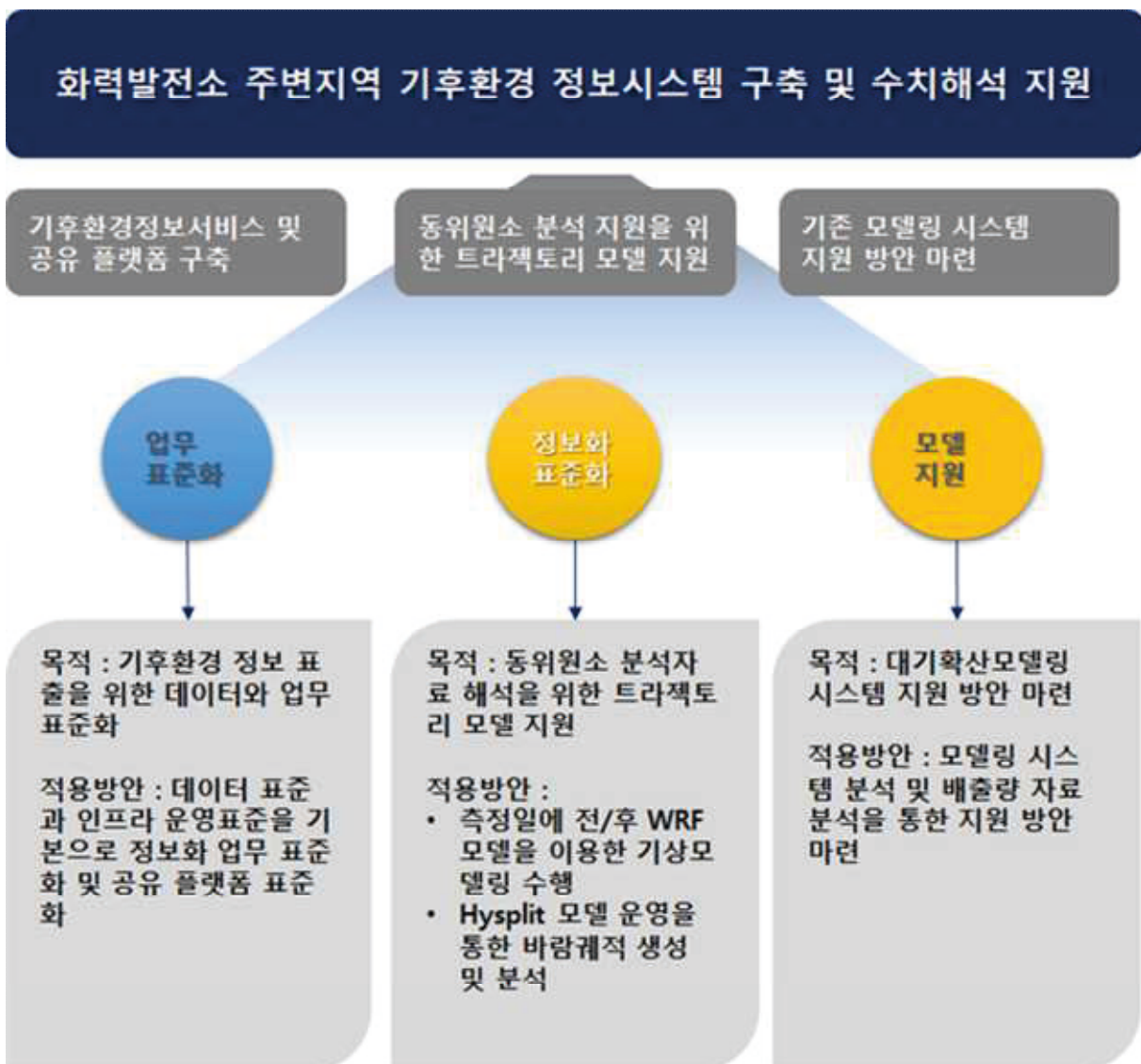
10) 3차년 대비 4차년 풍속이 상대적으로 낮아 상대적으로 무거운 입자상 물질인 PM10은 가까운 거리의 측정소간 상관성이 높은 것으로 나타남(3차년도 보고서 134페이지 참조)

제4장 정보DB시스템 구축 및 모델링 지원

1. 연구목적
2. 연구개요
3. 기후정보 DB시스템 구축
4. 기후정보서비스 시스템
5. 타 시스템과 연계성

1. 연구목적

- 기후정보 DB시스템 구축은 ‘화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구’에서 도출된 기후 환경정보를 제공할 수 있는 정보시스템을 구축하고, 동위원소 분석지원을 위한 트라젝토리 모델링(본 보고서 6장 참고)과 모델링 지원 방안을 마련하고자 추진함.



[그림 4.1] 기후환경 DB시스템 구축 목표

2. 연구개요

- 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구조사에서 추진하고 있는 미기후, 간이측정망, 생태계 조사 등의 자료를 통합 제공하는 기후환경정보 서비스 시스템을 구축함.
 - 1~4차년도 연구를 통해 축적된 연차별 측정 미기후 자료(온도, 습도 등)와 화력발전소 주변지역 대기질 간이 측정망 자료, 동·식물 등 생태계 자료, 화력발전소 관련 기타 연구자료에 대한 서비스를 제공함.
- 화력발전소 기원 오염물질을 규명하기 위해 동위원소 분석자료 해석을 위한 Hysplit 적용 트라젝토리 모델링을 추진하고 오염 기원 및 기여도에 대해 추정함.
 - 기상모델 결과자료를 변환하고 Hysplit 모델링을 통해 오염원 발생지점과 발생원의 기여 정도를 분석함.
 - 기존 모델링의 구성 및 지원을 위한 자료 검토를 통해 모델링 지원 방안을 마련함.

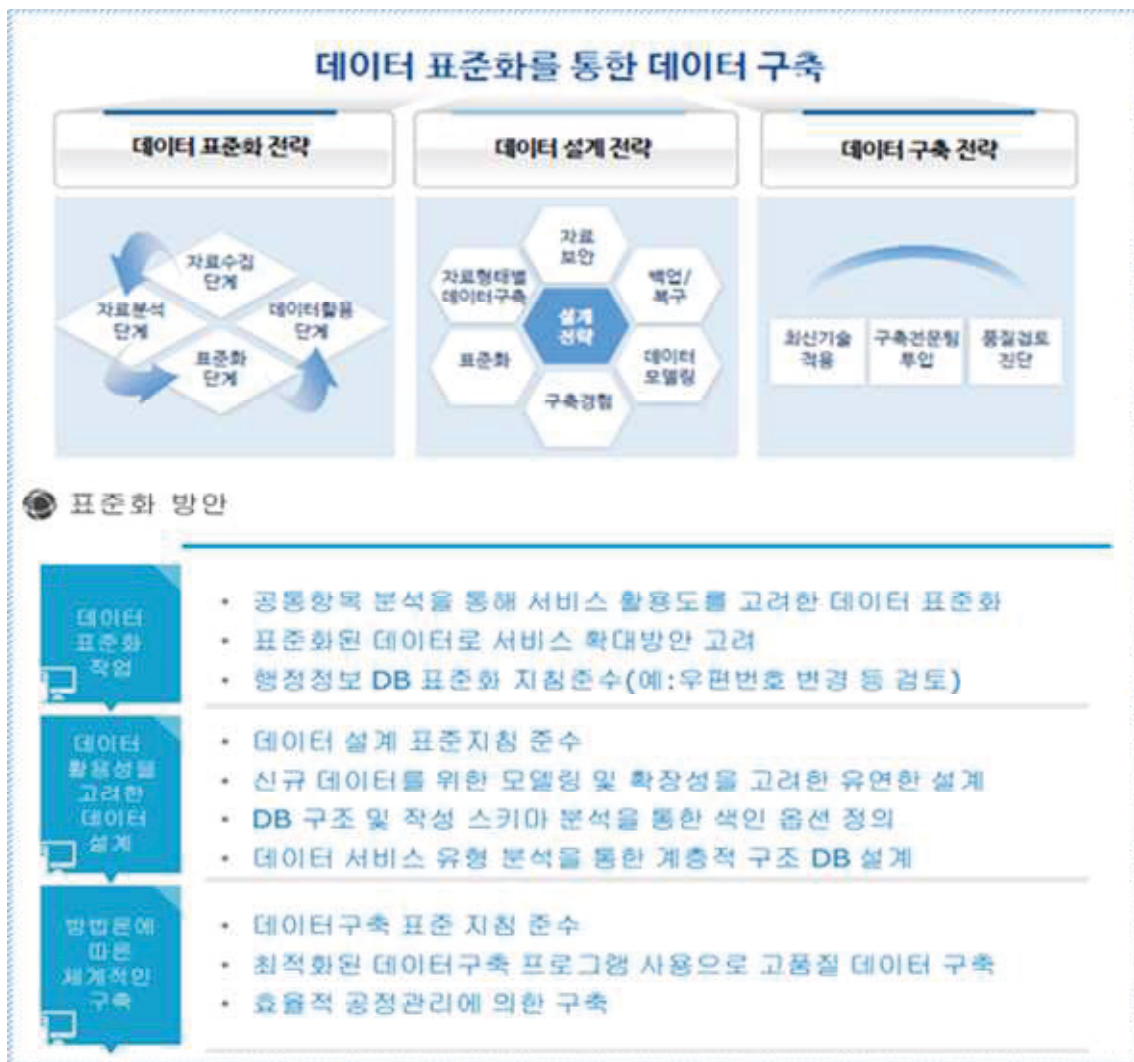
3. 기후정보 DB시스템 구축

3.1. 시스템 DB 설계

- 공공기관 데이터베이스 표준화 지침((행정자치부고시 제2021-32호, 2021.6.7.)을 준수하여 설계하고 구축하였음.
 - 데이터 표준화는 시스템별로 산재해 있는 데이터 정보요소에 대한 명칭, 정의, 형식, 규칙에 대한 원칙을 수립하여 이를 전사적으로 적용하는 것을 의미함.
 - 이러한 데이터 표준화 작업은 데이터의 정확한 의미를 파악할 수 있게 할 뿐만 아니라 데이터에 대한 상반된 시각을 조정하는 역할을 수행함.¹¹⁾

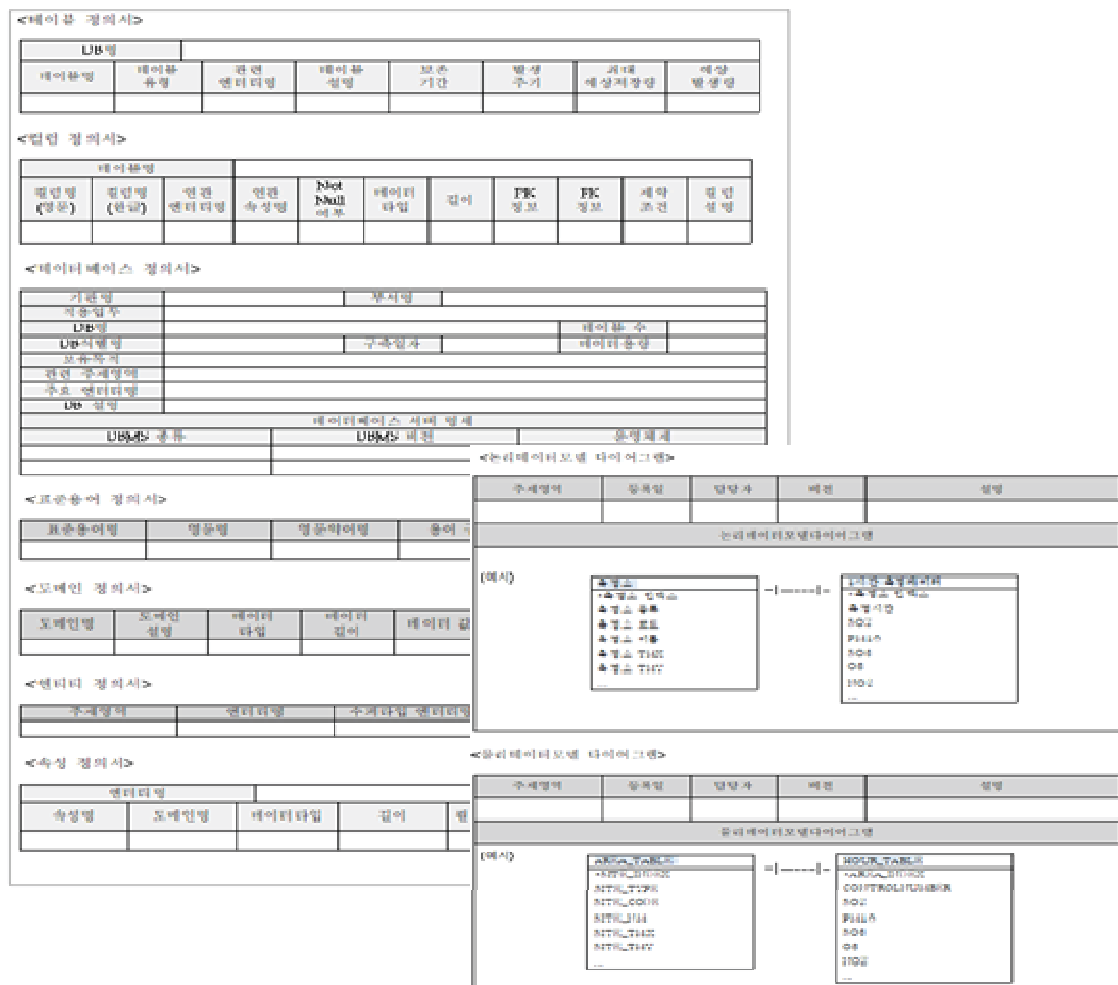
11) DAsP, 데이터 표준화 정의 <https://programmingyoon.tistory.com/197?category=756875> (검색일, 2021. 07. 30.)

- 표준화 구축체계는 데이터 표준화 작업, 데이터 활용성을 고려한 데이터 설계, 방법론에 따른 체계적인 시스템 구축 순으로 진행함.
- 연구 결과로 도출된 공통항목 분석을 통해 서비스 활용도·이해도를 고려하여 데이터 표준화를 실시하고 데이터 확대·활용을 위한 지원 방안을 수립함.
- 데이터 설계 표준지침을 준수하여 향후 포함될 데이터를 확장성을 고려 DB 구조를 합리적으로 계층화하고 유연하게 설계함.
- 데이터에 대해 신뢰도를 제고하고 수요자 맞춤형 데이터를 제공하기 위해 데이터 구축 전문팀을 구성하고 품질관리에 노력함.



[그림 4.2] 데이터 표준화 구축 방안

- 주요 표준화 지침 문서는 테이블 정의서, 컬럼 정의서, 논리데이터 모델 다이어그램·물리데이터 모델 다이어그램 (본 연구에서는 제외)을 활용함.
- 테이블 정의서는 물리 DB명, 테이블 소유자 등 12개 항목이 포함되며, 공공기관의 성격에 맞는 항목들을 포함하고 있으며, 테이블명에 유형이 반영된 경우 테이블 유형 항목은 생략할 수 있음.
- 컬럼정의서는 테이블과 컬럼의 영문명 등 17개 항목이 포함되며, 컬럼의 한글명과 설명은 필수적으로 기재되어야 하고, 기본키나 부키, 외부키 등 키정보와 개인정보와 암호화 여부가 포함되어 정보보호 관련 항목이 필수적으로 포함됨.
- 논리데이터 모델 다이어그램과 물리 데이터 모델 다이어그램은 논리·물리DB를 도식화하여 표현하는 것으로 논리적 판단이 필요한 경우 주로 사용되며, 본 연구에서 구축한 시스템은 정보수집, 표출이 주목적이므로 관련 프로그램을 적용하지 않음.



[그림 4.3] 데이터 표준화 지침

3.2. 시스템 DB 구축 방법

- 기후환경정보 서비스 시스템의 데이터베이스를 미기후, 대기 및 생태계 등 정보 제공을 위한 테이블과 시스템 운영과 관리를 위한 정보관리 테이블에 대하여 설계하고 구축을 진행함.
- 데이터베이스 테이블은 공동데이터와 시스템을 관리하기 위한 데이터, 사용자 접근성 통제를 위한 사용자관리데이터로 정보단위가 구성되고 공동데이터는 행정구역과 관련된 사항과 시스템 운영 필수정보(사용자 지정작업, 사용자 정의, 실행순서 등) 간 상호연관성 관련 테이블이 포함됨.
- 시스템관리데이터는 메뉴 생성·관리 및 메뉴 정보, 사용자그룹을 관리하는 테이블이 포함되며, 사용자관리데이터는 사용자 정보를 저장하는 테이블이 포함됨.

[표 4.1] 시스템 운영 데이터베이스 테이블 설계 목록

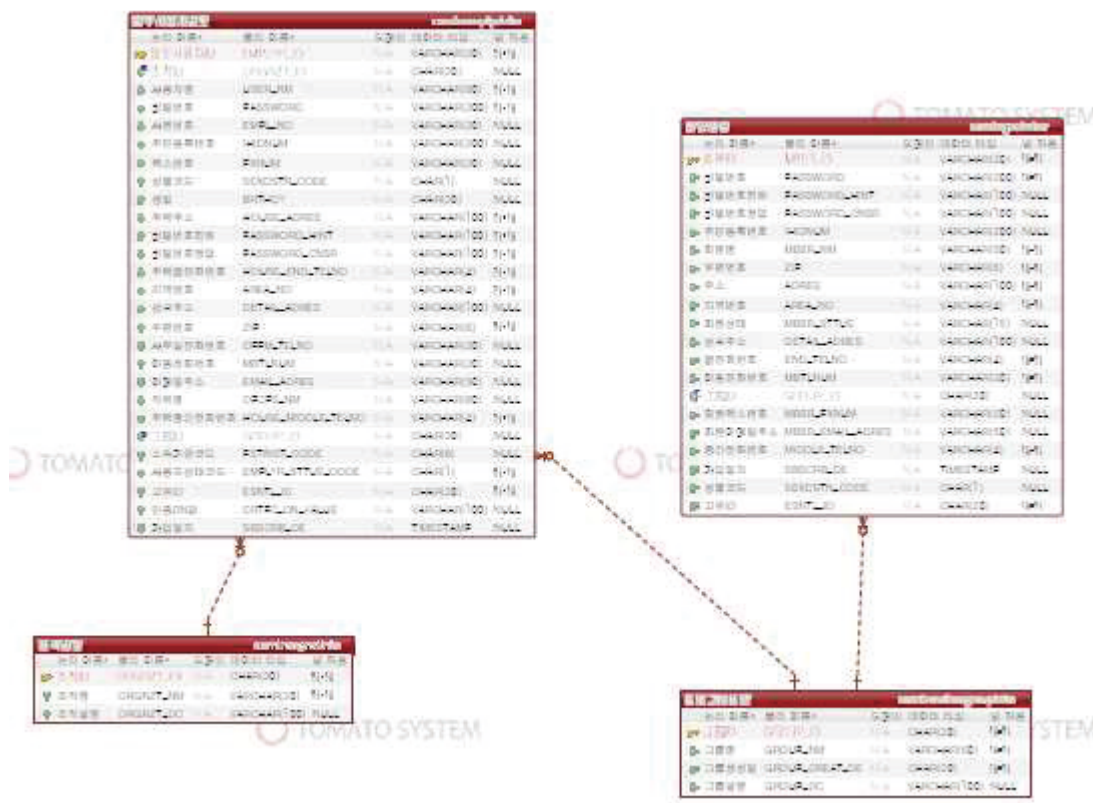
테이블명(영문)	테이블명(한글)	관련 엔터티명	테이블 설명
comtcadministcode	행정코드관리	공동데이터	행정구역 정보관리 코드를 관리하는 테이블
comtccmmnclcode	공통분류코드	시스템관리데이터	시스템 관리를 위한 공통분류 테이블
comtccmmncode	공통코드	시스템관리데이터	시스템 관리를 위한 공통코드 테이블
comtccmmndetailcode	공통상세코드	시스템관리데이터	시스템 관리를 위한 공통 상세코드 테이블
comtczip	우편번호정보	공동데이터	우편번호 정보를 저장하는 테이블
comtecopseq	시퀀스테이블	공동데이터	시퀀스 정보를 저장하는 테이블
comthprogrmchangedtls	프로그램 변경내역	시스템관리데이터	프로그램 변경 내역을 관리하는 테이블
comthsyshist	시스템이력	시스템관리데이터	시스템의 변경 이력을 관리하는 테이블
comtnauthorgroupinfo	권한 그룹 정보	시스템관리데이터	사용자 권한 그룹을 관리하는 테이블
comtnauthorinfo	권한 정보	시스템관리데이터	사용자 권한을 관리하는 테이블
comtnmenucreatdtls	메뉴생성관리	시스템관리데이터	메뉴 생성 관리하는 테이블
comtnmenuinfo	메뉴정보	시스템관리데이터	메뉴정보를 제공하는 테이블
comtnprogrmlist	프로그램목록	시스템관리데이터	프로그램 목록을 관리하는 테이블
comtnroleinfo	롤 정보	시스템관리데이터	사용자 역할 정보를 제공하는 테이블
comtnroles_hierarchy	롤 계층 구조	시스템관리데이터	사용자 역할 계층 구조 정보를 제공하는 테이블
comtnsyslog	시스템로그	시스템관리데이터	시스템 로그를 저장하는 테이블
comtnsyslogsummary	시스템로그요약	시스템관리데이터	시스템 로그 요약 정보를 제공하는 테이블
comtrdnmadrzip	도로명주소	공동데이터	도로명주소를 저장하는 테이블
comtnweblogsummary	웹로그 요약	시스템관리데이터	웹 접근 로그를 관리하는 테이블
comtnusermaster	사용자정보	사용자관리데이터	사용자의 기본 정보를 저장하는 테이블
comtnemplryinfo	업무사용자정보	사용자관리데이터	업무별 사용자 정보를 저장하는 테이블

- 연구성과 정보를 공유하기 위한 데이터베이스 테이블은 1~4세부 전 과제별 연구성과가 시각적으로 잘 구현되도록 테이블을 설계했으며, 정보활용을 위한 표준범위와 시공간 정보테이블을 포함하여 설계함.
- 연구성과정보 공유 테이블은 연구성과를 보다 체계적으로 취합하고 제공하기 위해 연구성과별 28개 엔티티로 테이블을 설계함. ([표 4.4] 참조)

[표 4.2] 연구성과정보 공유 데이터베이스 테이블 설계 목록

테이블명(영문)	테이블명(한글)	관련 엔티티명	테이블 설명
aeis_standard	표준범위	표준데이터	표준범위를 설정하는 테이블
area_table	지역정보	지역데이터	지역정보 데이터를 저장하는 테이블
hour_table	대기시간측정	대기데이터	대기 시간 측정자료 테이블
village_hour_table	마을대기 시간측정	대기데이터	마을대기 시간 측정자료 테이블
TB_CNTRBT_DO_ANALIS	기여도분석	대기데이터	기여도 분석자료 테이블
TB_CNTRBT_DO_MESURE_BHF	기여도측정지점	대기데이터	기여도 측정지점 정보를 관리하는 테이블
TB_COAL_CO_ERCCR_STTUS	석탄수입국현황	발전정보데이터	발전소 석탄수입국 현황정보 저장하는 테이블
TB_COAL_USGQTY	석탄사용량	발전정보데이터	석탄사용량을 저장하는 테이블
TB_CT_MNTN_DUST	비산먼지	비산먼지데이터	비산먼지 측정자료 테이블
TB DISS_KND	질환종류	사회비용데이터	질환 종류를 관리하는 테이블
TB_FISH_SPECIES	어류종목목	생태계데이터	어류 종목목을 관리하는 테이블
TB_FISHES_DTA	어류자료	생태계데이터	어류 자료 테이블
TB_INSECT	곤충	생태계데이터	곤충 자료 테이블
TB_MAMMALIA	포유류	생태계데이터	포유류 자료 테이블
TB_PLNT	식물	생태계데이터	식물 자료 테이블
TB_MAN_PC_ESTMTR_CHRGE	자가측정자료	발전정보데이터	자가측정 자료 테이블
TB_MESURE_BHF	간이측정망지점	간이측정망데이터	간이측정망 측정지점을 관리하는 테이블
TB_MESURE_VALUE	간이측정망 측정값	간이측정망데이터	간이측정망 측정자료 테이블
TB_MICROCLIMATE_DATA	미기후자료	미기후데이터	미기후 측정자료 테이블
TB_MICROCLIMATE_MSRSTN	미기후측정지점	미기후데이터	미기후 측정지점을 관리하는 테이블
TB_POPLTN	인구	사회비용데이터	인구 데이터를 저장하는 테이블
TB_PWRER_OUTTRN	전력생산량	발전정보데이터	발전소 전력 생산량을 저장하는 테이블
TB_SIMPLCTY_MESURE_NTWK_DTA	발전소 주변 간이측정망자료	간이측정망데이터	발전소 주변 간이측정망 측정자료 테이블
TB_SIMPLCTY_MESURE_NTWK_BHF	발전소 주변 간이측정망지점	간이측정망데이터	발전소 주변 간이측정망 측정지점 테이블
TB_SOCTY_CT	사회비용	사회비용데이터	사회비용 테이블
TB_TMS	TMS	TMS데이터	TMS 측정자료 테이블
TB_FIXING_MESURE_NTWK	고정측정망지점	대기데이터	대기 고정측정망 측정지점 테이블
TB_FIXING_MESURE_NTWK_DTA	고정측정망자료	대기데이터	대기 고정측정망 측정자료 테이블

- 엔티티 관계도는 시스템 운영 권한 관리, 대기 연구 분야, 발전 관련 현황, 사회 비용 산정 및 및 생태계 정보로 나눠서 작성함.
- 기후환경정보서비스의 효율적 정보관리를 위해 세부 과제, 분야별 정보 입력·수정이 가능하도록 기후환경정보 서비스의 사용자별 접근을 제어하는 시스템 관리 권한 엔티티를 구성함.
- 또한, 조직별 업무사용자 관리와 조직내 그룹별 회원으로 이원화하여 본 연구에 참여하는 많은 연구진이 해당 정보를 체계적으로 접근수정관리 할 수 있도록 세부과제 별로 조직을 만들고 조직내 정보단위별 그룹을 관리할 수 있도록 구성함.



[그림 4.4] 시스템 권한관리 ERD[그림 해상도 조정 필요]

[그림 4.6] 발전소 일반현황 정보 ERD[그림 해상도 조정 필요]



[그림 4.7] 발전소 일반현황 정보 ERD

- 생태환경 모니터링 분야 연구성과 공유를 위한 엔티티는 각 정보별로 독립적인 7개의 엔티티로 구성하였으며, 생태 현황자료 구분을 위한 엔티티와 생태분야별(식물, 곤충, 포유류, 어류) 엔티티를 개별적으로 구성함.
- 생태환경 정보는 지역의 환경영향(대기환경, 물환경 등)이 생체에 미치는 영향을 파악하는 기초자료로 가치가 높으며, 생태건강성 확보나 지역의 환경보건대응 등에 기본 정보로 활용할 수 있음.
- 본 연구를 통해 화력발전소 주변지역에 집중된 장기 생태모니터링이 국내에서 처음 시도되는 만큼 연구용역 기간동안 모니터링된 주요종에 대한 기초정보를 제공하기 위한 엔티티 구조도를 설계함.
- 어류의 경우 지점에 따른 특징을 추가 분석할 수 있도록 종 목록과 어류자료를 1대다관계의 별도 엔티티로 구성하였고, 식물, 곤충, 포유류의 경우 모니터링 조사지점, 시기별 종분포를 확인할 수 있는 개개의 엔티티로 구성함.
- 생태모니터링 분석결과(도시화지수, 귀화율, 야생동물 상대풍부도, 어류 군집지수 등)는 개별 식별자로 관리됨.

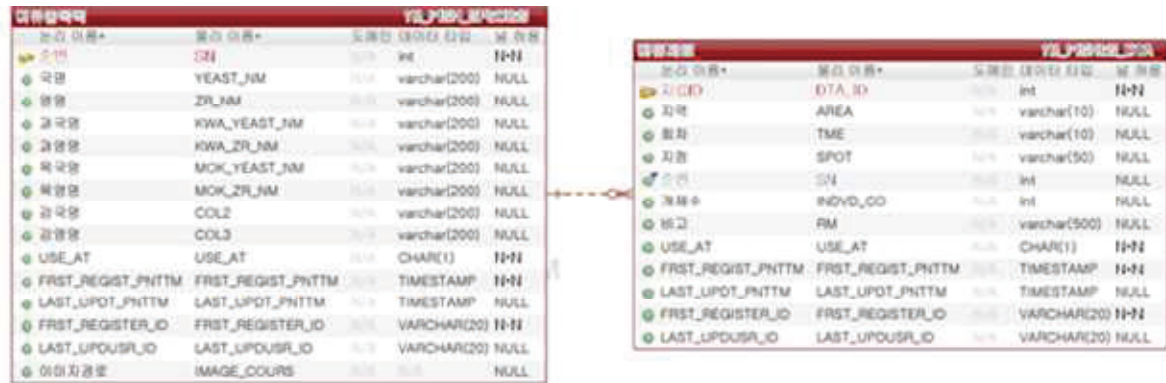
식별	종류	데이터 타입	비고
지점	DTA_ID	int	1:1
지역	AREA	varchar(20)	NULL
과명	KWA_NM	varchar(200)	NULL
학명	SCHCENM	varchar(200)	NULL
국명	YEAST_NM	varchar(200)	NULL
속	GENUS	varchar(200)	NULL
비고	RM	varchar(200)	NULL
이미지경로	IMAGE_COURS	character varying(500)	NULL
설명	DC	character varying(4000)	NULL

식별	종류	데이터 타입	비고
자료구분	DTA_SE	character varying(20)	NULL
지역	AREA	character varying(20)	NULL
내용	CV	text	NULL

식별	종류	데이터 타입	비고
종명	SN	int	1:1
국명	YEAST_NM	varchar(200)	NULL
이미지경로	IMAGE_COURS	character varying(500)	NULL
과명	KWA_NM	character varying(200)	NULL
학명	SCHCENM	character varying(200)	NULL
설명	DC	character varying(4000)	NULL
연도	YEAR	character(4)	NULL
지역	AREA	character varying(20)	NULL

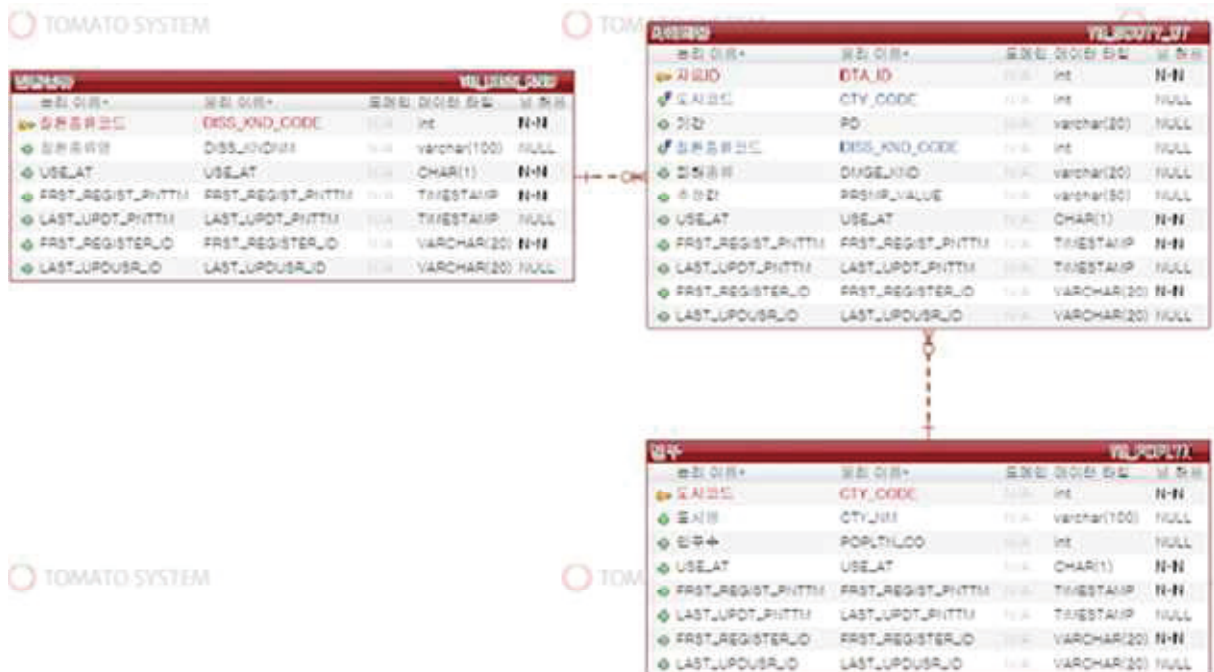
식별	종류	데이터 타입	비고
지점	DTA_ID	int	1:1
국명	YEAST_NM	varchar(200)	NULL
학명	SCHCENM	varchar(200)	NULL
개체수	INDVO_CD	int	NULL
날짜	DATE	date	NULL
조사장소	EXAMIN_PLACE	varchar(250)	NULL
특이사항	PARTCLR_MATTER	varchar(500)	NULL
조사방법	EXAMIN_MTH	varchar(200)	NULL
USE_AT	USE_AT	CHAR(1)	1:1
FRST_REGIST_PNTTM	FRST_REGIST_PNTTM	TIMESTAMP	1:1
LAST_UPDT_PNTTM	LAST_UPDT_PNTTM	TIMESTAMP	NULL
FRST_REGISTER_ID	FRST_REGISTER_ID	VARCHAR(20)	1:1
LAST_UPDUSR_ID	LAST_UPDUSR_ID	VARCHAR(20)	NULL
지역	AREA	character varying(20)	NULL
이미지경로	IMAGE_COURS	character varying(500)	NULL
설명	DC	character varying(4000)	NULL
과명	KWA_NM	character varying(200)	NULL

식별	종류	데이터 타입	비고
지점	DTA_ID	int	1:1
지역	AREA	varchar(20)	NULL
국명	YEAST_NM	varchar(200)	NULL
개체수	INDVO_CD	int	NULL
날짜	DATE	date	NULL
시간	TIME	character varying(5)	NULL
비고	RM	varchar(500)	NULL
USE_AT	USE_AT	CHAR(1)	1:1
FRST_REGIST_PNTTM	FRST_REGIST_PNTTM	TIMESTAMP	1:1
LAST_UPDT_PNTTM	LAST_UPDT_PNTTM	TIMESTAMP	NULL
FRST_REGISTER_ID	FRST_REGISTER_ID	VARCHAR(20)	1:1
LAST_UPDUSR_ID	LAST_UPDUSR_ID	VARCHAR(20)	NULL
이미지경로	IMAGE_COURS	character varying(500)	NULL
과명	KWA_NM	character varying(200)	NULL
학명	SCHCENM	character varying(200)	NULL
설명	DC	character varying(4000)	NULL

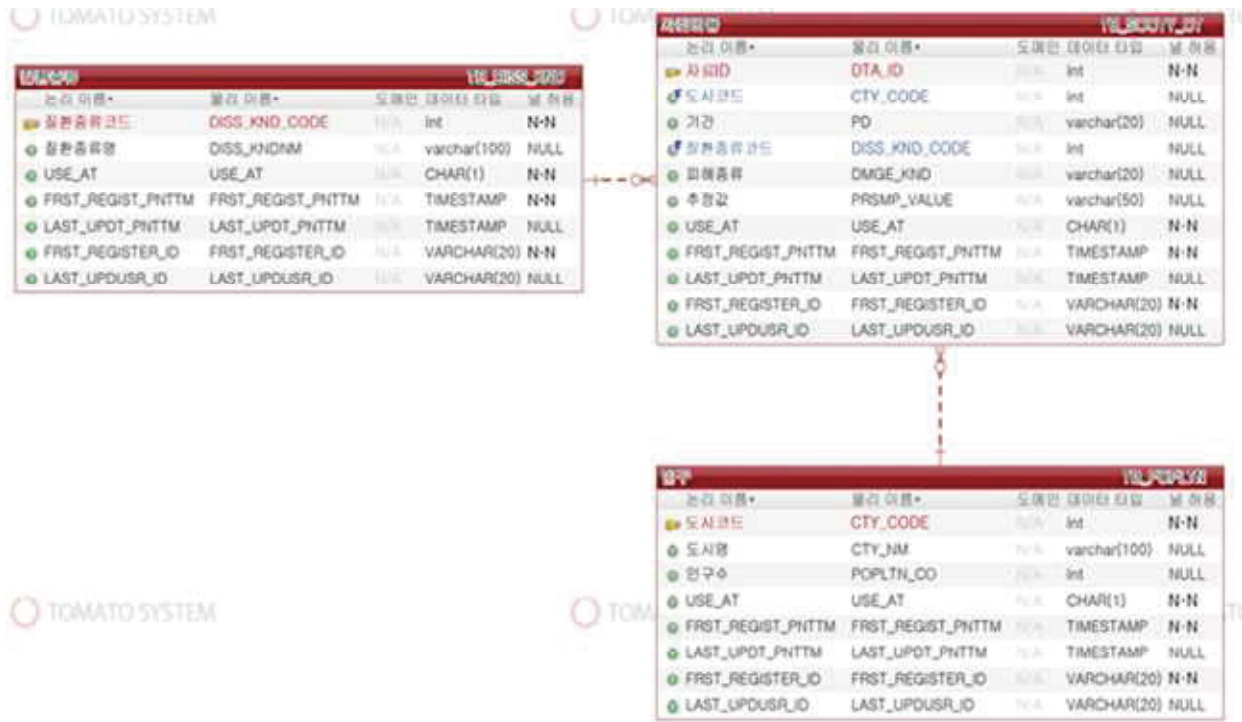


[그림 4.8] 생태환경 모니터링 정보 ERD

- 사회적 피해비용 산정 분야는 대기오염 장기노출에 따른 호흡기계 질환 또는 심혈관계 질환 등의 종류와 건강보험 빅데이터를 기반으로 표본 지역 인구수와 연계한 피해비용 산정 결과를 제공할 수 있도록 3개의 엔티티를 구성함.
- 다만, 사회비용 산정에 활용된 호흡기계심혈관계 등 세부 질환 정보, 건강보험 관련 정보는 비공개 자료에 해당되어 대국민 정보 공개가 불가함에 따라 질환 종류별 사회 비용과 공개 가능한 총괄적 인구 자료만 엔티티로 구성함.



[그림 4.9] 사회적 피해비용 산정 정보 ERD

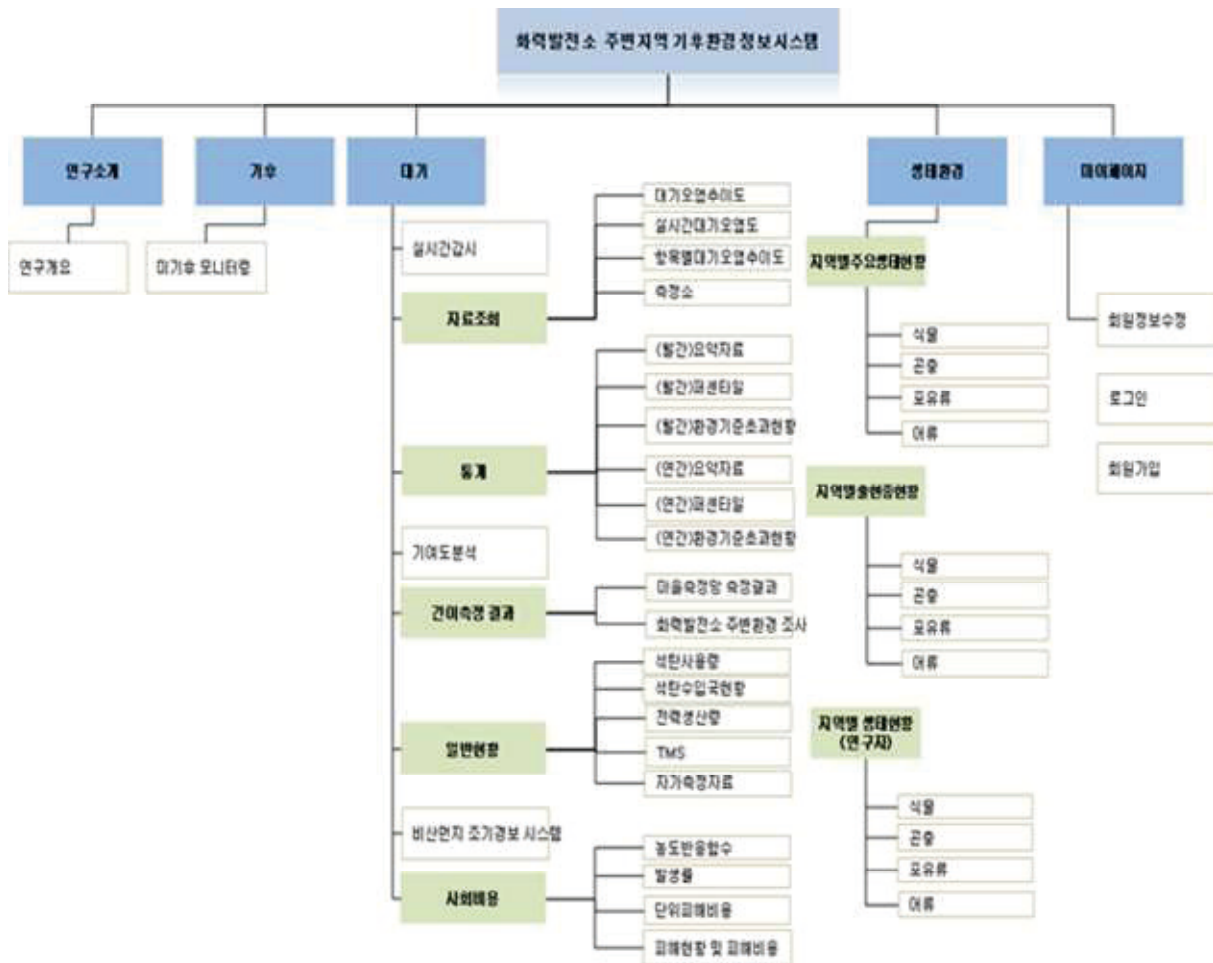


[그림 4.10] 사회적 피해비용 산정 정보 ERD

4. 기후정보서비스 시스템

4.1. 시스템 설계

- 화력발전소 주변지역 기후환경정보 서비스의 기본적인 UI(User Interface)를 설계하고 기본 메뉴구조를 구성하여 화력발전소 주변지역 기후환경영향에 대한 목적, 과업내용, 성과 등을 구현하였으며, 기후·대기·생태환경으로 체계·분류·화함.
- 기후분야는 미기후 모니터링 결과를 포함하고, 대기분야는 대기오염추이도, 실시간대기오염도, 측정망 결과, 사회적 피해비용 등 연구결과를 범주화하였고, 생태환경 분야는 화력발전소 주변지역의 식물곤충포유류어류 생태 현황, 출현종 현황에 대해 정보를 제공하는 동시에 지역별 특이성이 확인할 수 있도록 구성함.



[그림 4.11] 기후환경정보 서비스 메뉴 구성도

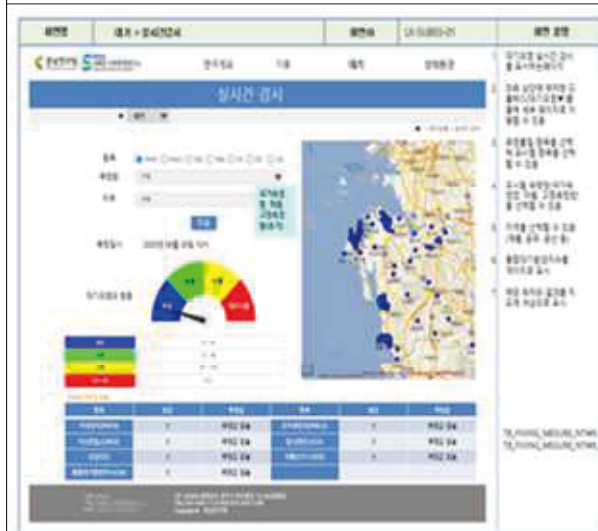
- 각 분야별 중요도에 따라 시각화하여 정보를 제공하고 종합적 이해가 필요한 정보는 통계자료를 함께 제공하여 정보의 이해도를 높이도록 메뉴를 구성함.
- 자료 관리를 위해 로그인시 시스템 권한관리 엔티티 설계에 따라 조직, 그룹별 로그인이 자동으로 진행되며, 미기후 모니터링, 생활권 대기질 정보제공, 대기환경 간이측정 정보 등은 위치정보를 함께 제공함.
- 정보 검색시스템에서는 자료의 활용도를 높이기 위해 검색한 자료를 직접 다운로드할 수 있도록 서비스를 제공하였고, 조회기간의 기초통계(요약, 평균, 환경기준초과현황 등)를 자동으로 제공할 수 있도록 시스템을 구성함.



정보DB시스템 로그인화면 모습



미기후 모니터링 검색 모습



생활권 대기질 정보제공 모습



대기환경 자료 조회 모습



대기환경 자료 통계처리 모습



대기환경 기여도관련 정보 검색 모습



대기환경 간이측정자료 검색 모습



화력발전소 일반현황 정보 검색 모습



사회적 피해비용관련 정보검색 모습



생태환경 정보검색 모습



[그림 4.12] 각 분야별 구성 화면 모습

4.2. 시스템 운영

- 2021년 5월부터 10월까지 대기, 사회적 피해비용, 생태계 정보 서비스 플랫폼을 구축하고 각 세부별 검토를 거쳐 2021년 12월부터 서버를 공개하였음.
- 서비스는 접근 디바이스에 독립적으로 운영될 수 있는 반응형 UI/UX 설계기술을 도입하여 모바일 화면 해상도에 맞춤형 서비스가 가능하도록 구성하였고, 접근 아이디를 발급받아 시스템을 시범적으로 운영할 수 있도록 함.



[그림 4.13] 정보DB시스템 연구소개 화면

5. 타 시스템과 연계성

5.1. 충남형 빅데이터 허브 플랫폼 연계

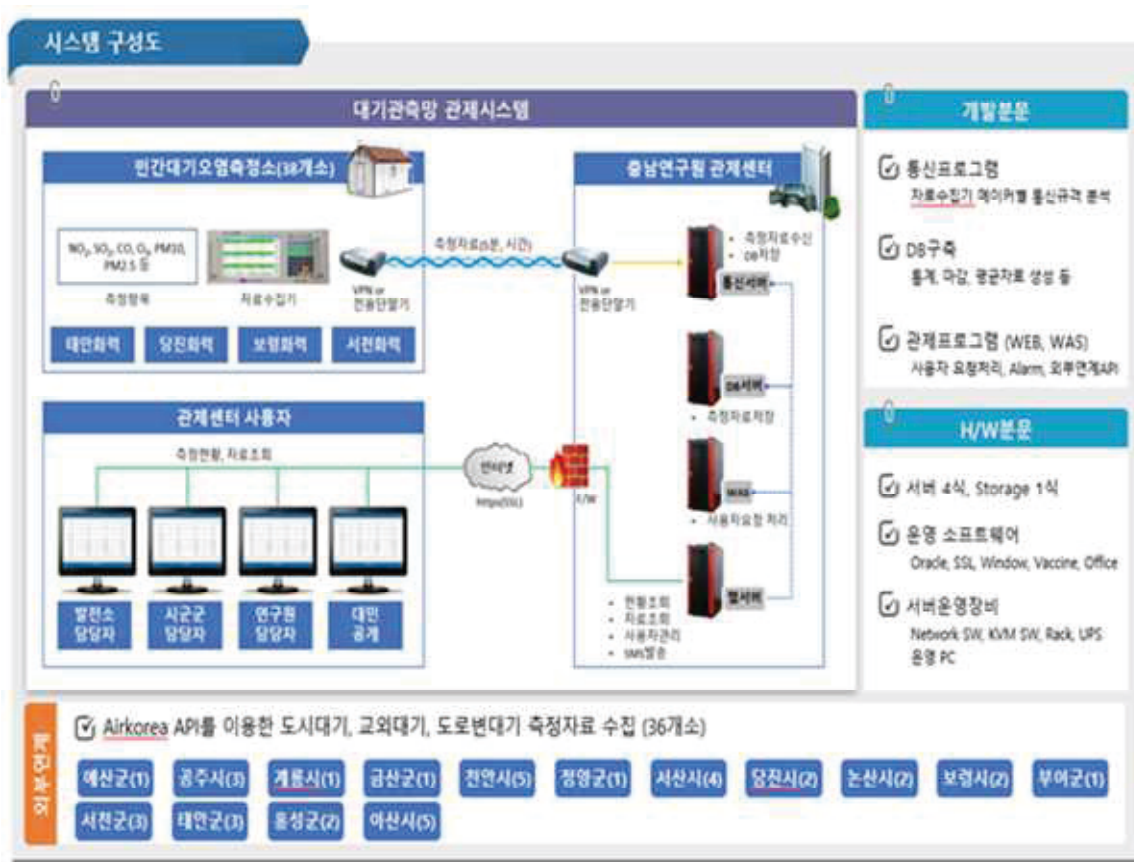
- 충청남도는 (데이터정책관) 2021년 6월 ‘충남형 빅데이터 허브 플랫폼’ 을 구축하여 운영중에 있으며, 충청남도의 공공데이터, 범정부 데이터, 외부 민간과 공기관 데이터 및 충남 특화 데이터를 기반으로 대기환경, 에너지, 도민 경제 등 총 1,108종의 고수요 데이터 플랫폼을 구축함.
- 충청남도 빅데이터 허브 내부포털로, ‘충남데이터포터 올담’ 을 통해 충청남도 내부 업무에 활용중임.
- 본 연구를 통해 최종적으로 개발될 시스템은 독자적으로 활용 가능한 시스템을 목표로 하고 있으나, 정보 접근성을 높이기 위해 ‘충청남도 데이터 포털’ 과 연계하여 추진할 필요성이 있음. 따라서, 향후 충청남도데이터포털과 연계하기 위한 허브플랫폼 규격·사양을 고려하여 5차년도 연구시 관련 플랫폼과의 통합 운영을 진행할 계획임.



[그림 4.14] 충청남도 데이터 포털 올담 초기화면

5.2. 충청남도 마을대기측정망 통합정보 시스템과의 차별성

- 충청남도는 ‘충청남도 마을대기측정망 통합정보 시스템’을 운영중에 있으며, 본 연구 영역에서 구축 중인 기후정보 DB 시스템과의 차별성(연구용역 자문위원의 차별성 지적과 관련됨.)을 위하여 화력발전소 주변지역 관련 정보의 확대와 연계성을 높이고자 노력하였음.
- 충청남도 마을대기측정망 통합정보 시스템은 화력발전소 주변지역에서 발전사가 직접 운영 중이던 38기의 대기측정망을 충청남도에서 통합운영하기 위해 개발된 시스템으로 대기측정망의 실시간 정보를 수집·분석하는 국가대기측정망(에어코리아)과 유사함.
- 마을대기측정망 통합정보시스템은 마을대기측정망 38개소의 실시간 대기질 정보를 충남연구원(서해안기후환경연구소)의 관제센터로 전송하고 국가측정망 정보를 Open_API로 전송받아 충청남도 지역 전역에 있는 대기측정소 정보를 표출·축적함.



[그림 4.15] 마을대기 측정망 시스템 구성도(충청남도, 2020)

- 기후정보 DB 시스템은 ‘화력발전소 주변지역 기후환경영향연구’에서 생산된 연구결과 정보를 공개하기 위한 목적으로 구축된 시스템으로 본 연구의 다양한 정보를 지역주민, 연구자, 정책개발자 등에게 기후·대기·사회적 피해비용·생태 일련의 정보를 제공함.
- 마을대기측정망 뿐만 아니라 대난지도·청라면 고정측정망, 국가대기측정망과 연계·분석된 자료를 제공하고 있으며, 대기정보와 함께 사회적 피해비용, 화력발전소 주요 오염시설의 비산먼지 발생 현황 정보, 사회적 피해비용 산정, 생태환경 모니터링 등 광범위한 정보를 제공하고 있음.
- 5차년도에도 기존 시스템과 차별화된 정보를 제공하기 위해 본 연구용역을 통해 분석된 자료를 공유하고 고도화된 정보를 제공하여 화력발전소 주변지역이 미치는 영향을 과학적으로 접근할 수 있도록 지원할 계획임.

[표 4.3] 기후정보 DB 시스템과 마을대기측정망 시스템 비교

구분	기후정보 DB	마을대기측정망
목적	– 본 연구 결과 정보 제공 및 확산	– 충남지역 대기측정망 실시간 정보 제공
정보의 종류	– 대기측정소 정보(좌동) – 미기후 및 미세먼지 성분분석(이온, 동위원소 등) 정보 – 화력 발전소관련 현황 정보 – 비산먼지 조기경보 시스템 정보 – 사회적 피해비용 산정관련 정보 – 생태모니터링 결과	– 대기측정소 정보(대기질 정보 : PM10, PM2.5, CO, SO2, NO2, O3, 기상정보 : 풍향, 풍속, 온습도), 경보주의보 현황
서비스 방식	– 홈페이지, DB시스템	– 대민홈페이지, 관제시스템
추가정보	– 연구과제 소개, 연구결과 가공자료 등	– 기초통계정보, 배움터 등
접근 권한	– 등록된 사용자	– 공개(관제시스템의 경우 관리자만 접근 허용)
주활용대상	– 정책개발자 – 발전소 주변 기후환경 관련 연구자 – 주변지역 주민 등	– 대기질 관련 연구자
특징	– 연구결과에 대한 빅데이터 제공 – 충남지역 화력발전소 주변 기후환경 연구·정책 플랫폼 역할 수행	– 국가측정망(에어코리아) 수준의 대기측정망 정보만 제공

제5장 생활권 대기질 정보 제공

1. 연구목적
2. 대기질 정보 공유
3. 요약 및 소결문

1. 연구목적

- 화력발전소 주변지역을 대상으로 대기오염물질을 비롯한 수질·토양·건강 영향 등 연구가 진행되었으나, 지역주민 의견수렴 및 요구가 거의 반영되지 않고 연구결과 또한 명확히 공유되지 않아 연구 전반에 대해 신뢰도가 부족하고 비협조적인 문제점이 발생됨.
- 이러한 문제점을 해결하기 위해 마을회의 및 이장단 회의 등에 참여하여 본 연구에 대한 정보와 협조 요청사항, 구축된 정보의 제공 계획 등을 공유하고 주민들의 의견을 적극 수렴하고 마을주변 대기오염물질 농도에 대한 정보를 제공함.
 - 주민 맞춤형 생활권 대기질 정보 제공은 알권리 충족과 주민이 원하는 정보를 제공함으로써 연구 결과의 신뢰성을 회복하는데 노력하였음.
 - 1차년도는 화력발전소 소재 4개 면(보령시 오천면, 당진시 석문면, 서천군 서면, 태안군 원북면)에 한하여 1일 지연 일평균 대기오염물질 농도 자료를 공유하고,
 - 2차년도에는 화력발전소 소재 4개 면과 인근 4개 면(보령시 주교면, 당진시 고대면, 서천군 비인면, 태안군 이원면)을 추가하여 총 8개 면에 정보를 제공함.
 - 3차년도는 에어코리아(<https://www.airkorea.or.kr/>)에서 제공하는 정보와 연계하여 1일 지연에서 1시간 지연(준실시간)으로 정보 제공 시간을 단축하였고, 정보 접근성을 제고하기 위해 모바일에도 적용 가능한 반응형 웹을 개발함.
 - 4차년도는 3차년도까지 고도화된 주민 맞춤형 생활권 대기질 정보를 지속 제공함으로써 화력발전소 주변지역의 기후환경오염의 관심을 유지시키고 마을별 대기질 정보 자료를 구축하는데 노력함.

2. 대기질 정보 공유

2.1. 대상 및 방법

- 화력발전소 주변지역 164개 마을 중 도서지역과 조사를 원하지 않는 마을을 제외하고 119개 마을(보령시 주교면 14, 오천면 10, 당진시 고대면 18, 석문면 10, 서천군 비인면 16, 서면 20, 태안군 원북면 17, 이원면 14)을 대상으로 주민 맞춤형 생활권 대기질 정보를 제공함.

- 지역 주민의 연령을 고려하여 비교적 정보 전달이 쉽도록 우편으로 연간 분석결과를 발송하였고, 제공된 정보의 개별적인 문의에 대응함.
- 이산화질소(NO_2), 아황산가스(SO_2), 오존(O_3), 미세먼지(PM_{10}), 총부유먼지(TSP)에 대해 국가측정망 대기질 정보가 확정된 후 6월 이전의 전년도(Y-1) 대기질 정보를 제공함. (3차년도는 2019년 정보, 4차년도에는 2020년 정보를 제공)
- 연구용역의 관심 제고 및 연계성을 강화하기 위하여 연구 추진현황 및 측정 결과를 마을 이장뿐만 아니라 해당 지자체 공무원에게도 공문으로 발송함.



[그림 5.1] 생활권 정보 대기질 우편발송

- 반응형 웹을 적용한 서해안기후환경연구소 홈페이지(<http://www.shari.re.kr/>)에서 연도별, 월간별, 시간별 자료를 온라인으로 함께 제공하여 정보 접근성 및 적시성을 제고하였음.
- 홈페이지 표출방식은 주민 의견을 반영하여 일평균 농도 값을 구간별로 색상(좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨)을 구분하고, 퍼센타일 등의 다양한 형태로 제공함.
- 온라인으로 제공되는 정보는 오프라인으로(우편물, 회의자료 등) 제공 중인 정보와 동일하게 이산화질소(NO_2), 아황산가스(SO_2), 오존(O_3), 미세먼지(PM_{10})에 대한 정보를 제공하고, 미세먼지의 경우에는 총부유먼지(TSP) 환산값을 적용하여 제공함.



서울환경연구원

Seoul Metropolitan Environment Research Institute

연구소개

기후

대기

생태환경

마케팅/이지

기타

연구소개

기후

대기

생태환경

마케팅/이지

기타

연구소개

기후

대기

생태환경

마케팅/이지

기타

연구소개

기후

대기

생태환경

마케팅/이지

기타

연구소개

기후

대기

생태환경

마케팅/이지

기타

연구소개

기후

대기

생태환경

마케팅/이지

기타

통계

대기

대기

통계

(월간) 요약자료

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

(월간) 미세먼지

(월간) 환경기준 초과현황

(월간) 요약자료

주요년도: 2019년 1월

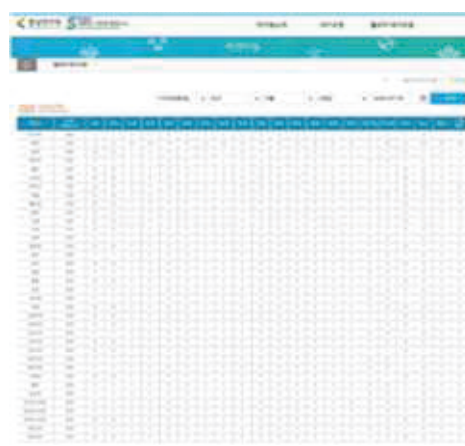
주요항목: PM10 (단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

구분	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	8월	9월	10월	11월	12월	연평균	최고	최저	총계	
서울	01	7	7	6	6	6	6	6	7	8	7	6	7	6	7	8	5
인천	03	8	6	6	5	5	5	4	5	5	7	8	6	6	7	10	9
경기	04	12	10	10	10	7	4	2	2	3	3	7	6	8	9	10	11
충청	05	6	8	6	6	6	11	10	11	11	12	10	10	7	7	9	16

(a) 반응형 웹 접속(월간요약자료)



(b) 항목별 대기오염 추이



(c) 퍼센타일



(d) 모바일 화면

[그림 5.2] 반응형 웹사이트 실시간 조회 예시

2.2. 정보 제공

- 도시대기측정망과 연계하여 측정지점과 인접한 도시대기측정망 데이터에 국가측정망-간이 측정기 변환 계수(C1), 측정지점별 변환 계수(C2)를 적용하여 대기환경기준 일평균 농도를 초과 일수를 분석제공하였음.
- 분석을 위해 활용된 도시대기측정망 지역은 대천2동, 주교면, 당진시청사, 송산면, 서천읍, 서면, 태안읍, 이원면 등 8개 지역이고,
- 변환계수 C1은 대기오염자동측정기 자료 검정에 의한 보정계수 $\text{SO}_2=0.5389$, $\text{NO}_2=0.5474$, $\text{O}_3=1.2398$, $\text{PM}_{10}=0.543$ 를 적용함. (1차년도 보고서 221쪽 참고)

- 변환계수 C2는 간이측정기 간 마을별 대기오염측정 고유값을 적용하되 정확도를 높이기 위해 연간 4회 측정 후 평균값인 계절별 편차를 적용함. (2차년도 보고서 194쪽 참고)
 - 다만, 간이측정기는 PM10 측정이 불가하여 총부유먼지(TSP) 측정값에 평균 농도분율 0.68를 적용(최진수와 백성옥, 1998)하여 PM10으로 환산함. (1차년도 보고서 221쪽 참고)
 - 일평균농도 초과기준은 「충청남도 환경 기본 조례」 제13조제3항에 명시된 충청남도 대기환경기준을 적용함. 이산화질소(NO2)는 24시간 평균 0.04 ppm 이하, 아황산가스(SO2)는 24시간 평균 0.03 ppm 이하, 미세먼지 PM10은 24시간 평균 80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, 오존(O3)은 8시간 평균 0.06 ppm 이하 기준을 적용함.
- 보령시 24개 마을에 제공된 정보는 PM10, 오존, 이산화질소, 아황산가스로 2019년 대기환경기준을 초과하는 날이 1,244일에서 2020년 1,061일(85.3%)감소한 183일로 나타남.
- 2019년에는 대기환경기준을 초과하는 날이 오존 1,167일, 아황산가스는 77일이었고, 2020년에는 PM10, 이산화질소, 아황산가스는 확인되지 않고, 오존만 183일 초과되는 것으로 분석됨.
 - 2020년 기준, 보령시 오천면과 주교면 지역에서 오존이 가장 높게 나타난 곳은 주교면 은포3리와 주교3리였고, 초과일의 평균은 각각 0.073 ppm, 0.071 ppm이었음.
 - 오존의 대기환경기준을 초과하지 않은 지역은 오천면 소성2리, 교성2리, 교성3리, 오포2리, 주교면 송학3리 총 5곳으로 평균농도는 0.020 ppm이며, 송학3리를 제외한 4곳이 오천항 주변에 위치하였고, 평균농도가 높은 0000지역은 보령 도심에서 가장 가깝게 위치하였음.
 - 2019년에 비해 2020년에는 대기환경기준을 초과한 날이 85.3% 대폭 감소하여 보령시는 화력발전소 주변지역 4개 시군에서 가장 낮은 오존 초과일수를 보였음. 이는 오존이 온도, 습도, 일사량의 영향을 복합적으로 받고, 특히 온도증감과 동일한 패턴으로 반응하는데 이는 미기후 분석결과에서 제시한 바와 같이 보령지역의 기온상승 폭이 가장 낮은 데 따른 영향이 반영된 것으로 판단됨.
- 당진시 석문면, 고대면 28개 마을에 동일하게 제공된 2020년 대기환경기준 초과일은 1,462일로 2019년 대기환경기준 초과일 1,083일 대비 379일(35.0%) 증가한 것으로 나타남.
- 2019년에는 대기환경기준을 초과하는 날이 PM10이 57일, 오존이 1,022일, 아황산가스는

4일이었고, 2020년에는 PM10은 2일로 감소하였으나, 오존은 1,460일 증가하였으며, 이산화질소, 아황산가스의 대기환경기준 초과일은 나타나지 않음.

- 2020년 기준, 당진시 석문면과 고대면 지역에서 상대적으로 오존농도가 높게 나타난 마을은 고대면 용두1리, 진관1리, 향곡리이며, 초과일의 평균은 각각 0.089 ppm, 0.088 ppm, 0.084 ppm이었음.
- 오존 대기환경기준을 만족하는 지역은 석문면 5개 마을(통정1리, 삼화3리, 삼봉1리, 삼봉3리, 교로1리)로 5개 마을 평균 오존농도는 0.025 ppm으로 낮으며, 화력발전소가 가까운 석문면 전체 마을의 평균 오존농도는 0.028 ppm으로 고대면 전체 마을의 평균 오존농도 0.044 ppm의 63.6% 수준으로 나타남.
- 당진시 지역은 4개 시군 중 대기환경기준 초과일이 가장 높게 나타났으며, 2019년 대비 2020년 35.0% 증가한 것으로 나타나, 미기후 기온상승 영향과 오존 생성에 영향을 미치는 대기오염물질 농도가 높은 영향을 동시에 받는 것을 확인할 수 있음.

○ 서천군 서면과 비인면 36개 마을에 제공된 PM10, 오존, 이산화질소, 아황산가스 대기질 정보의 2019년 대기환경기준 초과일은 782일이었으며 2020년에는 1,013일로 231일 (29.5%) 증가한 것으로 나타남.

- 서천군은 2019년, 2020년 모두 PM10, 이산화질소, 아황산가스의 대기환경기준 초과일이 나타나지 않았으며, 오존만 초과하는 것으로 나타남.
- 2020년 기준, 서면과 비인면 대상마을 중 평균 오존농도가 가장 높게 나타난 마을은 비인면 구북리로 초과일 평균 오존농도가 0.095 ppm에 달해, 4개 시군 전체 마을 중 가장 높게 나타남.
- 서천군 36개 마을 중 오존 대기환경기준을 초과하지 않은 마을은 18개 마을로 전체마을의 50%이며 평균 0.024 ppm의 비교적 안정적 농도를 보였으며, 성북2리, 칠지1리, 관1리를 제외한 대부분이 서면에 위치하고 있음.
- 미기후 분석결과에 따르면 서천지역이 4개 시군 중 기온상승이 가장 높았던 지역으로 나타나 오존농도 상승이 가장 높을 것으로 예상하였으나, 당진시에 비해 평균 농도가 0.000 ppm 낮은 것으로 확인됨에 따라 서천화력발전소 가동중단으로 인해 지역 대기오염물질의 오존농도 상승 기여가 상대적으로 낮았던 것으로 예상됨.

○ 태안군 원북면, 이원면 31개 마을에 제공된 PM10, 오존, 이산화질소, 아황산가스 정보를 분석한 결과 2019년 대기환경기준을 초과하는 날이 588일에서 2020년 349일로 239

일(40.6%)감소한 것으로 나타남.

- 태안군은 2019년과 2020년 이산화질소와 아황산가스의 대기환경기준 초과일은 나타나지 않았으나, PM10은 2019년 34일에서 11일로, 오존은 554일에서 338일 대기환경기준을 초과한 것으로 나타남.
- 태안군 이원면 포지2리에서 2020년 PM10 대기환경기준 초과일 11일이 나타났으며, 포지2리의 평균 PM10 농도는 $93.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석됨.
- 2020년 기준, 태안군에서 오존 대기환경기준 초과일이 발생하지 않은 마을은 8개 로 모두 이원면으로 나타났으며, 8개 마을 평균 오존농도는 0.025 ppm으로 분석됨.
- 태안군에서 2020년 오존농도가 가장 높게 나타난 마을은 양산1리로 농도는 0.074ppm이며, 양산2리(0.070 ppm), 청산2리(0.069ppm) 순으로 나타나 모두 원북면에 포함되어 지리적으로 태안읍에 가까운 곳이 상대적으로 오존농도가 높게 나타나는 것으로 분석됨.
- 태안군의 오존농도 분석결과 화력발전소가 가까운 이원면보다 원북면의 오존농도가 높은 원인은 태안해안 국립공원의 영향으로 추정할 수 있는데, 이는 태안군의 CO2 농도측정결과 다른 지역과 달리 발전소 기준 근거리 CO2 농도가 원거리에 비해 낮게 나타난 것과 연동하여 향후 충분한 CO2 모니터링 자료를 확보한 후 관련성 분석을 시도할 수 있을 것임.

[표 5.1] 2020년 마을별 충청남도 대기환경기준 초과일수 (괄호안은 2019년 초과일수)

지역	마을명	PM ₁₀	오존	이산화질소	이황산가스	마을값 산정 기준 국가측정망
보령시 합계	24개 마을	0(0)	183(1,167)	0(0)	0(77)	
보령시 오천면	소성1리	—	1	—	—	주교면
보령시 오천면	소성2리	—	—	—	—	주교면
보령시 오천면	영보1리	—	2	—	—	주교면
보령시 오천면	영보2리	—	1	—	—	주교면
보령시 오천면	교성2리	—	—	—	—	주교면
보령시 오천면	교성3리	—	—	—	—	주교면
보령시 오천면	갈현리	—	1	—	—	주교면
보령시 오천면	오포1리	—	5	—	—	주교면
보령시 오천면	오포2리	—	—	—	—	주교면
보령시 오천면	오포3리	—	1	—	—	주교면
보령시 주교면	주교1리	—	20	—	—	주교면
보령시 주교면	주교3리	—	1	—	—	주교면
보령시 주교면	은포1리	—	7	—	—	주교면
보령시 주교면	은포2리	—	32	—	—	주교면
보령시 주교면	은포3리	—	38	—	—	주교면
보령시 주교면	은포4리	—	1	—	—	주교면
보령시 주교면	송학1리	—	6	—	—	주교면
보령시 주교면	송학2리	—	38	—	—	주교면
보령시 주교면	송학3리	—	—	—	—	주교면
보령시 주교면	고정1리	—	10	—	—	주교면
보령시 주교면	고정2리	—	1	—	—	주교면
보령시 주교면	신대1리	—	1	—	—	주교면
보령시 주교면	신대3리	—	14	—	—	대천2동
보령시 주교면	신대4리	—	3	—	—	대천2동
당진시 합계	28개 마을	2(57)	1,460(1,022)	0(0)	0(4)	
당진시 석문면	통정1리	1	—	—	—	송산면
당진시 석문면	통정2리	—	4	—	—	송산면
당진시 석문면	삼화1리	—	1	—	—	당진시청사
당진시 석문면	삼화2리	—	3	—	—	송산면
당진시 석문면	삼화3리	—	—	—	—	송산면

지역	마을명	PM ₁₀	오존	이산화질소	이황산가스	마을값 산정 기준 국가측정망
당진시 석문면	삼봉1리	—	—	—	—	송산면
당진시 석문면	삼봉2리	—	10	—	—	송산면
당진시 석문면	삼봉3리	1	—	—	—	송산면
당진시 석문면	장고항3리	—	4	—	—	송산면
당진시 석문면	교로1리	—	—	—	—	송산면
당진시 고대면	용두1리	—	221	—	—	당진시청사
당진시 고대면	용두2리	—	19	—	—	당진시청사
당진시 고대면	슬항1리	—	103	—	—	당진시청사
당진시 고대면	슬항2리	—	133	—	—	당진시청사
당진시 고대면	대촌1리	—	100	—	—	당진시청사
당진시 고대면	대촌2리	—	37	—	—	당진시청사
당진시 고대면	장항1리	—	87	—	—	당진시청사
당진시 고대면	장항2리	—	29	—	—	당진시청사
당진시 고대면	성산1리	—	1	—	—	당진시청사
당진시 고대면	성산2리	—	25	—	—	당진시청사
당진시 고대면	성산3리	—	1	—	—	당진시청사
당진시 고대면	당진포1리	—	3	—	—	당진시청사
당진시 고대면	당진포2리	—	1	—	—	당진시청사
당진시 고대면	당진포3리	—	72	—	—	당진시청사
당진시 고대면	옥현리	—	60	—	—	당진시청사
당진시 고대면	항곡리	—	192	—	—	당진시청사
당진시 고대면	진관1리	—	221	—	—	당진시청사
당진시 고대면	진관2리	—	133	—	—	당진시청사
서천군 합계	36개 마을	0(0)	1,013(782)	0(0)	0(0)	
서천군 서면	봉하	—	—	—	—	서면
서천군 서면	당포	—	2	—	—	서면
서천군 서면	개야리	—	—	—	—	서면
서천군 서면	월리	—	—	—	—	서면
서천군 서면	소부사	—	—	—	—	서면
서천군 서면	대부사	—	3	—	—	서면

지역	마을명	PM ₁₀	오존	이산화질소	이황산가스	마을값 산정 기준 국가측정망
서천군 서면	장동	—	—	—	—	서면
서천군 서면	월하성	—	60	—	—	서면
서천군 서면	합전	—	—	—	—	서면
서천군 서면	선돌	—	—	—	—	서면
서천군 서면	장벌	—	—	—	—	서면
서천군 서면	남촌	—	—	—	—	서면
서천군 서면	춘장대	—	—	—	—	서면
서천군 서면	중리	—	6	—	—	서면
서천군 서면	요치	—	—	—	—	서면
서천군 서면	공암	—	—	—	—	서면
서천군 서면	홍원	—	10	—	—	서면
서천군 서면	요포	—	—	—	—	서면
서천군 서면	내도둔	—	—	—	—	서면
서천군 서면	마량	—	—	—	—	서면
서천군 비인면	성북1리	—	7	—	—	서면
서천군 비인면	성북2리	—	—	—	—	서면
서천군 비인면	선도1리	—	143	—	—	서면
서천군 비인면	선도2리	—	60	—	—	서면
서천군 비인면	선도3리	—	10	—	—	서면
서천군 비인면	칠지1리	—	—	—	—	서면
서천군 비인면	칠지2리	—	31	—	—	서면
서천군 비인면	구복리	—	251	—	—	서면
서천군 비인면	율리	—	15	—	—	서면
서천군 비인면	성산리	—	51	—	—	서면
서천군 비인면	관1리	—	—	—	—	서면
서천군 비인면	관2리	—	58	—	—	서면
서천군 비인면	관3리	—	9	—	—	서면
서천군 비인면	다사2리	—	221	—	—	서천읍
서천군 비인면	장포1리	—	67	—	—	서면
서천군 비인면	장포2리	—	9	—	—	서면

지역	마을명	PM ₁₀	오존	이산화질소	이황산가스	마을값 산정 기준 국가측정망
태안군 합계	31개 마을	11(34)	338(554)	0(0)	0(0)	
태안군 원북면	반계2리	—	2	—	—	이원면
태안군 원북면	반계3리	—	21	—	—	이원면
태안군 원북면	이곡1리	—	2	—	—	이원면
태안군 원북면	이곡2리	—	18	—	—	이원면
태안군 원북면	황촌1리	—	4	—	—	이원면
태안군 원북면	황촌2리	—	12	—	—	이원면
태안군 원북면	방갈1리	—	29	—	—	이원면
태안군 원북면	방갈2리	—	4	—	—	이원면
태안군 원북면	신두1리	—	1	—	—	이원면
태안군 원북면	신두2리	—	35	—	—	이원면
태안군 원북면	신두3리	—	18	—	—	이원면
태안군 원북면	동해1리	—	1	—	—	이원면
태안군 원북면	동해2리	—	4	—	—	이원면
태안군 원북면	양산1리	—	131	—	—	태안읍
태안군 원북면	양산2리	—	36	—	—	태안읍
태안군 원북면	청산2리	—	5	—	—	이원면
태안군 원북면	마산1리	—	4	—	—	이원면
태안군 이원면	내1리	—	5	—	—	이원면
태안군 이원면	내2리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	내3리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	관1리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	관2리	—	2	—	—	이원면
태안군 이원면	관3리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	당산1리	—	1	—	—	이원면
태안군 이원면	당산2리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	당산3리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	당산4리	—	1	—	—	이원면
태안군 이원면	포지1리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	포지2리	11	1	—	—	이원면
태안군 이원면	사창1리	—	—	—	—	이원면
태안군 이원면	사창3리	—	1	—	—	이원면

2.3. 4개 시군 종합분석

- 2020년은 2019년 대비 코로나19 확산에 따른 우리나라의 사회적거리두기 시행, 중국의 경제활동이 전면 제한으로 전국적으로 대기질 농도가 양호¹²⁾하였으며(박선엽, 2020, 데일리굿뉴스, 2020.06.06.), 본 연구대상 119개 마을의 경우도 미세먼지(PM10) 초과일이 2019년 91일에서 2020년 13일로, 아황산가스(SO₂)는 81일에서 ‘초과일 없음’으로 개선된 것으로 분석됨.
- 2020년 태안군 포지2리 PM10 기준 초과일수는 11일, 당진시 통정1리와 삼봉3리가 각각 1일씩 발생함.
- 오존의 경우 보령시와 태안군은 2019년 오존 초과일수가 각각 1,167일, 000일에서 2020년 183일, 000일로 감소한 반면, 당진시와 서천군은 2019년 각각 000일, 000일에서 2020년 438일, 231일로 약간 증가한 것으로 관찰되었는데, 지역·연차별 초과일수의 경향성은 없는 것으로 분석됨.
- 지역별 오존(O₃) 배출허용 초과 현황은 보령시 지역에서는 은포3리·송학2리가 38회로 가장 많았고, 당진시는 용두1리가 221회, 서천군은 구북리 251회, 태안군은 양산1리가 131회로 가장 많이 초과되는 지역으로 확인됨.

[표 5.2] 2020년 오존 배출허용 초과 마을현황

지역	마을명
보령시	은포2리 32회, 은포3리 38회, 송학2리 38회 순
당진시	용두1리 221회, 슬항2리 133회, 슬항1리 103회, 대촌1리 100회, 장항1리 87회 순
서천군	구북리 251회, 다사리 221회, 선도1리 143회, 장포1리 67회 순
태안군	양산1리 131회, 양산2리 36회, 신두2리 35회 순

12) WMO에서 25개국 조사결과 2015~2019년 대기 2020년 완전봉쇄기간 평균 이산화질소(NO₂) 최대 약 70%, 평균 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 30~40% 감소 발표(WMO 홈페이지), 2020년 전국 초미세먼지 연평균 농도는 19μg/m³로 초미세먼지 관측을 시작한 2015년(26μg/m³) 이래 가장 낮은 수치로, 2019년(23μg/m³)에 비해 17.4%(4μg/m³) 감소함(에어코리아 기준). 코로나19로 인한 경제활동 둔화로 이동 제한에 의한 수송부문 배출량 감소, 공장 등 산업배출량 감소, 영업 제한으로 인한 전기사용량 감소 등 에너지 사용량이 줄었고, 국내 고농도 미세먼지 주요 원인인 중국 등 국외유입이 감소한 것이 국내 대기질 개선에 기여함.

- 오존은 대기로 배출된 대기오염물질이 햇빛을 받아 화학반응으로 생기는 2차 오염물질로 자극성과 산화력이 강해 호흡기 질환 유발, 식물 수확량 감소, 건축물 부식, 스모그에 의한 대기오염 등 생태계 및 산업활동 전반에 영향을 미침.
- 우리나라는 오존 평균농도는 2010년 0.023ppm에서 2019년 0.30ppm으로 약 1.3배 증가했으며, 우리나라의 오존으로 인한 사망자 수 증가율은 OECD 35개국 중 가장 높아 오존 피해에 대한 우려가 큰 상황임.
- 2021년에도 오존주의보(1시간 평균 0.12ppm 이상), 경보(1시간 평균 0.30ppm 이상) 발령횟수는 경기 64회, 충남 29회 등 대기질 관리가 전국적으로 취약한 실정이며, 특히 연안지역의 오존농도 증가가 우려되는 사항에서 연안지역에 위치한 화력발전소 주변에 대한 오존관리 및 노출 최소화 정책추진이 필요한 것으로 분석됨.
- 화력발전소 주변지역 생활권대기질정보가 제공되는 마을 대상으로 분석한 결과 중점 관리대상 마을은 5개, 우선 관리대상 마을은 19개로 확인되었으며, 관련 자료는 119개 마을에 제공함.
- 중점·우선 관리대상 마을은 2차년도와 유사한 결과(관련내용 2차년도 보고서 206쪽 참조)를 나타냄에 따라 관련 마을에 대해 지속적인 집중 측정 등 관리가 필요할 것으로 판단됨.
- 화력발전소는 연안에 위치해 있어 선박대기오염배출 기준 마련, 저속운항해역 지정 등 선박대기오염배출 관리정책을 집중 추진하고 있으나, 상대적으로 국지적 오존 고농도에 대한 관리는 미흡한 실정으로 오존 발생 원인분석을 통해 대책을 수립할 필요성이 높은 것으로 분석됨.

[표 5.3] 4차년도 화력발전소 주변 오존 중점·우선 관리대상 마을

구분	중점 관리대상 마을	우선 관리대상 마을
보령시	주교면 은포2리, 주교면, 송학2리	주교면 은포3리, 주교면 은포2리
당진시	-	석문면 삼봉3리, 고대면 진관2리, 석문면 삼화3리, 석문면 삼화1리, 고대면 옥현리, 고대면 장항2리, 석문면 삼봉1리, 석문면 통정1리, 석문면 교로1리
서천군	비인면 구복리, 비인면 다사2리	비인면 구복리, 비인면 선도1리, 서면 내도둔
태안군	원북면 방갈1리	이원면 포지2리, 원북면 신두1리, 원북면 양산1리, 이원면 당산4리, 원북면 방갈1리

3. 요약 및 소결론

- 생활권 대기질 정보에 대해 측정하고, 취합된 정보에 대해 마을주민들에게 알권리를 충족시키고, 주민이 원하는 정보를 제공하여 연구결과의 신뢰성을 높이고 관심을 유도하고자 노력하였음.
- 보령시 24개 마을, 당진시 28개 마을, 서천군 36개 마을, 태안군 31개 마을 총 119개 마을에 주민 민원 및 화력발전소 주요 대기오염물질인 이산화질소(NO₂), 아황산가스(SO₂), 오존(O₃), 미세먼지 (PM₁₀), 총부유먼지(TSP) 등 생활권 대기질 정보를 반응형 웹과 우편으로 제공함.
- 마을대기질정보는 정보제공 서비스를 신청한 마을에 한해 3년 동안 제공하였으나, 초기에 비해 마을대기질정보 제공의 관심도가 낮아져 현장조사 시 지역을 방문하여 직접 홍보도 병행함.
- 마을별 대기환경기준 대비 초과일 분석 결과, 2019년 대비 2020년 초과일이 18.7% 감소하였는데, 보령시와 태안군은 대기환경기준일이 감소한 반면, 당진시와 서천군은 증가한 것으로 확인됨.
- 보령시는 1,244일에서 85.3%(1,061일)가 감소한 183일로 4개 시군중 가장 크게 대기환경기준 초과일이 감소하였고, 태안군은 588일에서 40.6%(239일)가 감소한 349일로 확인됨.

- 당진시는 1,083일에서 35.0%(379일) 증가한 1,462일로, 서천군은 782일에서 29.5% (231일) 증가한 1,013일로 확인됨.
- 미세먼지(PM10)는 대기환경기준 초과일이 2019년 91일에서 2020년 13일로, 아황산가스 (SO₂)는 2019년 81일에서 2020년은 확인되지 않음.
- 미세먼지(PM10)은 당진시와 태안군 마을에서만 2년간 대기환경기준일 초과일이 발생했으 며, 2019년 당진 57일, 태안 34일, 2020년 당진 2일, 태안 11일 발생하였고, 2020년 초과일은 당진시 통정1리 1일, 삼봉3리 1일, 태안군 포지2리 11일 3곳 마을에서만 확 인됨.
- 아황산가스(SO₂) 대기환경기준 초과일은 2019년에는 보령시 은포3리 77일, 당진시 삼 화4리 4일로 총 2개 마을에서 81일 관측됨.
- 보령시의 오존(O₃) 초과일수는 2019년 1,167일에서 2020년 183일로 가장 많이 줄고 태 안군은 2019년 554일에서 2020년 338일로 216일 감소하였으나, 당진시는 2019년 1,022일에서 2020년 1,460일로 438일, 서천군은 2019년 782일에서 2020년 1,013일 로 231일 증가함.
- 2차년도에는 오존 실측데이터(4회 측정)와 생활권 대기질 정보를 바탕으로 119개 마을 을 대상으로 중점·우선 관리대상 마을을 선정·발표하였으며, 4차년도에는 2차년도 결 과와 비교분석 하기 위해 생활권대기질 정보만으로 중점·우선 관리대상 마을을 재선정 하였고, 그 결과 2차년도와 중점·우선 관리대상 마을이 유사한 것으로 확인됨.
- 2020년 중점 관리대상 마을은 당진시 5개, 서천군 3개, 태안군 2개로 총 10개 마을로 확 인되었고, 우선 관리대상 마을은 보령시 7개, 당진시 5개, 서천군 3개로 총 15개 마을 이 지속 선정되어 관련 마을에 대한 지속적인 관리가 필요한 것으로 분석됨.
- 최근 연안을 중심으로 오존농도 상승 우려가 증가하고 있으며, 연구대상 마을 모두 연안 에 인접해있어 오존농도를 근거로 선정한 4차년도 중점·우선 관리대상 마을 이외 마을에 서도 고농도 오존으로 인한 피해에 각별한 주의가 요구됨.
- 오존농도가 높아지면 호흡기와 눈건강에 영향을 미치고 심할 경우 폐 기능 저하를 일으 킬 수 있어, 고령인 마을주민들이 고농도 오존에 대응하기 위한 기온상승과 CO₂ 농도와 연계한 사전 안내 등 정책 개발·지원이 필요할 것으로 판단됨.

- 대기환경기준 초과일은 대부분 오존농도가 초과하는 경우로 오존농도는 기온이 상승하면 대부분 같이 상승하게 되는데, 제2장에서 분석한 최근 해당 지역 기온상승 순위는 서천이 $13.8 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$, 당진 $13.5 \pm 8.7^{\circ}\text{C}$, 태안 $13.5 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$, 보령 $13.3 \pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 순으로 오존농도 증감 순위와 경향이 대부분 일치하여 기온상승이 오존농도 증가의 주요 원인인 것으로 추측됨.
- 일반적으로 기후변화로 기온이 상승하면 오존이 잘 생성되는 경향이 있고 이산화탄소 농도 증가는 기후변화를 가속화 하므로 지역 CO2 농도 증가가 오존농도 상승에 기여했을 것으로 추측되나, 오존농도 변화 분석은 기상조건, 대기오염물질 농도변화, 지형조건 등 복합요인을 고려해야 하기 때문에 오존농도와 이산화탄소 농도의 명확한 인과성의 해석을 위해서는 장기간 각 요인별 영향을 축적하고 분석하는 것이 필요할 것으로 사료됨.

제6장 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

1. 연구목적
2. 연구개요
3. 분석결과
4. 대기모델에 의한 기여도 결과
5. 대기모델을 활용한 발전소 기여도 평가
6. 요약 및 소결론

1. 연구목적

- 화력발전소 주변지역 대기오염물질 영향분석은 발전소 주변지역으로 유입되는 외부 대기오염물질의 영향 정도를 파악하는 기원 추정과 외부로부터의 기여도 분석, 그리고 화력발전소로부터 배출되는 대기오염물질이 외부에 영향을 미치는 내부 기여도 분석방법이 있음.
- 화력발전소 주변지역 대기오염물질 기원을 추정하기 위해 안정동위원소 라이브러리분석결과 자료를 축적하고, 자료 측정기간 동안 외부로부터 유입되는 대기오염물질 외부 기여도를 분석함.
 - 화력발전소 주변지역 4개 지점에 대해 계절별 대기시료와 강우시료를 분석하고, 3차년도 결과와 통합 분석을 실시함.
 - 대기시료와 강우시료에 포함된 중금속(Al, Cr, Mn 등 11개 항목)을 분석하고 대기-강우-하천으로의 중금속 유입 검토를 위해 4세부 하천과 저질 중금속 측정결과와 비교 분석함.
 - 또한, 화력발전소의 직접적인 영향을 파악하기 위해 발전소 석탄 원료 및 굴뚝 배기가스 시료(지역당 6개 시료)를 분석하고, 주변지역 대기오염물질 유입경로 파악을 위한 외부 기여도를 분석함.
- 화력발전소에서 배출되는 대기오염물질 기여도 분석을 위해 대기모델을 확정하고 충남 소재 발전소 대기오염물질 배출로 인한 PM_{2.5}의 도내 시군별 기여도를 분석함.
 - 기개발된 모델링 시스템을 발전소 기여도 시스템에 활용하기 위해 데이터를 현행화하고, 기상모델, 대기질 모델, 광화학 모델을 재검증하는 한편, 4차년도에는 발전소 기인 대기오염물질 중 PM_{2.5}에 대한 기여도를 우선 분석함 (PM_{2.5} 외 대기오염물질은 5차년도 분석할 예정).
 - 기여도분석 결과를 바탕으로 본 연구용역의 목적인 화력발전소 주변지역 영향분석(피해비용분석, 생태환경영향분석 등)의 관심 지역 선정을 위해 화력발전소 가동에 의한 PM_{2.5} 영향범위를 선정함.

2. 연구개요

2.1. 분석기간 및 분석방법

- 이화학적 성분분석을 위한 측정지점은 발전사별 이격거리를 고려하여 4개 지역에 총 16개 지점을 선정함. (TM좌표 변환 3차년도 보고서 205쪽 참고)

[표 6.1] 측정지점의 TM좌표와 화력발전소로부터의 이격거리

구분	TMx(N)	TMy(E)	화력발전소 인접도	
			거리(km)	방향
보령시	고정2리	422861.959208	154516.547971	2.3 남동
	영보1리	422861.959208	154516.547971	3.7 북동
	갈현리	422861.959208	154516.547971	6.0 북동
	신대1리	422861.959208	154516.547971	9.5 북동
당진시	교로3리	494768.663121	156382.572345	0.3 남동
	삼봉2리	494768.663121	156382.572345	5.6 남동
	대촌2리	494768.663121	156382.572345	14.3 남동
	시청사	494768.663121	156382.572345	21.4 남동
서천군	내도둔	393365.869968	154450.422603	1.3 동
	중리	393365.869968	154450.422603	3.3 북동
	선도1리	393365.869968	154450.422603	7.8 북동
	성산리	393365.869968	154450.422603	11.8 북동
태안군	방갈2리	478632.150173	131343.025785	2.2 북동
	포지2리	478632.150173	131343.025785	5.8 북동
	마산1리	478632.150173	131343.025785	8.5 북동
	양산2리	478632.150173	131343.025785	14.5 동

※ 보령 고정2리 및 영보1리와 서천 성산리는 주민 요청으로 측정장소 이전

- 현장조사는 공정시험기준을 준수하고, 대기시료 포집은 하이(로)볼륨에어샘플러를 활용(24시간 이상 포집)하였으며, 강우채수는 강우포집기를 제작하여 계절별 1회 측정함. (분석기관, 분석방법 등 상세 내용은 3차년도 보고서 207, 208쪽 참조)

- 대기시료 및 강우시료 분석은 정부출연 연구기관인 한국기초과학지원연구원에 의해 이루어졌으며, 3차년도 분석은 계절별로 2회씩 총 6회 평균을 분석하고, 4차년도는 당해기관 연간 분석일정으로 인하여 3차 시료 결과(중금속 2차 시료)까지만 분석함.

[표 6.2] 3~4차년도 대기시료 및 강우시료 분석 시기

구분	시기	분석기간	
		대기시료	강우시료
3차년도	1차 가을철	2019.10.23.~2019.11.08.	2020.11.21.
	2차 겨울철	2020.01.09.~2020.01.21.	2020.02.18.
	3차 봄철	2020.04.13.~2020.04.29.	2020.05.19.~2020.05.20.
	4차 여름철	2020.07.20.~2020.08.25.	2020.07.14., 2020.08.10.
4차년도	1차 겨울철	2021.01.11.~2021.01.28.	2020.01.13.
	2차 봄철	2021.04.05.~2021.04.21.	2020.05.17.
	3차 여름철	2021.06.16.~2020.06.30.	2021.08.23.
	4차 가을철	2021.11.01.~2021.11.12.	시료 중량미달

- 충청남도 화력발전소 주변지역 라이브러리 적용을 위해 화력발전소 굴뚝시료와 비산먼지(재)에 대한 시료 채취와 안정동위원소 분석을 실시함.
- 굴뚝측정과 비산먼지(재) 시료는 보령, 태안, 당진화력본부의 협조를 받아 획득하고, 추가적으로 지역주민이 연구진행 과정에서 굴뚝시료와 비산먼지(재) 분석을 요청하여 라이브러리 구축 전 미리 시료를 채취하고 분석함.
- 채취된 시료에 대한 안정동위원소는 실험실 분석(2차년도 보고서 210쪽 참고)으로 이루어졌으며, 관련 분석도 한국기초과학지원연구원에 분석을 의뢰하여 진행함.



[그림 6.1] 현장 시료채취 모습

2.2. 외부 기여율 분석 방법과 모델 운영 기간

- 동위원소 분석시기에 맞춰 대기오염물질 수송모델인 Trajectory를 적용하여 외부로부터 유입되는 오염물질 이동경로를 역추적하였으며, 외부 기여율 분석을 위해서는 PSCF (Potential Source Contribution Function) 모델을 적용함.
- 동위원소 측정기간 동안 대기오염물질 수송을 추적하기 위한 Trajectory 모델과 외부 기여율 분석을 위한 PSCF 모델은 2019년 10월부터 2021년 1월까지 시군별 6차례 시료 채취 기간을 기준으로 모델을 운영함. (관련 모델에 대한 기본사항과 기상모델 운영과 입력자료에 대한 상세 설명은 2차년도 보고서 228~236쪽, 3차년도 보고서 174~178쪽 참조)

[표 6.3] 기상모델 운영 기간 선정을 위한 시료 채취 기간

지역	1차	2차	3차	4차	5차	6차
보령	19.11.4~6	20.1.15~17	20.4.22~24	20.8.18~20	20.11.11~13	21.1.13~15
당진	19.10.29~30	20.1.9~11	20.4.13~15	20.8.24~26	20.11.23~24	21.1.25~28
서천	19.11.6~8	20.1.19~21	20.4.27~29	20.7.15~18	20.11.9~11	21.1.11~13
태안	19.10.30~11.1	20.1.13~15	20.4.27~29	20.8.31~9.2	20.11.24~26	21.1.19~21

2.3. 대기모델 개요

- 대기확산모델의 대표 모델인 Trajectory는 대기확산 모델링 시간 동안에 발생하는 바람의 유동을 나타내므로 대기오염물질 수송 연구를 위한 중요한 도구임. (김동철, 2005).
- 지형과 토지이용도 자료는 WRF 모델의 전처리 도구인 WPS (WRF Pre-Processing System)의 GEOGRID 과정을 거쳐 Terrestrial data를 생성함.
 - GRIB 형식의 NCEP Global Analyses 자료는 UNGRIB 과정을 거쳐 WRF 모델에서 사용할 수 있는 포맷으로 변환되고 GEOGRID와 UNGRIB에서 생성된 개개의 자료는 METGRID 과정에서 격자 체계에 맞게 기상자료가 수평내삽¹³⁾ 됨.
 - WPS 전처리 과정을 통하여 수평내삽된 자료는 WRF 본 모델의 REAL 과정에서 기상자료를 연직내삽¹⁴⁾하여 경계자료와 초기자료를 산출함.
 - 마지막 단계인 WRF 과정에서는 REAL에서 분석된 자료를 수치 적분하여 원하는 대상 기간과 대상 지역에 대해 기상상태를 모사하고 사용자의 분석에 도움을 주기 위한 WRF의 결과를 묘화하는 postprocessing 도구(NCL, RIP4, ARWpost, VAPOR 등)가 지원됨.
- 기상모델은 WRF version 3.9.1을 이용하여 설계하였으며, 기상 초기장의 경우 NCEP (National Centers For Environmental Prediction)/ FNL(Final Global Reanalysis) 자료를 활용하도록 구성함.
 - Trajectory 모델운영은 WRF 모델 결과로 3차원 바람장을 생성하고, 생성한 바람장은 다시 추적모델인 HYSPLIT 모델의 입력자료로 변환¹⁵⁾되며, HYSPLIT 모델은 역추적(본연구 적용¹⁶⁾)이나 정추적을 통해 추적대상으로부터 추적 시작점까지의 이동좌표를 모델링 결과로 도출함.

13) 전구모형자료를 WPS(WRF로 시뮬레이션을 돌리기전 실제 데이터를 격자에 넣어주는 과정)에서 처리할 수 있도록 파일형태로 변환하여 도메인과 지형에 맞게 반영하는 과정

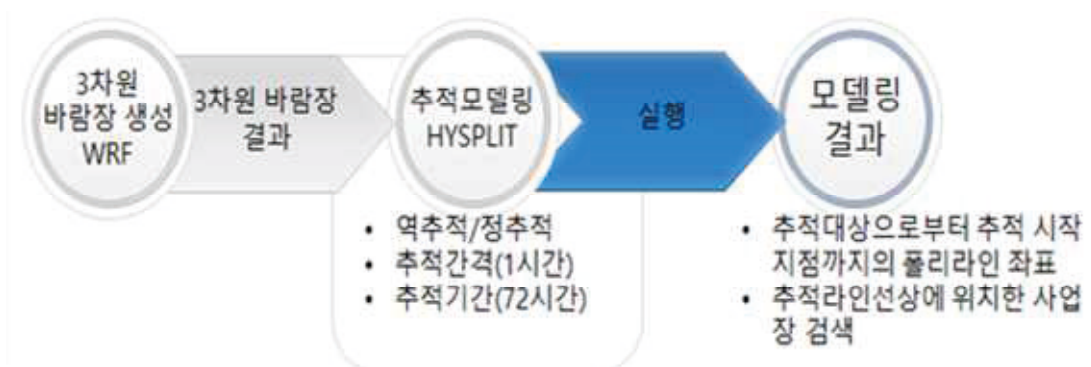
14) 수평내삽된 입력자료를 모델의 연직좌표에 맞게 수직으로 보간하는 과정

15) WRF 모델의 결과는 NetCDF(Network Common Data Format)의 형식으로 결과를 생성하고 HYSPLIT 모델은 NetCDF 파일 대신 자체적인 형식을 사용되게 되므로 이를 위한 자료 변환 프로그램을 제공함. HYSPLIT에서 입력자료는 metprog 패키지 중 arw2arl 프로그램을 이용하여 자료 변환을 하고 최종 입력자료로 적용함.

16) 본 연구 HYSPLIT 모델 운영은 안정동위원소 시료채취기간을 기준으로 역추적 분석함.

[표 6.4] 기상모델 입력자료 구성

구분	Description
WRF	Version 3.9.1
Global Met Input	FNL
Landuse	KMOE / SRTM
Micro Physics	WSM6(Hong and Lim, 2006)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch(kain 2004)
Long wave radiation	RRTM(Mlawer et al. 1997)
Short wave radiation	Goddard (Chou and Suarez 1999)
PBL scheme	YSU(Hong et al. 2006)
LSM scheme	NOAH(Chen and Duhia 2001)



[그림 6.2] Trajectory 모델 운영 흐름

- PSCF(potential source contribution function) 모델은 조건부 확률 분석으로 어떤 지리적 격자 지역을 지나는 궤적이 수용지점에 도달하여 기준치 이상의 높은 농도를 나타낼 확률을 분석하는 방법으로 오염원 위치 추적에 비교적 간단한 방법으로 이용됨. (Ashbaugh et. al., 1985)
- PSCF 결과는 오염원 위치를 제공하는 것이 아니라 수용지점에 영향을 줄 높은 확률을 가진 특정 격자지역의 위치만을 지정함. 따라서, 높은 PSCF 결과를 가진 격자지역은 수용지점에 영향을 주었을 확률이 높은 잠재 오염원 지역임.

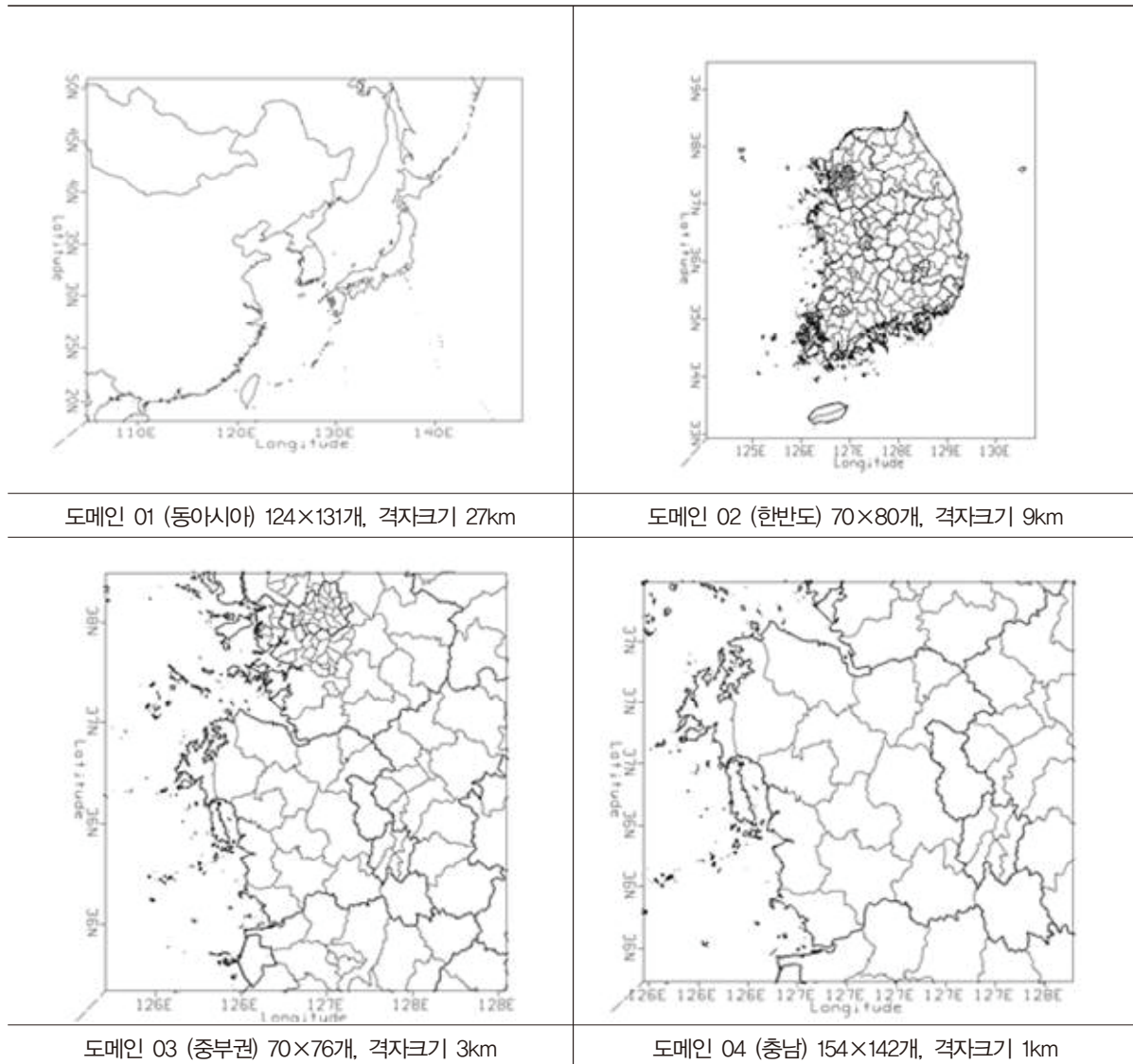
2.4. 발전소 기여도 평가 개요

- 석탄화력발전소가 국내(충남지역) 대기오염물질 농도에 미치는 영향 즉, 화력발전소의 기여도를 평가하기 위해 대기모델(WRF-SMOKE-CMAQ 모델시스템¹⁷⁾)을 구성하고 PM_{2.5} 기여도를 평가함(모델에 대한 기본사항과 기상모델 운영에 대한 상세 설명은 3차년도 보고서 174~178쪽 참고).
- 대기질 영향 예측 시, 예측 영역 내의 국지기상 특성을 상세히 반영하고 기상장을 생성하기 위해 3차원 기상 수치 모델인 WRF를 수행하여 초기 기상장을 생성함.
 - 기상장 모사를 위한 모델링 범위는 동아시아(격자 27km), 한반도(9km), 중부권(3km), 충남권(1km)으로 설정하고 시그마 레벨로 구성함.

[표 6.5] 기상 및 대기질 모델 영역

구분	격자크기(km)	WRF	
		격자개수	연직층수
DOMAIN 1 (동아시아)	27	124 × 131	29
DOMAIN 2 (한반도)	9	70 × 80	
DOMAIN 3 (중부)	3	70 × 76	
DOMAIN 4 (충남권)	1	154 × 142	

17) 기여도 분석을 위해서는 기상장의 변화와 대기오염 배출량에 따른 대기질 변화 및 대기오염물질 간 화학반응을 고려한 대기질 모의가 필요하며, 이를 위해 WRF(3차원 기상 수치모델)-SMOKE(배출량 수치모델)-CMAQ(광화학대기 수치모델)이 필요함.



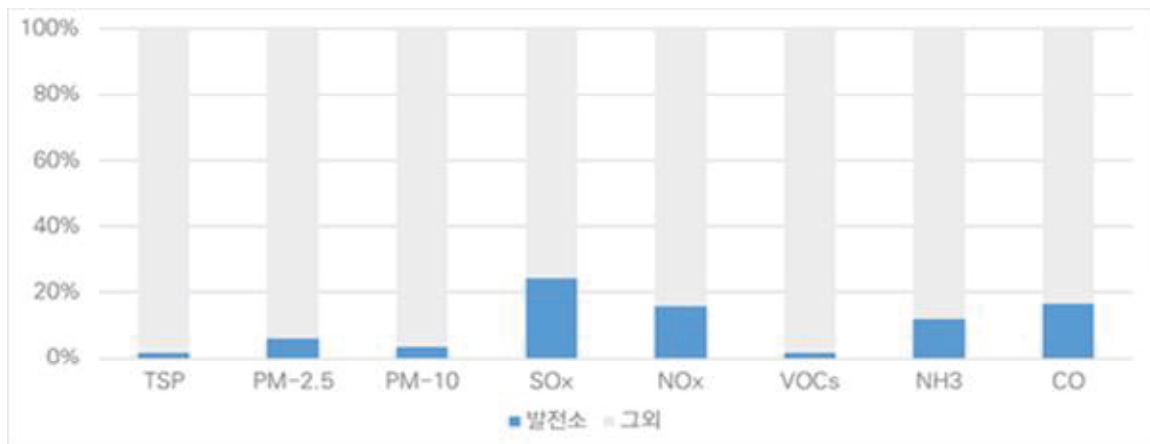
[그림 6.3] 기상 및 대기질 모델영역

- 대기질 모델 수행을 위해 격자별, 시간별 배출량 자료 입력 구축이 필요하며, 인위적 배출량과 자연 배출량 수치모델인 SMOKE를 수행함.
 - 한반도(도메인 2)와 중부권(도메인 3), 충남권(도메인 4)에 해당하는 우리나라의 인위적 배출량은 대기보전정책시스템(CAPSS: Clean Air Policy Support System) 자료를, 자연배출량은 SMOKE 3.6 (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions Version 3.6)에 탑재된 BEIS 3.1을 이용함.
 - 배출량 입력을 위해 충남도 내 석탄화력발전소 배출량 분석과 충남도 전체 배출량 대비 비율을 산정함. 발전소 배출량은 태안화력이 15,349톤으로 가장 많으며, 당진 13,776톤,

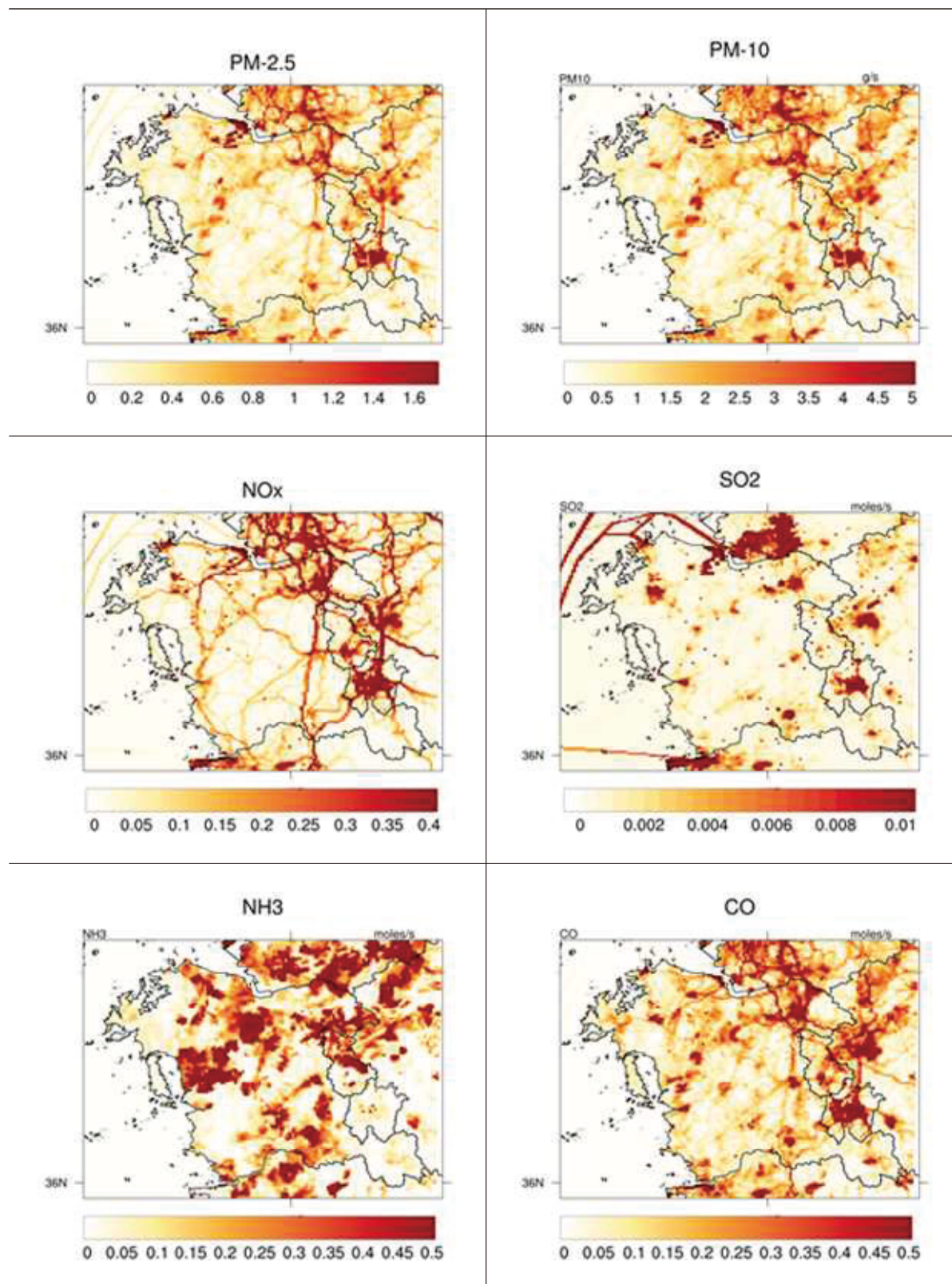
보령 12,451톤, 신보령 3,873톤 순으로(2019년 서천화력 폐쇄로 배출없음), 석탄화력 발전소가 충청남도 배출량의 9.8%를 차지함.

[표 6.6] 충청남도 석탄화력발전소 배출량(2019년 기준, 단위 : 톤)

구분	TSP	PM10	PM2.5	SOx	NOx	VOCs	NH3	CO	계
신보령	84	66	82	1,503	720	152	1.4	1,265	3,873
보령	311	245	304	4,429	4,505	290	8.5	2,358	12,451
태안	344	271	337	4,821	5,627	422	5.3	3,522	15,349
당진	436	346	429	4,315	4,385	413	4.8	3,447	13,776
발전소 합계	1,175	928	1,152	15,069	15,237	1,277	20	10,592	45,450
충남도 배출량	65,443	15,314	31,823	62,332	96,950	74,724	53,469	63,944	463,999
충남도 대비 발전소 비율(%)	1.8	6.1	3.6	24.2	15.7	1.7	0.3	16.6	9.8

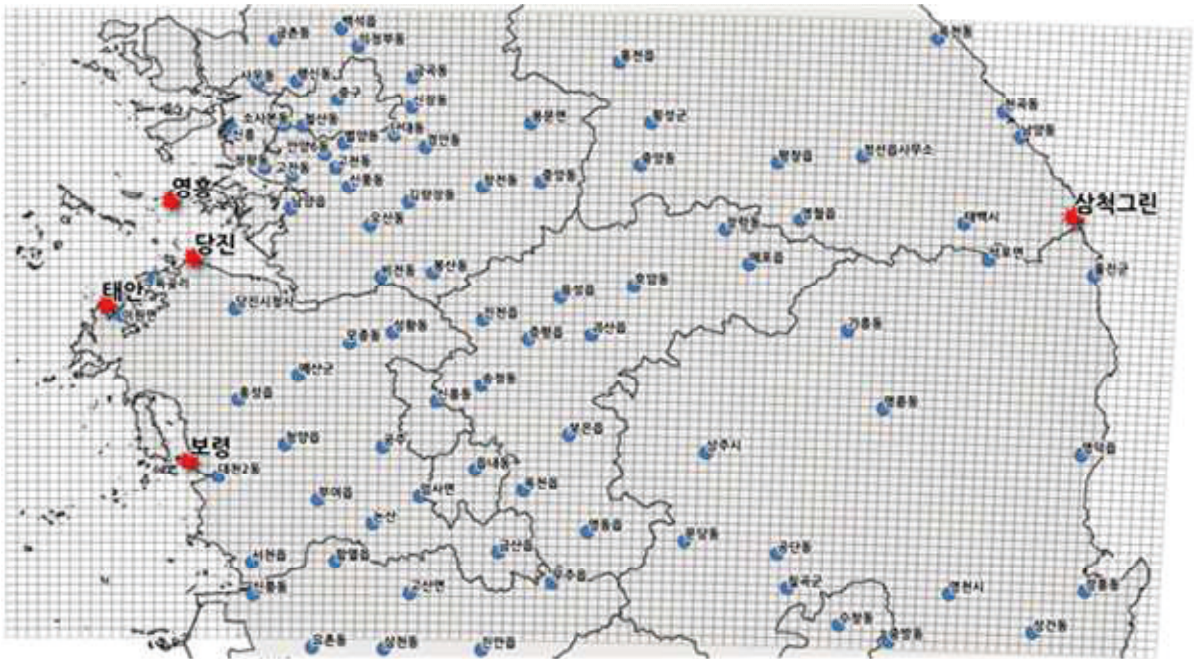


[그림 6.4] 충청남도 화력발전소의 대기오염물질별 배출비율



[그림 6.5] SMOKE 모델 수행결과(대기오염물질 배출량 처리결과)

- 검증된 기상수치모델과 배출량 수치모델을 바탕으로 격자별 오염물질별 농도를 모의하기 위해 광화학대기 수치모델인 CMAQ을 수행함.
- 모델링 수행결과의 정합도 분석은 모델링 도메인 내에 위치한 도시대기측정소의 실측자료와 모델의 예측값을 활용하여 검증하였으며, 검증은 RMSE(Root Mean Square Error), NMB(Normalized Mean Bias), IOA(Index of Agreement), r(Correlation) 등의 통계지수를 이용함.



[그림 6.6] 중부권 도메인 내 모델검증을 위한 도시대기측정소 위치

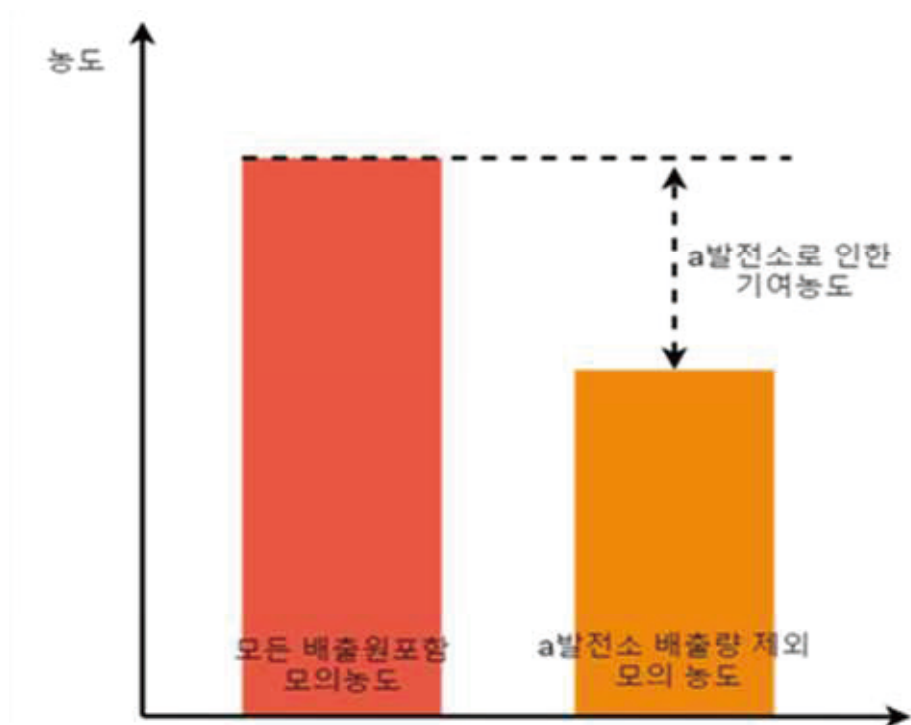
- 4차년도에는 화력발전소에서 배출하는 대기오염물질의 지역별 PM_{2.5} 기여도를 BFM (Brute-Force Method)을 적용하여 분석함.
- BFM은 대기질 모델에 기본 배출량을 적용하였을 때 모의농도와 배출량 증가 또는 감소 하였을 때 재모의된 농도를 비교하여 민감도(기여농도)를 산출하는 방법으로,
- BFM은 광화학 모델에 기초한 전통적인 민감도 산정방법인 동시에(김순태, 2011), 지역 또는 배출원 저감에 대한 효과를 가장 직관적으로 분석할 수 있으며, 최근에도 활발히 활용되고 있는 분석 방법임.

– BFM은 배출원에서 물질별 기여도는 다음 산식으로 산정됨.

$$S_i = \frac{C_i - C_x}{e_i}$$

- S_i : 발전소 i 의 배출량 변화에 따른 농도변화
- C_i : 기본 모의 결과 (모든 배출원포함)
- C_x : 발전소 i 삭감시 모의농도 / e_i : 발전소 i 에 의한 삭감폭 (예, 100% = 1)

○ BFM 방법은 기여농도 분석에 적용이 용이하고, 모델 적용 확장성이 좋고, 대기질 정책효과 평가에 활용성이 높은 반면, 모델링 시간이 길고 민감도가 높은 단점이 있음.



[그림 6.7] BFM 적용 발전소 기여도(기여농도) 분석 개념도

3. 분석결과

3.1. 대기시료 분석결과

- 4차년도 분석이 종료된 7회의 유기탄소 안정동위원소비는 서천군이 가장 고농도인 22.8‰로 나타났으며, 태안군-22.9‰, 보령시 -25.2‰, 당진시 -26.7‰ 순으로 분포함.

[표 6.7] 대기 중 유기탄소 안정동위원소비 분석결과(평균값)

(단위 : ‰)

구분	Mean	SD	Mean±SD	Median	비고
보령시 (Mean -25.2) * 3차년도 : -25.9	오포3리	-24.3	-24.3±0.1	-24.3	
	갈현리	-25.0	-25.0±0.1	-25.0	
	주교1리	-26.0	-26.0±0.1	-26.0	제외
	신대1리	-25.9	-25.9±0.1	-25.9	제외
	고정2리	-23.1	-23.1±0.0	-23.2	추가
당진시 (Mean -26.7) * 3차년도 : -26.1	영보1리	-27.0	-27.0±0.1	-27.0	추가
	교로3리	-25.9	-25.9±0.2	-26.0	
	삼봉2리	-27.0	-27.0±0.1	-27.0	
	대촌2리	-26.8	-26.8±0.1	-26.8	
	시청사	-26.9	-26.9±0.1	-26.9	
서천군 (Mean -22.8) * 3차년도 : -24.1	내도둔	-23.0	-23.0±0.1	-23.2	
	중리	-19.0	-19.0±0.0	-19.0	
	선도1리	-26.2	-26.2±0.1	-26.2	
	관3리	-24.6	-24.6±0.6	-24.9	제외
	성산리	-21.0	-21.0±0.0	-21.0	추가
태안군 (Mean 22.9) * 3차년도 : -24.7	방갈2리	-21.7	-21.7±0.0	-21.8	
	포지2리	-22.3	-22.3±0.1	-22.3	
	마산1리	-23.5	-23.5±0.1	-23.5	
	양산2리	-24.1	-24.1±0.0	-24.1	

- 유기탄소 안정동위원소비는 3차년도(2회 누적)과 4차년도(7회 누적) 분석결과와 3차년도(2회 누적) 분석결과 고농도 순서는 서천 > 태안 > 보령 > 당진 순으로 동일함.
 - 당진(-0.63%)를 제외한 지역에서는 농도가 증가하였으며, 특히 태안은 1.8% 증가하여 가장 큰 농도 증가를 보임(보령 0.7%, 서천 1.3% 증가)
 - 연차별 누적결과 농도증감의 차이는 일부 있으나 지역별 농도 순은 일정하게 나타나고 있어 지역별 2년간 자료(8회 누적)를 활용한 라이브러리를 구축하고 활용할 경우 지역별 농도차이는 반영될 것으로 판단됨.

- 석탄, 비철금속 제련에 의한 오염원 추적자로 주로 활용되는 납 안정동위원소비의 경향성은 3차년도와 마찬가지로 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \gg ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \gg ^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} > ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 순이며 지역별 특이점을 찾을 수 없었음.
 - 각 동위원소 비의 범위는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(18.362 \pm 0.411)$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(15.892 \pm 0.338)$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(38.244 \pm 0.406)$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(0.855 \pm 0.059)$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(2.129 \pm 0.096)$ 로 서로 상이함.
 - 하지만, 유기탄소, 납 안정동위원소 분석 모두 누적분석의 경향성을 확인할 수 있어 향후 최종 라이브러리의 경향성을 담보할 수 있을 것으로 판단됨.

[표 6.8] 대기 중 납 안정동위원소비 분석결과(평균값)

구분		$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
보령시	오포3리	18,229	16,230	37,838	0.836	2,170
	갈현리	18,025	15,650	38,424	0.876	2,202
	주교1리	18,767	15,887	38,650	0.826	2,107
	신대1리	18,403	15,724	38,514	0.858	2,180
	고정2리	18,551	15,645	38,409	0.878	2,156
	영보1리	18,361	15,753	38,558	0.806	2,145
	평균	18,389	15,815	38,399	0.847	2,160
당진시	교로3리	17,960	15,623	38,190	0.838	2,190
	삼봉2리	18,508	15,758	38,284	0.801	2,136
	대촌2리	18,162	15,677	38,212	0.874	2,121
	시청사	17,951	15,602	38,281	0.896	2,224
	평균	18,145	15,665	38,242	0.852	2,168
서천군	내도둔	18,476	15,634	38,135	0.871	2,139
	중리	18,172	15,697	38,118	0.845	2,135
	선도1리	18,284	15,554	38,116	0.876	2,080
	관3리	18,773	15,743	38,348	0.851	2,075
	성산리	18,507	15,628	38,137	0.862	2,203
	평균	18,442	15,651	38,171	0.861	2,126
태안군	방갈2리	18,483	15,588	38,230	0.887	2,118
	포지2리	18,062	15,658	38,565	0.914	2,184
	마산1리	18,471	15,720	38,332	0.846	2,033
	양산2리	18,303	15,679	38,148	0.796	2,205
	평균	18,330	15,661	38,319	0.861	2,135

- 지역별 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 서천(18.442)로 가장 높고, 당진(18.145)로 가장 낮으며, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 는 보령(15.815), 서천(15.651), $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 보령(38.399), 서천(38.171), $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 서천, 태안(0.861), 보령(0.847), $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 당진(2.168), 서천(2.126)으로 나타남.

- 대기 중 인위적 활동에 의해 증가되는 미량 중금속 분석을 위해 시료를 확보한 6회(3차년도 2회, 4차년도 4회)를 대상으로 분석을 실시함.
- 중금속에 대한 대기환경기준은 납(Pb)이 유일하며, 납 환경기준은 연간평균치 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로, 본 연구에서 24시간 내외로 포집한 시료의 결과값을 비교하기에는 다소 무리가 있

으나, 보령시 갈현리, 당진시 교로3리, 대춘2리, 서천 내도둔, 태안 마산1리를 제외한 모든 지점에서 대기환경기준인 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과함.

- 보령시 갈현리, 당진시 대춘2리, 서천군 내도둔, 태안군 마산1리는 납이 거의 검출되지 않았으며, 보령시 고정2리, 주교1리, 신대1리 등의 납 농도가 높게 나타나 보령시의 납 농도가 가장 높은 것으로 분석됨.

[표 6.9] 대기 중 중금속 분석결과

		(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)									
구분		Al	Cr	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	As	Pb	Cd
보령시	오포3리	36.6	0.1	89.8	12.9	1.4	1.0	0.1	0.3	0.6	37.8
	갈현리	21.7	0.1	43.5	9.6	0.4	0.2	0.7	0.3	0.2	15.8
	주교1리	94.4	0.2	108.9	56.8	4.0	1.4	0.6	0.7	1.4	42.0
	신대1리	23.4	0.1	239.9	25.3	2.2	1.6	0.3	0.2	1.3	34.5
	고정2리	73.7	0.1	104.7	34.2	2.0	0.4	0.5	0.1	1.5	22.8
	영보1리	96.3	0.4	37.7	15.8	3.3	0.9	0.0	0.1	1.2	31.2
	평균	57.7	0.2	104.1	25.8	2.2	0.9	0.4	0.3	1.0	30.7
	(3차년도)	81.7	0.2	62.6	22.0	1.9	1.0	0.1	0.2	0.8	17.3
당진시	교로3리	64.4	0.1	57.1	26.8	1.3	1.4	0.3	0.3	0.2	10.2
	삼봉2리	155.1	0.4	72.0	56.3	2.5	3.0	0.3	1.1	0.9	27.3
	대춘2리	130.5	0.1	234.5	63.5	4.1	2.6	0.3	0.7	0.0	42.2
	시청사	102.9	0.4	15.2	55.2	2.8	3.0	0.9	0.4	0.9	35.9
	평균	101.1	0.3	86.8	40.6	2.7	2.0	0.4	0.5	0.7	29.6
	(3차년도)	109.2	0.3	52.7	33.4	2.5	1.6	0.2	0.2	0.8	16.3
서천군	내도둔	57.7	0.1	135.7	44.2	1.9	0.9	0.8	0.4	0.0	22.0
	중리	54.6	0.3	62.6	16.7	1.5	0.7	0.1	0.1	0.6	9.3
	선도1리	7.8	0.1	92.1	34.8	2.3	1.1	0.1	0.9	1.1	20.8
	관3리	5.4	0.5	4.7	36.7	1.7	2.0	0.7	0.9	0.5	23.1
	성산리	1.5	0.7	66.8	34.6	1.8	2.0	0.5	0.2	0.7	21.4
	평균	38.0	0.3	74.8	34.6	2.0	1.4	0.4	0.5	0.6	21.0
	(3차년도)	97.5	0.2	27.0	31.3	1.6	1.5	0.1	0.2	0.7	11.5
	방갈2리	215.9	0.5	154.4	86.2	2.2	5.2	0.0	0.2	1.0	24.5
태안군	포지2리	48.8	0.1	29.5	34.1	0.1	1.3	0.7	0.5	1.1	11.8
	마산1리	78.3	0.5	126.6	37.4	1.2	2.6	0.1	0.4	0.1	18.6
	양산2리	118.0	0.1	20.1	93.9	2.0	4.4	0.3	0.8	0.6	30.2
	평균	83.4	0.4	78.7	53.5	1.5	2.8	0.3	0.4	0.7	21.3
	(3차년도)	104.5	0.2	22.9	33.4	1.2	1.7	0.1	0.1	0.5	9.8

- 지역별, 측정지점별 중금속 측정결과 대기환경기준이 존재하는 납(Pb) 이외의 항목에 대해 상대적으로 농도가 높게 나타난 곳을 확인한 결과 보령시의 경우 Cu, Zn, Cd이 당진시는 Al, Cu, Fe, Zn, As, Cd가 서천군은 Cu, Ni, As, 태안군은 Al, Cu, Fe, Co, As이 상대적으로 중금속 농도가 높게 나타나는 것으로 분석됨.
- Al 은 태안군 방갈2리 측정지점의 측정농도가 $215.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났으며, 보령시는 전체적으로 농도가 높게 나타나 지역간 농도차이가 크게 나타나는 특징을 보였으며, Fe는 태안군의 측정값이 타지역에 비해 높게 나타남.
- 3차년도 결과와 비교분석한 결과 Al은 모든 지역에 농도가 감소한 반면 Al 이외 대부분의 중금속 농도는 상승한 것으로 나타남.
- 태안군은 Al, Ni을 제외하고 증가률이 가장 높았으며, 보령시는 다른지역에 비해 상대적으로 증가률이 낮게 나타남.
- 측정지점별 증감률을 검토한 결과 측정시기별 증감 특이사항은 없었으며, 특히 다수의 측정지점에서 연차별 증감 차이가 뚜렷한 경우(태안군 마산1리 Cu : $0.82 \rightarrow 126.6$, 당진시 선도1리 Al : $110.0 \rightarrow 7.8$ 등)가 발견되는 것을 확인함
- 이처럼 개별 측정시기, 측정지점별 측정값 차이가 크게 나타나는 것은 다수의 측정지점 평균값, 다수의 측정시기 평균값으로 지역 특성을 제시하는 것이 타당하다는 것을 의미함.

[표 6.10] 대기 중 3차년도 결과 대비 중금속 증감

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$, %)

구분		Al	Cr	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	As	Pb	Cd
보령시	증감량	-24.0	0.0	41.5	3.8	0.3	-0.1	0.3	0.1	0.2	13.4
	증감률	-29.4	-22.9	66.3	17.4	16.2	-12.1	301.8	73.0	22.3	77.3
당진시	증감량	-8.1	0.0	34.0	7.1	0.2	0.4	0.1	0.3	-0.1	13.2
	증감률	-7.4	-4.1	64.6	21.3	7.4	24.7	57.5	134.7	-7.9	80.9
서천군	증감량	-59.5	0.1	47.8	3.3	0.4	0.0	0.3	0.3	-0.1	9.5
	증감률	-61.0	34.8	176.9	10.5	24.2	-2.0	236.5	224.8	-9.0	82.3
태안군	증감량	-21.1	0.1	55.8	20.0	0.4	1.1	0.2	0.3	0.2	11.5
	증감률	-20.2	63.9	243.9	59.9	30.6	66.0	167.3	258.9	50.2	117.5

3.2. 강우시료 분석결과

- 대기시료와 유사하게 강우 중 납동위원소비 분석 결과도 $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \gg ^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} > ^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} \gg ^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb} > ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 순이며, 이는 3차년도 강우시료 분석과도 동일한 순위로 나타남.
- 각 동위원소 비의 범위는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(18.448 \pm 0.521)$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(16.081 \pm 0.566)$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}(38.182 \pm 0.237)$, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(0.904 \pm 0.121)$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}(1.982 \pm 0.300)$ 로 서로 상이함.
- 대기시료와 비교시 납동위원소비는 $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 의 경우 높게 나타났으며, $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 는 낮게 나타남.

[표 6.11] 강우의 납 안정동위원소비 분석결과

구분	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$
보령시	오포3리	18.173	15.630	38.169	0.944
	갈현리	18.019	15.648	38.064	0.851
	주교1리	18.089	15.695	38.064	0.846
	신대1리	18.160	15.631	38.084	0.840
	고정2리	18.124	15.603	37.980	0.784
	영보1리	17.941	15.621	38.168	0.839
	평균	18.084	15.638	38.088	0.851
	2.190				
당진시	교로3리	18.968	15.729	38.195	0.815
	삼봉2리	18.357	15.515	38.217	0.821
	대촌2리	17.927	15.587	37.945	0.860
	시청사	18.152	15.655	38.013	0.821
	평균	18.351	15.622	38.093	0.829
	2.064				
서천군	내도둔	18.138	15.681	38.169	0.879
	중리	18.065	15.618	38.147	0.798
	선도1리	18.091	15.702	38.418	0.783
	관3리	18.147	15.693	38.196	0.807
	성산리	17.966	16.646	38.235	0.912
	평균	18.081	15.868	38.233	0.836
	2.157				
태안군	방갈2리	18.178	15.631	38.207	0.872
	포지2리	18.150	15.692	38.051	1.025
	마산1리	17.942	15.556	38.039	0.884
	양산2리	18.116	15.623	38.153	0.791
	평균	18.097	15.626	38.113	0.893
	2.122				

- 대기 중 포함되어 있는 미량의 중금속은 강우로 인해 침강하는데 이를 비교분석하기 위해 강우 시료에 대한 중금속 분석(3차년도부터 시료분석결과를 확보한 6회 시료 대상)을 실시함.
- 강우에 대한 중금속 함유기준은 없으며 수질기준(방류수)에는 Hg, Cr, Zn, Cu, Cd, As, Pb 등의 기준이 존재하나 강우에 적용할 수 없어 중금속 대기환경기준은 Pb의 대기 중 기준과 비교함.
- 보령시 갈현리와 주교1리를 제외하고 모든 지역의 납농도는 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 특히 보령시 대촌2리, 당진시 관3리와 성산리가 높게 나타나는 것으로 분석됨.

[표 6.12] 강우의 중금속 분석결과

(단위 : $\mu\text{g/L}$)												
구분	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb	
보령시	오포3리	89.2	1.2	71.2	61.1	0.7	2.3	7.2	597.2	1.3	1.0	0.71
	갈현리	16.3	1.2	16.0	23.3	0.3	1.9	5.3	533.8	0.1	0.1	0.47
	주교1리	7.6	0.3	27.7	15.6	0.2	0.8	5.6	38.4	0.6	0.4	0.43
	신대1리	150.6	1.4	45.4	38.8	0.7	1.5	56.8	859.2	0.5	0.4	0.77
	고정3리	129.9	2.0	12.0	17.7	0.1	1.1	21.0	269.6	1.2	0.3	.5
	영보1리	73.5	0.9	21.8	30.7	0.6	2.8	40.1	330.4	1.0	0.0	.5
	평균	77.9	1.2	32.4	31.2	0.4	1.7	22.7	438.1	0.8	0.4	0.6
(3차년도)	183.6	6.2	33.3	161.9	0.4	4.2	14.3	730.4	1.1	0.1	6.7	
당진시	교로3리	121.3	0.9	40.9	29.5	0.3	2.6	5.1	850.2	0.8	0.4	0.54
	삼봉2리	92.7	1.8	1.8	105.5	0.4	4.0	12.9	994.1	0.4	0.3	1.10
	대촌2리	157.6	2.3	7.6	176.6	0.7	6.4	20.0	563.0	0.4	0.0	2.04
	시청사	41.2	0.5	94.7	42.7	0.1	4.5	18.7	65.4	0.3	0.0	1.03
	평균	94.0	1.3	33.2	69.4	0.4	3.7	19.9	540.2	0.6	0.2	1.0
	(3차년도)	103.4	2.1	23.3	81.9	0.3	3.2	9.6	589.6	0.6	0.1	2.0
서천군	내도둔	21.7	0.5	10.2	65.5	0.2	2.3	13.2	68.7	0.6	0.3	1.38
	중리	135.3	1.0	42.5	47.6	0.3	3.2	8.2	559.4	0.8	0.7	1.22
	선도1리	142.6	1.2	50.9	65.0	0.8	1.9	9.7	930.3	0.0	0.1	1.12
	관3리	99.2	0.8	12.0	29.6	0.9	2.4	10.7	47.8	0.3	0.0	1.96
	성산리	47.5	0.8	10.9	16.0	0.7	2.1	9.6	199.6	0.4	0.1	1.52
	평균	90.1	0.9	26.6	48.8	0.6	2.6	11.9	391.0	0.5	0.2	1.4
	(3차년도)	641.9	2.6	67.4	467.7	0.9	4.9	13.7	700.0	2.8	0.2	10.0
태안군	방갈2리	99.4	0.7	16.0	47.3	0.0	5.6	8.8	881.3	1.3	0.4	0.60
	포지2리	106.1	1.0	19.7	42.3	0.0	3.2	8.6	963.8	0.5	0.4	0.45
	마산1리	35.7	1.9	30.0	64.2	0.2	3.6	6.4	768.0	0.2	0.4	0.53
	양산2리	145.6	1.3	26.0	71.6	0.5	3.9	10.5	929.0	1.5	0.6	0.81
	평균	87.4	1.1	21.5	48.4	0.3	3.5	9.3	688.8	0.7	0.4	0.9
	(3차년도)	222.0	3.0	24.5	141.4	0.5	4.9	7.7	892.9	1.2	0.3	3.3

- 지역별, 측정지점별 중금속 분석결과 상대적으로 농도가 높게 나타난 지역은 보령시의 경우 Cr, Mn, Cu, As, Cd이 당진시는 Al, Cr, Mn, Fe, Ni, Zn, Pb가 서천군은 Co, Pb가 태안군은 Cr, Ni, Zn, As, Cd이 상대적으로 중금속 농도가 높게 나타나는 것으로 분석됨.
- Zn의 경우 당진시 상봉2리 측정농도가 994.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높게나타났고, 보령시 주교1리의 경우 38.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가 나타나 지점별 농도차이가 크게 나타났으며, Al, Fe 도 농도차이가 크게나타남.
- 3차년도 강우시료 분석결과와 비교분석한 결과 Pb, Zn 은 모든 지역에서 농도가 대폭 감소하였으며, Al, Cr, Co, As의 농도변화는 거의 없는 것으로 나타남.
- 3차년도 대비 서천군과 태안군은 대부분 항목에서 농도 감소가 나타났으며, 당진시는 Pb, Zn, Fe을 제외하고 중금속 농도가 변동이 없거나 소폭 상승한 것으로 나타남.

[표 6.13] 강우 중 3차년도 결과 대비 중금속 증감

(단위 : $\mu\text{g}/\text{m}^3$, %)

구분		Al	Cr	Cu	Fe	Zn	Co	Ni	As	Pb	Cd
보령시	증감량	-105.8	-5.0	-0.9	-130.7	0.0	-2.5	8.4	-292.3	-0.3	0.2
	증감률	-0.6	-2.7	-14.8	-333.0	0.0	-630.5	198.1	-204.2	0.0	20.7
당진시	증감량	-9.3	-0.8	9.9	-12.6	0.1	0.5	10.3	-49.4	0.0	0.1
	증감률	-0.1	-0.8	477.6	-53.9	0.2	180.9	325.7	-515.8	0.0	11.2
서천군	증감량	-551.9	-1.7	-40.7	-418.8	-0.3	-2.3	-1.8	-309.0	-2.4	0.0
	증감률	-0.9	-0.3	-54.0	-621.8	-0.1	-273.8	-36.7	-225.1	-0.3	0.8
태안군	증감량	-134.6	-1.9	-3.0	-93.1	-0.1	-1.4	1.6	-204.1	-0.5	0.0
	증감률	-0.6	-0.9	-98.4	-379.6	-0.1	-308.9	33.6	-288.6	-0.1	3.4

- 보령시 Cd, 당진시 Al, Fe, Zn, Pb, 서천군 Pb, 태안군 As가 지역별 대기, 강우시료 모두에서 상대적으로 높은 농도가 나타나는 것으로 분석되었으나, 기상조건에 영향을 받는 강우시료 샘플링은 대기시료 샘플링 시기와 차이가 발생하여 대기-강우 시료의 중금속 분석결과를 직접 비교하기에는 다소 무리가 있음.

3.3. 대기-강우시료 중금속 분석결과 비교

- 3차년도 제4세부(3차년도 보고서 621쪽 ~68쪽 참고)에서 진행한 수질 및 저질(퇴적물) 중금속 분석은 측정시기(3차년도와 4차년도)와 분석방법¹⁸⁾ 등의 차이는 존재하나 대기중 중금속이 하천과 하천퇴적물에 일부 영향을 미칠 수 있으므로 두 결과를 비교 분석함(강우, 대기 시료의 경우 4세부 대상 하천에 가장 가까운 지점의 분석결과를 비교 대상으로 활용)
- 대기와 강우시료의 중금속 분석결과 Al 성분이 가장 높은 농도를 보였고, 강우시료의 경우 Zn, 대기 시료의 경우 Cu의 함량이 높게 나타남. 하천의 수질분석에서는 분석항목 중 Mn의 농도가 모든 지역에서 의미 있는 결과로 확인할 수 있었으며, 저질분석에서는 Al, Fe, Mn의 농도가 높게 나타남.
 - 일반적인으로 금속성분은 외부유입이나 추가 반응이 없다고 가정하면 대기-강우-하천-저질로 이동하면서 대기중 일부 중금속이 강우에 의해 침강하고, 하천으로 유입되어 희석되며, 저질에 퇴적과 응축의 과정을 거치면서 농도는 저질-대기-강우-하천 순서로 예상할 수 있음.
 - Al, As, Pb 의 경우 중금속의 이동을 설명해 주고 있으며, Cr의 경우 보령에서 하천의 농도가 다소 높게 나타나지만 비교적 이러한 이동매커니즘을 설명할 수 있음.
 - Zn을 제외한 모든 중금속은 강우시료의 농도가 높으면 저질의 농도도 함께 높은 것을 확인하여, 강우의 중금속 농도가 저질의 중금속 농도에 영향을 미칠 수 있음을 확인하였으나, 하천농도와 저질농도의 영향정도를 파악하기 위해서는 Zn의 이동-순환-축적 모델을 추가 실시해야함.
 - 중금속 전체 농도는 대기, 강우 시료의 경우 북부지역에 위치한 당진과 태안이 남부지역에 위치한 보령과 서천보다 높게 나타났으나, 저질의 경우 반대로 보령과 서천이 더 높게 나타남.

18) 대기시료는 대기오염공정시험기준에 따라 질산-염산혼합액에 의한 초음파 전처리를 실시하여 성분을 추출한 후, 유도결합플라즈마 분광법으로 분석하며, 수질시료는 용매추출법에 따라 미량의 중금속 성분을 유도결합플라즈마 질량 분석법 등으로 분석하고, 저질의 경우 건조 후 분말화하여 유기물을 제거하는 전처리 과정을 거친후 토양성분 분석과 같은 방법으로 중금속 성분을 분석함.

[표 6.14] 중금속 분석결과 비교

구분		Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
당진 (교로 3리)	대기($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	64.4	0.1		26.8	1.4	0.3	57.1	1.3	0.3	10.2	0.2
	강우($\mu\text{g}/\text{l}$)	121.3	0.9	40.9	29.5	0.3	2.6	5.1	850.2	0.8	0.4	0.54
	하천(mg/l)	0.04	0	1.3	0.1			0.09	0			
	저질(mg/kg)	2345	31.3	3548	2758		14.2	17.7	78.25	8.2		11.85
태안 (방갈 2리)	대기($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	215.9	0.5		86.2	5.2	0	154.4	2.2	0.2	24.5	1
	강우($\mu\text{g}/\text{l}$)	99.4	0.7	16	47.3	0	5.6	8.8	881.3	1.3	0.4	0.6
	하천(mg/l)	0.05	0	1.8	0.11			2.29	0.007			
	저질(mg/kg)	2888	44.8	824	1948		26	25.1	68	10.1	0	14.2
보령 (영보 1리)	대기($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	96.3	0.4		15.8	0.9	0	37.7	3.3	0.1	31.2	1.2
	강우($\mu\text{g}/\text{l}$)	73.5	0.9	21.8	30.7	0.6	2.8	40.1	330.4	1	0	0.5
	하천(mg/l)	0.06	0.02	2.4	0.4			0.42	0.015			
	저질(mg/kg)	2967	43.6	2022	2608		27.8	29.8	348	11.2	1.2	19.6
서천 (내두 둔)	대기($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	57.5	0.1		44.2	0.9	0.8	135.7	1.9	0.4	22	0
	강우($\mu\text{g}/\text{l}$)	21.7	0.5	10.2	65.5	0.2	2.3	13.2	68.7	0.6	0.3	1.38
	하천(mg/l)	0.05	0	1	0.1			0	0.01			
	저질(mg/kg)	3938	40	650	2370		30.4	63.6		18.9	0	26.4

- 대기와 강우의 중금속 성분함량과 하천, 저질의 중금속 함량을 직접 비교하는 것은 샘플의 수가 너무 작고 샘플링 시기와 분석방법 차이가 있어 직접 비교분석하기에는 한계가 있으나, 본 연구에서는 유사한 지역에서 하천과 저질의 중금속 측정결과 값과 강우와 대기의 측정결과 값 비율을 비교하여 중금속 종류별로 대기과 강우 중 중금속이 하천 및 저질에 어느정도 영향을 미칠 수 있는지 추측해 보고자 함.
- 강우와 대기의 중금속 농도 대비 하천의 중금속 농도는 미미한 것으로 나타났는데, 이는 강우 시기에 대부분의 중금속이 하천으로 유입되나 하천 샘플링 평시에 진행된 것으로 판단됨.
- 하지만, 장기간 퇴적되었을 것으로 추측되는 저질에서는 대부분의 중금속이 강우와 대기 농도 대비 높게 나타나는 것으로 분석됨.
- 비소(As)의 경우 저질에서 상대적으로 소량이 확인되었으나, 모든 대기, 강우시료에서 확인됨에 따라 추후 저질 축적을 통해 농도가 더 높아질 수 있으며, 대기-저질 비율에 근거하면 다른 지역보다 보령은 저질내 비소농도 증가에 관심을 기울일 필요가 있음.

- 강우가 하천농도에 미치는 비율은 망간(Mn)이 상대적으로 높았으며, 대기와 강우가 저질농도에 미치는 비율은 철(Fe)이 다른 중금속에 비해 높게 분석됨.
- 강우가 하천과 저질농도에 미치는 비율은 북부지역인 당진, 태안이 높았고, 대기가 하천과 저질농도에 미치는 비율은 남부지역인 보령, 서천이 높게 분석됨.
- 이는 남부지역 대비 북부지역의 연평균 강우량이 21mm 많아(기상청 기상자료개발 포털, 2021) 강우량이 대기 중 중금속의 하천유입에 기여하고 있는 것을 확인할 수 있음.

[표 6.15] 대기, 강우와 하천, 저질 중금속 비율

(단위 : %)

구분	Al	Cr	Mn	Fe	Co	Ni	Cu	Zn	As	Cd	Pb
당진 (교로 3리)	강우-하천										
	0.03	0.00	3.18	0.34		0.00	1.76	0.00			
	강우-저질										
	19,361	3,477	8,674	93,484		546	347	9.20	1,025		2,194
태안 (방갈 2리)	대기-하천										
	0.06	0.00		0.37		0.00	0.16	0.00			
	대기-저질										
	36,467	3,300		10,902		4,733	31	6,019	2,733		5,925
보령 (영보 1리)	강우-하천										
	0.05	0.00	11.25	0.23		0.00	26.02	0.00			
	강우-저질										
	29,062	6,400	5,150	41,074		464	285	7.72	776		2,366
서천 (내두 둔)	대기-하천										
	0.02	0.00		0.13			1.48	0.32			
	대기-저질										
	13,380	8,960		22,538			16	3,090	5,050		1,420
보령 (영보 1리)	강우-하천										
	0.08	2.22	11.01	1.30		0.00	1.05	0.00			
	강우-저질										
	40,771	4,844	9,275	8,490		992	74	105	1,120		3,920
서천 (내두 둔)	대기-하천										
	0.06	5.00		2.53			1.11	0.45			
	대기-저질										
	31,118	10,900		16,082			79	10,545	11,200	3.85	1,633
서천 (내두 둔)	강우-하천										
	0.23	0.00	9.80	0.15		0.00	0.00	0.01			
	강우-저질										
	18,137	8,000	6,372	36,212		1,321	481		3,150	0.00	1,913
서천 (내두 둔)	대기-하천										
	0.09	0.00		0.23		0.00	0.00	0.53			
서천 (내두 둔)	대기-저질										
	68,448	40,000		53,662		3,800	46		4,725	0.00	

4. 대기모델에 의한 기여도 결과

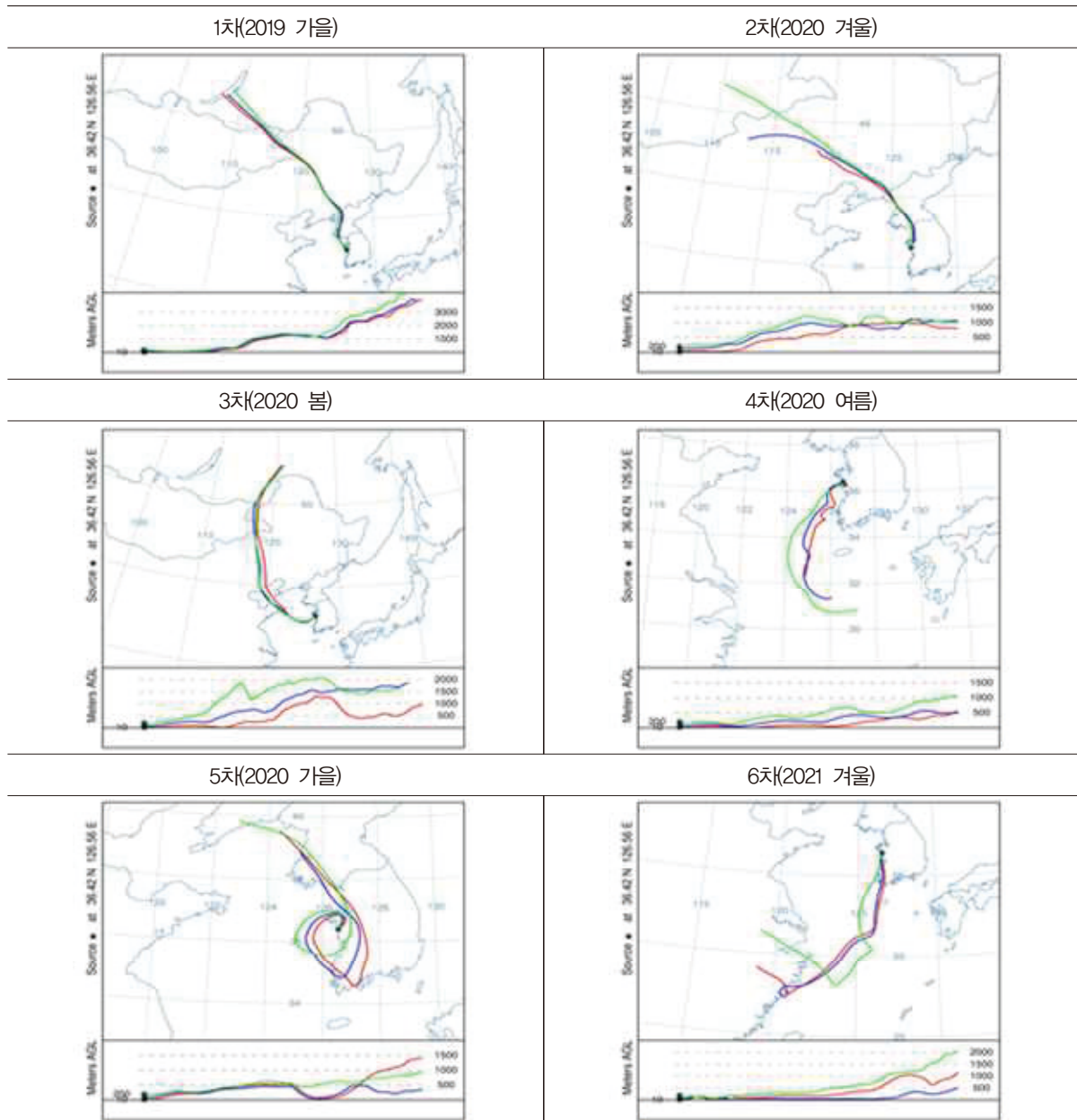
4.1. Trajectory 모델결과

- 동위원소 분석기간의 외부 기여도 분석에 참고를 할 수 있도록 트라젝토리 모델을 운영하였으며, 트라젝토리 모델에서는 각 분석기간 동안 대기오염물질 수송에 대한 개략적 정보와 저고도를 지나는 지점을 확인할 수 있어 측정지점의 외부 기여도에 대한 사전 정보를 확인할 수 있음.
- 장거리와 중거리에서는 모델운영 기간 서풍계열이 우세했으나 봄, 여름에는 동풍계열의 영향을 받고 단거리에서는 주변 국지풍의 영향을 다소 받아 보령의 경우 봄, 겨울에도 동풍의 영향을 받는 것으로 분석됨.
- 저고도로 이동할 경우 이동경로에 위치한 대기오염물질의 영향을 많이 받게 되는데, 겨울, 봄에는 완만한 고도변화를 보이고 있으나 여름에는 저고도로 이동하는 것으로 분석되어 여름철은 상대적으로 대기질이 양호하나 이동경로상 대기오염물질 배출시설의 영향을 더욱 주의 깊게 살필 필요가 있음.
 - 태안을 제외하고 `20년 여름기간 중장거리 서풍계열, 단거리 동풍계열로 변경되는 경로에서 저고도 이동을 보이고 있으며, 저고도를 유지하고 있는 경우는 대부분 북, 서풍 계열로 확인됨.
 - 당진은 2019년 가을 외에는 저고도 이동 경향을 보이고 있으며, 겨울철 단거리 구간에서 급격한 풍향변화가 나타나고 있어 근거리의 대기오염배출원은 상호영향을 주고 받을 수 있음을 확인함.

[표 6.16] 트라젝토리 모델 운영 결과 요약

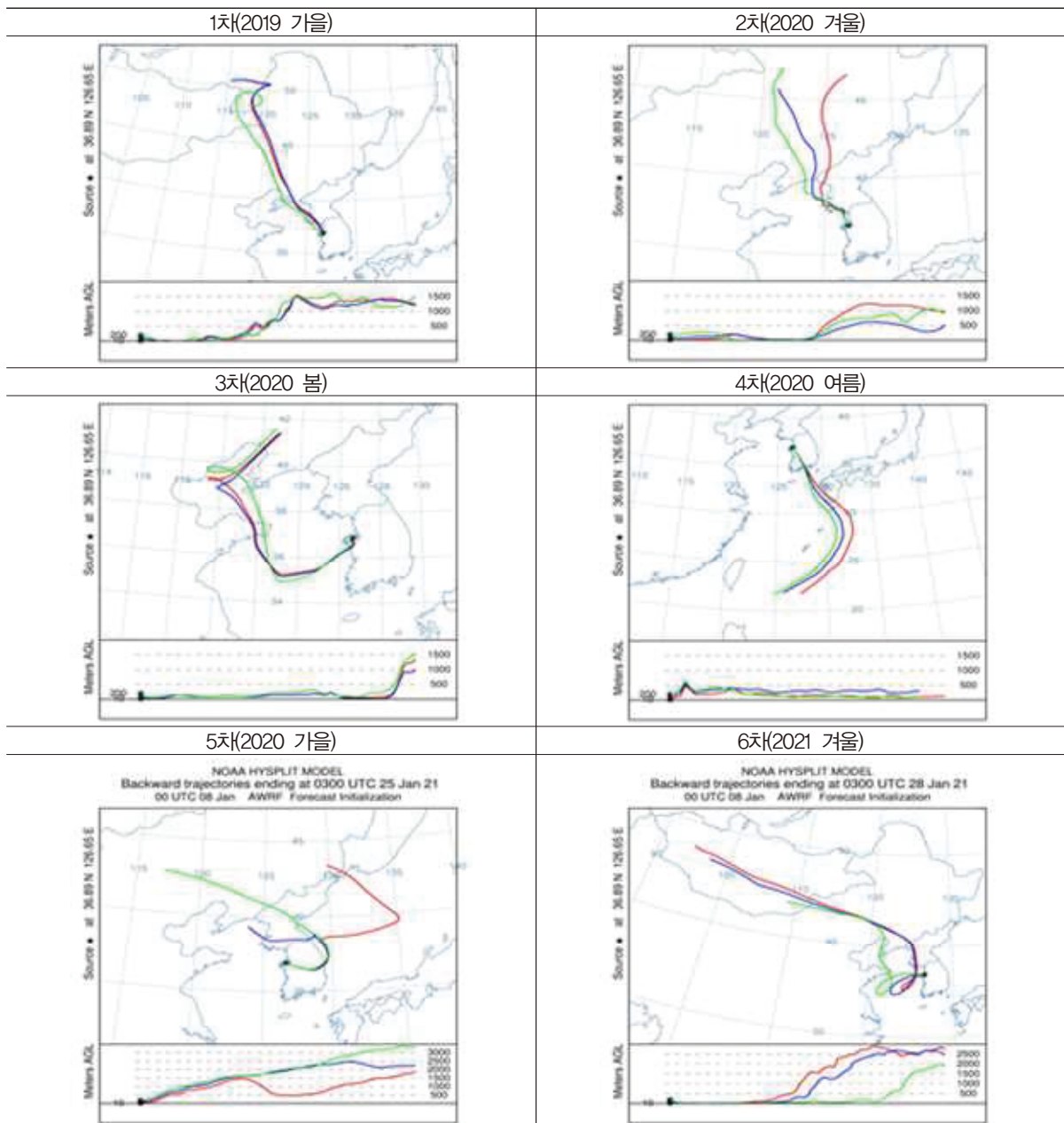
지역	모델시작	장거리	중거리	단거리	특징
보령	19.11.04.	NW	NW	NW	급격한 고도변화
	20.01.15.	NW	NW	N	완만한 고도변화
	20.04.22.	NE	N	E	경로에 따른 고도변화폭 큼
	20.08.18.	SE	SW	SW	저고도 이동
	20.11.11.	NW	N→S	E→NE	중거리 고도상승 후 완만한 이동
	21.01.13.	NW	SW	S	중거리 이후 저고도 이동
당진	19.10.29.	W	NW	N	중거리 이후 급격한 고도변화
	20.01.09.	NE(NW)	N	N	중거리 이후 저고도 유지
	20.04.13.	NE	NW	W	저고도 이동
	20.08.24.	SW	S	SE	저고도 이동
	20.11.23.	NW	E	SE	완만한 고도변화
	21.01.25.	NW	N	E→W	중거리 이후 저고도 유지
서천	19.11.06.	NW	N	N	완만한 고도변화
	20.01.19.	W	NW	NW	중거리 고도 유지
	20.04.27.	N	W	SW	중거리 이후 저고도 유지
	20.07.15.	—	NW	NE	저고도 완만한 고도 변화
	20.11.09.	N	W	SW	완만한 고도변화
	21.01.11.	—	NW	NE	저고도 완만한 고도 변화
태안	19.10.30.	NW	NW	N	완만한 고도변화
	20.01.13.	NW	N	NW	중거리 고도상승 후 완만한 고도변화
	20.04.27.	NW	SW	SW	중거리 까지 급격한 고도변화
	20.08.31.	E	SE	SE	단거리 고도 유지 후 급격한 변화
	20.11.24.	NW	NW	N	완만한 고도변화
	21.01.19.	NW	N	E→S	고도변화 진동

- 지역별 1차부터 6차까지 트라젝토리 모델을 운영한 결과는 그림과 같으며, 차수별 장거리·중거리·단거리의 이동경로 확인과 거리별 경로별 고도변화를 확인할 수 있음.
 - － 보령시는 북서풍의 영향을 주로 받고 있으며, 여름(4차)와 2021년 겨울(6차)의 경우 남서풍의 영향을 받고 있음.
 - － 6차의 경우 저고도로 이동이 확인되어 전남, 전북지역의 대기오염배출이 보령지역 대기오염농도에 영향을 미칠 수 있음을 확인함.



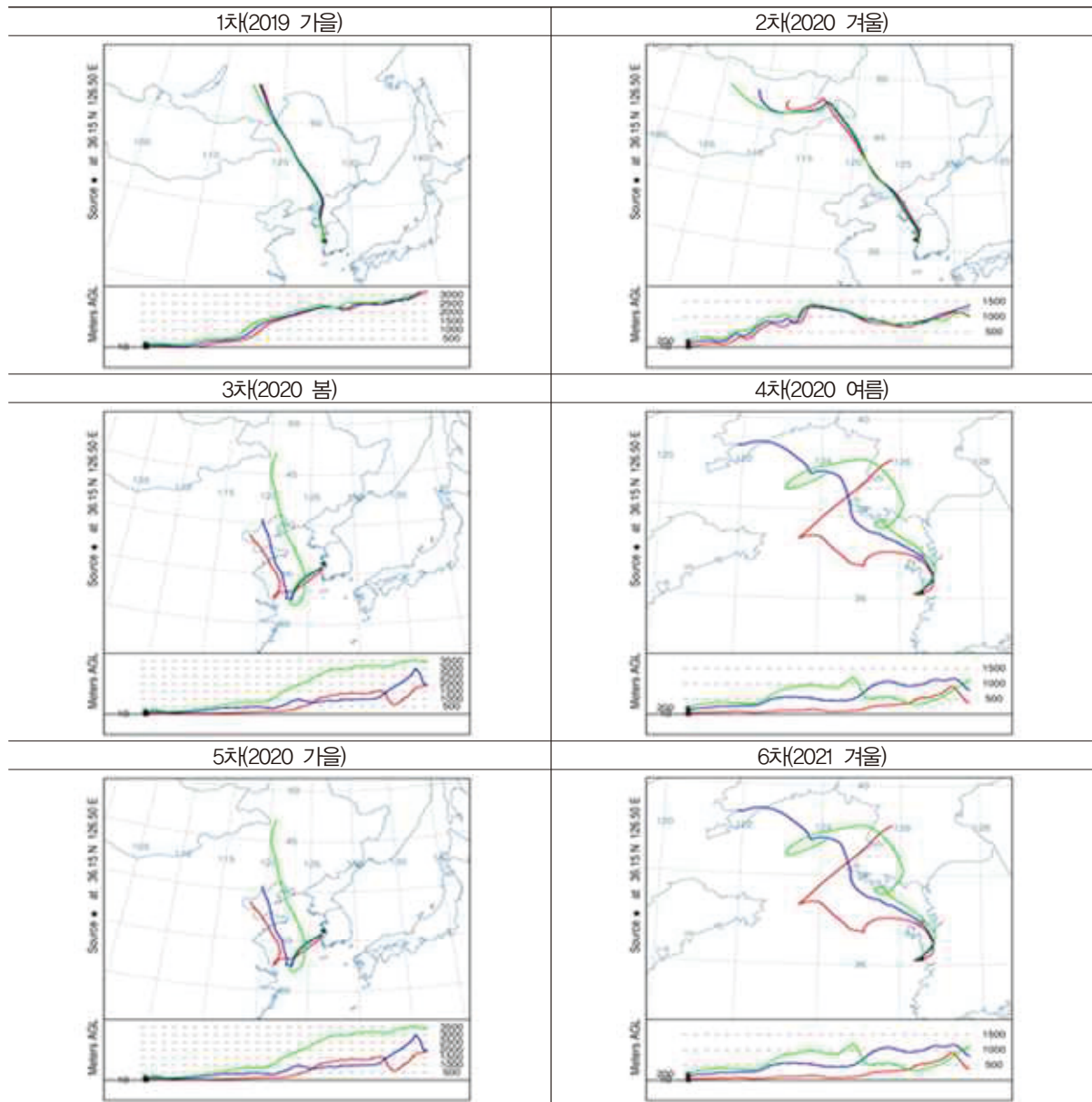
[그림 6.8] 보령 측정지점 트라젝토리 모델 결과

- 당진시는 북서풍의 영향을 주로 받으며, 여름(4차)은 남풍의 영향을 받음.
- 5차(2020 봄)의 경우 저고도로 이동하고 있어 해양의 영향이 있는 PM_{2.5}, 오존 농도에 영향을 미칠 수 있고, 4차(2021 겨울)은 가까운 연안지역의 영향이 클 것으로 확인됨.
- 1차(2019 가을), 2차(2020 겨울)은 근거리에서 저고도 이동이 확인되어 수도권권의 영향이 클 것으로 예상됨.



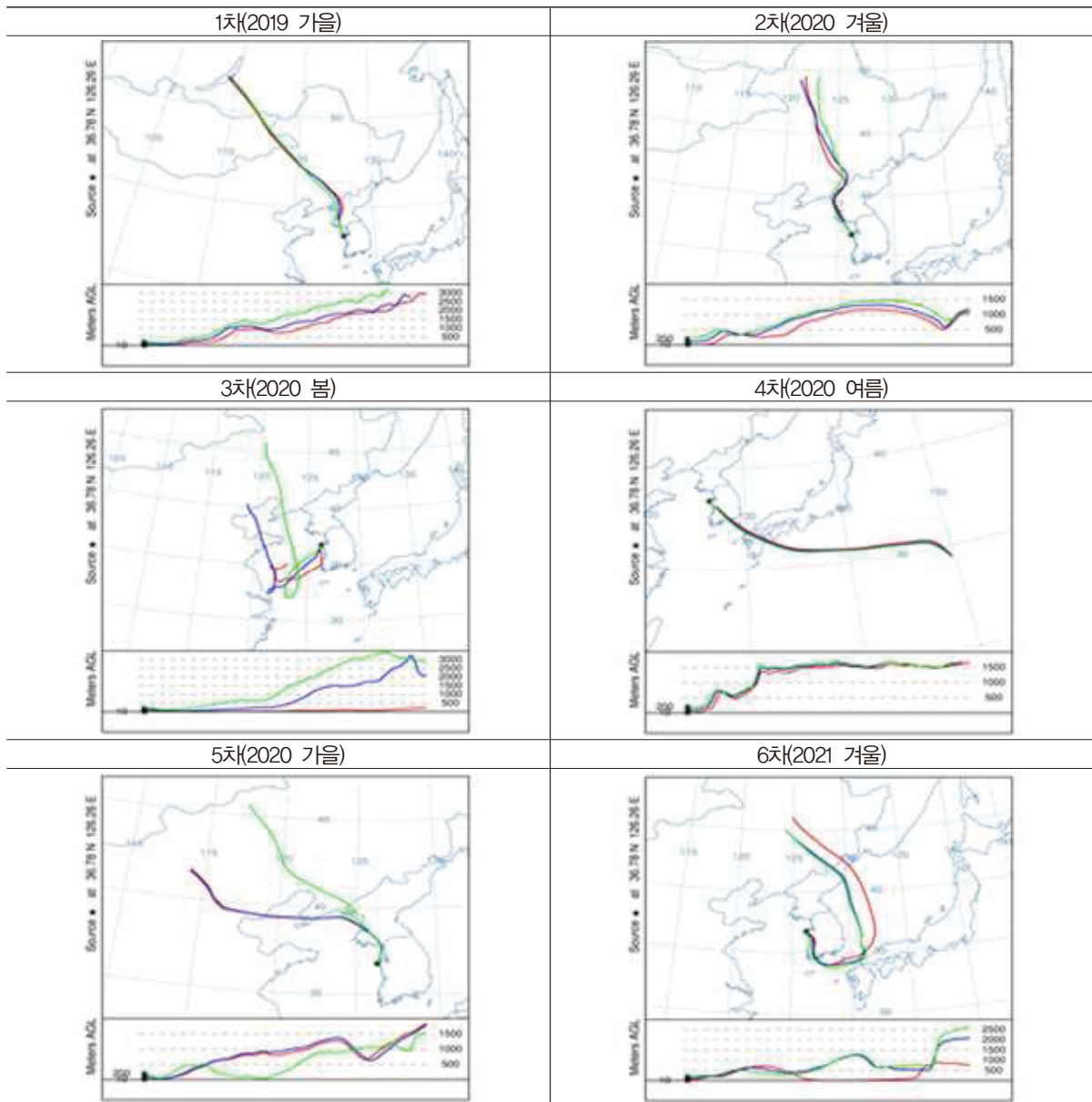
[그림 6.9] 당진 측정지점 트라젝토리 모델 결과

- 서천군은 모두 북서풍의 영향을 받고 있으며, 근거리에서 저고도 이동이 확인되어 인접지역 대기오염 배출에 영향을 받을 것으로 판단됨.
- 3차(2020 봄), 5차(2020 가을) 연안지역의 영향을, 1차(2019 가을)은 수도권, 2차(2020 여름)는 충남북부지역 영향이 클것으로 예상됨.



[그림 6.10] 서천 측정지점 트라젝토리 모델 결과

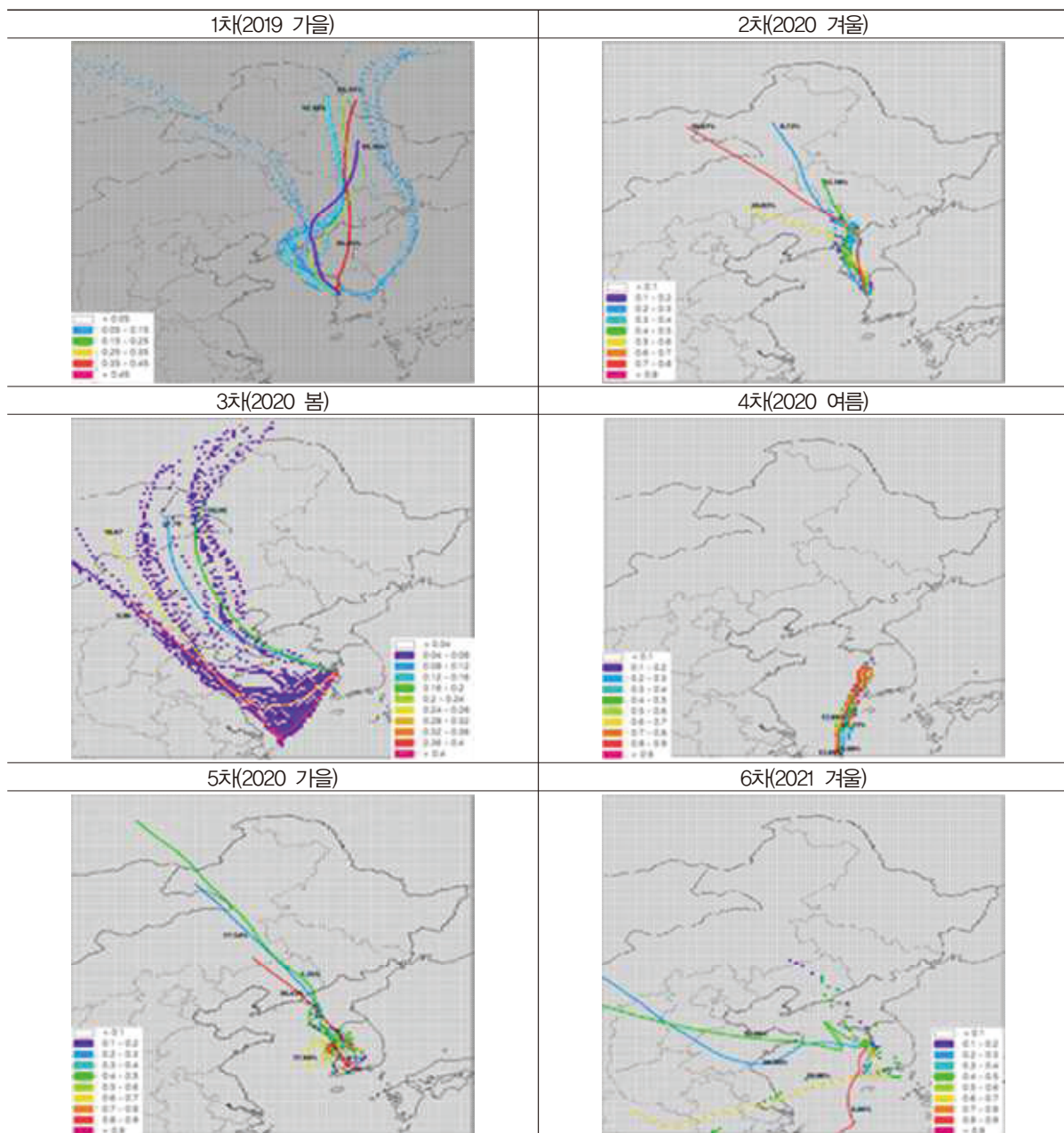
- 태안군은 주로 북서풍의 영향을 받고 있으나, 4차(2020 여름), 6차(2021 겨울)는 남서풍의 영향도 일부 받고 있음.
- 1차(2019 가을)는 충남북부, 3차(2020 봄)는 연안지역 영향이 예상되며, 그 외 기간은 고위도 이동을 보이고 있어 원거리 이동오염원 영향이 예상됨.



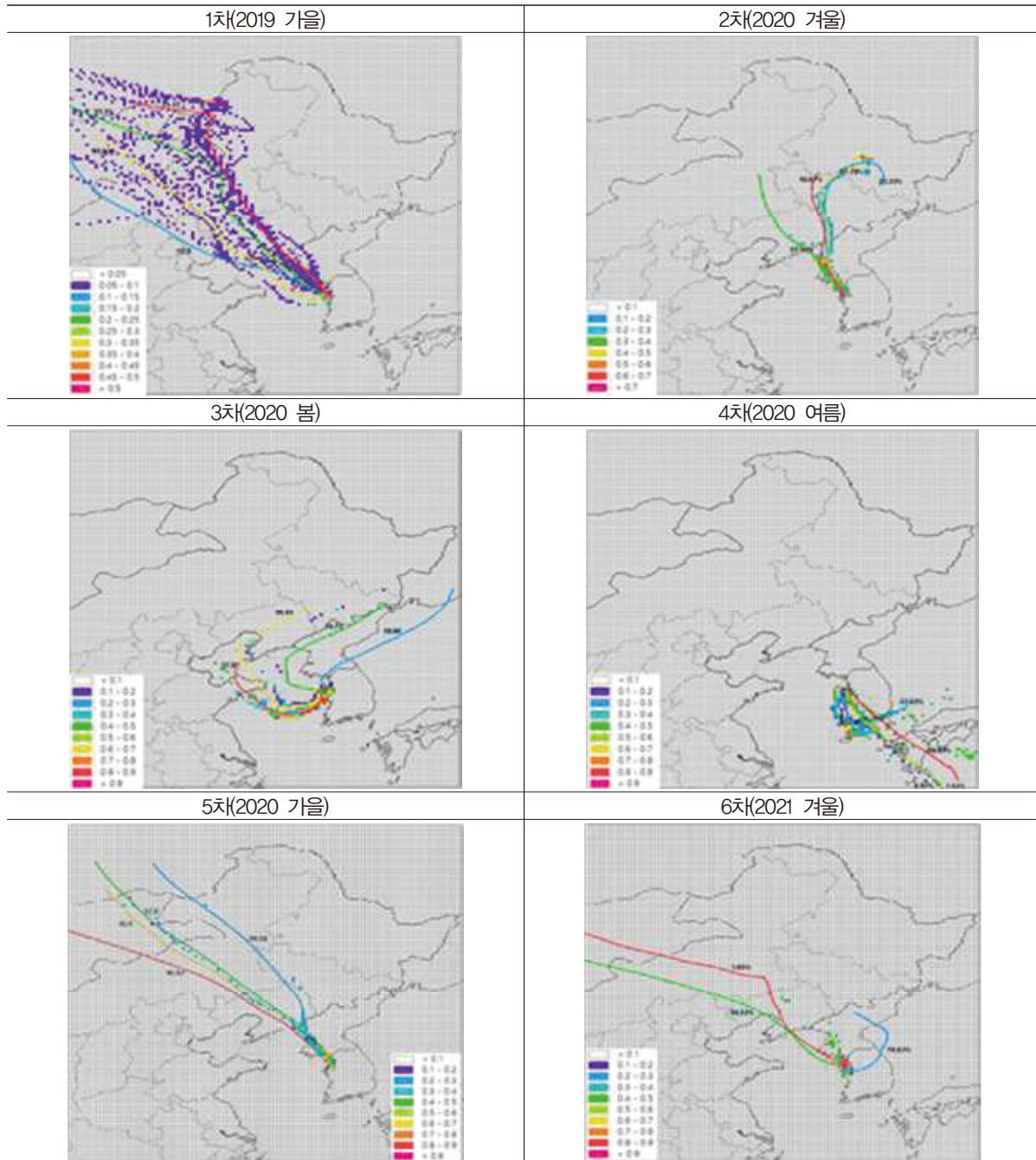
[그림 6.11] 태안 측정지점 트라젝토리 모델 결과

4.2. PSCF 모델을 적용한 외부 기여율

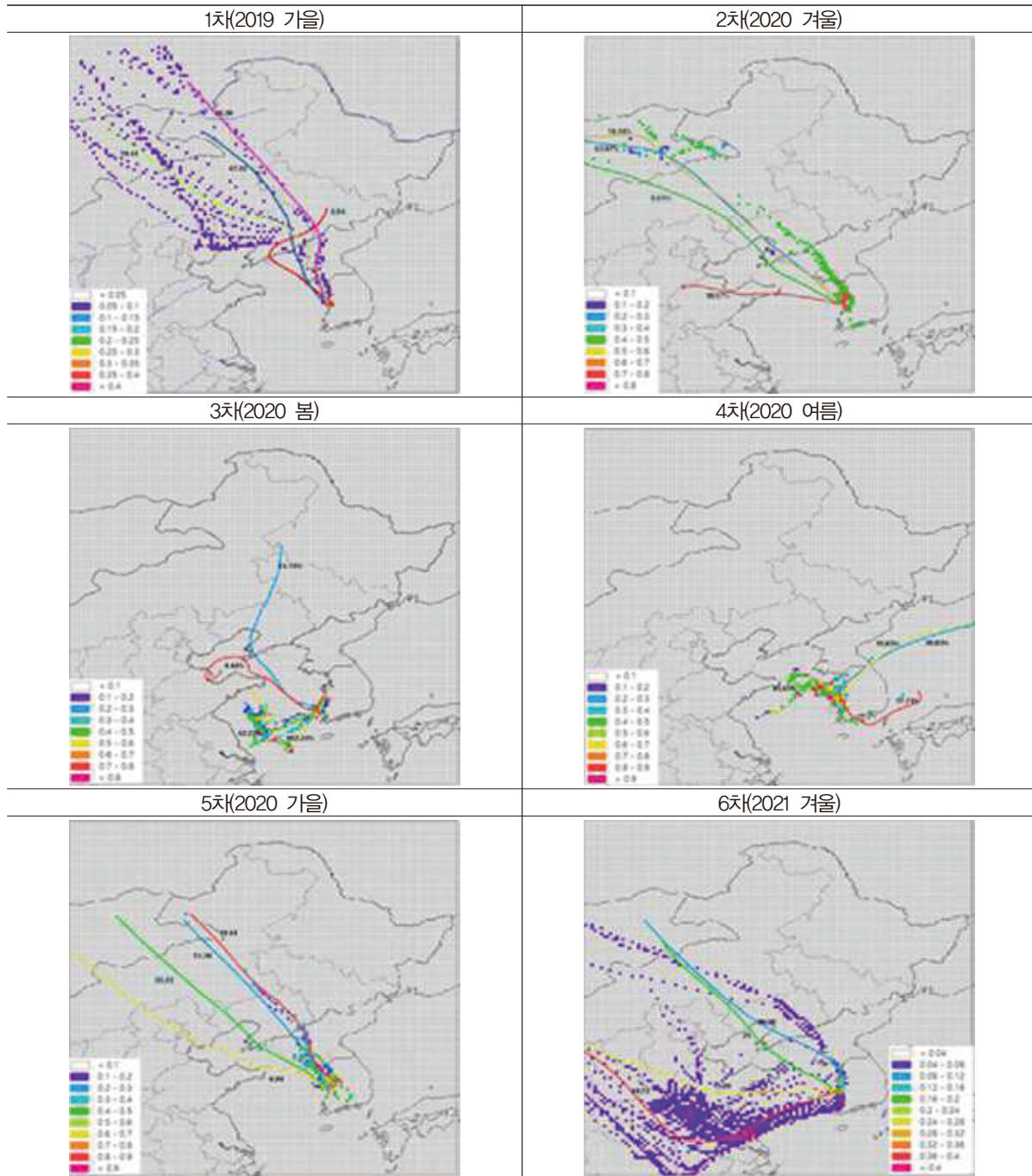
- 분석에 활용한 지역별 1차부터 6차까지 PSCF 모델결과 그림 6.28과 같이 차수별 경로별 측정지점에 영향을 주는 확률을 확인할 수 있으며, 표 6.19에 모델결과 시기별, 구역별 대표지역과 기여율을 나타냄.



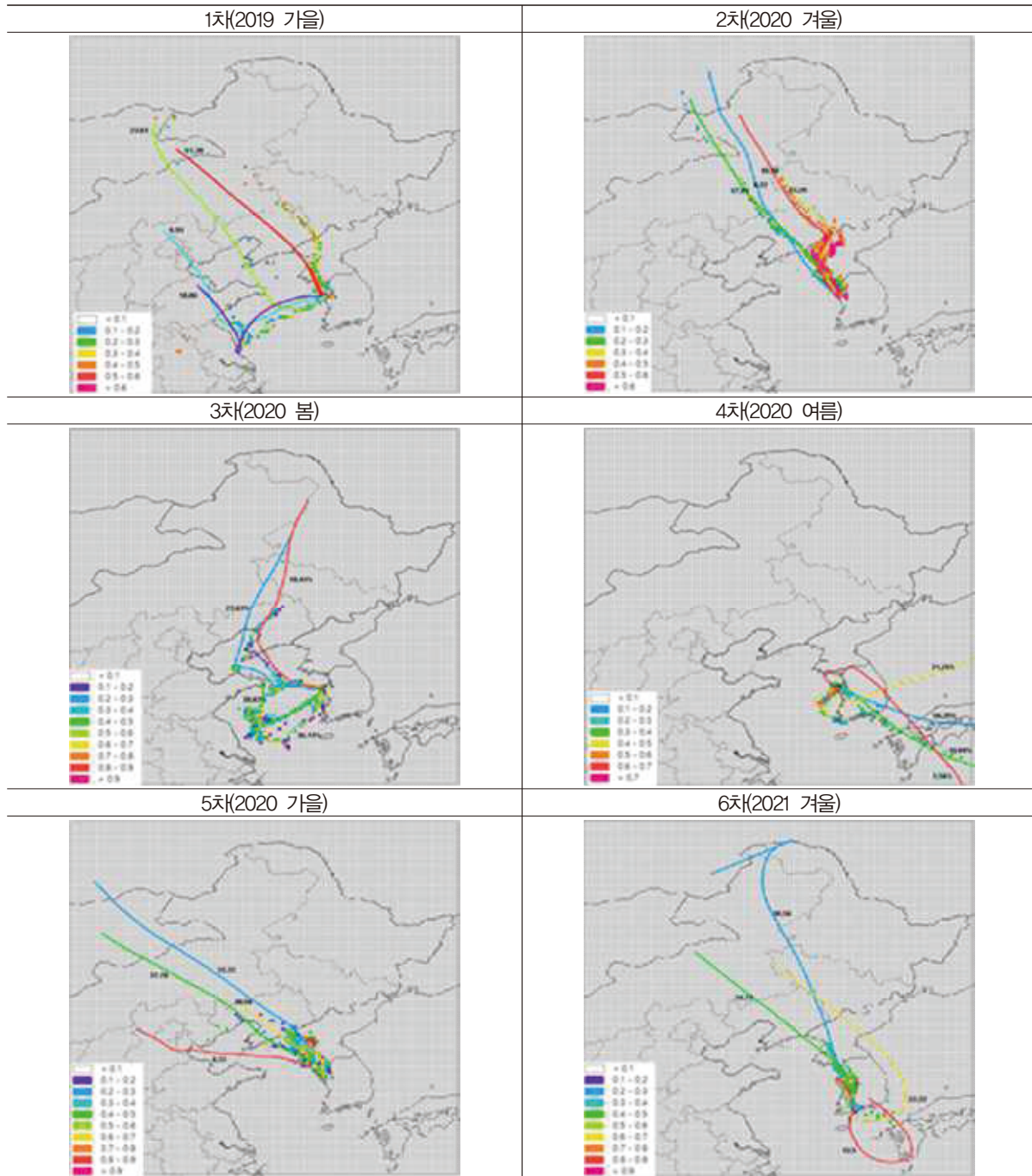
[그림 6.12] 보령 측정지점 PSCF 모델 결과



[그림 6.13] 당진 측정지점 PSCF 모델 결과



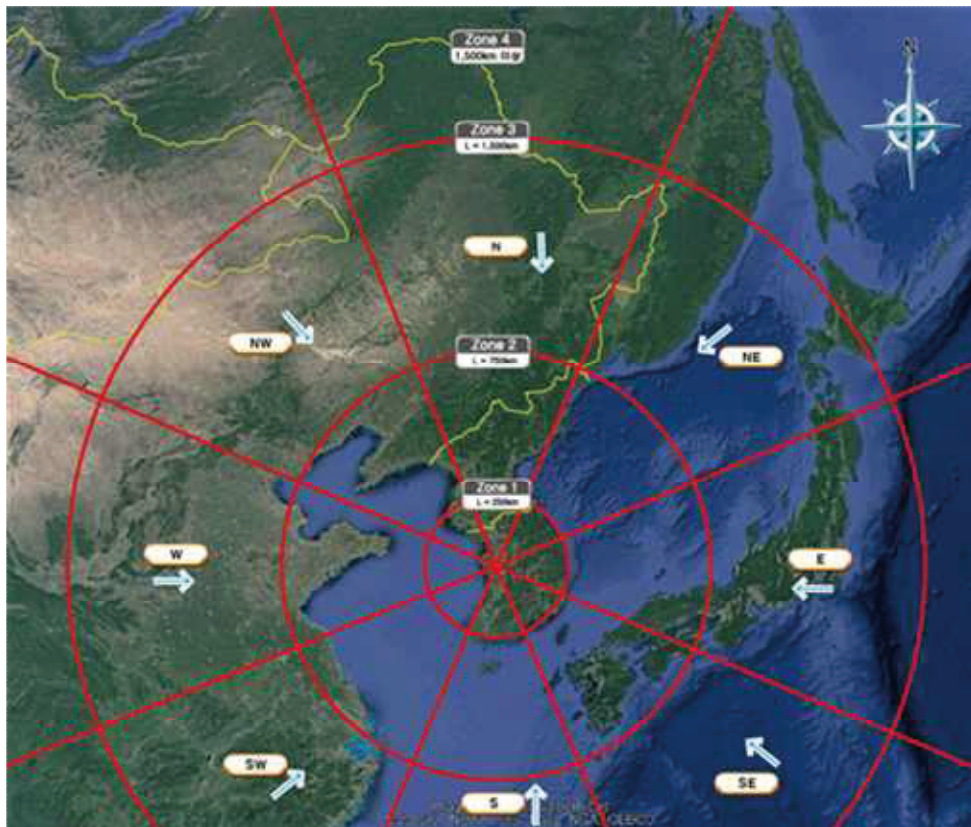
[그림 6.14] 서천 측정지점 PSCF 모델 결과



[그림 6.15] 태안 측정지점 PSCF 모델 결과

- 충청남도 지역을 중심으로 모델 결과별 외부 기여율(내부 기여도 제외)을 살펴보기 위해 그림과 같이 거리별, 방향별 구역을 설정하고 구역별 기여율을 분석함.
- 주 영향 방향은 북서쪽으로 여름철(남쪽 방향)을 제외한 모든 계절에 영향이 큰 것으로

나타났고, 영향거리는 250 km 이내 1.6%, 250~750 km 20.0%, 750~1,500 km서 45.4%, 1,500 km 이상에서 33.1%로 나타나, 750~1500 km의 외부 기여율이 약 78% 인 것으로 확인됨.



[그림 6.16] 외부 기여율 분석을 위한 구역 설정

- 기여율 분석을 위해 거리별(250km 750km, 1,500km, 1,500km 이상) 방향별(8개) 구역을 설정하였고, 모든 기간에 걸친 기여율을 지역별로 분석한 결과 몽골지역이 26.1%로 기여율이 가장 높고, 내몽골 16.4%, 헤이룽장 14.0% 등이 주요 기여지역이며, 풍향별 영향은 서풍계열이 63.3%(북서풍 44.9%)에 이르는 것으로 분석됨.
- 봄철에는 서쪽 산동성과 장쑤성의 영향이 두드러졌는데, 이는 시베이라 기단에서 떨어져 나온 변질된 이동성 고기압의 영향에 의한 것으로 판단되며, 일부 북동쪽의 영향도 나타남.
- 여름철은 적도 기단과 북태평양 기단의 영향으로 동쪽과 남쪽의 영향이 주로 나타나며, 서쪽의 영향도 일부 나타남.

- 가을철은 북서쪽 몽골의 영향이 큰 것으로 나타나며, 북쪽과 일부 서쪽의 영향도 나타나지만 주로 북서쪽의 영향이 가장 크게 나타남.
- 겨울철은 시베리아 기단의 영향으로 가을철과 같이 북쪽과 북서쪽의 영향이 큰 것으로 나타나며, 가을철과 다르게 서쪽 허난성 지역의 영향이 비교적 크게 나타남.

[표 6.17] 충남지역 외부 기여율 모델 결과

계절 구역	1차 '19년 가을	2차 '20년 겨울	3차 '20년 봄	4차 '20년 여름	5차 '20년 가을	6차 '21년 겨울	대표지역	전기간 기여율 (%)
N1	1.7						서울,경기	0.3
N2	3.8					19.9	지린	4.0
N3	21.2	38.5	18.4			5.6	헤이룽장	14.0
N4		4.8					다싱안링	0.8
NE1							충북,강원	
NE2							동해	
NE3			13.2	9.1			블라디보스토크	3.7
NE4							-	
NW1							인천, 서해	
NW2	14.6						랴오닝	2.4
NW3	54.2	13.2			22.2	8.7	내몽골	16.4
NW4		38.8	23.6		68.4	25.6	몽골	26.1
E1							경북	0.0
E2				22.9			시마네	3.8
E3				14.1			히로시마	2.4
E4							태평양	
W1	4.5						서해	0.8
W2			15.3	11.5	9.4		산둥성	6.0
W3		4.7	7.0				산시성	2.0
W4			1.4			35.7	닝샤후이족	6.2
S1							전북,전남	0.0
S2						1.5	남해	0.3
S3				25.0			동중국해	4.2
S4							-	
SE1						3.1	경남	0.5
SE2							후쿠오카	
SE3				17.5			미야자키	2.9
SE4							-	
SW1							서남해	
SW2			21.1				장쑤성	3.5
SW3							-	
SW4							-	

5. 대기모델을 활용한 발전소 기여도 평가

5.1. 기상모델 검증 및 배출량 자료 입력

- 국내 기상 특성 및 대기질 예측을 위한 기상모델링은 우선 모델링 대상지역의 기상대 및 기상자동관측시스템(AWS) 자료와 우리나라 고층기상 관측 자료를 이용하여 기상 모델인 WRF를 통해 해상도 3km×3km 격자의 기상장을 생성함.
- 기상모델 WRF 결과와 주변 주요 기상대 관측결과를 이용하여 기상모델 검증을 실시하였으며 기상모델 검증기준은 아래와 같음.

[표 6.18] 기상모델 검증 기준

항목	통계치	기준	비고
기온(K)	IOA	≥ 0.8	
	Bias	$\leq \pm 0.5K$	
	Gross Error	$\leq 2K$	Mean Absolute Gross Error
풍속(m/s)	IOA	≥ 0.6	
	Bias	$\leq \pm 0.5m/s$	
	RMSE	$\leq 2m/s$	
풍향(Deg)	Bias	$\leq \pm 10 \text{ deg}$	
	Gross Error	$\leq 30 \text{ deg}$	

- 기온 상관계수(r)는 인천기상대 0.9847, 서산기상대 0.9760으로 나타나 유의성이 높은 것으로 나타남.
 - 데이터의 편향된 정도(Bias)는 인천기상대 0.38K, 서산기상대 0.12K로 기준치인 $\pm 0.5K$ 를 만족하는 것으로 나타났으며, 절대평균 총 오차(Gross Error)의 경우 인천기상대 1.32K, 서산기상대 1.68K로 기준치인 2.0K를 모두 만족하는 것으로 나타남.
- 풍속 상관계수(r)는 인천기상대 0.7049, 서산기상대 0.6792로 나타나 유의성이 있는 것으로 나타남.

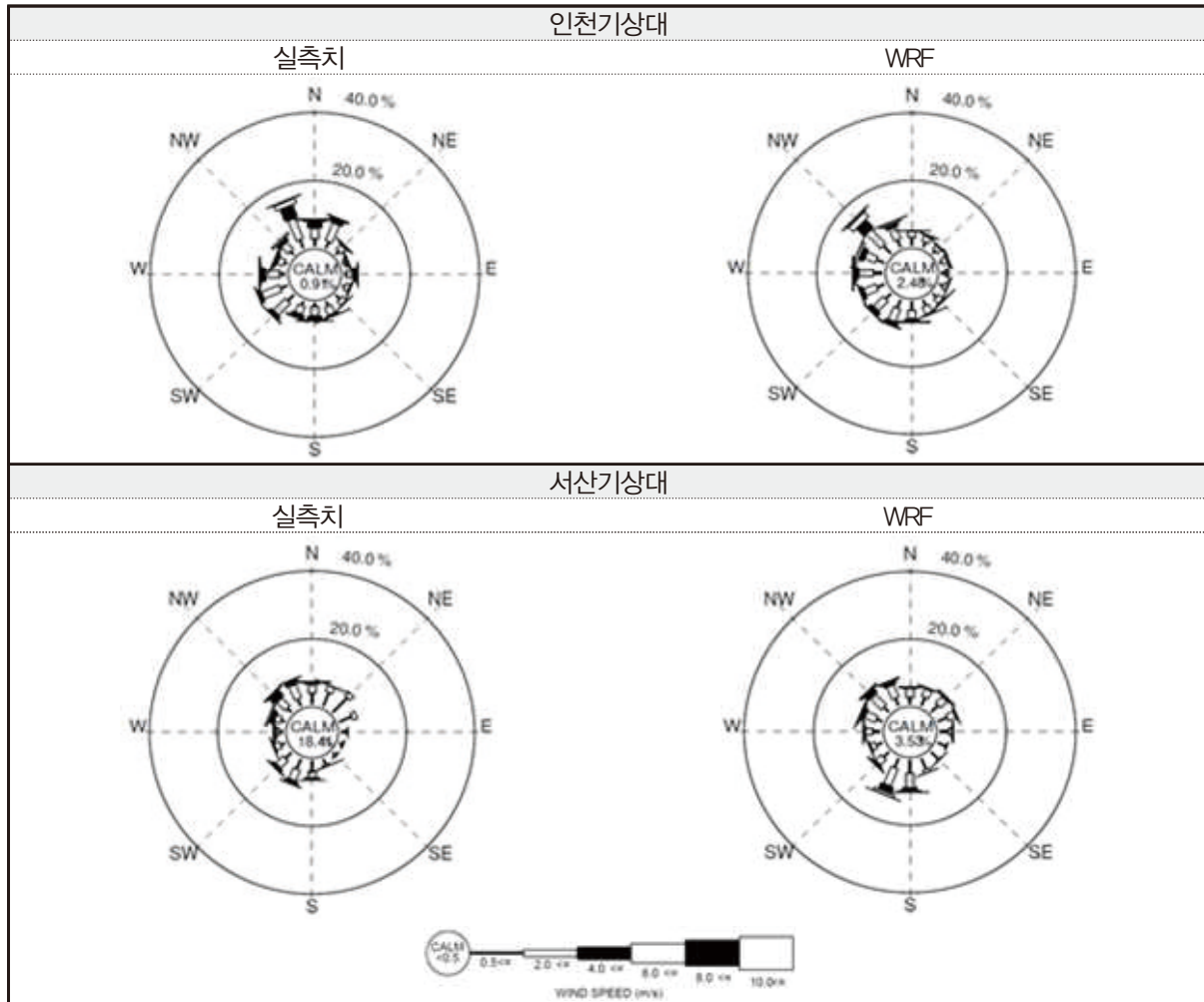
- 풍속 데이터의 편향된 정도(Bias)는 인천기상대 -0.25%, 서산기상대 0.56%로 기준치인 $\pm 0.5\%$ 를 서산기상대는 초과하나 인천기상대는 만족하는 것으로 확인됨.
- 평균제곱근오차(RMSE)는 인천기상대 0.97%, 서산기상대 1.09%로 기준치인 2.0 %를 모든 기상대가 만족하는 것으로 나타남.
- 풍향 데이터의 편향된 정도(Bias)는 인천기상대 -20.30deg, 서산기상대 -15.45deg, 광양시기상대 2.70deg로 기준치인 $\pm 10\text{deg}$ 를 초과하는 것으로 나타났으며, 절대평균 총 오차(Gross Error)는 인천기상대 35.96deg, 서산기상대 54.38deg,로 기준치인 30deg를 모두 초과하는 것으로 확인됨.

[표 6.19] 기상 모델링 검증 결과

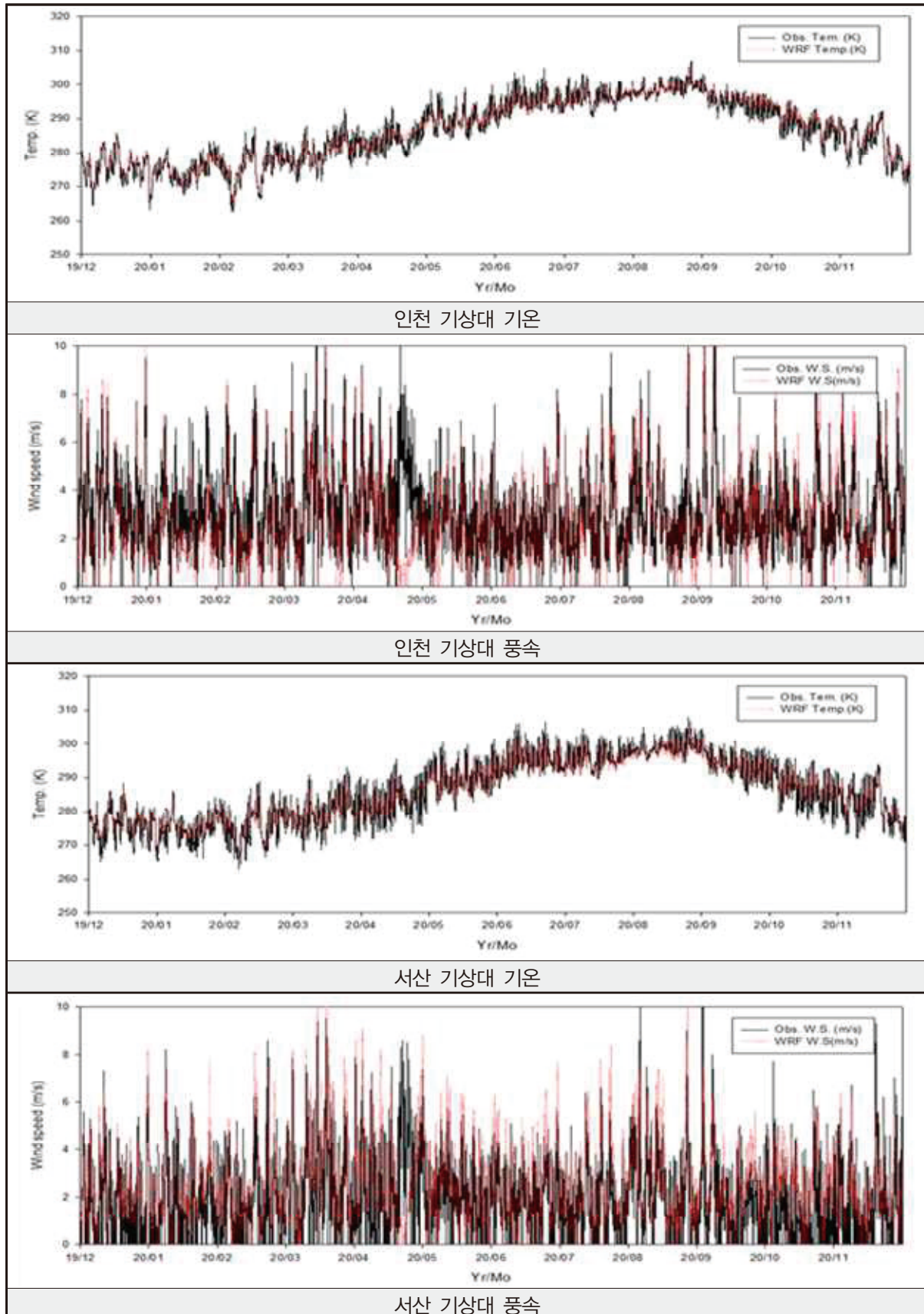
구 분	기 온			풍 속			풍 향	
	상관계수 (r)	Bias (K)	Gross Error(K)	상관계수 (r)	Bias (m/s)	RMSE (m/s)	Bias (deg)	Gross Error(deg)
인천기상대	0.9847	0.38	1.32	0.7049	-0.25	0.97	-20.30	35.96
서산기상대	0.9760	0.12	1.68	0.6792	0.56	1.09	-15.45	54.38
기준	-	$\leq \pm 0.5$	≤ 2	-	$\leq \pm 0.5$	≤ 2	$\leq \pm 10$	≤ 30



[그림 6.17] 대상 발전소 및 기상대 위치



[그림 6.18] 관측 및 WRF 모델결과의 바람장미도 비교

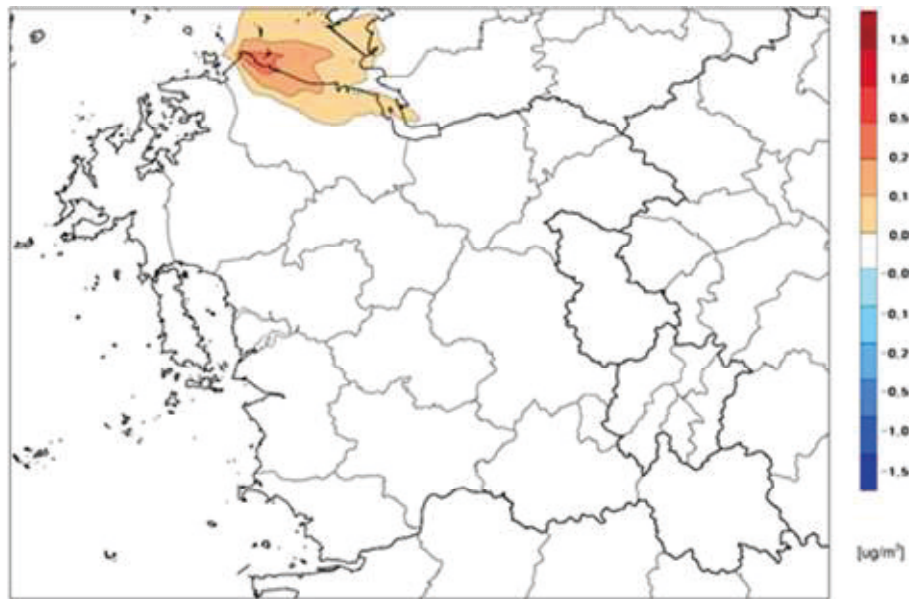


[그림 6.19] 관측치 및 WRF 결과의 시계열 분석

- 격자 $3\text{km} \times 3\text{km}$ 해상도에 SMOKE 모델을 이용하여 CAPSS 배출량을 중부권 지역에 분배하여 입력하였으며, 입력결과 중부권의 경우 NO_x , $\text{PM}_{2.5}$ 같은 인위적 오염물질의 배출량 집중지역과 주요 도로를 따라 배출량이 잘 입력된 것을 확인함(그림 6.26참고).

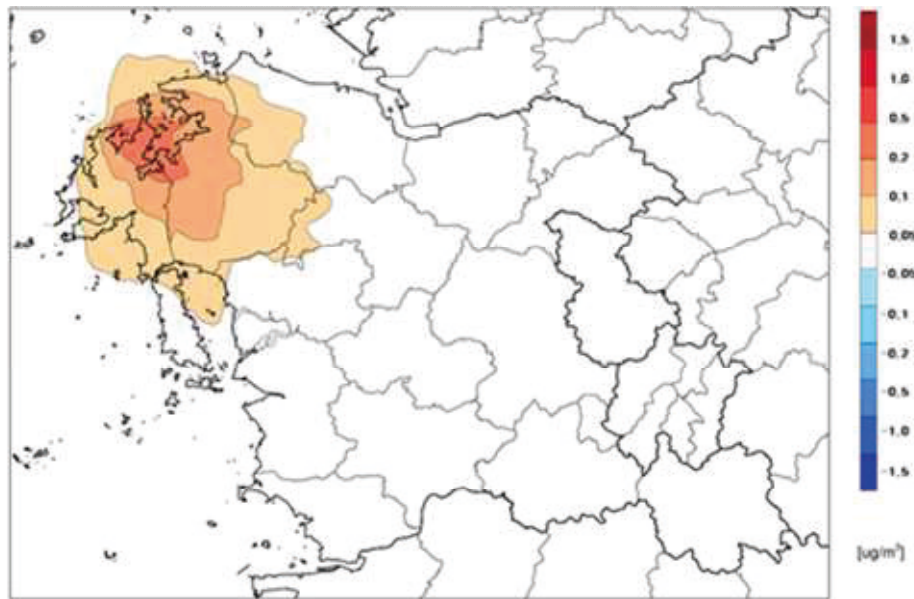
5.2. 발전소 기원 $\text{PM}_{2.5}$ 기여도 평가 결과

- 구축된 모델링 시스템을 활용하여 2020년 태안, 당진, 보령의 석탄화력발전소(신서천 미가동)를 대상으로 석탄화발전소 기여도 평가를 실시함.
 - 충남지역 $\text{PM}_{2.5}$ 연간평균농도는 $23.242\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 모의되었으며, 이는 발전소 $\text{PM}_{2.5}$ 배출량(928톤, 충남배출량의 6.06%)과 SO_x (15,069톤, 24.18%), NO_x (15,237톤, 15.72%), VOCs(1,277톤, 1.71%), NH_3 (20톤, 0.32%) 등 2차생성에 의한 배출량 기여도를 포함하고 있음.
- 당진화력발전소는 발전소가 위치한 충남지역의 연간평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 $0.043\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($23.242\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비) 증가하는데 기여했으며, 발전소 중 가장 낮은 기여도를 보였음.
 - 태백산맥 동쪽을 제외한 중부권 전역에 걸쳐 영향을 미치는 것으로 나타났으나 기여도는 약 $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 확인됨.
 - 충남도내 화력발전소 중 당진화력발전소의 기여도는 배출량은 높으나 발전소 주변지역의 높은 배출량으로 인한 기저효과와 충청남도 주풍인 북서풍으로 인한 확산의 영향이 작용한 것으로 판단됨.

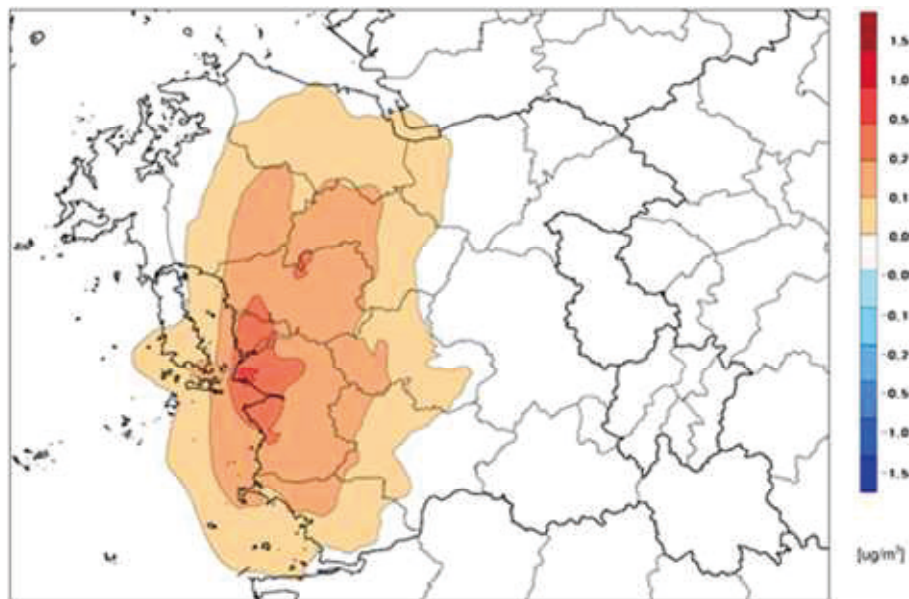


[그림 6.20] 당진 화력발전소 연간 PM_{2.5} 기여농도

- 태안화력발전소는 발전소가 위치한 충남지역의 연간평균 PM_{2.5} 농도를 $0.074\mu\text{g}/\text{m}^3$ ($23.242\mu\text{g}/\text{m}^3$ 대비) 증가하는데 기여하는 것으로 분석됨.
 - 충남 전역에 걸쳐 고농도 기여도를 보였으며, 특히 당진, 서산, 태안에 약 $0.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 기여도를 보임
 - 태안화력발전소는 가장 높은 자체배출량과 차령산맥이 확산의 제약조건으로 작용하여 농도가 상승하는 것으로 판단됨.

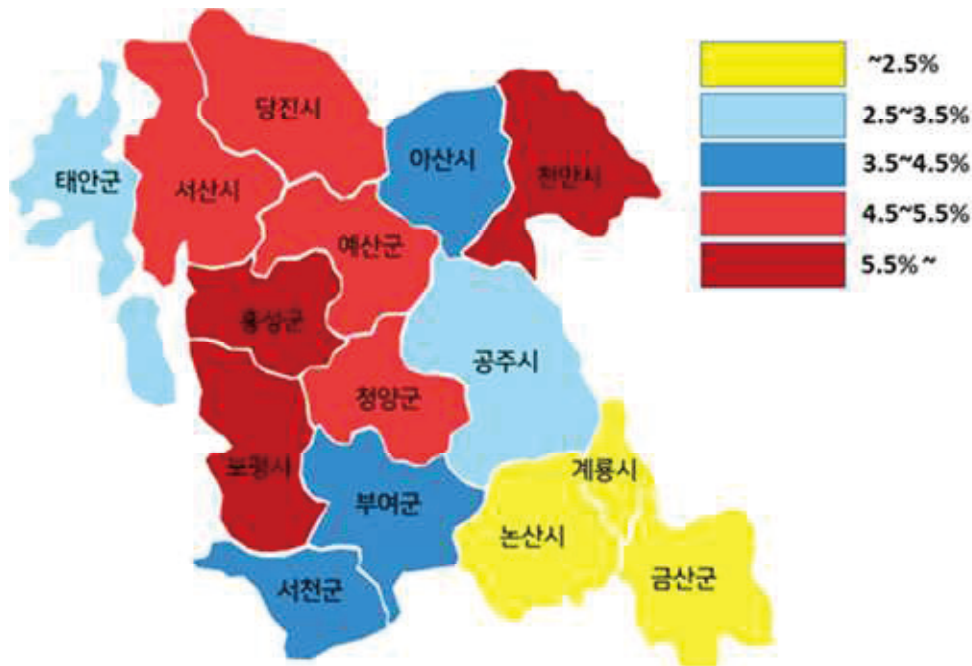
[그림 6.21] 태안 화력발전소 연간 $PM_{2.5}$ 기여농도

- 보령화력발전소는 발전소가 위치한 충남지역의 연간평균 $PM_{2.5}$ 농도를 $0.112\mu g/m^3$ ($23,242\mu g/m^3$ 대비) 증가하는데 기여하여 $PM_{2.5}$ 농도 증가에 가장 크게 기여하는 것으로 확인되었음.
- 발전소 위치가 충남지역 중간이라는 지리적 상화로 충남 전역에 걸쳐 $PM_{2.5}$ 농도에 영향을 미치며, 보령화력 총 배출량은 당진화력과 태안화력보다 작지만 국지적으로 높은 기여도를 나타내고 있음
- 고농도 사례 발생시 보령-안면도 주변에 자주 발생하는 대기 정체도 기여도를 증가시키는 원인으로 작용하며, 태안과 마찬가지로 차령산맥의 영향도 작용한 것으로 판단됨.



[그림 6.22] 보령 화력발전소 연간 $PM_{2.5}$ 기여농도

- 발전소 배출량을 제외한 모의농도에서 당진, 태안, 보령 화력발전소 전체에서 배출된 대기오염물질이 시군별 $PM_{2.5}$ 에 영향을 미치는 기여농도에 따라 연평균 기저농도대비 기여도(기여율)를 분석함.
 - 충청도내 시군별 기여율은 홍성군이 6.3%로 가장 많은 영향을 받으며 금산군이 1.6%로 가장 영향이 낮은 것으로 분석되었으며, 화력발전소가 위치한 보령, 당진, 태안의 기여도는 각각 5.2%, 4.8%, 3.4%로 확인됨
 - 홍성군이 화력발전소의 영향을 가장 많이 받게 된 것은 지역 주풍인 서풍계열(북서풍, 남서풍) 풍향시 발전소에서 배출된 오염물질이 홍성 방향으로 유입되고 앞서 언급한 바와 같이 유입된 오염물질이 차령산맥을 넘지 못하고 정체되는 현상이 주요한 원인으로 판단됨.
- 전반적으로 발전소 동쪽에 위치한 차령산맥을 기준으로 좌측에 위치한 지역은 대기정체가 빈번히 일어나는 지역으로 기여도가 높게 나타났으며, 차량 산맥 하부에 위치한 금산, 논산, 계룡의 경우 기여도가 상대적으로 낮게 확인됨.

[그림 6.23] 발전소 배출에 따른 지역별 PM_{2.5} 영향 분석 결과

- 4차년도에는 기개발된 대기모델을 기여도 평가를 위해 현행화 하고 모델 운용능력 확인을 위한 초기결과로 충청도내 발전소 기인 대기오염물질의 시군별 PM_{2.5} 기여도 분석에 적용하였으며, 5차년도에 PM₁₀, SO_x, NO_x 등 이외 대기오염물질로 적용을 확대하고 기여도 분석을 위한 추가 적용성을 검토하여 최종 기여농도를 제시할 예정임.
- 각 발전소의 가동률을 반영 여부를 반영하여 화력발전소 기인 배출량의 기여도 대표성을 확보할 필요가 있음.
- 특히, 암모니아가 2차 PM_{2.5} 생성의 중요한 인자로 연구되고 있으나 배출량 산정방법의 정확도가 낮아¹⁹⁾, PM_{2.5}의 경우 발전소 SCR²⁰⁾ 운영에 따른 암모니아 배출량의 적용성을 검토하여 기여도를 재확인할 필요가 있음.

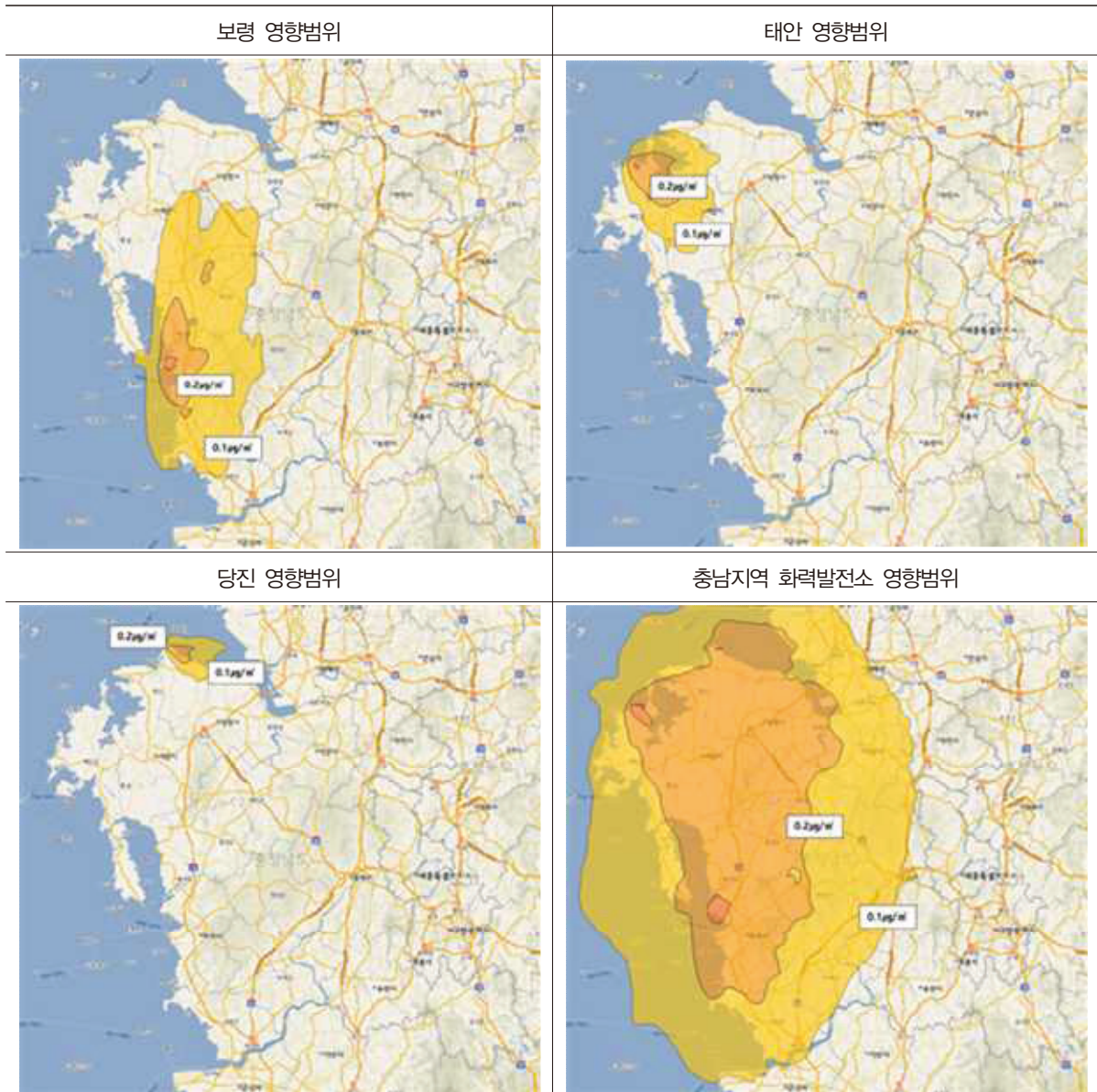
19) 대기모델에 적용한 배출량(CAPSS)은 SCR에서 발생하는 암모니아 배출량을 실제 측정한 것이 아닌 연료사용량을 통해 산정한 값으로 각 발전소의 SCR로 인한 암모니아 배출량의 신뢰도가 낮아 개선방법이 필요하다.

20) 선택적 촉매환원법(SCR; Selective Catalytic Reduction) : 배기가스 중 질소산화물(NO_x)을 처리하기 위해 대부분의 화력발전소에서는 건식법 중 하나인 선택적촉매환원법(SCR)을 적용하여 배기가스를 처리하고 있다. SCR은 NO_x가 함유된 배기가스에 암모니아(NH₃) 등의 환원제를 분사하여 낮은 온도 영역에서 질소(N₂)와 수분(H₂O)으로 환원시키는 공정이다.(발전소 복합 SCR 탈질 적용기술, 지식경제부, 2010). SCR은 설치비와 운전비가 저렴하며, 운전과 유지보수가 용이하고 높은 NO_x 제거효율을 확보할 수 있어 NO_x 제거공정 대부분에 적용되고 있으나, 처리과정에서 환원제로 활용되는 NH₃의 미반응 분이 그대로 대기중으로 배출되어 2차 미세먼지가 발생할 수 있는 단점이 있다(고승재 등, 2013).

- 또한, 5차년도는 필요시 신서천화력발전소 가동 전후 영향 비교분석, 노후화력가동 중단 효과분석, 고농도 미세먼지 발생시 발전소 상한제약 효과분석 등 대기모델의 정책활용성을 점검할 계획임.

5.3. 발전소 기인 대기오염물질 영향범위 산정(PM_{2.5})

- 본 연구에서는 PM_{2.5}의 영향범위를 산정하기 위한 기준으로 보편적으로 사용되는 미국 환경보호청(United States Environmental Protection Agency, EPA)에서 제시한 SIL(Significant Impact Levels)을 기준으로 발전소 기인 대기오염물질의 PM_{2.5} 영향범위를 산정함.
- EPA(2018)에서는 PM_{2.5}의 SIL을 연평균 기여농도 $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24시간 평균 $1.2\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 제시하고 있음.
- 본 연구 EPA의 SIL을 기준(연평균 기여농도 $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 기준으로 각 발전소별 PM_{2.5} 기여도 산정과 충남지역 화력발전소 기인 대기오염물질에 의한 PM_{2.5} 영향범위를 설정함.
- 영향 범위를 PM_{2.5} SIL $0.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상을 적용하면 보령의 영향범위가 최대 17.6km로 가장 넓게 나타났으며 태안 16.5km, 당진 7.1km 순으로 나타남.
- 충남도내 화력발전소의 복합적인 영향은 충남 서쪽지역 전역이 영향범위에 포함되며 내륙기준 동서로 최대 64km, 남북으로 103km의 지역에 영향을 미칠 것으로 분석됨.
- 충남지역 화력발전소 기인 대기오염물질의 PM_{2.5} 기여도 분석결과는 충남지역 화력발전소가 주변지역에 미치는 영향을 파악하기 위한 중요한 기초자료로 활용 가능하며, 5차년도에는 PM_{2.5} 외 대기오염물질에 대한 영향범위를 산정할 예정임.
- 산정된 영향범위는 화력발전소로 인한 사회적 비용산정 기초자료와 생태환경분야의 화력발전소 영향 비교 분석을 위한 대조구 선정 등 본 연구용역에 활용되며,
- 화력발전소 주변지역 기후환경 정책수립과 지원을 위한 근거로 활용이 가능함.

[그림 6.24] 충남지역 화력발전소 기인 PM_{2.5} 영향범위 산정결과

6. 요약 및 소결론

- 충남지역 화력발전소 주변 대기, 강우 시료 샘플링을 실시하고 대기오염물질 기원추정에 활용할 수 있는 유기탄소와 납 안정동위원소 라이브러리 구축을 위한 안정동위원소 분석과 시료내 중금속 분석을 실시함.
 - 대기 시료 중 유기탄소 안정동위원소비 분석결과 고농도 순서는 서천, 태안, 보령, 당진 순으로 3차년도와 동일하였으며, 태안, 서천, 태안의 안정동위원소비는 각각 1.8%, 1.3%, 0.7% 증가하였으나, 당진은 0.63% 감소함.
 - 대기시료의 납 안정동위원소 분석결과 또한 3차년도와 동일한 결과가 나타남에 따라 3, 4차년도 누적분석 결과의 경향성이 확보되어 구축될 유기탄소와 납 안정동위원소 라이브러리가 발전소 주변지역 대기 오염물질 기원추정시 활용 가능할 것으로 판단함.
 - 시료 중 미량의 중금속 10종에 대해 분석을 실시했으며, 대기환경 기준이 있는 납(Pb)의 경우 대기시료 16개 측정지점 중 11개 지점에서 환경기준(연간평균치 $0.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였고, 강우시료는 14개 지점에서 환경기준을 초과하는 것으로 분석되었으나 3차년도 대비 대부분의 지점에서 납 농도는 감소한 것으로 나타났으며, 강우시료의 경우 대폭 감소한 것으로 나타남.
 - 중금속의 대기-강우-하천-저질 이동에 대해 종합분석한 결과 Al, As, Cr, Pb 의 경우 중금속의 이동을 잘 설명해 주고 있으며, 하천과 저질의 중금속농도에 강우와 대기가 미치는 영향이 지역별로 차이가 있었으며 이는 지역별 강수량 변화와 무관하지 않은 것으로 확인함.
- 화력발전소 주변지역 대기오염물질의 외부 기여도를 분석하기 위해 Trajectory 모델과 PSCF 모델을 구성하고 동위원소 분석시기에 맞춰 지역별 외부기여율 분석함
 - Trajectory 모델 결과 이동경로의 대기오염물질의 영향이 우려되는 저고도 이동은 주로 북풍, 서풍계열인 것으로 확인되었으며, 태안을 제외하고 겨울은 모든 지역이 저고도로 이동이 확인되어 고농도 사례발생의 원인이 될 것으로 판단됨.
 - PSCF 모델 결과를 추가 분석하기 위해 거리별 방향별 구역에 따라 분석한 결과 발전소 주변지역에 영향을 미치는 지역은 북서쪽, 750km 장거리 이동이며, 지역은 몽골

(26.1%), 내몽골(16.4%), 헤이룽장(14.0%) 지역으로, 서풍계열 영향이 63.3%(북서풍 44.9%)에 이르는 것으로 분석됨.

- 화력발전소 기인 대기오염물질의 외부 기여도 평가를 위해 기존 대기모델링 시스템을 현행화하고 화력발전소에서 배출하는 대기오염물질이 충남도내 시군의 $PM_{2.5}$ 농도 증가에 기여하는 정도를 평가하고, 결과를 발전소 기인 대기오염물질 영향범위 산정에 적용함.
- 분석결과 석탄화력발전소에서 배출하는 대기오염물질의 시군별 $PM_{2.5}$ 기여도는 홍성군(6.3%)이 가장 높게 분석되었고, 발전소 소재 보령(5.2%), 당진(4.8%), 태안(3.4%)에도 영향을 미치는 것으로 분석됨.
- 미국 EPA의 $PM_{2.5}$ 영향범위 기준에 근거하여 충남지역 석탄화력발전소 기인 대기오염물질에 의한 $PM_{2.5}$ 영향범위를 산정한 결과, 충남도내 화력발전소의 복합적 영향은 서해연안을 기준으로 동서로 최대 64km, 남북으로 최대 103km 지역에 영향을 미칠 것으로 나타남.

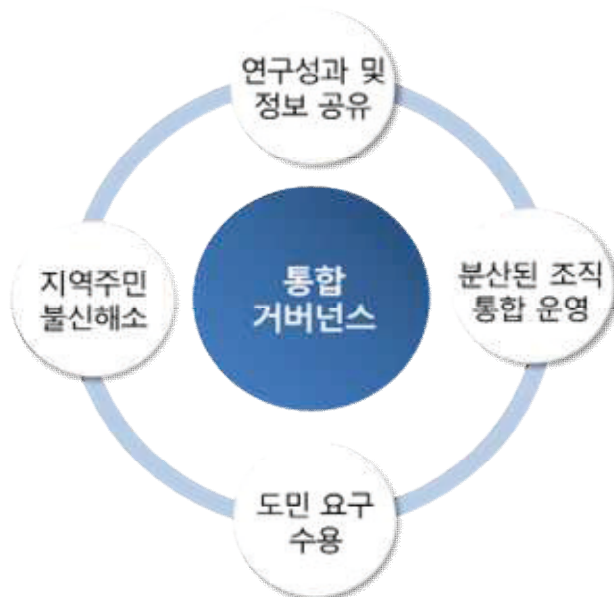
제7장 거버넌스 및 환류체계 구축

1. 연구개요
2. 통합민간환경감시단 제안
3. 요약 및 소결론

1. 연구개요

1.1. 연구목적

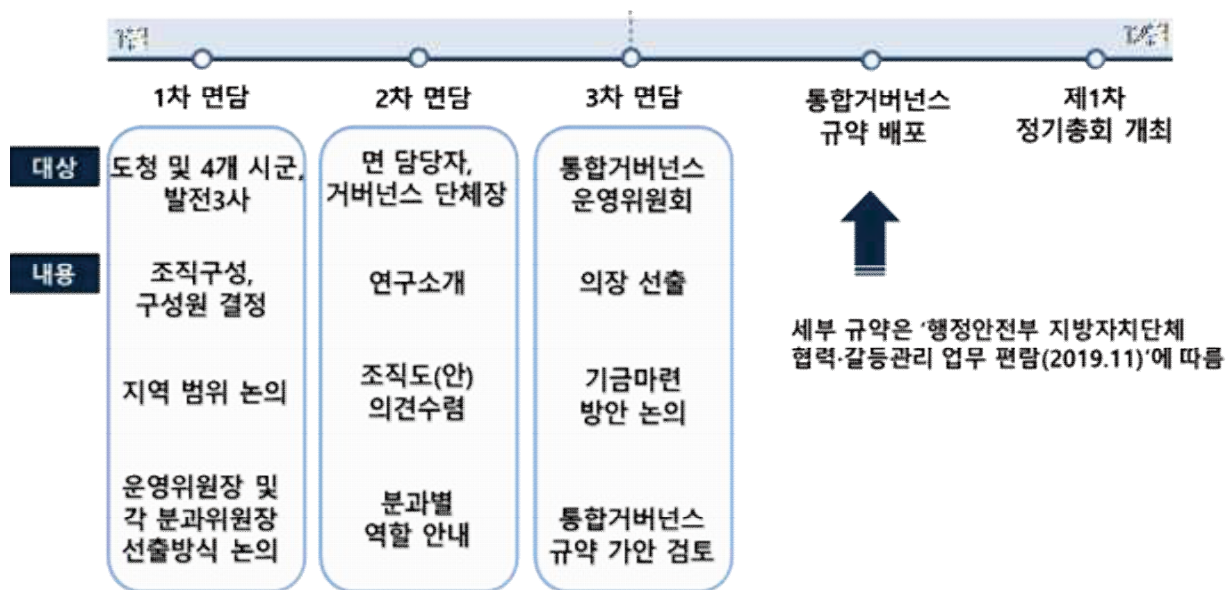
- 화력발전소는 대표적인 대규모 대기오염물질 배출시설이자 온실가스 배출시설로 발전소 운영에 따른 주변지역 환경문제와 관련하여 지역 주민과 발전사 간 명확한 시각 차이와 문제해결 접근방식의 입장 차이가 발생함.
 - 관련 법률에 따라 운영되는 환경민간감시단은 다소 형식적으로 운영되고 있고 지역 주민 대표로서 공감과 지지가 부족한 실정임.
 - 다양한 이해당사자들이 문제 사안별로 개별 대응함으로써 지역 주민의 소모적 노력이 소요되고 발전사와 지자체에서도 행정 낭비가 발생되고 있는 상황임.
- 이에 따라, 본 연구를 통해 지역 주민과 발전사 간 건전하고 효율적인 협력을 위한 통합거버넌스를 운영하고 지역주민의 협상력 강화 및 발전사와 지자체 간의 신속하고 효율적인 의사결정이 가능하도록 최적 모델을 개발에 노력함.
 - 사안별 연관성, 정보의 투명성·공개 등의 노력으로, 소통과 이해 부족으로 발생하는 지역 주민 간 갈등 요인을 최소화할 수 있도록 지원하였음.



[그림 7.1] 거버넌스 필요성

1.2. 협의 프로세스

- 2차년도에는 거버넌스 분류체계를 수립하였고 3차년도에는 거버넌스 분류모델을 검증하는 과정을 거쳤으며, 4차년도에는 검증모델과 이해당사자의 추가 의견수렴을 통해 실제 적용 가능한 통합 거버넌스 운영(안)을 제시함.
- 통합 거버넌스 구축을 위해 1차년도에는 주민설명회를 개최하여 의견을 수렴하고, 2차년도에는 검증을 통해 통합거버넌스 ‘권력-참여’ 모델을 확정하였으며, 3차년도에는 ‘권력-참여’ 모델 검증을 통해 통합 거버넌스 조직(안)을 제안함.
- 4차년도에는 위계-소외유형, 보상-타산유형, 규범-귀속유형을 포함하는 ‘권력-참여 모델’을 적용하여 각 지역별 통합거버넌스를 충남도에 제안하고 지역별 운영가능 여부에 대해 협의를 추진함.
- 지역주민 의견 수렴을 위해 화력발전소 인접 2개면에 대해 주민설명회와 대면 설문조사 방식의 심층 인터뷰를 진행하였으며, 지역별 환경감시단과 당진화력 민간환경감시단을 대상으로 서면의견 조사를 실시함.
- 3차례에 걸친 면담과 업무협약, 통합거버넌스 규약 배포를 통해 통합 거버넌스 조직과 구성원을 결정하고 통합거버넌스 조직(안)을 제안함.



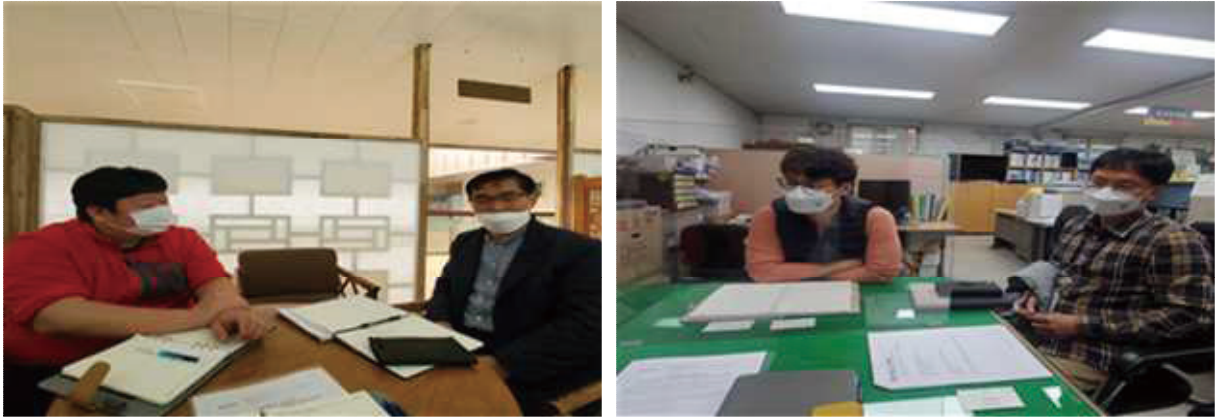
[그림 7.2] 4개 시군의 통합 거버넌스 제안을 위한 프로세스

1.3. 이해관계자 협의

- 3차년도까지 취합된 정보와 자료를 기반으로 제안된 통합 거버넌스 조직에 대하여 2021년 4월 1일부터 5월 10일까지 총 6차례에 걸쳐 도시군 공무원 등 이해관계자와 의견을 수렴하고 최적안의 통합거버넌스가 도출될 수 있도록 함.
- 충청남도 업무담당자와 2021년 4월 1일 통합거버넌스 조직 구성방법과 구성원, 시군별 통합거버넌스의 지역 범위를 설정하는 방안에 대해 협의하였음.
 - 추진 예정이었던 통합거버넌스가 단순히 새로운 조직이 추가되는 효과만 나타날 수 있다는 우려에 따라, 주민소통 강화와 기존 거버넌스 조직 지원을 강화할 수 있는 효율적인 거버넌스 운영으로 연구 방향을 일부 수정함.
 - 기존 거버넌스들이 지역의 환경문제 해결보다 피해보상 문제에 집중하고 있고, 거버넌스 간 혹은 행정, 발전소와의 충돌 등 소통의 문제점이 노출되어 소통강화 측면에서 기존 거버넌스의 약점을 지원하는 방향으로 운영 방향을 설정함.
- 화력발전소 소재 4개 시군(당진, 태안, 보령, 서천) 업무담당자와 지역 거버넌스인 민간환경감시단 운영에 대해 검토하고 통합거버넌스 운영방향에 대한 협의를 진행함.
 - 4개 시군은 해당 시군 주관으로 발전소와 주민간 환경협정을 통해 지역의 대기질 개선과 발전소로부터 배출되는 오염물질의 주변영향 조사, 주민의견 수렴 등 상생발전을 위해 시군별 환경협정을 근거로 12명~20명으로 구성된 “시군 민감환경감시단”을 설립하고 운영중에 있음 (신서천은 운영계획 수립 중).
 - 당진시의 경우 2018년 산업통산자원부의 지원으로 화력발전소 주변지역 환경보전과 감시업무를 목적으로 “당진화력발전소 민간환경감시센터”가 개소함에 따라 민간환경감시단의 역할이 축소되었으나, 민간환경감시센터 활동이 기존 민간환경감시단의 역할을 넘어 지역주민의 알권리 충족과 갈등관리 성과를 주민들로부터 인정받고 있음.
 - 4개 시군의 민간환경감시단 운영사례를 검토하고 통합거버넌스 운영방안으로 민간환경감시단과 통합 운영할 것을 제안하고 활동 방향 설명 및 참여 의사를 확인함.
 - 또한, 당진시의 민간환경감시센터 사례를 바탕으로 민간환경감시단의 통합 운영이나 민간환경감시센터를 통합거버넌스로 운영하는 것이 적절한 것으로 의견을 수렴하고, 통합민간환경감시단의 역할과 조직, 구성 등 계획을 설명함.

[표 7.1] 충청남도 용역 업무담당자 및 민간환경감시단 업무담당자 협의내용

시간	장소	참석자	주요 협의내용
2021년 4월 1일	충남도 302호실	(충남도) 류**, 이** (연구진) 이상신, 윤수향, 황은영	<ul style="list-style-type: none"> - 새로운 거버넌스 조직 구성 재검토 - 운영 중인 조직의 한계점 도출 - 기존 거버넌스 조직지원 역할 강화를 통합거버넌스 목표로 설정
2021년 4월 2일	서해안기후 환경연구소 104호실	(보령시) 김**, (당진시) 박**, (서천군) 나**, (태안군) 이** (연구진) 이상신, 김종범, 신우석, 윤수향	<ul style="list-style-type: none"> - 통합거버넌스 범위 설정 검토(관련 법률과 주민 요구 간 이견 확인) - 민간 주도 운영 필요성 공감 - 새로운 조직 운영 시 2차 갈등 우려로 기존 거버넌스인 환경감시단의 적극적 활용을 대안으로 검토
2021년 4월 19일	태안군 환경산림과	(태안군) 유** (연구진) 김종범, 윤수향, 황은영	<ul style="list-style-type: none"> - 기존 민간환경감시단의 조직 구성 및 구성원
2021년 4월 22일	보령시 환경보호과	(보령시) 유** (연구진) 김종범, 윤수향, 황은영	<ul style="list-style-type: none"> - 민간환경감시단에 배분된 예산 수준과 연간 활용 목적 - 민간환경감시단의 활동 사례 - 통합민간환경감시단의 제안 목적과 활동방향, 시군별 참여 의사 확인
2021년 4월 29일	당진시 환경정책과	(당진시) 박** (연구진) 이상신, 윤수향, 황은영	<ul style="list-style-type: none"> - 당진시의 사례를 토대로 상시 기구운영 필요성과 시군별 예산 선정 가능 여부 확인
2021년 5월 10일	서천군 환경보호과	(서천군) 나** (연구진) 김종범, 윤수향, 황은영	<ul style="list-style-type: none"> - 시군에서 생각하는 통합민간 환경감시단의 역할과 조직범위, 구성원 등에 대한 의견 수렴



[그림 7.3] 통합 거버넌스관련 업무담당자 협의 모습

1.4. 서면의견 조사

- 충청남도과 화력발전소 소재 4개 시군 협의 이후 협의결과에 따라 현재 실제 운영 중인 민간환경감시단의 현황조사와 통합거버넌스 관련 의견을 수렴하기 위해 3개 시군 업무담당자(신서천 감시단을 구성 중인 서천군 제외)와 당진민간환경감시센터를 대상으로 2021년 4월 27일부터 5월 10일까지 14일에 걸쳐 서면조사를 실시함.
- 의견조사 항목은 총 9가지로 환경감시단의 명칭과 구성인원수, 구성인원에 대한 선출현황과 선출 방식, 연간 활동빈도와 주요 역할, 환경감시분야 등이 포함됨.
- 신규 제안된 통합민간환경감시단에 포함될 참여주체에 대한 의견과 통합거버넌스에 대한 공동협력 의지에 대해 조사함.
- 설문조사 결과, 현재 운영 중인 민간환경감시단의 문제점을 인식하고 개선방안 논의를 통해 통합거버넌스(통합민간환경감시단)의 운영 필요성을 확인함.
- 통합거버넌스는 시군의 동의를 필요한 사항으로 본 업무를 통해 4개 시군의 참여의사를 확인하고 지역별 감시단 구성, 운영체계 등이 상이하여 이를 통합할 수 있는 가이드라인이나 현재 체계에서 통합거버넌스를 구성할 수 있는 방식이 필요하다는 인식을 확인함.
- 지역주민과 발전사의 소통창구로 중요한 역할을 하는 민간환경감시단을 통합하여 운영할 경우, 지역주민 참여가 반드시 필요한 사항으로 지역주민이나 활동 중인 감시단의 의견을 수렴하고 조직 통합이 필요할 것으로 협의함.

[표 7.2] 시군별 담당자 의견조사 결과

구 분	보령시	당진시	당진민간 화력감시센터	태안군
거버넌스 명	보령화력 환경감시단	당진화력발전소 민간환경감시사업 민간화력감시위원회	당진화력발전소 민간환경감시기구	태안화력 환경감시단
구성 인원수	12명	13명	13명	20명
구성원	주포면(2), 주교면(3), 오천면(3), 천북면(2), 청소면(2)	교로리(3), 당진시(3), 발전소(1), 한서대(1), 충남연구원(1), 시만단체(3), 민간화력감시센터(1)	교로 1리~3리 이장(3), 환경단체(3), 전문가(2), 행정기관(3), 발전소(1), 감시기구(1)	원북면(4), 이원면(4), 노원면(1), 태안군(4) 등
구성원 선출방식	마을주민 추천(개인)	조례에 따라 각 분야별 기관 추천	산업통상자원부 운영지침에 근거하여 당진시장 위촉	자료 미제출
활동빈도	연 1회	연 2회	연 2회	자료 미제출
주요역할	주민민원 해소 (민원발생 우선적 대응)	화력발전소 운영 감시, 주변지역 감시활동 보고 및 소통	환경감시(발전소 방문, 측정), 주민민원 해소(민원 대응)	환경감시 (발전소 방문, 측정)
환경감시 조사분야	대기분야	대기, 수질분야	대기, 수질, 폐기물, 소음·진동, 토양분야	대기, 소음·진동 분야
통합 거버넌스 (공동협력) 협력의지	있음	있음	있음	있음
통합거버넌스 참여주체	<ul style="list-style-type: none"> 충청남도 4개 시군 환경감시단 발전 3사 	<ul style="list-style-type: none"> 충청남도 4개 시군 환경감시단 발전 3사 	<ul style="list-style-type: none"> 충청남도 4개 시군 환경감시단 발전 3사 시군별 대표 환 경단체 	<ul style="list-style-type: none"> 충청남도 4개 시군 환경감시단

※ 서천군은 석탄화력발전소 폐쇄 이후 민간감시기구 미운영

2. 통합민간환경감시단 제안

2.1. 환경감시기구 운영사례 분석

- 보령시지속가능발전협의회를 통해 보령화력본부의 민간환경감시단 운영사례에 대한 의견을 수렴하고 현재 운영의 문제점 및 대안에 대해 세부 검토함.
 - 보령시와 한국중부화력발전(주)이 2005년에 환경협정을 체결하고, 14명으로 구성된 민·관·산·학 공동환경감시단을 발족하여 운영 중에 있음.
 - 그러나, 조직 초기와는 달리 현재는 민·관·산·학 공동감시단이 아닌 지역 대표 12명과 관계 공무원 2명으로만 구성·운영하여 일부 주민들은 당초 환경협정에 따라 민·관·산·학 공동감시단으로 구성하여 운영할 것을 요구하고 있음.
 - 또한, 환경협정에는 건설 및 운영시 지역업체 참여, 석탄회 기금설치, 전기요금 지원, 지역주민 우선취업, 탈황탈질설비 설치, 저탄장 방진펜스 설치, 온배수영향 조사 등을 수행하도록 명시하고 있으나, 발전소 운영 주체가 본사와 발전본부로 이원화되어 있어 환경협정에 명시된 과업에 대한 이행 주체가 명확하지 않아 보령화력 주변지역에 발생하는 환경문제에 적절히 대응하지 못하고 있다는 문제가 제기되고 있음.
 - 「발전소 주변지역 지원에 관한 법률」 시행령 제25조 1항 명시하고 있는 ‘화력발전소 주변지역의 환경보전 및 감시를 위한 지원사업’에 따라 환경감시가 이루어져야 하나 보령화력 민간환경감시단은 환경협정이 체결된 2005년 이후 지금까지 정상적으로 운영되지 못하고 있다고 분석됨.
- 민간환경감시 운영의 우수사례인 영흥화력발전본부와 당진민간환경감시센터를 통해 화력발전소 주변지역 오염의 통합적·종합적 측정·분석할 수 있는 기술 지원과 안정적 조직 운영을 위한 자금 지원을 분석하였음.
- 영흥화력 환경 거버넌스는 2004년 영흥화력 시설 운영 시부터 지역주민 환경복지 향상과 민·관·산 상생을 위한 지역 현안문제 해결을 위해 운영 중에 있음.
 - 영흥화력 환경거버넌스는 지역주민의 요구사항에 대해 영흥화력본부를 포함한 이해당사자 간 업무협약으로 다양한 사업을 추진하고 있음.

- 「수도권 대기환경개선에 관한 특별법」 시행 이후 강화된 배출허용기준을 만족시키기 위해 선도적으로 BAT(최적가용기술) 적용에 대한 주민 요청사항을 적극 반영하여, 총량관리제에 대한 적극적 대응으로 생긴 잉여배출권 판매로 얻어진 소득을 지역에 환원하여 지역 멸종위기 종 보전 사업과 생태계 보전사업 등을 추진하는데 사용하여 지역주민의 호응을 얻고 있음.
 - 협약을 통한 이행방식은 지역주민 요구사업에 유기적으로 대응할 수는 있으나, 사업별로 사업추진 추체간 별도의 협력 노력이 추가로 필요하며, 당시 환경 이슈 대응 협약에 집중된 경향이 있어 사업추진 성과가 미진한 사업이 다수 발생함.
 - 또한, 협약 추진을 위한 사업별 예산을 매년 구성하고 추진하는 한계에 따라 발전소 예산에 의존하여 사업 실행력 담보를 위한 안정적 예산확보 방안 마련이 필요함.
- 당진환경민간감시센터는 산업자원통상부의 화력발전소 주변지역 지원관련 시범사업으로 2018년 출범하였으며 국비 70%의 지원을 받아 운영하고 있음.
- 당진민간환경감시센터 주요업무는 발전소 내외 대기질 측정을 주요업무로 진행하고 있으며, 측정항목은 NO_x, SO_x, PM₁₀, PM_{2.5}, 벤젠, CO의 총 6개 항목으로 월 1회 측정하여 측정결과를 분기별로 소식지 형태로 공개하고 있음.
 - 특히, 대기질 측정 시 적극적인 지역주민 참여를 유도하고 측정결과는 지역전문가의 의견수렴을 거쳐 주민과 발전사, 유관기관에 공개·배포함으로써 지역주민의 센터에 대한 신뢰가 상당히 높음.
 - 또한, 대기질 측정 업무를 통한 발전소 주변지역 환경문제 감시와 더불어 지역주민을 대표해 주민의견을 수렴하고 발전사, 당진시, 환경단체 등과 소통에 노력하고 있음. 하지만 민간 운영의 한계로 전문인력과 장비가 부족하여 측정분석 업무 대부분을 외부기관의 도움에 의존하고 있는 실정임.
 - 당진의 사례를 통합거버넌스로 발전시켜 충남도 내 4개 지역을 모두 지원할 경우 운영비 절감, 표준화된 자료 생산과 제공, 지역 간 상호협력 유도, 지역 특성을 반영한 주민지원 효과가 있을 것으로 분석됨.
- 2023년 운영 예정인 삼척화력 거버넌스는 발전사인 포스파워의 주도로 민간환경감시기구 설립을 계획하고 있고 일부 사업은 사전에 추진하고 있음.
- 삼척화력 거버넌스는 지역 주민 중심으로 구성·운영할 예정이며, 발전소 내외 환경문제

감시를 주요 업무로 계획하고 있음.

- 계획 중인 사업 중 지역 주민 알권리 충족을 위한 환경정보 제공용 전광판 운영과 지역 환경 숙원사업인 맹방 해변 침식저감 지원을 위한 구체적 사업계획을 가지고 있으나, 사업지원을 위한 전문가 참여 계획이 구체적이지 않으며, 다양한 주체의 의견을 통합할 통합 거버넌스로의 발전이 필요함.

[표 7.3] 거버넌스 운영사례 조사결과

구분	영흥화력	당진화력	삼척화력
활동	- '04년부터 거버넌스 운영	- '18년 당진화력민간환경 감시센터 개소	- '23년 운영예정
운영 방식	- 사안별 다양한 업무협약을 통한 사업추진	- 상시기구 운영	- 지역주민 중심 운영
주요 기능	- 지역주민 환경복지 향상 - 민관산 상생협력 - 환경현안 해결	- 발전소 내외 대기질측정 - 주민참여 조사사업 - 주민의견 수렴 창구역할 - 당진시, 발전소와 지역 NGO 소통	- 발전소 내외 환경문제 감시
우수 사업	- 총량관리 잉여배출권 지역환원 - 생태계 보전사업 - 지역 주민 환경교육 - 지역 NGO 협력	- 주민참여 측정사업 - 측정결과 공개·배포 - 주민 이의신청 및 개선 요구 - 환경교육, 설명회	- 환경 전광판 운영 - 맹방 해변 침식저감 지원
개선 필요 사항	- 거버넌스 통합노력 필요 - 선언에 그치는 사업 다수 존재	- 측정·분석 기기 미비 - 전문인력 충원 필요 - 안정적 예산확보	- 전문가 참여 필요
예산 구성	- 협약 사업별 별도예산 구성 (남동발전, 인천시 예산 위주)	- 산업자원통상부 지원 (당진시, 동서발전 일부 부담)	- 포스파워(발전사) 지원 예정

- 화력발전소 주변지역 거버넌스 운영사례를 통해 충남지역 화력발전소 주변지역 거버넌스 운영방안 설정을 위해 3가지의 시사점을 도출함.
- 주변지역에 존재하는 다양한 거버넌스는 특정 환경문제에 대한 대안을 제시할 수는 있으나, 거버넌스별 목적에 따라 운영되고 있어 지역에 필요한 역할을 선택하고 집중하기가 어려워 통합거버넌스 형태로 운영할 필요가 있음.

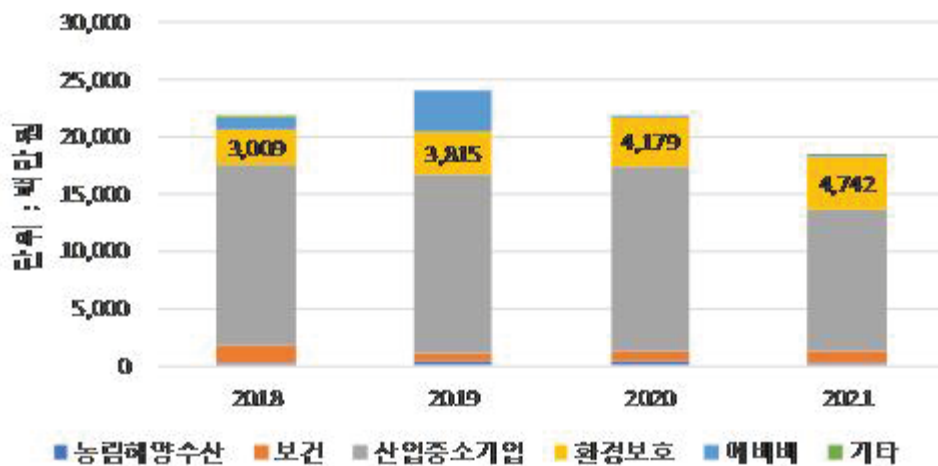
- 주민이 주체가 되는 환경문제 파악을 위해 현재 운영 중인 대부분의 환경거버넌스 단점을 보완할 수 있도록 과학적 감시체계를 구축할 필요가 있으며, 이를 위해 측정기기 운영, 전문인력 확보 등이 필요함에 따라 상시운영 형태의 통합거버넌스를 고려할 필요가 있음.
 - 또한, 감시 대상인 발전사로부터 독립성을 보장하기 위해 안정적 예산 확보방안 마련이 필요하며, 이를 위한 추가 운영 자원 확보방안을 검토해야 함.
- 충청남도과 4개 시군 업무담당자 협의와 서면조사 결과와 화력발전소 주변지역 거버넌스 운영사례 조사결과를 종합하여 충남도 내 4개 시군이 공통으로 운영 중이거나 운영계획이 있는 민간환경감시단을 통합 운영할 수 있는 방안을 포함하도록 통합민간환경감시단의 운영방향을 설정하고자 함.

2.2. 통합민간환경감시단 운영방향 설정

- 통합민간환경감시단 운영을 위해 현재 활동 중인 지역 민간감시단(감시센터) 구성원에 대한 추가 의견수렴 과정을 거쳐 현재 시스템에 대한 문제점을 분석함.
- 현재 민간환경감시단 운영예산 대부분은 국비나 시군비에 의존하는 구조이며, 안정적인 운영에 필요한 예산을 확보하는데 한계가 있어, 지역자원시설세 등을 활용할 수 있는 방안 마련이 필요함.
 - 민간환경감시단 대부분이 비전문가로 구성되어 있어 현장조사 장비 부족과 운영의 전문성이 다소 부족하고, 측정결과 해석의 어려움이 발생하고 있으나, 시군별로 전문인력을 확보하기에는 한계가 있어, 장비 구축과 운영을 주관하고 주기적인 교육 및 기술지원이 가능한 통합민간환경감시단의 역할이 필요함.
 - 또한, 민원이 자주 발생하는 저탄장, 회처리장, 온배수 방류지역 등은 실시간 감시가 필요하나, 개별적 민간환경감시단을 구축·운영하기에는 한계가 있어, 감시단을 통합으로 운영할 수 있는 관측시스템 구축·운영이 필요한 것으로 확인됨.
- 이해관계자 협의, 의견조사, 사례조사 결과를 바탕으로 안정적 예산확보, 전문성 보완, 주요 관심지역 실시간 모니터링, 주민의견 반영 체계 강화, 예산운영의 투명성 확보 측면에

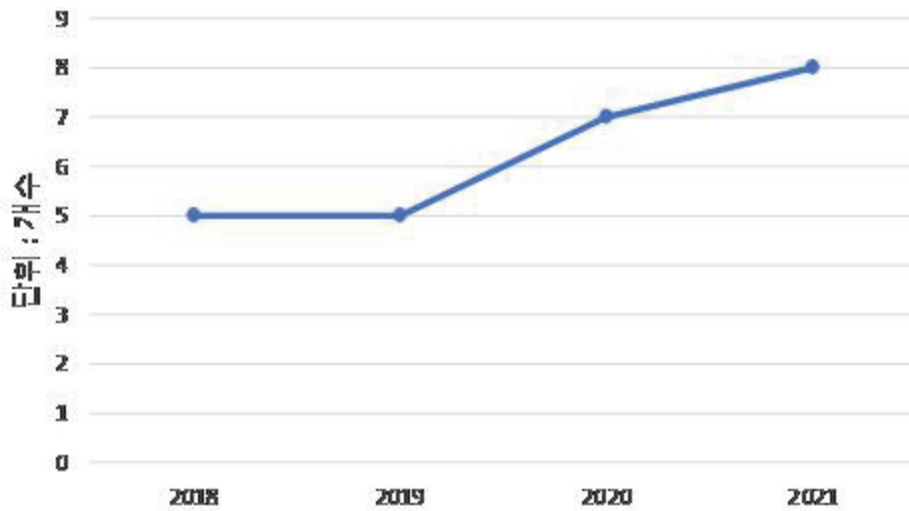
서 현재 모범적으로 운영 중인 당진화력민간환경감시센터를 기본모델로 하는 통합민간환경감시단의 운영방향을 설정함.

- 통합민간환경감시단의 안정적 운영을 위해서는 안정적 예산확보가 필요하며, 예산 측면에서 검토할 수 있는 대안은 관련법에 따른 국비(산업자원통상부) 지원, 지역자원시설세 활용, 발전사 상생기금 운영, 지방비(도 및 시군비) 활용 등이 있음.
- 대안 중 지역자원시설세는 2024년 시행되는 화력발전 지역자원시설세율 인상(지방세법 개정, 2021.12.28. 0.3원/kw → 0.6원/kw)에 따라 재원 마련의 현실적 대안이 될 수 있음.
- 충청남도 지역자원시설세는 2018년 218억원, 2019년 241억원으로 최고를 기록한 후 2020년 217억, 2021년 184억으로 감소 추세에 있음.
- 그러나 환경보호 관련 예산은 2018년 30억원, 2019년 38.2억원, 2020년 41.8억원, 2021년 47.4억원으로 지속적인 증가 추세에 있고, 이는 충남의 석탄화력발전소 집중으로 인한 환경문제의 지속적인 우려가 반영된 결과로 판단됨.



[그림 7.4] 충청남도의 지역자원시설세 부문별 사용 현황과 계획

- 또한, 지원자원시설세 기반으로 수행된 환경 관련 사업수 역시 2018년 5개, 2020년 7개, 2021년 8개로 지속적으로 증가하고 있고, 2019년 이후 꾸준히 감소하고 있는 지역자원시설세 규모에도 불구하고, 지역의 환경이슈를 해결하기 위해 환경분야에 대한 투자와 지원을 넓혀가고 있음.



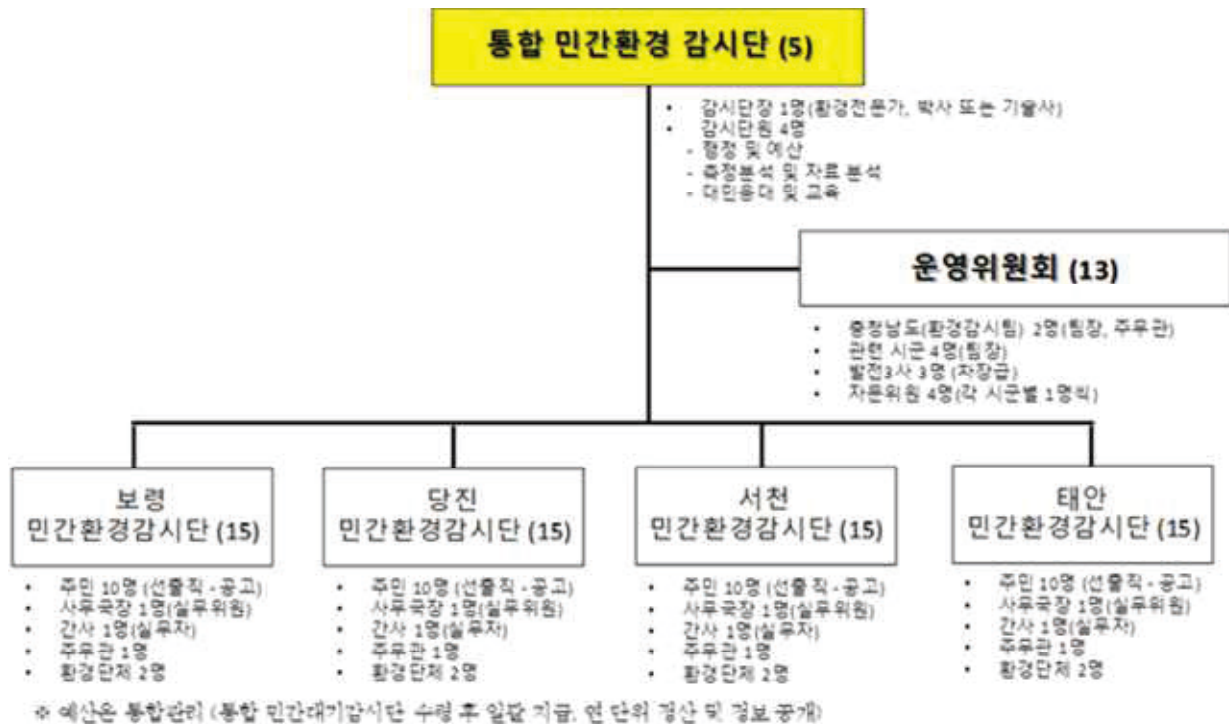
[그림 7.5] 충청남도의 환경관련 단위 사업 추진 추이

- 지방세법 개정안에 따라 2024년부터 지역자원시설세 관련 세액 증가가 예상됨에 따라 5차년도 연구 종료 후 통합민간감시단의 본격적 운영 시 세액 증가분 활용을 적극적으로 검토할 필요가 있으며, 당진민간환경감시센터 예산(4.24억, 2021년 기준)규모를 고려하고 4개 지역 지원 총괄, 측정기기 직접 운용 등을 고려하여 당진민간환경감시센터 예산의 1.5배(약 6.5억원)의 예산이 필요할 것으로 추산함.
- 인력운영 측면에서는 통합민간환경감시단은 관련 전문가를 감시단장으로 두고 현장측정, 자료 분석, 대민지원, 교육 및 행정지원을 담당할 최소한의 전문인력 4인 이상을 확보해야 하며, 4개 시군의 요청에 따라 통합민간감시단은 시의적절하게 지원할 수 있는 인력체계 구성이 필요함.
- 당진화력민간감시센터의 주요 업무인 현장 측정, 자료 분석과 함께 민원이 자주 발생하는 지역(저탄장, 회처리장, 온배수 방류지역 등)을 측정 관심지역으로 설정하고 실시간 모니터링도 필요함.
- 저탄장, 회처리장은 비산먼지 민원의 주요 원인으로 본 연구용역 2세부 연구결과인 실시간 감시시스템을 지역별로 구축·운영할 것을 제안하며, 온배수 모니터링은 현재 발전사에서 운영 중인 모니터링 시스템을 감시하고 연계하여 활용함으로써 인력과 예산 운영의 효율화를 도모할 필요가 있음.

- 통합민간환경감시단 운영 시 주민의견 반영체계 강화를 위해 주민의견 수렴창구 운영, 효율적인 의견 대응방안, 의견처리 현황 공시 의무화 등을 필수 업무절차로 규정하고, 예산 운영의 투명성 확보를 위한 감사 운영, 4개 시군 민간환경감시단 상호협력과 견제 시스템이 포함되도록 구체적 운영(안)을 5차년도 시범운영을 통해 점검하고 확정하는 절차를 거쳐야 함.

2.3. 통합민간환경감시단 운영(안)

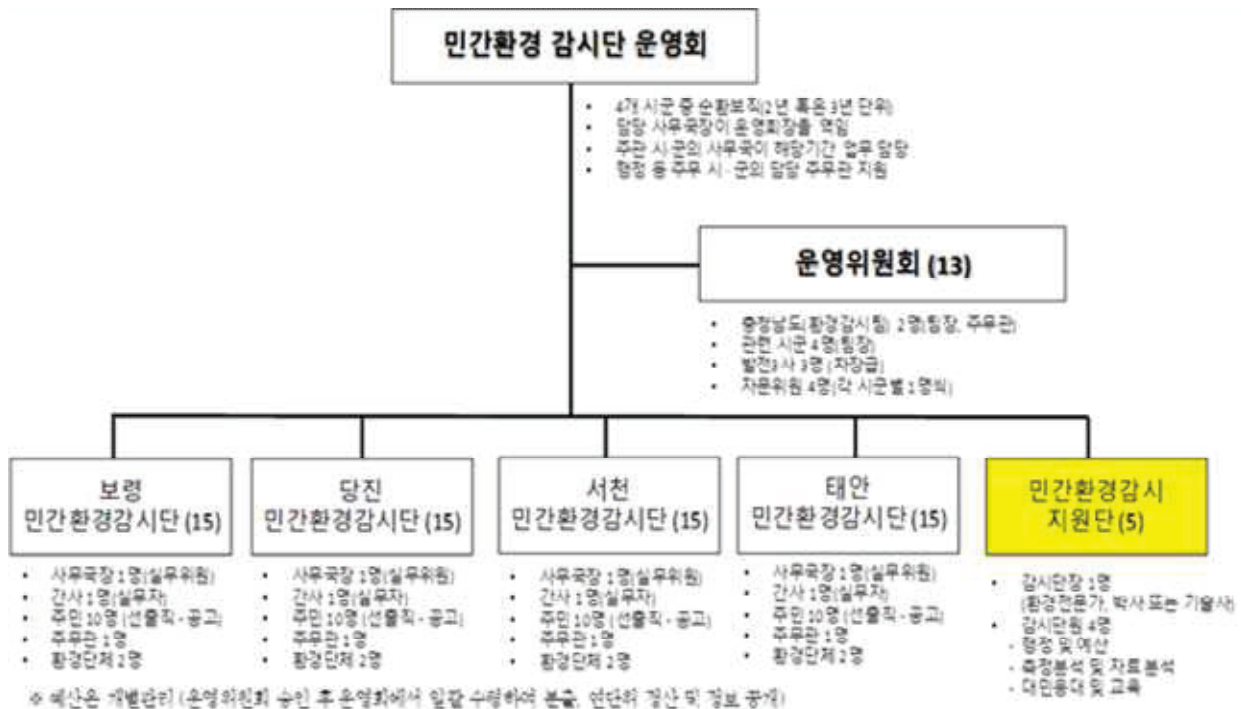
- 이해관계자 협의와 의견조사, 발전소 주변지역 환경감시기구 운영사례 분석을 통해 도출된 통합민간환경감시단 운영방향 설정을 근거로 하여 시범 운영기간 적용할 수 있는 통합민간환경감시단 운영(안) 3가지를 제안함.
 - － 통합민간환경감시단의 역할에 따라 (1안) 주도형 통합민간환경감시단, (2안) 지역형 통합민간환경감시단, (3안) 자문형 통합민간환경감시단으로 구분되며, 제안된 통합민간환경감시단 운영을 위해서는 지역별 민간환경감시단 구성이 전제로 되어야 하고, 당진민간환경감시센터의 기능과 역할은 통합민간환경감시단 차원에서 논의함.
- (1안) 주도형은 통합민간감시단 내 운영위원회를 두고 4개 시군 민간환경감시단을 통합운영하는 방안으로 통합환경감시단 주도의 수직적 의사결정 방식을 채택하며, 운영위원회에서 통합적으로 운영계획을 수립하고 운영하는 체계로 초기 운영에 적합함.
 - － 주도형은 통합환경감시단이 컨트롤타워 역할을 수행하면서 시군 환경감시단을 통합운영하는 방식으로 통합감시단의 운영계획에 시군 사업이 통합되고, 통합운영계획에 따라 시군 감시단에 인력을 지원하는 방식을 채택하고 있음.
 - － 통합민간환경감시단 예산은 통합하여 확정하고 4개 시군 감시단 운영비를 할당하는 방식으로 예산을 관리하며, 감시단장이 4개 시군의 정보를 관리하고 공개하는 방식으로 운영함.
 - － 통합민간환경감시단의 적극적인 역할을 기대할 수 있는 방안으로 전문가로 이루어진 통합민간환경감시단이 주체적으로 운영방안을 구성하고 추진하여 전체 사업의 일관성은 유지할 수 있는 장점이 있으나, 4개 시군 특성별 수요 대응에 다소 단점이 있고, 주민의견 수렴과 소통에 소홀할 수도 있으며, 전문가 의견 중심으로 정보를 생산하거나 공유함으로써 지역주민의 정보 접근성이 떨어질 수 있음.



[그림 7.6] (1안) 주도형 통합민간환경감시단 운영(안)

- (2안) 지역형은 민간환경감시단을 신설하고 시군 민간환경감시단이 민간환경감시단 운영 회로 통합하여 운영하는 방안으로 시군 민간환경감시단을 민간환경감시지원단이 지원하는 수평적 의사결정 방식을 채택하며, 민간환경감시단 운영회를 시군이 순차적으로 맡아 운영하는 체계로 통합민간환경감시단 운영이 안정화 단계에 접어든 이후 추진하기에 적합한 방안임.
- － 시군별 민간환경감시단은 독립적으로 운영하고, 운영위원회를 통해 시군별 민간환경감시 단과 민간환경감시지원단이 운영되며 민간환경감시지원단은 시군 민간환경감시단의 요청 이 있을 경우 지원하는 형태로 역할을 수행함.
- － 4개 시·군 민간환경감시단 각 예산 일부를 민간환경감시지원단 운영비로 할당하여 운영 하고, 지원단에서 생산·가공한 정보는 각 시군별로 관리하고 민간환경감시지원단에서 통합 공개하는 방식으로 운영함.
- － 민간환경감시지원단을 통해 전문영역(측정기기 운영, 분석 등)을 지원받아 지역별로 스스로 계획을 수립하고 추진함으로써 시군별 특성이 반영된 민간환경감시단 운영이 가능하 고 또한, 주민의견 수렴과 반영이 적극적으로 수행되어 주민이 필요한 정보생산과 공개 에 장점이 있으나,

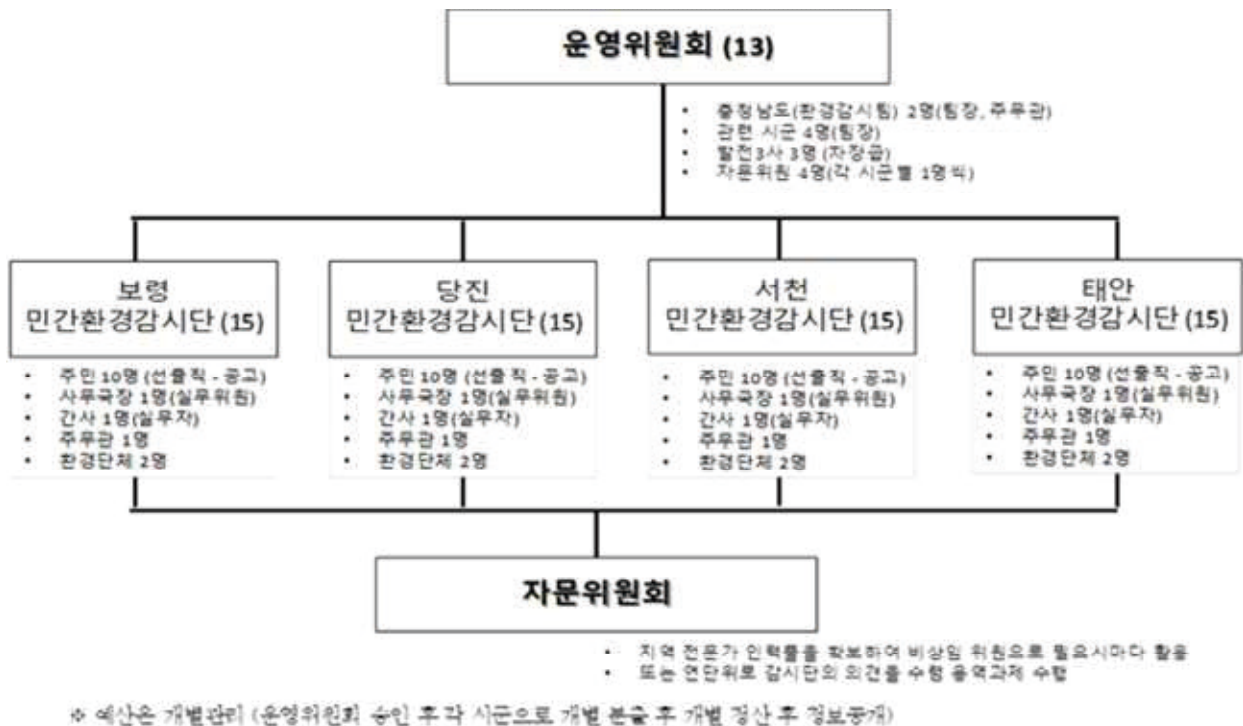
- 통합운영 주체인 민간환경감시단 운영회를 주관하는 지자체의 업무 부담과 지역의 요구에 따라 민간환경감시지원단이 업무를 수행할 수 있어 소극적이고 수동적 업무 수행이 우려되며, 시군 요청이 특정 시기에 집중될 경우 다른 개별사업 지원에 한계가 발생할 우려가 있음.



[그림 7.7] (2안) 지역형 통합민간환경감시단 운영(안)

- (3안) 자문형은 4개 시군 민간환경감시단을 충청남도를 중심으로 운영위원회를 구성하고 자문위원회를 통해 전문가와 측정·분석을 지원받는 방식으로 기존 운영방식을 단순히 통합하고 운영위원회 중심으로 의사 결정하는 체계로 시군별 개별로 사업운영계획을 수립·운영하는 현재 운영 방식을 유지하는 방안임.
- 시군별 민간환경감시단은 개별 운영하고 운영위원회를 중심으로 통합하며 자문위원회를 비상임으로 구성하거나 외부 전문기관 용역을 통해 기술을 지원받는 방식을 채택하고 있음.
- 시군 민간환경감시단과 운영위원회 예산은 별도로 운영됨으로 통합역할을 하는 운영위원회 예산은 충청남도과 발전사의 지원이 필요하며, 자문위원회는 분야별(대기, 수질, 토양, 해양, 소음진동, 악취 등) 인력풀을 구성하고 운영하는 것이 가능하며, 충청남도나 발전사의 예산만 지원된다면 즉시 운영이 가능한 방안임.

- 통합역할을 하는 운영위원회 운영 비용을 절감할 수 있으며, 적절한 인력풀 구성과 운영으로 광범위한 분야의 전문인력을 지원받을 수 있는 장점이 있으나,
- 지역별 예산 규모, 구성원 관리 수준 등 시군 민간환경감시단 역량에 따라 지역주민의 사업 기대효과 차이가 발생할 수 있고, 적절한 시기에 지원을 받기에 한계가 있으며, 통합거버넌스로서의 역할을 기대하기 어려움.



[그림 7.8] (3안) 자문형 통합민간환경감시단 운영(안)

[표 7.4] 통합민간환경감시단 운영 안별 특징

구분	(1안) 주도형	(2안) 지역형	(3안) 자문형
의사 결정	- 통합감시단 주도의 수직적 의사결정 방식	- 시군 감시단을 감시 지원단이 지원하는 수평적 의사결정 방식	- 기존 운영방식을 단순히 통합하고 운영위원회 중심의 의사결정 방식
운영 방식	- 4개 시군 감시단 통합 운영 - 통합감시단이 컨트롤 타워 역할 수행	- 시군별 감시단 개별운영 - 감시 지원단이 시군 요청에 지원하는 역할 수행	- 시군별 감시단 개별운영 - 충남도 중심의 운영 위원회 운영, 자문위원회 기술지원 역할 수행
인력 운영	- 통합감시단 지원계획에 따라 시군 인력 지원	- 시군 감시단 운영계획에 따라 감시지원단 인력 운영	- 자문위원을 비상임으로 운영하거나 외부 전문 기관 활용
예산 운영	- 통합운영, 시군별 할당	- 시군 감시단 운영비 일부를 감시지원단에 지원	- 충남도나 발전사가 자문 위원 운영비 별도 부담
사업 운영	- 통합감시단 운영계획 내 시군사업 통합 운영	- 시군별로 사업 운영	- 시군별로 사업 운영
정보 관리	- 통합 관리 / 통합 공개	- 개별 관리 / 통합 공개	- 개별관리 / 개별공개
주민 소통	- 통합감시단 의견취합, 민원해결시 건별 감시단과 협력	- 시군감시단 의견수렴, 필요시 감시지원단 지원 요청	- 시군별 의견수렴, 필요시 자문위원 자문 요청
장점 단점	- 초기 운영에 적합 - 통합감시단의 적극적 역할 기대 - 사업의 일관성 유지	- 시군 특성 반영 운영에 적합 - 적극적 지역의견 반영 기대 - 주민 중심의 정보생산	- 예산 확보시 즉시 운영 가능 - 운영위원회 운영비 절감 - 광범위한 분야 전문가 지원 가능
	- 시군 특성별 수요 대응 약점 - 직접 주민소통 애로사항 발생 - 전문가 중심의 정보생산	- 통합감시단 운영 담당 지자체 업무부담 가중 - 수동적 감시지원단 역할 우려 - 시군별 개별사업 지원 한계발생 우려	- 통합거버넌스 역할 기대 우려 - 시의적절한 지원 우려 - 시군감시단 역량에 따라 운영 효과 차이 발생

- 제안한 3개의 운영(안)에 대한 특징과 장단점을 분석하고, 지역 민간환경감시단의 의견을 수렴한 결과, 2(안)에 적극적으로 동의하고 있으며, 연구진 내부 검토 결과, 지역특성 반영이 가능하고 전문영역 지원도 가능하며, 주민 정보서비스 개선에 장점이 있는 (2안) 지역형 통합민간환경감시단을 최적(안)으로 선정함.

- 다만, 현재 4개 시군의 민간환경감시단이 상시로 운영되고 있지 않은 상황임으로 운영 안정화가 최우선적으로 선행되어야 할 것이며, 초기 (2안) 지역형으로 운영한 후 시군 감시단이 안정화가 되면 (1안) 주도형으로 변경하여 운영할 것을 제안함.

[표 7.5] 통합민간환경감시단 운영(안)에 대한 의견조사 결과

	보령시	당진시	당진민간감시센터	태안군
운영 필요성	필요	필요	필요	필요
운영안	2안	2안	2안 (현 민간환경감시단 안정화 전 1안 유지)	2안

3. 요약 및 소결론

- 효율적인 통합거버넌스 운영을 제안하기 위해 충청남도과 화력발전소 소재 4개 시군 업무담당자 협의와 의견조사를 진행했으며, 현재 운영 중인 민간환경감시단의 의견을 수렴하고 거버넌스 운영사례를 검토함.
- 4개 시군 통합거버넌스 운영의 필요성을 확인하였으며, 시군별 운영 중인 민간환경 감시단(민간환경감시센터)은 지역의 운영 의지, 대내외 여건 등의 차이로 운영방식의 차이가 있었으며, 특히 주민지원 측면에서 지역별 편차가 크게 나타나고 있어 통합 거버넌스 운영이 시급함을 확인함.
- 의견조사 결과 민간환경감시단 운영의 문제점을 예산, 전문성, 소통으로 구분하고, 통합민간환경감시단 운영 시 안정적 예산확보와 투명한 예산운영, 측정·분석의 전문성 확보와 실시간 자료생성 체계 구축, 주민 의견 반영 강화를 목표로 설정할 필요성을 확인함.
- 화력발전소 주변지역 거버넌스 운영사례 분석을 통해 지역별 우수사업과 개선필요 사항을 점검한 결과 문제점으로 구분한 예산, 전문성, 소통에서 당진화력민간환경감시센터의 운영사례가 모범사례로 확인되었으나, 당진의 사례가 통합거버넌스 모델로

확대되기 위해서는 적극적인 활동을 제약하는 전문성 결여 보완이 개선되어야 함.

- 조사·분석한 결과를 토대로 통합거버넌스의 주요 역할을 발전소 내외 대기질 측정, 주민참여와 이해당사자 소통 창구역할 수행으로 설정하였고, 안정적 예산확보, 전문 인력 지원체계를 갖춘 상시 운영형태의 통합민간환경감시단 운영을 제안함.
- 검토결과를 종합하여 통합민간환경감시단의 운영방향 중 예산, 인력 그리고 추가로 수행해야 할 업무를 제시함.
 - 통합민간환경감시단 운영을 위한 추가 예산은 충청남도 지역자원시설세 부문별 사용현황과 계획을 분석하고, 2024년 지역자원시설세율 인상으로 예상되는 추가 세수를 감안하여 연간 약 6.5억원을 확보할 것을 제안함.
 - 적정한 전문인력 규모는 운영사례를 기준으로 감시단장과 최소 4인의 전문인력으로 구성할 것을 제안하였고, 측정 관심지점인 저탄장, 회처리장, 온배수 방류지역 등의 모니터링 방안을 제안함.
- 본 연구에서 제시한 운영 방향을 적용할 통합민간환경감시단에 대해 3가지 운영(안)을 제안하고 의사결정, 운영방식, 인력운영, 예산운영, 사업운영, 정보관리 등 주요 특성을 제시하여, 충청남도 여건을 고려한 최적의 운영방안을 선정함.
 - 통합민간환경감시단 3가지 운영방식은 수직적 운영방식인 (1안) 주도형과 수평적 운영방식인 (2안) 지역형, 그리고 현재 운영방식을 통합하는 (3안) 자문형으로 구분하고, 각 (안)별 특성과 장단점을 분석함.
 - 제안된 3가지 (안)에 대해 관계자 의견을 수렴하고 내부검토를 거쳐 지역별 특성 반영과 원활한 전문영역 지원의 균형을 맞출 수 있는 (2안) 지역형 통합민간환경감시단 운영을 최적(안)으로 선정함.
 - 5차년도 연구에서는 선정된 (2안) 지역형 통합민간환경감시단을 시범 운영하면서 연구진이 민간환경감시지원단 역할(측정·결과분석, 대민지원과 교육 등)을 수행하고 주민 맞춤형 거버넌스 가이드라인 제시할 예정임.



제8장 결론 및 신규사업 제안

1. 결론 및 신규사업 제안


1. 결론 및 신규사업 제안

1.1. 미기후 모니터링

○ 미기후 모니터링 지점 운영, DB 축적, 주변지역 CO2 측정 추진

구분	내용
사전연구	-(1차년) 지역 기후변화 전망분석(기온, 강수량), 미기후(10개소) 측정지점 운영 -(2차년) 지역 기후변화 분석(대기질 영향인자인 풍속, 습도 등), 미기후 측정지점 22개소 추가 구축 -(3차년) 미기후 28개소 측정지점 DB 수집·관리
연구목적	-미기후 모니터링 시스템 운영 및 유지보수 -화력발전소 주변지역 온실가스 농도 파악
연구내용	-지점별 온습도 DB수집 및 분석(극한기후사상 포함) -발전소 주변지역 온실가스(CO2) 농도 모니터링 실시
4차년도 연구성과	-측정기간 지역별 온도 편차는 $\pm 8.5^{\circ}\text{C}$ 로 동일 : 기후적응 구간이 동일하여, 유사한 정책추진이 가능함 -폭염일수 : 보령, 태안 증가 경향, 당진, 서천 감소 경향 -주변지역 CO2 측정실시, 태안을 제외한 모든 곳에서 발전소 인근지역이 10km 내외의 대조구 보다 평균농도가 높은 것을 확인함
연구성과 활용	-산림 내 온습도 측정 후 지점별 비교를 통한 트렌드 분석 -발전소 주변지역 온실가스 농도 비교분석을 통한 기후변화 영향 사례제시 가능
세부과제 연계성	-(4세부) 생태모니터링과 연계분석
향후계획	-미기후변화와 온실가스농도의 상관성 분석 -CO2 국가배경농도인 안면도 측정자료와 비교분석

○ 신규사업 제안

사업명	화력발전소 주변지역 탄소중립 중점벨트 운영
개요	<ul style="list-style-type: none"> -화력발전소 주변지역은 환경취약지역으로 인식되어 지역 정주시설, 농수산물을 포함한 생 산품 등에 대한 부정적 이미지가 고착화되어 있음 -충청남도를 포함한 행정기관, 발전사, 지역주민의 노력으로 지역 환경개선 성과가 도출되 고 있으나 이미지 개선은 미미한 실정임 -화력발전소는 대표적인 온실가스 다배출 시설로서 국가와 충남지역의 탄소중립 목표실현 에 역할이 기대됨 -따라서, 국가탄소중립 기여할 수 있는 사업과 연계하여 본 연구결과와 추가 연구를 통해 지역 환경이미지를 개선을 위한 사업을 추진할 필요가 있음
추진 방향	<ul style="list-style-type: none"> -기존 발전사 사업에 대한 탄소중립 기여도 산정(예, 온배수 활용 농업 등) 
기대 효과	<p>[그림 8.1] 태안화력 주변 온배수 활용계획</p> <ul style="list-style-type: none"> -탄소중립지대 운영 : 발전소 이격거리별 CO2 변화 분석결과(1세부), 생태건강성 확인지역 (4세부) 등을 종합분석하여 발전사와 주거지역간 완충지대의 생태보전, 탄소흡수원 확충 등 사업 추진 -화력발전소 주변지역에 대한 탄소중립 도시 조성(건물, 수송, 폐기물 처리 등의 분야에서 탄소저감, 탄소흡수 체계로 전환) -탄소중립 도시 운영에 따른 환경영향 저감 정량화(세부과제별 연구결과 추가 활용) -2050 국가탄소중립 실현에 기여 -지역 환경이미지 개선, 지역 관광산업과 연계 → 지역경제 활성화 기여 -지역사회와 발전사의 적극적 참여 유도로 지역공동체 의식 함양 → 갈등해소 기여(통합민간환경감시단(1세부) 역할 강조)

1.2. 고정측정망 운영

○ 측정소 2개소 운영, 농도변화 분석 및 상관성 분석, 대난지도 측정소 이전 실시

구분	내용
사전연구	-(1차년) 대난지도 측정소 구축 -(2차년) 청라면 측정소 구축, 주변 측정소 비교분석 -(3차년) 당진화력 풍상, 풍하 농도비교, 보령화력 이격거리별 농도 변화 분석
연구목적	- 배경 농도, 거리별 농도변화 조사 및 DB축적 - 대난지도 측정소 장소 이전
연구내용	- 화력발전소 풍상 방향 배경농도와 풍하 방향 농도 비교 - 화력발전소 이격거리별 농도변화 분석 - 마을대기측정망 등과의 상관성 분석 - 대난지도 측정소 장소이전 조사
4차년도 연구성과	- 마을대기측정망 연계활용(충청남도 마을대기측정망 통합정보센터 정보제공) - 대난지도 측정소 장소이전 완료 - 도시대기측정망, 마을대기측정망의 이격거리별 농도분석 : PM10, NO2 거리에 따른 농도 감소, PM2.5 농도 증가 - 상관성 분석 : 주변 측정소간 높은 상관성 확인(보령지역보다 당진지역이 상대적으로 더 높음), 인접 측정소 활용 유의미한 결과 도출 가능성 확인 - 연구결과 홍보·확산 : 학회 특별세션, 홍보부스 운영
연구성과 활용	- 대난지도 측정소 : 당진화력 배경농도 DB축적으로 발전소 유입전 실시간 정보 제공 - 청라면 측정소 : 보령화력의 거리별 실시간 정보 제공 - 충청남도 마을대기측정망 통합정보센터 연계운영
세부과제 연계성	-(2세부) 화력발전소 주변 현황분석 활용 가능
향후계획	- 지속적인 측정소 정도관리와 운영(국가측정망 수준의 대기질 정보 제공) - 측정소별 월별 대기환경기준 달성률 분석 : 유의미한 수준의 초과일 발생시 국가적 차원의 관리 필요성 근거자료로 활용 - 화력발전소 풍상·풍하 방향 실시간 농도비교 분석 계속

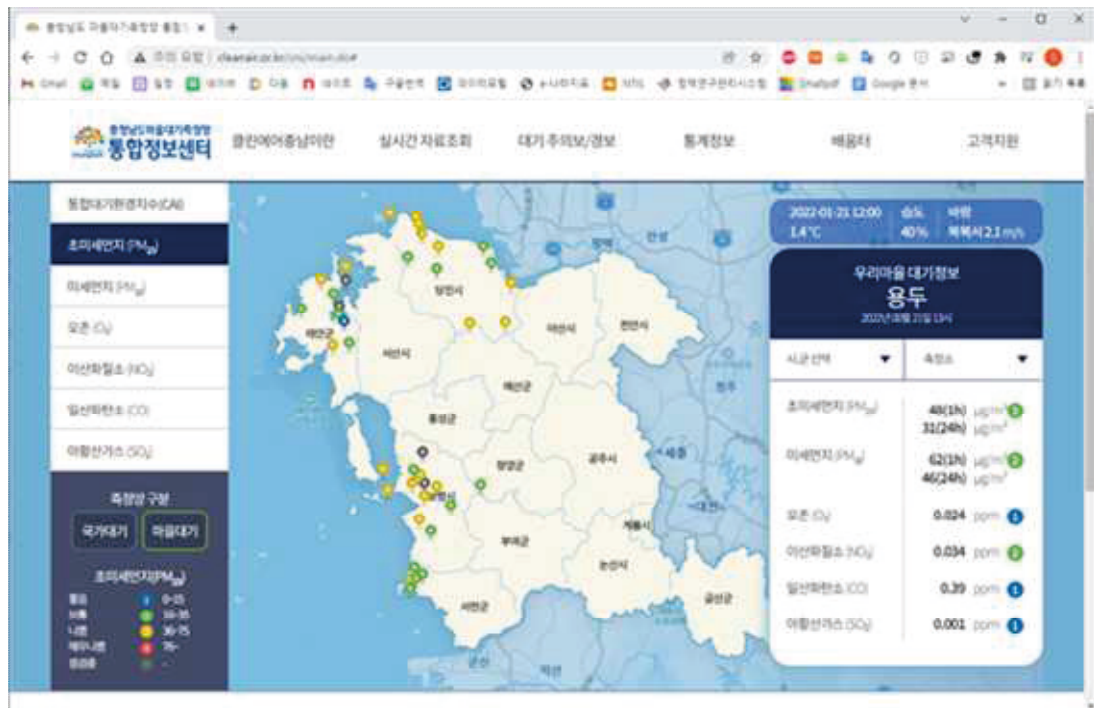
○ 신규사업 제안

사업명 충청남도 마을대기측정망내 고정측정망 확대 운영

개요

- 본 연구 진행 중 설치·운영 중인 고정측정망 2기의 경우 연구용역 종료 후 측정망 소유권과 운영 주체가 충청남도로 이관되어야 함
- 본 연구를 통해 2기의 측정망의 활용성을 확인(대난지도 측정소 - 화력발전소 실시간 배경농도 관측용, 청라면 측정소 - 화력발전소 이동거리별 실시간 농도변화 관측용)되어, 향후 화력발전소 관련 연구나 정책개발 등에 활용성이 높음
- 특히, 충청남도 마을대기측정망의 경우 전국에서 유일하게 대형배출시설 주변에 실시간 대기관측망이 집중적으로 분포하고 국가측정망 수준으로 관리 중에 있어 2기 측정소를 장기적으로 운영하는 효과를 충분히 기대할 수 있음
- 연구용역 종료 후 충청남도 마을대기측정망 운영사업내 대난지도 측정소와 청라면측정소 운영사업을 포함하여 확대 운영

추진
방향



[그림 8.2] 충청남도 마을대기측정망 현황

- 풍향별 배경농도(대난지도 측정소)와 이동경로상 상관성 높은 측정소의 농도변화, 화력발전소 거리별(청라면 측정소 포함) 상관성 높은 측정소의 농도변화 추가 표출 및 DB, 기초 통계분석 서비스 제공

기대
효과

- 마을대기측정망 운영 사업의 측정소 2기 추가 확보
- 배경농도, 거리별 농도변화에 대한 장기 DB 확보로 활용성 증대
 - 관련 우수연구자의 연구유도 등을 통해 관련 정책활용 자료 추가 확보

1.3. 기후정보 DB 시스템

○ 세부과제별 연구결과 DB 시스템 구축, 동위원소 분석결과 수치해석 실시

구분	내용
사전연구	-(1차년) 화력발전소 주변 중심 대기모델링 시스템 구축, 발전소 가동중 단 효과 검토, 고농도 사례일 분석, 고정측정망 위치선정을 위한 바람장 분석 -(2차년) 정보활용 시스템 기본 인터페이스 제작, 발전소 운영 상황에 따른 시나리오 개발 -(3차년) 연구결과 도출을 위한 정보시스템화(미기후, 대기측정자료 등 DB정보시스템 표출 프로그램 개발), 발전소 운영 시나리오에 따른 도내 영향 분석
연구목적	-기후정보 DB 시스템 구축 -모델링 재구성 및 동위원소 분석결과 수치해석
연구내용	-과업추진기간동안 1~4세부의 축정된 DB를 정보화하여 실무자들이 활용할 수 있는 정보시스템 구축 -기여도 분석을 위한 모델링 개선
4차년도 연구성과	-DB 시스템 구축완료 : 화면설계, 서비스 시스템 구축완료, 미기후, 간이 측정망, 고정측정망 자료 등 포함 -기여도 산정을 위한 모델링 시스템 지원방안 마련
연구성과 활용	-화력발전소 주변지역에 대한 광범위한 연구자료를 정책 및 관련 계획수립에 활용
세부과제 연계성	-(전 세부과제) 연구결과 활용성 제고를 위한 DB화
향후계획	-사회적 피해비용 분석결과 등 추가 자료 구축 -충청남도에서 기 구축하고 운영 중인 '충남데이터포털 올담' 호환 시스템 설계

1.4. 생활권 대기질 정보 제공

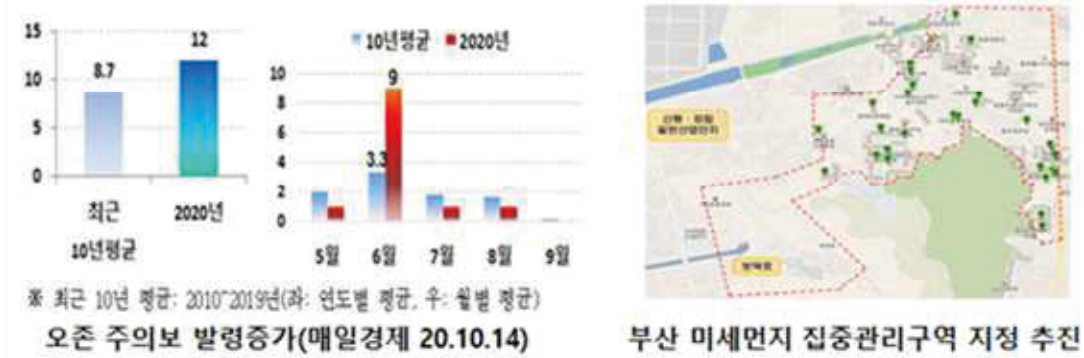
○ 119개 마을별 생활권 대기질 정보제공 및 DB축적

구분	내용
사전연구	-(1차년) 61개 마을별 변환계수 개발, 생활권 대기질 정보 제공(1일 지연 일평균농도), 주민 참여 대기질 측정 -(2차년) 119개 마을 정보제공 확대, 변환계수 정확도, 신뢰도 향상 -(3차년) 반응형 웹개발 및 운영으로 (준)실시간 정보제공(1시간 지연), 환경기준치 초과일 분석·제공
연구목적	-발전소 생활권 대기질 정보 지속(반응형 웹 유지관리) -화력발전소 주변 중점·우선 관리대상 마을 확인
연구내용	-반응형 웹 유지관리 및 정보제공 지속 -대상지점별 2020년 연간 총남환경기준치 초과일 분석
4차년도 연구성과	-반응형 웹 운영, 마을별 데이터 축적 -지자체 및 지역민에 계절별 분석결과 및 연간 총남 환경기준치 초과일 알림(119개 마을) -오존에 대한 집중관리 필요성 확인
연구성과 활용	-생활권 대기질 정보제공 플랫폼 완성(정보 접근성 강화)
세부과제 연계성	-(1세부) 정보DB 시스템을 통한 실시간 정보제공
향후계획	-119개 마을 정보제공 및 환경기준치 초과일 알림 지속

○ 신규사업 제안

사업명	발전소 주변 오존 집중관리 구역 지정·운영
개요	-발전소 주변 오존 1일 기준 초과 마을 최대 251회 발생(4차년도 연구결과) -기술의 한계와 기준 강화로 전국적으로 1일 초과 농도가 빈번히 발생하고 있으나, 상대적으로 넓은 지역을 관리하고 농도 저감 사업을 추진하는데 한계가 발생함 -따라서, 화력발전소 주변지역에 한정하여 오존 집중관리 구역을 지정·운영하여 지역 오존농도 감소를 위한 정책노력을 기울일 필요가 있음 -미세먼지의 경우 「미세먼지 저감 및 관리에 관한 특별법」 제22조에 따라 지정·운영할 수 있으며 부산 등 전국 36곳이 비교적 좁은 지역을 지정하여 운영하고 있음

사업명 발전소 주변 오존 집중관리 구역 지정·운영



[그림 8.3] 오존주의보 발령 증가(좌)와 미세먼지 집중관리구역 지정예(우)

추진
방향

- 충남지역 발전소 주변지역 마을 중 오존농도 초과 정도가 심한 지역을 오존 집중관리 구역으로 설정(전국 최초)
- 지정 구역에 대해 충청남도, 발전사, 민간이 협력하여 오존농도 저감을 위한 사업 추진(사업 아이디어 제안, 정책지원, 예산지원 등 역할 분담)
- 최우선 사업으로 충청남도가 중심이 되어 '충청남도 오존 집중관리 구역 운영계획' 을 수립함
- 운영계획은 세 가지 전략으로 구성할 수 있음
 - ① 저감전략 : 오존관리 계획을 수립하고 협력을 통한 이행 추진
 - ② 회피전략 : 오존 회피 시설을 설치·운영하고 행동요령 교육 등 실시
 - ③ 공감전략 : 발전소 주변 이해당사자간 협력체계 구성·운영

기대
효과

- 국가의 문제를 지역에서 먼저 해결하는 선도정책 추진
- 충남도, 발전사, 시민사회 협력을 통한 오존관리 체계 구축으로 국가 제도화 제안
- 실질적 오존농도 감소는 미미할 것으로 예상되나 작은 것부터 정책 집중을 통한 다양한 파급효과 기대

1.5. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 라이브러리 구축을 위한 발전소 주변지역 시료분석(굴뚝, 재 포함), 대기, 강우, 하천, 저질 중금속 분석결과 비교, 기여도 분석을 위한 대기모델 업데이트 및 예비분석 실시

구분	내용
사전연구	-(1차년) 선행연구 분석, 발전소 소재 4개 지점 원소함량(C, N, S) 분석 및 기여도 추정연구 방법론 수립 -(2차년) 당진지역 동위원소 활용 계절별 대기오염물질 기원 추정 및 동위원소 라이브러리 DB 생산, HYSPLIT-PSCF 모델링 진행 -(3차년) 동위원소 분석 4개 지역확대, 중금속 분석 추가, 강우시료 분석 추가, 대기-강우 상관성 분석
연구목적	-4개 지역 대기오염물질 라이브러리 확보 -동위원소 분석지점에 대한 외부기여도 추정
연구내용	-4개 지역 라이브러리 구축을 위한 시료 확보·분석 -대기, 강우 오염물질간 분석, 중금속 분석 실시 -발전소 영향 파악(석탄원료 및 굴뚝 시료 분석) -기여도 분석을 위한 대기모델링 개선 및 적용
4차년도 연구성과	-시료 분석 결과 제시(2년간 시료 분석완료 후 발전소 주변지역별 라이브러리 발표예정) -라이브러리 발표 후 비교 분석을 위해 굴뚝, 비산먼지(재)에 대한 분석 실시 -대기, 강우시료 SI 고농도 발생, 4세부의 하천, 저질 중금속 분석결과와 비교시 Mn이 의미있는 농도로 확인됨 -대기모델을 활용한 기여도 분석을 위해 모델을 업데이트하고 PM2.5 영향을 확인하기 위한 예비분석결과 도내 시·군 중 홍성군의 가장 높은 영향(10.5%)을 받는 것으로 확인됨
연구성과 활용	-계절별 대기오염물질 기원 및 기여도 규명 -지역 환경영향 DB 구축으로 지역내 관련 연구 활성화 유도
세부과제 연계성	-(3세부) 사회적피해비용 산정을 위한 기초자료로 활용 -(4세부) 오염물질 분석결과와의 연계성 확인
향후계획	-라이브러리 구축(시료 분석 완료 이후) 및 적용성 검토 -지역 환경영향 분석시 활용할 수 있도록 홍보 등 추진

1.6. 거버넌스 및 환류체계 구축

○ 통합 민간환경감시단 운영(안) 제안

구분	내용
사전연구	-(1차년) 발전소 주변지역 주민의견 수렴 -(2차년) 거버넌스 분류체계 수립, 주민 소통 및 연구결과 환류 -(3차년) 거버넌스 분류모델 검증(모델 개발 완료), 이해관계가 의견수렴, 상생협력사업 제안
연구목적	-거버넌스 분류모델 검증결과와 의견수렴 적용 -통합거버넌스 조직 및 운영(안) 제안
연구내용	-3차년도 모델에 대한 이해당사자 의견수렴 -실제 운영 가능한 통합거버넌스 운영방안 제안
4차년도 연구성과	-주민소통강화를 위한 효율적인 거버넌스 운영(안) 확정
연구성과 활용	-충청남도 화력발전소 통합 민간환경감시단 운영 ※ 감시보다 협력을 강조할 수 있도록 명칭변경 제안 : (예)민간환경협력단 (센터)
세부과제 연계성	-(3세부) 피해비용 산정결과 공유시 나타날 수 있는 이해당사자간 갈등을 관리하고 소통창구 역할 등을 수행할 수 있는 조직으로 운영
향후계획	-효율적 운영을 위한 가이드라인 작성 및 운영 -발전소와 지역민의 상생방안 모색

○ 신규사업 제안

사업명	발전소 연계 현장방문형 환경교육
개요	<ul style="list-style-type: none"> -충청남도는 석탄화력발전소를 포함하여 다수의 대형배출시설이 위치하고 있고, 이로 인한 영향을 받고 있음 -대형사업장을 운영 중인 기업들은 환경오염을 유발에 대한 책임을 이행하기 위해 지역상생사업 등을 통해 공동체 사회유지를 위해 노력하고 있음 -충청남도는 “찾아가는 환경교육단”을 발족하여 운영하고자 하였으나 코로나19 등으로 대면접촉이 어려워지면서 맞춤형 교육을 진행하겠다는 계획이 지연되고 있음 -환경교육은 감성 교육, 경제적 피해 교육 위주에서 체감형 교육으로 발전하고 있어, 충남도내 대표적 대규모 배출시설인 화력발전소의 실제 배출시설과 저감노력 등을 보고, 느낄 수 있는 맞춤형 교육 설계와 진행이 필요함
추진 방향	<ul style="list-style-type: none"> -화력발전소(홍보관, 홍보셔틀버스 등 활용)와 충남도내 환경관련 기관(서해안기후환경연구소, 충남보건환경연구원 등)과 연계하는 현장방문형 교육 프로그램 개발 · 각 발전소 : 해당 시설에 대한 홍보를 전담 팀 보유 <ul style="list-style-type: none"> → 산업체를 직접 방문하여 시설을 견학한 후 역사와 업무, 지역사회에 미치는 영향, 환경관리 및 지역사회와의 상생을 위한 노력 등을 소개 · 도내 관련 기관 : 마을대기측정망 운영과 모니터링, 관련 연구결과 등 운영 <ul style="list-style-type: none"> → 관련 환경정책이나 발전소 주변 모니터링 현황, 중장기적인 관리계획 등 소개 -교육프로그램 운영 주체는 통합환경감시단의 고유업무로 운영
기대 효과	<ul style="list-style-type: none"> -발전소의 환경개선 노력과 지역사회에 대한 공헌도를 알려 단순한 환경파괴 주범에서 지역 상생을 위한 공동체라는 발전소 이미지 향상 -현장 맞춤형 교육을 통해 환경시설 이해도 증진과 환경정보 접근 기회 제공 -충청남도 추진 정책결과에 대한 지역주민 정보제공·홍보

Part 2

대기질 측정분석

제1장 서론

1. 연구배경 및 목적
2. 연구범위 및 연구내용
3. 연구추진체계
4. 연구성과
5. 5차년도 주요 연구 추진계획

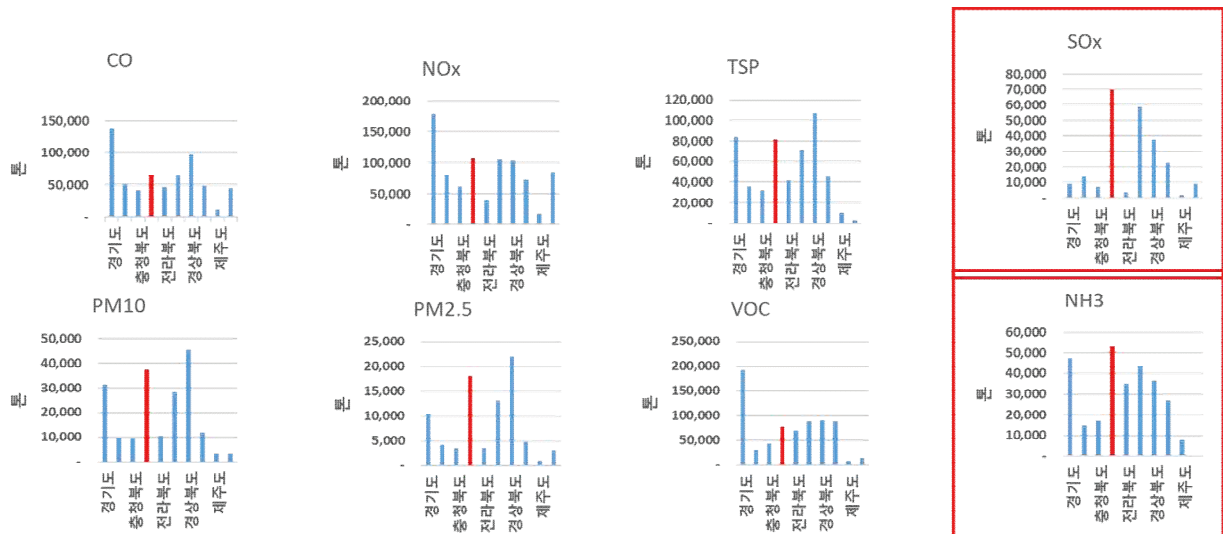
1. 연구배경 및 목적

- 화력발전소 인접 지역에 위치한 주민들이 미세먼지 등 대기오염도를 확인하는 방법은 국가 및 지자체에서 운영하는 일반 대기오염 측정소와 발전사에 운영하는 측정소의 측정결과를 제공받는 것임. 1차, 2차년도 연구 결과에서 민간 대기오염측정소 정도관리와 유지보수 등의 필요성을 확인하였고 충남도에 민간 대기오염측정소를 통합하여 관리하는 방안을 제안한 바, 2020년 하반기부터 발전사에서 운영하던 민간 대기오염측정소를 마을대기 측정소로 충청남도에서 운영하는 성과를 확보하였음
- 현재 우리나라의 오염물질 배출량은 국가미세먼지정보센터에서 대기오염물질 배출목록에 근거한 대기정책지원시스템(CAPSS, Clean Air Policy Support System)을 활용하여 점·면·이동오염원 등에서 배출되는 8가지 대기오염물질(CO, NO_x, SO_x, TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, VOC, NH₃)의 배출량을 매년 산출함

연도	CO	NO _x	SO _x	TSP	PM ₁₀	PM _{2.5}	VOC	NH ₃
2018년 (증감률)	808,801 (-1.1%)	1,153,265 (-2.9%)	300,979 (-4.1%)	617,481 (+4.1%)	232,993 (+6.2%)	98,388 (+6.6%)	1,035,636 (-1.2%)	315,975 (+2.5%)
2017년	817,420	1,189,800	315,530	592,582	218,476	91,731	1,047,585	308,298
2016년	795,044	1,248,309	358,951	611,539	233,085	100,247	1,024,029	301,301
2015년	792,776	1,157,728	352,292	604,243	233,177	98,806	1,010,771	297,167
2014년	594,454	1,135,743	343,161	147,194	97,918	63,286	905,803	292,501

[그림 1.1] 최근 5년간 전국 연도별 대기오염물질 배출량 변화

- 2018년을 기준으로 하여 최근 5년간 전국 연도별 대기오염물질 배출량 변화를 살펴보면 TSP, PM₁₀, PM_{2.5}와 같은 비산먼지의 배출량이 다른 대기오염물질에 비해 증가한 것을 알 수 있음
- 또한, 충남지역의 경우 전국 지역별 오염물질 배출량 비교에서 SO_x와 NH₃ 배출량은 전국 1위, NO_x/PM₁₀/PM_{2.5}는 전국 2위, TSP는 전국 3위를 차지할 만큼 많은 양의 오염물질 배출량을 나타내고 있음



[그림 1.2] 전국 지역별 오염물질 배출량 비교

- 1차년도 연구결과 이동측정망 운영을 통한 오염물질 공간분포를 확보하였고 일반(도시, 교외)측정소와 이동측정기 자료 검정결과 두 측정방법은 $R=0.7$ 이상의 양호한 상관관계를 확인하였으며, 충청남도 내 민간운영 대기오염측정소의 도차원의 검보정 실시 등 관리주체 체계화 구축에 기여하였음
- 2차년도 연구결과 민간대기오염측정소 20개소에서 32개로 확대하였으며, 환경오염 취약지역 주변의 대기질 조사결과, 당진권역 > 태안 또는 보령권역 > 서천권역 순으로 오염도 수준을 보였음. 또한 옥외저탄장 비산먼지의 실측을 통한 배출량 산정의 기반을 확보하였고 예비 조사 결과 저탄장 비산먼지 배출량 증가요인으로 기온, 풍속 감소요인으로 습도를 확인하였음
- 3차년도 연구결과에서 광산란 센서를 이용하여 주변지역 PM_{10} 실시간 연속 측정을 통해 화력발전소 주변지역의 지표대기오염물질 조사의 중요 도구로 활용 가능성을 확인하였음.
 - 실시간 비산먼지 배출량 산정 시스템 구성하고 시행하여 다중회귀모형식을 이용한 PM_{10} 배출량 예측 모델식을 개발하는 한편, 배출량 증가에 대한 예측가능성을 확인하였음. 면오염원시설(저탄장)에 대하여 실시간 비산먼지 배출을 평가하였으나, 회처리장에 대한 비산먼지 배출량 평가자료는 부족하여 화력발전소의 비산먼지 배출량 자료 제공 필요성을 재확인하였음

- 이에, 4차년도 2세부에서는 충청남도 내에 환경취약지역인 화력발전소 주변지역의 현황을 조사하기 위해
 - 1차 ~ 3차년도 연구결과의 연속성을 고려한 1)화력발전소(시설) 주변지역 현황조사·분석에 필요한 각종 통계 연보와 수집된 자료를 바탕으로 연구 대상지역의 일반 현황 분석, 화력발전소 운영 자료 분석, 국가 대기오염물질 배출량의 최신 및 경향성 분석 등을 수행함
 - 또한, 화력발전소 인접 지역의 해상도 높은 대기질의 기초자료를 확보하기 위해 2) 주민 참여 하에 화력발전소 인접 주변지역의 지표대기오염물질 조사를 수행하고, 실시간으로 화력발전소 내 회처리장 비산먼지 Flux 배출량 산정과 활용방안 제안을 위해서 3) 실시간 비산먼지 Flux 배출량 모니터링 시스템 개발 및 테스트베드를 운영하였음
- 5차년도는 4) 다양한 상황에서의 실시간 회처리장 시설 배출량 산정 및 결과 해석, 5) 실시간 비산먼지 조기경보 시스템을 제안할 계획임
- 이러한 연구 결과를 바탕으로 회처리장의 실시간 Flux 배출량 분석과 화력발전소 인접지역의 지표 대기오염물질 조사결과 자료를 활용하여 주민은 비산먼지 상시 감시체계 활용, 발전사는 회처리장의 비산먼지 영향 발생시 선제적 대응, 충청남도는 각종 비산먼지 저감을 위한 정책 추진 등 이해 당사자에게 사업·감시체계에 필요한 기초자료를 제공하고자 함

2. 연구범위 및 연구내용

2.1. 시간적 범위

- 연구 수행기간 : 2020. 12월 ~ 2021. 12월 (1년)
- 현황 자료분석 : 최근년도 기준 5 ~ 10년 자료 수집과 분석
 - 충청남도 내 통계자료, 기상자료, CAPSS 배출량 자료
- 회처리장 PM₁₀ Flux 측정장치 구축 및 운영 : 2021. 3월 ~ 2021. 12월
- 실측에 의한 대기오염조사 : 2021. 01월 ~ 2021. 10월 (2회)

2.2. 공간적 범위

- 당진화력발전과 신서천화력발전
 - 당진화력 : 회처리장
 - 신서천화력 : 회처리장
 - 주변지역 : 신서천화력 주변 지역 20개소

2.3. 내용적 범위

- 화력발전소(시설) 주변지역 현황조사 · 분석
- 화력발전소 주변지역의 지표 대기오염물질 조사
- 시스템 개발 및 테스트베드 운영
- 회처리장 시설의 비산먼지 산정 및 관리방안 도출
- 실시간 비산먼지 조기경보 시스템 제안

2.3.1. 화력발전소(시설) 주변지역 현황조사 · 분석

- 1차년 ~ 3차년도와 연계한 최신 자료 업데이트
- 각종 통계연보와 활동도 자료를 통한 자료 구축
 - 충청남도 · 시 · 군 통계연보, 기상청 통계연보, 에너지 통계연보 등 활용
- 국가대기오염물질 배출량 CAPSS 최신자료의 분석
 - 연도별, 지역별, 물질별 자료 분석
- 발전소별 원료 사용량, 발전량, 대기오염 배출량 등 현황조사(발전사 제공자료 또는 자체 수집)
- 현재의 배출량 산정방법의 한계와 문제점 도출

2.3.2. 화력발전소 주변지역의 지표 대기오염물질 조사

- 신서천화력 주변지역 대기질 조사
 - 측정물질 : 아황산가스(SO_2), 미세먼지(PM_{10}), 총부유분진(TSP)
 - 측정지점 및 횟수 : 20개소, 총 2회
- 화력발전 주변지역의 지표 대기오염물질 기초자료 확보

2.3.3. 시스템 개발 및 테스트베드 운영

- 실시간 비산먼지 Flux 배출량 모니터링 프로그램 및 앱 개발 및 테스트베드 운영 및 문제점 개선(trouble shooting)
- 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템 구성 및 운영
 - 3차원 기상장비, 미세먼지 측정기(광산란 방식) 활용
 - Flux 배출량 산정은 Flux-Gradient Method(경도법) 이용하여 실시간으로 산정

2.3.4. 다양한 상황에서의 실시간 회처리장 시설 배출량 산정 결과 및 해석

- 대상시설 : 당진화력 및 신서천화력 회처리장 시설
- 다양한 상황(미세먼지 주의보·경보, 비상저감조치 등)의 회처리장 Flux 배출량 산정 결과 및 해석

2.3.5. 실시간 비산먼지 조기경보 시스템

- 발전사 별 회처리장 관리방안 및 회처리장 관리방안 도출
- 고농도 미세먼지 발생 및 비상저감조치 상황 시의 회처리장 배출량과 농도 측정결과 기반 조기 경보시스템 활용방안 제안

3. 연구추진체계

3.1. 화력발전소(시설) 주변지역 현황조사 · 분석

- 화력발전소 주변지역 자료구축을 위해 각종 통계연보 분석을 위해 현장자료를 수집하여 ‘연구대상 지역의 일반 현황분석’ 자료구축과 당진권역, 태안권역, 보령권역, 서천권역 주변의 상세 분석을 통한 ‘대기오염 취약지역의 집중분석, 충청남도의 에너지사용 및 배출량의 분석을 위해 ‘에너지통계연보 및 국가 대기오염배출량 자료 비교 분석’ 을 실시



[그림 1.3] 충청남도 및 화력발전소 주변지역의 자료 분석방법

3.2. 화력발전소 주변지역의 지표 대기오염물질 조사

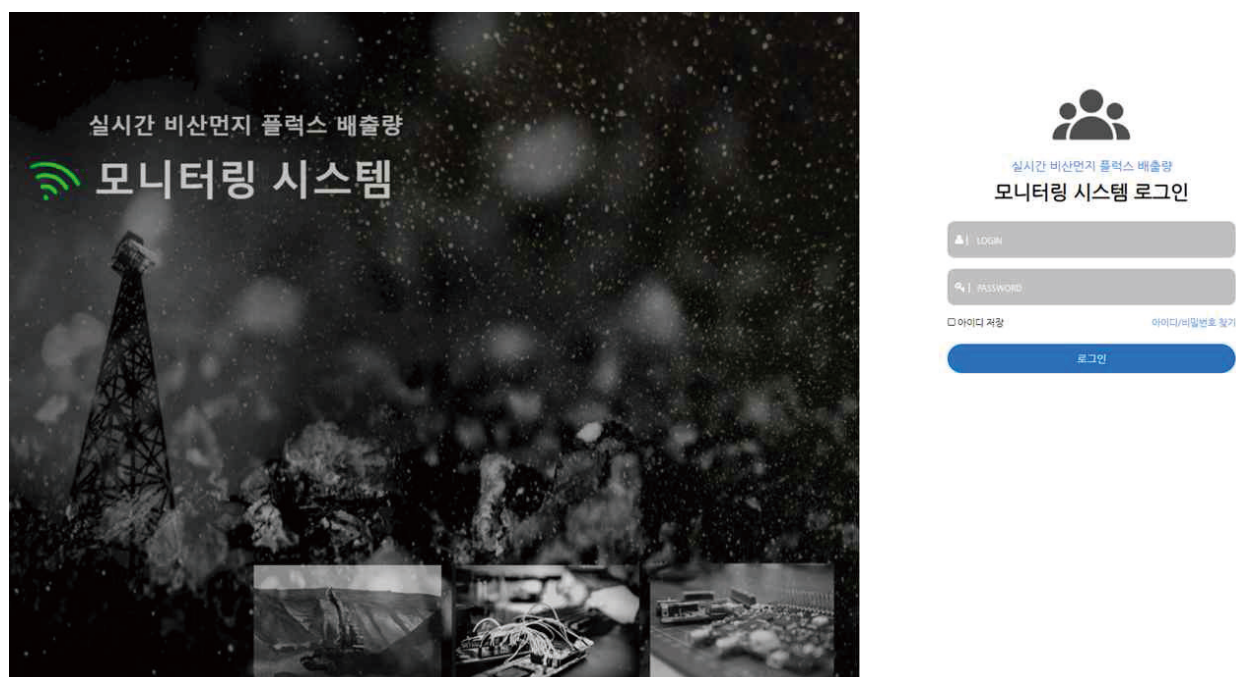
- 화력발전소 주변지역 지표 대기오염물질 조사를 위해 당진화력 주변 지역 반경 5km 이내 20개소의 측정지점을 대상으로 아황산가스(SO_2), 미세먼지(PM_{10}), 총부유분진(TSP)에 대해 조사를 실시
- 아황산가스(SO_2)측정은 Passive Air Sampler 이용하였고 미세먼지(PM_{10}) 측정은 센서기반 광산란 측정기를 이용하여 2회 조사하여 측정기간별 지점간 비교 평가를 실시



[그림 1.4] 화력발전소 주변 인접지역의 대기오염도 조사방법

3.3. 시스템 개발 및 테스트베드 운영

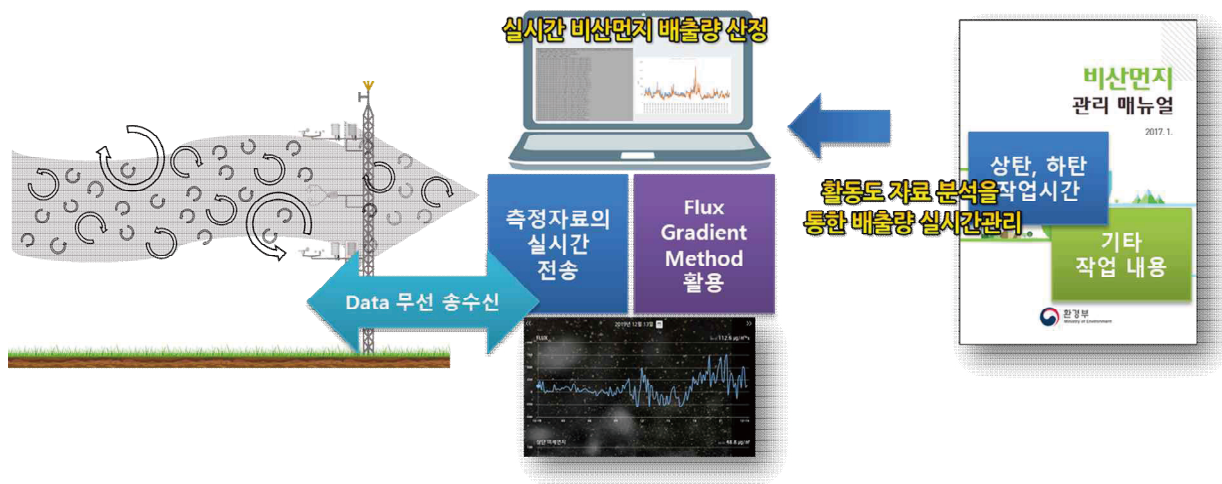
- 기상장비 관리, 미세먼지 관리, 비산먼지 Flux 계산 등의 웹프로그램의 기능을 가진 모니터링 시스템 개발
- 데이터 누락 관리 방안 모색, 측정기 설치 단순화 진행을 포함한 테스트베드 운영



[그림 1.5] 시스템 개발 및 테스트베드 운영

3.4. 회처리장 시설의 비산먼지 배출량 산정 및 관리방안 도출

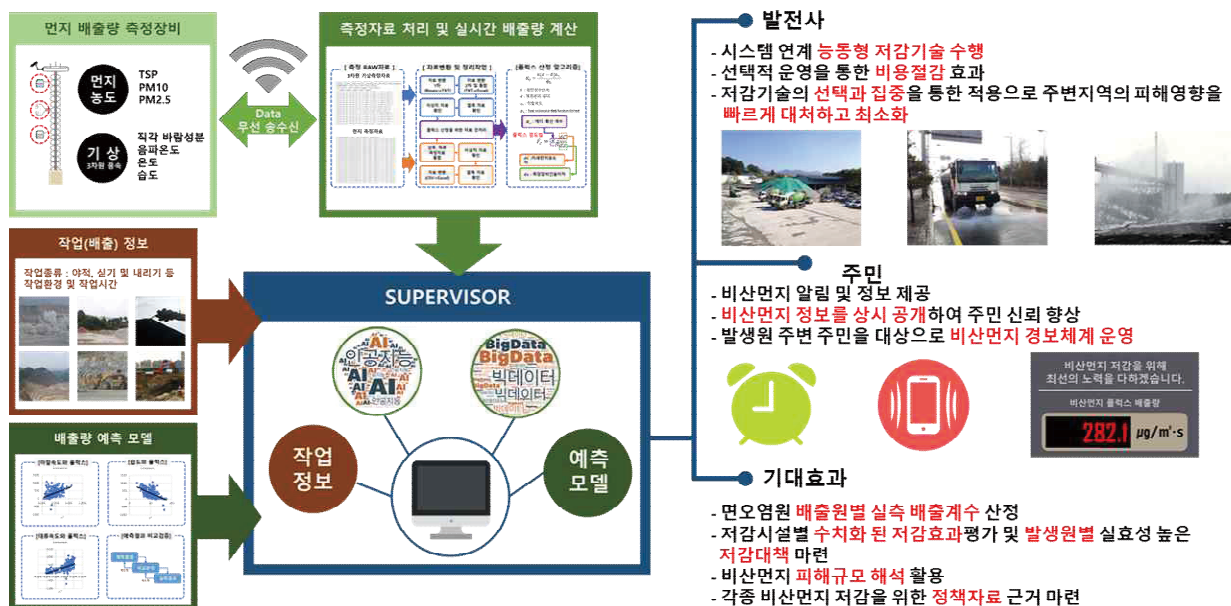
- 실시간 회처리장의 비산먼지 Flux 배출량 산정을 위해 회처리장에 Flux-Gradient Method(경도법)에 필요한 측정장비 설치와 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템을 구성·운영하여 실시간 PM10 Flux 배출량을 확보
- 회처리장의 비산먼지 관리방안 모색을 위해 PM10 Flux 배출량을 이용한 회처리장 비산먼지 관리실태 및 추가관리 방안을 제시하고자 함



[그림 1.6] 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템 및 능동제어 관리방안 도출

3.5. 실시간 비산먼지 조기경보 시스템

- 석탄 화력발전소 운영으로 인해 석탄회가 배출되고 있으며 이를 처리하기 위해 3차년도 연구결과에서 검증된 정도법을 이용한 Flux 배출량 산정방법을 활용하여 연구
 - 회처리장을 대상으로 비산먼지 저감 대책 및 주변 피해 현황 파악을 위한 기초자료와 국가 대기오염물질 배출량에 포함되어 있지 않은 회처리장 비산먼지 배출량 조사기법을 제안함



[그림 1.7] 비산먼지 모델식 개발 및 조기경보 시스템 제안

4. 연구성과

4.1. 주요 연구성과

- 화력발전소 운영으로 인한 최근접지역의 공간 해상도 높은 대기질 기초자료 확보를 위해 간이대기측정기(Passive Sampler)와 센서기반 광산란 측정기를 이용하여 신서천 화력발전소 반경 5 km 이내의 인접지역 20개소 측정지점을 대상으로 아황산가스, 총부유분진, 미세먼지를 측정하였음
- 신서천 화력발전소 가동 전과 가동 후 상황을 나눠 측정을 진행하였으며, 총부유분진의 경우 2차 조사 당시 회처리장 가동 중단과 국외 유입 영향으로 인하여 입자상 물질 크기가 작아진 것도 확인할 수 있었음
- 아황산가스의 경우 전체 조사기간 결과 회처리장은 2.15 ppb로 나타났으며 홍원리(0.16 ppb), 내도둔(0.15 ppb), 마량리(0.06 ppb)로 전체적인 농도는 낮으나 조사기간 주풍인 북풍의 영향으로 발전소 주변 마을인 홍원리, 내도둔에서 상대적으로 높은 농도를 나타냄
- 미세먼지의 전체 조사기간 결과 회처리장은 36 μ g/m³ 로 나타났으며 홍원리(37 μ g/m³), 내도둔(39 μ g/m³), 마량리(40 μ g/m³)로 조사기간 주풍인 북서풍, 북풍의 영향을 받아 회처리장 주변 마을의 농도가 회처리장과 비슷한 수준으로 나타남
- 충남지역 발전소는 북쪽이나 서쪽 해안가 근처에 위치해 있으며, 전체 조사기간 주풍인 북서풍, 북풍과 1차 조사(1월), 2차 조사(11월)인 겨울의 계절풍으로 인해 주변 마을로 확산되어 가는 것을 확인할 수 있었음
- 브레드보드로 구성된 메인보드 사용으로 인한 헤더핀 빠짐 현상 및 기기 내부 펄스 문제로 데이터 누락 현상 등의 문제를 아두이노 PCB 판넬로 교체함으로써 데이터가 누락되지 않고 정상적으로 데이터를 수집할 수 있었음

- 또한 상·하단 기상측정기 내부와 전체적인 구성을 4차년도 회처리장 설치와 유지보수를 위해 단순화 작업을 진행하였으며, 제작이 완료된 기상측정기를 건물 내부와 건물 외부에서 테스트베드 운영 과정을 통하여 모든 측정장비가 정상 가동되게 하여 기술적 완성도를 높일 수 있었음
- 측정기기에서 수집한 실시간 비산먼지 배출량 측정값을 측정기기와 하드웨어적 설정, 측정값 관리 기능을 하는 LoggerNet 프로그램을 이용해 웹·모바일 기반 실시간 비산먼지 배출량 모니터링 프로그램을 개발하였음
- 위와 같은 측정기기 테스트베드 운영과 실시간 비산먼지 발생량 모니터링 시스템 개발을 완료한 후 당진화력 및 신서전화력 회처리장 내 실시간 비산먼지 배출량 측정장비를 설치하였음
- 회처리장의 실시간 비산먼지 배출량 측정결과, 기존에 저탄장이나 회처리장 주변의 민원에서도 나타나듯이 풍속이 강해지면서 미세먼지 농도는 낮아지나 비산먼지 배출량은 강한 바람에 의해 증가하는 경향을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과가 본 연구에서 수행한 비산먼지 실시간 측정의 중요성과 초단기적인 대응의 필요성을 반증하는 결과라 할 수 있음



[그림 1.8] 기상상황에 따른 실시간 배출량 측정결과

- 3차년도 연구에서 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템을 이용한 실시간 Flux 배출량과 산정 및 활용 가능성을 확인하였으며, 본 연구를 통하여 국내 최초 Flux Gradient Method(경도법)과 난류 현상을 고려한 실시간 비산먼지 발생량(Flux)을 산정할 수 있는 기술적 성과를 확보하였음

- 실시간 측정된 배출량을 고려하지 않고 정해진 시간대의 단편적인 관리방안을 경보 단계 시스템과 비산먼지 배출량에 기반하여 고농도 상황을 포함한 모든 상황 시 체계적인 비산먼지 저감기술 및 능동적 저감기술 운용을 제안함
- 또한, 비산먼지 발생이 불가피한 작업의 경우 작업을 분산하여 비 작업구역은 방진망 도포, 살수설비 등의 비산먼지 저감기술을 적용하고 작업구역의 경우, 북서풍이나 서풍 계열인 계절풍 상황 등 기상악화 시 작업중단 및 비산먼지 억제제 살수 등 기상 상황을 고려하여 연계 대응이 이뤄질 수 있도록 대안을 제시함
- 이러한 결과를 바탕으로 고농도 미세먼지 상황 발생 시 능동적 제어와 같은 회처리장 관리방안과 조기경보 시스템을 활용하여 발전소 인근지역 주민의 피해 최소화에 기여할 수 있을 것으로 판단됨

4.2. 연구성과 활용 및 확산

4.2.1. 학술대회 발표 : 2021년 한국냄새환경학회 추계학술대회

- 한국냄새환경학회 주관 2021년도 추계학술대회에 2세부 연구책임자(김선태)와 연구원(강정호, 어현준, 전형재, 김건호)이 참석하여 본 연구과제를 활용하여 면오염원의 악취 플럭스 배출량 산정 시스템 개발을 주제로 학술 논문집에 게재하였음
- 일시/장소 : 2021년 11월 11일 ~ 11월 12일 / 메종글래드 제주 컨벤션홀



[그림 1.9] 학술적 성과(학술대회참가)

4.2.2. 석사학위논문 학술 실적

- 4차년도 2세부 연구결과를 활용하여 (어현준 : 난류모델을 이용한 비산먼지 배출량 산정 방법 및 특성연구), (강정호 : 광산란법을 이용한 미세먼지 간이측정기의 정도 관리), (황운호 : Comparison of PM2.5 and PM10 Concentration between Light Scattering and β -ray Absorption Method under Different Humidity Conditions)와 같은 석사학위논문을 작성하여 학술적 성과에 기여하였음



[그림 1.10] 학술적 성과(석사학위논문)

5. 5차년도 주요 연구 추진계획

5.1. 대기질 측정 및 배출량 분석

- 1차년도부터 4차년도까지 화력발전소별 원료사용량 및 발전량 등 현황조사와 함께 분석을 진행하였으며 굴뚝 TMS 중심으로 발전소의 대기오염물질 연구를 추진하였음.
 - 화력발전소의 영향을 보다 명확히 분석하기 위해서는 화력발전소의 협조가 매우 절실하나, 일부 발전소의 경우에는 외부 비공개자료를 사유로 원활히 제공받지 못한 부분이 있어 향후, 연구의 정확도 및 품질 제고를 위해 발전사의 적극적인 협조가 필요할 것으로 사료
- 5차년도에는 발전소에 보다 적극적인 협조와 정보 제공을 요청하여 화력발전소(시설) 실측 기반 대기오염물질 배출량을 평가하고 국가배출량 자료를 비교 분석하여 단기 및 중기의 특성을 분석할 예정임.
 - 또한, 화력발전소 회처리장 등 주요 오염배출시설 영향범위를 설정하여 계절별 민원 발생시기를 고려한 비산먼지 기여농도를 예측하고, 오염배출 상관성 및 영향 정도를 종합적으로 연구할 예정임

5.2. 화력발전소 실측기반 비산먼지 배출량 평가 및 국가 배출량 산입 제안

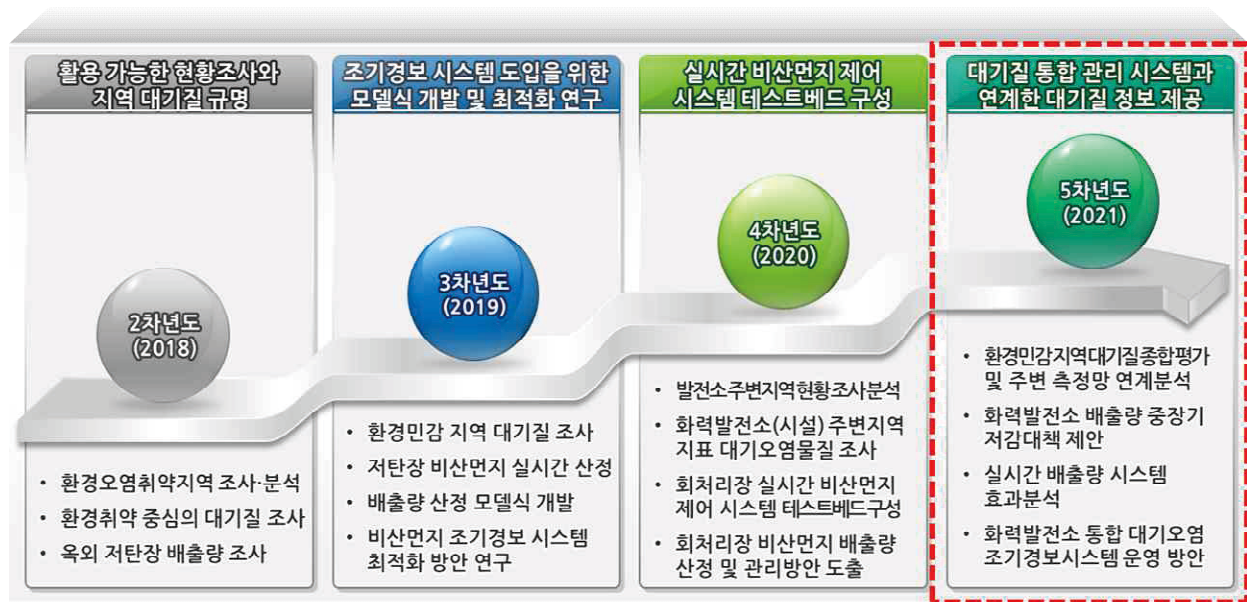
- 1차년도부터 3차년도까지 연구를 통해 국립환경과학원의 대기오염물질 배출량 산정 방법의 한계를 확인하고, 화력발전소 저탄장 중심의 미세먼지 배출량 실측 평가를 수행하여 ‘실시간 비산먼지 배출량 산정 시스템 구성 및 Flux 모델식’을 개발함
 - 4차년도에는, 실시간 비산먼지 측정기기의 테스트베드 운영과 모니터링시스템 개발을 완료하여 회처리장 시설에 대한 지속적인 실시간 비산먼지 배출량 조사가 가능하도록 기반을 마련함
- 5차년도 연구에서는 회처리장 시설에 대한 지속적인 실시간 비산먼지 배출량 조사를 통해 종합평가를 실시하고 국가 대기오염물질 배출원 분류체계에 회처리장을 추가하여 실시간 비산먼지 배출량 산입 제안을 진행할 예정

5.3. 회처리장 복토 및 작업환경에 따른 비산먼지 발생량저감 대책효과 분석

- 4차년도 연구를 통해 실측기반 실시간 비산먼지 배출량을 조사할 수 있게 되었고, 기상상황 및 작업환경에 따른 비산먼지 발생량과 저감 대책효과에 대해 분석이 가능해짐
- 5차년도에는 기온, 풍속, 상대습도, 주/야간 등 기상상황에 따른 비산먼지 배출량 분석과 회처리장의 복토 및 작업환경에 따른 실시간 비산먼지 배출량 분석을 연계하여 연구를 진행하고,
 - － 발전소 측에서 내부 출입 측정과 작업환경 자료제공 협조가 가능할 경우 하역장 등 주요 오염배출시설의 비산먼지 발생량도 함께 분석하여,
 - － 비산먼지 배출량 증장기 저감 대책을 제안하고 살수, 먼지 흡입 차량 운영, 조업 중단 등 저감 대책에 따른 효과 분석도 함께 연구를 진행할 예정임
- 앞서 언급한 바와 같이 관련 연구를 진행하기 위해서는 발전소의 적극적인 협조가 필수적이며, 5차년도에도 지속적으로 충청도와 함께 발전사의 협조를 요청하여 연구를 목적을 달성할 수 있도록 노력할 계획임

5.4. 화력발전소 통합 대기오염 조기경보시스템 운영방안

- 5차년도는 4차년도 구축한 회처리장 실시간 비산먼지 배출량 모니터링시스템을 충남 지역 모든 발전소에 적용하여 통합 대기오염 조기경보시스템 운영방안을 분석하고
 - － 발전소 주변 국가대기오염측정소와 연계 해석을 진행하여, 충청남도 내 종합관제시스템 연계 활용방안을 검토할 계획임
 - － 아울러, 1세부 생활권 대기질 정보제공 시스템과 통합하고 정보를 제공하여 정보 접근성을 높일 예정



[그림 1.11] 5차년도 주요 연구 추진계획

제2장 화력발전소(시설) 주변지역 현황 조사 · 분석

1. 연구대상 지역의 일반현황분석
2. 화력발전소 현황분석
3. 소결론

1. 연구대상 지역의 일반 현황분석

1.1. 입지여건

- 1~3차년도 보고서 참조
 - 1차년도 최종보고서 : 255p
 - 2차년도 최종보고서 : 291p ~ 292p
 - 3차년도 최종보고서 : 309p ~ 310p

1.2. 지형분석

- 1~3차년도 보고서 참조
 - 1차년도 최종보고서 : 255p ~ 278p
 - 2차년도 최종보고서 : 292p ~ 294p
 - 3차년도 최종보고서 : 310p ~ 312p

1.3. 인구현황

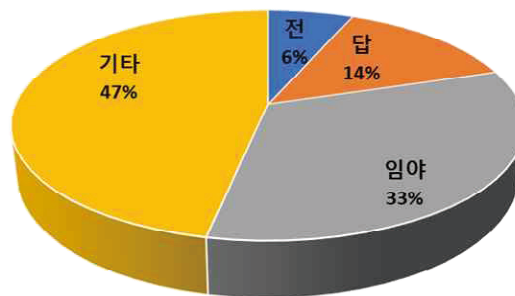
- 충청남도의 총 인구는 2020년 12월 기준, 2,121,029명으로 세대수는 989,963세대이며 세대당 인구수는 2.14명임
 - 시·군별 인구수는 천안시(658,808명), 아산시(316,129명), 서산시(175,591명), 당진시(166,249명) 순으로 많으며, 적은 순으로는 청양군(30,948명), 계룡시(42,822명), 금산군(51,413명), 서천군(51,866명), 태안군(62,214명)으로 나타남
 - 화력발전소 지역 내에서의 인구증감률은 당진시(0.15%)를 제외하면 서천군(-1.14%), 보령시(-1.18%), 태안군(-0.64%)은 인구수가 감소 추세임

[표 2.1] 시군별 인구현황

구분	2020년 말	2021년 4월	세대수	인구증감율 ('20년 대비)
충청남도 계	2,121,029	2,116,452	989,963	-0.18
시 계	1,681,048	1,679,933	769,455	-0.00
천안시	658,808	657,410	293,853	-0.16
공주시	104,545	103,782	51,066	-0.76
보령시(화력)	100,229	99,137	49,230	-1.18
아산시	316,129	318,699	142,167	0.98
서산시	175,591	175,817	80,212	0.25
논산시	116,675	115,520	57,702	-1.07
계룡시	42,822	43,235	16,826	0.98
당진시(화력)	166,249	166,333	78,399	0.15
군 계	439,981	436,519	220,508	-0.84
금산군	51,413	50,950	25,797	-0.94
부여군	65,354	64,527	33,308	-1.42
서천군(화력)	51,866	51,289	26,700	-1.14
청양군	30,948	30,658	16,324	-1.16
홍성군	100,102	99,755	46,754	-0.34
예산군	78,084	77,538	38,950	-0.79
태안군(화력)	62,214	61,802	32,675	-0.64

1.4. 토지이용

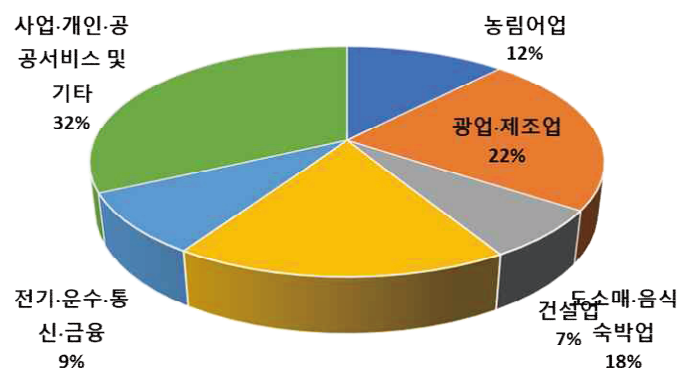
- 충청남도 지역의 2019년 12월 기준 토지 종별 현황을 살펴보면, 임야가 33% (4,085.09km²)로 가장 많으며, 답 14%(1,685.18km²), 전 6%(790.5km²) 순으로 나타남



[그림 2.1] 토지종별(2019년 12월 기준) 현황

1.5. 산업 · 경제활동

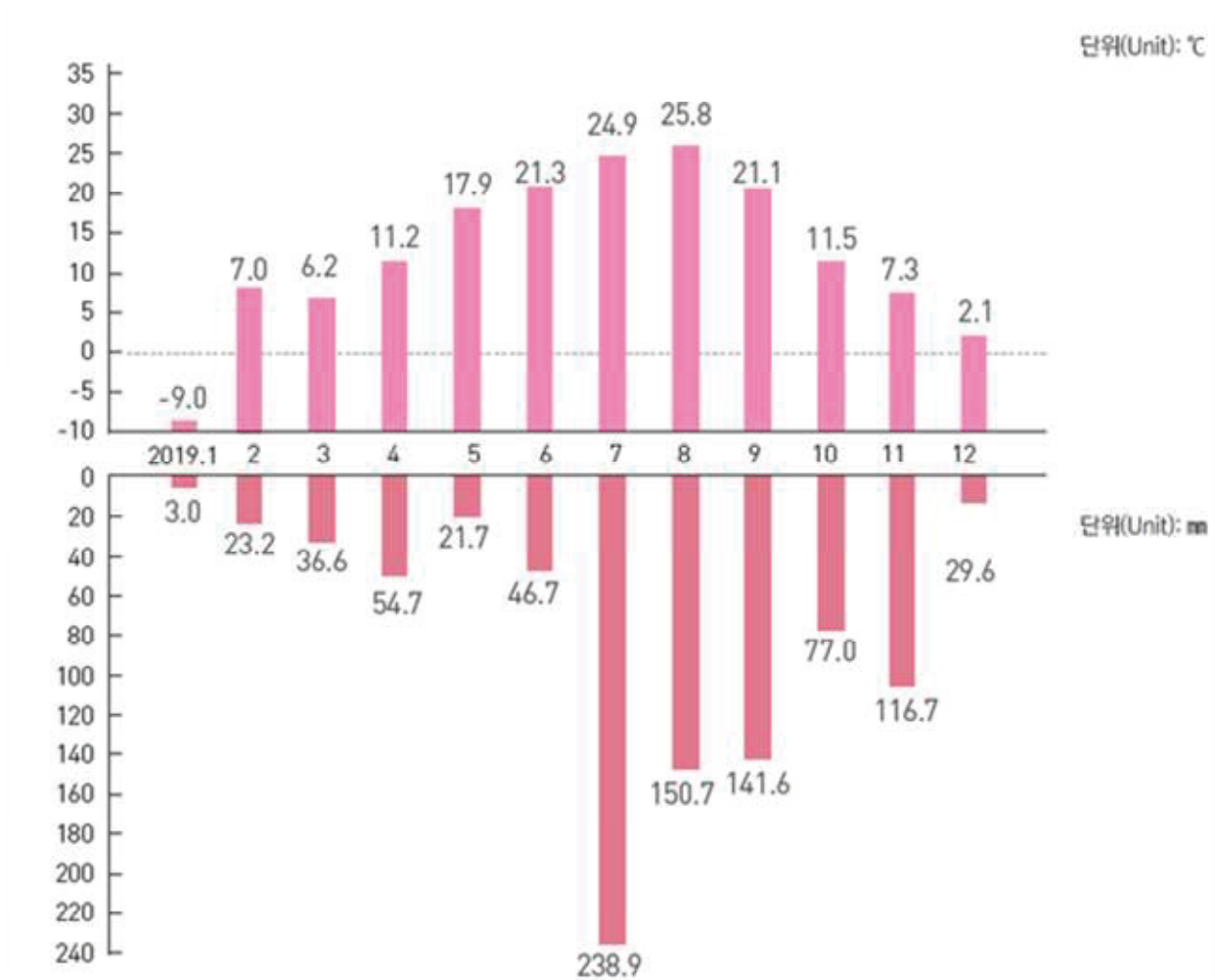
- 2019년 기준 경제활동별 부가가치액을 기준으로 산업구조를 보면, 충청남도는 사업 · 개인 · 공공서비스 및 기타업 32%(384 천명), 제조업(광공업) 22%(270 천명), 도소매 · 숙박음식점업 18%(211 천명)의 비중이 크고 건설업이 7%(83 천명)로 비중이 낮은 경제활동 인구로 분석됨



[그림 2.2] 산업별 취업자 현황(2019년 기준)

1.6. 기상 및 기후특성

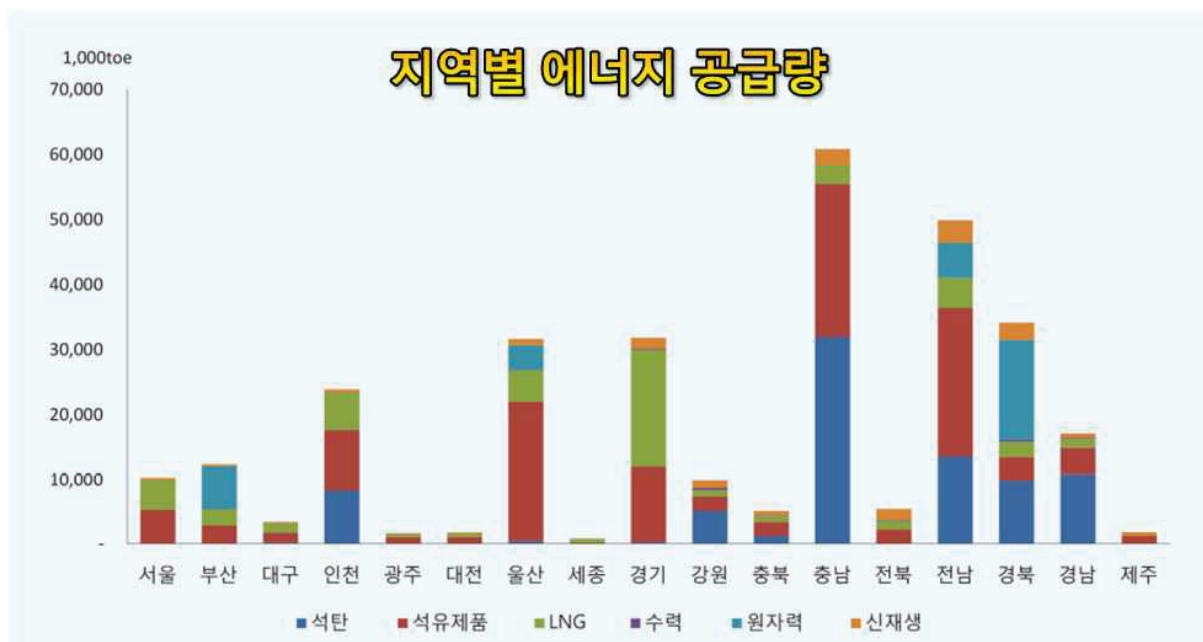
- 2019년 기준 충청남도의 월별 기온변화는 최저기온 -9.0°C 로 1월의 기온이 낮아 가장 추웠으며, 반대로 8월이 25.8°C 로 가장 더웠던 것으로 관측됨. 연평균 기온 또한 8월이 가장 더웠고 1월이 가장 추웠던 것으로 나타나고 있음
- 월별 강수량은 7월, 8월 순으로 높았으며 각각 238.9mm, 150.7mm로 확인됨. 1월이 3.0mm로 가장 낮은 강수량을 보이고 있음



[그림 2.3] 월별 기온 및 강수량 변화(2019년 기준)

1.7. 에너지 사용량

- 2020년도 지역에너지 통계연보(산업통상자원부, 에너지경제연구원)에 의하면 충청남도는 2018년기준 60,820천 toe의 1차 에너지를 공급 받았으며, 이 중 석탄 31,963천 toe(52.3%), 석유제품 23,506천 toe(38.7%), LNG 2,869천 toe(4.7%), 수력 16천 toe, 신재생 2,465천 toe(4.1%)로 석탄에 의한 에너지 공급이 가장 높음
- 석탄에 의한 1차 에너지 공급을 지역별로 비교하면, 충청남도 60,820천 toe (20.1%), 전남 49,884천 toe(16.5%), 경북 34,154천 toe(11.3%), 경남 17,125천 toe(5.7%), 울산 31,622천 toe(10.4%) 순으로 충청남도의 석탄 공급량이 전국 1위임



[그림 2.4] 지역별 1차 에너지 공급량(2020 지역에너지 통계연보)

- 2020년 지역에너지 통계연보에 의한 충청남도 1991년 ~ 2019년 석탄류 소비량을 분석하면, 충청남도는 2011년 4,291천 toe로 급격한 석탄사용이 발생하였고 이어서 2014년 7,552천 toe, 2017년 7,324천 toe로 과거 석탄화력발전소가 운영되고 있었음에도 불구하고 2011년 전에는 석탄에 의한 에너지 사용이 50천 toe 수준이고, 2011년 이후에 크게 증가하였으며 2017년 ~ 2019년은 유사한 수준으로 보임

[표 2.2] 충청남도 최종에너지 원별 소비량(단위 : 천 toe)

구분	합계	석탄	석유제품	천연 및 도시가스	전력	열에너지	신재생
2009	20,660	52	16,772	985	2,762	—	89
2010	21,468	50	16,742	1,262	3,338	—	77
2011	25,908	4,291	16,565	1,262	3,668	—	122
2012	28,424	5,812	17,184	1,454	3,826	5	143
2013	30,612	6,341	17,390	1,730	4,112	6	1,032
2014	33,747	7,552	18,967	1,588	4,277	14	1,348
2015	34,045	7,735	19,352	1,288	4,067	—	1,603
2016	35,487	5,825	22,727	1,317	4,167	—	1,451
2017	37,195	7,324	22,551	1,391	4,315	42	1,572
2018	37,346	7,566	23,440	1,438	4,473	34	395
2019	37,223	7,348	23,441	1,503	4,528	36	368



[그림 2.5] 충청남도의 원별 에너지 소비량(지역에너지 통계연보)

- 이러한 원인은 지역에너지통계연보(2011년 ~ 2013년)자료에 따르면 충청남도의 제철용-유연탄은 2011년 6,065,000톤으로 2010년 0톤에서 급격히 증가하였기 때문인 것으로 판단되며, 이는 현대제철의 조업 시작 등 에너지 다소비업종의 설비 증설에 따른 결과로 보임
- 결국, 원료사용량의 증가는 충남도의 배출량 증가와 직접적으로 관련된 사항이므로 과거 석탄 사용의 급격한 증가가 미친 영향 분석과 국가 대기오염배출량에 정량적으로 얼마나 기여하였는지 확인이 필요함

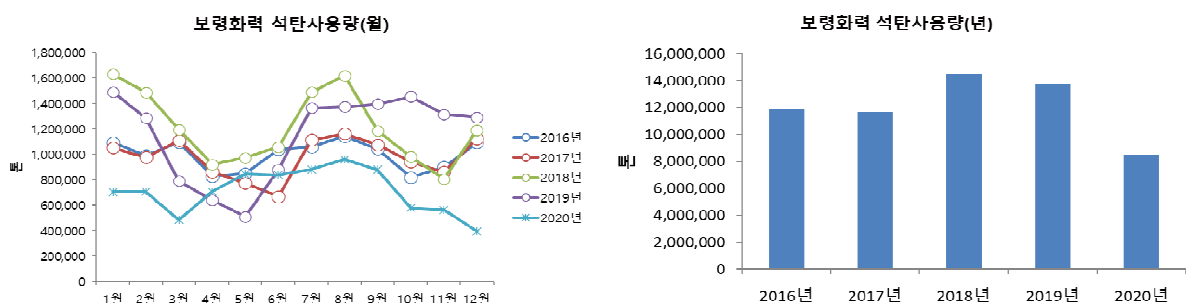
2. 화력발전소 현황분석

2.1. 지리적 특성

- 1~3차년도 보고서 참조
 - 1차년도 최종보고서 : 262p ~ 263p
 - 2차년도 최종보고서 : 301p ~ 303p
 - 3차년도 최종보고서 : 319p ~ 321p

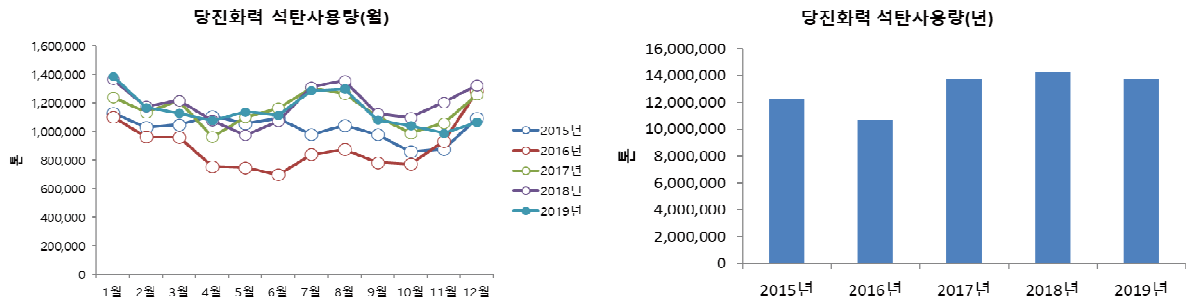
2.2. 발전사별 석탄사용량 비교

- 정상적으로 가동하여 전력을 생산하는 발전소 기준으로 보령화력 및 태안화력(2016년~2020년), 당진화력(2015년~2019년)에서 제공받은 자료를 분석함
- 보령화력은 냉/난방에 의해 전력소비가 많은 겨울(12월~3월)과 여름(6월~9월)의 석탄사용량이 높으며 최근 2020년도의 석탄사용량이 8,525,935톤으로 2019년과 비교하여 감소한 상황임



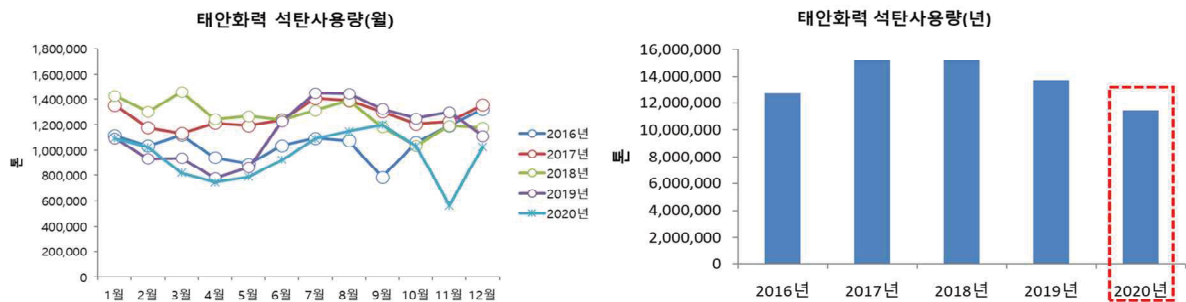
[그림 2.6] 보령화력발전소의 월 및 연도별 석탄사용량

- 당진화력은 냉/난방에 의해 전력소비가 많은 겨울(12월~3월)과 여름(6월~9월)의 석탄사용량이 높은 경향이 보이나 전체적으로 월별 사용량에 큰 변동이 없음. 연도별 사용량은 2016년을 기점으로 증가하는 추세로 2017년 13,786,108톤, 2018년 14,295,948톤, 2019년 13,763,665톤으로 최근 3년간은 변화가 거의 없음



[그림 2.7] 당진화력발전소의 월 및 연도별 석탄사용량

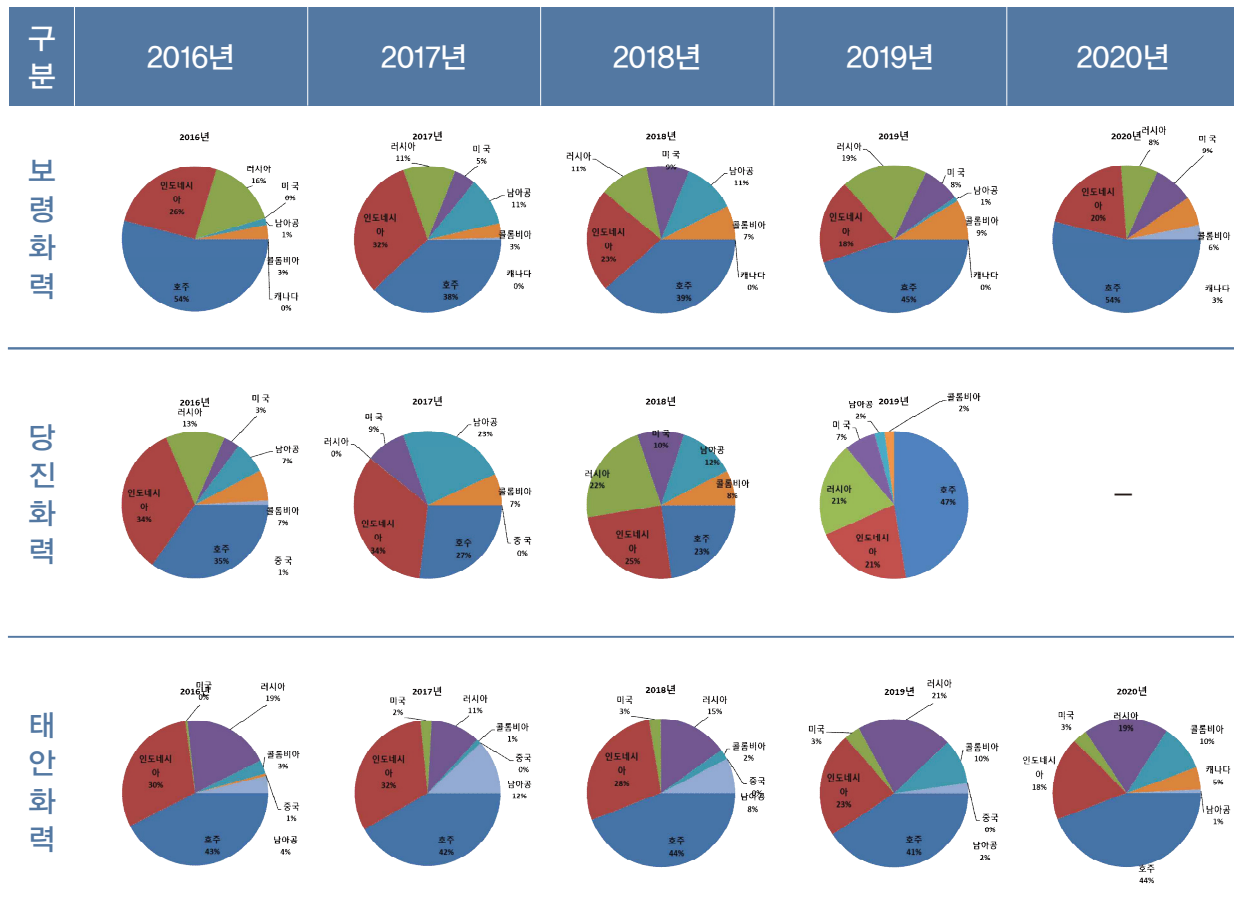
- 태안화력은 2020년 11월 한시적으로 석탄사용량이 낮았으나 전체적으로 냉/난방에 의해 전력소비가 많은 겨울(12월~3월)과 여름(6월~9월)의 석탄사용량이 높음. 연도별 사용량은 지속적으로 증가하는 추세였으나 2018년 15,228,245톤, 2019년 13,772,886톤, 2020년 11,456,561톤으로 감소하는 추세임



[그림 2.8] 태안화력발전소의 월 및 연도별 석탄사용량

- 석탄(유연탄) 수입국가 현황은 발전사 모두 대체적으로 호주산 및 인도네시아산이 약 60~70%를 차지하고 있으며, 수입국들 간의 비중이 최근 5년간 유사하게 나타나고 있음
- 당진화력은 2016년까지는 호주산과 인도네시아산 유연탄 사용이 69 ~ 73%로 높았고 2017년 러시아산 사용을 일시 중단하면서 남아프리카산 석탄 사용이 23%로 높아짐. 이후 2018년에 다시 러시아산을 22% 사용하면서 인도네시아, 호주, 러시아산의 유연탄 사용이 약 70%를 차지하게 되며, 2019년에는 인도네시아, 호주, 러시아산이 90%를 차지하고 있음

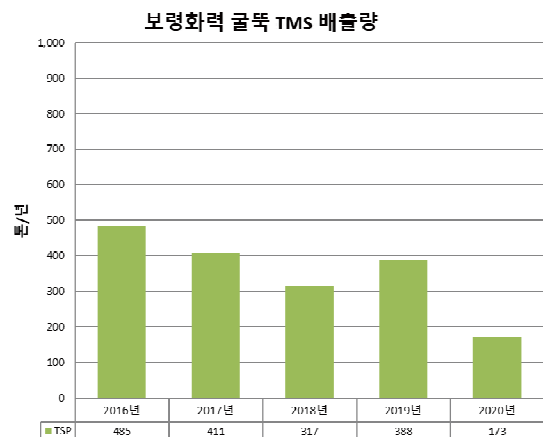
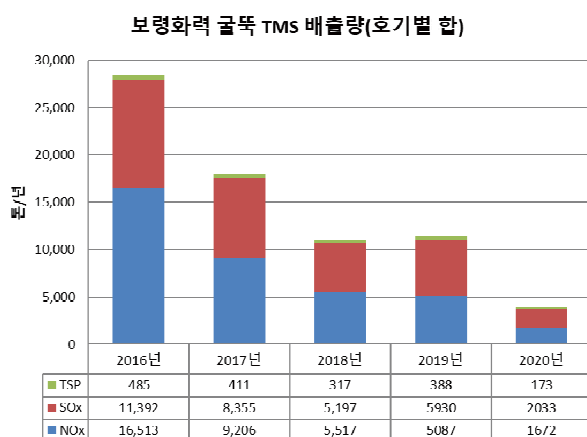
- 당진화력과 태안화력은 한시적으로 2016년 1% 수준으로 중국산 유연탄을 사용하다가 2017년부터 사용하지 않고 있음
 - 당진화력 중국산 유연탄 사용량 : 2016년 119,000톤
 - 태안화력 중국산 유연탄 사용량 : 2016년 74,000톤



[그림 2.9] 발전사별 석탄사용에 따른 수입국가 비교

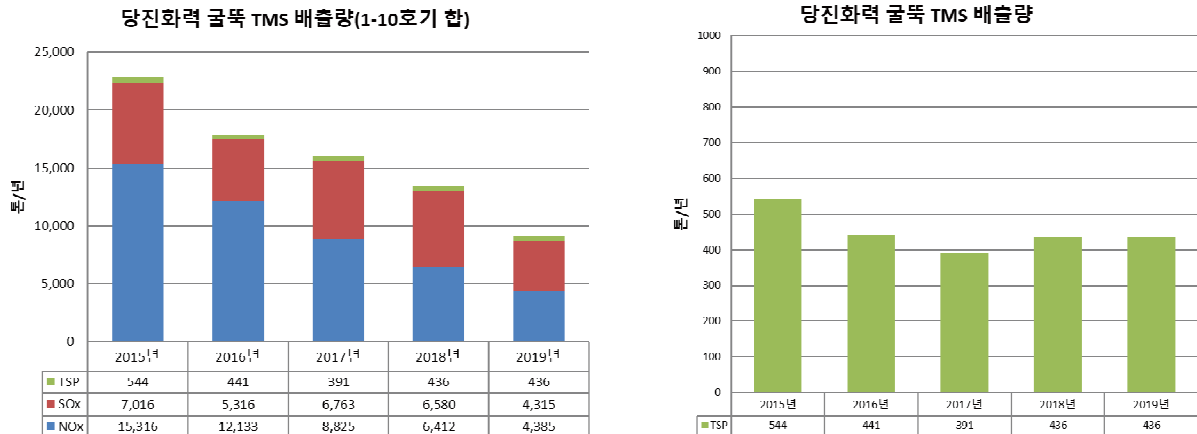
2.3. 굴뚝 TMS에 의한 발전사별 대기오염 배출량 비교

- 점오염원 형태인 굴뚝 TMS 측정 결과를 발전사별로 제공 받아 당진화력은 2015년 ~ 2019년(5년간), 보령화력 및 태안화력은 2016년 ~ 2020년(5년간)의 대기오염물질 발생현황을 분석하였음. 분석항목은 질소산화물(NOx), 황산화물(SOx), 총부유먼지(TSP)의 연간 총배출량을 비교 분석함
- 보령화력의 #3~6호는 2003년 5월, #7호기는 2008년 4월 #8호기는 2008년 12월에 굴뚝 TMS가 부착되어 관리되고 있고, 아래 그림과 같이 각 호기별 합산 배출량은 2016년 질소산화물 16,513톤/년, 황산화물 11,392톤/년, 총부유먼지 485톤/년으로 최근 5년간 가장 높은 배출량을 보이고 있고, 2016년 이후 배출량이 점차 감소하면서 2020년에는 질소산화물 1,672톤/년, 황산화물 2,033톤/년으로 2016년 대비 질소산화물 90%, 황산화물은 82% 감소하였음
- 보령화력의 총부유먼지 또한 연도별 지속적으로 감소하는 경향이었으나 2019년 증가한 후 2020년 다시 감소하였음. 2016년과 2017년 각각 485톤/년, 411톤/년에서 매년 감소하여 2020년에는 173톤/년으로 2016년 대비 64% 감소하였음



[그림 2.10] 보령화력 연도별 굴뚝 TMS 배출량 비교

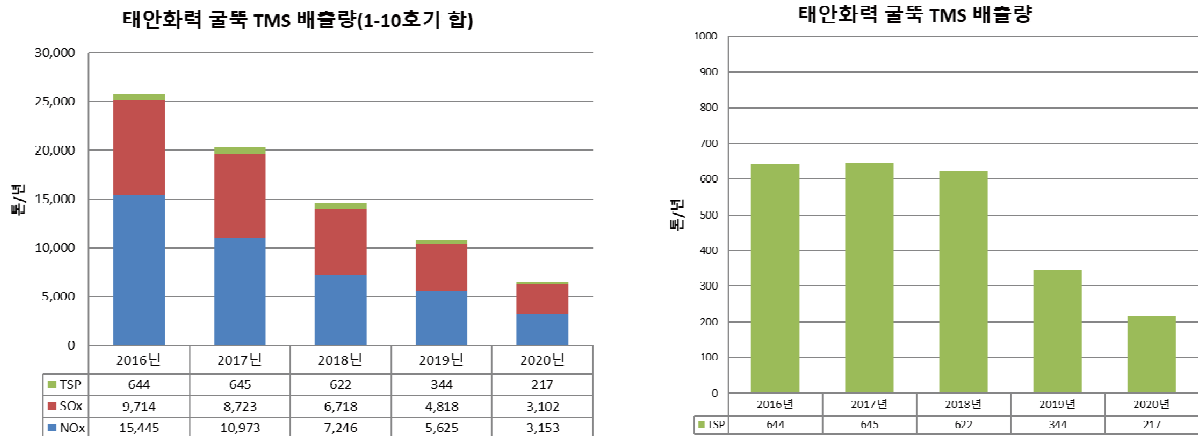
- 당진화력 배출량은 #1~10호기의 합으로 2015년 이후 지속적으로 감소하는 추세를 보이고 있음. 2015년 배출량은 질소산화물 15,316톤/년, 황산화물 7,016톤/년, 총부유먼지 544톤/년이며, 2019년에는 질소산화물 4,385톤/년, 황산화물 4,315톤/년, 총부유먼지 436톤/년으로 2015년 대비 각각 71%, 38%, 20% 감소하였음. 상대적으로 총부유먼지 감축량이 20%로 낮고 질소산화물이 72%로 높은 감축량을 보이고 있음
- 당진화력에서 배출되는 총부유먼지 만을 살펴보면 총부유먼지 배출량은 2015년 544톤/년의 배출량을 보이다가 2016년과 2017년에 각각 441톤/년, 391톤/년으로 일시적으로 감소하였고 2018년 다시 증가하는 추세로 436톤/년의 배출량을 보이고 있으며, 2019년 도도 전년과 같은 436톤/년으로 배출됨
 - 총부유먼지 증가율에 대한 원인을 분석하기 위해 각 발전소별 일반현황 외 작업현황과 같은 자료제공이 필요하며 이러한 자료제공을 통해 현황 분석뿐만 아니라 실시간 비산 먼지 배출량 예측 모델식에도 활용할 수 있어 5차년도 연구시 화력발전소의 자료제공 및 적극적인 협조가 필요함



[그림 2.11] 당진화력 연도별 굴뚝 TMS 배출량 비교

- 태안화력의 굴뚝 TMS 배출량은 최근 5년간 지속적으로 감소하였음. 2016년의 질소산화물 15,445톤/년, 황산화물 9,714톤/년, 총부유먼지 644톤/년으로 최근 5년간 가장 높은 배출량을 보였고, 2020년에 물질별 배출량이 2016년 대비 질소산화물 80% 감소, 황산화물 68% 감소, 총부유먼지 66% 감소로 확인됨

- 태안화력의 총부유먼지 배출량은 2016년 이후 2018년까지 정체였으나 2019년 큰 폭으로 감소됨



[그림 2.12] 태안화력 연도별 굴뚝 TMS 배출량 비교

- 발전사별로 배출량과 감축량에 차이는 있으나, 대부분 발전소의 배출량은 감소하는 추세를 보이고 있음. 이는 봄철 고농도 시기의 비상저감조치에 따른 가동정지와 2017년 ~ 2018년 기간에 수행한 발전설비의 대대적인 성능개선 공사와 단계적 저감계획 노력 등의 효과로 판단되며 현재의 노력을 넘어 지속적인 저감 노력을 수행하기 위한 자발적인 감축 노력이 필요할 것으로 판단됨
- 2019년의 당진화력 전력생산량 대비 총부유먼지 발생비(1MW당 먼지발생량(g))는 보령화력이 10.7g/MW 배출량을 보였고, 당진화력 12.3g/MW, 보령화력 8.9g/MW로 보령화력이 상대적으로 낮은 먼지 배출량을 보이고 있음
- 태안화력의 경우 노후 발전기 가동 중단으로 인한 타 발전사 대비 낮은 발생량을 보이는 것으로 판단됨

[표 2.3] 2019년 기준 전력생산 1MW당 총부유먼지 발생량

구분	보령화력	당진화력	태안화력
2019년	10.7g	12.3g	8.9g

- 태안화력과 보령화력의 경우 2020년에도 지속적인 성능개선 공사와 환경개선 노력으로 인하여 전력생산량 대비 먼지 배출량이 보령화력 7.8g/MW, 태안화력 7.7g/MW로 지속적으로 개선됨을 보이고 있음
 - － 한편, 당진화력의 경우 총부유먼지 발생량을 포함한 굴뚝 TMS, 석탄사용량 등 2020년도 일반현황 자료를 요청하였으나 외부 비공개 자료를 사유로 제공받지 못하였음

[표 2.4] 2020년 기준 전력생산 1MW당 총부유먼지 발생량

구분	보령화력	당진화력	태안화력
2020년	7.8g	－	7.7g

2.4. 발전사별 저탄장 운영 현황 및 환경개선 노력

- 태안화력 : 9, 10호기 및 IGCC는 옥내저탄장, 1~8호기는 옥외저탄장에 운영하고 있으며 태안 5~8호기 저탄장 옥내화 공사가 진행 중에 있음(24년 10월 준공 예정). 또한 옥외저탄장 환경관리 방안으로 석탄 하역에서 보일러 연소를 위한 상탄까지 밀폐형 하역기 및 컨베이어, 옥내저탄장 등 공정별 비산먼지 저감을 위한 방지 노력을 하고 있음
- 보령화력 : 2021년 9월 옥내저탄장 사업계약을 체결하였으며 2024년 말 준공계획에 있음. 옥외저탄장 환경관리 방안으로 하루 3회 이상 약 1~2시간 정도 1,000~2,000톤의 살수를 하고 있으며 수시로 저탄장 주변 도로에서 진공청소차를 운영하는 한편, 적외선 카메라 감시를 통해 자연발화를 지속적으로 감시하고 있음
- 서천화력 : 회처리장 작업구역 및 비 작업구역을 세분화하여 비 작업구역은 방진망을 도포하였으며, 작업구역은 살수설비를 가동해 비산먼지를 저감하고 있음. 또한 관리도로 개선 및 세륜시설 운영, 관리도로 내 골재 포설로 석탄회 재활용 차량의 이동시 발생하는 비산먼지를 저감하여 세륜시설 운영으로 재활용 차량에서 발생하는 비산먼지를 저감하고 있음

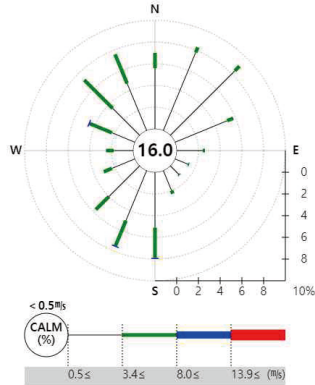
- 당진화력 : 2021년 6월부터 옥외 저탄장을 옥내화하고 있고 하루 평균 2회 살수설비를 가동하는 동시에, 표면 경화제 도포, 방진웬스 설치, 회처리장 지능형 게이트 설치, 특정 배치, 살수차 운행 확대 (주 3회, 필요시 매일)를 실시하고 있음

2.5. 화력발전소 주변 바람특성 분석

- 발전소 지역을 당진 & 태안권역, 보령 & 서천권역으로 구분하여 바람특성을 분석하였음. 당진 & 태안권역의 기상자료를 분석하기 위해 서산기상대(129), 보령 & 서천권역 기상자료는 보령권역 보령기상대(235)의 10년간 자료를 수집하여 분석하였음
- 2020년 당진 & 태안권역의 기상 특성을 살펴보면 봄에는 북서풍의 영향을 받으며 여름은 북풍, 가을과 겨울은 북서풍의 영향을 받음
- 보령 & 서천권역의 2020년도 기상 특성을 살펴보면 봄과 여름에는 남서풍, 가을과 겨울은 북풍 또는 북동풍계열의 풍향 빈도가 높은 것으로 확인됨

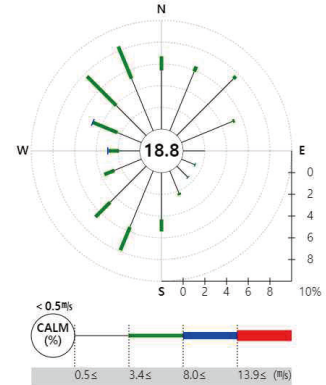
10년 누적

기상청 바람장미 종관 서산(129) 2011~2020년



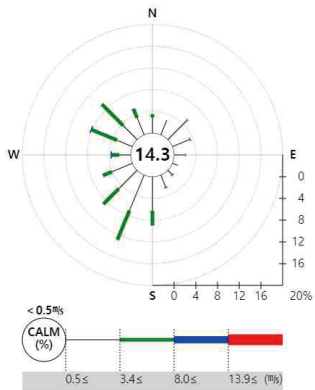
2020년

기상청 바람장미 종관 서산(129) 2020~2020년



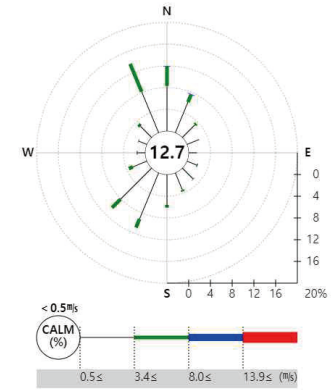
2020년 봄

기상청 바람장미 종관 서산(129) 2020~2020년 봄



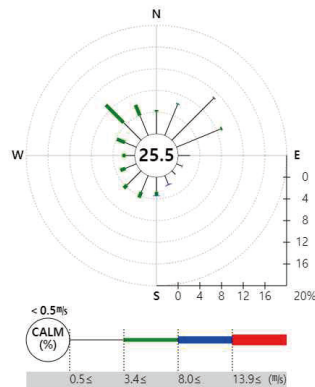
2020년 여름

기상청 바람장미 종관 서산(129) 2020~2020년 여름



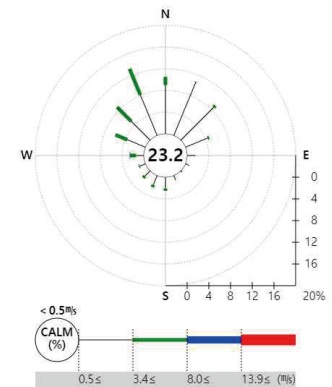
2020년 가을

기상청 바람장미 종관 서산(129) 2020~2020년 가을



2020년 겨울

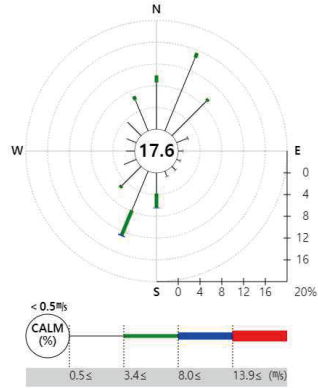
기상청 바람장미 종관 서산(129) 2020~2020년 겨울



[그림 2.13] 당진 및 태안권역 바람장미 분석

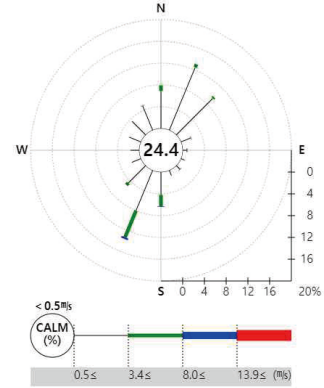
10년 누적

기상청 바람장미 종관 보령(235) 2011~2020년



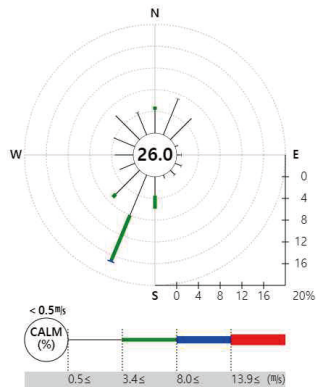
2020년

기상청 바람장미 종관 보령(235) 2020~2020년



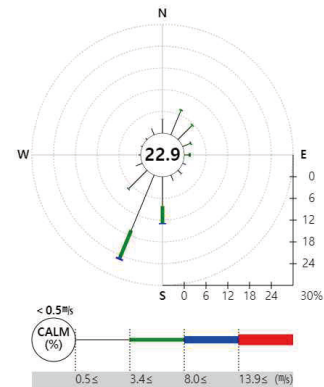
2020년 봄

기상청 바람장미 종관 보령(235) 2020~2020년 봄



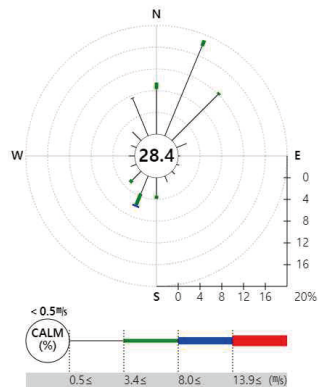
2020 여름

기상청 바람장미 종관 보령(235) 2020~2020년 여름



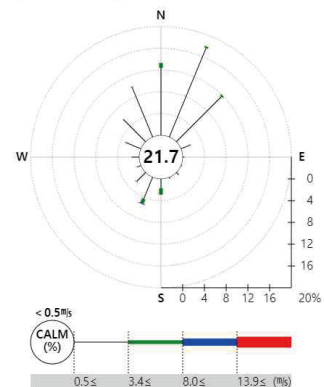
2020 가을

기상청 바람장미 종관 보령(235) 2020~2020년 가을



2020년 겨울

기상청 바람장미 종관 보령(235) 2020~2020년 겨울



[그림 2.14] 보령 및 서천권역 바람장미 분석

3. 소결론

- 충청남도 화력발전소 지역의 인구 증가율은 2020년 기준 당진시(0.15%)를 제외하면 서천군(-1.14%), 보령시(-1.18%), 태안군(-0.64%)은 인구수가 감소 추세임
- 2019년 기준 충청남도의 월별 기온변화는 최저기온 -9.0℃로 1월의 기온이 낮았고 8월이 25.8℃로 가장 더웠던 것으로 관측되며, 연평균 기온 또한 같은 경향임
- 석탄에 의한 1차 에너지 공급량을 지역별로 비교하면, 충청남도 60,820천 toe (20.1%), 전남 49,884천 toe(16.5%), 경북 34,154천 toe(11.3%), 경남 17,125천 toe(5.7%), 울산 31,622천 toe(10.4%) 순으로 충청남도의 석탄 공급량이 전국 1위로 나타나고 있음

[표 2.5] 화력발전소별 대기오염물질 배출량 2016년, 2020년 비교

구분	보령화력		당진화력		태안화력	
	2016년	2020년	2016년	2019년	2016년	2020년
TSP	485톤/년	173톤/년	441톤/년	436톤/년	644톤/년	217톤/년
SOx	11,392톤/년	2,033톤/년	5,316톤/년	4,315톤/년	9,714톤/년	3,102톤/년
NOx	16,513톤/년	1,672톤/년	12,133톤/년	4,385톤/년	15,445톤/년	3,153톤/년

- [표 2.5]와 같이 화력발전소 대기오염물질 배출량이 연도별 감소하는 경향을 나타냈으며, 보령화력의 경우 2016년도 대비 질소산화물은 90%, 황산화물은 32%, 총부유먼지는 64% 감소하였고, 당진화력의 경우 2016년도 대비 질소산화물은 64%, 황산화물은 19%, 총부유먼지는 1.1% 감소함. 태안화력의 경우 질소산화물은 80%, 황산화물은 68%, 총부유먼지는 66% 감소하는 것으로 나타남.
 - 신서천화력발전소의 경우 2020년에 가동을 시작하여 짧은 가동기간으로 인해 대조군인 2016년 자료없음으로 대기오염물질 배출량 감소 비교분석은 없으며, 이에 따라 5차년도 연구에 발전소에 협조를 요청(발전사의 적극적인 자료제공 등 협조 필요)하여 구체적인 일반현황 분석이 이뤄질 수 있도록 조치할 예정

- 이러한 결과를 통해 발전사별 배출량과 감축량의 차이는 있으나, 대부분 발전소의 배출량은 감소하는 추세를 보이고 있음.
- 이는 봄철 고농도 미세먼지 시기의 가동정지와 2017년 ~ 2018년 기간에 수행한 발전설비의 대대적인 성능개선 공사 및 단계적 저감계획 노력 등의 효과로 판단되며 현재의 노력을 넘어 강화된 자발적 감축 노력으로 지속적인 저감이 이루어져야 할 것으로 판단됨

제3장 화력발전소(시설) 주변지역 지표 대기오염물질 조사

1. 주변지역 지표 대기오염물질 조사 계획
2. 주변지역 지표 대기오염물질 조사 결과
3. 소결론

1. 주변지역 지표 대기오염물질 조사 계획

- 주민의견을 반영한 대기오염물질 측정을 위하여 주민이 원하는 장소에서 주민 참여 하에 화력발전소 인근 대기질 공간분포조사 및 실시간 대기질을 측정하였고, 공간 해상도가 높은 대기질 기초자료를 확보하기 위해 화력발전소 최근접지역을 지정하여 조사를 추진함.
- 대기질 측정은 Passive Air Sampler(간이대기측정기)와 센서기반 광산란 측정기를 이용하여 신서천화력발전 반경 5 km 이내의 인접지역에 20개소 측정지점을 대상으로 실시함

1.1. 대기오염물질 조사 방법

- 대기오염공정시험기준에 따라 같은 시간대 여러 지점에서 연구를 수행할 경우 시간과 비용의 문제 발생으로 본 연구에서는 1~3차년도에서 사용한 간이대기측정기와 센서 기반 광산란 측정기를 이용하여 대기질 조사를 실시함
- 지표대기오염물질 및 측정방법
 - － 아황산가스(SO_2) : 간이대기측정기
 - － 미세먼지(PM_{10}) : 센서기반 광산란 측정기
 - － 총부유분진(TSP) : 탁도계, 현미경

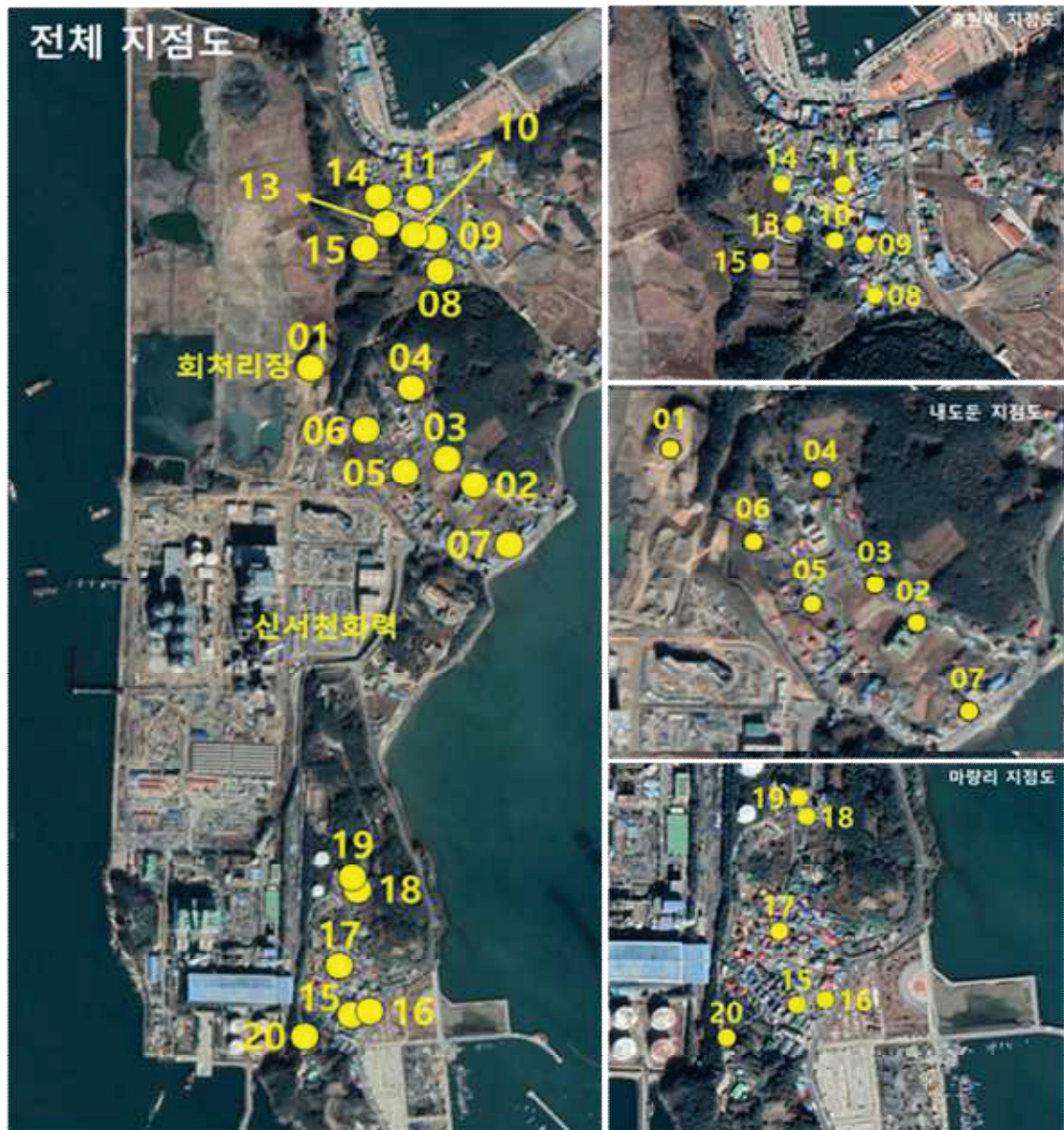
1.2. 간이대기측정기의 특징 및 감보정

- 3차년도 보고서 참조
 - － 3차년도 최종보고서 : 357p ~ 361p

2. 주변지역 지표 대기오염물질 조사 결과

2.1. 조사 지점 및 기간

- 화력발전소 최근접지역에 미치는 환경적 영향조사를 위하여 신서천화력발전소 외부 반경 5 km 이내의 20개소 지점(지역주민이 원하는 지점을 우선 반영)을 선정함



[그림 3.1] 신서천화력 주변지역 대기질 조사 지점

- 신서천화력발전소 주변지역을 회처리장 1개소, 내도둔 6개소, 홍원리 7개소, 마량리 6개소로 구분하여 측정함

[표 3.1] 화력발전소 인접지역 대기질 조사 지점의 정보

지역	세부 주소	지점명
회처리장 (1)	충남 서천군 서면 서면 도둔리 1472(회처리장)	1
	충남 서천군 서면 마량리 74-1(내도둔 마을회관)	2
	충남 서천군 서면 마량리 23	3
내도둔 (6)	충남 서천군 서면 마량리 2-1(법장사)	4
	충남 서천군 서면 마량리 36	5
	충남 서천군 서면 마량리 324-4	6
홍원리 (7)	충남 서천군 서면 마량리 74-8(해돋이 펜션)	7
	충남 서천군 서면 도둔리 970-6(홍원리 고물상)	8
	충남 서천군 서면 도둔리 965-3(훈이네 민박)	9
	충남 서천군 서면 도둔리 964-3	10
	충남 서천군 서면 도둔리 1006-2(홍원마을회관)	11
	충남 서천군 서면 도둔리 963-13	12
	충남 서천군 서면 도둔리 963-27	13
마량리 (6)	충남 서천군 서면 도둔리 1008-5	14
	충남 서천군 서면 마량리 197-11(마량리 마을회관)	15
	충남 서천군 서면 마량리 157	16
	충남 서천군 서면 마량리 245	17
	충남 서천군 서면 마량리 251-1(동백정 교회)	18
	충남 서천군 서면 마량리 272-1	19
	충남 서천군 서면 마량리 275-34(소초 앞)	20

○ 조사기간

- 1차 측정 PM₁₀

· SO₂, PM₁₀, TSP : 2021년 1월 13일 ~ 2021년 1월 20일

- 2차 측정

· PM₁₀, TSP : 2021년 10월 26일 ~ 2021년 11월 01일

· SO₂ : 2021년 10월 29일 ~ 2021년 11월 01일

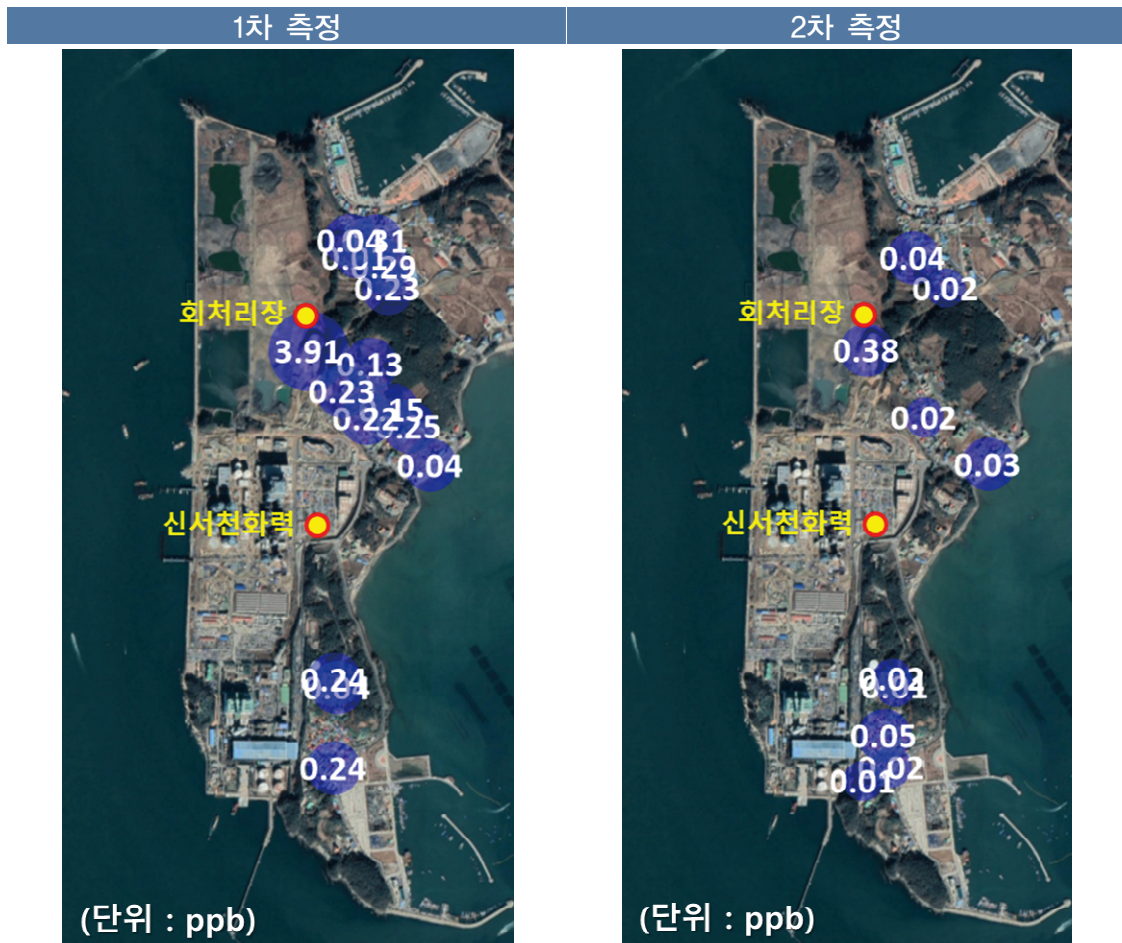
- 대기질 조사 기간별 풍향, 풍속, 기온, 습도는 신서천 화력발전 회처리장 근처에 연구진이 설치한 기상 측정 장비의 측정자료를 활용하였고, 강수량은 기상청 운영측정자료 중 신서천 화력발전소와 가장 인접한 서면 측정소 자료를 활용하였음

[표 3.2] 측정 기간별 기상현황

1차 2021.01.13. ~ 2021.01.20.(SO ₂ , PM ₁₀ , TSP)	2차 2021.10.26. ~ 2021.11.1. (SO ₂ , PM ₁₀ , TSP)
<ul style="list-style-type: none">• 주풍 : 북동풍• 풍속 : 1.9 m/s• 기온 : 0.1℃ (-4.7~4.8℃)• 상대습도 : 61%• 강수량 : 4.0 mm	<ul style="list-style-type: none">• 주풍 : 북풍• 풍속 : 3.9 m/s• 기온 : 15.4℃ (11.3~21.5℃)• 상대습도 : 67%• 강수량 : 18.5 mm

[표 3.3] IC기기를 이용한 지점별 SO₂값 측정 결과

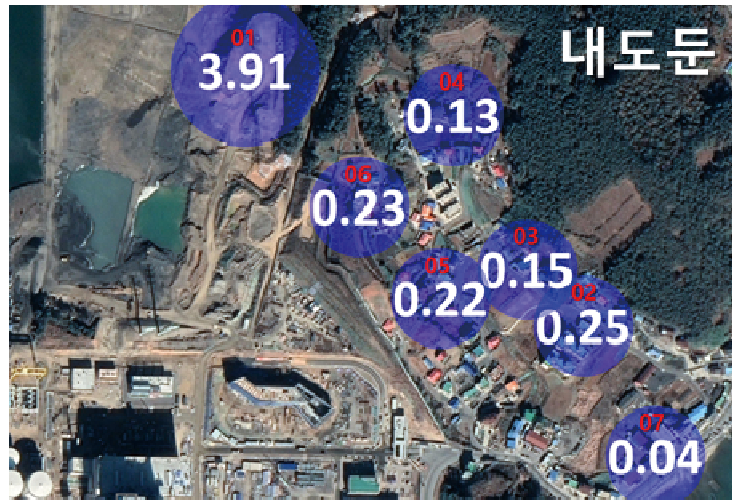
구분	지점명	측정결과(ppb)		
		1차	2차	평균
회처리장	01	3.91	0.38	2.15
	평균	3.91	0.38	2.15
내도둔	02	0.25	불검출	0.25
	03	0.15	불검출	0.15
	04	0.13	불검출	0.13
	05	0.22	0.02	0.12
	06	0.23	불검출	0.23
	07	0.04	0.03	0.04
	평균	0.17	0.03	0.15
홍원리	08	0.23	0.02	0.13
	09	0.29	불검출	0.29
	10	불검출	불검출	불검출
	11	0.31	불검출	0.31
	12	불검출	불검출	불검출
	13	0.01	0.04	0.03
	14	0.04	불검출	0.04
	평균	0.18	0.03	0.16
마량리	15	0.24	0.02	0.13
	16	불검출	불검출	불검출
	17	불검출	0.05	0.05
	18	0.04	0.01	0.03
	19	0.24	0.02	0.13
	20	불검출	0.01	0.01
	평균	0.17	0.02	0.07
기초통계	평균	1.11	0.11	0.63
	최소	0.01	0.01	0.01
	최대	3.91	0.38	2.15
	표준편차	0.94	0.11	0.48



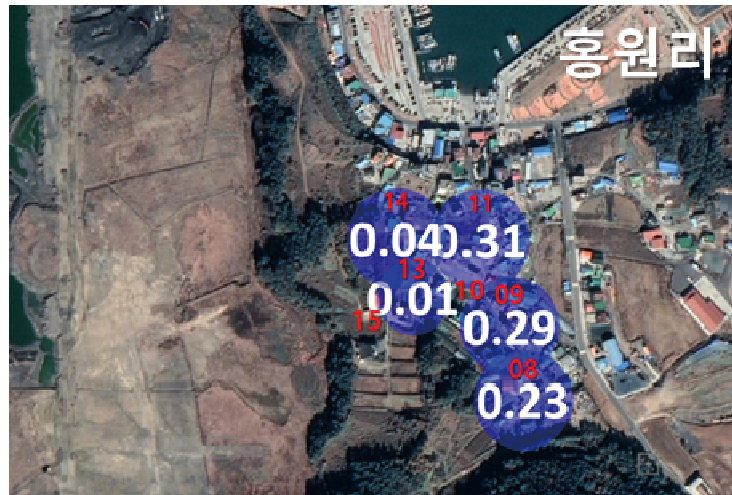
[그림 3.3] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 SO₂ 농도값 공간분포 비교

- 회차별로 지역별 평균값을 비교해 보면, 1차 측정은 회처리장 > 홍원리 > 내도둔 = 마량리, 2차 측정은 회처리장 > 홍원리 = 내도둔 > 마량리 순으로 높게 나타남
- 1차 측정결과 20개 지점 중 회처리장은 3.91ppb로 가장 높게 나타났으며 홍원리 13번 지점이 0.01ppb로 가장 낮게 나타났고 5개 지점이 불검출되었음
- 2차 측정결과 20개 지점중 회처리장은 0.38ppb로 가장 높게 나타났고 마량리 20번 지점이 0.01ppb로 가장 낮게 나타났으며 총 10개 지점이 불검출되었음
- 1차와 2차 전체지점 평균 농도차는 약 6배 차이가 발생하였고 전체적으로 농도는 낮은 상태이나 발전소 인근에서 상대적으로 높은 농도를 나타냄

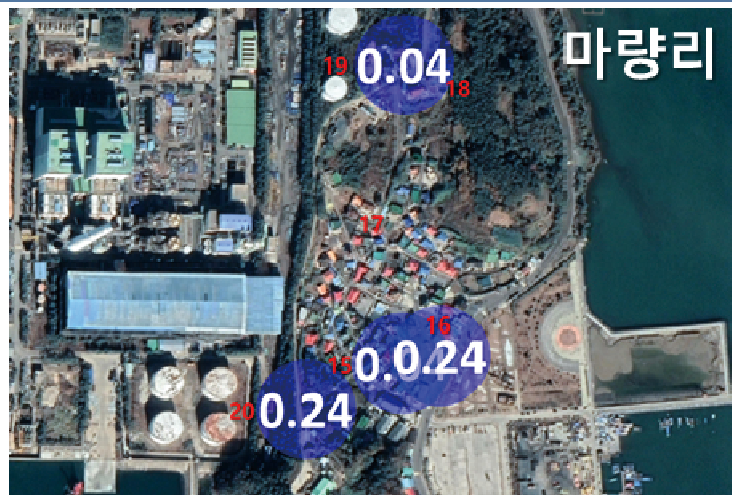
내도둔



홍원리



마량리

[그림 3.4] 신서천화력발전소 1차 조사 지역별 SO₂ 공간분포 비교

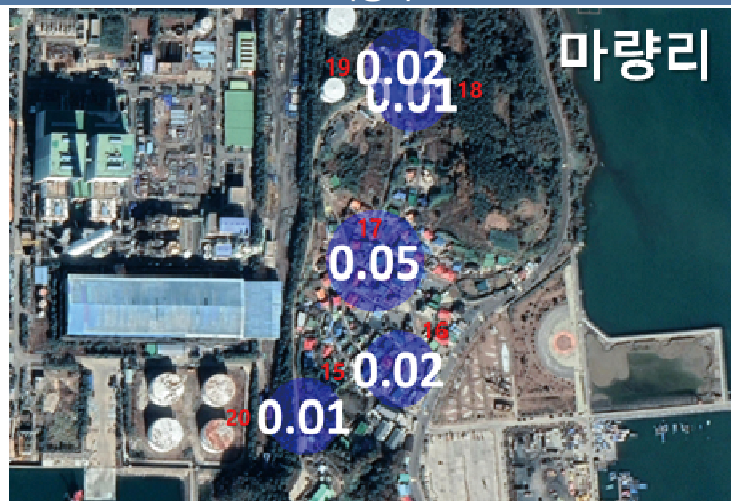
내도둔



홍원리



마량리



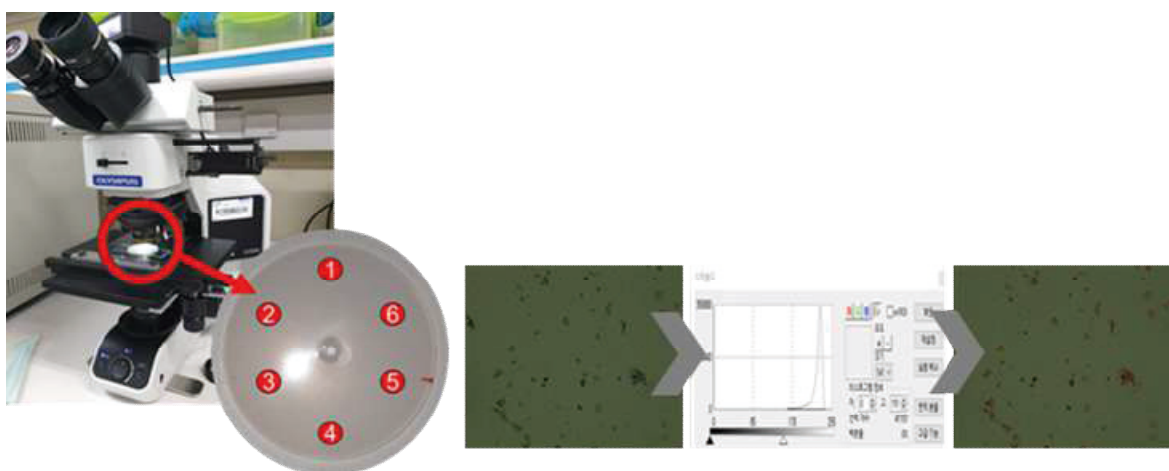
[그림 3.5] 신서천화력발전소 2차 조사 지역별 SO₂ 공간분포 비교

2.3. 총부유분진(TSP)

- TSP 조사는 Passive Sampler를 이용하여 입자상 물질을 채취하여 증류수로 탈착한 탈착액을 탁도계를 이용하여 분석하는 ‘탁도계 분석’ 과 채취한 시료를 현미경을 이용하여 관찰하여 조사 지점별 입자 크기 및 평균개수를 분석하는 현미경 분석으로 진행하였음
- 탁도계를 이용한 탁도 값과 현미경을 이용한 TSP 개수를 산정하여 비교 분석을 진행하고 동일한 20개 지점에서 진행한 결과값을 사용하여 상관분석을 실시하였음



[그림 3.6] 탁도계를 이용한 탁도 분석



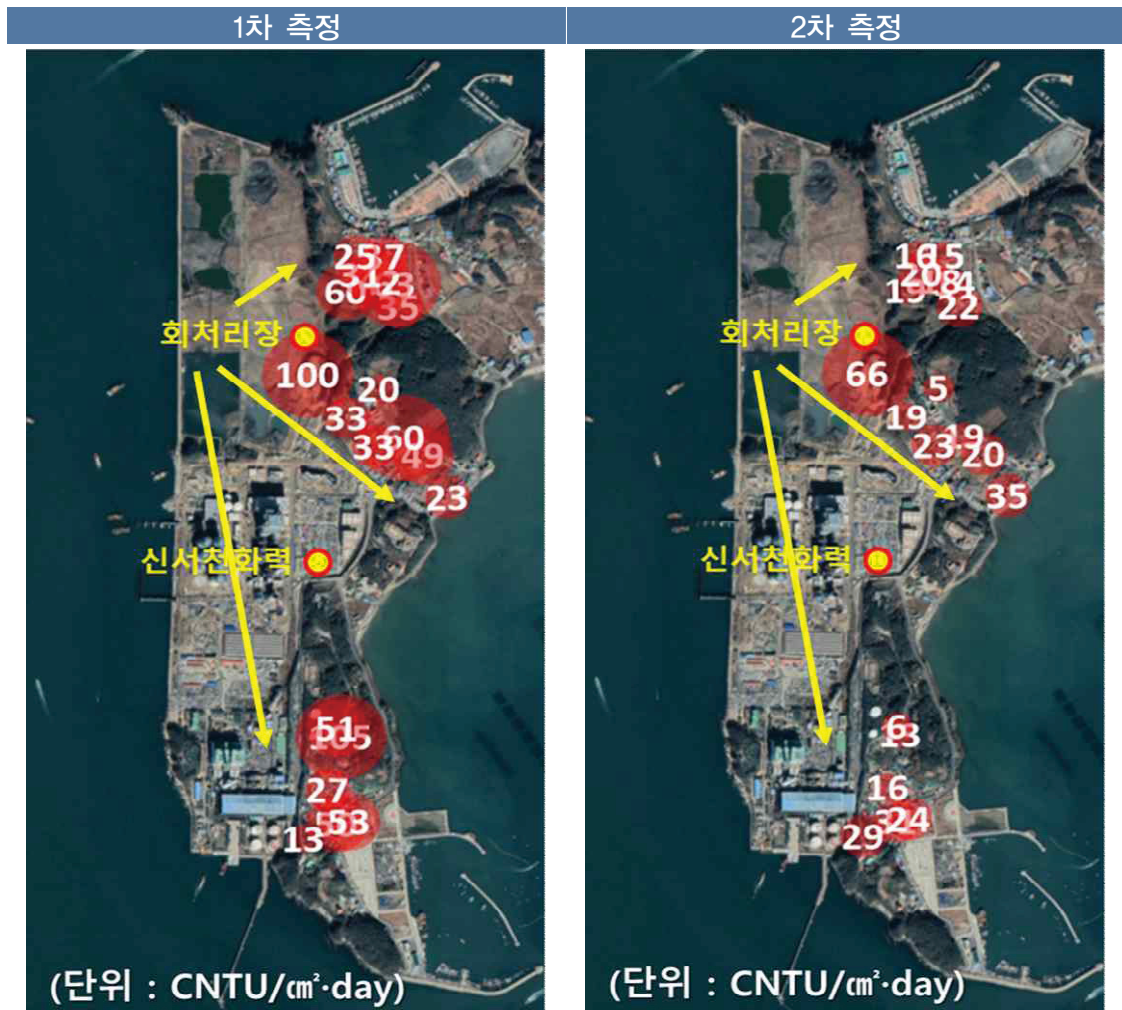
[그림 3.7] 현미경을 이용한 TSP분석

2.3.1. 탁도 분석

- 조사기간의 지역별 평균값은 회처리장($83 \text{ NTU/cm}^2 \cdot \text{day}$) > 마량리($35 \text{ NTU/cm}^2 \cdot \text{day}$) > 홍원리($30 \text{ NTU/cm}^2 \cdot \text{day}$) > 내도둔($28 \text{ NTU/cm}^2 \cdot \text{day}$) 순으로 높게 나타남
- 회차별 평균값은 1차($57 \text{ NTU/cm}^2 \cdot \text{day}$) > 2차($31 \text{ NTU/cm}^2 \cdot \text{day}$) 순으로 높게 나타남

[표 3.4] 탁도계를 이용한 지점별 탁도값 측정 결과

구분	지점명	측정결과(NTU/cm ² · day)		
		1차	2차	평균
회처리장	01	100	66	83
	평균	100	66	83
내도둔	02	49	20	34
	03	60	19	40
	04	20	5	12
	05	33	23	28
	06	33	19	26
	07	23	35	29
	평균	36	20	28
홍원리	08	35	22	28
	09	63	14	39
	10	42	18	30
	11	37	15	26
	12	60	19	39
	13	31	20	25
	14	25	16	21
	평균	42	18	30
마량리	15	50	31	40
	16	53	24	39
	17	27	16	22
	18	105	13	59
	19	51	6	28
	20	13	29	21
	평균	50	20	35
	평균	57	31	44
기초통계	최소	13	5	12
	최대	105	66	83
	표준편차	24	13	15



[그림 3.8] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 탁도 값 공간분포 비교

- 회차별로 지역별 평균값을 비교해 보면, 1차 측정은 회처리장 > 마량리 > 홍원리 > 내도둔, 2차 측정은 회처리장 > 마량리 = 내도둔 > 홍원리 순으로 회처리장 내부가 외부 인근 지점보다 높게 나타남
- 1차 측정결과 20개 지점 중 회처리장은 100 NTU/cm²·day, 마량리 18번 지점은 105 NTU/cm²·day으로 가장 높게 나타났으며, 마량리 20번 지점은 13 NTU/cm²·day으로 가장 낮게 나타났음.
- 2차 측정결과에서는 20개 지점중 회처리장은 66 NTU/cm²·day로 가장 높게 나타났고 내도둔 4번 지점이 5 NTU/cm²·day로 가장 낮게 나타났음

- 1차 측정결과 마량리 한 곳에서 최대값(18지점, 105 NTU/cm² · day)과 최솟값(20번 지점, 13 NTU/cm² · day)이 모두 나타났는데 이는 조사기간의 풍향 및 지형에 의한 것임.
 - 1차 조사기간의 주풍은 북동풍의 영향을 받아 마량리 18번 지점이 최대값을 나타낸 반면, 마량리 20번 지점은 고도가 높은 위치에 있고 지형 지물로 둘러 쌓여 바람의 영향이 상대적으로 적어 탁도가 최솟값이 나타나 유사지역 대비 큰 편차가 나타남
- 아울러, 1차와 2차 기간동안 주로 불어온 북동풍의 영향으로 회처리장을 중심으로 총부유분진(TSP)이 확산되는 경향을 확인할 수 있었음

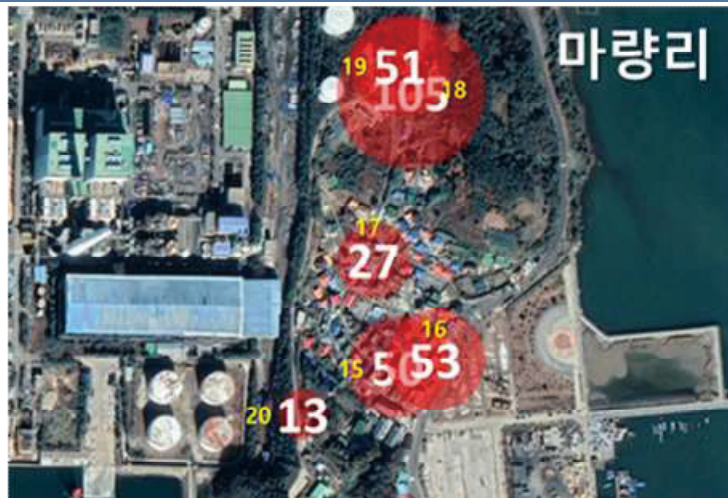
내도둔



홍원리



마량리



[그림 3.9] 신서천화력발전소 1차 조사 지역별 공간분포 비교

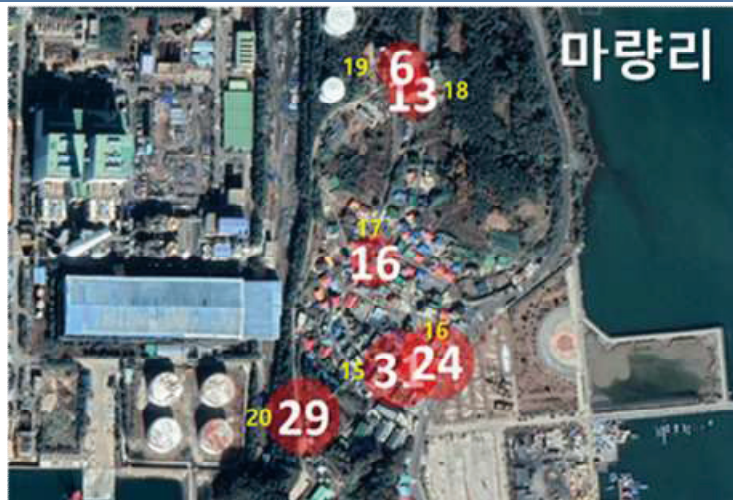
내도둔



홍원리



마량리



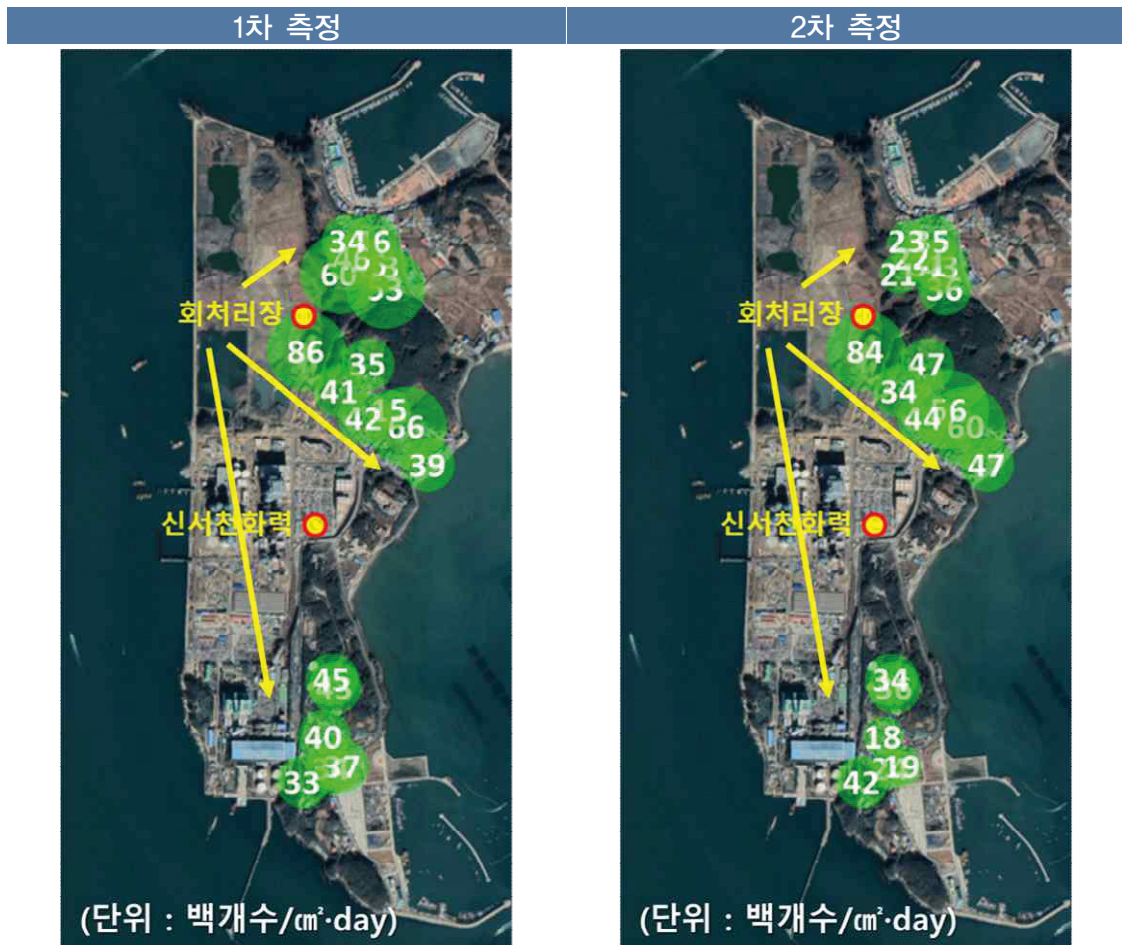
[그림 3.10] 신서천화력발전소 2차 지역별 공간분포 비교

2.3.2. 현미경 분석

- 조사기간의 지역별 평균값은 회처리장(85 백개수/cm² · day) > 내도둔(44 백개수/cm² · day) > 홍원리(38 백개수/cm² · day) > 마량리(34 백개수/cm² · day) 순으로 높게 나타남
- 회차별 평균값은 1차(52 백개수/cm² · day) > 2차(48 백개수/cm² · day) 순으로 높게 나타남

[표 3.5] 현미경을 이용한 지점별 TSP 측정 결과

구분	지점명	측정결과(백개수/cm ² · day)		
		1차	2차	평균
회처리장	01	86	84	85
	평균	86	84	85
내도둔	02	66	59	63
	03	15	56	36
	04	35	46	41
	05	42	44	43
	06	41	34	38
	07	39	47	43
	평균	40	48	44
홍원리	08	53	36	45
	09	33	43	38
	10	45	31	38
	11	46	34	40
	12	60	21	41
	13	46	21	34
	14	34	23	29
	평균	45	30	38
마량리	15	34	24	29
	16	37	19	28
	17	40	17	29
	18	43	36	40
	19	45	33	39
	20	33	42	38
	평균	39	29	34
기초통계	평균	52	48	50
	최소	13	17	28
	최대	86	84	85
	표준편차	14	16	13



[그림 3.11] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 TSP 값 공간분포 비교

- 회차별로 지역별 평균값을 비교해 보면, 1차 측정은 회처리장 > 홍원리 > 내도둔 > 마량리, 2차 측정은 회처리장 > 내도둔 > 홍원리 > 마량리 순으로 높게 나타남
- 1차 측정결과 20개 지점 중 회처리장은 86 백개수/cm²·day로 가장 높게 나타났고, 내도둔 3번 지점이 15 백개수/cm²·day으로 가장 낮게 나타났음.
- 2차 측정결과 20개 지점 중 회처리장은 84 백개수/cm²·day로 가장 높게 나타났고, 마량리 17번 지점이 17 백개수/cm²·day으로 가장 낮게 나타났음
 - 2차 조사기간 동안 주풍은 서남서풍, 북풍으로 회처리장 작업이 중지된 상태였음에도 표면의 비산먼지와 중국발과 같은 국외 미세먼지 유입으로 인하여 회처리장의 총부유먼지 값에 영향을 주어 다른 지역에 비해 상대적으로 높게 나타난 것으로 확인됨

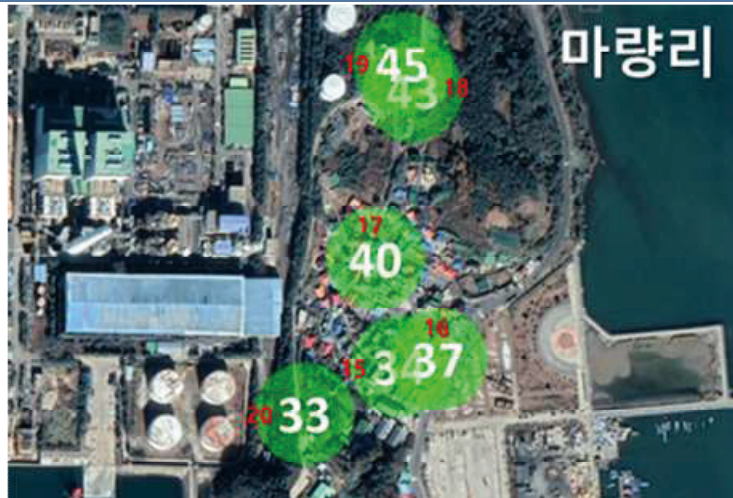
내도둔



홍원리



마랑리



[그림 3.12] 신서천화력발전소 1차 조사 현미경 분석 지역별 공간분포 비교

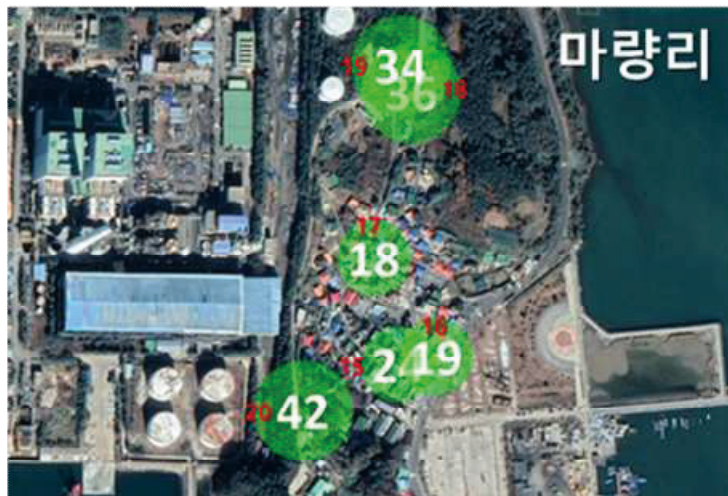
내도둔



홍원리



마량리



[그림 3.13] 신서천화력발전소 2차 조사 현미경 분석 지역별 공간분포 비교

1차 측정					2차 측정				
	회처리장(01)	홍원리(12)	내도둔(02)	마량리(19)		회처리장(01)	홍원리(12)	내도둔(02)	마량리(19)
10.0 μm 이상	3,294 (38.2%)	2,527 (41.9%)	2,745 (41.8%)	1,837 (41.2%)	10.0 μm 이상	2,277 (27.1%)	1,114 (31.0%)	1,701 (28.5%)	1,204 (28.6%)
5.0 ~ 10.0 μm	1,379 (16.0%)	991 (16.4%)	1,058 (16.1%)	688 (15.4%)	5.0 ~ 10.0 μm	1,444 (17.2%)	556 (15.5%)	1,164 (19.5%)	666 (15.8%)
2.5 ~ 5.0 μm	1,409 (16.3%)	948 (15.7%)	1,049 (16.0%)	714 (16.0%)	2.5 ~ 5.0 μm	1,585 (18.9%)	666 (18.5%)	1,205 (20.2%)	851 (20.2%)
2.5 μm 미만	2,545 (29.5%)	1,567 (26.0%)	1,713 (26.1%)	1,129 (27.4%)	2.5 μm 미만	3,089 (36.8%)	1,259 (35.0%)	1,905 (31.9%)	1,495 (35.5%)
계	8,627	6,033	6,564	4,457	계	8,395	3,595	5,975	4,216

[그림 3.14] 신서천화력발전소 주변지역 회차별 TSP 입자상 물질 크기별 비교

- 입자크기별 분포 분석 결과를 보면, 1차 조사의 경우 10 μm 이상의 입자들의 분포가 가장 많이 관찰되어 PM₁₀의 영향보다 TSP의 영향을 더 많이 받는 것으로 보임
- 2차 조사의 경우 입자상 물질의 크기는 2.5 μm 미만이 가장 많이 관찰되어 PM₁₀ 보다 PM_{2.5}의 영향을 더 많이 받는 것으로 나타남
- 2차 조사기간 당시 회처리장 가동 중단으로 인한 나대지 포장 등의 작업 차량 이동이 적었으나 1차 조사결과 보다 10 μm 미만의 입자 크기 분포가 높게 나타난 이유는 중국발 미세먼지 등 외부 초미세먼지 유입 등의 영향인 것으로 판단됨
 - 2차 조사 중 국외 초미세먼지가 유입된 10월 27일 일평균 초미세먼지 농도는 보통으로 예보되었지만 에어코리아 통계자료인 [그림 3.16]을 통해 오전 국외 초미세먼지 유입에 따른 발전소가 위치한 지역(서천, 당진)의 초미세먼지 농도는 급격하게 상승한 것을 확인하였음²¹⁾

21) 대기정보예보, 미세먼지 세부 측정정보, 에어코리아(2022)

오늘 [10월27일]

예보등급

○ [미세먼지] 경기남부·세종·충북·전북·대구·는 '나쁨', 그 밖의 권역은 '보통'으로 예상됩니다. 다만, 오전에 수도권·충청권은 일시적으로 '매우나쁨', 강원영서는 일시적으로 '나쁨', 오후에 광주·전남·부산·울산·경북·경남·제주권은 '나쁨' 수준일 것으로 예상됩니다.

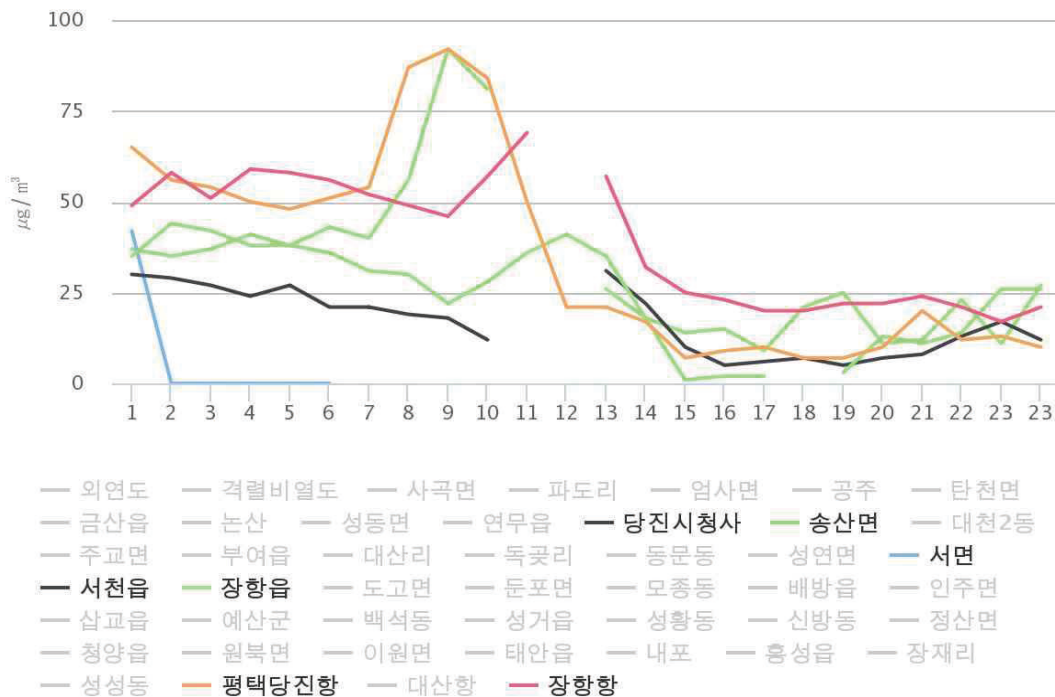
구분	서울	인천	경기		강원		대전	세종	충북	충남	광주	전북	전남	부산	대구	울산	경북	경남	제주
			북부	남부	영서	영동													
미세먼지	보통	보통	보통	나쁨	보통	보통	보통	나쁨	나쁨	보통	보통	나쁨	보통	보통	나쁨	보통	보통	보통	보통
PM ₁₀	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통	보통
PM _{2.5}	보통	보통	보통	나쁨	보통	보통	보통	나쁨	나쁨	보통	보통	나쁨	보통	보통	나쁨	보통	보통	보통	보통

※미세먼지 예보 등급은 PM₁₀과 PM_{2.5} 중 높은 등급을 기준으로 발표됩니다.

원인 분석

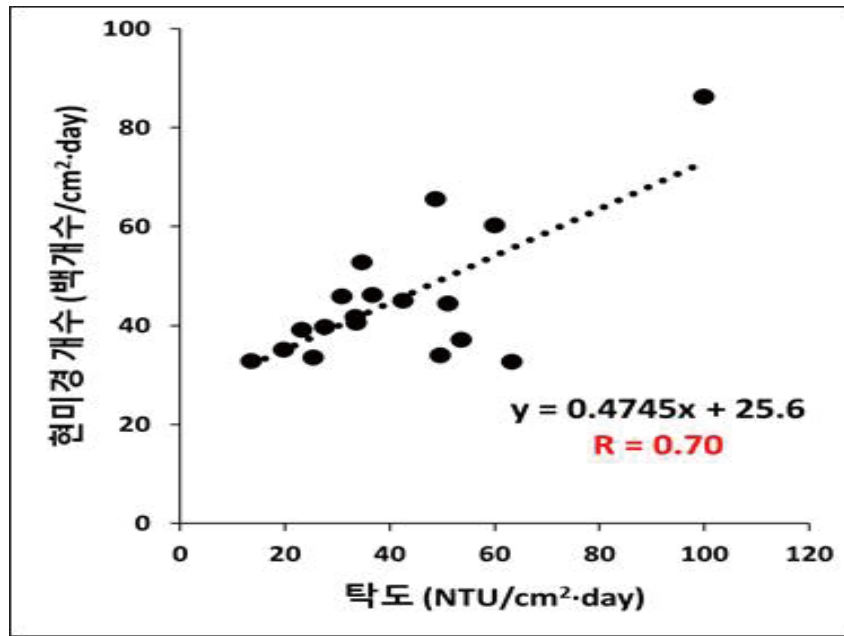
○ [미세먼지] 전일 미세먼지가 잔류하고, 국외 미세먼지가 유입되어 남동쪽으로 이동하면서 중부지역은 오전에, 남부지역은 오후에 농도가 높을 것으로 예상됩니다.

[그림 3.15] 국외 초미세먼지 유입 당시 예보



[그림 3.16] 국외 초미세먼지 유입 당시 서천,당진 그래프

- TSP에 대한 두 측정방법 간의 비교 평가를 위해 20개 동일한 지점의 측정 자료를 이용하여 상관성 분석을 실시한 결과, 두 방법간 상관계수가 0.70로 나타나 탁도 값과 현미경 개수를 이용한 먼지 측정 방법의 활용 가능성을 확인함



[그림 3.17] 탁도 값과 현미경 개수 간의 상관 분석 결과

2.4. 미세먼지(PM₁₀) 조사 결과

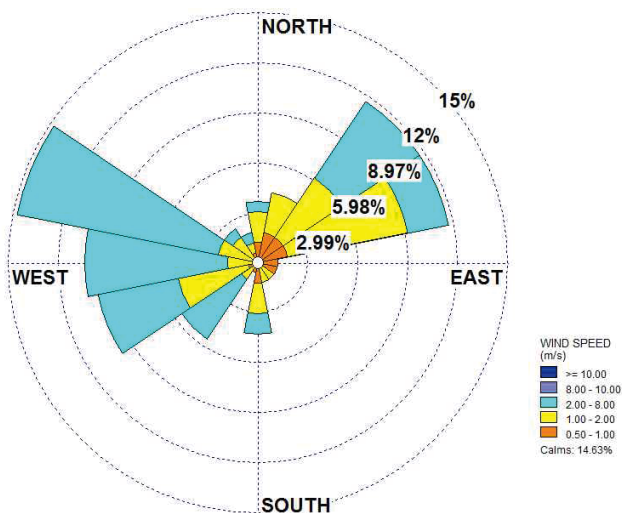
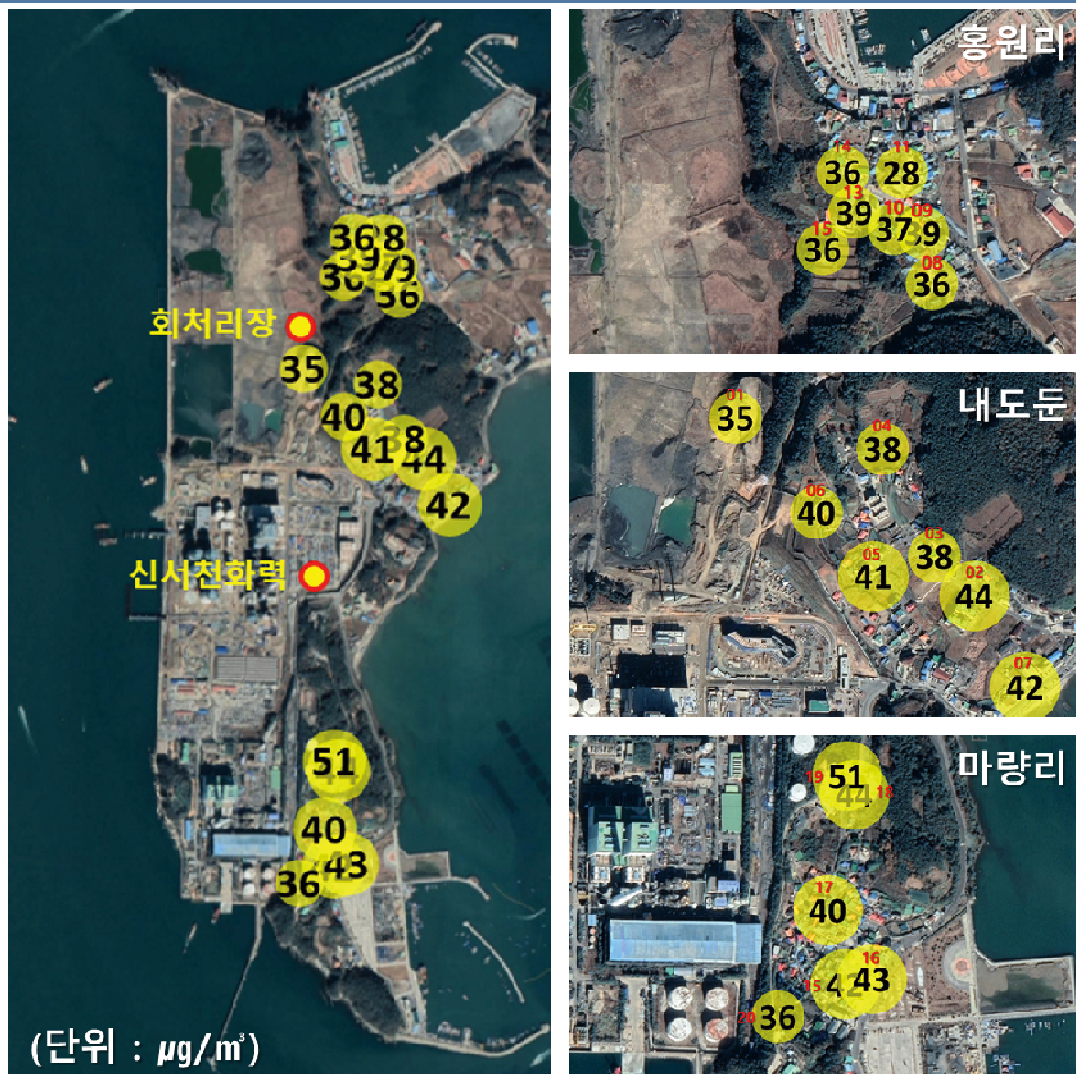
- 측정기간의 지역별 평균 값을 비교해 보면, 1차 조사의 경우 마량리($43 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 내도둔($40 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 홍원리($36 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 회처리장($35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타남
- 2차 조사 결과 홍원리($38 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 마량리($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) = 내도둔($37 \mu\text{g}/\text{m}^3$) > 회처리장($36 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 나타남
- 2차 조사 당시 회처리장의 경우 가동 중단 상태였으며, 대기 정체가 발생하는 기상 상황에 따른 국외 초미세먼지 유입으로 홍원리, 마량리 등 회처리장 주변지역의 농도가 높아진 것으로 판단됨
- 1차 측정의 경우 주풍은 북서풍, 2차 측정은 북풍 계열로 나타남

○ 측정기간의 전체 평균은 1차는 $39 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 2차는 $37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 유사하게 나타남

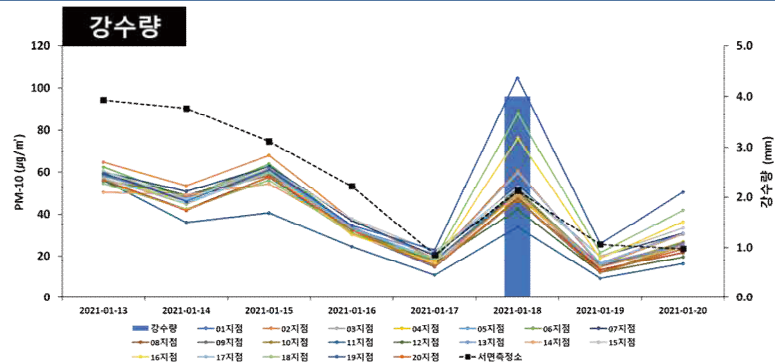
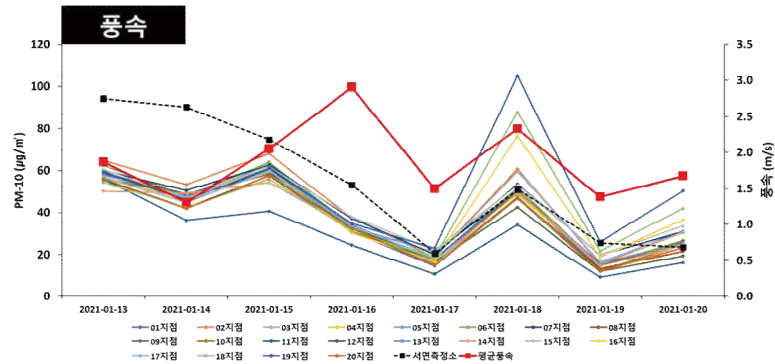
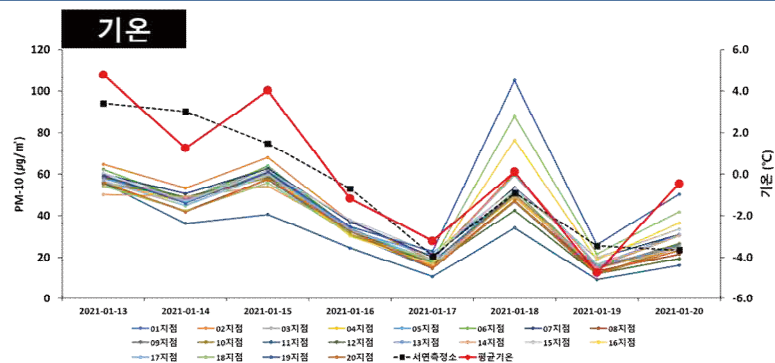
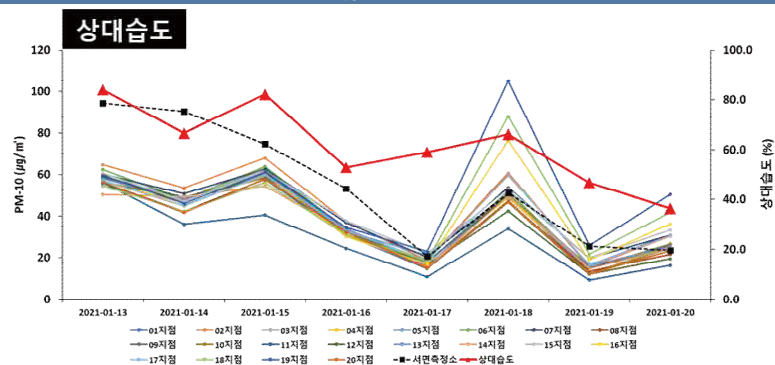
[표 3.6] 센서기반 광산란 측정기를 이용한 미세먼지 측정 결과

구 분	일 자	측정결과($\mu\text{g}/\text{m}^3$)				
		회처리장	내도둔	흥원리	마랑리	평균
1차 측정	01/13	56	60	56	57	57
	01/14	42	49	46	44	45
	01/15	58	63	56	59	59
	01/16	31	35	32	33	33
	01/17	15	18	16	19	17
	01/18	47	53	46	71	54
	01/19	12	15	13	19	15
	01/20	23	28	23	36	27
	평균	35	40	36	43	39
2차 측정	10/26	53	55	54	55	54
	10/27	48	50	49	50	50
	10/28	21	18	22	20	21
	10/29	17	15	20	17	18
	10/30	25	25	26	24	25
	10/31	35	37	37	38	37
	11/01	53	56	55	56	56
	평균	36	37	38	37	37

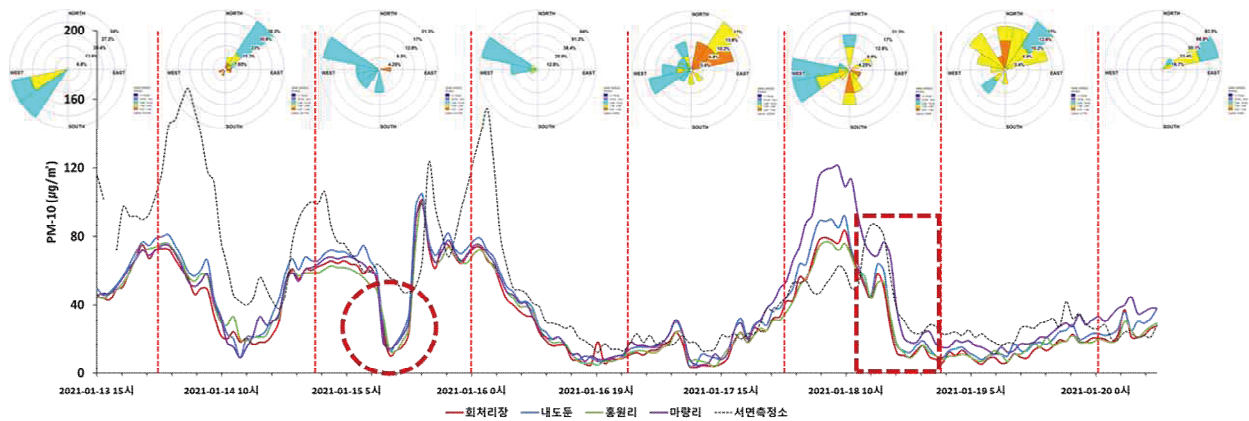
1차 측정



[그림 3.18] 신서천화력발전소 주변지역의 1차 미세먼지 농도의 공간분포 비교

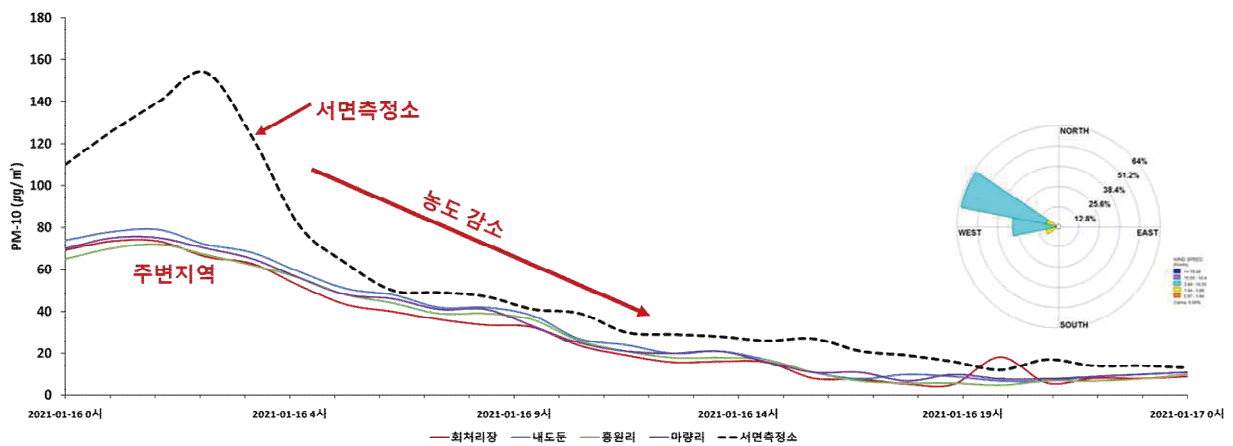
일평균 PM₁₀과 강수량 비교일평균 PM₁₀과 풍속 비교일평균 PM₁₀과 기온 비교일평균 PM₁₀과 상대습도 비교

[그림 3.19] 신서천화력발전소 주변지역의 미세먼지 1차 조사결과



[그림 3.20] 신서천 화력발전소 주변지역 미세먼지(PM₁₀) 조사 결과(1차)

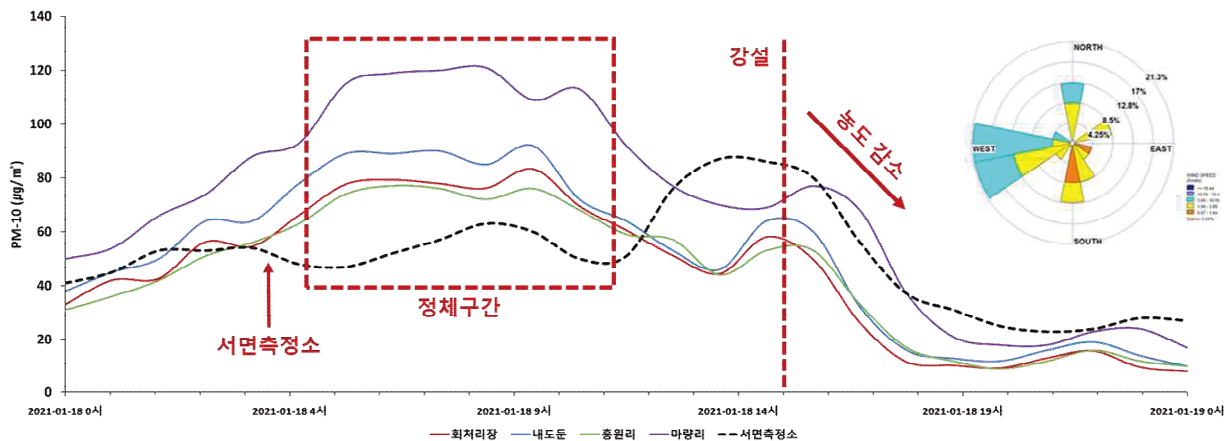
- 일 평균농도가 높게 나타난 1월 15일은 산발적인 강우 전후의 대기 정체의 영향으로 추정되며, 이후 1월 16일 풍속이 강해지면서 미세먼지 농도가 낮아지는 경향을 보임



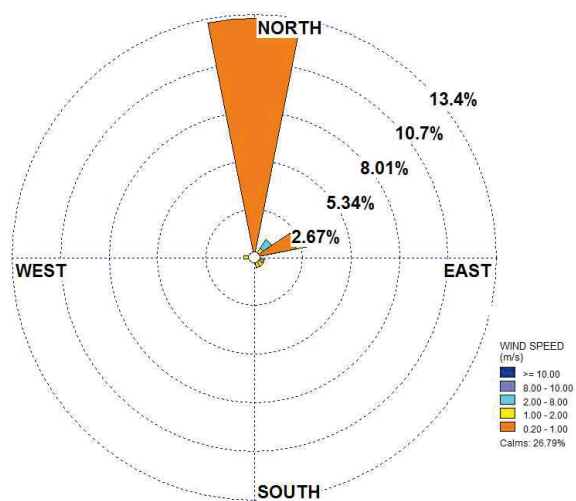
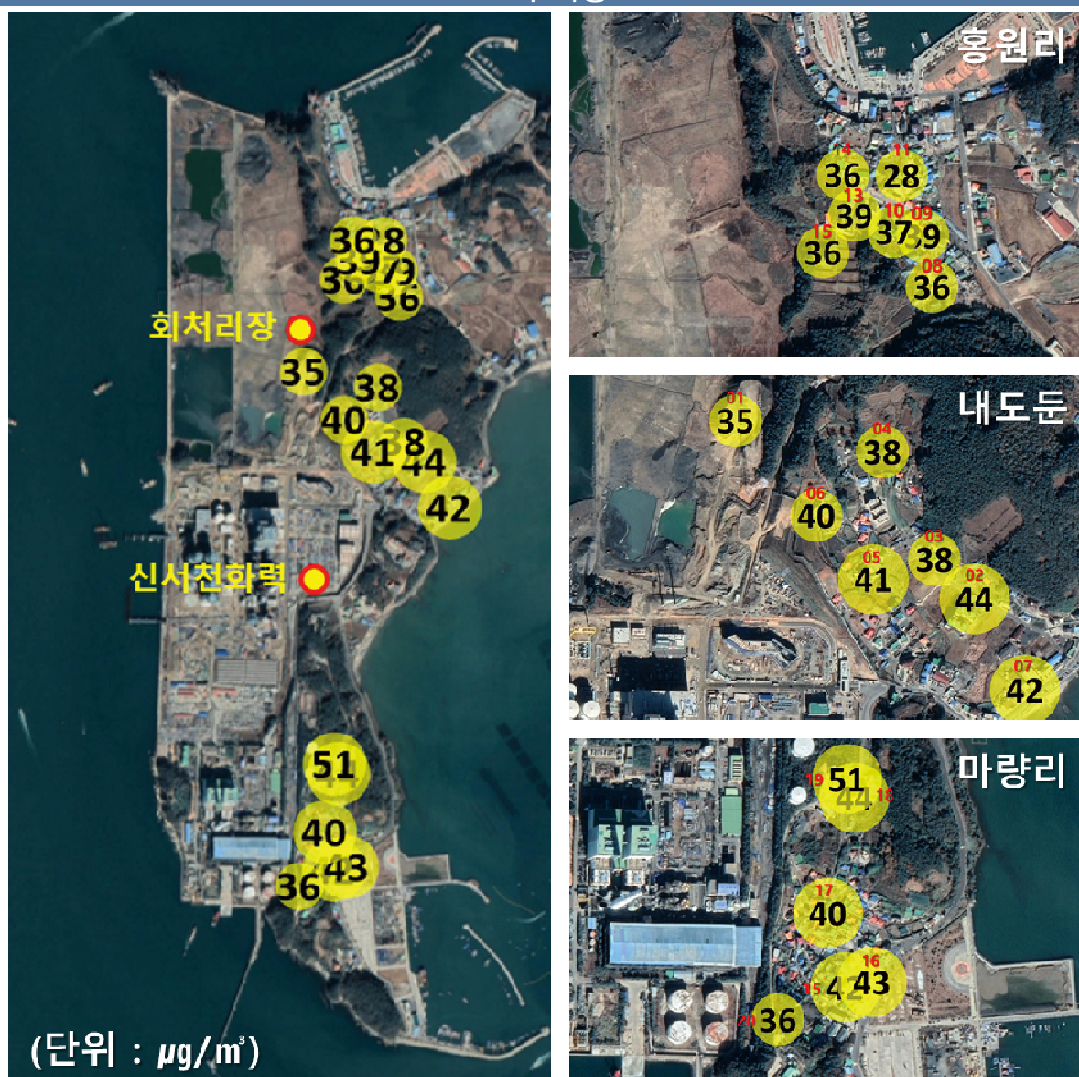
[그림 3.21] 1월 16일 미세먼지 조사 결과

○ 측정기간 전반적으로 시내에 위치하여 다양한 먼지 발생원의 영향으로 서면측정소의 미세먼지 농도가 발전소 주변지역의 농도보다 상대적으로 높게 나타나고 있으나, 1월 18일에는 반대로 발전소 주변지역의 농도가 시내 서면측정소의 농도보다 높게 나타나고 있는 것을 확인하였음

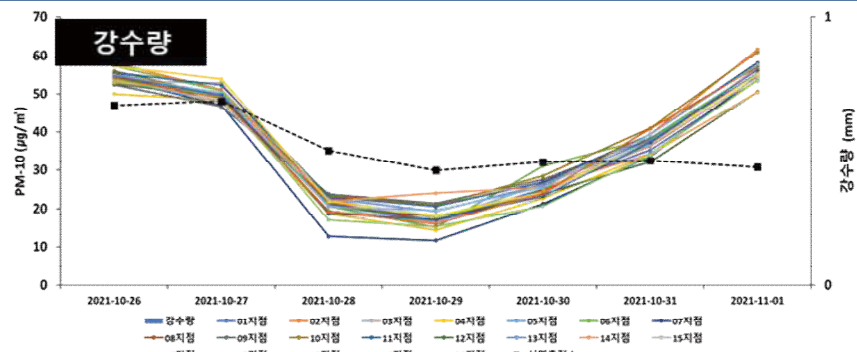
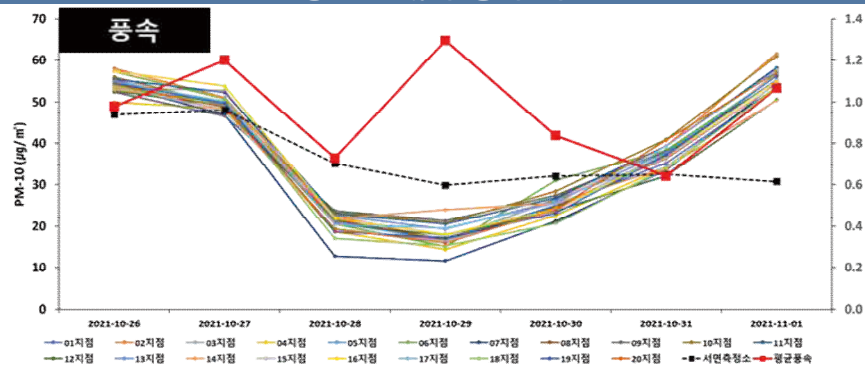
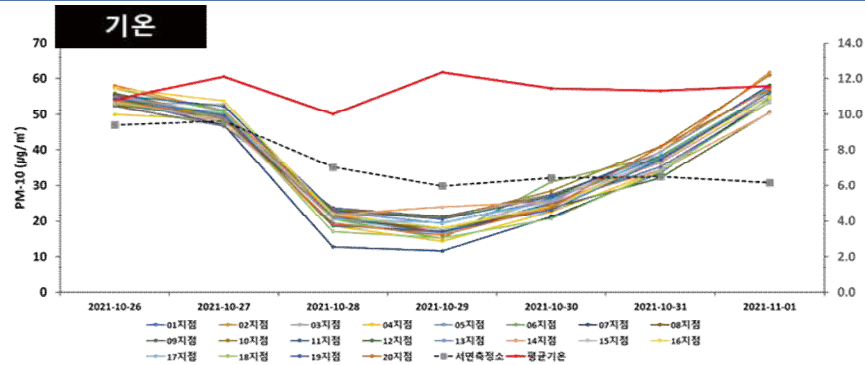
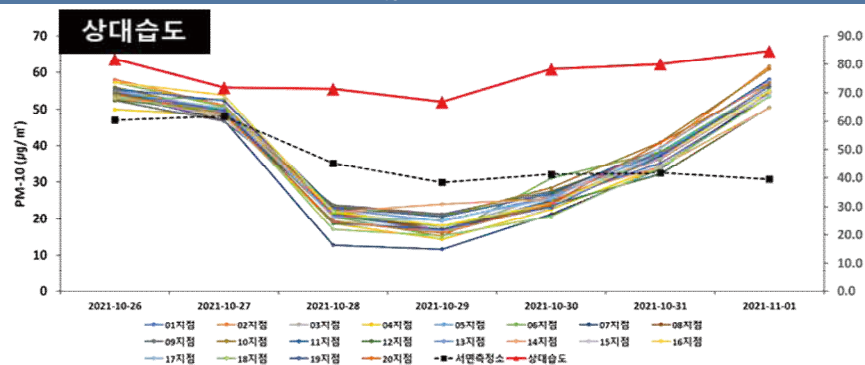
- 이는 1월 18일 새벽부터 아침까지의 대기 정체의 영향으로 보이며, 강설 이후에 바로 미세먼지 농도가 감소하고 있음. 서면측정소의 미세먼지 농도가 낮게 측정됨에도 화력발전소 인접지역의 미세먼지 농도가 높은 것은 회처리장의 영향이 대기 정체와 맞물려 일어난 것으로 판단됨



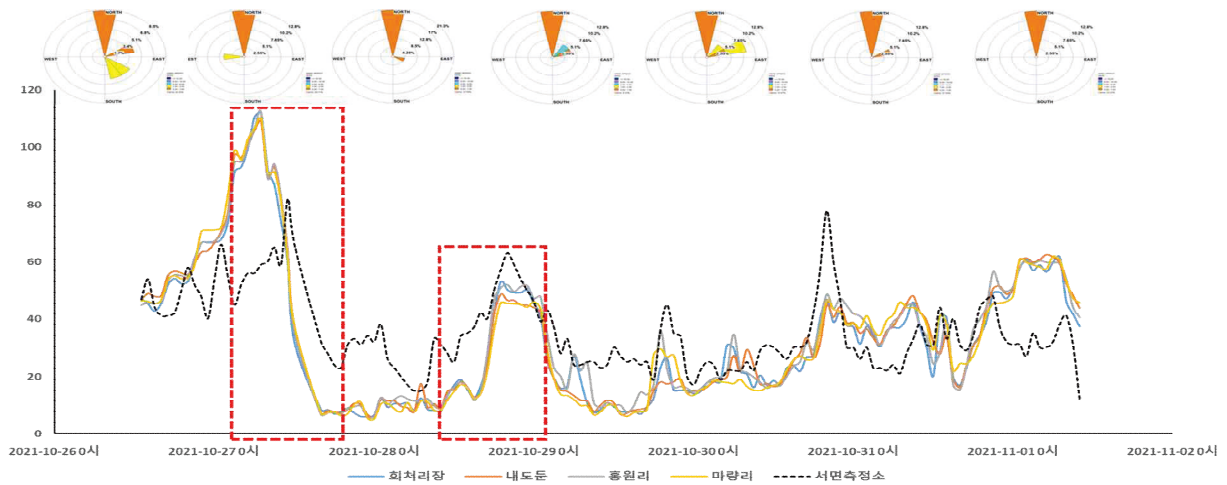
2차 측정



[그림 3.23] 신서천화력발전소 주변지역의 2차 미세먼지 농도의 공간분포 비교

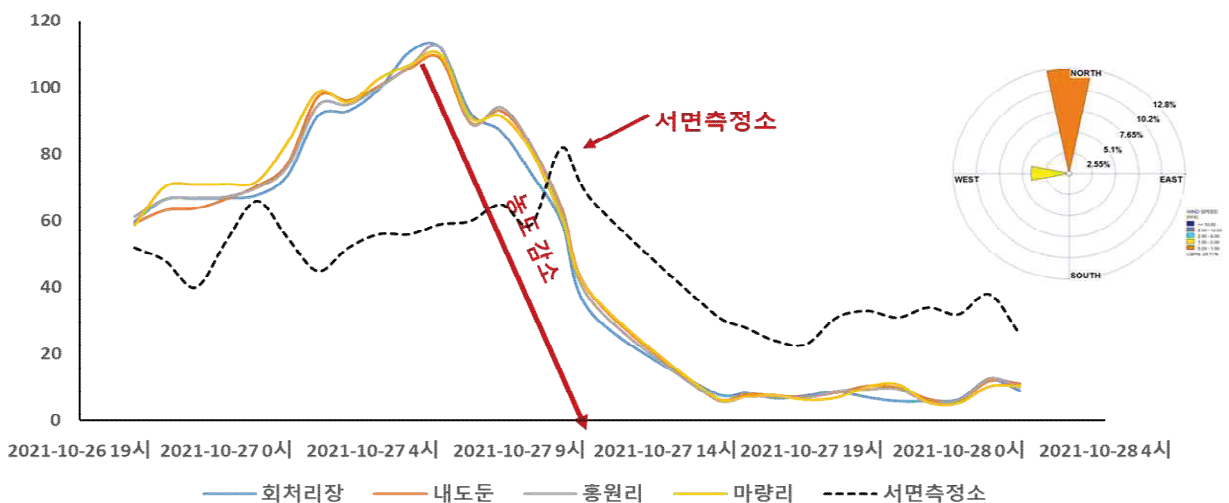
일평균 PM₁₀과 강수량 비교일평균 PM₁₀과 풍속 비교일평균 PM₁₀과 기온 비교일평균 PM₁₀과 상대습도 비교

[그림 3.24] 신서천화력발전소 주변지역의 미세먼지 2차 조사결과

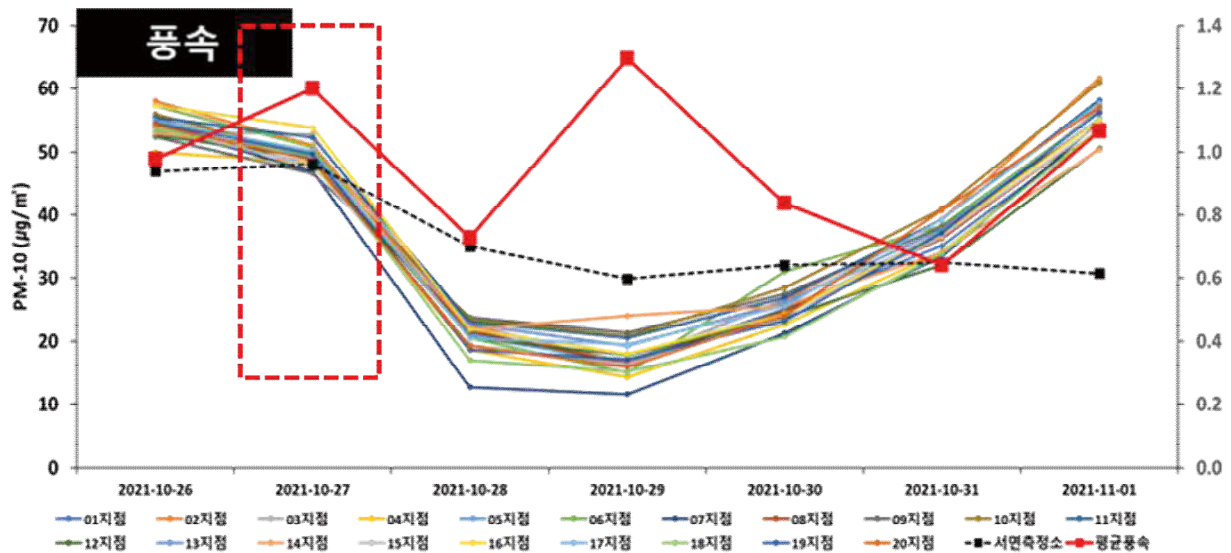


[그림 3.25] 신서천 화력발전소 주변지역 미세먼지(PM₁₀) 조사 결과(2차)

- 2차 조사 기간 중 평균농도는 홍원리 > 마량리 = 내도둔 > 회처리장 = 서면측정소 순으로 나타남
- 조사기간 동안 서면측정소의 농도가 상대적으로 가장 높게 나타났으나 10월 27일은 주변지역이 서면측정소 보다 높게 나타났고 10월 27일 대기 정체와 국외 유입 미세먼지 영향으로 북풍이 불 때 미세먼지 농도가 높아지는 경향을 보임. 10월 27일 4시부터는 미세먼지 농도가 감소하기 시작했으나, 28일 14시경부터는 다시 농도가 높아졌음



- 27일 보도자료에 의하면 중국발 영향으로 미세먼지 농도가 나쁨으로 보도(본 보고서 67쪽 에어코리아 통계자료 참조)되었다가 오후 풍속이 강해지면서 농도가 감소하는 것을 파악하였으며, 이에 풍속의 영향에 따른 미세먼지 변화 경향을 확인하였음



[그림 3.27] 10월 27일 조사 당시 풍속 변화

- 결국 PM_{10} 평균농도에서는 측정지점간 차이가 크지 않으며, 시내 서면측정소의 농도가 측정소 주변 도로변 및 서면농공단지와 같은 주변 발생원의 영향으로 발전소 인접지역보다 상대적으로 높은 경향을 보이나, 강우나 강설 전, 기온 상승 등으로 인한 대기 정체가 발생하는 상황에서는 국외 유입 미세먼지와 함께 회처리장 인접지역의 미세먼지 농도가 높아질 수 있음을 확인함

3. 소결론

- 4차년도 연구는 신서천화력 내·외부 인접지역 20개소(내도둔, 홍원리, 마량리, 회처리장)에서 1차(1월 13일 ~ 1월 20일), 2차(10월 26일 ~ 11월 1일)로 나누어 대기질 조사를 수행하였음
- 아황산가스(SO_2)의 경우 1차 조사의 경우 5지점 불검출, 2차 조사의 경우 10지점 불검출이 나타났으며, 전체적인 농도 값은 낮으나 발전소 인근 지역이 상대적으로 높은 것으로 확인되었음
- 조사지역(회처리장, 내도둔, 홍원리, 마량리)의 입자상 물질의 크기는 1차 조사는 $10\mu\text{m}$ 이상이 가장 많이 관찰되었으며, 2차 조사는 국외 유입으로 인한 $2.5\mu\text{m}$ 미만이 가장 많은 비중을 차지하였음
- 2차 조사 당시에는 회처리장 가동이 중단되었음에도 국외 미세먼지 유입영향에 따라 미세먼지 입자상 물질 크기가 작은 $2.5\mu\text{m}$ 미만이 상대적으로 높게 나타나, 회처리장 운영상황과 외부 미세먼지 유입이 영향을 미쳐 미세먼지 입자 크기 차이가 달라진 것으로 분석하였음
- 일반적으로 서면측정소의 농도가 도로 등 내부 발생원의 영향에 따라 상대적으로 높게 나타났으나, 대기가 정체된 1월 18일의 경우에는 회처리장 주변지역이 서면측정소(국가대기측정망) 보다 높게 나타났고, 2차 조사 10월 27일 오전의 경우에는 기온이 상승하고 대기가 정체되면서 회처리장과 외부 미세먼지 유입 영향으로 회처리장 주변 지역 미세먼지 농도가 급격하게 상승한 것을 확인할 수 있었음
- 따라서, 농도 이외에 회처리장의 실시간 먼지 발생량, 주변지역 먼지 농도(침적량), 기상 상황을 연계하여 비산먼지 배출량 해석과 이에 상응하는 대응 대책 수립 이행이 필요함

제4장 시스템 개발 및 테스트베드 운영

1. 실시간 비산먼지 Flux 배출량 모니터링 시스템 개발
2. 테스트베드 성과
3. 회처리장 실시간 비산먼지 Flux 배출량 측정장비 설치 및 운영
4. 소결론

1. 실시간 비산먼지 Flux 배출량 모니터링 시스템 개발

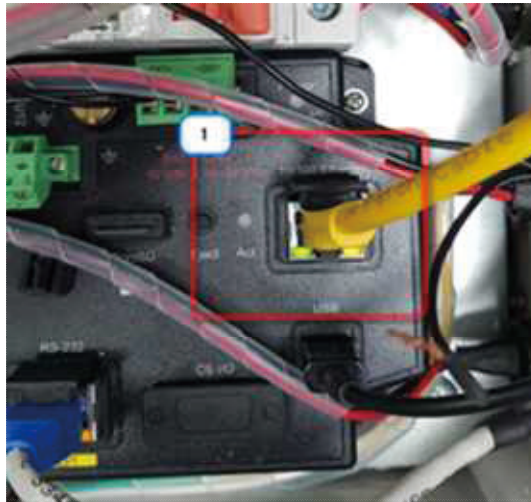
1.1. 데이터로거를 이용한 Flux 산정 실시간 측정자료 수집

- 비산먼지 Flux 배출량 측정자료를 수집하기 위한 측정 장비는 3차원 기상장비, 미세 먼지 측정기 등 디지털 방식으로 자료를 전송하고 있는데, 여러 측정 장비를 연결해 데이터를 수신하고 주기적으로 PC로 자료를 전송하는 데이터로거를 사용하고 있으나, 측정기별 데이터 저장방식이 달라 전체 자료를 한꺼번에 처리하기에 어려움이 있음
- 회처리장에 설치한 측정기기에서 실시간 비산먼지 Flux 배출량 측정자료를 수집하고 이를 받아 프로그램에서 계산, 표출하기 위해 Cambell Scientific사에서 제공하는 데이터로거 관리 프로그램인 LoggerNet을 활용함



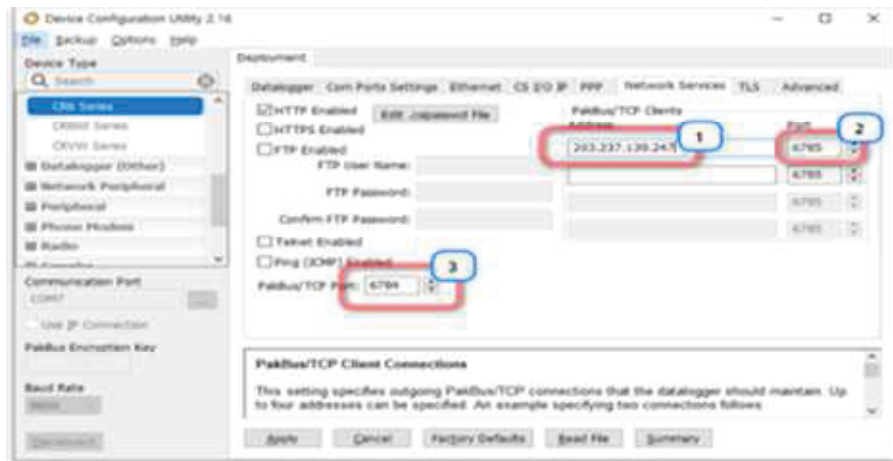
[그림 4.1] LoggerNet 메인 화면 예시

- LoggerNet에서 저장된 자료를 인터넷 통신으로 데이터를 전송하기 위해 데이터로거의 Ethernet 포트 1에 인터넷선을 연결하며, LTE 모뎀 이후부터는 일반 유선 인터넷과 동일한 조건이기 때문에 LTE 모뎀과 연결된 인터넷 라인을 아래 [그림 4.2]과 같이 연결하여 사용함



[그림 4.2] 데이터 로거에 인터넷 라인 연결 예시

- 이후 LoggerNet 프로그램 내 측정 데이터 설정 화면에서 3D 기상 측정 데이터, 온습도 측정 데이터, 측정기기 상단에 설치한 측정 데이터, 하단에 설치한 측정 데이터 등으로 구분하여 측정값을 관리하는 프로그램을 구성하였음



[그림 4.3] Utilities 설정 화면

- 구성된 프로그램에 1분 단위로 새로 생성된 값을 확인한 후 측정항목에 맞는 DB에 데이터를 저장하였으며 기능에 따라 기상 측정, 측정기기에서 생성하는 데이터, 케이웨더 미세먼지 측정값을 가져오는 프로그램으로 구성하였음



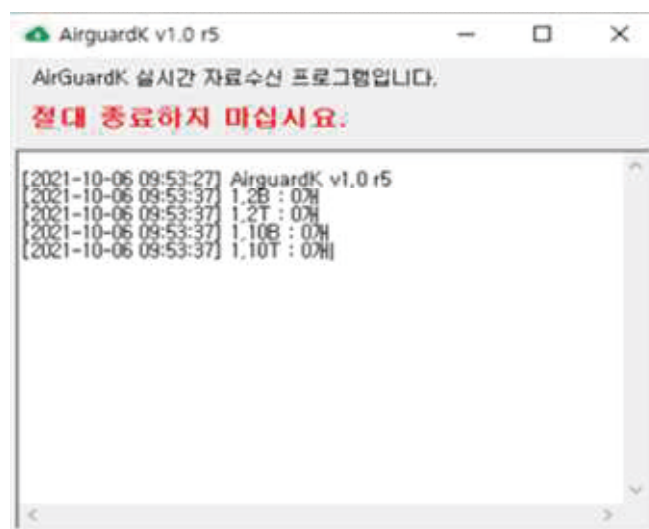
[그림 4.4] 데이터 전송 프로그램 예시

- 케이웨더 미세먼지 측정값은 케이웨더에서 자체 운영하는 서버에 값이 저장되기 때문에 서버에서 측정값을 가져와 본 연구에서 운영하는 DB 서버에 측정값을 입력하는 기능이 필요함

K^W WEATHER IAQ Station • Update : 2021-10-12 오후 02:02

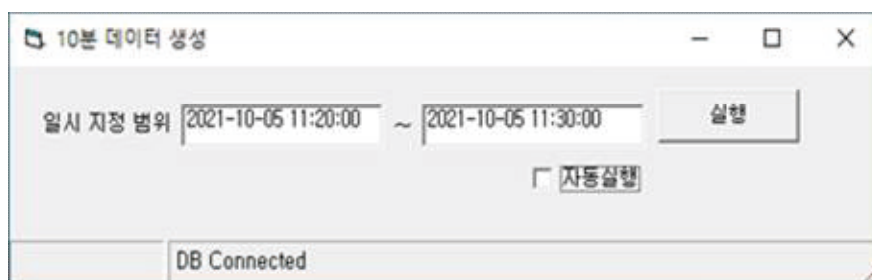
스테이션명	날짜시간	미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO2 (ppm)	VOCS (ppb)	소음 (dB)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	통계
대전대학교06	2021-10-12 14:00	14				17.2	81	2	
대전대학교05	2021-10-12 14:00	32				18.5	65	4	
대전대학교04	2021-10-12 14:00	12				17.0	90	1	
대전대학교	2021-10-12 14:00	49				18.7	73	28	

[그림 4.5] 케이웨더 측정값 관리 화면(케이웨더 제공)



[그림 4.6] 케이웨더 미세먼지 측정기 데이터 전송 프로그램

- 최종적으로 DB 서버에 입력된 측정값의 10분 평균값을 산출해 화면에 표시하였으며, Flux값, Monin-Obukhov Length, Richardson Number, 대기 안정도 등을 계산하여 10분 간격으로 프로그램이 실행되도록 설정한 후 10분 평균값과 10분 측정값을 이용한 최종 플럭스 계산값을 모니터링 시스템 DB에 저장하도록 함

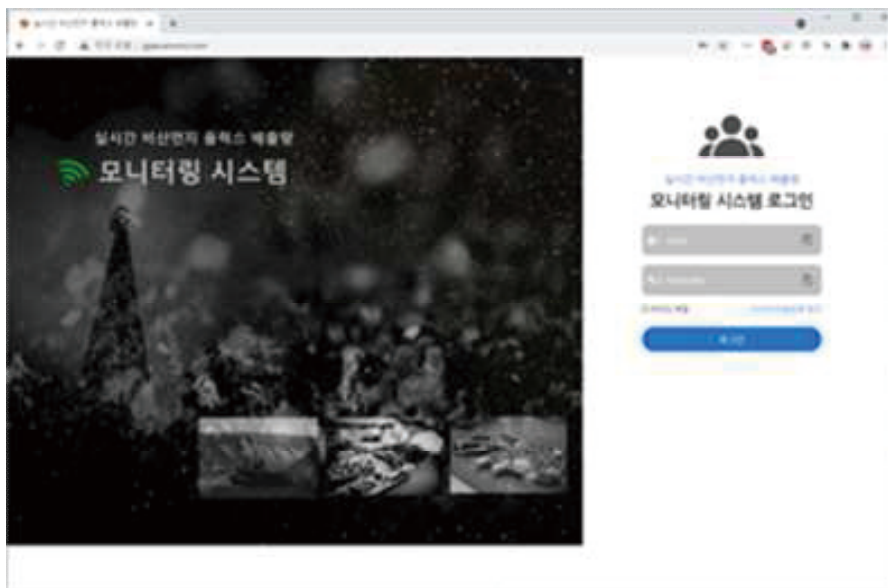


[그림 4.7] 데이터 생성 프로그램

1.2. 실시간 비산먼지 Flux 측정 모니터링 시스템 구현 및 운영

○ 모니터링 시스템 웹 프로그램 구현

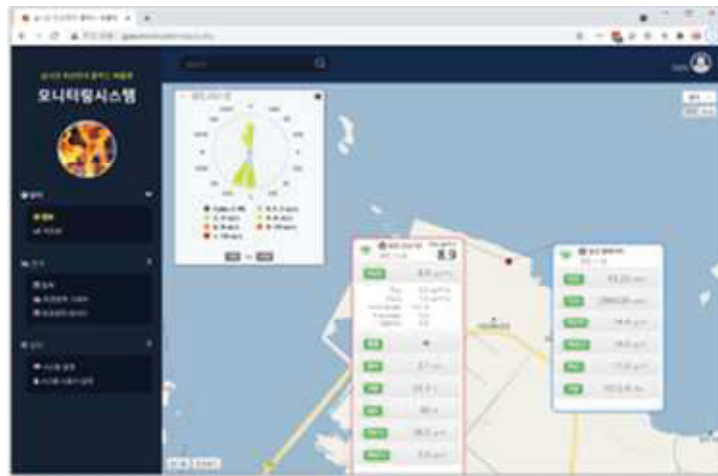
- 웹기반을 통한 실시간 비산먼지 배출량(Flux) 산정 시스템을 구현하여 PM₁₀ 배출량, 기상측정자료 등을 실시간으로 제공하도록 구성함
- 측정값을 이용한 DB 생성과 Flux 계산 등의 계산 작업은 백그라운드 프로그램에서 자동으로 실행됨



[그림 4.8] 실시간 비산먼지 Flux 배출량 시스템 시작화면

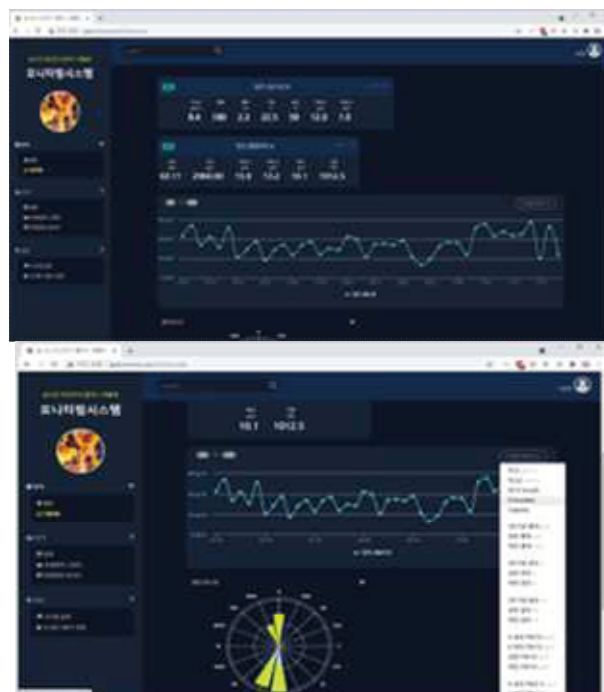
○ 모니터링 시스템 운영

- 측정항목은 Flux(산술식 계산에 의해 얻어지는 계산값 모두 포함), 풍향, 풍속, 기온, 습도, PM₁₀, PM_{2.5} 그룹으로 나뉘어 있으며 각 항목을 클릭하면 상단, 하단, 측정기 종류에 따라 세부 측정값이 표시되도록 함
- GPS상 지점별 측정 항목은 간단 보기, 전체 보기를 선택하여 결과값을 볼 수 있도록 하고 기상 측정 현황 파악을 용이하도록 바람장미를 추가로 좌측 상단에 표시함



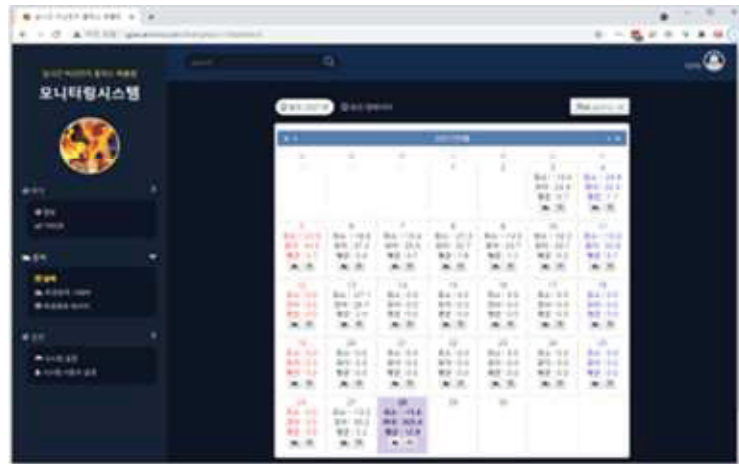
[그림 4.9] 모니터링 시스템 메인화면

- 차트뷰는 현재 측정값과 사용자가 원하는 시간 동안의 측정값 변화를 차트를 이용하여 확인할 수 있으며 상단에 각 측정항목에 대한 대표 측정값을 표시하도록 함
- 하단에는 측정항목에 대한 목록이 그룹화되어 표출되며 차트로 표시할 항목을 선택하면 원하는 측정시간과 측정값을 확인할 수 있음



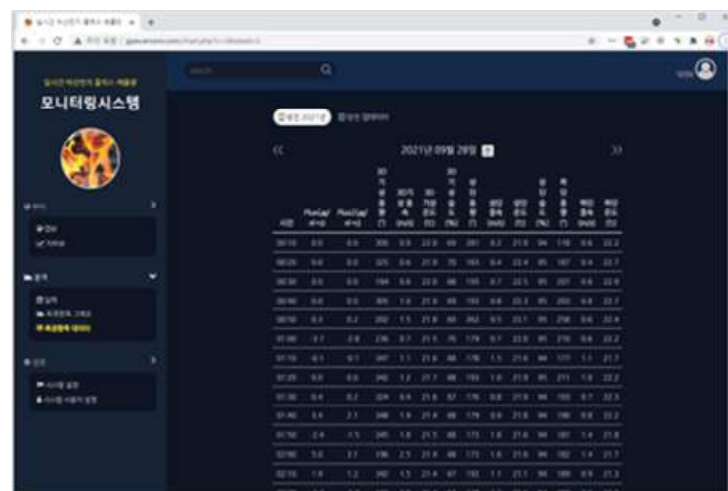
[그림 4.10] 모니터링 시스템 차트뷰 상,하단 화면

- 각 항목에 대한 일별 측정현황(최대값, 최소값, 평균값)을 확인할 수 있도록 표시하여 일별 변화추이를 확인하기 쉽도록 구성함
- 각 일자 하단 아이콘을 통하여 일자의 측정항목 그래프 화면과 데이터 화면으로 이동 가능함



[그림 4.11] 모니터링 시스템 일별 측정현황

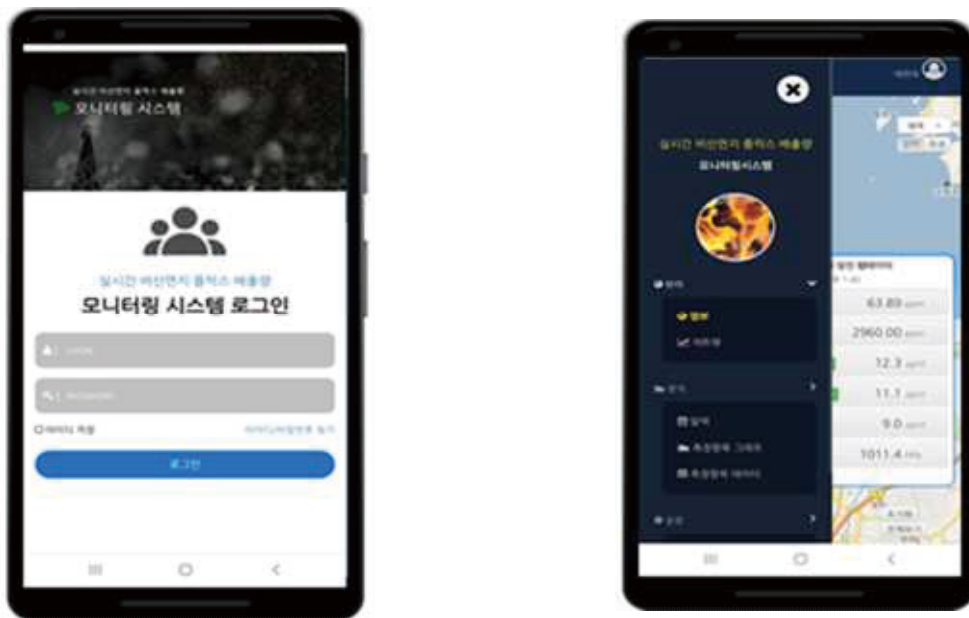
- 측정항목 데이터 부분에서는 일별-항목별 측정, 계산 데이터를 수치로 확인할 수 있고 측정값을 Excel 형태로 다운로드가 가능하도록 하는 동시에 10분 단위 데이터를 한 번에 확인할 수 있도록 구현함



[그림 4.12] 모니터링 시스템 측정항목 데이터 화면

○ 모니터링 시스템 모바일 프로그램

- 실시간 비산먼지 Flux 배출량 모니터링 시스템을 스마트폰이나 태블릿 PC와 같은 모바일 장비에서도 확인할 수 있도록 구성하여 장소에 구애받지 않고 어디서나 실시간 Flux 배출량 확인이 가능하도록 함
- 모바일 기기의 Chrome 브라우저를 사용하여 gpes.envoers.com으로 연결하여 모니터링 시스템을 접속할 수 있으며 모바일 장비의 화면 크기에 맞도록 반응형 웹을 구성함



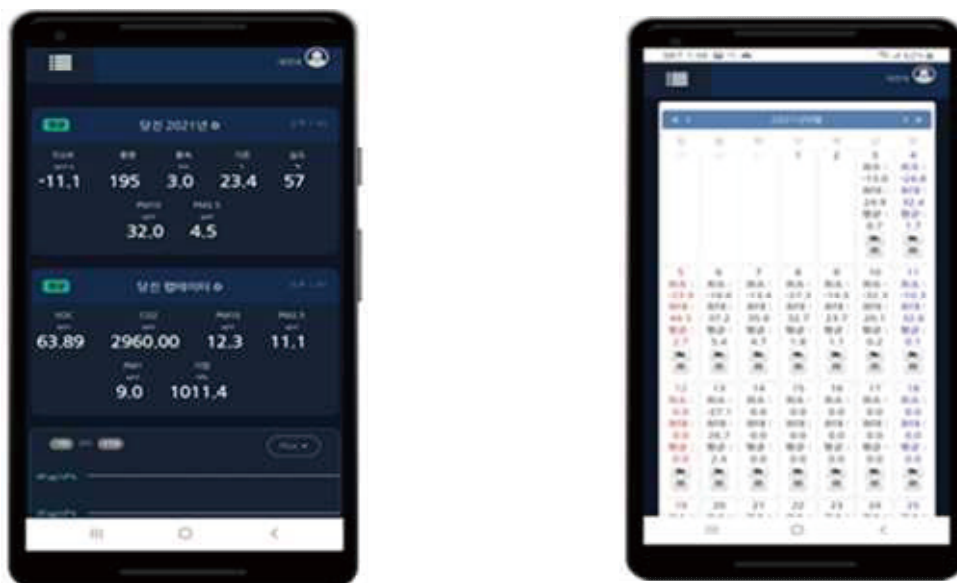
[그림 4.13] 모바일 모니터링 시스템 접속 화면

- PC 버전과 동일한 구성을 모바일로 이용이 가능하며 메인화면에서 좌측 상단 목록을 터치하면 다른 항목의 차트 확인도 가능함



[그림 4.14] 모바일 모니터링 시스템 메뉴 및 측정항목 데이터

- 이러한 모바일 기기를 사용한 모니터링 시스템 개발을 통하여 장소와 시간에 구애 받지 않고 Flux 배출량을 확인할 수 있으며 그에 따른 고농도 상황에 따른 즉각적인 반응과 빠른 대응조치가 이루어질 수 있을 것이라고 사료됨



[그림 4.15] 모바일 모니터링 시스템 차트뷰 및 일별 측정결과

2. 테스트베드 성과

2.1. 데이터 누락 관리방안

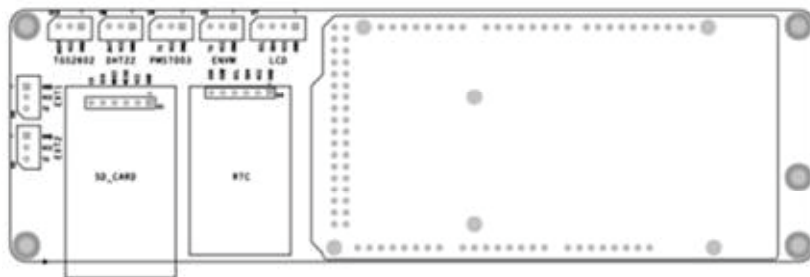
2.1.1. 측정장비 메인보드 교체

[문제점]

- 3차년도 진행당시 옥외 저탄장 실시간 비산먼지 Flux 배출량 측정장비 메인보드는 브레드보드로 구성되어 있으며 브레드보드 사용시 헤더핀 빠짐 현상, 기기 내부 펄스 문제로 인하여 데이터가 누락 되는 현상이 있었음
- 또한 브레드보드 내부가 PCB 판넬과 같이 회로도 형식이 아닌 +, - 직렬 형식으로 되어 있어 안정성이 떨어짐
- 이러한 문제를 해결하기 위하여 회로와 헤더핀을 접합하여 오배선의 우려가 없으며 회로가 브레드보드보다 안정적인 PCB 판넬을 제작하여 사용하였음



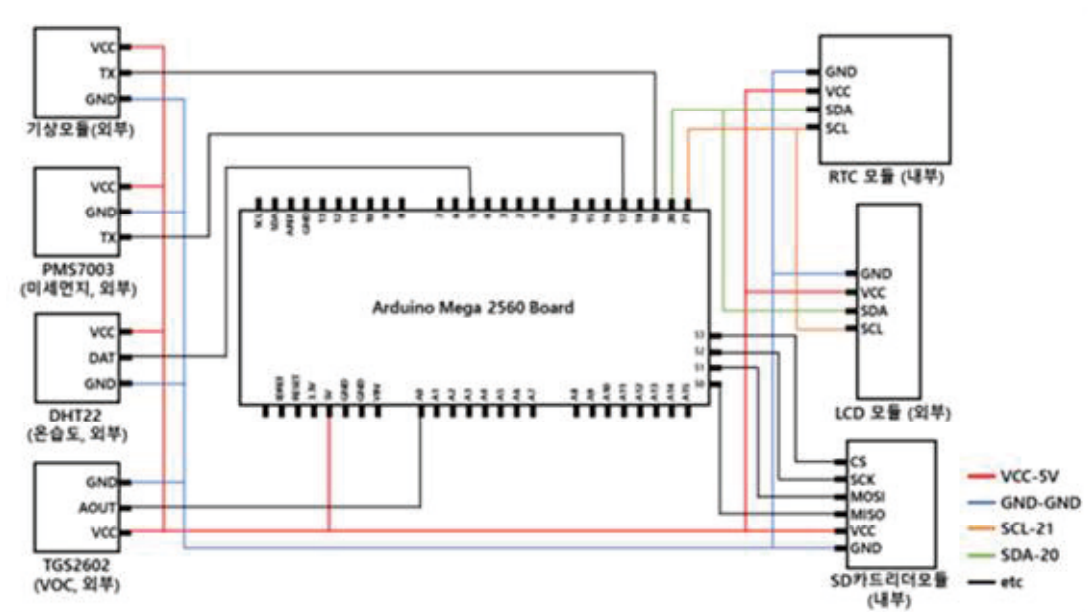
[그림 4.16] 측정장비 메인보드 PCB판넬로 교체



[그림 4.17] 측정장비 메인보드 PCB 배치도

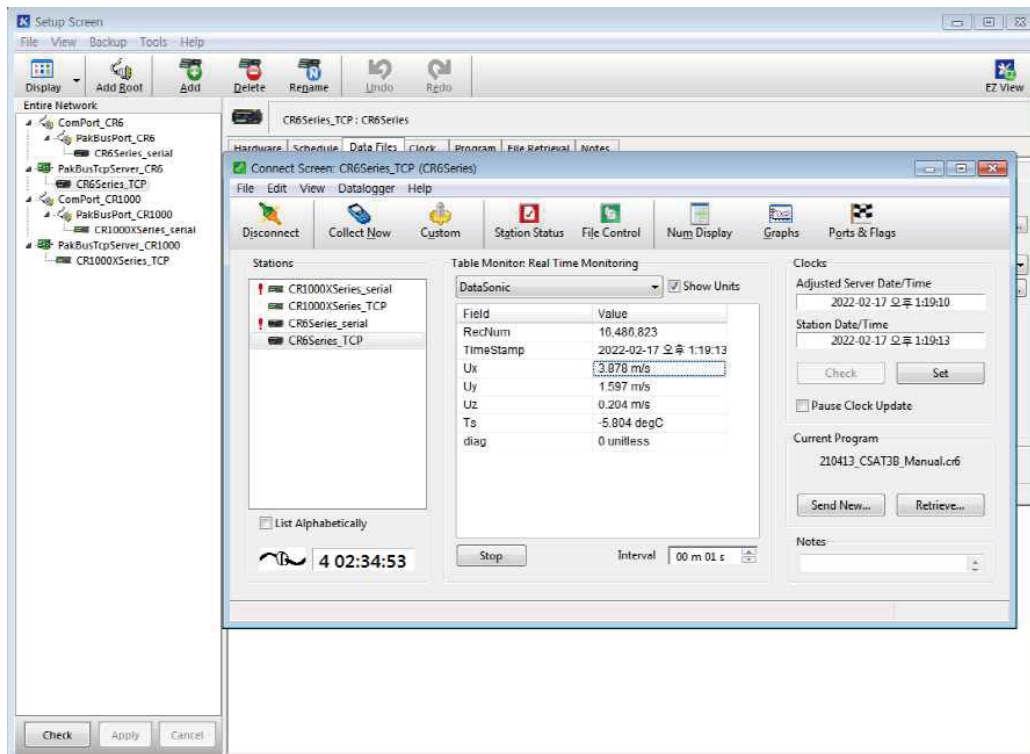
[해결방안]

- RTC 모듈과 SD 카드리더 모듈은 PCB 내부에 부착하며, 나머지 모듈(기상, 미세먼지, 온습도, VOC, LCD)들을 핀 형식으로 연결한 후 외부에 설치하는 방식으로 헤더핀 빠짐 현상을 방지하였음
- 기상 측정기 코딩 시 사용되는 코드를 새로 제작한 메인보드 회로도의 핀 번호와 일치하게 작성하여 사용 범용성을 높임



[그림 4.18] 측정장비 메인보드 PCB 회로도

- 이에 따라, 제작이 완료된 PCB를 장착한 기상 측정기 TCP 및 Serial 통신을 연결하여 데이터가 누락되지 않고 정상적으로 저장되도록 조치하였으며 모든 기상측정기 메인보드 교체 후 테스트베드 운영을 거쳐 회처리장의 데이터를 누락 없이 수집하였음



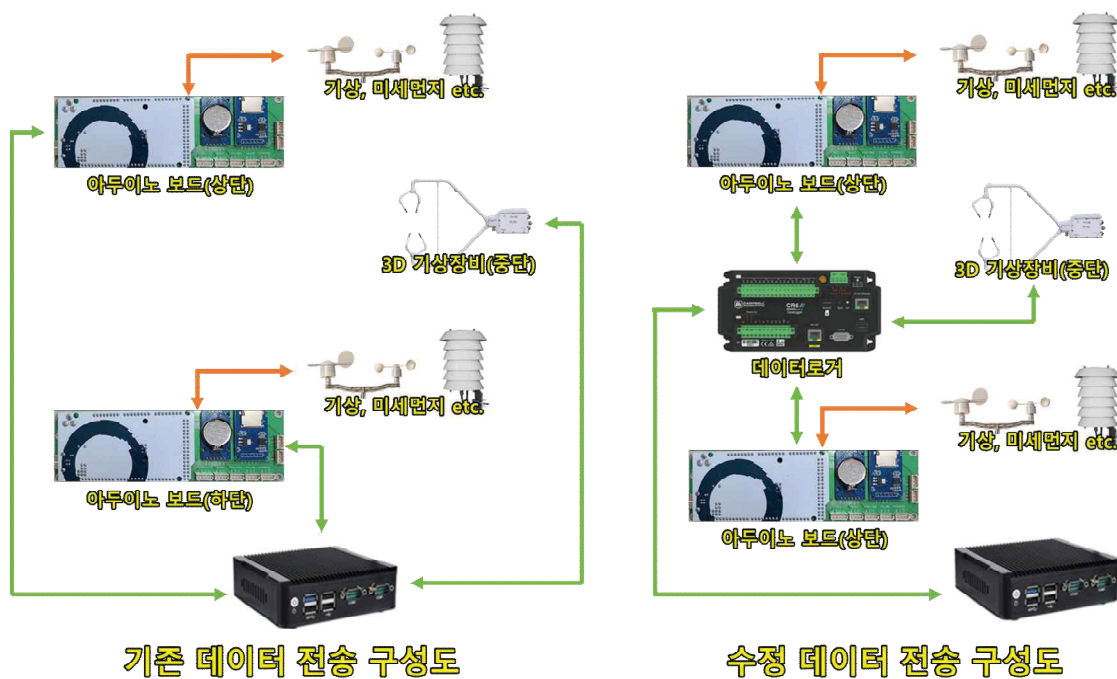
[그림 4.19] 측정장비 메인보드 PCB 통신 연결 예시

2.2. 데이터 송·수신 안정화

2.2.1. 데이터 송·수신 안정화를 위한 통신장비 선정 및 모듈 구축

[문제점]

- 3차년도와 비교해 측정항목 증가로 더 많은 데이터와 안정적인 데이터 송수신이 필요하여 3차년도 당시 제작한 측정기기를 보완하여 신규 측정기기 제작 및 데이터 송·수신 모듈을 구축함
- 데이터로거와 통신 모듈(LTE)을 이용한 측정 데이터 무선 송·수신 방식으로 수정 하였으며, 무선 LAN을 통신 모듈과 직접 연결하여 데이터 송수신을 안정화함



[그림 4.20] 수정 데이터 전송 구성도

[해결방안]

- 신호 전송 방식은 데이터 송·수신 안정화를 위하여 디지털 방식으로 통신장비를 구성하였음
- 디지털 신호 방식은 통신 프로토콜만 알면 쉽게 데이터를 추출할 수 있는 장점이 있으며 신호 송수신 중 오류만 없다면 측정기에서 전송한 값 그대로 데이터를 수신할 수 있음
- 디지털 방식은 TTL, RS-232, RS-485이 있으며 TTL 또는 RS-485 통신의 경우 PC에 직접 연결할 수 없으며 TTL to RS-232 컨버터, RS-485 to RS-232 컨버터를 사용하였음



[그림 4.21] 디지털 방식의 케이블과 컨버터, 커넥터 예시

- 데이터로거는 여러 측정장비를 연결하여 데이터를 받고 데이터로거 내부 메모리에 데이터를 저장하여 PC로 자료를 전송하는 기능을 수행함
 - 데이터로거에는 각 장비를 연결할 수 있는 여러 종류의 통신을 제공하므로 사용할 측정기의 전송 방식에 맞는 데이터로거를 선정해야 하며 본 연구에서는 RS-232를 지원하는 포트가 많은 아래 [그림 4.22]과 [그림 4.23]과 같은 모델을 선정하였음



[그림 4.22] CR6 모습

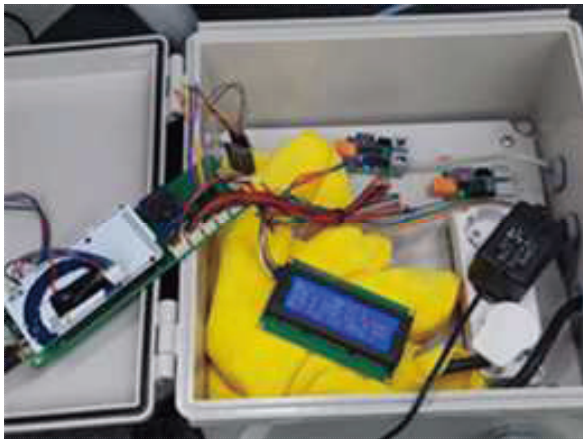


[그림 4.23] CR1000x 모습

- 무선 통신의 경우 원격지에 측정 장비를 설치하는 경우 무선으로 데이터를 전송해야 하기 때문에 LTE 모뎀을 이용한 무선 통신을 사용하였음
- 개별 연결 장비 및 아두이노 보드를 연결하여 회처리장의 비산먼지 배출량 산정을 위한 모듈을 구축함
 - 데이터로거와 직접 연결되는 장비들 CSAT3B(3차원 기상 측정), LUFT(온습도, 기압), Vaisala(온습도) 등을 연결하고 아두이노 보드를 이용하여 각 센서로부터 값을 받아 하나의 장비처럼 구성하였음



[그림 4.24] 기상 측정 장비 연결 모습



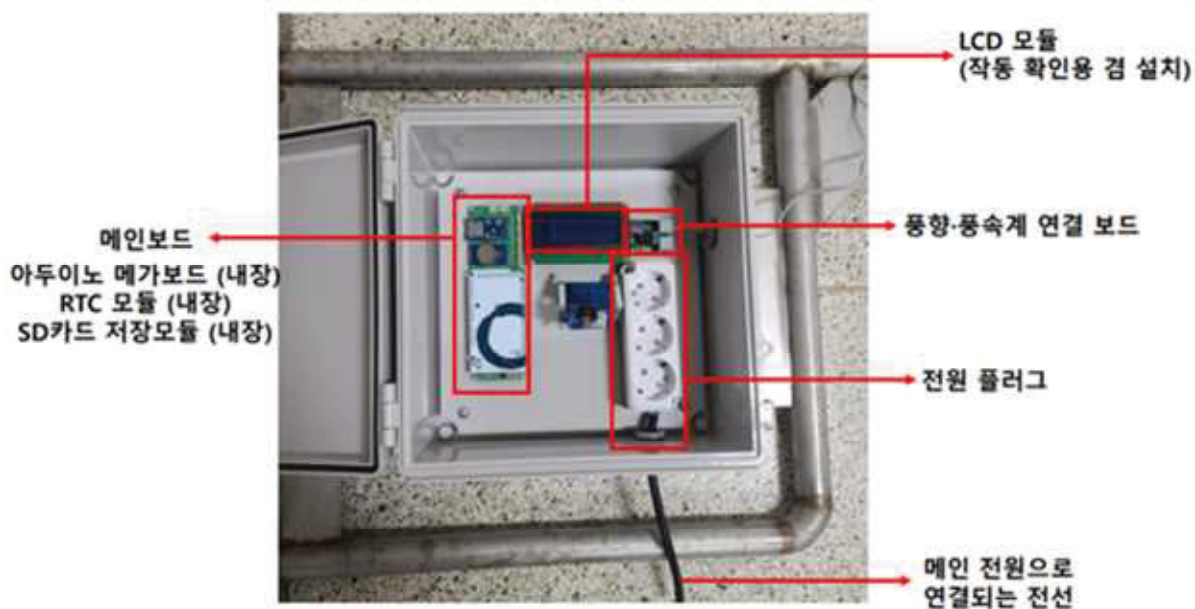
[그림 4.25] 아두이노 보드 및 데이터로거 연결 모습

2.3. 측정기 테스트베드 운영

2.3.1. 측정기 설치 단순화 진행

[문제점]

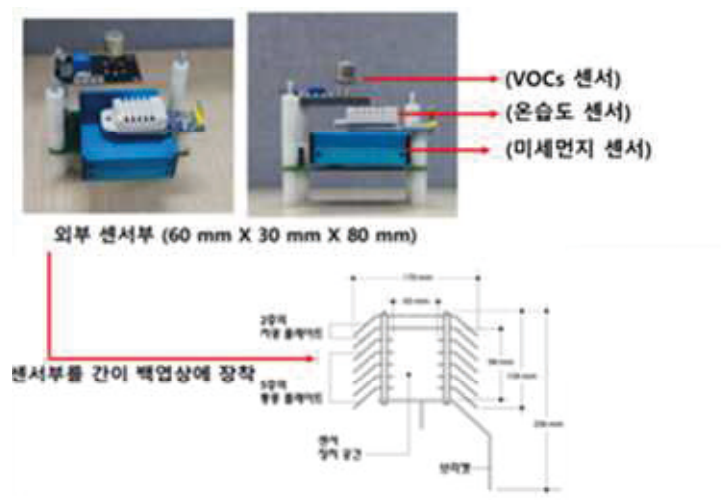
- 3차년도 연구당시 VOCs, 온습도, 미세먼지 센서를 측정박스 내부에 설치하였으나, 설치 이후 역풍, 박스 내 공기 정체현상 등 데이터의 정확성이 떨어져 외부에 설치함
- 3차년도 연구당시 옥외저탄장에 설치하였던 상·하단 기상측정기 내부와 전체적인 구성을 단순화하여 설치와 유지보수를 용이하게 재구성하였음
- 기상측정기의 경우 상·하단 각각 K-Weather 미세먼지 측정기와 자체 제작 기상측정기를 새로 제작한 컨트롤 박스를 사용하여 전력공급 및 아두이노 메인보드 장착 등 단순화 작업을 진행함



[그림 4.26] 기상측정기 컨트롤박스

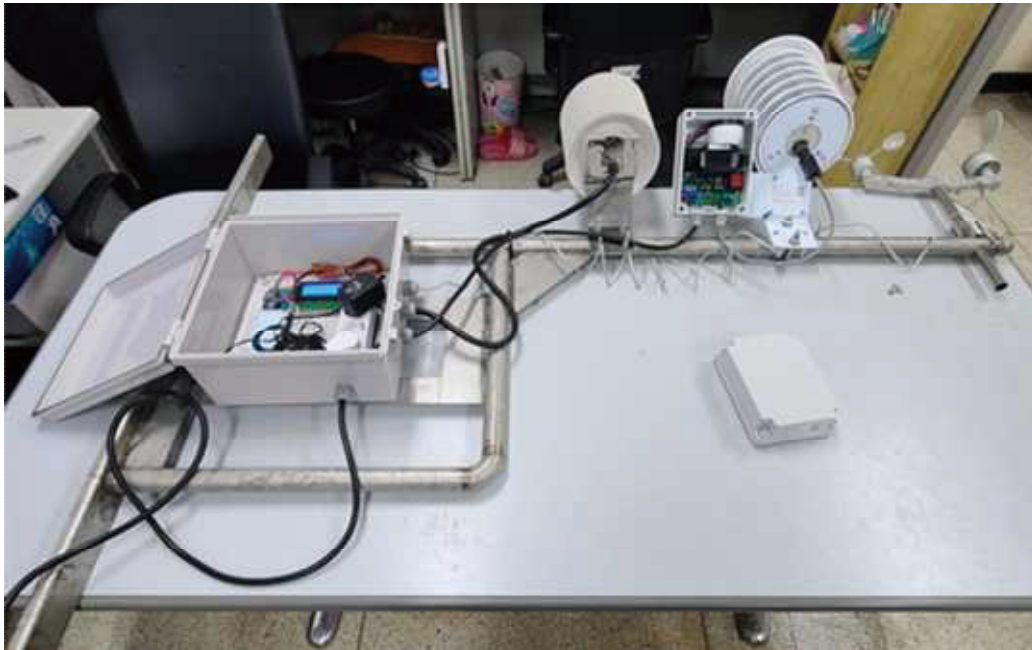
[해결방안]

- 센서부의 쉘터는 간이 백엽상을 선정하여 제작하였으며, 우천이나 기상악화에 따른 센서의 안정성 저하를 방지하기 위하여 아래 [그림 4.27]과 같이 설계하였음
 - － 3차년도 연구 당시 센서부가 컨트롤박스 내부에 부착되어 박스 내 공기 정체현상 등의 이유로 데이터의 정확성이 떨어져 VOCs, 온습도, 미세먼지 센서를 하나로 묶어 간이 백엽상 내부에 장착해 컨트롤박스 외부로 센서부를 설치하여 데이터의 정확성을 확보하였음



[그림 4.27] 측정센서 외부설치 설계도

- 3차년도에는 K-Weather 미세먼지 측정기의 경우 전원이 단일전선으로 연결되어 고소작업 진행 시 불편함이 있어 K-Weather 측정기의 전원을 컨트롤박스에 연결하여 현장 고소작업을 단순화함



[그림 4.28] 단순화된 기상측정기 예시

- 4차년도 연구 진행을 위해 3차년도 당시 단점과 문제점을 보완하여 화력발전소 주변 현장에 설치하기 전 연구실에서 자체적인 테스트베드를 운영하였음
 - － 기상측정기 정상 가동을 테스트하기 위하여 연구실 건물 내부에서 측정기 시범운동을 진행하였음



[그림 4.29] 상단부 측정장비



[그림 4.30] 중단부 측정장비



[그림 4.31] 하단부 측정장비

- 건물 내부 테스트베드 운영 결과 K-Weather 측정기의 5분 단위 미세먼지 데이터가 정상적으로 수집되는 것을 확인하였으며, 컨트롤박스를 통하여 센서 데이터의 정상 작동을 확인하였음

스테이션명	날짜시간	미세먼지 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	CO2 (ppm)	VOCs (ppb)	소음 (dB)	온도 ($^{\circ}\text{C}$)	습도 (%)	PM2.5 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	통합실내쾌적지수 (ICI)
대전대학교06	2021-08-18 17:35	25				28.0	51	3	93
대전대학교05	2021-08-18 17:35	27				27.6	53	4	91
대전대학교	2020-08-13 14:36								
대전_02	2020-07-03 09:36								
대전대학교03	2020-07-28 17:56								
대전대학교04	2020-09-02 17:06								

[그림 4.32] K-Weather 측정기 정상작동 결과 예시

- 건물 내부에서 테스트베드 운영을 통하여 정상 작동을 확인한 상·중·하단 기상측정 장비를 건물 외부에 설치하여 현장설치 전 실시간 데이터를 수집하는 최종 테스트베드 운영을 진행함



[그림 4.33] 건물 외부 최종 테스트베드 운영

- 회처리장 비산먼지 Flux 배출량 현장 측정 전, 본 연구기관 건물 외부에 실시간 데이터 수집 테스트베드를 운영하고, 모니터링 시스템을 통하여 정상적인 실시간 데이터 수집을 확인하였음

Flux air/m ² /s	Flux2 air/m ² /s	3D기상 풍향 °	3D기상 풍속 m/s	3D기상 온도 °C	3D기상 습도 %	방안 풍향 °	방안 풍속 m/s	방안 온도 °C	방안 습도 %	방안 풍향 °	방안 풍속 m/s	방안 온도 °C	방안 습도 %	K 방안 PM2.5 air/m ³	K 방안 PM10 air/m ³
7.6	7.3	42	1.5	23.5	70	24	2.7	23.4	95	23	2.1	24.9	95	26.0	11.0
				K 방안 PM2.5 air/m ³		K 방안 PM2.5 air/m ³		Richardson Number		Stability					
				14.5		NaN		-55.0		-0.2		4.0			

[그림 4.34] 최종 테스트베드 운영 결과 예시

2.3.2. 광산란법 PM2.5 미세먼지 측정기 등가성 평가

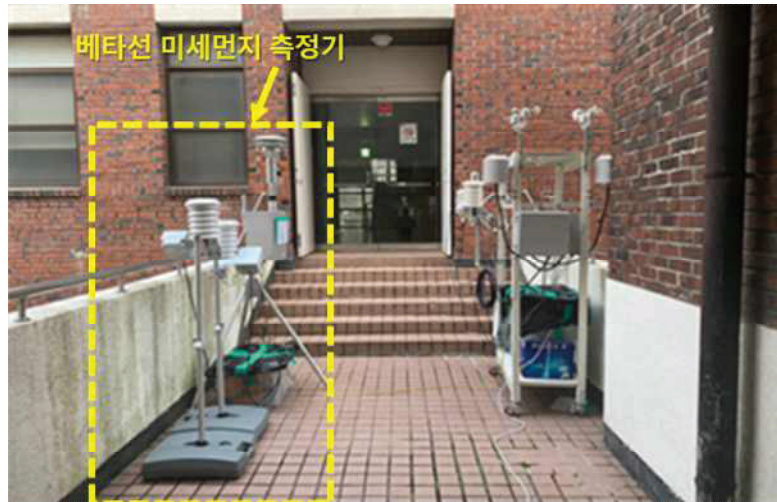
- 3차년도 보고서 참조
 - 3차년도 최종보고서 : 357p ~ 361p

2.3.3. 광산란법 PM10 미세먼지 측정기 등가성 평가

- 광산란법 PM10 미세먼지 측정기 등가성 평가 자료는 2차년도 연구결과를 활용하였으며 광산란법 PM10 측정기 성능에 대한 검증을 위해 대기오염공정시험기준(ES 01605.1 : 환경대기 중 미세먼지 자동측정법)에 준하여 평가를 실시
- 기준장비인 베타선 미세먼지 측정기(E-BAM)는 공인기관(KTL, 한국산업기술시험원)에서 ES 01605.1에 준하여 사전 검증 완료한 장비로 광산란법 PM10 미세먼지 측정기 2대에 대하여 2021년 08월 23일 ~ 2021년 09월 07일까지 등가성 평가를 수행

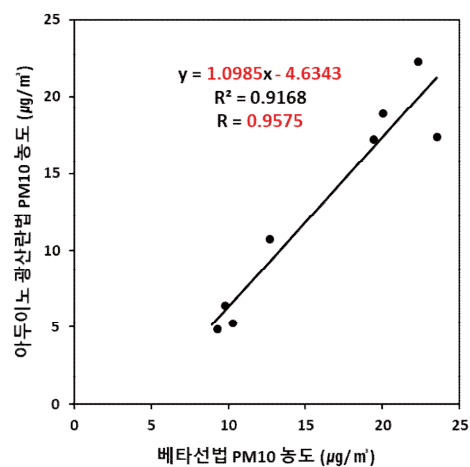
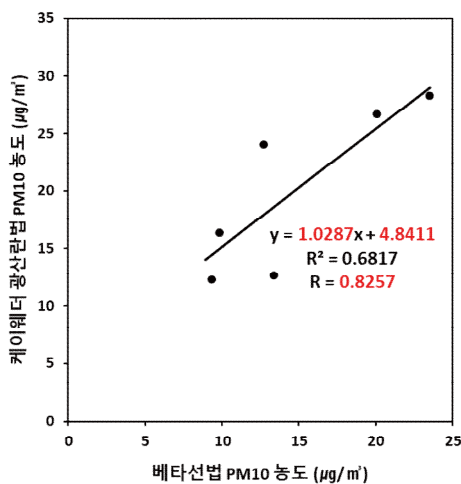


[그림 4.35] PM10 베타선 측정기 시험성적서



[그림 4.36] PM10 광산란법 측정기 자체 등가성 평가 실험 전경

- ES 0.1605.1(환경대기 중 미세먼지 자동측정법)의 등가성 평가에 따르면 “평균자료 (베타선법)와 중량 농도법 측정자료 최소 10일 이상을 대상으로 상관 직선을 최소 제곱법으로 구하여 기울기의 범위가 0.9 ~ 1.1, 절편의 값은 -5.0 ~ 5.0 이어야 한다.” 고 명시됨
- 광산란법 장비의 등가성 평가결과 베타산법과 광산란법 간의 기울기는 각각 1.0287, 1.09856, 절편의 값은 각각 4.8411, -4.6343로 ES 0.1605.1(환경대기 중 미세먼지 자동측정법) 범위를 만족함



[그림 4.37] PM10 베타선법 측정기 대 광산란법 측정기 상관분석도

3. 회처리장 실시간 비산먼지 Flux 배출량 측정장비 설치 및 운영

- 테스트베드를 완료한 기상측정 장비를 당진화력과 서천화력에 설치하여 운영하였음
- 설치장소 : 당진화력 내 회처리장 북동쪽
- 설치시기 : 2021년 09월
- 당진화력 내 회처리장 북동쪽에 타워를 설치하고 고소차량을 이용하여 상단, 중단, 하단에 측정기를 설치하였음



[그림 4.38] 당진화력 회처리장 타워설치 및 측정기 설치 현장 사진

- 미세먼지 측정장비는 9.0m 높이와 4.0m 높이에 설치하였고 3차원 기상센서는 6.5m에 설치함
 - 미세먼지 측정기 : 광산란법, 상부하부 2기 설치, 최소 1분 단위의 PM10 농도 측정
 - 3차원 기상센서 : 10Hz(1초에 10회)로 U_x 풍속, U_y 풍속 U_z 풍속, 풍향 및 기온 측정



[그림 4.39] 당진화력발전소 회처리장 배출량 조사 측정기 설치위치



미세먼지
측정기
상부
9.0m



3차원
기상센서
6.5m



미세먼지
측정기
하부
4.0m

[그림 4.40] 당진화력발전소 저탄장 배출량 조사를 위한 측정기 운영 전경

- 설치장소 : 신서천화력 내 회처리장 북동쪽
- 설치시기 : 2021년 10월
- 신서천화력 내 회처리장 외곽지역에 타워를 설치하고 고소차량을 이용하여 상단, 중단, 하단에 측정기를 설치하였음



[그림 4.41] 신서천화력 회처리장 타워설치 및 측정기 설치 현장 사진

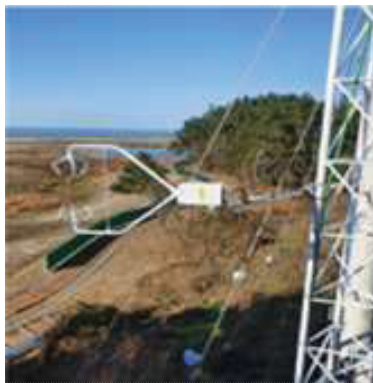
- 미세먼지 측정장비는 9.0m 높이와 4.0m 높이에 설치하였고, 3차원 기상센서는 6.5m에 설치함
 - 미세먼지 측정기 : 광산란법, 상부·하부 2기 설치, 최소1분 단위의 PM10 농도 측정
 - 3차원 기상센서 : 10Hz(1초에 10회)로 U_x 풍속, U_y 풍속 U_z 풍속, 풍향 및 기온 측정



[그림 4.42] 신서천화력발전소 회처리장 배출량 조사 측정기 설치위치



미세먼지
측정기
상부
9.0m



3차원
기상센서
6.5m

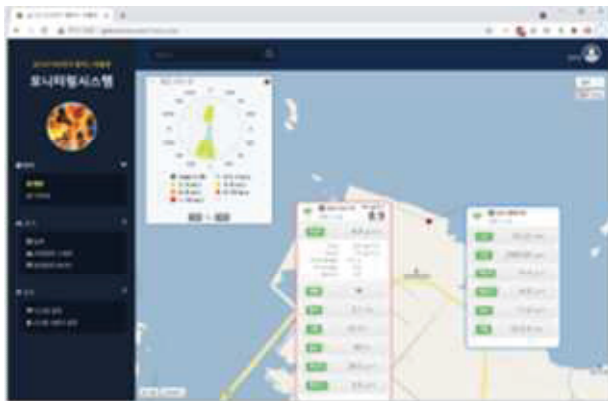


미세먼지
측정기
하부
4.0m

[그림 4.43] 신서천화력발전소 회처리장 배출량 조사 측정기 설치위치

4. 소결론

- 당진화력발전소와 신서천화력발전소 회처리장 내 실시간 비산먼지 Flux 배출량 측정 장비를 설치하였으며, 이를 실시간으로 측정자료를 수집하기 위하여 실시간 모니터링 시스템을 개발하였음
- 측정기기에서 수집한 실시간 비산먼지 배출량(Flux) 측정값을 측정기기과 데이터로거 하드웨어 설정, 측정값 관리의 기능을 가진 LoggerNet 프로그램을 이용해 측정값을 DB에 저장하고 저장된 값을 웹모바일 기반 실시간 Flux 배출량 모니터링 시스템에 사용할 수 있는 포맷으로 변환해 사용하였음
- 위와 같은 프로그램으로 측정값을 가공하여 웹과 모바일을 기반으로 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템을 구현하고 운영하여 실시간으로 측정값을 제공함



[그림 4.44] 웹, 모바일 기반 실시간 Flux 배출량 모니터링 시스템

- 이러한 실시간 모니터링 시스템 개발을 통하여 시간과 장소에 구애받지 않고 실시간으로 Flux 배출량을 확인할 수 있으며 고농도 발생 시 작업 중지 및 살수제어 장치와 연계하여 비산먼지 발생을 능동적으로 제어하는데 기여할 수 있을 것으로 판단됨

- 3차년도에는 브레드보드로 구성된 메인보드 사용으로 인하여 헤더핀 빠짐 현상 및 기기 내부 펄스 문제로 데이터 누락 현상 등의 문제가 발생함. 4차년도에는 이를 해결하기 위해 회로와 헤더핀을 접합하여 오배선 발생을 제거하고 안정적인 회로 PCB 판넬을 제작하여 3차년도에 발생한 문제점을 해결함
- PCB판넬 제작으로 메인보드 회로도의 핀 번호와 기상 측정기 코딩 시 사용되는 코드를 일치하게 작성하여 사용 범용성을 높였으며, 제작이 완료된 PCB를 장착한 기상 측정기 TCP 및 Serial 통신을 연결하여 데이터의 누락됨 없이 정상적으로 데이터를 수집할 수 있었음
- 3차년도 당시 구성한 측정기기에 측정항목이 추가되어 더 많은 데이터와 안정적인 송·수신이 필요하였고, 이에 따라 측정기기의 통신장비를 데이터로거와 통신 모듈(LTE)를 이용하여 새롭게 구성하고 무선 LAN을 통신 모듈과 직접 연결하여 데이터 송·수신을 안정화하였음
- 4차년도에는 회처리장에 장비를 설치하고 설치된 장비를 유지보수하기 위해 3차년도 설치하였던 상·하단 기상측정기 내부와 전체적인 구성을 단순화하는 작업을 진행하였음
- 3차년도 당시 미세먼지 센서 및 VOCs, 온습도 센서를 컨트롤박스 내부에 설치하였으나, 역풍과 박스 내 공기 정체현상 등 데이터의 정확성이 떨어져 외부에 관련 센서를 설치하는 것으로 변경하였음
 - K-Weather 미세먼지 측정기와 기상센서를 외부에 설치한 뒤 컨트롤박스 내부에 전원 플러그와 아두이노 메인보드 및 풍향·풍속계 연결 보드를 부착함
- 제작이 완료된 기상측정기는 건물 내부에서 테스트베드 운영을 통하여 정상가동을 확인한 후 상·중·하단 기상 측정장비를 건물 외부에 설치하여 현장설치 전 실시간 데이터가 모두 정상적으로 수집되는 것을 확인하였고 회처리장 설치 전 모든 측정장비가 정상 작동되는 것을 확인하였음

제5장 실시간 회처리장 시설 배출량 산정 결과 및 해석

1. 회처리장 관련 국가 배출량의 산정방법
2. 실시간 회처리장 비산먼지 모니터링 시스템 구성 및 운영
3. 실시간 회처리장 Flux 배출량 조사결과
4. 소결론

1. 회처리장 관련 국가 배출량의 산정방법

1.1. 회처리장 관련 국가 대기오염물질 배출량의 문제점

- 국가 대기오염물질 배출량이 배출원 분류체계에 회처리장은 없으나, 유사한 배출원으로 나대지가 있음
- 나대지 배출원의 비산먼지 국가 배출량 산정과정은 통계적인 배출계수만을 이용하여 산정되고 있는 상황임

$$E = \sum A \times EF / 1000$$

E: 나대지 배출량(kg/yr)

A: 나대지 면적(m²)

EF: 배출계수(g/m²/yr)

$$\begin{aligned} \text{배출계수(g/m}^2\text{/yr)} &= 0.5 \times \text{풍화잠재력(Erosion potential function)} \\ &= 0.5 \times [58 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})^2 \\ &\quad + 25 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})] \\ &= 0.5 \times [58 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]^2 \\ &\quad + 25 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]] \end{aligned}$$

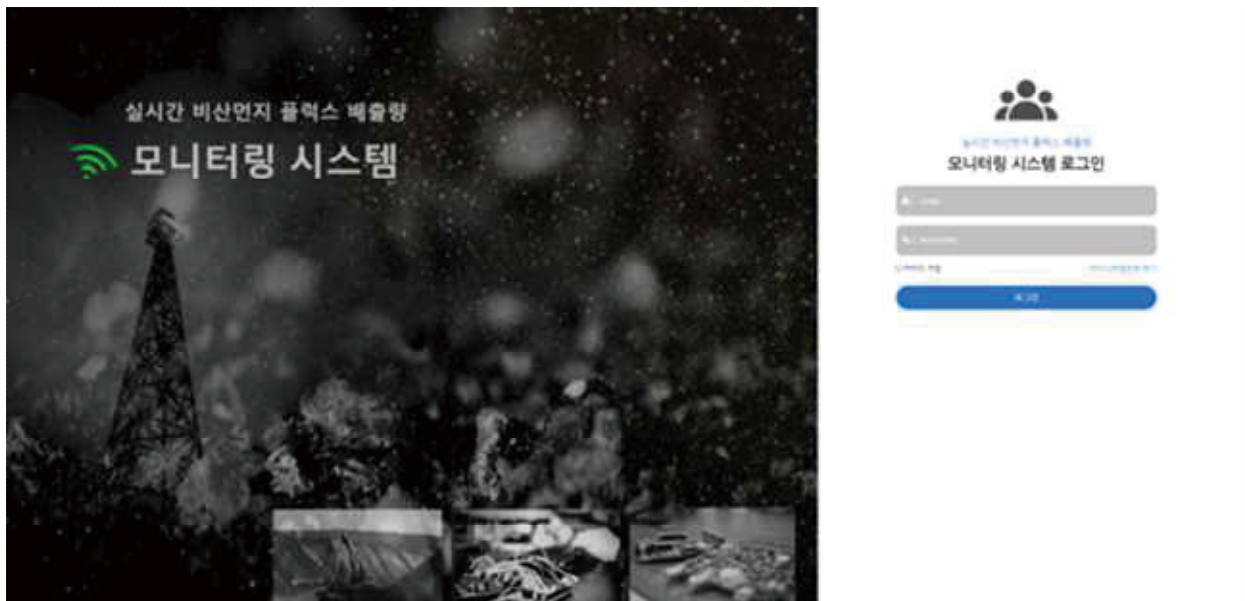
[그림 5.1] 나대지 배출량 산정방법 및 배출계수

- 회처리장에서 발생하는 비산먼지를 관리하기 위한 가장 중요한 전제조건은 비산먼지배출량 산정이나 현재 국가대기오염물질 비산먼지 배출량 산정방법에 회처리장 배출량은 제시되어 있지 않음.
 - 유사 배출원 산정방법인 나대지의 비산먼지 배출량의 경우 배출계수의 통계적 연평균값을 기반으로 배출량을 산정하기 때문에 기상, 주변 영향요인 등을 고려한 실시간 배출량을 산정하지 못하는 한계가 있음

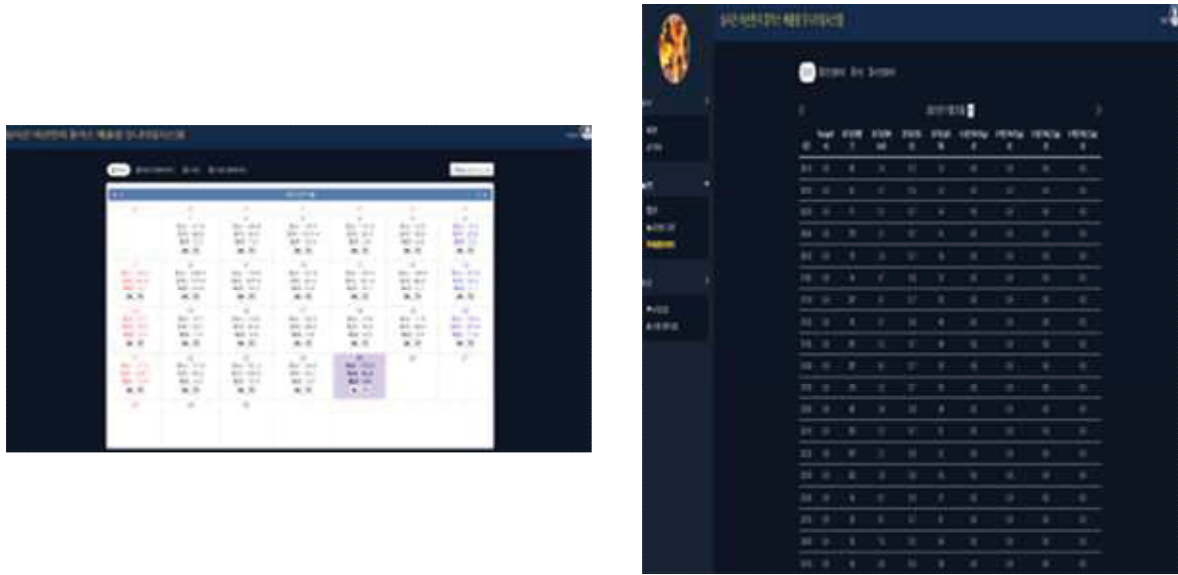
2. 실시간 회처리장 비산먼지 모니터링 시스템 구성 및 운영

2.1. 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템 구현 및 운영

- 3차년도 연구결과에서 실시간 옥외 저탄장 비산먼지 모니터링 시스템 구성 및 운영을 하였고 이 연구결과를 기반으로 4차년도 회처리장에 실시간 회처리장 비산먼지 모니터링 시스템을 구성함
- 웹기반을 통한 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템을 구현하여 PM10 Flux 배출량, 기상측정자료 등을 실시간으로 제공함



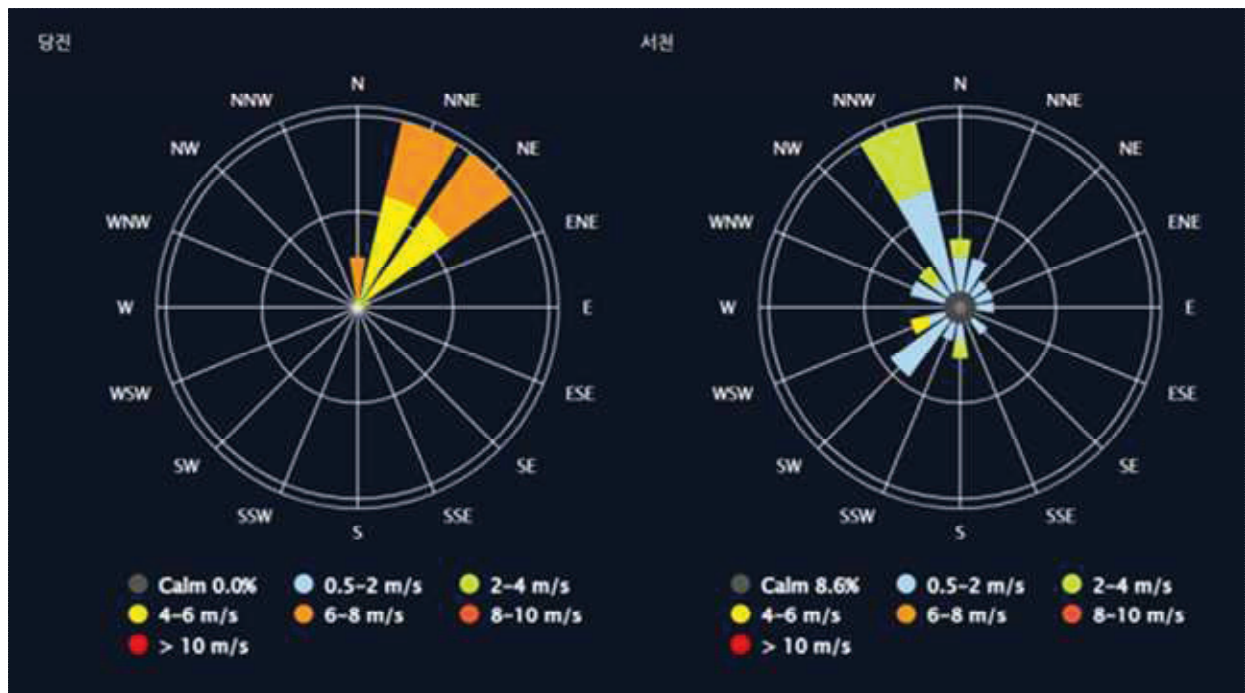
[그림 5.2] 실시간 비산먼지 Flux 배출량 시스템 시작화면



[그림 5.3] PM10 Flux 달력 및 Flux 배출량 DB 자료



[그림 5.4] 실시간 PM10 Flux 배출량 및 측정자료 표출



[그림 5.5] 기상측정 자료를 이용한 바람장미 표출

3. 실시간 회처리장 Flux 배출량 조사결과

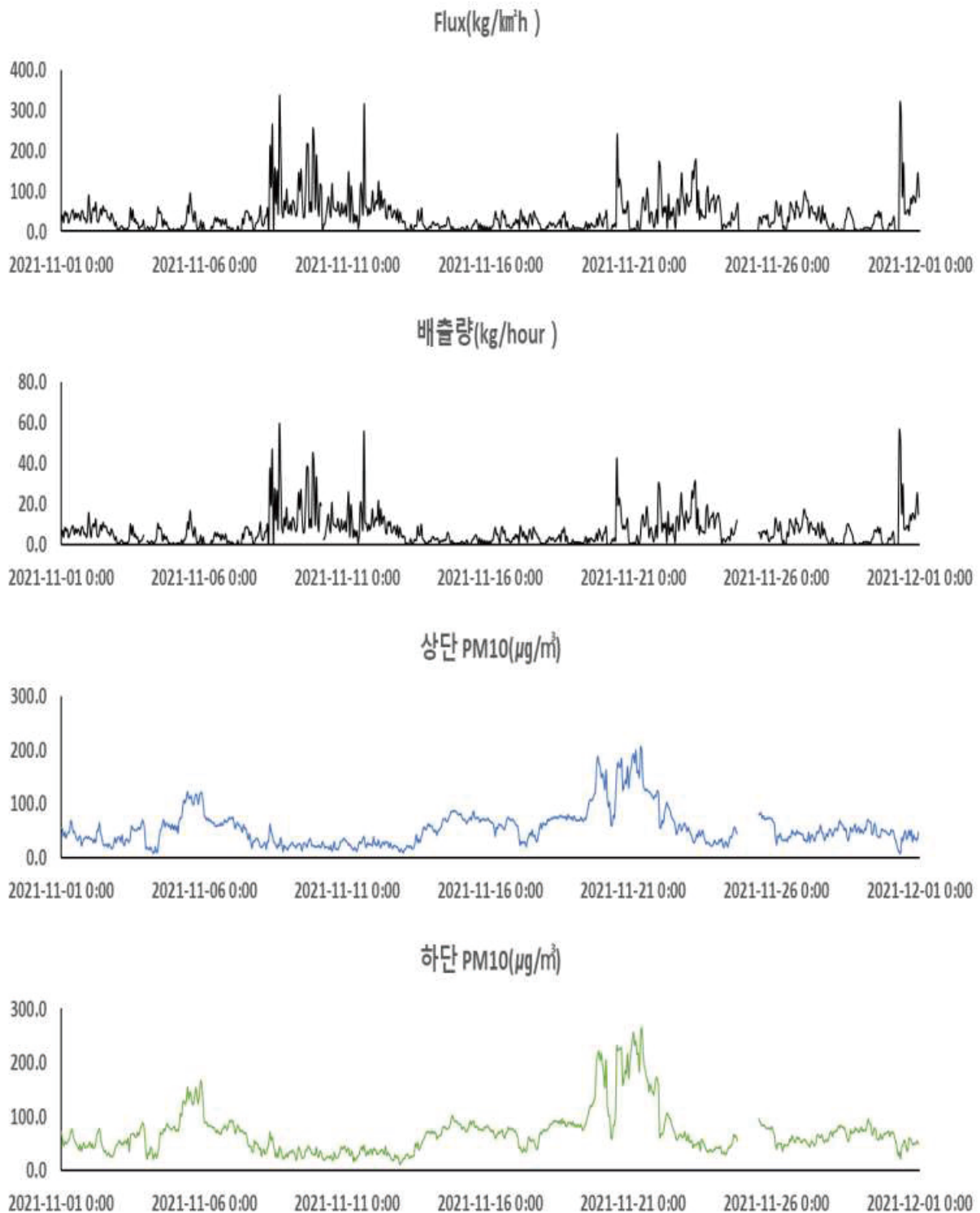
- 실시간 회처리장 Flux 배출량 평가를 위해 당진화력 (2021년 9월)과 신서천화력 (2021년 10월)에 배출량 측정장비를 설치하여 운영하였음
- 아래 [그림 5.7]과 같이 상단과 하단에 K-Weather사 미세먼지 측정기 제품과 연구실에서 제작한 기상측정기를 설치하였으며 중단에 3D 기상장비(CSAT3B)를 설치하였음



[그림 5.6] 회처리장 Flux 배출량 조사 모식도

3.1. 당진화력 회처리장 비산먼지 PM10 Flux 배출량 측정결과

- 당진화력 회처리장의 실시간 비산먼지 Flux배출량 산정 시스템에서 확보한 11월 한달 동안의 상·하단 PM10 측정농도와 PM10 Flux 배출량을 정리함
- 회처리장 면적(176,100m²)을 고려하여 음(-)의 플럭스 값을 제외한 후 측정기간의 실시간 비산먼지 배출량(kg/hour)을 산정하였음
- 비산먼지 배출량 자료를 시간 평균으로 환산하여 시간 단위 비산먼지 배출량을 산정하였음
- 당진화력 회처리장의 11월 01일부터 11월 30일까지 시간 평균 비산먼지 배출량을 산출하였으며 평균 6.9 kg/hour이며 11월 08일이 59.0 kg/hour로 최대값을 나타냈으며 11월 28일 0.1 kg/hour로 최소값을 나타냄
- 당진화력 회처리장의 실시간 배출량 평가를 통해 실시간으로 변화하는 비산먼지 배출량 산정 가능성을 확인하였음



[그림 5.7] 11월 당진화력 회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도

○ 2021년 11월 4일~08일

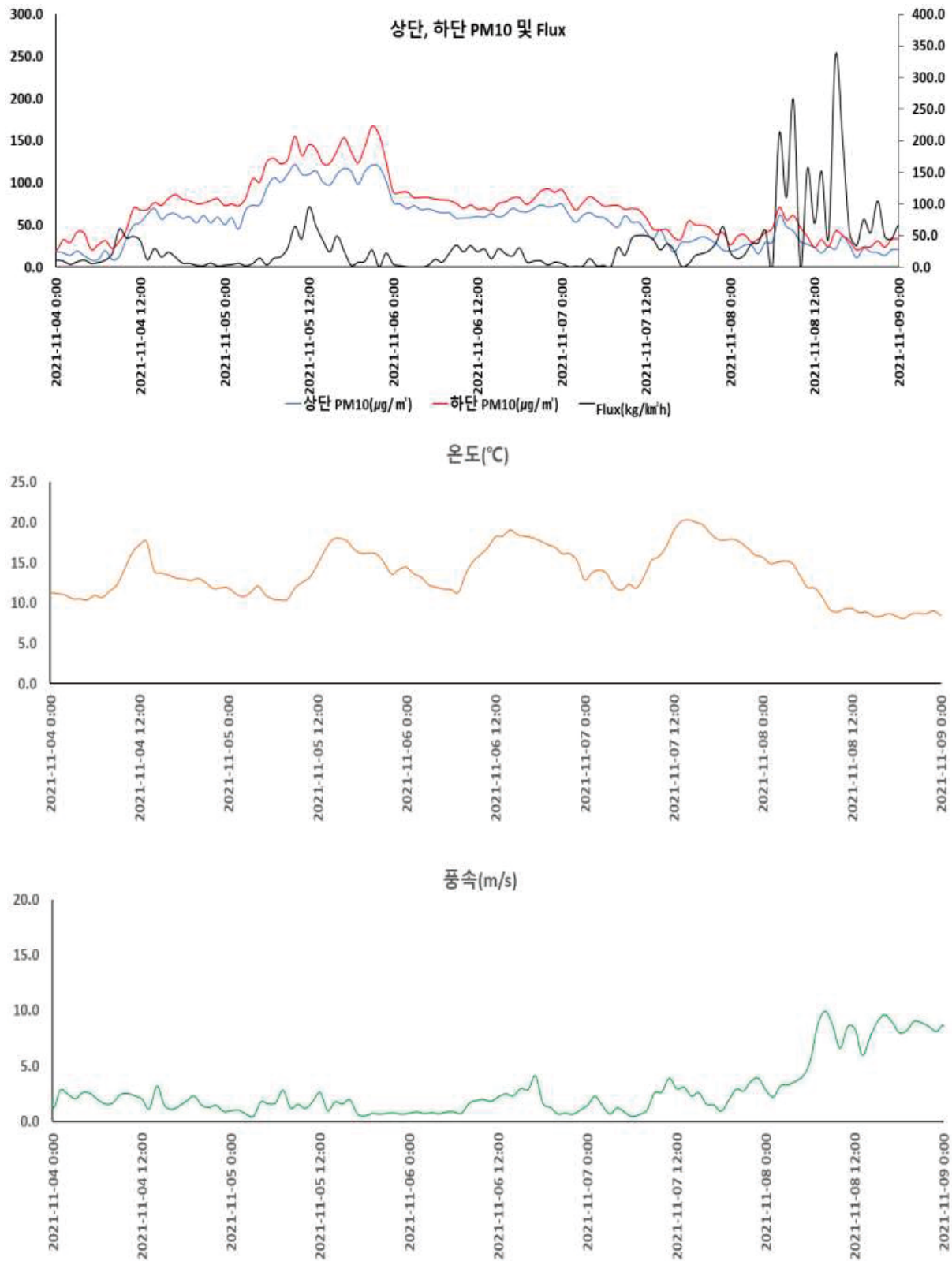
- 11월 5일 수도권 및 충청권 미세먼지 나쁨, 농도는 높으나 Flux는 높지 않음. 중국 첫 대기오염 황색경보 기류로 국내로의 유입은 없었음
- 11월 8일 전국적으로 비가 많이 내렸으며 미세먼지 농도는 좋음. 8일 새벽부터 온도가 떨어지기 시작함
- Flux 값은 15시 334.9 kg/km²·h 이후 23시까지 감소하는 추세를 보였으며 상·하단 미세먼지 농도는 변화 없었음

○ 2021년 11월 14일

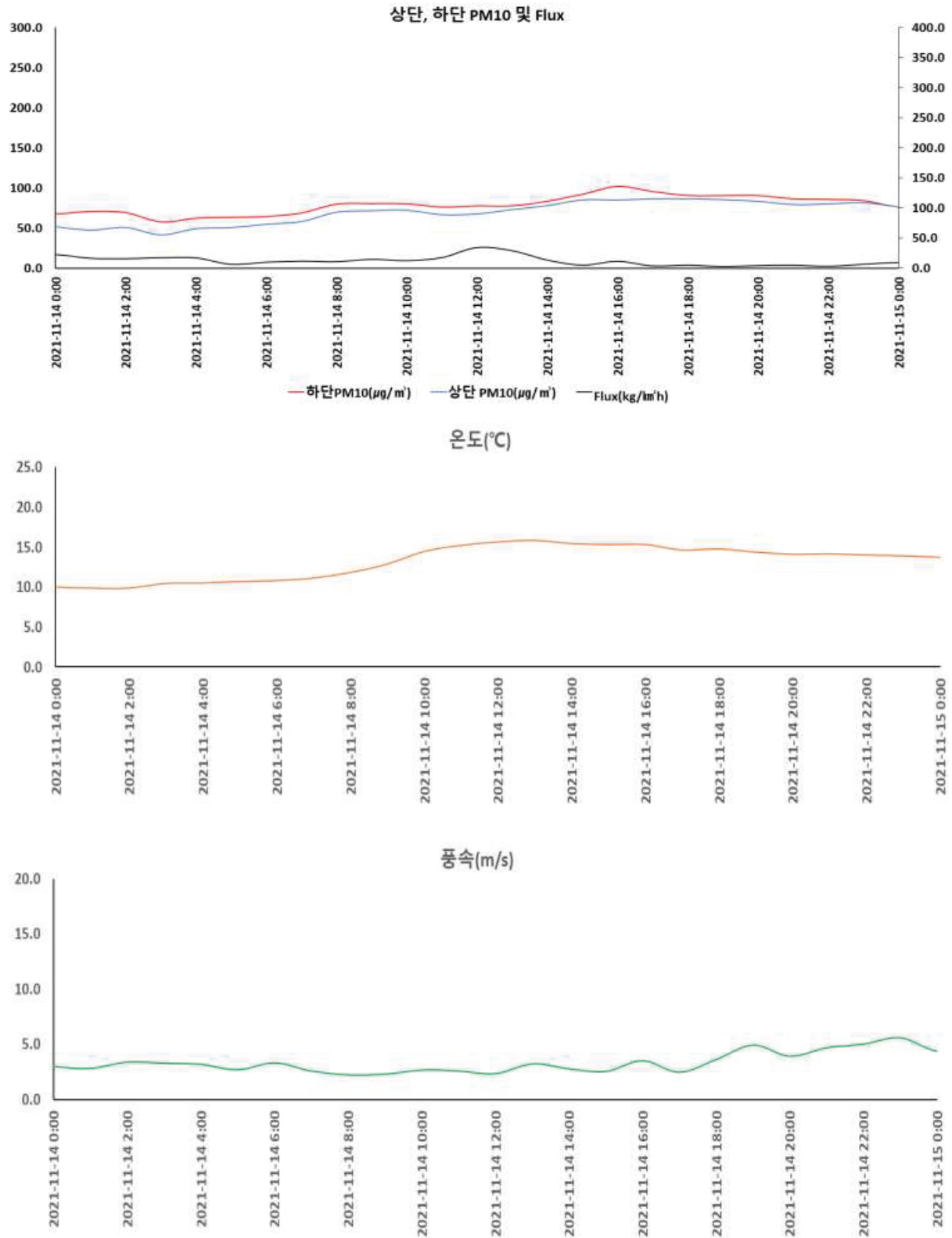
- 오전부터 중국 발 미세먼지 유입 예보로 서해안 쪽 미세먼지 농도 상승
- 외부 유입으로 인한 영향으로 Flux 값은 주로 음(-)의 값을 나타내며, 바람은 점차 강해짐

○ 2021년 11월 20일~21일

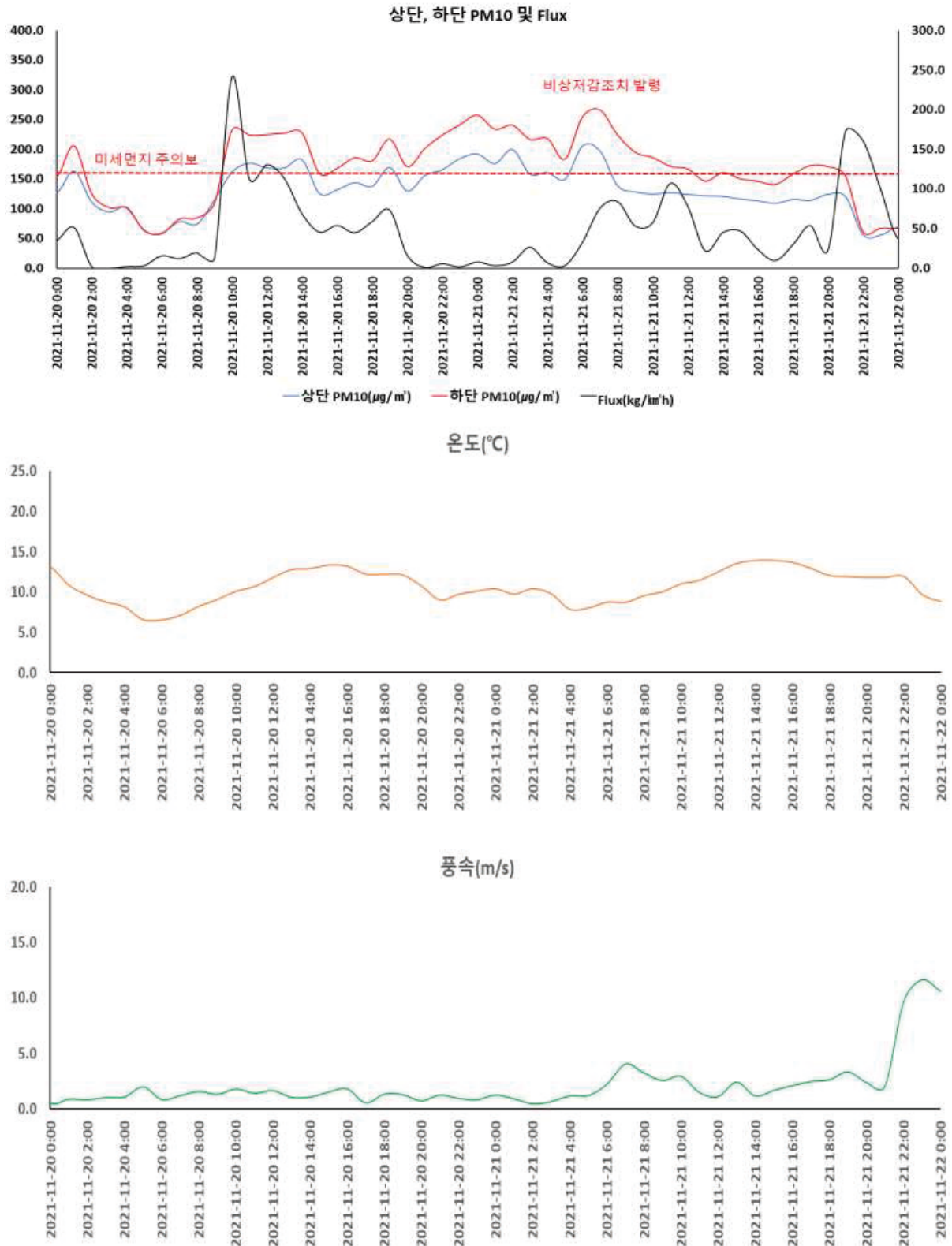
- 20일 새벽부터 서울 경기 등 6개월 만에 처음으로 미세먼지 주의보 발령되었으며 바람이 강한 편임
- 중국 발 미세먼지의 영향으로 상·하단 미세먼지 농도가 모두 높게 나타났으며, 내부 정체를 하다 21일 미세먼지 비상저감조치 발령 후 점차 감소하였음



[그림 5.8] 11월 4일~8일의 당진회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도



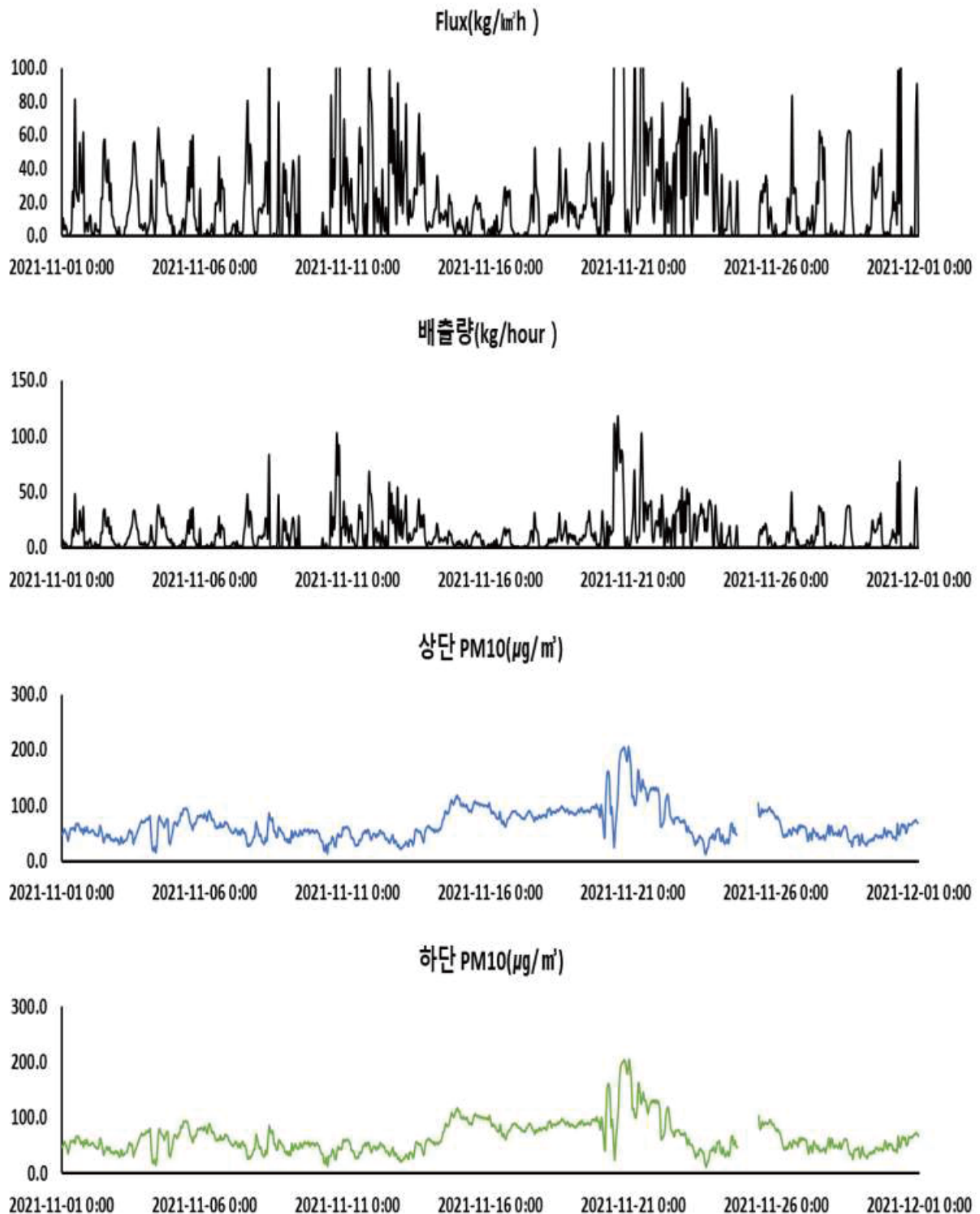
[그림 5.9] 11월 14일의 당진회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도



[그림 5.10] 11월 20일~21일의 당진회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도

3.2. 서천화력 회처리장 비산먼지 배출량 평가

- 서천화력 회처리장의 실시간 비산먼지 Flux 배출량 산정 시스템에서 확보한 11월 한달 동안의 상·하단 PM10 측정농도와 PM10 Flux 배출량을 정리함
- 회처리장 면적(592,509.6m²)을 고려하여 음(-)의 플럭스 값을 제외한 후 측정기간의 실시간 비산먼지 배출량(kg/hour)을 산정하였음
- 비산먼지 배출량 자료를 시간 평균으로 환산하여 시간 단위 비산먼지 배출량을 산정하였음



[그림 5.11] 11월 서천화력 회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도

○ 2021년 11월 4일~08일

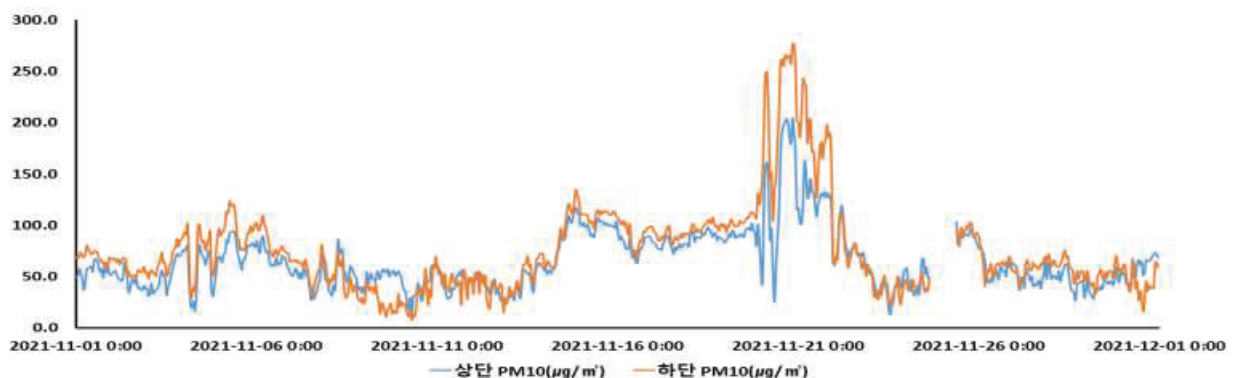
- 11월 5일 수도권 및 충청권 미세먼지 나쁨, 농도는 높으나 Flux는 높지 않음. 중국 첫 대기오염 황색경보 기류로 나타났으나 국내로의 유입은 없었으며 전일 국내 발생 미세먼지가 축적되어 높게 나타난 것으로 확인됨
- 11월 8일 전국적으로 비가 많이 내렸으며 미세먼지 농도는 좋음. Flux 값은 오후부터 점차 감소하는 추세이며 8일 새벽부터 온도가 떨어지며 바람이 점점 강해짐

○ 2021년 11월 14일

- 오전부터 중국 발 미세먼지 유입 예보로 서해안 쪽 미세먼지 농도 상승
- 외부 유입으로 인한 영향으로 Flux 값은 정체된 상태이며 바람은 약해짐

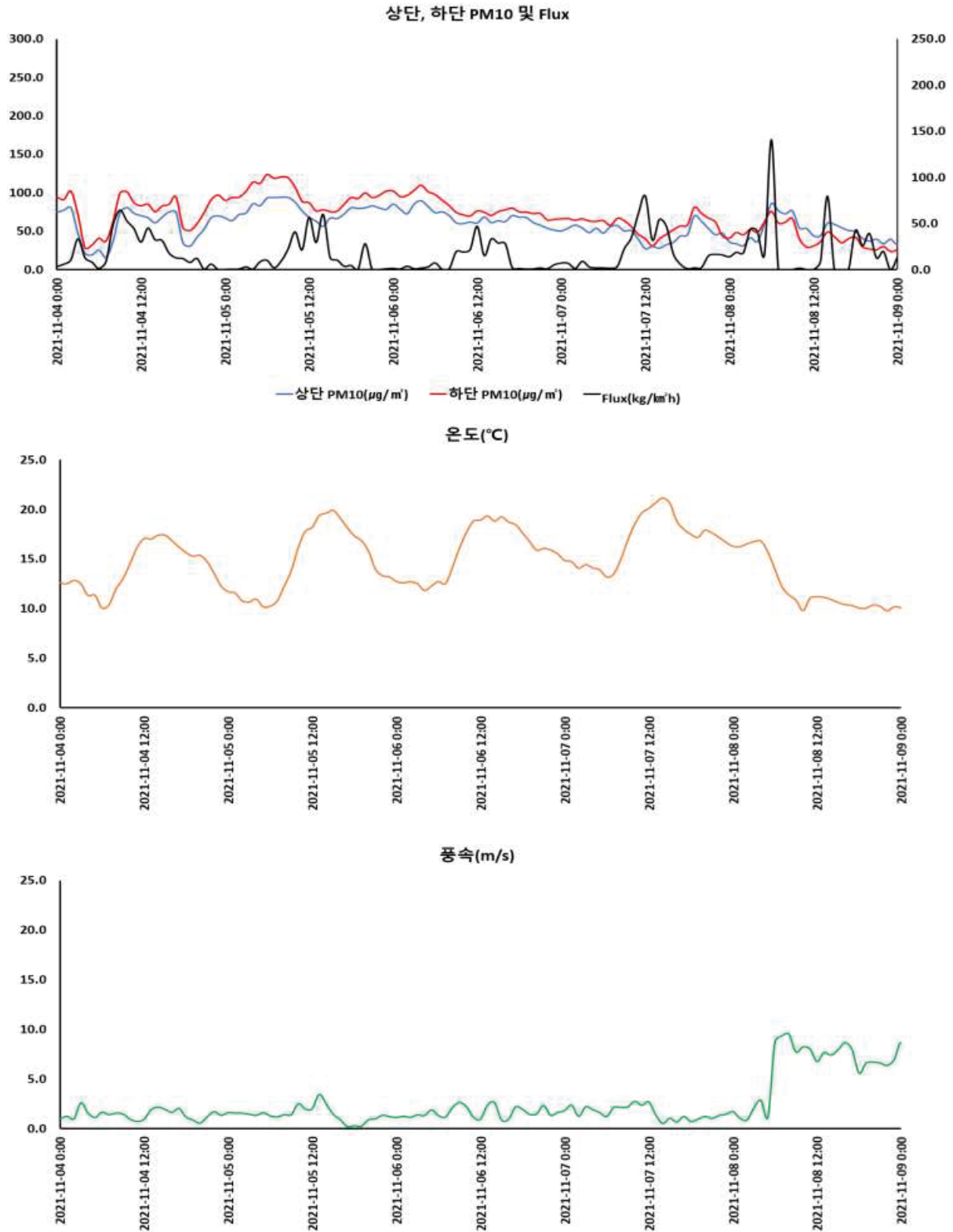
○ 2021년 11월 20일~21일

- 20일 새벽부터 서울 경기 등 6개월 만에 처음으로 미세먼지 주의보 발령되었으며 바람이 강한 편임
- 중국 발 미세먼지의 영향으로 상·하단 미세먼지 농도가 모두 높게 나타났으며, 내부 정체를 하다 21일 미세먼지 비상저감조치 발령 후 상·하단 미세먼지 농도 및 Flux 배출량이 점차 감소하였음

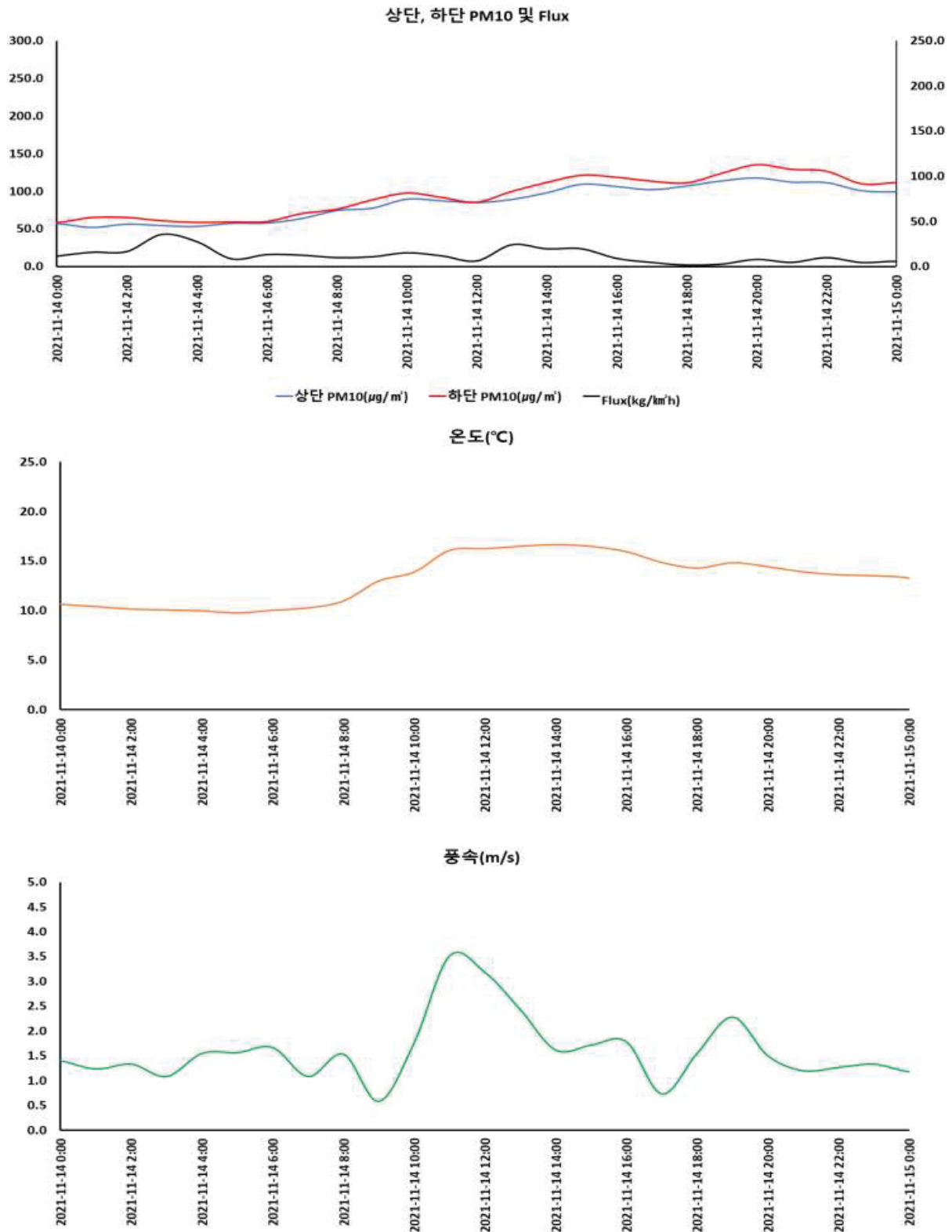


[그림 5.12] 비상저감 조치일의 서천화력 회처리장 상·하단 미세먼지 농도 Flux 배출량

- 서천화력 회처리장의 실시간 배출량 평가를 통해 실시간으로 변하는 비산먼지 배출량 산정 가능성을 확인하였음



[그림 5.13] 11월 4일~8일의 서천회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도



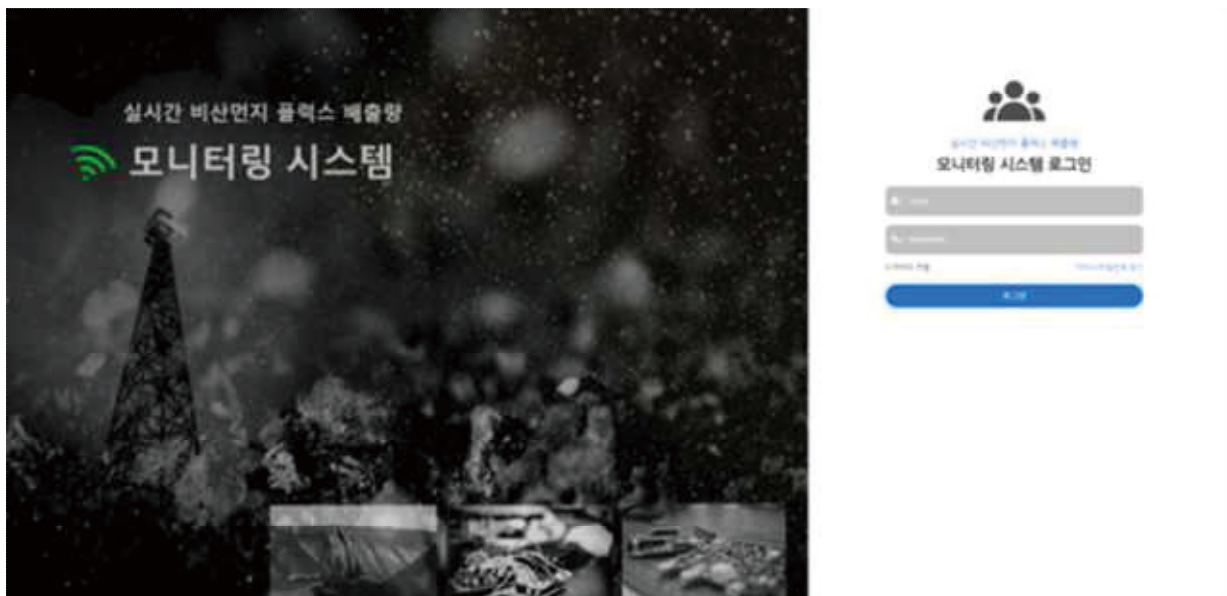
[그림 5.14] 11월 14일 신서천회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도



[그림 5.15] 11월 20일~21일 신서천회처리장 Flux 배출량 및 상·하단 PM10 농도

4. 소결론

- 회처리장에서 발생하는 비산먼지를 관리하기 위한 가장 중요한 전제조건은 비산먼지의 배출량 산정이나 현재 국가대기오염물질 비산먼지 배출량 산정 방법에 회처리장에 대한 배출량 산정 방법은 명시되어 있지 않으며, 유사 배출원 산정방법인 나대지의 비산먼지 배출량 산정 방법의 경우 배출계수를 기반으로 통계적 연평균 배출량으로 산정하기 때문에 기상, 주변영향 요인 등을 고려하여 실시간 배출량을 산정하지 못하는 한계가 있음
- 3차년도 실시간 옥외저탄장 비산먼지 모니터링시스템 구성을 기반으로 4차년도에 당진화력 및 신서천화력에 회처리장 비산먼지 배출량(Flux) 모니터링 시스템을 구성함



- 실시간 비산먼지 배출량 평가 기간 중 11월 20일 중국 발 미세먼지의 영향으로 측정기기의 상·하단 미세먼지 농도가 모두 높게 나타났으며 배출량도 높게 나타남
- 11월 21일 비상저감조치 발령일 전후의 실시간으로 변화하는 PM10 배출량 변화를 비교 확인할 수 있는 등 회처리장 주변의 비산먼지 영향에 대한 실시간 변화와 대책 이행에 따른 저감효과 분석 등이 가능하게 됨

제6장 결론 및 제언

1. 비산먼지 배출량 산정 개선
2. 고농도 비산먼지 조기경보체계 구축
3. 배출량 기반 능동적 비산먼지 관리방안

1. 비산먼지 배출량 산정 개선

1.1. 비산먼지 배출량 산정 현황

- 국가 대기오염물질 배출량의 배출원 분류체계에 회처리장은 없으며, 유사한 배출원으로 나대지, 비산먼지(대분류)/하역 및 야적(중분류)/석탄(소분류)이 있음
- 나대지 배출원의 비산먼지 국가 배출량 산정과정은 통계적인 배출계수만을 이용하여 산정되고 있으며, 비산먼지/하역 및 야적 배출원 산정과정은 입자분포, 평균풍속, 수분함량의 계수가 포함된 산정식을 이용하여 대상물질의 배출계수를 산정하도록 되어 있음²²⁾

$$E = \sum A \times EF / 1000$$

E : 나대지 배출량(kg/yr)

A : 나대지 면적(m²)

EF : 배출계수(g/m²/yr)

$$\begin{aligned} \text{배출계수(g/m}^2\text{/yr)} &= 0.5 \times \text{풍화잠재력(Erosion potential function)} \\ &= 0.5 \times [58 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})^2 \\ &\quad + 25 \times (\text{표면마찰속도} - \text{표면마찰속도 역치})] \\ &= 0.5 \times [58 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]^2 \\ &\quad + 25 \times [(0.053 \times \text{순간최대풍속}) - 0.58]] \end{aligned}$$

[그림 6.1] 나대지 배출량 산정방법 및 배출계수

22) 대기오염물질 배출계수(2012년 대기오염물질 배출량 기준)

부록 D. 비산먼지/하역 및 야적 산정식

알갱이 물질을 하역 및 야적시에는 알갱이 물질을 일정 높이에서 떨어트리게 된다. 알갱이 물질 낙하시에 발생하는 비산먼지는 다음 식과 같이 산정한다. 평균 풍속은 시도별 일별 풍속을 평균한 값을 적용한다.

$$EF = k \times 0.0016 \times [(U/5)^{1.3}/(M/2)^{1.4}]$$

EF : emission factor

k : 입자분포, particle size multiplier (k=0.35 for PM₁₀, k=0.035 for PM_{2.5})

U : 평균 풍속, mean wind speed(m/s)

M : 수분함량, material moisture content(%)

〈표 D-1〉 알갱이 물질 하역 및 야적 시 비산먼지 배출계수 적용조건

SCC	대상물질	수분함량(%)
12050100	모래	7.4
12050200	석탄	4.5
12050300	복토재	12
12050400	알갱이 성상 폐기물	27

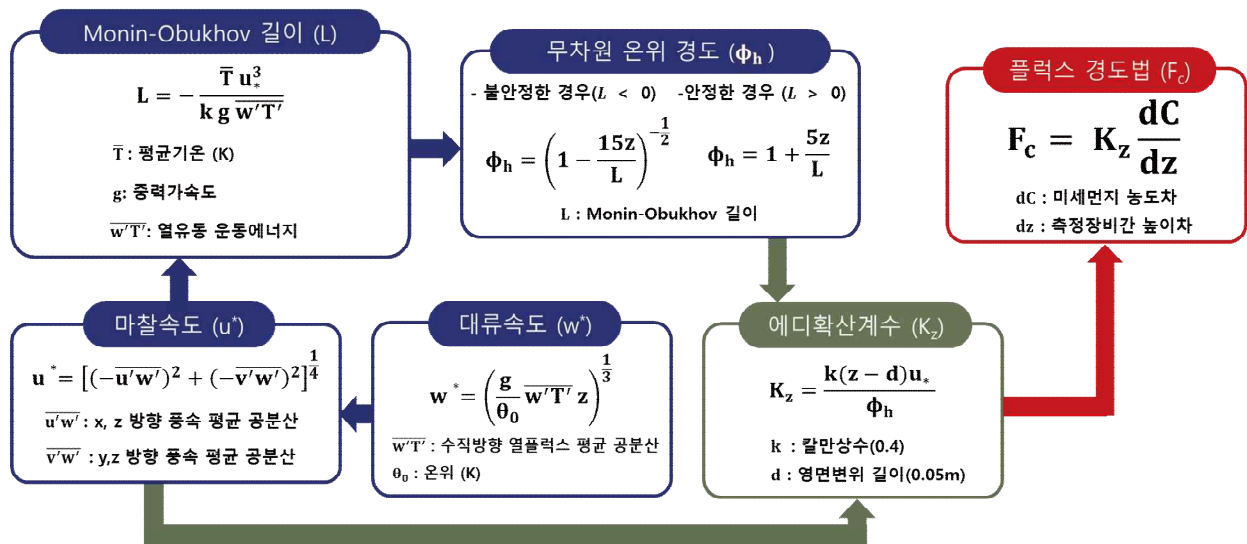
* 출처 : 국립환경과학원 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발(Ⅰ,Ⅱ)(2008)

[그림 6.2] 비산먼지/하역 및 야적 대기오염물질 배출계수

- 2017년 국가대기오염물질 배출량 중 비산먼지/하역 및 야적/석탄의 PM10 배출량은 보령시 653 kg/년, 태안군 616 kg/년, 서산시 541 kg/년이나 국가대기오염물질 배출량의 배출원 지역은 발전사가 위치한 지역이 아닌 하역작업이 이뤄진 항만 지역이며 산정된 배출량도 연평균임
- 즉, 회처리장에서 발생하는 비산먼지를 관리하기 위한 가장 중요한 전제조건은 비산먼지 배출량 산정이나 현재 국가대기오염물질 비산먼지 배출량 산정방법에 회처리장 배출량은 제시되어 있지 않음
- 유사 배출원인 나대지, 하역/석탄 배출량의 경우 배출계수 통계적 연평균 값을 기반으로 배출량을 산정하기 때문에 기상, 주변 영향요인 등을 고려한 실시간 배출량을 산정하지 못하는 한계가 있음

1.2. 비산먼지 배출량 산정 방법 제언

- 현재 전적으로 배출계수에 의해 산정되는 국가배출량에 대해 본 4차년도 연구결과 중 실시간 비산먼지 배출량 측정기기 설치 및 실시간 비산먼지 배출량 모니터링시스템과 같은 실측조사를 기반으로 실시간 비산먼지 배출량 산정 방식으로 국가배출량 수정·보완을 요청함
- 또한 배출계수 통계적 연평균값을 기반으로 한 배출량 산정이 아닌 풍속과 기온의 평균치 연직분포와 난류 수송량을 이용한 Flux-Gradient Method(경도법)을 이용하여 기상, 주변 영향요인 등을 고려한 실시간 비산먼지 배출량 산정 방법론을 금번 4차년도 연구결과로 제시하였으며 이를 기반으로 국가 대기오염물질 배출량의 배출원 분류체계에 회처리장을 추가하여 나대지 배출량 산정방법이 아닌 회처리장 실시간 비산먼지 배출량 산정 방법으로 수정·보완을 요청함



[그림 6.3] Flux-Gradient Method(경도법) 산정 방법론

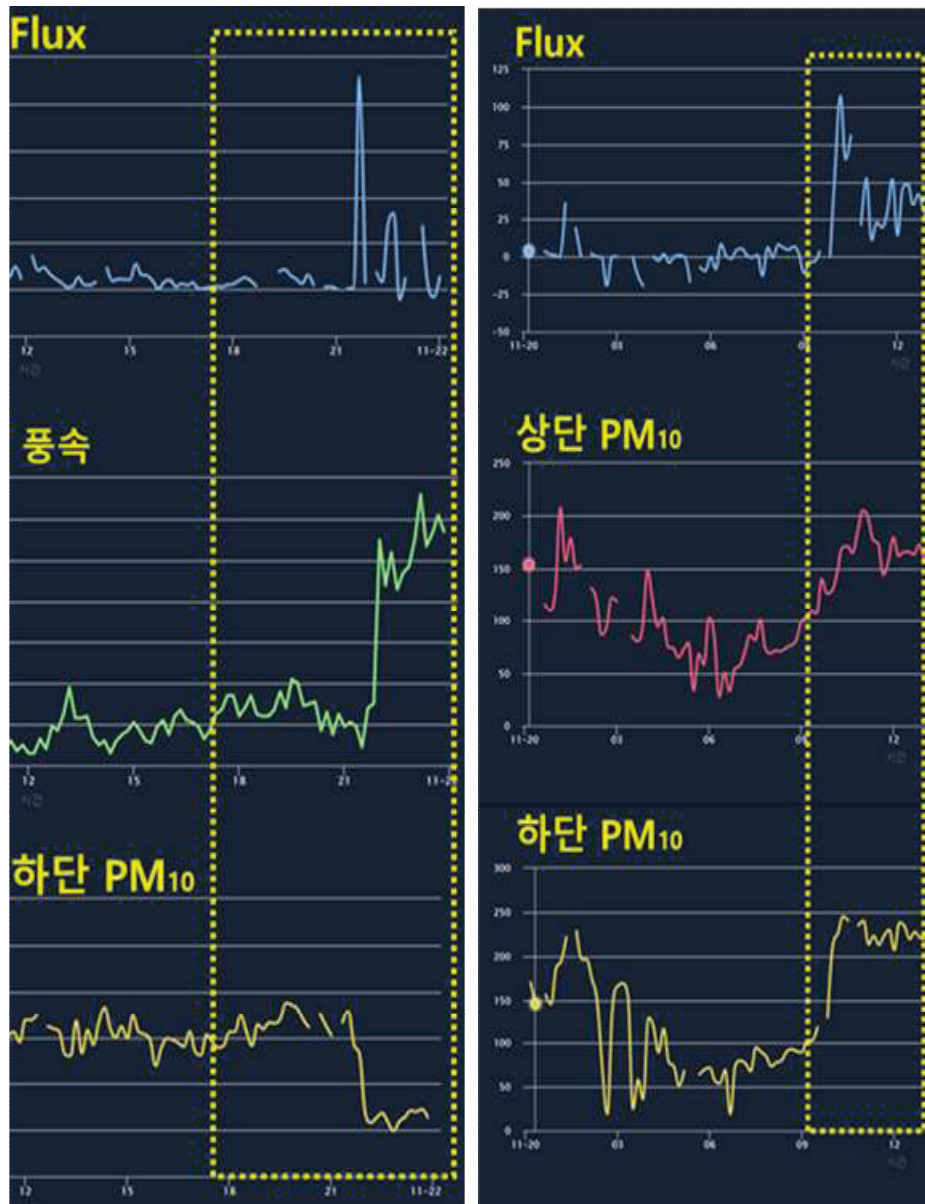
2. 고농도 비산먼지 조기경보체계 구축

2.1. 비산먼지 조기경보체계 현황

- 4차년도 연구 결과를 통해 회처리장의 비산먼지 배출량 모니터링 시스템에서 실시간으로 산정한 결과를 기반으로 회처리장의 작업으로 인한 고농도 비산먼지 발생 시 다양한 비산먼지 저감 기술을 능동적으로 투입해 선제적 대응이 이뤄질 수 있도록 개선하고자 함
- 또한 비산먼지 조기경보 시스템 최적화를 위해선 Flux 예측 모델식을 이용해 비산먼지 배출량 증가에 대한 예측 가능성 및 실측을 통해 주변 지역 및 거리별 미세먼지 농도 변화를 확인해야 함.
- 하지만 회처리장의 작업 수행 및 저감시설 가동 시간, 작업 정보 확보가 원활하지 않아 예측 모델식과 실측 배출량의 상관성 개선에 한계가 있음
- 4차년도 연구의 비산먼지 배출량 측정결과 중 풍속이 강할 때 주변 농도는 낮게 나타나는 반면 배출량은 강한 바람에 의해 증가하여 높은 수준으로 상승하는 것을 확인하였음
- 이는 발전소 주변 강한 바람이 불 때 회처리장의 비산먼지에 의한 민원이 발생하는 것과 같이 농도 측정만으로는 발전소에서 발생하는 비산먼지 대응에 한계가 있음을 보여주는 것이라 할 수 있음. 따라서 농도 위주가 아닌 비산먼지 농도와 배출량을 연계한 비산먼지 조기경보체계를 구축하고자 함

2.2. 고농도 비산먼지 조기경보체계 구축 제안

- 4차년도 연구결과인 [그림 6.4]와 같이 미세먼지주의보 발령일의 회처리장 실시간 비산먼지 배출량 모니터링 시스템의 데이터를 확인한 결과, 비산먼지 배출량 및 초미세먼지 농도가 상·하단 모두 상승하는 경향이 나타났으며 비상저감조치 발령일부터 초미세먼지 농도가 낮아지는 경향이 나타남. 이처럼 실시간 비산먼지 배출량 시스템을 이용하여 비상저감조치 발령으로 인한 효과를 확인할 수 있었음



[그림 6.4] 비상저감조치 당일 모니터링 시스템 화면

- 또한, 충남지역 발전소는 아래 [그림 6.5]과 같이 북쪽이나 서쪽 해안가 근처에 위치해 있으며, 그로 인해 주풍인 북서풍일 때나 계절풍(서풍)의 영향을 받는 겨울과 봄에 인접지역 주민에게 피해 영향을 줄 수 있으므로 기상예측 모델과 연계하여 작업 최소화 등의 관리방안 수립과 이행이 필요함.
- 따라서, 이를 위해 배출량의 계절별 변화와 대책 이행에 따른 효과 분석에 대한 자료를 장기적이고 체계적으로 확보해 나가는 노력이 필요할 것으로 판단

- 실시간 비산먼지 배출량 측정 결과를 확실하게 이해하기 위해서는 기상상황에 의한 영향뿐만 아니라 회처리장 활동 또는 외부 요인 영향까지 포함하여 해석해야 할 필요성이 있으므로,
- 발전소별 회처리장 CCTV 설치나 작업일지 등을 통한 비산먼지 발생량, 비산먼지 저감시설 가동 시간작업내용 등의 정보(발전소의 정보 제공 협조가 매우 필요)와 연계 해석이 필요함



[그림 6.5] 서쪽 해안가에 위치한 발전소 예시

- 위와 같은 작업환경자료와 연계한 저감 방안으로 비산먼지 배출량 예측 모델식이 있으며, 현재 화력발전소별 작업 환경자료, 저감시설 가동 시간, 작업일지와 같은 정보 공유가 활성화되지 않아 모델값이 실측값보다 낮은 수준으로 나타남.
- 이에 예측 모델식 상관성 개선을 위해 발전소는 행정기관에 월별 작업일지 및 고농도 상황 시 저감시설 가동 일지와 같은 회처리장 작업현황에 대한 정보 공유 제안과 행정기관에서는 회처리장 CCTV 설치 지원 및 발전소 비산먼지 발생시설에 측정 인프라 구축을 통해 상시 감시체계 도입을 제안함
- 이처럼 4차년도 연구결과로 제시한 조기경보는 실시간 비산먼지 배출량을 산정하고 실시간 비산먼지 배출량 모니터링시스템 정보기준을 활용하여 나아가 예측 모델식을 개발하여 조기경보와 연계해 고농도 상황 발생 시 비상저감조치보다 앞서 선제적 대응으로 비산먼지 저감 및 발전소 인근 주민의 피해를 최소화할 수 있으므로 본 연구에서 고농도 조기경보체계 구축을 제안하며 조기경보체계 구축에 따른 행정, 정부, 주민의 매뉴얼도 함께 제안함



[그림 6.6] 고농도 미세먼지 조기경보시스템 모식도

○ 주민

- 실시간 비산먼지 배출량 모니터링 시스템을 통해 화력발전소 주변 지역 주민에게 정보를 제공하고, 주민들은 고농도 미세먼지 상황 발생 시 조기 경보제를 통해 외출 자제 및 외출 시 마스크 착용, 빨래 및 오염될 음식이나 물건 등의 외부 노출 자제, 농작물과 지면에 살수 등의 조치를 이행할 수 있음. 이를 통해 주민 신뢰 향상 등 발전소 인근 주민의 피해를 최소화할 수 있을 것이라 판단됨

○ 행정

- 행정기관에서는 비산먼지 배출량 실측기기 및 모니터링시스템 상시가동, 실측자료를 연계한 조기경보시스템 운영을 통해 고농도 상황 시 선제적 대응을 할 수 있도록 발전소와 함께 비산먼지 배출량을 관리하여 비산먼지로 인한 민원 및 인근 주민의 피해를 최소화하도록 노력해야 함

○ 정부

- 정부는 비산먼지 배출량 실측기기 및 모니터링시스템 상시가동을 위한 재정적 지원과

미세먼지 주의보 등의 예보 발생 시 발전소 단축 운영 및 비산먼지 관리방안을 실행하여 배출량을 저감할 수 있도록 지도하며 주민에게 실시간 비산먼지 배출량 정보 제공을 통해 고농도 상황 발생 시 피해를 최소화할 수 있음

○ 기대효과

- 발전사는 실시간 비산먼지 배출량 모니터링시스템을 활용하여 고농도 비산먼지 조기경보 발령 시 능동적 비산먼지 저감방안과 선택적 운영을 통한 비용 절감 등 주변 지역의 피해 영향을 빠르게 대처하고 최소화할 수 있으며 주민들은 고농도 미세먼지 상황 발생 시 조기 경보제를 통해 외출 자제 및 농작물 피해 예고 등의 정보를 받아 피해를 최소화할 수 있음
- 나아가 면오염원(저탄장, 회처리장 등) 배출원별 실측 배출계수를 산정하여 실효성 높은 저감 대책 마련 및 비산먼지 피해 규모 해석에 활용하고 정책 자료 근거에 활용할 수 있음



[그림 6.7] 고농도 조기경보체계 매뉴얼 모식도

3. 배출량 기반 능동적 비산먼지 관리방안

3.1. 회처리장 비산먼지 관리방안 현황

- 석탄화력발전소의 운영에 따라 석탄회가 배출되고 있고, 이를 처리하기 위하여 각 발전사는 회처리장을 운영하고 있음. [표 6.1]과 같이 각 발전사별로 회처리장에서 발생하는 비산먼지를 방지하기 위해 개별적으로 환경관리 방안을 운영중에 있음
- 태안화력의 경우, 회처리장 환경관리 방안으로 석탄재를 습식 보관하고 남은 석탄재는 재활용하고 있으며 적정수위 관리를 위하여 준설작업을 실시하는 한편 석탄재 노출 부위(회처리장 전체 면적의 약 11%, 23만 m²)에는 방진망을 설치하여 석탄회로 인한 비산먼지가 많이 발생되지 않도록 관리하고 있음
- 보령화력은 회처리장의 안정적인 유지관리를 위하여 유지관리 조직을 별도로 구성하고, 보령발전본부와 신보령발전본부가 남부 회처리장을 공동 사용하고 있지만 관리 주체는 보령화력발전으로 일원화하여 운영하고 있음.
 - － 회처리장에 대한 제반 환경관리는 환경관리실에서 직접 운영하며, 회처리장 주변 지하수 및 해수 수질분석, 회처리장 비산 방지에 관한 사항, 석탄재 및 탈황석고 재활용 관리, 석탄재 매립량 기록관리 등의 역할을 수행함
 - － 회처리장 운영은 한전산업개발(주)에서 위탁하여 관리하고, 석탄재 매립시설 운영, 제반 부대시설 관리, 회처리장 출입자 관리 등을 하고 있음.
 - － 회처리장의 설비 유지보수는 시설관리부·기계기술부·전기기술부·제어기술부에서 수행하고 석탄재 매립계획과 복토계획, 회처리장과 관련된 시설의 유지 및 보수, 매립 후 식재 및 조경 등에 대한 역할도 함께 수행함
 - － 회처리장의 환경관리 방안으로 비산분진 억제와 수질분석을 진행하고 비산분진 억제는 회처리수(회이송수)를 이용하여 슬러지 상태로 이송된 석탄 연소재가 수면 위로 노출되지 않도록 수면 유지관리를 시행하는 동시에 매립량 증대에 따른 노출면 발생 시 부분 복토를 시행하고 있음
 - － 수질분석은 지하수, 주변해역 해수, 회처리수(회이송수)를 대상으로 검사하고 있음

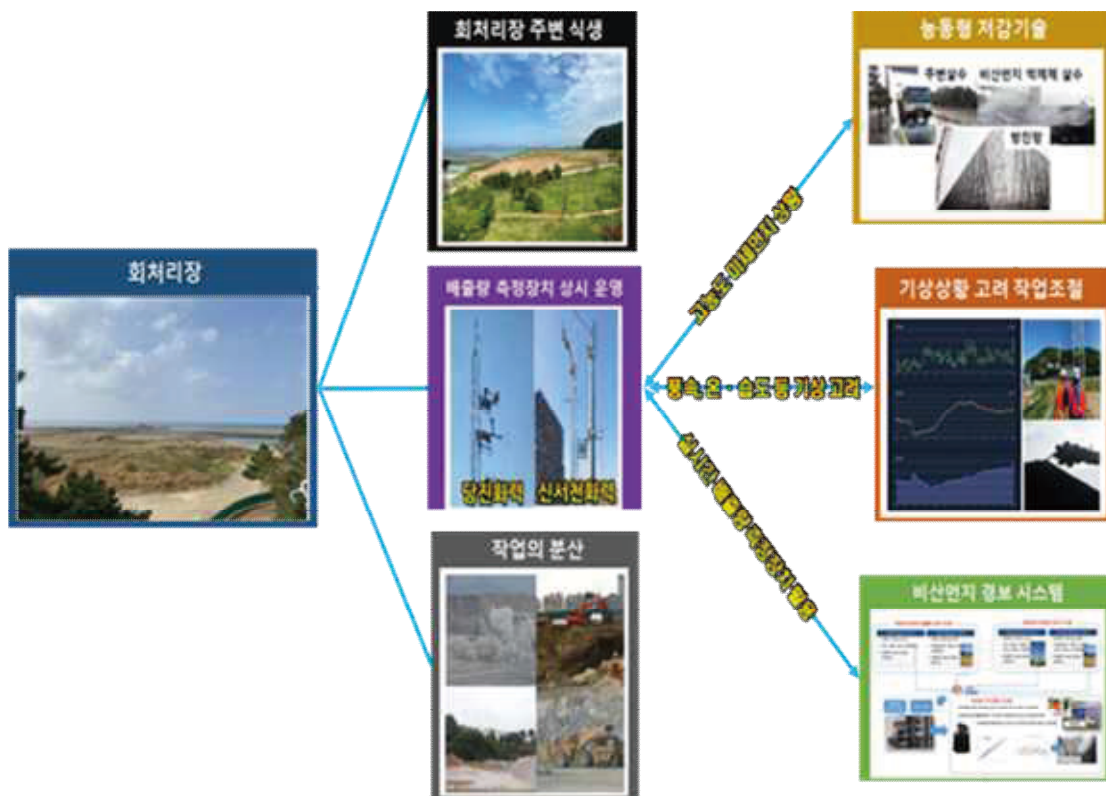
- 서천화력은 회처리장의 환경관리 방안으로 회처리장 구역을 세분화하여 비 작업구역은 방진망을 도포하고, 작업구역은 살수설비를 가동하고 있음. 또한 관리도로 내 골재 포설, 세륜시설 운영을 통해 석탄회 재활용 차량 이동 시 발생하는 비산먼지 저감을 위해 노력하고 있음
- 각 발전사별로 회처리장에 의한 비산먼지 발생을 저감하기 위하여 환경관리 방안을 마련하여 대처하고 있으나, 이는 과학적인 배출량 측정이 이루어지지 않은 상황에서 관리되고 있는 것으로 근본적이고 체계적인 비산먼지 관리와 그 효과 분석에도 미흡한 실정임

[표 6.1] 발전사별 회처리장의 환경관리 방안(2021년 기준)

구분	회처리장 관리방안
태안화력	<ul style="list-style-type: none"> • 석탄재의 습식보관 및 재활용 • 적정수위 관리를 위한 준설작업 • 석탄재 노출 부위 방진망 설치(전체면적의 약 11%, 23만 m²)
보령화력	<ul style="list-style-type: none"> • 회처리장의 안정적인 유지관리를 위한 조직 구성 • 제반 환경관리, 운영, 설비 유지보수 등으로 세분화하여 운영 • 비산분진 억제 : 회처리수에 의해 슬러지 상태로 이송된 석탄 연소재가 수면 위로 노출되지 않도록 수면 유지관리, 매립량 증대로 인한 노출면 발생 부분 복토 시행 • 수질분석 : 지하수, 주변해역 해수, 회처리수 검사
신서천화력	<ul style="list-style-type: none"> • 비 작업구역 : 방진망 도포 • 작업구역 : 살수설비 가동 • 차량 이동 시 발생하는 비산먼지 저감 방안 : 관리도로 내 골재 포설, 세륜 시설 운영
당진화력	<ul style="list-style-type: none"> • 하루 평균 2회 살수설비 가동 및 살수차 운행 확대(주 3회, 필요시 매일) • 회처리장 지능형 게이트 설치 및 특경배치 • 표면경화제 도포, 방진웬스 설치

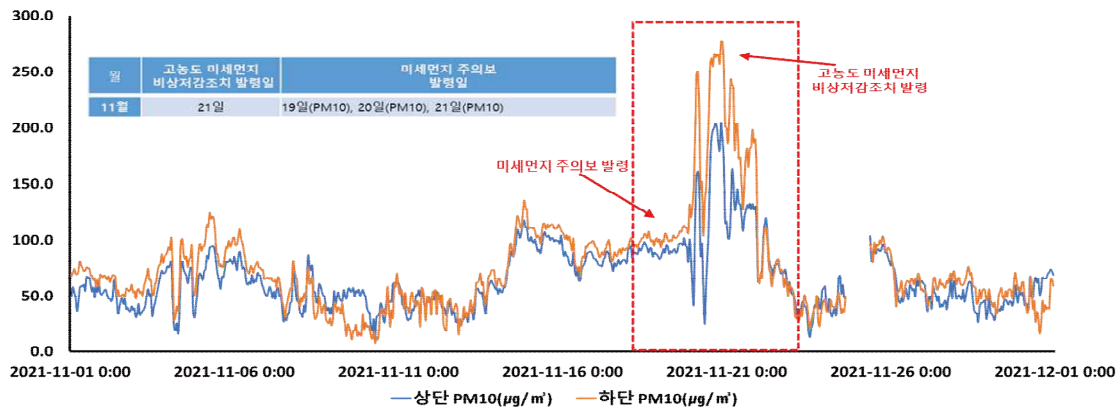
3.2. 배출량 기반 능동적 비산먼지 관리방안 제언

- 회처리장의 실시간으로 변화하는 배출량을 이용하여 고농도 미세먼지 발생 및 비상저감조치 상황 시 회처리장 배출량과 농도 측정 결과를 기반으로 과학적인 저감방안을 아래와 같이 제안함



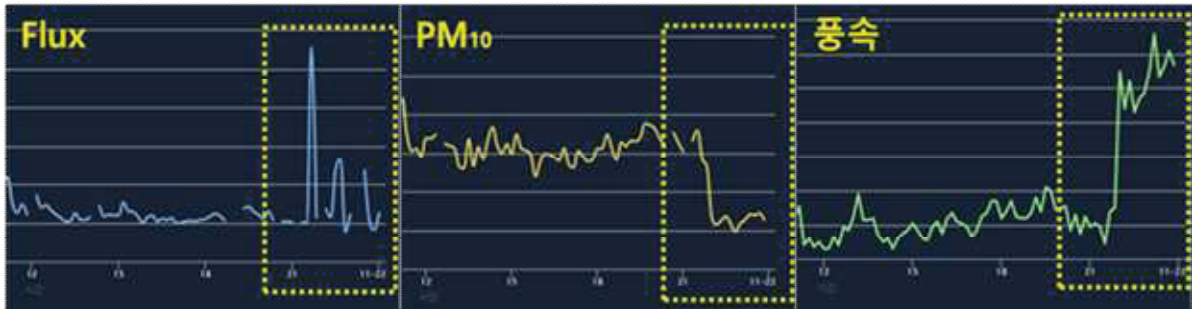
[그림 6.8] 회처리장 관리방안 모식도

- 발전사
 - 각 발전소별로 시행 중인 회처리장에 대한 비산먼지 저감 방안은 정해진 시간대의 살수설비 가동과 같은 단편적인 방안으로 실시간으로 측정된 배출량을 고려하지 않는 상황에서 관리되고 있음
 - 이는 비산먼지 고농도 상황을 포함한 모든 상황 시 체계적으로 비산먼지 저감기술이 시행되지 않는다는 것을 의미함
 - 따라서 [그림 6.9]와 같이 비산먼지 배출량에 기반하여 배출량이 높거나 고농도 미세먼지 상황 시 능동적으로 저감기술을 운용하여 비산먼지를 제어하는 것이 필요함



[그림 6.9] 서천화력 회처리장의 미세먼지 비상저감조치 당시 모니터링 시스템

- 중장기적인 회처리장 관리방안으로는 크게 회처리장 주변 식생, 배출량 측정장치 상시 운영, 비산먼지 저감시설 개선이 있음.
 - 성장이 빠르고 대기오염물질을 잘 흡수하는 은행나무, 상수리나무 등을 식재함으로써 대규모 완충녹지를 조성하여 주거지로 이동하는 대기오염물질을 저감하여 주민의 심리적 안정 및 비산먼지 저감에 긍정적인 영향을 유도할 수 있음
 - 고농도 비산먼지 발생 시 ‘비산먼지 경보 시스템’과 같은 측정장치를 통해 기상 상황을 고려한 작업 조절이 가능하도록 지원하여 능동적·선제적으로 비산먼지 발생량을 관리할 수 있음
 - 배출량 측정장치 상시 운영 방안으로는 이번 4차년도 연구에서 당진화력과 서천화력에 설치한 측정장치와 같은 방법을 모든 발전소의 저탄장과 회처리장 등 비산먼지가 발생하는 장소에 설치하여 실시간 배출량 측정장치와 모니터링시스템을 연계하고 고농도 비산먼지 상황 및 기상악화 상황 발생 시 발전소 내 작업과 연동시켜 작업조절 등 비산먼지 발생량을 저감하도록 함
 - [그림 6.10]와 같이 풍속이 강할 때 미세먼지 농도는 낮으나 배출량은 높아지는 역상관의 경향을 보여 비산먼지 배출량 증가로 인해 인접지역 주민에게 피해를 줄 수 있으므로 기상악화 시 작업중단 및 방진망 및 도포 설치, 비산먼지 억제제 살수 등 기상 상황을 고려한 연계 대응 방안도 필요함



[그림 6.10] 풍속에 따른 비산먼지 배출량과 미세먼지 농도 비교

- 기존에 회처리장 시설에 설치된 방진펜스 등과 같은 비산먼지 저감시설에 대한 성능평가를 실시하여 평가에서 기준 미달된 노후화 시설에 대해 전면 교체 및 유지보수 등 각 발전소별 객관적인 평가를 통한 자발적인 방지시설 유지관리를 시행하고 정부는 방지시설 유지관리 지원에 대한 제도적 틀을 마련하도록 제안함
 - 또한, 석탄회 운반, 매립과 같은 비산먼지 발생이 불가피한 작업의 경우 동시다발적으로 이루어지기보다는 작업을 분산하여 작업구역 및 비 작업구역을 세분화하고 비작업구역은 방진망 도포, 작업구역은 살수설비를 가동해 비산먼지를 저감하도록 노력함.
 - 이러한 작업 분산의 효과는 배출량 측정시스템을 통해 확인하고 대책 평가 및 개선 방안 수립의 기초자료로 활용함
- 금번 연구를 통해 발전사별 기존 비산먼지 관리방안을 그대로 활용하면서 실시간 비산먼지 배출량 모니터링 시스템을 활용하여 비산먼지 저감을 위한 능동적 대응 방안을 제안함.
- 고농도 미세먼지 상황일 때 실시하는 집중 주변 살수, 기상 상황을 고려한 작업조절, 발전사 주변 식생, 작업 분산 등과 같은 기존의 방식을 과학적 비산먼지 배출량 산정과 연계하여 능동적으로 대응할 수 있도록 하고, 대책 수립에 따른 평가와 연계하여 활용하도록 제시함

Part 3

사회적 피해비용

제1장 서론

1. 연구배경 및 목적
2. 연구내용
3. 연구성과 및 차년도 계획

1. 연구배경 및 목적

- 지역자원시설세 특정자원분은 지역자원 보호, 환경보호 및 개선 등 주민생활환경 개선 및 지역개발사업에 필요한 재원을 확보하기 위해 부과되는 것으로 화력발전 지역자원시설세는 대기오염 등 환경비용을 근거로 과세됨(조성진·박광수, 2020).
- 석탄화력은 LNG등 다른 화력발전원에 비해 발전량 당 대기오염물질 배출량이 커 지역에 미치는 환경영향이 크지만, LNG와 동일한 수준의 지역자원시설세를 부담하고 있음.
- 충청남도는 석탄화력발전이 전국에서 가장 밀집된 지역으로 석탄화력으로 인한 여러 환경문제를 겪고 있으나 현행 지역자원시설세 과세수준이 이러한 피해를 완화하기에 충분하지 않다는 지적이 제기되어 왔음.
- 이에 따라 충청남도는 석탄화력발전 주변지역의 주민환경개선 및 지역 발전을 위한 재원으로 석탄화력의 지역자원시설세 증세를 꾸준히 주장해왔으나, 적정 증세 규모를 제시할 합리적인 평가사례가 제한적임.
 석탄화력발전이 유발하는 피해를 비용으로 평가하여 정책 개발에 활용하고자 하는 시도가 있어왔으나 지역이 아닌 국가 단위의 피해비용을 산출하거나 해외 연구를 국내 여건에 따라 변환하여 적용하는 등의 분석이 주를 이룸.
- 본 연구는 유럽 등 국제적으로 활용되고 있는 피해비용 평가 방법론인 영향경로접근법(Impact Pathway Approach, IPA)²³⁾에 의거하여 충청남도 소재 석탄화력발전이 충청남도에 미치는 피해비용을 정량화하는 것을 목적으로 함.

23) 환경영향을 화폐가치화하는 방법론으로 오염배출 → 매개체(대기, 토양 등)를 통한 확산 → 수용가(receptor)의 영향 → 비용평가의 단계로 구성됨. 유럽의 대표적인 발전원별 사회적비용 평가 프로젝트인 〈Extern E〉(Bickel & Friedrich, 2004)에서 활용됨. 자세한 설명은 1, 2차년 보고서(각각 518쪽, 465쪽)에 기술되어 있음.

2. 연구내용

- 〈화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구〉의 전체 과업 기간 1~5차년 중 피해비용 분석 연구는 1~2차년 동안 수행되었음.
- 연구 1차년에는 충청남도 석탄화력발전의 개황과 대기오염농도 수준, 지역자원시설세 현황을 살펴보고 석탄화력발전이 유발하는 외부비용을 평가한 국내외 연구사례와 각 연구에서 사용된 방법론을 검토하였음.
연구사례 검토를 통해 국내를 대상으로 외부비용을 직접 도출한 사례는 제한적이며, 해외연구에서 도출된 외부비용을 국내 여건에 맞추어 보정하는 연구가 대부분임.
해외의 경우 기후변화, 인체영향, 농업, 건물 등을 대상으로 피해비용을 직접 도출한 사례가 존재하며, 기후변화를 제외할 경우²⁴⁾ 인체영향으로 인한 피해비용이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타남.
- 연구 2차년에는 석탄화력발전의 총 피해비용 평가에 활용하기 위한 단위 질병 피해 및 단위 사망피해비용을 평가하였으며, 대기오염의 건강영향을 정량화하기 위한 농도반응함수를 선행연구에 대한 메타분석²⁵⁾을 통해 도출하였음.
- 이상의 1, 2차년 연구결과 및 5차년도에 제1세부 과제를 통해 도출될 예정인 석탄화력발전의 대기오염농도 기여도를 적용하여 충청남도 소재 석탄화력발전의 피해비용을 평가하고자 하였음.
- 여기서 선행연구에서 도출된 농도반응함수대신 충청남도 인구보건데이터를 활용한 농도반응함수를 개발하여 피해비용평가에 활용하는 것이 필요하다는 전문가의견에 따라 4,5차년도연구를 통해 농도반응함수 개발하는 것으로 과업이 일부 조정됨.

24) 기후변화를 유발하는 온실가스는 국지적으로 영향을 미치는 대기오염물질과 달리 전지구적으로 영향을 미치기 때문에 도세인 지역자원시설세 세수와 비교하기 위한 목적의 피해비용 평가 항목으로 적절하지 않음.

25) 여러 선행 연구에서 도출된 연구결과를 통계적으로 종합하여 대표결과를 도출하는 연구방법. 예를 들어, 대기오염 농도반응함수의 경우, 선행연구 농도반응함수에 대한 가중 평균을 통해 하나의 농도반응함수 대푯값을 도출할 수 있음. 메타분석은 여러 연구의 결과를 통합하므로, 단일연구에서 도출하기 어려운 보편적인 결론을 이끌어낼 수 있다는 장점이 있음. 단, 연구대상지역에서 기 수행된 농도반응함수가 없거나 제한적일 경우, 메타분석을 통해 도출된 농도반응함수가 해당 연구대상지역에 적합한 것이라 볼 수 있는지에 대한 이슈가 존재할 수 있음.

- 이에 당해연도 연구는 영향경로접근법에서 피해비용 산정 결과에 큰 영향을 미치는 농도반응함수(Concentration-Response Function, CRF)²⁶⁾를 충청남도의 지역 여건에 적합한 값으로 개발하기 위하여 필요한 데이터 조사 및 방법론 정립을 목적으로 함.

4차년 연구결과를 바탕으로 최종 5차년도에 농도반응함수 도출 및 피해비용 평가를 수행할 예정임.

3. 연구성과 및 차년도 계획

- 당해연도 연구를 통해 충청남도 농도반응함수 직접 도출을 위한 가용데이터 및 방법론 조사, 피해비용 평가 범위 설정이 이루어짐.

보건의로 데이터 조사는 대기오염과 관련된 건강영향을 평가하는데 가장 적절한 통계 데이터를 선정하기 위해 수행되었으며, 보건 및 의료 통계 데이터 비교 결과 다양한 질병원인 정보를 제공하고, 대상 인구 수를 충분히 확보할 수 있는 사망원인통계와 국민건강보험공단 빅데이터 중 맞춤형DB가 본 연구의 목적과 범위에 가장 부합한다는 결론을 도출하였음.

대기오염 농도반응함수를 도출하기 위해 사용 가능한 방법론을 고찰한 결과하고 대기오염의 단기 및 장기노출 영향 분석에 적합하고 널리 활용되는 시계열연구방법 및 코호트연구방법을 채택하였음.

피해비용분석범위를 공간적, 시간적, 내용적 범위로 나누어, 공간적 범위는 지역자원 시설세의 대상 범위인 충남도 전체로 설정하고, 시간적 범위는 석탄화력발전의 기여도 분석 대상 연도에 초점을 맞추어 2017년 또는 2018년도로 설정하였음.

내용적 범위는 피해비용을 가장 크게 유발하는 것으로 알려진 PM2.5, 그리고 유사한 경향성을 가진 PM10을 주요 원인물질로 하고 국외 대기오염정책영향 평가 시 고려되는 조기 사망 및 호흡기계, 심혈관계 질환과 폐암을 대상으로 함.

26) 대기오염 농도와 건강위험(반응) 간의 관계를 정량화하는 함수. 주로 대기오염 농도의 일정한 변화량(예, 대기 중 PM2.5 농도 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가) 당 건강위험지표(예, 입원건수)가 얼마나 더 변화(예, 1.4% 증가)하는지로 표현됨. 자세한 설명은 1, 2차년 보고서(각각 527쪽, 472쪽)에 기술되어 있음.

- 차년도에는 당해연도에 수립된 분석방법 및 분석 범위를 대상으로 하여 석탄화력의 대기오염 피해비용을 도출하고, 지역자원시설세와 비교하여 증세 방안을 마련할 예정이다.
- 본 연구는 총 5차년의 다년차 과제이기 때문에 연구기간 동안 다양한 정책 환경의 변화가 존재함.
- 특히 당해연구기간 동안 화력발전 지역자원시설세가 2024년부터 kWh당 0.3원에서 0.6원으로 100% 인상된다는 지방세법 개정(안)이 통과됨²⁷⁾에 따라 본 연구의 목적이었던 지역자원시설세 증세가 일부 반영되었음.
- 그러나 증세 수준의 적정성을 판단할 정량적 근거는 여전히 제한적이며 다른 발전원인 원자력발전 세율과의 비교만이 가능한 실정임.
- 따라서 본 연구의 피해비용평가는 충청남도 지역 주민과 화력발전사업자 입장에서 적정한 수준의 지역자원시설세 규모가 어느 정도인지를 판단한 정량적 근거를 제시할 수 있다는 점에서 증세가 실현된 현 시점에서도 당위성이 있음.

27) 에너지타임즈 2021년 12월 9일자 보도자료 “화력발전 지역자원시설세 100% 인상”

제2장 보건의료데이터 분석

1. 개요
2. 건강위험 측정 지표
3. 보건의료 데이터
4. 건강보험 데이터
5. 소결

1. 개요

- 농도반응함수는 대기오염농도와 건강위험 간의 영향 관계를 나타내는 함수로 농도변화에 따라 건강위험 수준이 얼마나 달라지는지에 대한 통계적 추정을 통해 도출됨.
- 인구집단의 건강위험 수준을 정량적으로 나타내기 위해서는 건강위험 수준을 측정할 수 있어야 하며, 건강위험 수준을 측정하기 위해서는 측정하고자 하는 지표를 정의하여야 함.
- 본 절에서는 일반적으로 활용되고 있는 건강위험 지표를 살펴보고, 각 지표를 측정하기 위해 활용 가능한 국내 보건의료데이터 현황을 검토함.
- 이를 바탕으로 충청남도 석탄화력발전의 대기오염배출로 인한 피해비용을 평가하는데 가장 적절한 지표와 데이터를 선정하는 과정을 기술함.

2. 건강위험 측정 지표

- 영향경로접근법에 따라 석탄화력의 대기오염으로 인한 건강피해 수준을 측정하기 위해서는 석탄화력의 대기오염으로 인한 농도 기여수준과, 농도 기여수준 차이에 따른 건강위험 수준의 변화량을 비교하여야 함.
- 인구집단의 건강위험은 대표적으로 질병과 사망으로 나눌 수 있음.
인구집단의 범위를 태아 및 영아에 한정하는 경우 유산율, 조산율, 저체중아 출산율, 영아사망률 등의 지표를 활용하기도 함.
- 질병 위험의 경우 유병률, 발생률, 발병률 등이 있으며, 질병 피해 수준을 직접적으로 나타내는 의료서비스 이용건수, 건강손실년수 등이 있음.
유병률(prevalence rate): 특정 질병에 걸린 인구의 수를 특정 시점 또는 특정 기간 동안의 전체 인구 집단의 수로 나눈 것으로 현재 인구집단의 질병 이환 수준을 파악할 수 있으나 질병 발생시점을 알 수 없음.

발생률(incidence rate): 특정 기간 동안 위험에 노출된 사람 중에서 동 기간 동안 새롭게 질병이 발생한 사람의 수를 나타내는 것으로 질병의 원인을 찾는 데 활용하는 지표이자 질병 발생확률을 직접적으로 나타내는 지표임.

발병률(attack rate): 질병 발생 가능 인구 중 실제로 병에 걸리는 인구의 비율을 나타낸 것으로 유행병 분석에 주로 활용되며, 면역 등으로 인해 병에 걸릴 가능성이 없으면 계산에서 제외되므로 발생률과 차이가 존재함.

건강손실년수(Year lost due to disability, YLD): 질병 및 장애로 인한 건강년수의 상실을 나타내는 지표로 평균수명에서 건강손실년수를 뺀 값은 건강수명을 나타냄.

의료서비스 이용건수(이용률): 병·의원 방문 건수, 응급실 이용 건수 등으로 질병으로 인한 피해부담 수준을 직접적으로 측정할 수 있으며, 인구 수로 나눈 경우 이용률로 표준화하여 서로 다른 인구 집단 간 비교할 수 있음.

- 사망 위험을 나타내는 지표로 조사망률을 가장 일반적으로 활용하나, 원인별 사망 위험 수준을 확인하기 위한 비례사망률, 치명률을 사용하거나 사망으로 인한 피해수준을 보다 정확하게 평가하기 위해 기대여명손실을 정의하기도 함.

조사망률(crude death rate): 사망수준을 나타내는 가장 기본적인 지표로 특정 기간 동안 총사망자 수를 해당 기간 중간 시점²⁸⁾의 인구로 나눈 값으로 정의됨.

비례사망률(proportionate mortality): 특정 기간 동안 특정 질병으로 인해 사망한 인구의 수를 동 기간 동안 모든 원인으로 인한 사망자 수로 나눈 값으로 정의됨.

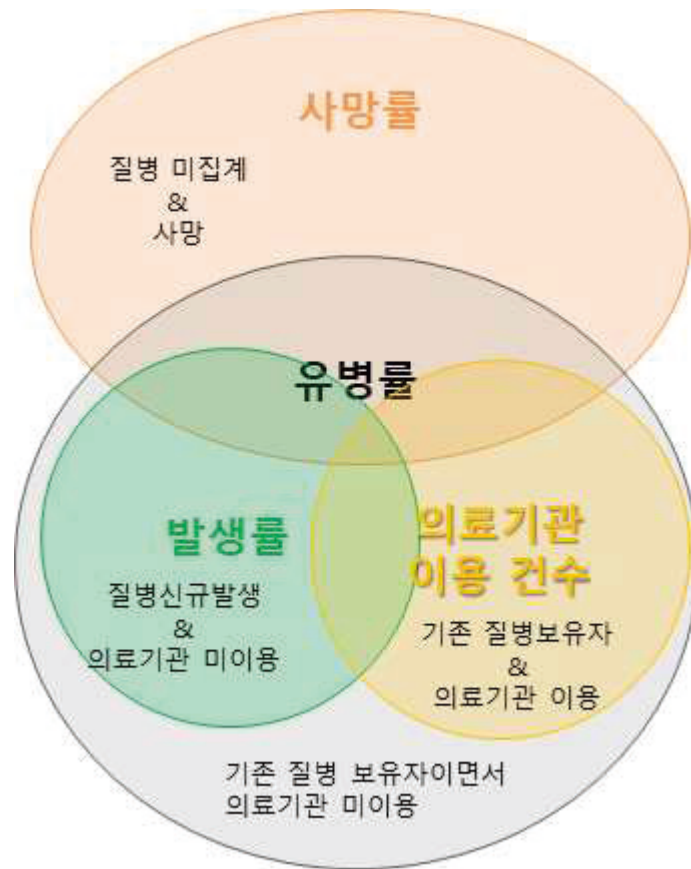
치명률(Case-fatality rate): 특정 기간 동안 특정 질병으로 인한 사망자 수를 동기간 동안 동일 질병을 가진 환자 수로 나눈 값으로 정의됨.

기대여명손실(Year of life lost, YLL): 사망시점의 연령 기준 기대수명과 사망시점의 연령과의 차이인 기대여명을 연수로 나타낸 것임.

- 인구 집단 내 질병을 보유한 인원이 있을 경우, 이 중 일부는 해당 질병으로 인해 사망할 수 있으므로 유병률과 사망률은 모두 특정 질병으로 인한 피해 수준을 나타내는 지표로 역할을 하며, 둘 모두에 집계되는 인원이 존재할 수 있음.

28) 2021년 조사망률은 2021년 1월 1일부터 2021년 12월 31일까지의 모든 사망자 수를 2021년 7월 1일 기준 인구로 나눈 값으로 정의됨.

- 특정 질병으로 인해 사망했음에도 사망전까지 해당 질병으로 인식되지 않은 경우, 유병률에는 집계되지 않지만 사망률에 집계될 수 있음에 따라 사망과 질병 각각을 피해비용 평가에 반영하여야 함.
- 유병률과 사망률에 대한 피해비용을 각각 산정하더라도 중복산정이 발생하지 않는데 이는 질병에 따른 피해비용은 의료서비스에 수반되는 비용, 노동생산성손실, 교통비 등 편익손실 및 직접 지불비용을 나타내는 반면, 사망에 따른 피해비용은 생명가치로 한정하기 때문임.
따라서 질병으로 피해를 입은 사람이 그 질병으로 인해 사망하는 경우, 질병 이환시점부터 사망 직전까지는 치료 등에 수반되는 질병피해비용으로 산정하며, 사망에 따른 생명가치 손실을 사망피해비용으로 산정함.
- 한편 발생 여부를 명확하게 판단할 수 있는 사망과 달리 질병은 실제 병이 있더라도 조사를 통해 질병유무가 확인되지 않거나 잘못 식별되는 불확실성이 있을 수 있음.
- 또한 질병이 있는 사람이 반드시 의료서비스를 이용한다고 볼 수는 없기 때문에 의료서비스 이용건수 또는 이용률로 피해수준을 가늠할 경우 실제 질병 피해 수준을 과소평가할 수 있음.
- 발생률은 신규로 발병된 인원만을 집계하는 반면, 유병률은 발생시점을 고려하지 않기 때문에 피해비용 평가 기간을 정확하게 설정하지 않는 경우, 유병률이 피해비용을 올바르게 산정하지 못할 수 있음.
- 이상과 같이 질병의 경우 어떤 지표를 사용하느냐에 따라 실제 해당 인구집단이 부담하고 있는 피해수준을 정확하게 측정하지 못할 불확실성이 존재함.
- 어떤 지표를 사용할 것인지는 우선적으로 가용한 통계의 수준에 따라 정의됨에 따라, 국내 보건의료통계를 바탕으로 본 연구에 적용할 수 있는 최적의 평가지표를 설정하는 것이 필요함.



[그림 2.1] 건강피해단위별 범주

3. 보건의료 데이터

- 본 연구에서 활용가능한 건강위험지표를 결정하고 농도반응함수 도출에 활용하기 위해 국내 보건의료데이터 현황을 검토함.
- 사망 위험을 나타내는 국내 통계로 산업, 사고 및 재해 관련 사망 통계가 있으며, 보건 연구에 활용 가능한 통계는 통계청이 제공하는 사망원인통계가 대표적임. 사망원인통계는 통계법과 가족관계의 등록 등에 관한 법률에 따라 전국의 읍·면·동 행정복지센터 및 시·구청(재외국민은 재외공관)에 접수된 사망신고서를 주민등록지 기준으로 집계한 결과임.²⁹⁾ 2020년에 발생한 사망 사건에 대하여 당해년도 1월부터 익년 4월까지(16개월간) 신고된 자료를 집계함.

29) 통계청 보도자료 2021년 9월 28일자. <2020년 사망원인통계 결과>

매년 9월에 발표하며, 직전년도에 발생한 사망사건에 대하여 직전년도 1월부터 당해연도 4월까지 신고·집계된 값을 발표함.

- 사망원인통계는 세계보건기구(WHO)의 사인분류 지침에 따라 원사인(사망에 이르게 한 근원 요인)을 기준으로 집계하며, 이를 일별, 원인별, 시군구별로 제공함에 따라 대기오염의 단기 및 장기영향 분석에 모두 활용할 수 있음.

사망원인 및 사망자에 대한 세부정보는 통계청 마이크로데이터 통합서비스³⁰⁾를 통해 확보가 가능함.

건강보험데이터와 연계도 가능하며, 이 경우 의학연구윤리심의위원회(Institutional Review Board, IRB)의 심의가 요구됨.

[표 2.1] 사망원인통계 구성항목

항목명	공공용(MDIS)	원격접근 서비스용(RAS)	MD이용센터용(RDC)	MD이용센터용(RDC확대항목)
연도	O	O	O	X
신고년도	O	O	O	X
신고월	O	O	O	X
신고일	O	O	O	X
주소행정구역 시도코드	O	O	O	X
주소행정구역 시군구코드	O	O	O	X
사망년도	O	O	O	X
사망월	O	O	O	X
사망일	O	O	O	X
사망시	O	O	O	X
사망장소코드	O	O	O	X
사망자직업코드	O	O	O	X
진단자코드	X	O	O	X
결혼상태코드	O	O	O	X
교육정도코드	O	O	O	X
성별코드	O	O	O	X
사망연령	O	O	O	X
수동원사인코드	O	O	O	X

30) <https://mdis.kostat.go.kr/>

항목명	공공용(MDIS)	원격접근 서비스용(RAS)	MD이용센터용 (RDC)	MD이용센터용 (RDC확대항목)
국적구분코드	O	O	O	X
이전국가코드	O	O	O	X
사망원인_103항목분 류코드	O	O	O	X
사망원인_56항목 분류코드	O	O	O	X

- 그 외 주요 암, 감염병, 치매 등 질병별 사망정보나 알코올 질환 사망자 수 등 특정 질병별로 세분화된 사망통계가 존재하나, 제한된 범위의 통계만을 제공함에 따라 사망원인통계에 비해 활용성이 낮음.
- 질병의 경우 유병률, 발생률, 의료서비스 이용 건수 등 각 지표별로 통계가 존재함.
- 유병률 통계로 질병관리청 《국민건강영향통계》 중 만성질환 유병률 통계, 한국보건사회연구원의 《의료패널》 중 만성질환 유병률 통계가 있으나 만성질환에 국한함에 따라 대기오염으로 인해 유발되는 급성질환(급성하기도 감염 등) 정보를 제공하지 않음.
또한 두 가지 통계 모두 전수조사가 아닌 표본조사로 본 연구의 관심 대상인 석탄화력발전 주변 지역으로 한정할 경우 통계적 유의성을 검증하기에 충분한 표본 수를 확보하기 어려움.
- 발생률 통계로 법정감염병 통계, 업무상질병 통계, 암 등록 통계가 있으나 이 중 대기오염과 직접 관련이 있는 것은 암 등록 통계에 국한되며, 시도 단위로만 제공됨에 따라 시군구 단위로 세분화된 분석이 어려움.
- 의료서비스 이용건수를 파악할 수 있는 통계(예. 국민관심질병통계)가 다수 있으나, 모두 건강보험청구데이터에 기초한 것이거나, 제공범위가 제한됨에 따라 건강보험청구데이터를 세부조사하였음.
- 건강보험청구 데이터는 전국민³¹⁾을 대상으로 수집되기 때문에 데이터건수가 충분하

31) '2020년 기준 전체 인구 51,829,023명 (행정안전부), 건강보험적용인구 51,344,938명 (건강보험통계연보)으로 전체인구의 99.07%를 차지함.

며, 주 질병뿐만 아니라 부상병, 치료 비용, 내원일수 등 피해비용 평가에 활용가능한 다양한 정보를 확인할 수 있다는 장점이 있음.

또한 건강보험가입자의 거주지를 기준으로 시군구 단위의 통계를 산출할 수 있어 지역 단위 비교가 가능하고 내원일 정보를 제공함에 따라 일별 변동을 파악할 수 있어 단기영향과 장기영향 분석에 모두 활용 가능함.

국민건강보험의 일부로 제공되는 건강검진 내역을 연계할 경우 대기오염농도 외 질병에 영향을 미치는 다른 요인으로 인한 영향을 제거하여 보다 신뢰성 있는 결과를 도출할 수 있음.

- 이상과 같이 국내 보건의료데이터를 대상으로 데이터 제공 범위를 비교한 결과 충청남도 석탄화력 대기오염 영향을 평가하기 위해서는 시군구 및 일단위 데이터 제공이 가능하고, 대상자 수가 많으며, 질병정보를 다양하게 포함하는 사망원인 통계 및 건강보험 청구 데이터가 가장 적합함.

[표 2.2] 국내 보건 통계

정의	국내 통계	대상	발표주기	시간	공간	가용성 검토
사망률	통계청 사망원인 통계	전체 사망건수	매년. 당해연도 1월~익년 4월까지 신고 집계하여 9월 발표	일별	시군구	사용가능
	질병관리청 국민건강영양통계 중 만성질환 유병률(고혈압, 당뇨, 고중성지방혈증, 고콜레스테롤혈증, 폐쇄성 폐질환)	1만여 가구 표본조사	3년	연별	시군구	불가. 질병 종류 제한적
유병률	한국보건사회연구원 의료패널 중 만성질환 유병률(고혈압, 당뇨, 심뇌혈관, 만성하기도질환, 암)	8500가구 표본조사	매년. 조사년도익년12월	연별	시군구 (추정)	불가. 질병 종류 제한적
발생률	질병관리본부 법정감염병 발생보고	전체 발생건수	매년. 작성년도익년 6월	연별	시군구	불가. 대기오염 관련 낮음
	고용노동부 업무상질병 발생현황	전체 발생건수	분기	월별	전국	불가. 대기오염 관련 낮음
	질병관리본부 암등록통계	전체 발생건수	매년. 작성년도 익년 12월	연별	시도	제한적. 단기영향 분석 불가
	건강보험심사평가원 국민관심질병통계	건강보험청구건	매년	연별	전국	불가. 지역구분 미제공
입원/외래 건수	건강보험공단 빅데이터	건강보험청구건	수시	일별	시군구	사용가능
	건강보험심사평가원 빅데이터	건강보험청구건	수시	일별	시군구	사용가능
응급실 이용건수	응급의료현황통계	전체 발생건수	매년. 작성년도익년 12월	연별	시도	불가. 질병 종류 제한적

- 건강보험청구데이터는 건강보험공단이 제공하는 데이터와 건강보험심사평가원이 제공하는 데이터가 있음.
- 건강보험공단은 맞춤형연구DB와 표본연구DB를 각각 제공하며, 두 데이터 모두 전체 건강보험청구데이터가 아닌 목적에 따라 일부 가공, 추출된 데이터임.
- 맞춤형연구DB는 공단이 수집, 보유, 관리하는 건강보험 및 장기요양보험 자료를 정책 및 학술 연구 목적으로 이용할 수 있도록 신청자의 연구목적에 따라 추출, 요약, 가공한 데이터임.
연구의 목적과 범위에 적합한 데이터를 사용할 수 있다는 장점이 있으나 선호되지만, 건강보험공단에서 데이터를 추출, 가공하는 절차가 수반되므로 데이터 획득에 시간이 소요됨.
또한 맞춤형 건강정보자료를 열람 및 연구 분석할 수 있는 PC가 설치된 공단 내의 장소인 “빅데이터 분석센터”에서 통계분석 툴(Tool)을 이용하여 제공함³²⁾에 따라 연구자가 원하는 시간, 원하는 장소에서 분석할 수 없어 연구에 제약이 큼.
- 표본연구DB는 전국민 건강보험 빅데이터를 기반으로 수요도가 높은 데이터를 표본 추출한 데이터로 표본코호트DB, 건강검진 코호트DB, 노인 코호트DB, 영유아검진코호트DB, 직장여성 코호트DB의 5종이 있음.³³⁾
- 이 중 표본코호트DB는 우리나라 전체 인구의 지역, 연령, 성, 소득분위 등 사회경제적 특성별 분포와 균등한 분포를 가지도록 추출된 100만명의 표본을 대상으로 하는 건강보험 데이터셋임.
- 즉, 대한민국 인구 5천만명을 대표할 수 있는 100만명을 추출하여 개개인의 건강보험 데이터를 제공하는 것임.
- 표본코호트DB는 100만명으로 정의된 표본집단에 대해 이미 가공된 건강보험데이터를 제공하므로 추가적인 데이터 가공 단계가 필요하지 않으며 직접 데이터분석센

32) 국민건강보험공단 연구DB 데이터제공 안내 (<https://nhiss.nhis.or.kr/bd/ab/bdabd003cv.do>)

33) 노인코호트, 영유아검진 코호트, 직장여성 코호트는 연구 대상이 특정 인구계층에 한정될 경우에 사용할 수 있으며, 본 연구의 경우 충청남도 지역이라는 특성 외에 연구 대상 인구를 특정하지 않으므로 해당 DB의 사용을 고려하지 않음. 건강검진 코호트 또한 2002~2003년 40~79세 일반건강검진 수검자 51만명을 대상으로 한 검진 데이터로 본 연구에서 활용하기에 적절하지 않음.

터에 방문해야만 데이터에 접근가능한 맞춤형연구DB와 달리 연구자의 PC에서 가상사설망(VPN)을 통해 데이터서버에 접속하여 분석할 수 있어 상대적으로 분석이 용이함.

- 그러나 표본코호트DB내 전체 인구가 100만명이므로 이 중 충청남도 거주 인구는 약 4만명³⁴⁾으로 제한적이며, 여기서 대기오염 관련 질환자의 수를 특정할 경우 대상 인구 수가 더욱 적어짐에 따라 통계적 경향을 뚜렷하게 도출해내기 어려움.

지역자원시설세 증세 규모를 판단하기 위해서는 충청남도 전체의 피해수준을 분석하여야 하므로 충청남도 인구로 한정된 분석이 필요함.³⁵⁾

- 따라서 건강보험공단 데이터를 활용할 경우 표본코호트DB보다는 맞춤형연구DB를 활용하는 것이 본 연구의 목적에 가장 적절하다고 보여짐.

- 건강보험심사평가원은 의료기관이 청구한 건강보험청구건에 대한 심사평가를 진행하고, 평가결과를 건강보험공단에 통보하는 기관으로 건강보험공단과 유사한 건강보험 청구데이터를 보유하고 있음.

건강보험심사평가원 또한 맞춤형 자료와 환자표본자료를 제공하고 있으며, 각 데이터셋의 특성은 건강보험공단의 맞춤형DB, 표본DB와 유사함.

- 두 데이터가 모두 동일함에 따라 본 연구에서는 건강보험공단의 맞춤형DB를 대상으로 데이터 제공범위 및 수집 방법을 상세히 조사함.



[그림 2.2] 건강보험 심사 청구절차

34) 표본코호트DB는 전국민의 지역별 분포와 동일하도록 추출된 표본 데이터이므로, 대한민국 전체인구 5천만명 중 충청남도 거주인구 약 2백만명(2020년말 기준 2,121,029명)임을 고려하였을 때 동일한 비율을 100만명에 적용할 경우 약 4만명으로 추산할 수 있음.

35) 분석 범위에 대한 세부 설명은 본 보고서 제4장을 참조

[표 2.3] 국민건강보험 관련 데이터 비교

구분	건강보험공단 맞춤형DB	건강보험공단 표본DB	건강보험심사평가원 맞춤형 자료	건강보험심사평가원 환자표본자료
개요	공단이 수집, 보유, 관리하는 건강보험 및 장기요양보험 자료를 정책 및 학술 연구 목적으로 이용할 수 있도록 신청자의 연구목적에 따라 추출, 요약, 가공한 데이터 2002년부터 연구자가 필요로 하는 기간까지 제공	전국민 건강보험 빅데이터를 기반으로 수요도가 높은 데이터를 표본 추출한 데이터 표본 코호트 DB, 건강검진 코호트 DB, 노인 코호트 DB, 영유아검진코호트DB, 직장여성 코호트 DB 등 5종	공단이 보유하고 있는 자료와 유사 약제 관련 부가정보(의약품 안심서비스 정보, 의약품 유통관리 정보 등), 진료적정성평가자료, 일부 비급여 항목 자료 제공 2007년부터 제공	요양기관이 청구한 요양급여비용 청구명세서에서 표본 추출한 데이터. 입원환자데이터셋, 전체환자데이터셋, 고령환자데이터셋, 소아청소년환자 데이터셋 등 4종
대상	건강보험가입자(전국민)	100만명(표본코호트기준)	건강보험가입자(전국민)	100만~140만명
장점	전국민 대상이므로 분석 데이터 수가 많음.	데이터 취득 용이	공단 맞춤형 DB와 동일 약제정보 상세	데이터 취득 용이
단점	데이터를 열람할 수 있는 지정장소 내에서만 분석 가능(시간 소요)	충남도로 제한 시 데이터 수가 많지 않고, 제한된 기간 동안의 자료만 제공 표본/검진/노인 '02-15년 직장여성 '07-15년 영유아검진 '08-15년	공단 맞춤형 DB와 동일	공단 표본DB와 동일. 연도별 추출 대상이 달라 시계열연구 불가

4. 건강보험 데이터

4.1 개요³⁶⁾

- 국민건강보험(National Health Insurance Service, NHIS)은 전 국민을 대상으로 보편적인 건강보험제도이며, 국민건강보험공단은 가입자의 의료 이용 및 처방 내역을 기록하여 보관하고 있음.
- 방대한 크기의 양질의 데이터를 공중보건 및 의료 연구에 활용할 수 있도록 개인 정보, 인구통계 및 의료데이터 등을 포함하는 ‘국민건강정보 데이터베이스 (National Health Information Database, NHID)’가 개발되었음.
NHID는 의료 서비스 제공자(병원 등)가 청구한 NHIS 가입자의 의료비를 기반으로 기록되며, 청구날짜가 아닌 진료날짜에 따라 재정렬됨.
- 청구내역에 따라 기록된 모든 정보를 공개하는 것은 개인정보보호 등에 위반하기 때문에 NHIS는 대표적인 정보를 담고 있는 표본코호트 (NHIS-National Sample Cohort, NHIS-NSC)를 구축하였음.
하지만 NHIS-NSC는 NHIS에서 사전에 가공한 데이터이기 때문에 연구자가 임의로 연구 기간, 관심 질병 등을 선택할 수 없다는 점에서 한계가 있음.
- 이를 극복하기 위해 NHIS는 연구자가 요청하는 조건에 맞춰 추출된 맞춤형 코호트 (NHIS-NHID)를 전문가의 심의를 거쳐 제공하고 있음.

4.2 데이터 종류

4.2.1 표본코호트(NHIS-NSC)

- NHIS-NSC는 2014년 1.0 버전이 공개되었으며, 2017년 정확성 보강 및 정보보호 강화를 목적으로 2.0 버전으로 개정되었음.
- 2006년 1년간 NHIS 가입자 혹은 의료급여수급권자 자격을 유지한 한국 국적 보유자 48,222,537명 중 1,000,000명을 무작위 추출하였음.

36) Lee J, Lee JS, Park S-H, Shin SA, Kim K. 2016. Cohort Profile: The National Health Insurance Service-National Sample Cohort (NHIS-NSC)에서 일부 발췌함.

성별, 연령(1-79세, 5세 단위), 지역구분(대도시/중소도시/농어촌), 가입자 구분 및 보험료분위(의료급여수급권자/지역분위/직장분위) 계층별로 비례 배분하여 계층화한 표본추출을 시행함.

NHIS는 2005년까지 직장 주소를, 2006년 이후에는 거주지 주소를 기록하였기 때문에 가입자의 거주지 정보는 계층변수로 사용되지 않음.

- NHIS-NSC에 포함된 사람은 2002년부터 사망 또는 이민 등의 이유로 자격이 박탈되지 않는 한 2015년까지 14년 동안 추적되었음.
- NHIS-NSC는 불필요한 자료 또는 누락된 자료를 모두 제거하고 사전에 가공되었기 때문에 연구자의 편의성 측면에서 매우 유용한 자료이나, 연구자가 임의로 조건을 설정할 수 없다는 단점이 있음.

4.2.2 맞춤형 코호트(NHIS-NHID)

- NHIS-NHID는 NHIS에서 보관하고 있는 전체 데이터를 기반으로 연구자의 연구 목적에 따라 선택 추출된 자료로써, 연구 기간(현재 2020년까지 신청 가능), 제외조건, 포함조건 등을 설정하여 신청할 수 있음.
- NHIS-NHID는 가공되지 않은 원자료이기 때문에 누락된 자료를 모두 포함하고 있어 데이터 수집 후 연구자가 직접 가공해야 한다는 단점이 있으나, 연구 목적에 맞춰 광범위한 데이터를 분석할 수 있음.
- 또한 NHIS에서 생산하지 않는 사망원인 자료의 경우, 통계청 사망원인 자료와 연계하여 분석에 사용할 수 있음.
- 본 연구는 지역적 범위가 충청남도로 제한되어 있고, 관심 질병이 대기오염물질로 인한 영향이 큰 질병들이기 때문에 NHIS-NSC를 사용할 경우 연구 분석에 포함되는 대상의 수가 매우 적어질 우려가 있음.
- 따라서 본 연구는 연구 목적과 범위에 맞춰 NHIS-NHID를 수집하여 연구에 사용하였음.

4.3 데이터 수집 절차

4.3.1 생명윤리위원회 승인

- NHIS-NHID는 인간을 대상으로 수집된 자료이며, 연구대상자를 간접적으로 식별할 수 있는 정보를 포함하고 있기때문에 생명윤리위원회 (Institutional Review Board, IRB)의 연구승인 확인서를 제출해야 함.
단, 연구대상자를 직접 모집하여 새로운 정보를 생성하지 않고 이미 생성된 기존의 자료를 사용하는 것이기 때문에 심의를 면제함.
- 본 연구는 보건복지부 지정 공용기관생명윤리위원회에 의해 심의를 면제받았음. (P01-202103-22-002)

보건복지부 지정 공용기관생명윤리위원회 [별지 제13호 서식] 1 쪽

심의면제확인서

감명경 회차

면제확인번호	P01-202103-22-002					
연구과제명	화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구용역					
연구책임자	김명	김명경	조국	한국통일재단	지점	연구원

상기 연구과제에 대하여 본 위원회에서는 심의면제대상임을 확인합니다.

* 모든 연구자들은 아래의 사항을 준수하여야 합니다.

① 계획서에 따라 연구를 수행하여야 합니다.

② 위원회의 요구가 있을 때에는 연구의 진행과 관련된 보고를 위원회에 제출하여야 합니다.

③ 연구용역을 위하여 관할부서가 필요시 조사 및 실험 과정에서 만일 발생할 수 있습니다.

④ 연구의 관련된 기록은 연구가 종료된 시점을 기준으로 최소 3년간 보존하여야 합니다.

2021년 03월 04일

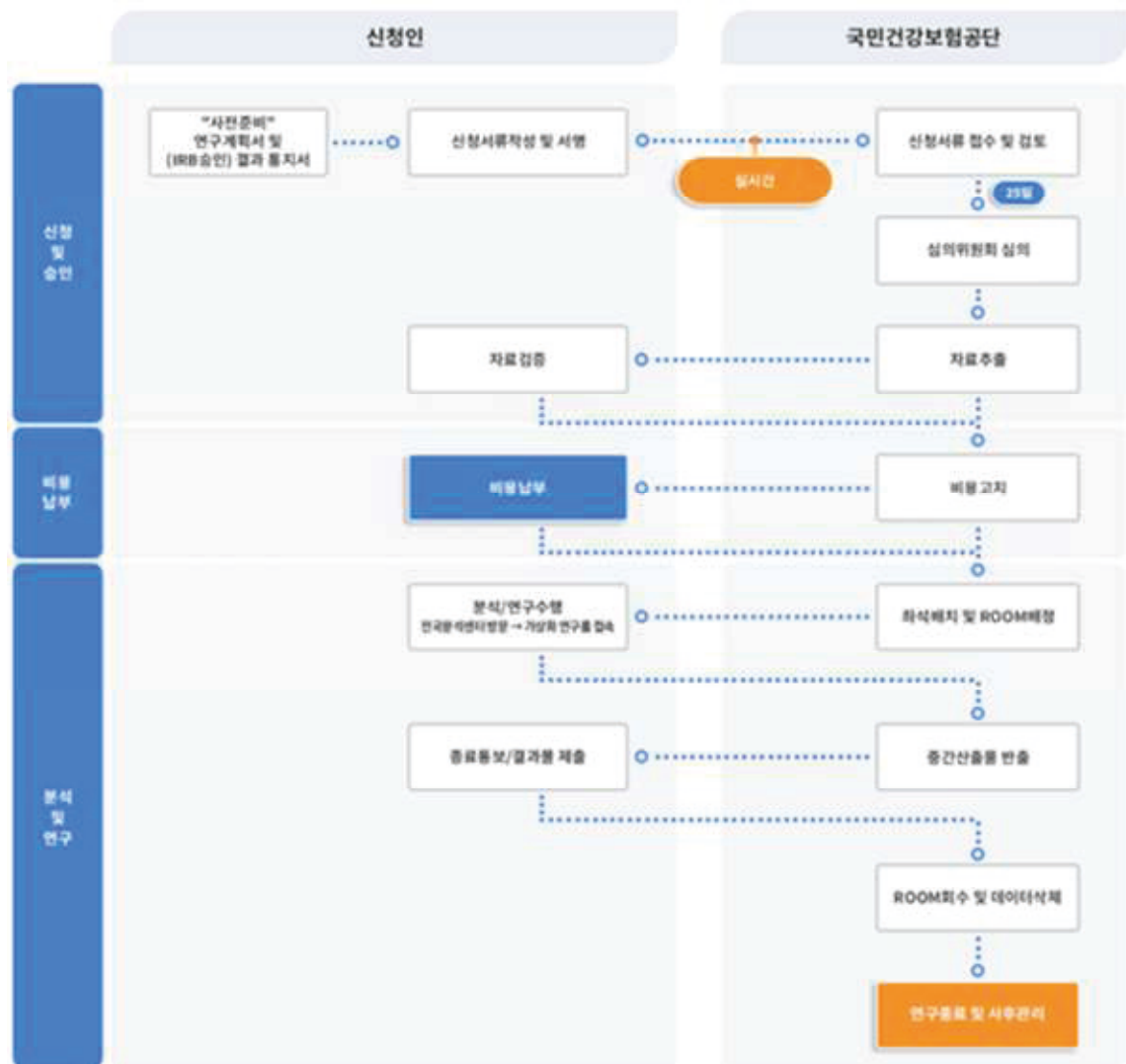
**보 건 복 지 부 지 정
공용기관생명윤리위원장 (인)**

본 확인서에 기재된 사항은 보건복지부 지정 공용기관생명윤리위원회에 기재된 내용과 일치함을 증명합니다.
본 공용기관생명윤리위원회는 생명윤리 및 안전에 관한 법률과 관련 통규를 준수합니다.
본 확인서와 함께 감명경(Jinmyeong Kim)이 있는 부속지 점을 첨부 연구의 실행에 사용하십시오.
본 확인서의 지점은 공용기관생명윤리위원회에서 보관합니다.
www.kci.go.kr (2021.3)

[그림 2.3] 심의면제 확인서

4.3.2 NHIS-NHID 신청승인

- NHIS-NHID 신청 절차는 [그림 2.4]과 같으며, 신청승인부터 자료구축까지 약 3개월 정도 소요됨.



[그림 2.4] NHIS-NHID 신청 및 승인 절차

- NHIS-NHID는 개개인의 건강정보를 다루고 있기 때문에 개인정보보호를 위해 다음과 같은 물리적인 제약이 존재함.
NHIS에서 지정한 빅데이터 분석센터 내에서 제한된 시간(일주일 최대 3회 / 09:00-18:00)동안 사용 가능하며, 데이터의 반입과 반출이 자유롭지 않음.
데이터 가공 및 통계 분석은 데이터 센터 내 비치된 컴퓨터를 활용하여 수행되어야 하

며, 해당 컴퓨터에 설치된 통계 분석 소프트웨어인 SAS, R, STATA, SPSS만 사용할 수 있음.

또한 반드시 각 연구에 배정된 ‘가상화 연구팀’에 접속하여 분석할 수 있으므로 데이터 처리 속도가 느림.

5. 소결

- 농도반응함수에서 건강피해반응을 정의하기 위해 인구집단의 건강위험을 나타내는 지표를 비교하였음
- 사망률, 유병률, 발생률 등 각 지표별 정의와 특징을 검토하였으며, 데이터의 가용성에 따라 사용가능한 지표가 정의됨에 따라 각 지표와 연계하여 가용한 국내 보건의료데이터를 조사하였음.
- 사망 위험을 나타내는 국내 통계로 산업, 사고 및 재해 관련 사망 통계 외에 보건 연구에 활용 가능한 통계는 통계청이 제공하는 사망원인통계가 대표적임.
매 일별 사망건수를 원인별, 시군구별로 제공함에 따라 사망률 등으로 변환하여 대기오염의 단기 및 장기영향 분석에 모두 활용할 수 있음.
- 건강보험청구 데이터는 전국민³⁷⁾을 대상으로 수집되기 때문에 데이터건수가 충분하며, 주 질병뿐만 아니라 부상병, 치료 비용, 내원일수 등 피해비용 평가에 활용가능한 다양한 정보를 확인할 수 있다는 장점이 있음.
또한 건강보험가입자의 거주지를 기준으로 시군구 단위의 통계를 산출할 수 있어 지역 단위 비교가 가능하고 내원일 정보를 제공함에 따라 일별 변동을 파악할 수 있어 단기영향과 장기영향 분석에 모두 활용 가능함.
- 최종적으로 연구목적에 고려하여 대상자 수가 많으며, 질병정보를 다양하게 포함하는 사망원인 통계 및 건강보험 청구 데이터를 분석 대상 데이터로 결정하고 데이터 수집을 위한 제반 절차를 수행하였음.

37) 2020년 기준 전체 인구 51,829,023명 (행정안전부), 건강보험적용인구 51,344,938명 (건강보험통계연보)으로 전체인구의 99.07%를 차지함.

제3장 농도반응함수 도출 방법론

1. 개요
2. 역학연구 방법
3. 코호트 연구
4. 선행사례
5. 소결

1. 개요

- 농도반응함수는 대기오염농도와 건강피해반응 간의 관계를 나타내는 모형(model)을 설정하고 통계기법을 이용하여 모형을 추정함으로써 도출됨.
- 적절한 모형을 설정하기 위해서는 농도와 피해반응 간의 관계를 분석하는 역학(epidemiology)연구 방법이 사용됨.
- 본 절에서는 역학연구에 사용되는 여러 방법론을 살펴보고 각 방법론을 비교·분석하여, 대기오염과 건강영향 간의 관계를 명확하게 확인할 수 있으며 본 연구에 적용 가능한 최적의 방법론을 선택하는 과정을 기술함.
- 또한 역학연구에서 영향관계를 정량적으로 뒷받침하기 위해 활용되는 여러 통계기법을 검토하고 본 연구에 사용될 통계기법을 대상으로 이론적 고찰을 수행하였음.
- 최종적으로 대기오염의 건강영향을 나타내는 농도반응함수 도출 사례를 국내외, 질병 유형별로 검토하고 본 연구의 분석 모델을 수립하였으며 결론에 대한 근거와 확인사항을 본 절에 다루었음.

2. 역학연구 방법

2.1 방법별 분류

- 농도반응함수는 우리가 관심 있는 특정 사건(사망, 질병 발생 등)과 사건을 유발할 가능성이 있는 위험 요인 간의 인과관계에 따라 위험 요인의 노출이 사건에 미치는 영향의 크기를 확인하는 것이 목적임.
- 역학(epidemiology)이란 인구집단 내에서 건강과 관련된 사건, 상태, 과정의 발생과 분포를 기술하고 이에 대한 결정요인을 규명하는 예방의학의 한 분야임.
- 역학연구의 목적이 현상에 대한 기술인 경우 기술연구(descriptive study), 영향관계에 대한 가설 검증인 경우 분석연구(analytic study)로 구분됨.³⁸⁾

기술연구에 사용되는 연구방법으로 사례연구, 사례군 연구, 생태학적 연구 등이 있음.
 분석연구에 사용되는 연구방법으로 시계열연구, 환자대조군 연구, 코호트 연구 등이 있음.

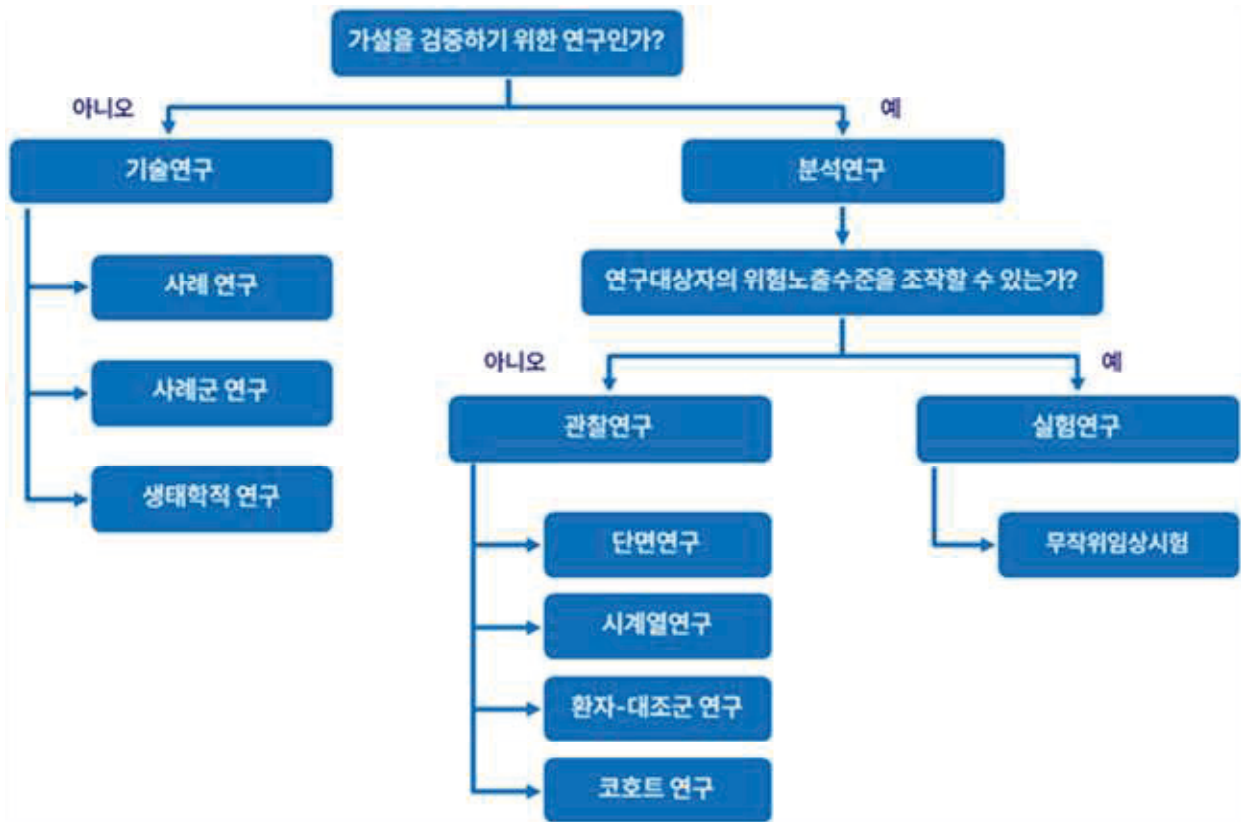
[표 3.1] 역학연구 방법 중 기술연구 방법

기술연구 종류	연구방법
사례연구	<ul style="list-style-type: none"> · 하나 또는 몇 개의 사례를 중심으로 분석하는 연구 · 특정 집단, 사건, 공동체에 대하여 심층적으로 분석
사례군 연구	<ul style="list-style-type: none"> · 동일 환자군에서 관심변수의 빈도 등을 분석
생태학적 연구 (ecological study)	<ul style="list-style-type: none"> · 분석 단위가 각 개인이 아니라 집단인 연구로, 여러 집단을 동시에 또는 하나의 집단을 여러 시기에 걸쳐 비교하는 형태 · 소요 경비와 시간이 상대적으로 적은 장점이 있지만 인과관계를 추론할 때 오류가 발생할 수 있음.
단면연구 (cross-sectional study):	<ul style="list-style-type: none"> · 특정한 시점 또는 짧은 기간에 연구대상의 유병여부와 연구하려는 속성의 유무를 동시에 조사한 후 이들 사이의 관계를 규명하는 방법으로 비용과 기간 소요가 적으나 인과관계를 판단할 시간적 선후관계를 알 수 없는 단점이 있음.

- 분석연구는 다시 연구대상자의 건강위험 요인 노출수준을 인위적으로 조작할 수 있는지에 따라 관찰연구(observational study)와 실험연구(experimental study)로 세분화됨. 관찰연구는 연구자의 인위적 개입 없이 연구대상자를 관찰하여 건강위험 수준과 건강위험요인에 대한 정보를 수집하여 상관관계를 분석하는 방법으로 환자대조군연구, 코호트연구 등이 관찰연구 방법에 해당함. 실험연구는 연구자가 위험요인을 조작, 통제하여 인과관계를 분석하는 방법이며, 대표적으로 무작위임상시험(Randomized Clinical Trial)이 있음.
- 농도반응함수는 요인과 반응 간의 관계를 도출하는 것이므로 기술연구가 아닌 분석연구 방법을 적용하여야 하며, 인구집단의 대기오염 노출 수준을 인위적으로 조절할 수 없기 때문에 실험연구 방법이 아닌 관찰연구 방법을 적용하여야 함.

38) 이하의 설명은 방준석 (2019)의 내용을 인용하였음.

- 따라서 분석연구 방법론 중 관찰연구 방법에 속하는 단면연구, 시계열 연구, 환자-대조군 연구, 코호트 연구 방법에 대해 비교 검토하였음.



[그림 3.1] 역학연구방법 분류

2.2. 분석연구 종류

- 농도반응함수 도출에 적용가능한 방법은 단면연구, 시계열 연구, 환자-대조군 연구, 코호트 연구 방법 등이 있음.
- 단면연구(cross sectional study)는 특정 시점 또는 짧은 기간 동안 연구 참여자의 발병 여부와 관심 있는 위험요인 노출수준을 동시에 조사한 후 이들 사이의 연관성을 추정하는 연구임.
한 시점에서 연구 참여자의 발병 여부와 위험요인 노출 수준을 동시에 수집함에 따라 경제적이고 간편함.

그러나 원인(노출 수준)과 결과(발병 여부) 간의 시간적 선후관계를 고려하지 않기 때문에 인과관계를 설명하는데 사용할 수 없음.



[그림 3.2] 단면연구 모식도

○ 시계열 연구(time series)는 시간에 따라 변화하는 위험 요인 노출수준과 발병 빈도 간의 간의 연관성을 분석하는 연구임.

분석하고자 하는 발병빈도가 위험요인 변동과 동시에 또는 짧은 기간 내에 함께 변동할 경우 둘 사이의 상관성이 높다고 간주함.

여러 시점에 걸쳐 위험요인 노출과 발병 빈도 간의 상관관계를 살펴보기 때문에 단면연구에 비해 보다 설명력있는 결론을 도출할 수 있음.

위험요인 변동에 즉각적으로 반응이 나타나는 경우만 분석가능함에 따라 대기오염의 단기노출에 따른 영향을 분석하는데는 효과적이지만, 장기간 노출에 따른 영향을 분석하기는 어려움.



[그림 3.3] 시계열 연구 모식도

- 환자-대조군 연구(case-control study)는 현재 시점에서 발병 유무에 따라 연구 대상 집단을 구성하고, 각 집단의 위험 요인에 대한 과거의 노출수준을 조사한 후 사건과 위험 요소 간의 관계를 추정하는 후향적(retrospective) 연구임.

비교적 드물게 발생하는 질병을 연구하기에 적합하며, 하나의 질병에 관계되는 여러 가지 위험 요인들을 동시에 조사할 수 있고, 후술할 코호트 연구에 비해 경제적이라는 장점이 있음.

하지만 관심 사건이 발생한 집단과 유사한 대조군을 설정하는 것이 어려우며, 사건 발생과 위험 요인 노출의 시간적 선후관계가 불명확하다는 단점이 있음.



[그림 3.4] 환자-대조군 연구 모식도

- 코호트³⁹⁾ 연구는 위험 요인에 노출된 집단과 노출되지 않은(또는 노출 수준이 낮은) 집단을 모집하고 장기간에 걸쳐 두 집단의 사건 발생여부를 추적·비교하는 연구임.

연구시점과 추적기간을 어떻게 설정하느냐에 따라, 연구 시점 이후부터 연구집단을 관찰하는 전향적 코호트 연구(prospective cohort study)와 연구 시점 이전에 수집된 데이터를 소급 적용하는 후향적 코호트 연구(retrospective cohort study) 등으로 구분됨. 코호트 연구에 대한 보다 세부적인 설명과 코호트 연구의 종류 등은 본 장 《3.2 분석모델》에서 상세히 다룸.

39) 코호트(Cohort)란 인구통계학적으로 유사성을 가지는 등 공통 특성을 공유하는 집단을 의미함.



[그림 3.5] 전향적 코호트 연구 모식도

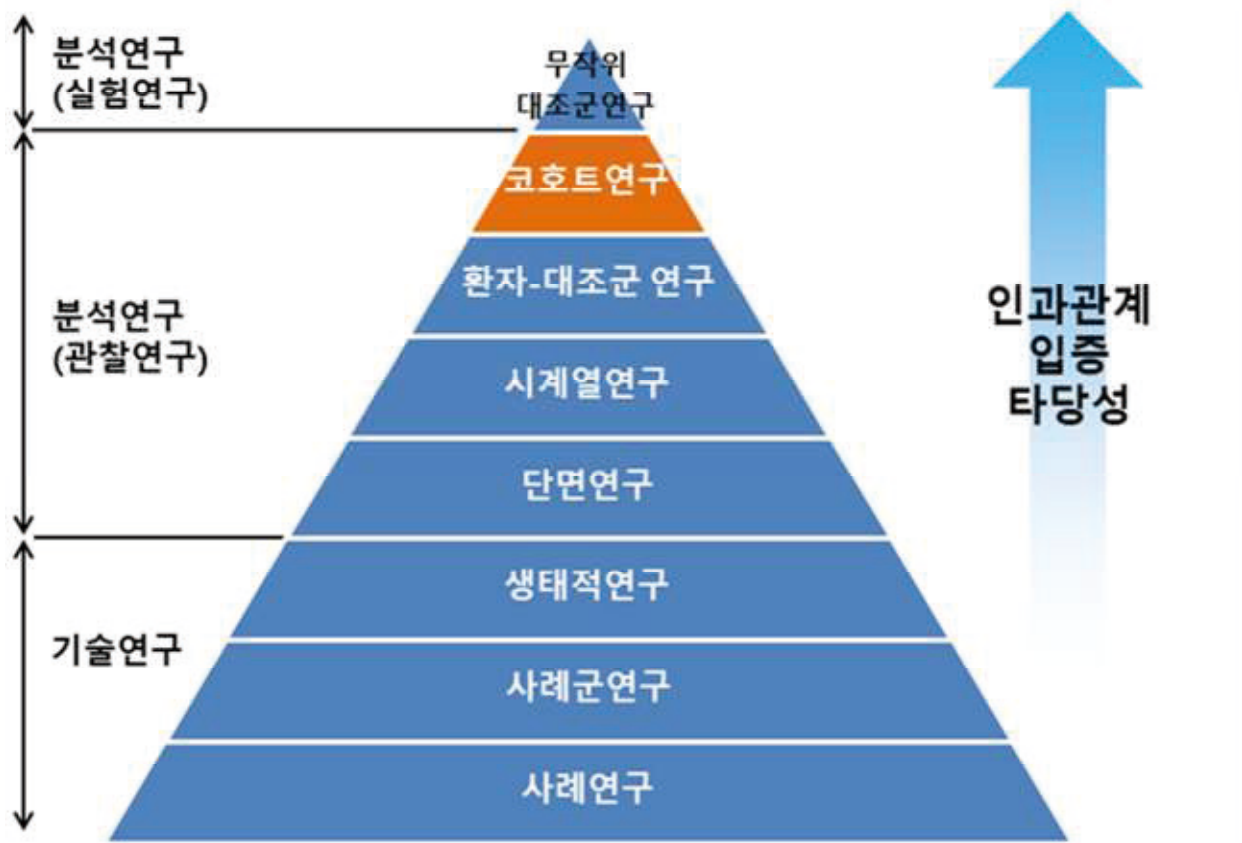


[그림 3.6] 후향적 코호트 연구 모식도

2.3. 인과관계 입증 타당성

- 본 연구는 대기오염물질 노출과 관심 사건(뇌졸중 입원 등)의 연관성을 확인하는 것을 목적으로 하고 있음.
- 인과관계를 설명하기 위한 가장 강력한 과학적 증거(scientific evidence)를 제공하는 연구설계는 무작위 대조군 연구이며, 다음으로 코호트 연구임.
코호트 연구 중에서도 전향적 코호트 연구가 후향적 코호트 연구에 비해 인과관계를 입증하기에 더 타당한 것으로 알려져 있음.

출처: Künzli & Tager (1997) 내용을 일부 변용



[그림 3.7] 연구방법별 인과관계 입증 타당도

- 각 연구방법별로 인과관계 또는 상관관계를 통계적으로 뒷받침하기 위해 사용되는 통계 방법이 달라짐.
- 시계열 연구는 일반적인 선형회귀모형과 유사한 형태로 모형을 설정하며, 종속변수를 사망자 발생 수, 입원 발생건수 등으로 정의하고 독립변수로 대기오염농도를 정의함.
- 시계열 연구에서 건강위험 측정지표는 사망위험을 나타내는 사망발생확률(p)로 표현되며 대기오염 영향의 크기는 각 대기오염농도 수준에서 위험도의 변화를 비교하여 표준화된 값을 도출함.
 대기오염 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 상대위험도가 1.3이라고 한다면, 대기오염 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가했을 때 사망 위험이 대기오염농도가 증가하지 않았을 때의 사망위험에 비해 1.3배 높다고 설명할 수 있음.
 사건 발생확률(p)로 직관적으로 해석 가능한 위험도를 지표로 사용할 수 있으므로 영향을 과대해석할 우려가 없음.
- 시계열 연구는 일별 대기오염 농도 변화에 따라 같은 날 사망자 수가 얼마나 달라지는지를 모델링하므로 대기오염노출로 인한 장기 영향(예. 1년 간 노출, 2년간 노출 등)을 분석할 수 없음.
- 대표적으로 환자-대조군 연구방법을 이용하여 대기오염 건강영향을 분석하는 경우 로지스틱 회귀모형이 주로 사용되어 대기오염노출 수준에 따른 질병 또는 사망 발생 확률 변동을 모델링 함.
 로지스틱 회귀모형은 독립변수의 선형결합으로 종속변수에 미치는 영향을 분석한다는 점에서 일반적으로 알려진 선형회귀모형과 유사하지만 종속변수가 연속형 변수(continuous variable)가 아니라 특정 사건의 발생 여부를 나타내는 이산형 변수(dichotomous variable)라는 점이 특징임.
 예를 들어, 대기오염에 따른 건강영향일 경우 종속변수를 사망 발생 여부, 독립변수로 대기오염농도를 설정할 수 있음.

- 로지스틱 회귀모형에서 건강위험 측정지표는 사망이 발생할 확률(p) 대비 사망이 발생하지 않을 확률($1-p$)의 비로 정의되는 오즈(odds, $1/(1-p)$)로 표현됨.

대기오염 영향의 크기는 각 대기오염농도 수준에서 오즈를 비교하여 농도변화량 당 오즈비로 나타냄.

대기오염 농도가 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 오즈비가 1.3이라고 한다면, 대기오염 농도 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가했을 때 사망에 대한 오즈가 대기오염농도가 증가하지 않았을 때의 오즈에 비해 1.3배 높다고 설명할 수 있음.

- 우리가 직관적으로 받아들이는 것은 사건의 발생확률(p)로 표현되는 위험도(risk)이지만, 오즈는 항상 p 보다 크기 때문에 로지스틱회귀모형을 이용하여 대기오염 영향을 오즈비로 나타낼 때는 대기오염영향이 실제보다 크다고 해석하지 않도록 주의하여야 함.

$$risk = p > odds = \frac{p}{1-p}$$

$$relative \quad risk(RR) = \frac{p}{p'} > oddsratio(OR) = \frac{\frac{p}{1-p}}{\frac{p'}{1-p'}}$$

- 코호트 연구는 생존분석기법 중 하나인 콕스비례위험모형(Cox proportional hazard model)으로 분석하며, 사망 발생 여부만 보는 것이 아니라 사망까지의 생존기간을 종속변수로 함께 고려한다는 점에서 장기영향을 보는데 적합함.

코호트 연구에서 대기오염 농도는 전체 생존기간 동안의 평균 농도, 고정된 특정 기간의 평균 농도, 사망 발생 몇 년 전 평균 농도 등으로 정의될 수 있으며 장기간 동안 평균 농도 수준이 변수로 반영됨에 따라 장기영향을 고려할 수 있음.

[표 3.2] 연구방법별 통계모델 비교

연구방법	통계모델 (예)	종속변수		필요 데이터(예)	특징
		구분	예		
시계열 연구	로그 선형 회귀	연속형	사망자수 또는 사망률	<ul style="list-style-type: none"> · 인구집단 내 일별 사망률(종속변수) · 인구집단이 노출된 일별 PM_{2.5}농도 · 인구집단의 분석기간 · 기타영향요인 	<ul style="list-style-type: none"> · 빈도, 비율 분석에 적합 · 상대위험도 산출 가능 · 단기 영향 평가에 적합
환자-대조군 연구	로지스틱 회귀	이산형	사망 여부	<ul style="list-style-type: none"> · 개인별 사망/생존 여부(종속변수) · 개인별 분석기간 평균 PM_{2.5}농도 · 개인별 분석기간 기타 영향요인 	<ul style="list-style-type: none"> · 장기/단기영향평가에 적합 · 위험요인의 효과를 과대 해석할 가능성 · 생존기간 미고려
코호트 연구	콕스비례위험모형	이산형	사망 여부, 생존시간	<ul style="list-style-type: none"> · 개인별 사망/생존 여부 · 개인별 분석기간 평균 PM_{2.5}농도 · 개인별 분석기간 기타 영향요인 · 개인별 사망시점/생존년수 	<ul style="list-style-type: none"> · 장기 영향 평가에 적합 · 상대위험도에 근사한 위험비 산출 가능

- 대기오염노출 영향을 분석하는 본 연구의 특성 상 무작위 대조군을 수행할 수 없으며, 전향적 코호트연구를 수행하는 것은 본 연구의 범위를 벗어남.
- 따라서 본 연구에서는 데이터 가용성과 연구목적에 고려하여 여러 역학연구 방법 중 인과관계 설명에 가장 효과적인 후향적 코호트 연구 방법을 사용할 예정이다.
앞서 제2장 보건의료데이터 분석을 통해 조사한 사망원인통계 및 건강보험 데이터를 기반으로 과거 대기오염 농도 데이터를 노출지표로 활용하여 후향적 코호트연구를 수행할 수 있음.

- 코호트 연구 방법을 통해 대기오염의 장기노출 영향을 포착할 수 있음에 따라 대기 오염으로 인한 영향을 설명하는데 효과적임.
Künzli et al. (2001)은 대기오염의 장기노출에 대한 영향분석을 통해 설명되는 영향의 크기가 단기노출에 대한 영향크기보다 5-10배가량 크다고 언급함.
- 이와 더불어, 장기영향만으로 포착하기 어려운 대기오염 단기 노출에 따른 급성영향을 함께 비교하기 위해 단기영향연구에 효과적인 시계열 연구를 보조적으로 수행하고자 함.
- 시계열 연구 방법은 본 연구의 1, 2차년도 연구 보고서(각각 573쪽, 522쪽)에서 다루었음에 따라 당해년도 보고서에서는 생략하였으며, 대신 장기영향 분석에 사용되는 코호트 연구 방법론을 세부적으로 살펴보았음.

3. 코호트 연구

3.1. 코호트 데이터

- 코호트 연구는 원인과 결과에 대한 시간적 선후관계를 가정하고 영향을 분석하기 때문에 인과관계를 평가하는데 효과적임.
- 일반적으로 코호트 연구를 통해 수집된 코호트 데이터는 크기가 매우 크기 때문에 사건 발생과 위험 요인 간의 연관성에 대해 일반적이고 신뢰할 수 있는 결론을 내릴 수 있음.
- 코호트 연구는 전향적(prospective) 코호트 연구, 후향적(retrospective) 코호트 연구, 그리고 양방향(ambidirectional) 코호트 연구로 나누어짐.
- 전향적 코호트 연구는 사전에 연구를 계획하여 연구 참여자를 모집하고 시간이 지남에 따라 연구참여자의 사건의 발생 여부를 추적조사하는 연구로써, 결과 데이터는 미래 시점에서 얻어짐.
전향적 코호트 연구는 데이터의 질과 양을 통제할 수 있다는 장점이 있으나, 연구를 시작하고 장기간에 걸쳐 많은 연구 참여자의 데이터를 수집하는 것이기 때문에 시간이 오

래 걸리고 비용이 많이 들며, 연구 참여자가 중도 탈락하는 경우가 발생함

전향적 코호트 연구의 예로 미국의 Nurses' Health Study가 있으며, 미국 11개 주에 등록된 간호사를 대상으로 경구피임약과 유방암의 관계를 추정하기 위한 목적으로 1976년 121,700명의 코호트가 구축되었으며, 2년마다 사건 발생 또는 위험 요인 노출 변화 등을 반복적으로 조사하였음

전향적 코호트 연구는 사건 발생과 위험요소 간의 인과관계 추론에 가장 적합한 방법으로 알려져 있으나, 연구 결과를 얻기까지 긴 시간 동안 연구 참여자를 추적해야 하고, 이 과정에서 상당한 비용이 소요됨.

- 후향적 코호트 연구는 이미 구축되어있는 과거 자료를 이용하는 방식으로, 연구를 진행하는 현재 시점에서 이미 확보된 추적 조사결과를 활용하는 것임.

연구 설계 단계에서 연구 참여자를 모집하여 추적하는 것이 아니라, 이미 구축되어있는 과거 자료를 이용함에 따라 데이터의 양과 질을 통제하지 못한다는 단점이 있음.

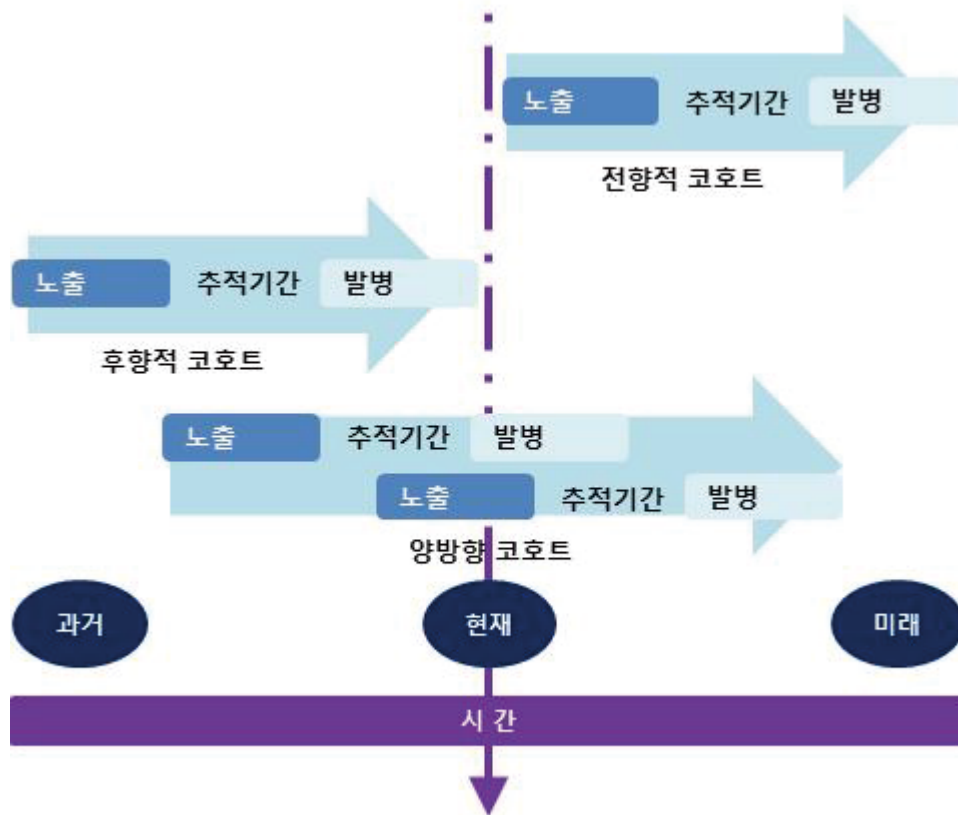
반면, 전향적 코호트에 비해 낮은 비용으로 분석을 수행할 수 있다는 점이 장점으로 꼽힘.

- 양방향 코호트 연구는 전향적 단계와 후향적 단계를 모두 포함하며, 위험 요인의 단기 노출로 발생하는 사건과 장기 노출로 발생하는 사건이 모두 존재할 때 유용함.

양방향 코호트 연구의 예로 Air Force Health Study가 있으며, 1979년 미 공군이 베트남 전쟁 중 살포된 화학 물질에 노출되었을 때 건강에 미치는 영향을 평가하기 위한 목적으로 베트남에서 화학 물질에 노출된 조종사 1,098명과 같은 기간 동남아 화물선을 탄 남성 1,549명을 모집하여 코호트를 구축하였음.

화학 약품 노출로 인한 것으로 의심되는 문제 중 일부(피부 발진 등)는 노출 직후 발생했을 것이고, 일부(불임, 암 등)는 노출 후 일정 시간이 지난 후에 발생할 것임.

따라서 단기 노출로 인해 이미 발생한 사건은 후향적 단계를 통해, 장기 노출로 인해 발생할 것으로 예상되는 사건은 전향적 단계를 통해 평가됨.



[그림 3.8] 코호트 연구 방법의 종류

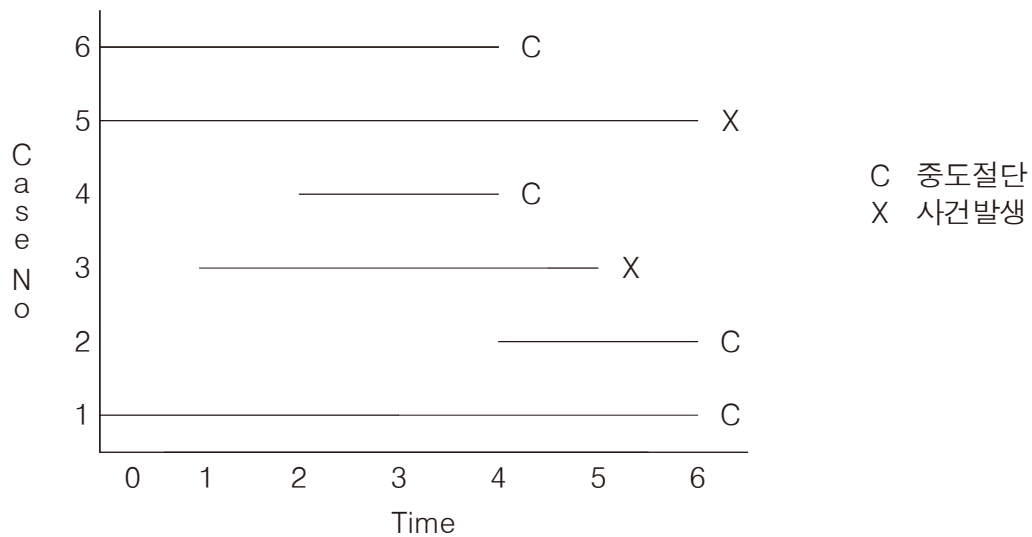
- 또한, 코호트는 연구 시작 이후 연구 참여자의 추가 여부에 따라 개방(open 또는 dynamic) 코호트, 폐쇄(closed) 코호트, 그리고 고정(fixed) 코호트로 구분할 수 있음
- 개방 코호트는 연구기간 동안 연구 참여자가 추가되거나 탈락될 수 있음
- 폐쇄 코호트는 연구 시작 시점에서 고정된 연구 참여자만을 추적하며, 추적기간 동안 관심 있는 특정 사건 외에 다른 요인으로 인한 탈락이 발생하지 않음. 또한 위험 요인에 대한 노출은 초기에 결정되고 변화하지 않는다고 가정함
- 고정 코호트는 폐쇄 코호트와 유사하게 연구 시작 시점에서 고정된 연구 참여자만을 추적하고 위험 요인의 노출이 변화하지 않는다고 가정하지만, 다른 요인으로 인한 탈락을 허용하기 때문에 폐쇄 코호트에 비해 융통성이 있음

- NHIS는 약 5천만명의 전 국민을 대상으로 출생에서 사망까지 건강보험 자격 및 보험료 자료, 질병 기록 등 2002년부터 축적된 빅데이터를 활용하여 코호트 데이터를 구축하였음
- 본 연구는 연구 시작 시점에서 연구 참여자를 모집하여 추적하는 전향적 코호트 연구가 아닌, NHIS-NHID에서 제공하는 코호트 데이터를 활용한 후향적 코호트 연구이며, 연구기간 도중 참여자의 추가는 허용하지 않고 지역 이동, 사망 등으로 인한 탈락은 허용하는 고정 코호트 연구를 수행함

3.2. 분석 모델

3.2.1. 생존분석

- 생존분석은 불완전한 자료를 제외하지 않고 분석에 포함시키기 위해 고안된 연구 방법론임
- ① 연구기간 동안 모든 참여자에게 관심 사건이 발생하는 것은 아니며, ② 연구 중 참여자의 이탈(관심 사건 외 사망, 거주지역 이동 등)이 일어날 수 있고, ③ 관찰기간이 동일하지 않을 수 있음
- 기존의 통계모형과 달리 생존분석의 가장 큰 특징은 ① 생존기간(Time to event)을 고려한다는 것과 ② 중도절단(Censoring) 자료를 포함할 수 있다는 것임



[그림 3.9] 중도절단자료 모식도

일반적으로 연구기간 동안 불완전한 자료는 결측값으로 처리되지만, 생존분석에서는 ‘관찰된 기간에 관심 사건이 발생하지 않았다’는 것에 초점을 맞춰 분석에 포함함

그러나 본 연구에서 사용하는 후향적 고정 코호트 연구는 연구기간 도중 새로운 연구 참여자의 유입을 허용하지 않기 때문에 좌측 중도절단(right censoring) 자료를 포함하고 있지는 않음

- 생존분석 방법은 모수적 방법과 비모수적 방법이 있으며, 건강 데이터의 특성 상 모수적 생존분석의 가정을 만족시키지 못하는 경우가 많으므로 비모수적 또는 준모수적 방법이 주로 사용됨

대표적인 모수적 생존분석 방법으로는 Weibull model, exponential model, log-logistic model, lognormal model, generalized gamma model 등이 있음

대표적인 비모수적 생존분석 방법에는 Kaplan-Meier 곡선, 생존표법(Life tables) 등이 있음

대표적인 준모수적 생존분석 방법으로는 콕스비례위험모형이 있음

3.2.2. 생존함수와 위험함수

① 생존함수(Survival Function)

- 생존함수(Survival Function)는 특정 시점 t 까지 사건이 발생하지 않을 확률을 의미하며, 다음과 같이 표현됨

$$S(t) = \Pr(T \geq t) \quad (1)$$

T : 개인의 생존시간, t : 특정시점

- 누적분포함수(Cumulative Distribution Function)는 생존함수와 반대되는 개념으로, 특정 시점 t 까지 사건이 발생했을 확률을 의미하며, 다음과 같이 표현됨

$$F(t) = \Pr(T < t) = 1 - S(t) \quad (2)$$

- 확률밀도함수(Probability Density Function)는 특정 시점 t 에서 사건이 발생할 확률을 의미하며, 다음과 같이 표현됨

$$f(t) = F'(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \Pr(t \leq T < t + \Delta t) \quad (3)$$

② 위험함수(Hazard Function)

- 위험함수는 특정 시점 t 까지 사건이 발생하지 않고, 바로 직후에 사건이 발생할 조건부 확률로 정의되며, 다음과 같이 표현할 수 있음

$$h(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t \leq T < t + \Delta t \mid T \geq t)}{\Delta t} \quad (4)$$

식 (4)는 조건부 확률 공식, $\Pr(B \mid A) = \frac{\Pr(A \cap B)}{\Pr(A)}$,에 의해 다음과 같이 정리할 수 있음

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Pr(t \leq T < t + \Delta t)}{\Delta t \cdot \Pr(T > t)} = \frac{f(t)}{S(t)} \quad (5)$$

③ 콕스비례위험모형 (COXPH)

- COXPH는 생존분석 중 대표적인 준모수적 방법론으로, 종속변수의 분포를 특정 형태로 가정하지 않으나, 참여자의 다양한 속성이 관심 사건 발생에 미치는 영향을 분석할 수 있음
- COXPH의 기본가정은 다음과 같음
- ① 생존함수가 지수함수를 따르며, ② 위험비(hazard ratio)가 연구기간 동안 일정해야 함

$$\text{Hazardratio} = \frac{h_2(t)}{h_1(t)} \quad (6)$$

$h_i(t)$: t 시점에서 참여자(또는 그룹) i 의 위험함수

일반적으로 시간에 따른 그룹별 위험비 그래프를 그리거나 Schoenfeld 잔차기반 비례위험가정 검정을 통해 가정 ②를 확인함

만약 가정 ②를 만족하지 않을 경우, Basic COXPH가 아닌 extended COXPH (Stratified, time-dependent 등)⁴⁰⁾

- COXPH의 기본가정을 만족할 때 사용하는 Basic COXPH는 위험함수를 다음과 같이 정의함

$$h(t | X_i) = h_0(t) \exp(\beta X_i) \quad (7)$$

$h_0(t)$: 특정 시점 t 의 기저위험함수, X_i : 참여자 i 의 시간불변 변수의 벡터

Basic COXPH의 변수와 계수에는 시간 t 가 존재하지 않음

즉, Basic COXPH 모델은 변수가 생존에 영향을 주기는 하지만, 그 영향은 시간과 관계없다고 가정함

40) 더이상 위험비가 일정하다는 가정을 따르지 않기 때문에 이론적으로는 proportional-hazard가 아니지만, 통상적으로 extended COXPH라고 칭함.

예를 들어, 흡연자는 비흡연자보다 심혈관계 질환 발병 위험이 높지만, 흡연을 막 시작한 사람과 30년 넘게 피운 사람이 동일하게 위험하다고 가정함

식 (7)에 따르면 우리가 관심 있는 두 그룹의 위험비(rate of hazard ratio, HR)는 시간과 기저위험함수($h_0(t)$)와 독립적임

$$HR = \frac{h(t | X_2)}{h(t | X_1)} = \frac{h_0(t)\exp(\beta X_2)}{h_0(t)\exp(\beta X_1)} = \exp[(X_2 - X_1) \cdot \beta] \quad (8)$$

만약 일부 변수가 시간에 따라 변화하여 COXPH의 가정 ②를 만족하지 않을 경우, extended COXPH model을 활용해야 함

- extended COXPH는 시간가변 변수(time-dependent covariates)를 사용하는 방법과 집단을 계층화(stratified)하는 방법이 있음

시간가변 변수는 어떤 변수의 특성이 시간에 따라 변할 때 사용하는 방법으로, 예를 들어 특정 시점을 기준으로 연구 참여자가 고혈압(터미변수)이 발생했다면, 그 시점을 기준으로 그전까지는 고혈압을 0(미해당)으로, 그 후에는 고혈압을 1(해당)로 모델에 반영해 줌

시간가변 변수를 사용한 extended COXPH의 위험함수는 다음과 같이 정의됨

$$h(t | X_i) = h_0(t)\exp\left\{\sum\beta X_i + \sum\beta' X_i(t)\right\} \quad (9)$$

$X_i(t)$: 참여자 i 의 시간가변 변수의 벡터

시간가변 변수를 활용한 extended COXPH의 위험비는 식 (10)과 같음

$$HR = \frac{h(t | X_2)}{h(t | X_1)} = \frac{h_0(t)\exp\left\{\sum\beta X_2 + \sum\beta' X_2(t)\right\}}{h_0(t)\exp\left\{\sum\beta X_1 + \sum\beta' X_1(t)\right\}} = \frac{\exp\left\{\sum\beta X_2 + \sum\beta' X_2(t)\right\}}{\exp\left\{\sum\beta X_1 + \sum\beta' X_1(t)\right\}} \quad (10)$$

○ HR의 해석

HR은 실험군과 대조군의 위험비의 비율을 의미하며, 연속변수인 경우 단위 증가 시 관심 사건 발생 확률의 변화를 의미함

HR이 1보다 크다면, 대조군에 비해 실험군에서 관심 사건이 발생할 확률이 높음 (예를 들어, HR이 1.5라면 ‘실험군에서 관심 사건이 발생할 확률이 대조군에 비해 1.5배 증가한다’ 는 것을 의미하며, ‘관심 사건이 발생할 확률이 50% 증가한다’ 고 표현할 수 있음)

HR이 1이라면, 실험군과 대조군에서 관심 사건이 발생할 확률은 동일함

HR이 1보다 작다면, 대조군에 비해 실험군에서 관심 사건이 발생할 확률이 낮음 (예를 들어, HR이 0.8이라면 ‘실험군에서 관심 사건이 발생할 확률이 대조군에 비해 0.8배 감소한다’ 는 것을 의미하며, ‘관심 사건이 발생할 확률이 20% 감소한다’ 고 표현할 수 있음)

4. 선행사례

4.1. 개요

- 석탄화력발전 피해비용 추정결과의 타당성을 주장하기 위해서는 석탄화력발전 대기 오염 농도 기여도와 농도반응함수 그리고 비용평가의 기본 가정이 합리적이어야 함.
- 농도반응함수의 적합성은 농도반응함수 도출에 사용된 데이터의 정확성, 분석모형의 타당성에 의존함.
- 앞서 데이터 및 연구 방법 조사를 통해 본 연구에 사용될 주요 농도반응함수 도출 방법으로 사망원인통계 및 건강보험데이터를 이용한 코호트 연구를 설정함.
코호트 연구로 대기오염의 장기영향을 분석하고 보조적으로 단기영향 분석을 위한 시계열 연구를 병용할 예정이나 시계열 연구는 2차년도에 다루었으므로 본 보고서에서 생략함.
- 실제로 코호트연구를 수행하기 위해서는 대기오염 농도 외에 건강위험에 영향을 미칠 수 있는 교란변수(confounder)의 영향을 제거하여야 하며, 이를 위해서는 건강위험에 따라 적절한 교란변수를 설정하여 통계모델에 반영하여야 함.
예를 들어 뇌졸중 발생 여부에 영향을 미치는 교란변수로 혈압, 당뇨 여부 등을 고려할 수 있고, 만성폐쇄성 폐 질환 발생 여부에 영향을 미치는 교란변수로 천식 유무를 고려할 수 있음.
- 교란변수는 임상의학 분야 전문가 자문을 통해 설정되는 것도 의미있지만 농도반응함수 연구결과의 대표성을 뒷받침하기 위해서 다수의 선행연구에서 가장 보편적으로 고려된 변수를 반영하는 것이 더욱 효과적임.
- 대기오염의 장기간 농도를 독립변수로 반영하기 위해서는 대기오염노출기간을 어느 정도로 길게 설정할 것인지, 어떤 시점으로 설정할 것인지 등에 대한 정의가 필요함.
- 통계모형의 분석결과가 모형을 이루는 개별 요소의 변화에 크게 흔들리지 않고 일관된 결과를 보여주는 경우 해당 모형은 강건(robust)하다고 평가되며 충분히 타당하고 합리적으로 피해비용을 도출할 것이라 기대할 수 있음.

- 분석결과의 신뢰성을 입증하기 위해 여러 방식의 민감도 분석을 수행할 수 있으며 민감도 분석을 수행한 선행연구 조사를 통해 본 연구에 적용할 적절한 방법을 탐색할 수 있음.
- 이에 따라 본 절에서는 교란변수, 노출정의 방식, 민감도 분석 방식 등을 조사하여 본 연구 분석 모델을 수립하는 것을 목표로, 대기오염과 건강위험 간의 관계를 농도반응함수로 도출한 국내외 선행연구사례를 검토하였음.
선행연구 사례는 장기영향 분석 연구문헌에 집중하여 조사하였으며, 연구사례가 풍부한 PM_{2.5} 농도반응함수 사례가 다수를 차지함.
PM_{2.5}가 야기할 수 있는 건강위험으로 당뇨, 뇌혈관질환 등 여러 질병들이 존재할 수 있으나, 연구사례가 풍부한 호흡기계질환, 심혈관질환, 폐암을 중심으로 조사하였음.
- 마지막으로 5차년도에 도출할 농도반응함수가 대기오염의 영향크기를 합리적인 범위(scale)로 추정하고 있는지 판단하기 위해 선행연구의 영향크기와 비교할 수 있으며 이를 위해 선행연구의 방법론 뿐만 아니라 연구 결과도 함께 수집하였음.

4.2. 국내 대상 연구

4.2.1. 주요결과 요약

- 국내 대상 대기오염 장기노출에 따른 건강영향 연구사례를 폭넓게 수집하기 위해 의학전문 저널인 PubMed⁴¹⁾와 구글 스칼라를 통해 문헌을 조사하였음.
- 대기오염의 사망 영향 연구는 기존에 특정 질환을 보유하고 있던 인구가 대기오염 노출로 인해 사망할 확률이 어떻게 변하는지, 대기오염 노출에 따라 특정 질환으로 사망할 확률이 어떻게 변하는지, 또는 사고나 자살 등 외부적 요인 외에 모든 원인으로 인해 사망할 확률이 어떻게 변하는지 등을 분석함.

41) PubMed는 생명과학 및 생물의학, 건강심리학 등 보건 및 복지 관련 분야의 학술문헌에 대한 초록 검색을 지원하는 무료 데이터 베이스로 3300만건 이상의 생물 및 의학학 문헌정보를 수록하고 있음.

- 조사결과 대기오염 장기 노출이 사망에 미치는 영향을 분석한 최근 연구사례로는 Kim et al. (2017a), Kim et al. (2017b), Kim et al. (2020), Lee et al. (2020), Kim et al. (2021) 등이 있음.
- 사망이 아닌 신규 질병 발생에 영향을 미치거나, 특정 질병의 악화로 인한 병원 또는 응급실 방문에 영향을 미치는 정도를 분석한 선행연구도 존재하였으며, 이를 사망 영향과 구분하여 질병 영향으로 분류하였음.
- 선행연구를 통해 신장질환(Jung et al. 2021), 우울증(Kim et al. 2016) 등 여러 다양한 질병에 대한 영향이 분석되었으나, 호흡기계 질환(만성폐쇄성 폐질환, 천식 등), 심혈관계 질환(뇌졸중, 허혈성 심장질환 등)에 대한 영향을 분석한 사례가 가장 많은 것으로 나타남.
- 특히 질병 영향의 경우 장기영향 연구에 활용할 수 있는 양질의 코호트 데이터인 건강보험 데이터가 2014년에 공개됨에 따라 과거 연구사례는 단기영향 연구가 중심이 되거나, 특정 질병에 국한하는 등 그 수가 제한적임.
- 본 연구를 통해 조사된 국내 대상 사망 및 질병 영향 분석 사례와 결과는 하단 표에 제시하였으며, 이 중 일부 주요 연구에 대하여 연구 방법과 분석모형, 연구의 시간적, 공간적 범위, 연구 결과를 다음 절에 요약하였음.
- 하나의 연구에서 여러 분석을 수행한 경우 저자가 강조하는 대표 결과만을 수록하였으며, 대기오염과 건강영향 간의 관계는 대기오염농도변화량 당 위험도비(Hazard ratio)로 제시하였음.
 $PM_{2.5}$ 농도 $10\mu g/m^3$ 증가 당 사망의 HR이 1.03이면, 대기오염 농도 $PM_{2.5}$ 농도 $10\mu g/m^3$ 증가 시 마다 사망확률이 3% 증가한다고 해석할 수 있으며, $PM_{2.5}$ 농도 $10\mu g/m^3$ 증가 당 사망의 HR이 1.014이면, 대기오염 농도 $PM_{2.5}$ 농도 $10\mu g/m^3$ 증가 시 마다 사망확률이 1.4% 증가한다고 해석할 수 있음.

[표 3.3] 국내 대상 장기영향 농도반응함수 연구사례

연구자 (연도)	건강 영향	대상 인구	세부질병	오염 물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가량)]
Kim et al. (2017a)	사망/ 질병	18세 이상	전체사망/심혈 관 질환 관련 사망	PM _{2.5} / PM ₁₀ / CO/SO ₂ / NO ₂ / O ₃	2007년- 발병/사망/ 연구 종료	COXPH	사망 1.32 (PM _{2.5} 1μ g/m ³ 증가 당)
Kim et al. (2020a)	사망	18세 이상	전체사망/심혈 관 질환 관련 사망	PM _{2.5}	2009년- 발병/사망/ 연구 종료	COXPH	전체 사망 1.034 (PM _{2.5} 10μ g/m ³ 증가 당)
Lee et al. (2020)	사망	40세 이상 COPD 환자	호흡기 질환 관련 사망	PM ₁₀	발병 직전 1개월/3개 월/6개월/1 년 평균	시간 가변 COXPH	전체 사망 1.011 (PM _{2.5} 10μ g/m ³ 증가 당)
Kim et al. (2021)	사망	18세 이상	전체사망/심혈 관 질환 관련 사망/호흡기 질환 관련 사망	PM ₁₀ / SO ₂ / NO ₂	발병 직전 6개월/1년/ 2년/3년평 균	시간 가변 COXPH	전체 사망 1.144 (PM _{2.5} 5.05μ g/m ³ 증가 당)
Kim et al. (2017b)	사망	18세 이상	전체사망/심혈 관질환 관련 사망/뇌혈관질 환 관련 사망/호흡기질 환 관련 사망/암 관련 사망/ 폐암관련 사망	PM ₁₀	2002년- 2006년	COXPH	전체 사망 1.05 (PM _{2.5} 5.05μ g/m ³ 증가 당)
Son et al. (2011)	사망	영아	전체사망/ 유아 돌연사 증후군/ 호흡기 질환 관련 사망	TSP, PM ₁₀ , PM _{10-2.5} PM _{2.5}	출생-연구 종료/ 전체임신 기간/ 임신 3분기	COXPH	전체 사망 1.53 (임신 중 PM _{2.5} 3.15μ g/m ³ 증가 당)

연구자 (연도)	건강 영향	대상 인구	세부질병	오염 물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가량)]
Kim et al. (2020b)	입원	—	IHD ⁴²⁾ /MI/심 부전증/ 뇌졸중/모든 CVD ⁴³⁾ 질환	PM _{2.5} / PM ₁₀	발병 직전 1년, 직전 3년, 직전 5년 평균/ '02- '06년 평균	시간 가변 COXPH	심혈관 발병 1.04 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Kim et al. (2019)	입원	18세 이상	심방세동	PM _{2.5} / PM ₁₀ / CO/SO ₂ / NO ₂ /O ₃	'09년-발 병/사망/연 구 종료	COXPH	심방세동 발병 1.179 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Han et al. (2020)	병원 방문	65세 이상	COPD ⁴⁴⁾	PM _{2.5}	60개월, 48개월 이동평균/ '08년, '08- '09년 평균	시간 가변 COXPH	COPD 병원 방문 1.09 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Lee et al. (2021)	병원 방문	65세 이상	천식	PM _{2.5}	4년 평균/ 5년 평균	시간 가변 COXPH	천식 병원방문 1.08 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Yang et al. (2021)	입원/ 외래	30세 이상	폐암	PM _{2.5} / PM ₁₀ / NO ₂	발병 직전 1년 직전 3년, 직전 5년 평균	시간 가변 COXPH	암 가족력 보유 시 폐암 발병 5.55 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Moon et al. (2020)	입원/ 외래	30세 이상	폐암	PM ₁₀ / NO ₂	2002- 2007	COXPH	PM10 농도 60.9 μ g/m ³ 미만 노출 인구 대비 PM10 농도 60.9 μ g/m ³ 이상 노출 시 폐암 위험 1.03

42) Ischemic Heart Disease 허혈성 심장질환

43) Cardiovascular Disease 심혈관질환

44) Chronic Obstruction Pulmonary Disease 만성폐쇄성 폐질환

4.2.2. 사망 영향

- Kim et al. (2017a)은 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 2007–2013년 서울에 거주하는 18세 이상 136,094명을 대상으로 노출기간 ('07년부터 발병/사망/연구 종료 시점) 동안의 $PM_{2.5}$ 노출과 사망 또는 유병률(모든 CVD 질환, 뇌졸중, 급성 심근경색(Acute myocardial infarction, AMI), 울혈성 심부전(Congestive heart failure, CHF) 간의 관계를 분석함.

2007년부터 2013년까지 심혈관질환 경력이 없는 인구를 대상으로 하였으며, 관찰기간 동안 대기오염 평균농도를 설명변수로 사용하였음.

나이, 성별, 사회경제적 지위, 기저질환 여부(고혈압, 당뇨병, 이상지질혈증, 만성신부전, 말기신질환, 허혈성 심장질환(Ischemic heart disease, IHD), 말초동맥질환, 만성폐쇄성 폐질환(Chronic obstructive pulmonary disease, COPD), 악성종양), BMI, 공복혈당, 총콜레스테롤, 헤모글로빈 수치를 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

$PM_{2.5}$ 외 $PM_{2.5-10}$, CO , SO_2 , NO_2 , O_3 를 고려하였음.

$PM_{2.5}$ 농도가 $1\mu g/m^3$ 증가할 때 CVD 질환으로 인한 사건이 발생할 확률은 32% (95%CI: 22%–43%) 증가함.

- Kim et al. (2020a)는 국민건강보험공단 표본코호트DB를 활용하여 '09– '13년 동안 최소한 한 번의 건강검진을 받은 경험이 있는 전국의 18세 이상 436,933명을 대상으로 노출기간 ('09년부터 발병/사망/연구 종료 시점) 동안의 $PM_{2.5}$, O_3 노출과 모든 사망 또는 심혈관계 질환으로 인한 사망 간의 관계를 분석함.

'09– '13년 동안 다른 지역으로 이동한 사람, 거주지, 흡연, 음주 변수에 결측치가 있을 경우 분석에서 제외함.

나이, 성별, BMI, 소득, 기저질환(고혈압, 당뇨, 이상지질혈증, 말초동맥질환, 심장질환, 뇌졸중, 심근경색), 혈청 추정 사구체 여과율, 흡연, 음주를 교란변수로 설정하였으며, 기상변수로 온도와 습도를 고려하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

2002–2008년 건강검진을 받기 전 심장질환, 고혈압, 당뇨, 뇌졸중, 심근경색, 말초동맥 질환, 또는 심방세동 질환을 진단받은 경험이 있을 경우 분석에서 제외함.

$PM_{2.5}$ 농도가 $10\mu g/m^3$ 증가할 때 사망할 확률은 3.4% (95%CI: 2.7–4.1%) 증가함.

- Lee et al. (2020)는 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 전국 40-89세의 COPD질환 보유자 291,518명을 대상으로 노출기간 (발병 직전 1년 직전 6개월, 직전 3개월, 직전 1개월 평균) 동안의 PM₁₀ 노출과 COPD 질환으로 인한 사망 간의 관계를 분석함.

크리깅(Kriging) 방법을 이용하여 2001-2015년 PM₁₀ 농도를 추정하여 활용함.

모든 COPD, 천식과 COPD가 동시에 기록된 ACO(asthma and COPD overlap), 그리고 COPD만 기록된 pure COPD를 분리하여 분석하였음.

나이, 성별, BMI, 소득, 흡연, Charlson Comorbidity Index를 교란변수로 설정하였음.

시간가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM₁₀ 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 모든 COPD 질환으로 사망할 확률은 1.1% (95%CI: -0.6-2.7%) 증가함.

- Kim et al. (2021)은 제4차-6차 국민건강영양조사에 등록된 7개 대도시에 거주하는 18세 이상 19,681명을 대상으로 노출기간 (발병 직전 3년 직전 2년, 직전 1년, 직전 6개월 평균) 동안의 PM₁₀ 노출과 모든 사망/심혈관계 질환으로 인한 사망/호흡기계 질환으로 인한 사망 간의 관계를 분석함.

나이, 성별, BMI, 교육 수준, 근로 상태, 혼인 유무, 흡연, 음주, 운동량, 공동체 결핍지수, 의료기관 접근성, NDVI⁴⁵⁾를 교란변수로 설정하였음.

시간가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM₁₀ 외 SO₂, NO₂를 고려하였음.

PM₁₀ 농도가 5.05 μ g/m³ 증가할 때 심혈관계 질환으로 사망할 확률은 2.4% (95%CI: -0.4-5.2%), 전체 원인(사고사 제외)으로 사망할 확률은 14.4%(95%CI: -0.4 - 31.4%) 증가하는 것으로 나타남.

- Kim et al. (2017b)은 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 전국의 18세 이상 275,337명을 대상으로 노출기간 ('02- '06년 평균) 동안의 PM₁₀ 노출과 사망 간의 관계를 분석함.

노출기간 동안의 지역 이동을 고려하여 5개의 시나리오를 설정하여 각각 분석하였음.

나이, 성별, BMI, 기저질환(고혈압, 당뇨, 심혈관계질환), 흡연, 음주, 운동량, 65세 이상 인구비율, 고학력자 비율, GRDP를 교란변수로 설정하였음.

45) normalized difference vegetation index

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM₁₀ 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 전체 사망 확률은 5% (95%CI: -1-11%) 증가함.

4.2.3. 질병 영향

④ 심혈관계

- Kim et al. (2020b)은 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 2007-2015년 간 국내에 거주하고, 2007년 기준 30-84세인 196,167명을 대상으로 노출기간 (발병 직전 1년, 직전 3년, 직전 5년 평균, '02- '06년 평균) 동안의 PM₁₀, PM_{2.5} 노출과 심혈관계 질환 유병률(IHD, MI, 심부전증, 뇌졸중, 모든 CVD⁴⁶⁾) 간의 관계를 분석함.

범용 크리깅(Universal kriging) 방법을 이용하여 개발된 모델을 통해 PM₁₀ 농도를 예측하고, PM_{2.5}와 PM₁₀ 비율을 적용하여 예측된 PM_{2.5} 농도(R²=0.79)를 활용함.

나이, 성별, 소득, 보험종류, 흡연, 음주, 운동량, BMI, 당뇨, 고지혈증, 고혈압을 교란변수로 설정하였음.

시간 가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 모든 CVD 질환으로 인한 입원이 발생할 확률은 4% (95%CI: 0%-9%) 증가함.

- Kim et al. (2019)는 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 2009-2013년 동안 최소한 한 번의 건강검진을 받은 경험이 있는 전국 18세 이상 432,587명을 대상으로 노출기간 ('09년부터 발병/사망/연구 종료 시점) 동안의 PM_{2.5} 노출과 심방세동 질환 발생률 간의 관계를 분석함.

나이, 성별, BMI, 사회경제적 지위, 흡연을 교란변수로 설정하였으며, 기상변수로 온도와 습도를 고려하였음.

추가로 수행한 민감도 분석에서는 심부전, 고혈압, 당뇨, 뇌졸중, 심근경색(Myocardial Infarction, MI), 말초혈관병(peripheral vascular disease), 알콜중독 소견이 있는 사람을 제외하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

46) Kim et al. (2020)에서 모든 CVD 질환이란, IHD, MI, 심부전증, 뇌졸중을 포함하는 것임.

PM_{2.5} 외 PM₁₀, SO₂, NO₂, CO, O₃ 를 고려하였음.

2002-2008년 심방세동 질환을 진단받은 경험이 있을 경우 분석에서 제외함.

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 심방세동 질환이 발생할 확률은 17.9% (95%CI: 17.6%-18.3%) 증가함.

- Son et al. (2011)은 2004-2007년 서울을 대상으로 통계청 출생 및 사망 데이터를 활용하여, PM₁₀, PM_{2.5}, PM_{10-2.5} TSP 노출과 영아 사망 간의 관계를 분석하였음.

동기간 출생한 신생아 359,459명 중 225명이 사망하였으며, 이 중 전체 사망, 호흡기 질환 관련 사망, 유아 돌연사 증후군(SIDS) 사망의 범주에 속하는 사망건에 대하여 대기 오염 노출과의 관계를 분석함.

대기오염 노출은 출생에서 사망(또는 생후 1년 연구 종료 시까지)까지의 평균 농도와 임신기간 전체 평균 농도, 임신 3분기 중 각 분기별(1분기, 2분기, 3분기) 평균농도를 각각 독립변수로 정의하여 상관관계를 도출함.

교란변수로 영아의 성별, 임신기간, 출생 계절, 산모 연령 및 교육 수준, 열 지수(heat index)를 고려하였음.

분석결과 임신기간 중 PM_{2.5} 농도 3.15 μ g/m³ 증가 당 영아의 총 사망률(모든 원인)이 53% 증가하는 것으로 통계적으로 유의미하게 나타남.

⑤ 호흡기계

- Han et al. (2020)은 국민건강보험공단 데이터를 이용하여 한국 7개 대도시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산)에 거주하고, 2008-2010년 COPD와 관련된 병원 방문 이력이 없는 65세 이상 687,940명을 대상으로 노출기간 (60개월, 48개월 이동평균/ 2008년 평균, 2008-2009년 평균) 동안의 PM_{2.5} 노출과 COPD 유병률 간의 관계를 분석함.

화학수송모델(chemical transport model)을 이용하여 district level의 일평균 PM_{2.5} 농도를 추정하여 활용함

나이, 성별, 수입, 지역별 고등교육 수준, 흡연자 비율, 월평균 수입, 표준화된 사망률을 교란변수로 설정하였음.

시간 가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 COPD로 인한 병원 방문이 발생할 확률은 9% (95%CI: 7%–11%) 증가함.

- Lee et al. (2021)은 7개 대도시(서울, 부산, 대구, 인천, 광주, 대전, 울산)를 대상으로 2008~2010년(3년)간 천식 내원이력이 없는 65세 이상 인구 122만645명에 대해 국민건강보험공단 건강보험데이터를 이용하여, 2011~2016년(6년) 간 천식 신규 발병 이력을 조사하였음.

천식 발병은 천식이 주상병이면서 2회 이상 방문한 이력이 있는 경우로 한정하였음.

2011~2016년(6년) 간 추적하여 이 중 54,522명이 신규로 천식이 발병하였으며, 콕스비례위험모델 분석결과 36개월 이동평균 PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 천식발생률이 8% (95%CI: 3%–12%)으로 확인하였음.

⑥ 폐암

- Yang et al. (2021)은 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 2005–2007년 30세 이상이고, 2007년 기준으로 심각한 장애가 없는 83,478명의 서울시민을 대상으로 노출기간 (발병 직전 1년, 직전 3년, 직전 5년 평균) 동안의 PM₁₀, PM_{2.5}, NO₂ 노출과 폐암 간의 관계를 분석함.

범용 크리깅(Universal kriging) 방법을 이용하여 개발된 모델을 통해 2001–2015년 PM₁₀, NO₂ 농도를 예측하고, PM_{2.5}와 PM₁₀ 비율을 적용하여 예측된 PM_{2.5} 농도 (R²=0.79)를 활용함.

나이, 성별, 보험료, 고용현황, 흡연, 음주, 운동량, 식습관, BMI, 비만, 고혈압, 당뇨, 이상지질혈증, 가족력(암, 고혈압, 당뇨), 의료기관 방문(medical use) 총 빈도를 교란변수로 설정하였음.

시간 가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

- Moon et al. (2020)은 국민건강보험공단 표본코호트DB에 등록된 2006–2007년 30세 이상이고, 2002–2006년 동안 (ICD-10) C 코드 또는 D 코드 질병 이력이 없는 전국의 인구를 대상으로 노출기간 (2002–2007년 평균) 동안의 PM₁₀, NO₂ 노출과 폐암 간의 관계를 분석함.

범용 크리깅(Universal kriging) 방법을 이용하여 개발된 모델을 통해 2001–2015년

PM₁₀, NO₂ 예측 농도값을 활용함

나이, 성별, 흡연, 음주, 운동량, BMI, COPD, 외부요인에 의한 폐질환, 간질성 폐질환을 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

현재 흡연 중인 남성 연구 참여자 중 PM₁₀ 노출농도가 60.9 μ g/m³ 이상인 참여자는 그 미만인 참여자에 비해 폐암으로 인해 병원에 방문이 발생할 확률이 3% (95%CI: -2%-8%) 증가함.

4.3. 국외 대상 연구

4.3.1. 주요결과 요약

- 국외 대상 연구는 연구대상 집단의 연령대, 대상 질병, 분석 기간 등이 다양하며, 연구문헌의 수가 많아 일반적인 분석모형의 경향을 확인할 수 있음.
- 다만, 동일한 질병을 분석한 연구라 하더라도 분석 지역, 분석 대상, 노출 기간, 분석에 포함한 교란변수 등에 따라 결과가 상이하고, 특히 미국, 유럽 등 서양은 인종적 차이가 분석에 포함되어 직접적인 비교는 어려움.
특히 교란변수의 경우 국가별 특성이 다른 만큼 국내와 적합하지 않은 교란변수를 고려하는 경우도 많아 공통적으로 사용되는 교란변수가 무엇인지 확인하기 위한 참고자료로서 활용하는 것이 적절함.
- 국외 대상 연구는 그 수가 매우 다양함에 따라, 선행연구를 조사함에 있어 향후 본 연구의 분석모형과 유사한 PM_{2.5} 대상 장기 연구를 다룬 최근 10여년 간의 연구사례로 범위를 설정하여 조사하였음.
- 연구모형 수립에 참고한 국외 대상 선행연구의 목록은 아래 표와 같으며, 다음 절에서 이 중 일부 주요 연구를 대상으로 연구내용 및 결과에 대한 요약을 기술하였음.
대기오염 농도반응함수는 95% 신뢰수준에서 위험도비(Hazard ratio, HR) 추정값으로 제시되며, 국내 대상 연구와 마찬가지로 하나의 연구에서 여러 농도반응함수를 제시하는 경우 저자가 강조하는 대표결과만을 표에 수록하였음.
위험도비가 1보다 클수록 대기오염이 건강에 미치는 영향이 크다는 것을 의미함.
선행연구 중 일부는 대기오염과 건강영향 간의 관계가 통계적으로 유의미하게 나타나지 않는 경우도 존재(예. Puett et al. 2011)하며, 이러한 연구는 대부분 95% 신뢰수준에서의 위험도비 추정값이 1이하(HR ≤ 1)로 나타남.
농도반응함수는 대기오염농도-건강 간 관계에 대한 통계적 경향성을 분석하므로, 대기오염이 건강에 영향을 미친다는 임상학적 증거가 충분⁴⁷⁾하더라도 통계모형과 분석 데이터의 한계 등으로 통계적으로 유의미한 수준의 영향관계를 입증하지 못할 수 있음.

47) 대기오염이 특정 질환에 영향을 미친다는 증거는 통계에 근거한 역학적 연구방법 뿐만 아니라, 인체실험, 독성학 등 여러 의학연구방법을 통해 입증되고 있음. 미국환경청(US EPA)은 대기오염-건강영향을 입증하기 위해 독성학, 인체 노출 연구 등 연구사례를 통해 수집된 증거를 분석하여 각 질환별 인과관계를 평가하였음. (EPA, 2019)

따라서 유의하지 않은 연구결과라 하더라도 분석모형 및 데이터의 한계 등을 참고하여 본 연구 분석 방향을 결정하는데 반영할 수 있음에 따라 선행연구 조사 목록에 함께 포함하였음.

[표 3.4] 국외 대상 장기영향 농도반응함수 연구사례

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Puett et al. (2011)	미국	사망/발병	전체사망/ 심혈관계 질환	PM _{2.5}	1989– 2002	COXPH	전체 사망 0.94 (PM _{2.5} 4 μ g/m ³ 증가 당)
Di et al. (2017)	미국	사망	전체사망	PM _{2.5} /O ₃	직전 1년	시간가변 COXPH	전체 사망 1.073 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Ward–Caviness et al. (2020)	미국	사망	전체사망	PM _{2.5}	심부전 진단 후 1년	COXPH	전체 사망 1.13 (PM _{2.5} 1 μ g/m ³ 증가 당)
Coleman et al. (2021)	미국	사망	전체사망	PM _{2.5}	암진단 후 연구종료까 지	COXPH	전체 사망 1.01 (PM ₁₀ 1 μ g/m ³ 증가 당)

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Pope III et al. (2019)	미국	사망	전체사망/ 심혈관 질환 사망/ 뇌혈관 질환 사망/ 만성 하기도 질환 사망/ 인플루엔자 사망/ 심혈관계 사망/암 등	PM _{2.5}	연구시작부 터 연구종료까 지	COXPH	전체 사망 1.12 (PM ₁₀ 1μ g/m ³ 증가 당)
Hanigan et al. (2019)	호주	사망	전체사망	PM _{2.5} / NO ₂	2007– 연구종료까 지	COXPH	전체 사망 1.05 (PM ₁₀ 1μ g/m ³ 증가 당)
Dirgawati et al. (2019)	호주	사망	전체사망	PM _{2.5} / NO ₂	1996– 1999/ 연구기간 평균/직전 1년	시간가변 COXPH	전체 사망 1.06 (PM _{2.5} 10μ g/m ³ 증가 당)
Li et al (2018)	중국	사망	전체사망	PM _{2.5}	직전 3년	시간가변 COXPH	전체 사망 1.08 (PM _{2.5} 10μ g/m ³ 증가 당)
Hart et al.(2015a)	미국	사망	전체사망	PM _{2.5}	직전 1년	시간가변 COXPH	전체 사망 1.13 (PM _{2.5} 10μ g/m ³ 증가 당)
Zhang (2021)	중국	사망	전체사망	PM _{2.5}	직전 2년/ 직전 3년	시간가변 COXPH	전체 사망 1.055 (PM _{2.5} 10μ g/m ³ 증가 당)

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Lepeule et al. (2012)	미국	사망	전체사망/ 심혈관 질환 사망/호흡 기 질환 사망	PM _{2.5}	직전 1년~5년	시간가변 COXPH	전체 사망 1.14 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Carey et al. (2013)	영국	사망	전체사망/ 심혈관 질환 사망/호흡 기 질환 사망/폐암 사망	PM ₁₀ / PM _{2.5} / NO ₂ / SO ₂ /O ₃	2002	COXPH	전체 사망 1.02 (PM _{2.5} 1.9 μ g/m ³ 증가 당)
Katanoda et al. (2011)	일본	사망	폐암/호흡 기계 질환	PM _{2.5} / PM ₁₀ /SO ₂ / NO ₂	1974– 1983	COXPH	폐암 사망 1.23 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Turner et al. (2011)	미국	사망	폐암	PM _{2.5}	1979– 1983/ 1999– 2000	COXPH	폐암 사망 1.19 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Tagliabue et al. (2016)	이탈리아	사망	유방암	PM _{2.5}	직전 3년 (연 단위)	COXPH	유방암 사망 1.72*
Gan et al. (2013)	캐나다	사망/입원	COPD	PM _{2.5} / NO ₂ /NO/ Black carbon	1994– 1998/ 1999– 2002	COXPH	COPD 입원 1.02 (PM _{2.5} 1.58 μ g/m ³ 증가 당)
Jung et al. (2019)	대만	발병	천식 (영유아)	PM _{2.5}	2004– 2014	COXPH	천식 발병 1.258 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Shine et al. (2021)	캐나다	발병	천식/ COPD	PM _{2.5}	직전 3년	시간가변 COXPH	COPD 발병 1.07 (PM _{2.5} 3.4 μ g/m ³ 증가 당)
To et al. (2020)	캐나다	발병	천식/알레 르기성 비염/습진 (소아 및 청소년)	PM _{2.5}	생후 3년	COXPH	천식 발병 0.88 (PM _{2.5} 3.2 μ g/m ³ 증가 당)
Buteau et al. (2020)	캐나다	발병	천식 (소아)	PM _{2.5}	2002- 연구종료	COXPH	천식 발병 1.1 (PM _{2.5} 0.13 μ g/m ³ 증가 당)
Lavigne et al. (2019)	캐나다	발병	천식 (소아)	PM _{2.5}	임산1분기/ 2분기/ 3분기/ 임신기간 전체/생후	COXPH	천식 발병 1.08 (PM _{2.5} 3.8 μ g/m ³ 증가 당)
Liu et al. (2021a)	스웨덴/ 덴마크	발병	천식	PM _{2.5}	1992- 2004	COXPH	천식 발병 1.17 (PM _{2.5} 5 μ g/m ³ 증가 당)
To et al. (2015)	캐나다	발병	COPD (천식 보유자)	PM _{2.5}	천식발병시 점- 연구종료	COXPH	COPD 발병 3.06 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Bo et al. (2021) ⁴⁸⁾	대만	발병	COPD	PM _{2.5}	직전 1년	시간가변 COXPH	COPD 발병 0.88 (PM _{2.5} 5 μ g/m ³ 감소 당)

48) 다른 연구의 경우 대기오염 농도 증가량 당 사망 또는 질병의 HR를 나타내므로 1과 같거나 작은 값일 경우 대기오염의 부정적 영향이 통계적으로 유의미하지 않게 나타난 것으로 해석할 수 있음. 그러나 Bo et al. (2021)은 대기오염 수준 개선에 따른 영향을 분석하는 것이므로 HR이 1보다 작을수록 대기오염 감소에 따른 건강위험이 유의미하게 감소한 것으로 해석함.

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Liu et al. (2021b)	덴마크	발병	천식	PM _{2.5}	직전 3년	시간가변 COXPH	천식 발병 1.29 (PM _{2.5} 6.33 μ g/m ³ 증가 당)
Guo et al. (2018)	대만	발병	COPD	PM _{2.5}	직전 2년	시간가변 COXPH	COPD 발병 1.08 (PM _{2.5} 5 μ g/m ³ 증가 당)
Yazdi et al. (2019)	미국	발병	COPD/ 폐렴	PM _{2.5}	2002– 연구종료	COXPH	COPD 발병 1.073 (PM _{2.5} 1 μ g/m ³ 증가 당)
Gandini et al. (2018)	이탈리아	발병	COPD/ 천식	PM _{2.5}	2001– 연구종료	COXPH	COPD 발병 0.9 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Cesaroni et al. (2014)	유럽	사망/입원	IHD	PM _{2.5} / PM ₁₀ / PM _{2.5-10} / PM _{2.5} 흡광도/ NO ₂ /NO _x	2008– 2011	COXPH	IHD 입원 1.13 (PM _{2.5} 5 μ g/m ³ 증가 당)
Liang et al. (2020)	중국	사망/입원	모든 CVD 질환/뇌졸 중/IHD/ AMI	PM _{2.5}	2000– 발병/사망/ 연구 종료	시간 가변 COXPH	심혈관 질환 발병 1.251 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Bai et al. (2019)	캐나다	입원/외래	CHF ⁴⁹⁾ / AMI ⁵⁰⁾	PM _{2.5} /NO ₂ / O ₃ /Ox	발병 직전 1년, 3년, 5년 평균	COXPH	CHF입원 1.05 (PM _{2.5} 3.5 μ g/m ³ 증가 당)
Hart et al. (2015b)	미국	입원	모든 CVD 질환/CHD/ 뇌졸중	PM _{2.5} / PM ₁₀ / PM _{2.5-10}	2000- 발병/사망/ 연구 종료	시간 가변 COXPH	당뇨 여성 CVD/CHD/ 뇌졸중 발생 위험 1.44 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Qiu et al. (2017)	홍콩	응급실 입원	뇌졸중	PM _{2.5}	1998- 2010	COXPH	뇌졸중 응급실 입원 1.18 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Raaschou- Nielsen et al. (2013)	유럽	발병	폐암	PM _{2.5} / PM _{2.5-10} / PM ₁₀ / NOx	2008- 2011	COXPH	폐암 발병 1.18 (PM _{2.5} 5 μ g/m ³ 증가 당)
Puett et al. (2014)	미국	발병	폐암	PM _{2.5} / PM _{2.5-10} / PM ₁₀	발병 직전 6년	시간가변 COXPH	폐암 발병 1.06 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Hart et al. (2015c)	네덜란드	발병	폐암	PM _{2.5} /N ₂ O /BS	1987- 1996	COXPH	폐암 발병 1.17 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)

49) Congestive heart failure 울혈성 심부전증

50) Acute myocardial infarction 급성심근경색

연구자 (연도)	국가	건강영향	세부질병	오염물질	노출기간	방법론	대표 결과 [HR(증가 량)]
Tomczaket al. (2016)	캐나다	발병	폐암	PM _{2.5}	1998– 2006	COXPH	폐암 발병 1.34 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Gharibvand et al. (2017)	미국/ 캐나다	발병	폐암	PM _{2.5} / O ₃	2000– 2001	COXPH	폐암 발병 1.43 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Li et al. (2020)	중국	발병	폐암	PM _{2.5}	직전1년/ 3년/5년	시간가변 COXPH	폐암 발병 1.49 (PM _{2.5} 10 μ g/m ³ 증가 당)
Hvidtfeldt et al. (2021)	유럽	발병	폐암	PM _{2.5} / NO ₂ /BC/ O ₃	1990– 연구종료	COXPH	폐암 발병 1.13 (PM _{2.5} 5 μ g/m ³ 증가 당)

* 해당 결과는 21.1 μ g/m³ 미만에 노출된 사람 대비 26.5 μ g/m³ 이상에 노출된 사람의 HR임

** 연구 참여자의 노출수준에 따라 log(kg)으로 평가됨

4.3.2. 사망 영향⁵¹⁾

○ Katanoda et al. (2011)은 일본 8개 지역에 거주하는 40대 이상 성인 63,520명을 대상으로 노출기간 (1974–1983년 평균) 동안의 PM_{2.5} 노출과 폐암으로 인한 사망 간의 관계를 추정하였음

일본 8개 지역에서 수행된 전향적 코호트 연구로, 센다이, 나고야, 오사카 지역을 노출 지역으로, 나머지 5개 지역을 비노출 지역으로 선정하여 10년 동안 추적하였음

성별, 나이, 흡연(직간접 흡연), 식습관, 가정 내 난방 종류(숯 또는 연탄)를 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

51) 공간적 범위, 출간 년도, 질병 등을 고려하여 앞절의 전체 연구 표 중 일부 연구만 발췌하여 세부 내용을 기술하였음.

PM_{2.5} 외 PM₁₀, SO₂, NO₂ 를 고려하였음

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 폐암으로 인해 사망할 확률은 23% (95%CI: 9%–38%) 증가함.

- Turner et al. (2011)은 1982년 미국 암학회(American Cancer Society)에 등록된 비흡연자 188,699명을 대상으로 노출기간 (1979–1983년/ 1999–2000년) 동안의 PM_{2.5} 노출과 폐암으로 인한 사망 간의 관계를 추정하였음

나이, 성별, 인종, 교육 수준, BMI, 기저질환(천식, 만성 기관지염, 폐기종), 혼인유무, 식습관, 간접흡연, 직업적 노출, 지역의 라돈 농도를 교란변수로 설정하였음.

시간 가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 모든 CVD 질환으로 인한 입원이 발생할 확률은 1.9% (95%CI: -0.3%–4.7%) 증가함.

- Tagliabue et al. (2016)은 이탈리아 바레세 지역의 50–69세 여성 2,021명을 대상으로 노출기간 (연 단위 직전 3년) 동안의 PM_{2.5} 노출과 유방암으로 인한 사망 간의 관계를 추정하였음

GEOS-Chem을 통해 추정된 지상 PM_{2.5} 농도를 각 연구 참여자의 거주지역에 따라 발병 직전 3년(연 단위) 동안의 연간 농도의 중앙값을 사용함

성별, 분화도(grade), 병기(stage), 발병 기간, 검진 참여를 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도를 4개의 범위로 나누어 적용했으며, 21.1 μ g/m³ 미만에 노출된 사람에 비해 26.5 μ g/m³ 이상 노출된 사람이 유방암에 걸릴 위험이 72%(95% CI: 8%–175%) 증가함

- Gan et al. (2013)은 연구기간동안 캐나다 밴쿠버에 거주하는 45–85세 성인 467,994명을 대상으로 노출기간 (1994–1998년, 1999–2002년) 동안의 PM_{2.5} 노출과 COPD로 인한 사망 또는 유병률간의 관계를 분석함

나이, 성별, 사회경제적 지위, 천식(J45–J46), 당뇨(E10–E14), CHD(I20–I25), 고혈압성 심장질환(I10–I13) 여부를 교란변수로 설정하였음

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 심방세동 질환으로 인한 사건이 발생할 확률은 2% (95%CI: -0.2%-7%) 증가함.

- Cesaroni et al. (2014)은 유럽 5개 국가(독일, 덴마크, 스웨덴, 이탈리아, 핀란드)의 11개 코호트 데이터를 이용하여 2008-2011년 동안의 PM₁₀, PM_{2.5} 노출과 IHD로 인한 사망 또는 유병률 간의 관계를 분석함.

11개의 코호트 데이터를 이용해 각각의 HR을 도출했으며, 이를 메타분석하여 하나의 단일값을 제시함.

성별, 나이, 혼인여부, 교육수준, 직업, 흡연, 사회경제적 수준을 교란변수로 설정하였음. 각각의 코호트 데이터가 보유하고 있는 정보에 따라 당뇨, 고혈압, 운동량, 음주, BMI 등을 추가로 고려하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

2000년 이전 CVD 진단을 받은 경우 제외함.

PM₁₀, PM_{2.5} 외 PM_{2.5-10}, PM_{2.5} 흡광도⁵²⁾, NO₂, NOx를 고려하였음.

PM_{2.5} 농도가 5 μ g/m³ 증가할 때 IHD로 인한 사건이 발생할 확률은 각각 13% (95%CI: -0.2-30%), 25.1% (95%CI: 22.0%-28.3%) 증가함.

- Liang et al. (2020)은 2000-2015년 중국 15개 지역에 거주하는 18세 이상 116,972명을 대상으로 노출기간 ('00년부터 발병/사망/연구 종료 시점) 동안의 PM_{2.5} 노출과 사망 또는 유병률(모든 CVD 질환, 뇌졸중, IHD, AMI) 간의 관계를 분석함.

머신러닝 기법을 이용하여 예측한 PM_{2.5} 농도를 활용함.

성별, 나이, 교육수준, 직업 관련 운동량, 흡연, 음주, BMI, 총 콜레스테롤, 고혈압, 당뇨, 거주지역, 도시화 수준을 교란변수로 설정하였음.

시간 가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

2000년 이전 CVD 진단을 받은 경우 제외함.

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 모든 CVD 질환으로 인한 사망, 진단이 발생할 확률은 각각 16.4% (95%CI: 11.7%-21.3%), 25.1% (95%CI: 22.0%-28.3%) 증가함.

52) PM_{2.5} 필터의 빛 흡수량에 따라 대기질 탄소의 양을 간접적으로 확인할 수 있는 지표로 사용됨

4.3.3. 질병 영향

⑦ 심혈관계

- Bai et al. (2019)은 2001–2015년 캐나다, 온타리오에 거주하는 35–85세를 대상으로 노출기간(발병 직전 1년, 3년, 5년 평균) 동안의 PM_{10} , $PM_{2.5}$ 노출과 심혈관계 질환 유병률(CHF, AMI) 간의 관계를 분석함.

GEOS-Chem (Global atmospheric chemistry transport model) 모델을 이용하여 예측된 $PM_{2.5}$ 농도를 활용함.

나이, 성별, 소득, 고등교육을 받지 않은 15세 이상 인구비율, 실업자 비율, 이민자 비율, 거주지역의 상태(인구밀도, 도심/지방, 불평등 정도 등), 건강보험 가입현황, 소수 민족 비율, 기저질환 여부(CHF: 당뇨, 고혈압, 부정맥, 관동맥성 심장병, COPD, 악성종양; AMI: 당뇨, 고혈압, 부정맥, CHF, COPD, 천식, 악성종양)를 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

$PM_{2.5}$ 외 NO_2 , O_3 , $Ox(NO_2 \text{ 와 } O_3 \text{ 의 redox-가중평균})$ 를 고려하였음.

2001년 4월 1일 (베이스라인) 이전 CHF, AMI 이력이 있을 경우 제외함.

$PM_{2.5}$ 농도가 $3.5\mu g/m^3$ 증가할 때 CHF, AMI 질환으로 인한 입원이 발생할 확률은 각각 5% (95%CI: 4%–5%), 5% (95%CI: 4%–6%) 증가함.

- Hart et al. (2015)은 미국 Nurses' Health Study에 등록되어 있고, 1988–2006년 미국에 거주하고 있는 여성을 대상으로 노출기간('00년부터 발병/사망/연구 종료 시점) 동안의 PM_{10} , $PM_{2.5-10}$, $PM_{2.5}$ 노출과 심혈관계 질환 유병률(모든 CVD 질환, CHD, 뇌졸중) 간의 관계를 분석함.

나이, 인종, 역년(calendar year), 계절, BMI, 폐경 여부, 호르몬제 사용여부, 고혈압, 이상지질혈증, 2종 당뇨, 심근경색 가족력, 흡연, 혼인, 직업, 교육, 수입을 교란변수로 설정하였음.

시간가변 Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시하였으며, 12개월, 24개월, 60개월, 120개월 단위로 각각 모델을 설계하였음.

1988년 이전 CVD 질환 이력이 있을 경우 제외함.

미국 전역을 대상으로 분석했기 때문에 지역(Northeast, Midwest, West, South)에 따

라 결과가 크게 차이이며, 가장 사건 빈도가 높은 Northeast의 경우 $PM_{2.5}$ 농도가 $10\mu g/m^3$ 증가할 때 모든 CVD 질환으로 인한 입원이 발생할 확률은 44% (95%CI: 12%–86%) 증가함.

- Qiu et al. (2017)은 1998–2010년 홍콩에 거주하는 65세 이상 66,820명을 대상으로 노출기간('98– '10년 평균) 동안의 $PM_{2.5}$ 노출과 뇌졸중으로 인한 첫 번째 응급실 입원(emergency hospitalization) 간의 관계를 분석함.

선형회귀를 이용하여 예측한 $PM_{2.5}$ 농도를 활용함.

나이, 성별, BMI, 운동, 교육수준, 수입, 고혈압, 심장질환, 당뇨, COPD, 천식, 뇌혈관 질환, 흡연, 음주, 약물사용, 거주지역 현황(노인비율, 고등교육 이수 비중, 고소득자 비중, 흡연자 비율)을 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시하였으며, $PM_{2.5}$ 를 1년 단위 시간 가변 변수로 두고 민감도 분석을 수행했음.

$PM_{2.5}$ 농도가 $10\mu g/m^3$ 증가할 때 뇌졸중 질환으로 인한 응급실 입원이 발생할 확률은 18% (95%CI: 7%–31%) 증가함.

⑧ 호흡기계

- Shin et al. (2019)은 2001–2015년 캐나다, 온타리오에 거주하는 35–85세를 대상으로 노출기간(발병 직전 1년 평균) 동안의 $PM_{2.5}$ 노출과 COPD, 천식 발병 간의 관계를 분석함.

나이, 성별, 소득, 도시/교외 거주 여부, 지역별 학력 수준, 지역별 이민자 비율, 지역별 소득 수준, 지역별 실업율, 분석연도, 동반질환 유무, 사회적 빈곤지수, 1차 의료진 밀도를 교란변수로 고려하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

$PM_{2.5}$ 농도가 $3.4\mu g/m^3$ 증가할 때 COPD로 인한 입원이 발생할 확률은 7% (95%CI: 6%–8%) 증가하였으며 천식에 대한 영향은 유의미하지 않게 나타남.

- Liu et al. (2021a)은 스웨덴, 덴마크에서 각각 1992–2004년 평균 $PM_{2.5}$ 농도로 인해 1992–2011, 1992–2015년 간 천식 발병 위험을 분석함.

나이, 성별, BMI, 직업 유무, 교육수준, 혼인 상태, 흡연 여부, 흡연 기간, 흡연량, 지역

별 가구소득 중간값을 교란변수로 반영하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 5 μ g/m³ 증가할 때 천식이 발생할 확률은 17% (95%CI: 6%–29%) 증가함.

- Bo et al. (2021)은 2001–2014년 대만 타이페이에 거주하는 인구를 대상으로 대기 오염농도개선에 따라 COPD발생 감소와 발병 직전 1년 평균 PM_{2.5} 농도 간의 관계를 분석함.

나이, 성별, BMI, 직업(먼지 또는 용매 등 화학제품 노출 직업군), 교육수준, 흡연, 신체 활동 수준, 음주량, 과일섭취량, 채소 섭취량, 계절, 과거 연구집단 등록 시점 평균 농도를 교란변수로 고려하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 5 μ g/m³ 감소할 때 COPD 발생위험이 12% (95% CI: 7%–17%) 감소한 것으로 나타남.

⑨ 폐암

- Hart et al. (2015)는 네덜란드의 55–69세 고령층 120,852 명을 대상으로 노출기간 (1987–1996년) 동안의 PM_{2.5} 노출과 폐암 발병과의 관계를 추정

네덜란드 204개 지방자치단체에 거주자 중 피부암 이외 암 병력이 없는 인원을 대상으로 연구를 수행

PM_{2.5} 농도는 국가 대기질 모니터링 네트워크(National Air quality Monitoring Network)의 ID, 토지사용회귀모델 (Land-use regression)를 사용 농도 추정, 1986년 주소 기반으로 평균 농도 적용

나이, 성별, BMI, 흡연 상태, 간접흡연, 교육 수준, 직업, 음주여부, 식습관(과일, 야채, 생선, 조개 섭취)을 교란변수로 설정하였음

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함

PM_{2.5} 농도가 10 μ g/m³ 증가할 때 폐암 발병 확률은 17% (95%CI: –7% – 47%) 증가함

- Tomczak et al. (2016)은 캐나다 국가 유방 검진 연구(Canadian National

Breast Screening Study)에 등록된 40-59세 여성 89,234명을 대상으로 노출기간 (1998-2006년) 동안의 $PM_{2.5}$ 노출과 폐암 발병과의 관계를 추정

캐나다 6개 주 에서 모집된 인원 중 폐암 병력이 없는 인원을 대상으로 전향적 코호트 연구를 수행

$PM_{2.5}$ 농도는 1998-2006년 위성기반 지표 농도를 사용하였고, 1980-1985년 주소 기반으로 평균 농도 적용

나이, BMI, 피하지방 두께, 흡연, 출생지, 교육 수준, 혼인여부, 직업을 교란변수로 설정하였음

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

$PM_{2.5}$ 농도가 $10\mu g/m^3$ 증가할 때 폐암 발병 확률은 34% (95%CI: 10%-65%) 증가함.

- Gharibvand et al. (2017)은 미국 50개 주, 캐나다 5개 주 80,285명의 비흡연자를 대상으로 노출기간 (2000-2001년) 동안의 $PM_{2.5}$ 노출과 폐암 발병과의 관계를 추정함.

미국 50개 주, 캐나다 5개 주에서 Adventist Health and Smog Study-2 (AHSMOG-2)의 일환으로 비흡연자들에 대한 코호트 연구를 수행, 노출 후 평균 7.5년 간 추적함.

$PM_{2.5}$ 와 O_3 를 고려하였음.

$PM_{2.5}$ 농도는 미국 환경보호청의 대기질 시스템을 통해 획득하였고, ArcGIS 활용하여 연구시작 직전 2년 동안의 월별 평균 노출을 추정함.

나이, 성별, 흡연 여부, 인종, 교육수준, 금연 기간, 평균 흡연량, 야외활동 시간, 운동량, 인종, 연구 전 등록주소지 거주기간 등을 교란변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

$PM_{2.5}$ 농도가 $10\mu g/m^3$ 증가할 때 폐암 발병 확률은 43% (95%CI: 11%-84%) 증가함.

- Li et al. (2020)은 중국 동맥경화성 심혈관 질환 위험 예측연구에서 18-74세 127,841명을 대상으로 $PM_{2.5}$ 노출과 폐암 발병과의 관계를 추정함.

1992년-2008년 중 수행된 네 개의 코호트 연구 자료 기반으로 연구를 수행함.

PM_{2.5} 농도는 2000-2015년 위성기반 지표 농도를 사용하여 평균 농도를 적용함.

나이, BMI, 지역, 흡연, 도시화, 교육수준, 흡연 상태, 일과 연관된 육체 활동 등을 교란 변수로 설정하였음.

Cox 비례위험모형을 이용하여 HR 형태의 결과를 제시함.

PM_{2.5} 농도가 Q3(57.17-71.37 μ g/m³)일 때 폐암 발병 확률은 49% (95%CI: 1.12-1.99) 증가함.

4.4. 국내 및 해외 연구 비교

- 연구모형 측면에서 보면, 국내 및 해외 연구에서 장기영향을 분석한 연구는 대부분 콕스비례위험모형 (COX PH)을 분석모형으로 설정하였으며, 대부분 국민건강보험공단의 건강보험데이터를 활용한 후향적 코호트연구를 수행하였음.
통계청 출생/사망 데이터를 활용하거나 국민건강영양조사 데이터를 활용한 경우가 일부 존재하나 건강보험데이터를 사용한 연구에 비해 그 수는 제한적임.
- 해외 연구의 경우 직접 인구집단을 추적하는 전향적 코호트 연구(Katanoda et al, 2011)사례가 일부 존재하나, 국내와 마찬가지로 기 구축된 건강보험데이터 또는 코호트 데이터(Turner et al, 2011; Gan et al, 2013; Tomezak et al, 2016 등)를 사용하여 분석하는 후향적 코호트 연구가 주를 이루고 있음.
- 국내의 경우 전국(Kim et al., 2020a; Lee et al., 2020) 또는 인구가 많은 서울 등 대도시권(Son et al., 2011; Han et al., 2020)을 대상으로 연구가 이루어졌으며, 해외 연구 또한 대도시나 국가 전체, 또는 여러 지역을 대상으로 연구됨.
농도반응함수는 대기오염농도변화에 따른 건강피해를 통계적 경향을 통해 분석하므로 충분히 많은 수의 인구를 대상으로 하여야 유의미한 결과를 얻기에 용이하기 때문임.
- 국내외 연구에 확인할 수 있는 특징적인 차이는 대기오염의 영향을 분석하기 위해 통제된 교란변수에 있음.
- 동일한 대기오염-질병 영향을 분석더라도 국가별로 사용 가능한 인구보건 데이터의

여건이 다르기 때문에 연구자별로 정의한 교란변수가 다르게 나타남.

예를 들어 가정 내 숯 사용 여부는 실내 대기오염노출 수준에 영향을 미치기 때문에 질병에 영향을 미치는 교란변수일 수 있지만, 후향적 코호트연구에서 관련 데이터를 제공하지 않을 경우 이를 별도로 수집할 수 없으므로 일부 연구(Buteau et al., 2020)에서만 교란변수로 고려되었음.

- 특히 국외 대상연구는 대부분 미주, 유럽 지역으로 다양한 인종이 포함되기 때문에 인종을 교란변수를 분석에 포함했다는 특징이 있음.
- 따라서 국외 연구의 교란변수 설정 사례를 그대로 국내 연구에 적용하는 것은 적합하지 않을 수 있음.
- 이에 질병별로 국내외 연구에서 공통으로 고려하는 교란변수와 지역적/인종적 특징에 따라 추가로 분석에 포함하는 교란변수를 분류하였으며, 이를 통해 본 분석에서 사용할 변수를 1차로 선별하였음.
- 예를 들어, 국내외 문헌 중 심혈관계 질환 중 뇌졸중을 분석한 연구를 바탕으로 교란변수를 다음과 같이 선별하였음.
대기오염물질로 인한 뇌졸중 사망, 발병 등을 연구는 총 7건(국내 2건, 국외 5건)으로, 주요 내용은 다음과 같음.

[표 3.5] 국내외 뇌졸중 연구 주요 내용

논문번호	구분	연구자 (연도)	국가 및 지역	피해영향	연구대상
1	국내	Kim et al. (2017a)	한국, 서울	뇌졸중 사망	18세 이상
2	국내	Kim et al. (2020b)	한국	뇌졸중 발병	-
3	국외	Hart et al. (2015b)	미국, 11개 주	뇌졸중 발병	30-55세 여성 대상
4	국외	Liang et al. (2020)	중국, 15개 성	뇌졸중 발병	4개 코호트
5	국외	Puett et al. (2011)	미국, 13개 주	뇌졸중 사망	40-75세 남성 대상
6	국외	Qiu et al. (2016)	홍콩	뇌졸중 응급실 방문	65세 이상

논문번호	구분	연구자 (연도)	국가 및 지역	피해영향	연구대상
7	국외	Stafoggia et al. (2014)	유럽 5개 국가	뇌졸중 발병	11개 코호트 개별 분석 및 메타분석

- 모든 연구에서 성별, 나이, BMI, 고혈압, 그리고 당뇨를 분석에 포함하였으며, 대부분(50% 초과)의 연구에서 소득, 흡연, 음주, 그리고 운동을 교란변수로 사용하였음. Hart et al. (2015b)와 Puett et al. (2011)은 연구 대상을 여성 혹은 남성으로 한정했기 때문에 연구 대상 선정 과정에서 이미 성별을 고려한 것으로 볼 수 있음.
- 국내연구 중 Kim et al. (2017a)는 다양한 종류의 동반 질환(comorbidity)을 분석에 포함하였으나, Kim et al. (2020b)는 고혈압과 당뇨만을 포함하고 있음. 동반 질환의 경우 고혈압과 당뇨를 기본으로 포함하되, 이상지질혈증, 만성폐쇄성폐질환 등의 경우 분석통계모형의 유의미성, 데이터 가용성에 따라 결정될 수 있음.
- 일부 국외 연구는 직업, 교육 수준 등 개인 변수를 일부 포함하였으나, 국내연구에서 사용한 표본코호트DB는 의료기관 이용과 건강검진 결과를 결합한 자료로써 직업, 혼인유무 등과 같은 개인 변수는 제공하고 있지 않으므로 분석에 포함시키기 어려움.

[표 3.6] 국내외 뇌졸중 연구에서 포함한 교란변수

논문번호	1	2	3	4	5	6	7
성별	0	0	-	0	-	0	0
나이	0	0	0	0	0	0	0
BMI	0	0	0	0	0	0	0
사회경제적 상태 (소득)	-	0	0	-	-	0	-
보험종류	-	0	-	-	-	-	-
인종	-	-	0	-	-	-	-
직업	-	-	0	-	-	0	-
교육수준	-	-	0	0	-	-	0
혼인유무	-	-	0	-	-	-	-
동반질환							
고혈압	0	0	0	0	0	0	0

논문번호	1	2	3	4	5	6	7
당뇨	0	0	0	0	0	0	0
이상지질혈증	0	-	0	0	-	-	-
만성신부전	0	-	-	-	-	-	-
말기신질환	0	-	-	-	-	-	-
허혈성 심장질환	0	-	-	-	-	-	-
말초동맥질환	0	-	-	-	-	-	-
만성폐쇄성폐질환	0	-	-	-	-	0	-
악성종양	0	-	-	-	-	-	-
고지혈증	-	-	-	0	-	-	-
고콜레스테롤혈증	-	-	-	-	0	-	-
천식	-	-	-	-	-	0	-
심장질환	-	-	-	-	-	0	-
뇌혈관질환	-	-	-	-	-	0	-
심근경색 가족력	-	-	0	-	0	-	-
흡연	-	0	0	0	0	0	0
음주	-	0	-	0	0	0	-
운동	-	0	-	0	0	0	-
공복 혈당	0	-	-	-	-	-	-
헤모글로빈	0	-	-	-	-	-	-
총 콜레스테롤	0	-	-	0	-	-	-
거주지역	-	-	-	0	-	-	0
도시화 수준	-	-	-	0	-	-	-
노인 비율	-	-	-	-	-	0	-
고등교육 이수 비율	-	-	-	-	-	0	-
고소득자 비율	-	-	-	-	-	0	-
흡연자 비율	-	-	-	-	-	0	-
식습관	-	-	-	-	0	-	-
약물 사용	-	-	0	-	-	0	-
계절	-	-	0	-	-	-	-

○ 국내외 연구에서 포함한 모든 교란변수는 엑셀 스프레드시트에 정리하여 5차년 연구의 농도반응함수 도출에 활용할 수 있도록 함.

481

5. 소결

- 본 장에서는 본 연구목적에 적합한 연구 방법론을 선정하기 위해 다양한 건강영향 함수 도출 방법론들을 조사 및 비교하였음.
- 건강영향 함수를 도출하는 일반적인 방법으로는 위험 요인 노출수준 조작 가능성, 연구 설계의 목적성 등에 따라 무작위 대조군 연구, 코호트 연구, 환자 대조군 연구 등이 있음.
- 활용 가능한 보건 의료데이터 현황, 연구 목적과의 적합성, 연구설계별 인과관계 입증 타당성 등을 고려하여 본 연구에서는 장기노출과 건강 간의 관계를 확인하기 위해 코호트 연구, 그중에서도 후향적 코호트 연구를 설정하였음.
- 장기노출 영향을 파악하기 위한 통계분석 기법으로 대표적인 준모수적 생존분석 방법인 콕스비례위험모형을 사용할 예정임.
- 대기오염물질의 장기노출 영향과 건강 간의 관계를 추정한 국내외 학술논문 검토를 통해 본 연구 분석모형의 방향을 수립하였음.
- 특히 대기오염물질 외 영향을 미치는 교란변수들을 세부 질병별로 조사·수집하였으며, 추후 실제 통계분석 과정에서 함께 고려함으로써 발생할 수 있는 편향을 줄이고자 함.
 - 국내외 연구는 사용 가능한 데이터의 구성, 분석 국가에 따른 지역적/인종적 차이로 인해 분석에 포함된 교란변수를 모두 고려하는 것은 국내 실정에 적합하지 않을 가능성이 있음.
 - 따라서 질병별로 국내외 연구에서 지역적/인종적 특징에 구분 없이 공통으로 고려하는 교란변수와 추가로 분석에 포함하는 교란변수를 분류하였으며, 본 연구에서 활용하는 맞춤형 코호트DB에서 제공하고 있고, 국내 실정에 적합한 교란변수를 1차적으로 선별함.
- 장기노출에 비해 그 영향의 크기가 적으나 장기영향분석만으로 포착되지 않는 단기 노출의 영향을 평가하기 위해 시계열 연구를 추가적으로 고려할 예정임.
 - 시계열 연구의 통계분석 기법으로는 일반화가법모형 (Generalized Additive Model, GAM)을 사용할 예정이며, 이에 대한 자세한 내용은 1, 2차년도 연구 보고서(각각 573쪽, 522쪽)에 기술하였음.

제4장 석탄화력피해비용 분석 범위

1. 공간적 범위
2. 시간적 범위
3. 내용적 범위
4. 분석모형 설계
5. 소결

1. 공간적 범위

- 본 연구의 최종 목적은 충청남도 소재 석탄화력발전에서 배출되는 대기오염으로 인한 충청남도의 건강피해를 비용으로 정량화하고 이를 지역자원시설세 세수규모와 비교하는 것임.
- 지역자원시설세는 광역자치단체가 과세권을 갖는 지방세로 도세에 해당(유태현, 박상수, 2013)하므로 도 단위에서 피해비용 평가가 이루어져야 함.
- 석탄화력발전으로 인한 직접적인 피해를 겪는 지역은 석탄화력발전소 소재 4개 시군(당진, 서천, 태안, 보령)이라고 볼 수 있지만, 지역자원시설세와 비교하기 위한 피해비용 정량화는 도 단위에서 이루어져야 하므로 피해비용 평가를 위한 농도반응함수 또한 도 단위에 적용가능한 값이 필요함.
본 연구 건강영향 분석의 목적이 화력발전 인근지역의 타지역대비 피해수준을 비교하는 것이 아니라, 충남도 차원에서 화력발전으로 인한 피해비용을 평가하여 도세인 지역자원시설세를 증세하는데 있기 때문임.
- 따라서 농도반응함수는 도 단위에서 분석되거나, 충남도 각 시군구 단위에서 분석된 값을 사용할 수 있음.
- 그러나 시군구 단위에서는 인구 수가 충분히 많지 않아 대기오염과 관련된 질환자 및 사망자 발생 빈도가 낮기 때문에 통계적으로 유의미한 수준의 대기오염 영향 관계를 검출하기 어려움.
- 이에 본 연구에서는 충남도 단위의 인구 및 보건데이터를 이용하여 도 단위에서 공통적으로 적용 가능한 농도반응함수를 도출하고자 함.
- 즉, 농도반응함수 분석을 위한 연구의 공간적 범위는 충남도 전체에 해당함.
다만 석탄화력발전 소재 시군의 현황을 도 내 다른 지역과 비교하는 것은 석탄화력발전 소재지의 보건 측면의 이슈를 파악하여 향후 지역자원시설세 운용방안을 마련하는데 활용할 수 있음에 따라, 석탄화력발전 소재 시군과 타 지역의 대기오염 관련 질환 발생 빈도 등 비교 분석을 추가로 수행할 예정임.

2. 시간적 범위

- 앞서 농도반응함수 분석을 위한 보건의료데이터 조사에서 살펴본 바와 같이 보건의료데이터는 가장 최신연도(2020년)까지 데이터가 확보됨.

- 그러나 Covid 19로 인해 호흡기 관련 사망이 급격히 증가하고, 대기오염 배출 패턴에도 변화가 생기는 등 2020년 이후 사망 및 질병 데이터를 이용한 건강위험평가를 수행하기 위해서는 정교한 분석모형 및 가정이 요구됨.

2020년 3월 WHO에서 코로나19를 팬데믹으로 선언한 이후, 여러 국가에서 코로나19 확산 억제를 위해 다양한 조치를 시행함에 따라 수송/산업/경제활동이 둔화되면서 대기오염물질 농도에도 예상치 못한 변화가 발생함⁵³⁾

서울의 경우 2020년 4월 기준 코로나19 일일 확진자 수가 최대 기간이었던 2020년 2월 26일부터 3월 18일 3주 동안의 PM_{2.5} 농도와 2016-2019년 동기간의 PM_{2.5} 농도를 비교한 결과, 2016-2019년 평균 농도에 비해 2020년 농도가 32% 감소했음

이처럼 예상치 못한 대기오염물질 농도의 변화는 본 연구의 공간적 범위인 충청남도 석탄화력발전으로 인한 영향에 편향을 미칠 수 있음.

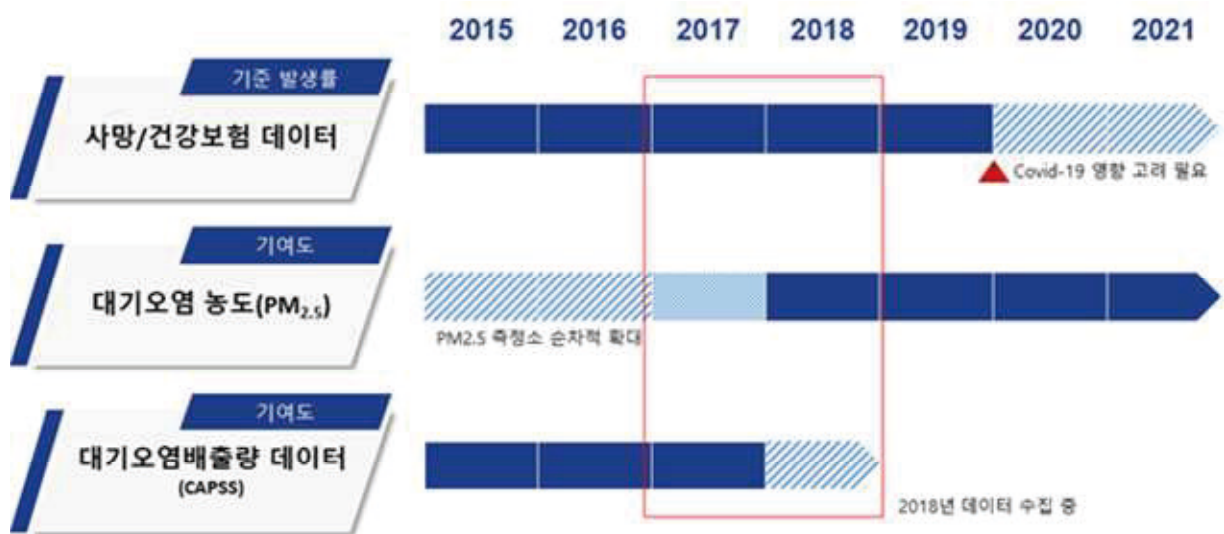
따라서 보건의료데이터의 가용성 관점에서는 2019년까지가 유효한 분석기간이라고 볼 수 있음.

- 농도반응함수를 도출하기 위해서는 건강위험과 비교할 수 있는 대기오염물질의 과거 농도 데이터가 요구되며, 특히 주요 물질인 PM_{2.5}의 장기간 농도 데이터가 필요함.
- 충청남도의 경우 2015년부터 PM_{2.5}측정이 시작되었으나, 특정지역에 국한되어 있었으며 2017-2018년 이후에야 공간적 변동을 반영할 만큼 충분한 측정 데이터가 존재함.
- 따라서 농도반응함수 도출 측면의 농도 데이터 관점에서는 2017년 이후로 분석 범위를 설정하는 것이 적절함.
- 피해비용과 지역자원시설세의 비교가 본 연구의 목적이며 석탄화력발전의 대기오염 농도

53) IQAir, 2020. COVID-19 impact on air quality in 10 major cities.

기여도를 적용하여 피해비용을 산출하는 점을 고려하면 기여도 도출 대상이 되는 분석 시점과 피해비용 산출 시점 또한 일치되어야 함.

- 기여도의 경우 농도가 아닌 대기오염 배출량 데이터⁵⁴⁾를 활용하여 도출되며 현재 공개된 최신 배출량 데이터는 2017년임.
2018년 배출량 데이터는 수집 중이며 해당 데이터가 5차년도 이전까지 공개될 경우 2018년 데이터를 이용한 기여도 도출이 가능함.
- 따라서 이상과 같이 기여도 도출가능 시점, 보건의료 데이터 가용시점, 대기오염 농도데이터 가용시점 등을 종합적으로 고려하였을 때 피해비용평가 대상이 되는 시간적 범위는 2017년 또는 2018년(기여도 도출 시)로 설정될 수 있음.



[그림 4.1] 피해비용평가의 시간적 범위

54) 제1세부 보고서 제6장 대기오염물질 기원 및 기여도 추정 194쪽(표 6.15)

3. 내용적 범위

3.1. 피해비용 분석 사례

- 본 연구에서는 석탄화력발전으로 인한 대기오염물질의 건강영향을 분석대상으로 함에 따라 대기오염과 관련되어 그동안 국내외에서 대기오염과의 관련성이 연구되어 입증된 건강영향을 분석대상 범위로 선정하고자 하였음.
- 특히 본 연구의 결과는 화력발전 대기오염의 영향을 통한 정책적 활용방안 모색에 있으므로 학계의 연구사례뿐만 아니라 보건정책입안의 측면에서 대기오염과 건강영향을 다룬 공신력있는 기관의 연구보고서를 중점 검토하였음.
- 이를 위해서 국제기구, 유럽, 미국의 국가기관의 최신 대기오염 영향 연구사례를 검토하였음
유럽의 경우 Clean Air Outlook 사례, 미국의 경우 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA) 보고서, 그리고 국제보건기구(World Health Organization, WHO)의 전세계 질병부담연구사례를 검토함.

3.2. 유럽 Clean Air Outlook

- Clean Air Outlook은 유럽위원회의 환경사무국(Directorate-General for Environment)이 발표하는 보고서로 유럽의 대기정책이 시행되었을 경우 대기질 전망을 분석한 보고서임.
- 가장 최근에 발표된 보고서는 2021년 1월에 발표된 제2차 보고서로 각국이 국가 대기오염규제프로그램(NAPCP)⁵⁵⁾에 포함된 정책을 시행할 경우 대기질을 전망하고 있음.
- 대기질 전망 및 비용편익에 대한 과학적 분석은 국제응용시스템분석연구소(

55) NAPCP는 유럽 회원국이 참여하는 제도로 NEC(national emissions ceilings) directive에 따라 특정 대기오염원에 대해 개별 회원국이 연간 배출감축목표를 설정하고 국가별대기오염규제프로그램 NAPCPs를 통해 이를 달성해나가도록 하는데 목적이 있음. SO₂, NO_x, NH₃, NMVOCs, 메탄, 미세먼지(메탄과 미세먼지는 2016년부터 추가)에 대해 2029년까지 배출규제를 적용함 (세계에너지시장인사이트 제17-24호 (2017.7.17.)에너지경제연구원)

International Institute for Applied Systems Analysis, IIASA)가 제공하며, 다양한 모델링을 통해 분석결론에 대한 근거를 제공함.

- Clean Air Outlook의 근거가 되는 IIASA의 분석은 통합평가모델인 GAINS⁵⁶⁾ (Greenhouse gas-Air pollution Interactions and Synergies)를 이용하여 정책에 따른 대기오염배출 변화 및 영향을 분석함.
 - 건강영향의 경우 WHO의 HRAPIE(2013) 프로젝트에서 개발된 건강영향평가 방법론을 기본으로 하였으나 최신 연구결과를 반영하여 일부 건강영향을 추가하여 평가 모형을 마련함.
 - 대기오염으로 인한 단기노출보다는 연평균 장기 노출을 주요 대상으로 하였으며, 인위적 PM_{2.5}, O₃ 에에 대한 선형 농도반응함수를 사용하였음.
 - IIASA 연구 또한 분석대상 범위를 결정하기 위해 여러 국제기구(EU, OECD, WHO, USEPA 등)에 의한 건강영향평가 사례를 검토하였으나 무엇을 반드시 포함해야 하는지에 대한 합의된 사항이 없음.
 - 또한 사망률에 대해 어떤 정확한 반응함수를 채택해야하는지에 대한 공통의 합의도 없음을 밝힘.
 - 대신 IIASA는 WHO의 2013년 HRAPIE 프로젝트에서 개발된 농도반응함수를 보수적인 관점 및 이전 연구결과와의 일관된 비교를 위해 사용하였음.
- 다만, HRAPIE프로젝트 이후로 많은 시간이 흐름에 따라 HRAPIE에서 개발된 PM_{2.5}의 사망영향평가 함수가 실제 피해를 과소평가한다는 연구증거가 발표되어 최신의 농도반응함수를 비교용으로 사용하였음.
- 비교용으로 사용한 농도반응함수는 Chen and Hoek (2020)의 연구결과에서 도출한 10 microgram/m³ 증가 당 1.08로 HRAPIE에서 도출된 1.06에 비해 1.9% 높은 수치임.

56) GAINS 모델은 대기오염물질과 온실가스 배출의 원천과 영향, 그리고 이들의 상호작용에 대한 정보를 종합한 통합 평가 모델이다. 경제 개발, 배출원의 구조, 제어 잠재력 및 비용, 대기 중 오염물질의 형성 및 분산, 오염의 환경 영향 평가에 대한 데이터를 수집한다. 미세먼지 및 지상 오존으로 인한 인간 건강에 미치는 대기오염 영향, 지상 오존으로 인한 식물 피해, 육상 및 수중 생태계의 산성화 및 토양의 과잉 질소 퇴적 등을 다루고 있다. SO₂, NO_x, PM, NMVOC, NH₃, CO₂, CH₄, N₂O, F-gas를 대상으로 대기중물질과 건강 및 생태계 영향을 설명한다.

- 최신의 역학연구에 바탕을 둔 추가 영향(관상동맥심장병, 뇌졸중, 천식 및 당뇨병)을 고려하였으나 연구사례가 충분하지 않아 최종적으로 비용평가에는 포함되지 않았음.
- 최종적으로 IIASA연구를 통해 비용평가가 이루어진 건강영향은 다음과 같으며, 해당 영향에 대한 편익이 Clean Air Outlook 보고서에 반영됨.

[표 4.1] 유럽 Clean Air Outlook의 대기오염물질별 건강영향

오염물질	건강영향
O ₃	급성사망
O ₃	호흡기 입원
O ₃	심혈관질환 입원
O ₃	경미한 행동제약일수(Minor Restricted Activity Days_
PM _{2.5}	만성영향으로 인한 사망(생존연수 손실)
PM _{2.5}	만성영향으로 인한 사망(사망자수)
PM _{2.5}	영아사망(사망자수)
PM _{2.5}	성인 만성 기관지염
PM _{2.5}	6세-12세 기관지염
PM _{2.5}	호흡기 질환 입원
PM _{2.5}	심장병입원
PM _{2.5}	행동제약일수
PM _{2.5}	어린이 천식증상일수
PM _{2.5}	근로일 손실
PM _{2.5}	뇌졸중
PM _{2.5}	비치명적 심근경색

3.3. 미국 EPA Integrated Science Assessment

- 미 환경청(US Environmental Protection Agency)은 청정대기법(Clean Air Act)에 따른 비용 편익 분석을 통해 청정대기법 시행에 따른 사회적 편익이 비용보다 훨씬 더 크다는 것을 보이고 있음.(US EPA, 2014; 김병욱 외, 2018에서 재인용⁵⁷⁾)
- 미 환경청은 대기환경기준 변경 시 종합적 과학평가 (Integrated Science Assessment, ISA)를 통해 PM_{2.5}와 건강 피해 간 인과관계를 평가하는 작업을 수행하고 이를 바탕으로 PM_{2.5} 노출에 따른 조기사망률과 같은 정량적 위해성 평가를 수행하고 정책의 사결정의 근거로 활용함.
- ISA보고서는 미세먼지, 오존, 일산화탄소, 질산화물 및 황산화물에 대해 역학, 임상 연구, 동물실험 분야 선행연구를 분석하고, 건강영향별 인과성에 대해 인과성이 있다고 확신하는 경우(Causal), 인과성이 존재할 가능성이 있다고 보는 경우(Likely to be causal), 인과성 유무가 분명하지 않은 경우 등으로 나누고 있음.
- 특히 질병영향에 대한 구분 외에도 단기 노출과 장기 노출의 영향을 각각 구분하여 인과성을 판단하였다는 점에서 본 연구의 농도반응함수 분석 설계의 근거로 활용 가능함.
- 동 보고서에 제시된 미세먼지와 각종 질병별 건강영향은 다음과 같으며, 본 연구에서는 가독성을 위해 인과성 판단 범주별로 유의도를 *** (인과관계 있음), ** (인과관계 가능성 높음), * (인과성이 의심됨 또는 인과성이 의심되나 증거가 충분하지 않음), - (인과성을 판단할 증거가 불충분), X (인과성 없음)으로 추가하여 표시하였음.
- PM_{2.5}의 경우, 심혈관계 질환과 사망의 인과관계는 확실한 것으로 판단하였으며, 호흡기계와 신경계, 암의 인과관계는 가능성이 높은 것으로 판단함.

57) 김병욱 외 (2018) 미국의 초미세먼지 관리 제도 검토. 한국대기환경학회. Vol. 34, No. 4, August 2018, pp. 588-609

[표 4.2] EPA ISA의 대기오염 물질별 건강영향

오염물질	건강영향			평가
PM _{2.5}	호흡기계 질환	단기	인과관계 가능성 높음	**
PM _{2.5}	호흡기계 질환	장기	인과관계 가능성 높음	**
PM _{2.5}	심혈관계 질환	단기	인과관계 있음	***
PM _{2.5}	심혈관계 질환	장기	인과관계 있음	***
PM _{2.5}	대사 질환	단기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
PM _{2.5}	대사 질환	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
PM _{2.5}	신경계 질환	단기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
PM _{2.5}	신경계 질환	장기	인과관계 가능성 높음	**
PM _{2.5}	생식기능(여성과 남성)	—	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
PM _{2.5}	생식기능(임신과 출산)	—	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
PM _{2.5}	암	장기	인과관계 가능성 높음	**
PM _{2.5}	사망	단기	인과관계 있음	***
PM _{2.5}	사망	장기	인과관계 있음	***
O ₃	호흡기계 질환	단기	인과관계 있음	***
O ₃	호흡기계 질환	장기	인과관계 가능성 높음	**
O ₃	심혈관계 질환	단기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	심혈관계 질환	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	대사 질환	단기	인과관계 가능성 높음	**
O ₃	대사 질환	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	사망	단기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	사망	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	중추신경계	단기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	중추신경계	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	생식기능	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
O ₃	암	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
CO	심혈관계 질환	단기	인과관계 가능성 높음	**

오염물질	건강영향			평가
CO	심혈관계 질환	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
CO	중추신경계	단기	인과성이 의심됨	*
CO	중추신경계	장기	인과성이 의심됨	*
CO	출산결과(birth outcome) 및 발달영향	장기	인과성이 의심됨	*
CO	호흡기계 질환	단기	인과성이 의심됨	*
CO	호흡기계 질환	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
CO	사망	단기	인과성이 의심됨	*
CO	사망	장기	인과성이 없을 것으로 보임	X
NO ₂	호흡기계 질환	단기	인과관계 있음	***
NO ₂	호흡기계 질환	장기	인과관계 가능성 높음	**
NO ₂	심혈관계 질환	단기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
NO ₂	심혈관계 질환 및 당뇨	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
NO ₂	사망	단기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
NO ₂	사망	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	—
NO ₂	생식기능 및 발달영향(출산, 생식, 임신)	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
NO ₂	생식기능 및 발달영향(출산결과)	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
NO ₂	생식기능 및 발달영향(생후발육)	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
NO ₂	암	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
SO ₂	호흡기계 질환	단기	인과관계 있음	***
SO ₂	호흡기계 질환	장기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*

오염물질	건강영향			평가
SO ₂	심혈관계 질환	단기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
SO ₂	심혈관계 질환	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
SO ₂	생식기능 및 발달영향	—	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
SO ₂	사망	단기	인과성이 의심되나 충분하지 않음	*
SO ₂	사망	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—
SO ₂	암	장기	인과성 여부를 추론하기에 불충분함	—

3.4. WHO 전세계질병부담(Global burden of disease)

- WHO는 정기적으로 Global Burden of Disease 보고서를 발간하여 전 세계 및 국가별 주요 사망원인으로 인해 발생한 조기사망 및 장애로 인한 질병부담을 측정 제시함.
- 가장 최근에 발표된 2019년 보고서는 204개 국가를 대상으로 대기오염, 저체중출산, 오염된 식수, 간접흡연 등 다양한 원인과 369개 질병 간의 관계를 추정하였음. GBD는 전체 질병별 부담을 추정하기 때문에, 대기오염과 관련성이 낮은 질병도 포함하고 있음.
예를 들어, 인플루엔자와 같은 감염성 질환은 대기오염과 직접적 관련성이 낮은 것으로 알려져 있음.
- EPA의 ISA와 마찬가지로 GBD 또한 연구의 틀을 유지한 채 지속적으로 새로운 과학적 연구 결과를 반영하여 갱신함에 따라 과거에 유의미한 관계를 발견하기 어려웠던 원인-질병 간 관계가 추가되는 특징을 보임.
대기오염의 경우 2016년에 관련성이 있다고 평가된 건강영향이 7종이었으나, 가장 최근인 2019년 발표 보고서에서는 10개 종으로 증가함.

[표 4.3] WHO GBD의 대기오염 물질별 건강영향

분석연도	외기 중 대기오염으로 인한 건강영향
2016	하기도감염, 폐암, 기도암, 기관지암, 허혈성심장질환(IHD), 뇌졸중, 만성폐쇄성폐질환(COPD)
2017	하기도감염, 폐암, 기도암, 기관지암, 허혈성심장질환(IHD), 뇌졸중, 만성폐쇄성폐질환(COPD), 2형 당뇨병
2019	하기도감염, 폐암, 기도암, 기관지암, 허혈성심장질환(IHD), 뇌졸중, 만성폐쇄성폐질환(COPD), 2형 당뇨병, 출생체중(신생아 사망), 임신주수

3.5. 분석범위 설정

- 앞서 유럽, 미국 피해비용 분석 사례 및 임상학적 인과관계 입증이 이루어진 질병영향 분석 사례 검토를 통해 공통적으로 고려되는 건강영향을 다음과 같이 도출하였음.
- 의학분야 전문가 자문을 거쳐 모든 문헌에서 공통적으로 고려되는 질병영향은 필수 분석범위로 반영하도록 연구범위를 설정함.
- 단, 두 개 이상의 문헌에서 고려되는 질병영향 또한 본 연구에서 고려될 가치가 있음에 따라 필수 분석 범위는 아니나 본 연구 분석 대상 범위로 동시에 고려함.

[표 4.4] 선행피해비용 분석 문헌에서 고려된 건강영향

질병 및 사망영향	US EPA 2nd Integrated Scientific Assessment*	US EPA Benefit and Cost analysis of Clean air act 1990-2020	Europe2ndClean Air outlook**	WHO Global Burden of Disease 2019
사망	○(단기/장기)	○	○	-
전체 호흡기 질환	○(단기/장기)	○	○	-
만성 기관지염	-	○	○	-
급성 기관지염	-	○	-	-
만성폐쇄성 폐질환	○(단기/장기)	○	-	○
천식	○(단기/장기)	○	○	-
폐렴	-	○	-	-
상기도 증상	-	○	-	-
하기도 증상	-	○	-	-
감염성 호흡기 질환	○(단기/장기)	-	-	○(하기도 감염)
전체 심혈관계 질환	○(단기)	○	○	-
심근경색	○(단기, 장기)	○	△	-
허혈성 심질환	○	○	-	○
심부전	○(단기)	-	-	-
부정맥	○	○	-	-
응혈성심근경색	○(단기)	○	-	-
뇌졸중	-	-	△	○

질병 및 사망영향	US EPA 2nd Integrated Scientific Assessment*	US EPA Benefit and Cost analysis of Clean air act 1990-2020	Europe2ndClean Air outlook**	WHO Global Burden of Disease 2019
인지행동 영향	O(장기)	-	-	-
신경퇴행성 질환	O(장기)	-	-	-
어린이 신경발달	O(장기)	-	-	-
폐암	O(장기)	-	-	-
기타 기도암	-	-	-	O
기관지암	-	-	-	O
당뇨(2형)	-	-	-	O
저체중아증가	-	-	-	O
임신주수감소	-	-	-	O

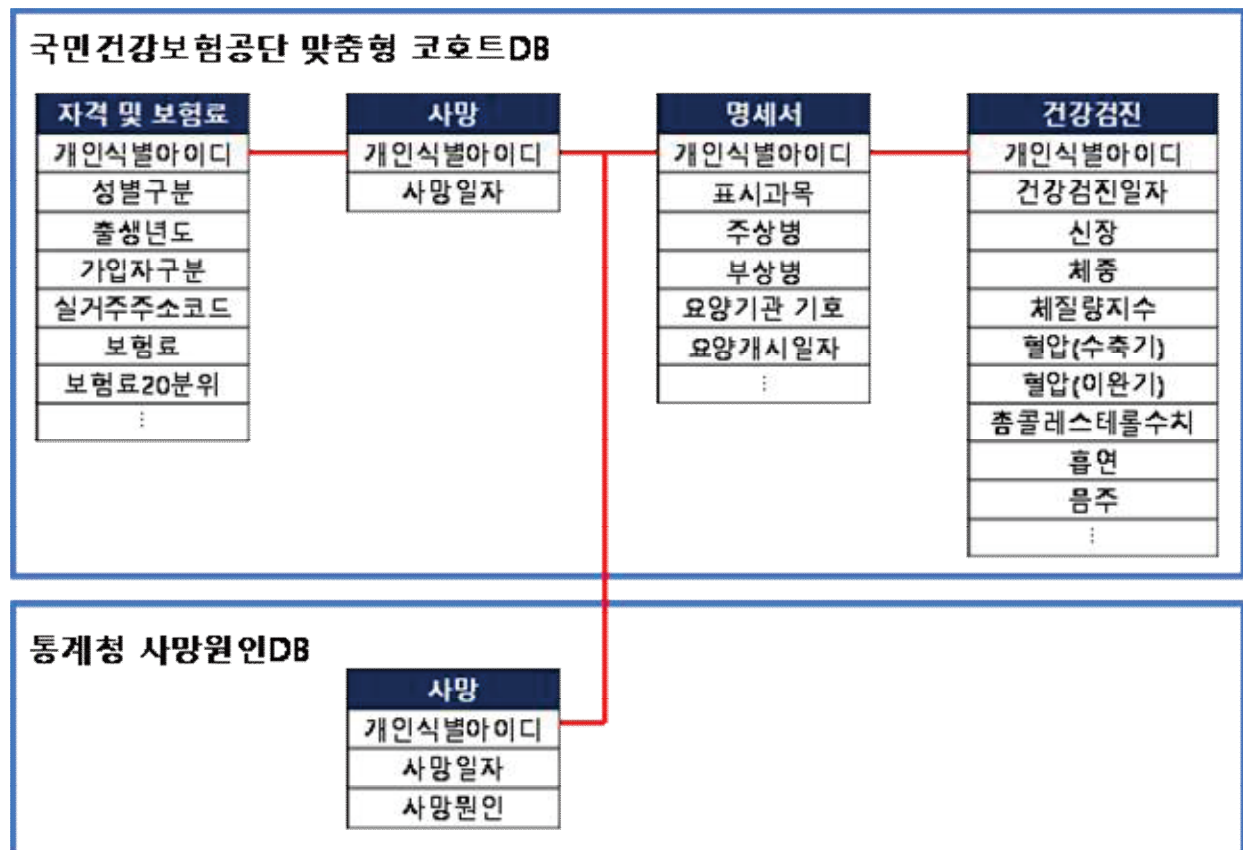
4. 분석모형 설계

4.1. 연구 참여자 설정

- 본 연구는 NHIS에서 제공하는 자료에 기반한 후향적 코호트 연구이며, 연구 참여자의 질병 기록, 과거 이력, 거주 지역, 그리고 개인변수(성별, 나이 등) 등은 모두 NHIS-NHID에 기록된 자료를 사용하였음

NHIS-NHID는 자격 및 보험료, 사망, 명세서, 그리고 건강검진 등 여러 개의 테이블을 제공하고 각각의 테이블은 개인식별 아이디를 통해 연결할 수 있도록 구성되어 있음

NHIS-NHID에서 제공하는 사망자료에는 개인의 사망원인 자료가 포함되어 있지 않으므로 통계청 사망원인 자료와 연계하여 분석에 사용함



[그림 4.2] 데이터 구성

연구 참여자의 질병은 주상병과 4개의 부상병으로 기록되며, 주상병은 환자의 증상에 가장 영향을 많이 미친 질병이 필수적으로 기록되고, 부상병은 선택적으로 기록됨
본 연구는 주상병과 1개의 부상병까지 검토하였으며, 모든 질병은 제10차 국제질병분류(International Classification of Diseases 10th codes, ICD-10)에 따라 정의됨
NHIS-NHID는 외래 및 입원, 그리고 사망의 경우 사망 일자만을 구축하고 있으며, 사망원인 자료는 통계청에서 제공하고 있음. 따라서 NHIS-NHID 구축 이후 통계청에 요청하여 사망원인 자료를 연계하였음

- 질병의 종류와 관계없이 본 연구는 2007-2016년 동안 관심 질병이 앓지 않았던 사람을 대상으로 2017-2019년 관심 질병의 발생을 추적하였음
- NHIS-NHID의 건강검진 자료는 확장성 측면에서 NHIS-NSC에 비해 유리하지만 선가공이 되어있지 않아 다수의 결측치, 이상치 등을 포함하고 있어 정제가 필요하여 NHIS-NSC 2.0 사용자 매뉴얼에 따라 가공하였음

4.2. 건강 영향 설정

4.2.1. 호흡기계 질환

- 앞서 조사된 선행연구와 전문가 자문을 바탕으로 대기오염물질 장기노출과 관련된 세부 호흡기계 질환은 다음과 같이 도출됨.
 - 전체 호흡기계 질환
 - 만성 폐쇄성 폐질환(Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD): ICD-10, J41-J44
 - 천식(Asthma): ICD-10, J45-J46
 - 하기도 감염(Lower Respiratory Infaction): ICD-10, J18-J22
- 대기오염물질 노출과 호흡기계 질환의 연관성을 확인하기 위해 제3장 4절의 선행연구 조사를 바탕으로 다음과 같은 위험 요인들을 교란변수로 설정하였음.
성별, 나이, 소득, BMI, 흡연, 음주

4.2.2. 심혈관계 질환

- 본 연구에서는 앞서 조사된 선행연구를 바탕으로 대기오염물질 장기노출에 의해 발병할 위험이 있는 심혈관계 질환 중 다음과 같은 세부 질병을 선정하였으며, 심혈관계 질환으로 인한 결과는 첫 번째 입원과 사망으로 한정하였음

전체 심혈관계 질환

허혈성 심장질환(Ischemic Heart Disease, IHD): ICD-10, I20-I25⁵⁸⁾

부정맥(Arrhythmia): ICD-10, I46-I49

뇌졸중(Stroke): ICD-10, I60-I64

- 대기오염물질 노출과 심혈관계 질환의 연관성을 확인하기 위해 제4장 5절의 학술논문 조사를 바탕으로 다음과 같은 위험 요인들을 교란변수로 설정하였음
성별, 나이, 소득, BMI, 총 콜레스테롤, 고혈압, 당뇨, 흡연, 음주

4.2.3. 폐암

- 앞서 조사된 선행연구와 전문가 자문을 바탕으로 대기오염물질 장기노출과 관련이 있을 것으로 추정되는 세부 악성종양 질환은 다음과 같음

폐암(Lung Cancer): ICD-10, I34

- 대기오염물질 노출과 악성종양 질환의 연관성을 확인하기 위해 제4장 5절의 학술논문 조사를 바탕으로 다음과 같은 위험 요인들을 교란변수로 설정하였음
성별, 나이, 소득, BMI, 운동량, 흡연, 음주

4.3. 대기오염물질 노출 평가

4.3.1. 자료 수집

- 본 연구는 한국환경공단에서 제공하는 측정소별 대기오염물질 농도 확정자료를 사용하였음
- 충청남도는 2019년 기준으로 31개의 도시대기 측정망, 2개의 교외대기 측정망, 1개

58) 심근경색(Myocardial Infarction)의 ICD-10 코드는 I21로, 허혈성 심장질환에 포함됨

의 도로변대기 측정망을 포함한 34개의 일반 대기오염 측정망을 운영하고 있음
PM10의 경우 2015년 이전부터 일부 측정소에서 측정되고 있었으나, PM_{2.5}의 경우 2015년 이전 자료를 확보하기에 어려움이 있음
또한 전체 측정소 중 76.5%에 해당하는 24개 측정소는 2017년 이후에 설치되었기 때문에 상당량의 결측치가 포함된 상태임

[표 4.5] 연도별 측정소 개수

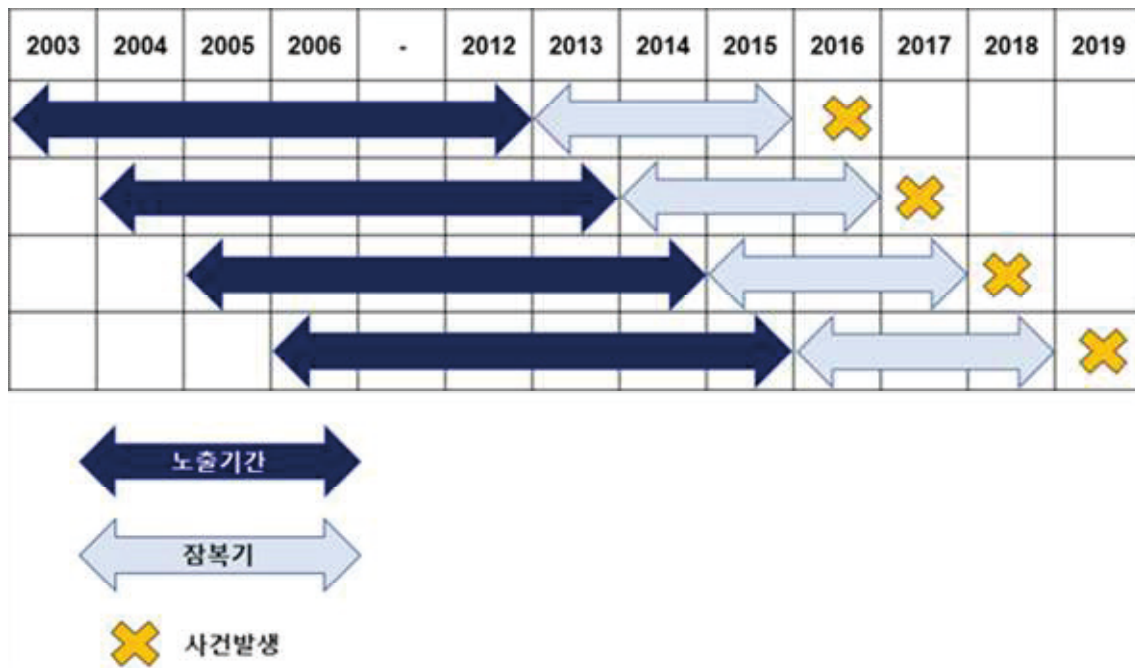
시.군	오염물질	측정망 구분	15년	16년	17년	18년	19년
천안	PM ₁₀	도시대기	2	2	2	3	4(1)
		도로변대기	1	1	1	1	1
	PM _{2.5}	도시대기	1(1)	1(1)	2(1)	3	4(1)
		도로변대기			1(1)	1	1
당진	PM ₁₀	도시대기	2	2	3(1)	2	2
	PM _{2.5}	도시대기		2(2)	3(1)	2	2
서산	PM ₁₀	도시대기	2	2	2	3(1)	4(1)
	PM _{2.5}	도시대기		1(1)	2(1)	3(1)	4(1)
아산	PM ₁₀	도시대기	1	1	2(1)	5(3)	5
	PM _{2.5}	도시대기		1(1)	2(1)	5(3)	5
논산	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	1
태안	PM ₁₀	도시대기			2(2)	2	2
		교외대기	1	1	1	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			2(2)	2	2
		교외대기					1(1)
보령	PM ₁₀	도시대기			1(1)	2(1)	2
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	2(1)	2
홍성군	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	2
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	2
공주	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	1
		교외대기	1	1	1	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	1
		교외대기					1(1)

시.군	오염물질	측정망 구분	15년	16년	17년	18년	19년
부여	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	1
청양군	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	1
금산군	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	1
예산군	PM ₁₀	도시대기			1(1)	1	1
	PM _{2.5}	도시대기			1(1)	1	1
계룡	PM ₁₀	도시대기				1(1)	1
	PM _{2.5}	도시대기				1(1)	1
서천	PM ₁₀	도시대기				2(2)	3
	PM _{2.5}	도시대기				2(2)	3

※ 괄호 안은 전체 측정소 중 유효측정 처리 비율이 75% 미만인 측정소의 개수임

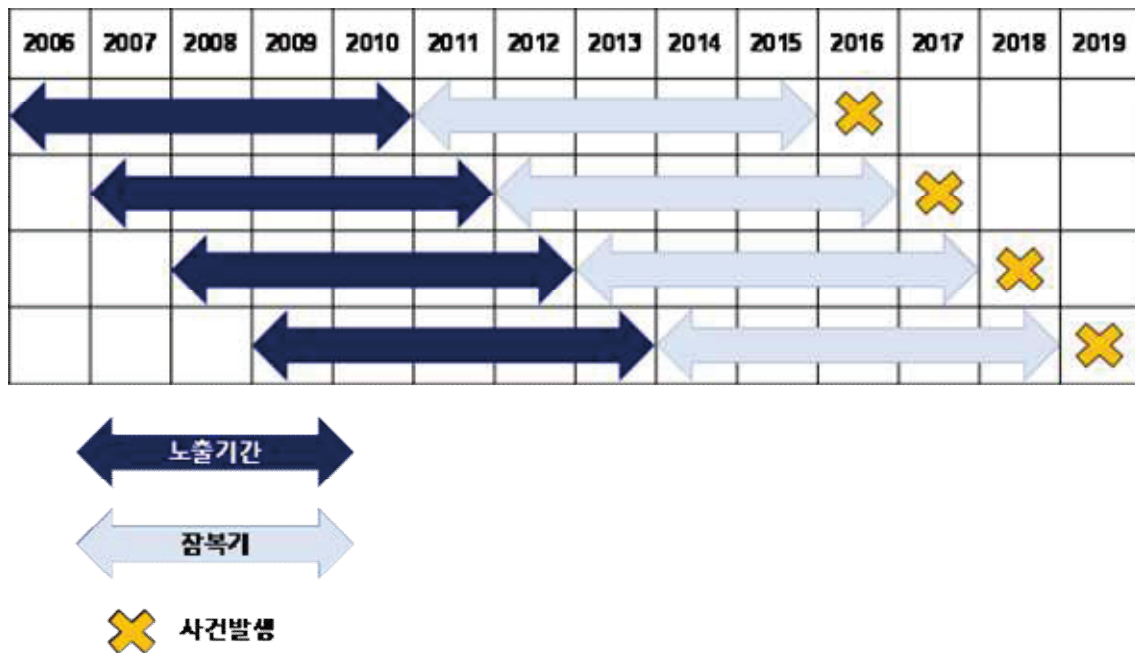
4.3.2. 노출기간 설정

- 본 연구는 NHIS-NHID에서 제공하는 연구 참여자의 거주지역과 에어코리아의 대기 오염물질 농도 확정자료를 활용하여 질병별 대기오염물질 노출기간을 설정하였음
- 각각의 질병은 질병 특성상 대기오염 노출로 인해 질병이 발생하기까지 소요되는 노출기간, 잠복기 등을 고려하여 노출기간이 상이함. 단, 연구 참여자의 지역 이동이 충청남도 내에서 이뤄졌을 경우 거주지역을 고려하여 가중평균했으며, 만약 충청남도 외 지역으로 이동한 경우 연구에서 제외하였음
- 악성종양, 즉 폐암의 경우 대기오염 노출 이후 3년의 잠복기를 가지고, 그 전 10년의 노출이 폐암 발병에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음. 따라서 폐암의 대기오염 물질 노출기간은 발병 직전년도부터 3년의 잠복기, 그 전 10년으로 설정하였음
즉, 연구 참여자의 발병연도에 따라 노출기간이 달라지며, 추적기간은 2016년 1월 1일부터 발병날짜 또는 절단 날짜(사망 또는 연구 종료)까지로 설정하였음



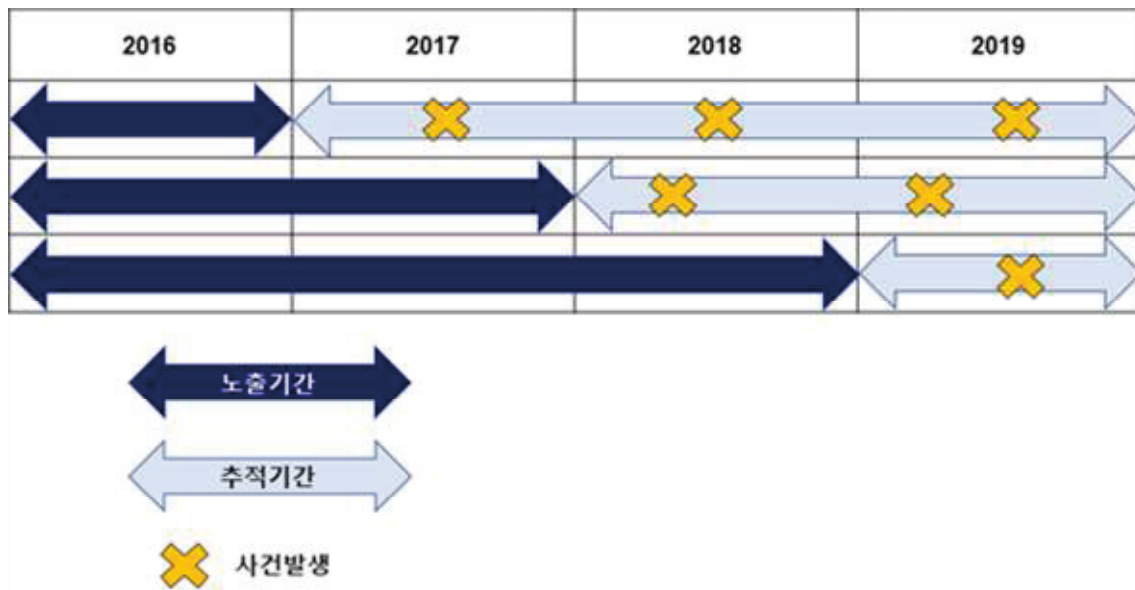
[그림 4.3] 폐암 연구 대기오염물질 노출기간

- 호흡기질환 중 잠복기를 포함하여 가장 긴 노출기간을 적용해야 하는 질병은 COPD로, 일반적으로 대기오염 노출 이후 5년의 잠복기를 가지고, 그 전 최소 5년 이상의 노출이 폐암 발병에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음. 따라서 폐암의 대기오염물질 노출기간은 발병 직전년도부터 5년의 잠복기, 그 전 5년으로 설정하였음
즉, 연구 참여자의 발병연도에 따라 노출기간이 달라지며, 추적기간은 2016년 1월 1일부터 발병날짜 또는 절단 날짜(사망 또는 연구 종료)까지로 설정하였음



[그림 4.4] 호흡기질환 대기오염물질 노출기간

- 심혈관계 질환의 경우 단기 노출로도 질병이 발생하는 것으로 알려져 있고, 특별히 잠복기를 고려해줄 필요가 없어 다음과 같은 노출기간을 설정함
 - ① 2016년 1년 평균, ② 2016-2017년 2년 평균, 그리고 ③ 2016-2018년 3년 평균
- 관심 사건의 추적기간은 노출기간에 따라 각각 2017-2019년, 2018-2019년, 그리고 2019년으로 설정했음. 연구 종료 시점까지 관심 사건이 발생하지 않은 경우 추적 시작 시점부터 2019년 12월 31일까지를 생존기간으로 설정하였음



[그림 4.5] 심혈관계질환 대기오염물질 노출기간

5. 소결

- 본 장에서는 5차년도 피해비용 도출 범위를 공간적, 시간적, 내용적 범위에서 구체화하였음.
- 피해비용 분석 범위 설정은 지역자원시설세와의 비교라는 연구목적에 대한 부합성, 신뢰도 높은 선행사례의 케이스를 바탕으로 한 평가범위 설정의 타당성, 그리고 본 연구에서 활용가능한 데이터 가용성을 고려하여 이루어졌음.
- 특히 피해비용 분석 대상 건강영향범위를 설정할 때, 건강영향을 많이 포함할수록 비용이 커지지만 피해비용 결과에 대한 합리성을 주장하기 어렵고, 건강영향 범위를 최소화할수록 실제 주변지역이 겪고 있는 피해수준을 평가한다는 연구의 목적과 맞지 않는다는 지적이 있을 수 있음.
- 본 연구의 결과물이 단순히 연구가 아닌 정책 및 법제를 뒷받침하는 근거가 될 수 있음에 따라 연구방법과 결과에 대한 신뢰성, 객관성을 주장할 수 있도록 연구모형을 설계하는 것이 매우 중요함.

- 이에 따라 유럽, 미국 등 정부기관 차원에서 대기오염에 대한 영향평가 및 정책비용 평가가 이루어지고 있는 최신의 국외사례를 검토, 반영하여 본 연구의 피해비용 주장의 신뢰성을 뒷받침할 수 있는 근거를 수집함.
분석대상으로 WHO, 미국 EPA, EU의 사례를 참고하였으며 추가로 의학분야 전문가 자문을 통해 피해비용분석범위 설정 접근법의 타당성을 확인하였음.
- 또한 농도반응함수 도출 및 피해비용분석은 5차년에 수행될 예정이나, 당해연도에 이루어진 연구방법론 및 사례 조사, 데이터 조사 결과를 바탕으로 5차년도 연구분석 모형(안)을 설정하고 그에 대한 근거를 제시하였음.
단, 향후 실제 분석과정에서는 분석시점의 데이터 특징에 따라 일부 교란변수의 종류가 변경될 수 있고, 본 보고서에서 직접적으로 다루어지지 않은 이상치(outlier), 결측치(missing data) 처리가 적용될 수 있음.



제5장 결론 및 향후 과제

- 본 연구는 다년차 과제로 석탄화력발전으로 인한 대기오염의 건강피해비용을 평가하여 지역자원시설세와 비교함으로써 지역자원시설세 증세 방안을 마련하는 것을 최종 목표로 함.

전체 5차년 중 1,2차년 과업기간 동안 피해비용 평가 선행사례 조사 및 비용평가 방법론 설정, 선행 농도반응함수 사례 조사 및 대표농도반응함수 도출, 질병 및 사망에 따른 단위피해비용평가를 수행하였음.

- 1, 2차년 과업기간 동안 충남도에 적합한 대기오염 농도반응함수 도출 필요성이 제기됨에 따라 당해연도에는 농도반응함수 직접 도출을 위한 가용데이터 및 방법론 조사, 피해비용 평가 범위 설정을 목표로 과업이 수행되었음.

세부적으로 당해연도 과업은 국내 보건의료 데이터 조사 및 농도반응함수 사용가능성 분석, 농도반응함수 도출 방법론 조사 및 설정, 피해비용 분석 대상 범위 설정으로 구성됨.

- 첫 번째, 보건의료 데이터 조사는 국내에서 발표되는 보건 통계 및 데이터 현황을 조사하여 대기오염과 관련된 건강영향을 평가하는데 가장 적절한 통계 데이터를 도출하기 위해 수행되었음.

보건복지부 국민건강영양조사, 통계청 사망원인통계, 국민건강보험공단 빅데이터 등 국내에 존재하는 주요 보건 및 의료 통계 데이터를 대상으로 내용적 범위, 통계 및 데이터 생산 주기, 공간 단위 등을 비교하였음.

대기오염으로 인한 건강영향을 조기사망 그리고 사망 이전까지의 질병이환으로 구분하여, 사망과 질병피해를 정량화하기 위해서는 사망원인 및 사망자 정보, 질병원인 및 환자 정보, 의료서비스 정보 등이 요구됨.

보건 및 의료 통계 데이터 비교 결과 다양한 질병원인 정보를 제공하고, 대상 인구 수가 많고 시군 단위의 세분화된 정보 제공이 가능한 사망원인통계와 국민건강보험공단 빅데이터 중 맞춤형DB가 본 연구의 목적과 범위에 가장 부합한다는 결론을 도출하였음.

선정된 통계 데이터를 수집·활용하기 위한 절차와 선행사항을 조사하였고 데이터 수합에 시간이 소요되는 국민건강보험공단 빅데이터 맞춤형 코호트 DB의 경우 차년도 과업 수행 시 분석기간을 단축하기 위해 당해 연도에 데이터 사용허가를 획득하고 기초 데이터 분석을 수행하였음.

- 두 번째로 본 연구 제5차년도에 피해비용 도출에 사용할 대기오염 농도반응함수를 도출하기 위해 사용 가능한 방법론을 조사하고 대기오염의 단기 및 장기노출 영향

분석에 적합하고 널리 활용되는 시계열연구방법 및 코호트연구방법을 채택하였음.

대기오염의 장기노출로 인한 영향이 일반적으로 단기노출에 의한 영향보다 큰 것으로 알려져 있으나 장기노출 영향 평가로 포착하기 어려운 단기노출 영향이 존재할 수 있기 때문에 본 연구에서는 단기와 장기영향을 각각 분석대상으로 함.

단기영향의 경우 시계열 연구방법을 통해 분석되며, 연구방법론 및 분석기법 등 관련 내용은 1, 2차년도 연구⁵⁹⁾를 통해 조사되었음.

장기영향의 경우 일반적으로 사용되는 코호트 연구 방법을 채택하였으며, 코호트 연구 방법에서 사용되는 통계모형인 콕스비례위험모형의 개념과 방법론을 세부적으로 조사하고 본 연구에 적용할 연구모형을 수립하였음.

- 세 번째로 5차년도 피해비용분석범위를 데이터 가용 수준, 최종연구 목적 등을 고려하여 공간적, 시간적, 내용적 범위로 나누어 정의하였음.

공간적 범위는 화력발전 주변 시군이 아닌 본 연구의 최종목적인 지역자원시설세의 대상 범위인 충남도 전체로 설정하고, 석탄화력의 대기오염 기여도를 고려하여 피해비용에 따른 지역자원시설세의 배분 및 활용이 가능하도록 시군단위 피해비용 도출을 목표로 함.

시간적 범위는 지역자원시설세와 석탄화력발전의 피해비용을 동등하게 비교할 수 있도록 석탄화력발전의 기여도 분석 대상 연도에 초점을 맞추어 2017년 또는 2018년도로 설정하였음.

- 기여도 도출에 사용되는 데이터의 수집연도인 2017~2018년도, 주요 대기오염물질인 PM_{2.5}의 농도 데이터의 완전성, 건강보험데이터의 수집 가능성 등을 종합적으로 고려하여 2017년 또는 2018년도를 대상으로 함.
- 현재 공개된 최신 대기오염배출량 데이터는 2017년이나 2018년 데이터가 수집되고 있음에 따라 차년도 기여도에 직접 활용된 데이터의 수집연도와 일치될 수 있도록 시간적 범위를 설정할 예정임.

내용적 범위는 피해비용 평가 대상 대기오염물질의 종류와 평가대상 건강영향의 종류로 구분하여, 대기오염물질의 경우 피해비용을 가장 크게 유발하는 것으로 알려진 PM_{2.5}, 그리고 유사한 경향성을 가진 PM₁₀, 건강영향은 국외 대기오염정책 편익 평가 시 주로 고려된 조기 사망 및 호흡기계, 심혈관계 질환과 폐암을 대상으로 함.

59) 1, 2차년도 연구 보고서 각각 573쪽, 522쪽을 참조

- 대기오염물질의 경우 $PM_{2.5}$, PM_{10} , SO_x , NO_x , CO , O_3 등이 국내 정책을 통해 관리·수집되고 있으나 각 오염물질이 복합적으로 영향을 미치기 때문에 각각의 피해비용을 구하여 합산하는 것은 피해비용을 과대평가할 우려가 있음.
 - 미국 EPA, 유럽 등에서 대기오염 정책평가 시 $PM_{2.5}$ 와 O_3 만을 대상으로 하며, 그 중에서도 $PM_{2.5}$ 의 피해비용이 가장 큰 비중을 차지한다는 연구결과가 존재함에 따라 본 연구에서도 $PM_{2.5}$ 를 주요 평가대상으로 함.
 - 다만, 충남도 여건 상 $PM_{2.5}$ 의 농도데이터가 충분히 긴 시간 동안 축적되지 않아, $PM_{2.5}$ 의 영향이 통계적으로 유의미하게 규명되지 않는 경우 $PM_{2.5}$ 농도와 경향성이 유사한 PM_{10} 을 함께 분석하여 피해비용 평가에 활용할 예정임.
- 차년도에는 당해연도에 수립된 분석방법 및 분석 범위를 대상으로 하여 석탄화력의 대기오염 피해비용을 도출하고, 지역자원시설세와 비교하여 증세 방안을 마련할 예정임.
- 본 연구의 피해비용은 대기오염의 건강영향, 그 중에서도 인과관계가 입증되고 분석 사례가 많은 일부 질병에 국한되어 있기 때문에 석탄화력의 모든 피해를 포함하는 것이 아니며, 실제 측정되지 않는 영향을 화폐가치로 추정하는 것임에 따라 피해비용 평가 결과에 대한 이해관계자 간 해석의 차이가 존재할 수 있음.
- 본 연구 피해비용평가의 목적이 지역자원시설세와의 비교에 있으므로 최대한 합리적으로 피해비용을 주장하기 위해 선행사례 및 근거를 통해 뒷받침될 수 있는 범위로 분석 범위를 한정하였으며, 전문성 및 신뢰도가 높은 국가 및 국제기구의 평가사례를 활용하여 본 연구의 분석 틀을 수립하였음
- 또한 본 연구는 총 5차년의 다년차 과제이기 때문에 연구기간 동안 다양한 정책 환경의 변화가 존재함.
- 특히 연구시작 시점에 비해 최근 탄소중립, 지속가능경영 등이 주요 정책 아젠다로 떠오름에 따라 석탄화력발전시설은 점차적으로 폐쇄 및 축소되고 있는 추세임.
- 이에 따라 충남도의 대기환경은 과거 대비 개선될 것으로 예상되지만, 석탄화력이 차지하던 세수 측면의 기여수준이 감소될 것이므로 이로 인한 지역경제의 부정적 영

향이 우려되고 있음.

- 본 연구의 범위는 석탄화력의 건강피해비용 평가 및 그에 근거한 증세 방안 마련이지만 동 과업의 궁극적인 목적이 석탄화력발전으로 인한 주변지역영향을 올바르게 평가하고 영향을 최소화하기 위한 방안을 마련하는데 있음을 고려하였을 때, 석탄화력발전 조기 폐쇄를 고려한 세수 감소 영향 또한 광의의 석탄화력발전 영향이라고 볼 수 있음.
- 이에 따라 5차년도 연구 시 석탄화력발전 운영 여건 및 이에 따른 지역 영향에 대한 지역의 인식을 반영하여 지역자원시설세 증세방안 및 활용방안에 대한 정책적 제언을 마련하고자 함.

Part 4

생태환경 모니터링

제1장 서론

1. 연구배경 및 목적
2. 연구범위 및 연구내용
3. 연구추진체계
4. 연구성과
5. 연구성과 활용 및 확산
6. 5차년도 연구계획

1. 연구배경 및 목적

- 환경부 국가미세먼지정보센터에서는 국가 대기오염물질 배출량을 대기정책지원시스템 (Clean Air Policy Support System, CAPSS)을 통해 공개하고 있음.
 - CAPSS 2016 대기오염물질 배출량 통계에 따르면 유연탄 화력발전소는 국내 총부유 먼지 (Total suspended particles, TSP) 배출의 0.5%, 황산화물 배출의 18.9%, 질산 화물 배출의 7.6%를 차지하고 있음. (환경부 국가미세먼지정보센터, 2016)
- 화력발전소는 대규모 점 오염원으로, 이는 단일 사업장으로 최대 규모의 대기오염물질 배출원임. 석탄 화력발전소가 대규모 대기오염물질의 배출원이라는 것이 널리 알려져 있는 상황에도, 화력발전소의 연돌에서 배출된 대기오염 물질이 인근 및 원거리 지역에 영향을 미치는 연구는 미미한 실정임. (주재민과 윤대옥, 2019).
- 충청남도는 전국 석탄화력발전소 59기 중 절반에 해당하는 29기가 위치하고 있어 온실가스 배출량과 지역 대기오염물질 배출 기여도가 높음.
 - 환경부 2018년 7월 4일 보도자료에 따르면 굴뚝 자동측정기기가 부착된 635개 사업장의 2017년 대기오염물질 연간 배출 총량은 36만 1,459톤이며, 업종별로는 발전업이 16만 8,167톤으로 47%를 차지하고 있었으며, 국내 다량 배출량사업장 오염물질 배출량 상위 10위권 안에 충남지역 화력발전소 3곳이 포함되어 있음. (환경부, 2018)

[표 1.1] 다량배출사업장 오염물질 배출량 상위 10개소 (환경부 2018)

순위	사업장명	시·도	합계	먼지	SOx	NOx	HCl	HF	NH ₃	CO
1	남동발전 삼천포본부	경남	28,432,715	522,066	13,420,162	14,490,487				
2	현대제철(주)	충남	21,849,496	486,018	10,899,531	10,463,613	334			
3	태안화력본부	충남	20,341,083	644,979	8,722,831	10,973,273				
4	포스코 광양제철소	전남	19,997,116	227,389	9,260,432	10,505,504	3,564			227
5	보령화력 발전본부	충남	18,196,984	412,766	8,355,074	9,429,144				
6	남부발전 하동화력	경남	16,645,742	304,547	7,710,328	8,630,867				
7	당진화력본부	충남	15,978,327	390,705	6,762,511	8,825,111				
8	쌍용양회공업 동해공장	강원	14,861,226	348,177		14,497,749	15,300			
9	포스코	경북	14,611,093	125,681	4,375,209	10,104,012	1,562			4,629
10	삼표시멘트 삼척공장	강원	11,415,865	203,026		11,211,481	1,358			

- 화력발전소가 대기환경에 미치는 영향은 인체적·사회적으로 매우 크지만, 실제 화력발전소 관련 연구는 피해 정도를 과학적으로 분석하고 증명하는 연구보다는 ‘주변지역 주민들에 대한 건강·피해비용 산정’ 또는 ‘방지시설 개선에 따른 배출억제에 관한 연구’가 주를 이루었음. (Patricia, 2019)
 - 국내에서는 해양환경에 대한 일부 연구가 진행되어 발전 온배수에 의한 해양생태계 및 수산업의 피해가 일부 규명되었지만(맹준호 등, 2017 ; 정윤희 등, 2018; 이순길, 1987) 육상 생물에 대한 연구는 전무한 실정임.
- 본 연구는 화력발전소 주변지역의 육상 생물(동·식물)에 대한 모니터링 및 오염연구를 통하여 화력발전소 주변지역의 생태계 영향을 체계적으로 조사하고 분석하고자 함.

2. 연구범위 및 연구내용

2.1. 시간적 범위

- 연구 수행기간 : 2020. 12월 ~ 2021. 12월 (1년)

2.2. 공간적 범위

- 산림생태계 오염물질 모니터링 분야
 - 시험구 : 보령화력발전소 일원(보령 청소면·성주면), 서천화력발전소 일원(서천 서면)
 - 대조구 : 충북 보은, 경남 함양, 전남 장흥
- 중금속 농도 모니터링 분야
 - 수질 및 저질 : 4개 화력발전소(당진, 서천, 보령, 태안) 주변 어류 연구대상지
 - 어류
 - 실험구 : 3개 화력발전소(보령, 태안, 서천) 주변 어류 연구대상지
 - 대조구 : 춘천 지내천

- 포유류
 - 실험구 : 당진 화력발전소 주변
 - 대조구 : 서산 희리산 주변
- 생태모니터링 분야
 - 식물 · 곤충 · 포유류
 - 실험구 : 4개 화력발전소(당진, 서천, 보령, 태안) 주변
 - 대조구 : 서천 팔봉산, 서산 희리산
 - 어류 : 4개 화력발전소(당진, 서천, 보령, 태안) 주변 하천

2.3. 내용적 범위

- 산림생태계 오염물질 모니터링
- 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링
- 화력발전소 주변지역 생태모니터링
- 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

2.3.1. 산림생태계 오염물질 모니터링

- 화력발전소의 원거리 영향을 파악하기 위해 화력발전소 인근지역과 원거리 대조구를 선정하여 연구 수행함.
 - 수은농도 장거리 이동 영향 파악을 위해 보령 화력발전소 인근지역(보령 청소면, 보령 성주면)과 서천화력발전소 인근지역(서천 서면)에서 수목 원판을 채취하여 분석함.
 - 대조구로 화력발전소와 거리가 먼 충북 보은, 경남 함양, 전남 장흥의 수목 원판을 채취하여 분석을 실시함.
- 화력발전소 주변지역 산림토양 수은농도 연구는 환경부에서 실시한 토양오염실태조사 결과를 활용하여 분석함.

2.3.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링

- 수질과 저질의 중금속 농도는 4개 화력발전소 주변지역 하천 내 어류 모니터링 지점에서 시료 채취 후 분석을 실시함.
- 어류 중금속 농도는 모니터링 종으로 선정한 붕어를 대상으로 3개 화력발전소(보령, 태안, 서천)와 대조군으로 춘천 지내천에서 붕어를 채집하여 분석함.
- 포유류 중금속 농도는 실험군으로 당진 화력발전소와 대조군으로 서산 희리산 지역에서 설치류를 포획하여 분석함.

2.3.3. 화력발전소 주변지역 생태모니터링

- 화력발전소 주변 생물상 조사를 위해 식물, 곤충, 포유류 분야는 2차년도와 3차년도에 이어서 동일한 방법으로 화력발전소 주변 지역과 대조구인 서산 희리산과 서천 팔봉산에서 생태조사를 실시함.
- 어류분야는 화력발전소 주변지역 하천을 대상으로 2차년도와 3차년도에 이어서 동일한 방법으로 어류상을 조사한 후 어류건강성평가법을 이용하여 어류의 건강성을 평가하였음.

2.3.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

- 식물 분야는 3차년도 조사에서 선정한 모니터링 후보종에 대한 추가 조사실시 후 최종 모니터링 종을 선정하고 선정종의 개체군, 생육상태 및 자생지 환경을 분석함.
- 곤충 분야는 3차년도에 모니터링종으로 선정한 지표배회성 곤충 8종에 대해 종 구성, 종수 및 개체수를 바탕으로 지역별 군집 간 유사도 분석을 실시함.
- 포유류 분야는 3차년도에 모니터링종으로 선정한 수달을 대상으로 카메라 트랩조사를 수행하여 지점별 수달의 상대 풍부도를 분석함.

- 어류 분야는 3차년도에 모니터링종으로 선정한 붕어와 송사리를 대상으로 채집된 개체를 대상으로 크기와 무게를 측정하여 Length-weight relationship 및 Condition factor(K)를 분석함.

3. 연구추진체계

- 화력발전소 주변지역의 동물에 대한 오염과 주변환경 오염연구를 통하여 화력발전소 주변지역의 생태계 영향을 체계적으로 조사하고 분석하고자 함.

3.1. 산림생태계 오염물질 모니터링

- 산림생태계 오염물질 모니터링은 주변 지역의 수목 및 토양의 수은 농도 변화 추이를 조사하고 분석하여 화력발전소에서 배출된 오염물질이 수목 및 토양의 수은 농도 변화에 미치는 영향을 분석함.
 - 수목 나이테 수은 농도 연구는 3차년도에는 화력발전소 인접지역에서 연구를 수행하였고 4차년도에는 원거리 영향 파악을 위해 화력발전소 인근지역과 원거리 대조구를 선정하여 분석함.
 - 또한 3차년도에 실시한 수은 농도 분석대상 수목이 위치한 지점의 산림토양 수은 농도 자료를 바탕으로 환경부 토양오염실태조사 결과를 분석하고 화력발전소의 수은 배출 영향 범위를 파악함.

3.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링

- 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링은 물환경(수질과 저질, 어류)과 포유류에서 중금속 농도 분석을 통해 중금속 오염 정도를 파악함.
 - 화력발전소 주변지역 및 대조구 지역에서 1세부에서 연구된 화력발전소 영향이 높은 중금속에 대하여 물환경(수질, 저질, 어류)과 육상(포유류)에서의 중금속 오염정도를 분석함.

3.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링

- 화력발전소 주변지역 생태모니터링은 식물, 곤충, 포유류, 어류 등 4개 분류군에 대하여 2차년도부터 지속적으로 화력발전소 지역과 대조군 지역에 대하여 생태모니터링을 수행하고 생물상을 파악함.
 - 2차년도부터 동일한 조사 방법으로 식물, 곤충, 포유류, 어류에 대하여 생태조사를 수행하여 화력발전소 주변지역 및 대조구 지역의 생물상을 파악함.

3.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

- 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링은 2차년도와 3차년도에 걸쳐 조사한 결과를 바탕으로 선정한 화력발전소 주변지역의 주요종에 대한 생태 모니터링을 수행하여 생물상의 분포 및 변화 추이를 파악함.
 - 식물 분야는 3차년도에 모니터링 후보종으로 12분류군의 17지점 선정하고, 4차년도에는 장기간 모니터링이 가능한 분류군을 각 지역별로 2분류군 2지점씩 선발한 후 개체수 및 식생 조사를 진행함.
 - 곤충 분야는 3차년도 선정된 모니터링 종을 대상으로 4차년도에는 종 구성, 종수 및 개체수를 바탕으로 지역별 군집 간 유사도를 산출하는 MEDIAN & KRUSKAL-WALLIS 쌍대검정 분석을 진행함.
 - 포유류 분야는 3차년도에 모니터링으로 선정한 수달을 대상으로, 4차년도에는 무인센서카메라를 이용하여 상대풍부도를 산출하여 분석함.
 - 어류분야는 3차년도에 모니터링 종으로 선정한 붕어와 송사리를 대상으로 Length-weight relationship 및 Condition factor(K) 분석을 하여 각 종별 환경 적응도를 분석함.

4. 연구성과

4.1. 산림생태계 오염물질 모니터링 결과

- 화력발전소의 수은 배출 영향 범위를 파악하기 위하여 화력발전소 기준 1km 이내의 시험구 2곳(충남 태안군 원북면, 충남 보령시 오천면)과 5~10km 이격 지점의 시험구 1곳(충남 서천군 서면), 10~20km 이격 지점의 시험구 2곳(충남 보령시 청소면 및 성주면)의 수목 나이테 수은 농도를 분석하였음.
 - 분석 결과, 수목 나이테 평균 수은 농도는 1km 이내 시험구에서 2.5~4.0ng/g, 5~10km 이격 시험구에서 2.5ng/g, 10~20km 이격 시험구에서 5.3~6.7ng/g로 나타나 충남 지역 내 화력발전소의 수은 배출 영향 범위는 최소 20km로 파악됨.
 - 또한, 1993~2019년의 대조구 3곳과 시험구 4곳(충남 태안 및 보령)의 수목 나이테 수은농도는 각각 평균 1.37, 4.11ng/g로 나타나 대조구에 비해 시험구가 약 3배 높은 것으로 나타남.
 - 2015~2019년의 대조구 및 시험구에 대한 수목 나이테(1993~2019년의 대조구와 시험구과 동일) 수은 농도는 각각 1.03, 2.23으로 나타나 시험구에서 2000년대 중반 이전에 비해 수은 농도가 감소하였음에도 대조구에 비해 여전히 2배 가량 높은 것으로 나타남. 이러한 결과를 통해 대기 중 수은의 장거리 이동성을 확인할 수 있었음.
- 산림토양 수은농도 분석을 위해 3차년도에 충남 태안과 보령의 화력발전소 기준 1km 이내 지점 시험구에서 시료를 채취 후 수은 농도를 분석하였음. 그 결과, 대조구에 비해 수은농도가 유의미하게 높다고 할 수 없었지만, 수목 나이테 수은농도 분석을 통해 확인하였던 수목 내 수은의 농축 가능성을 고려하여 공시목의 위치와 인접한 지점의 토양시료를 채취하여 수은오염을 모니터링할 필요가 있다고 판단함.
- 환경부 토양오염실태조사에 따르면, 2020년도 기준 토양 수은 농도는 전국 평균 38ng/g이었으며, 충남 지역의 경우 91.9ng/g로 전국에서 두 번째로 높은 것으로 나타남. 그러나 2020년도의 충청남도 토양오염실태조사 지역 중 산림지역의 측정지점은 전체 조사 지점의 2.18%인 5개 지점에 불과하고, 화력발전소 배출 대기오염물질을 확인할 수 있는 영향권 지점과는 관계가 다소 적었음.

4.2. 화력발전소 주변지역 중금속 모니터링 결과

- 충남화력발전소 주변 하천에 대한 수질과 저질의 중금속 농도를 조사한 결과, 당진 화력발전소 인근 하천에서 수체 내 중금속 중 Fe은 지점 1과 3에서 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l를 초과한 0.7 mg/l와 1.2 mg/l로 나타남.
 - Zn은 지점 1과 지점 3에서 각각 2.0 mg/l, 13.3 mg/l로 검출되어 어류폐사 기준치인 0.4~1.75 mg/l를 최대 7.6배 초과한 것으로 나타남. 당진화력발전소 하천 저질 내 중금속 중 Pb은 3개 지점 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 3등급(154~459 mg/kg)으로 분석됨.
 - Cu는 지점 1과 지점 3에서 3등급(229~1890 mg/kg)으로, 지점 2에서 2등급(48~228 mg/kg)으로 각각 나타났고 Zn은 지점 2에서 2등급(364~1,170 mg/kg)으로 확인되어 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것으로 조사됨.
- 태안 화력발전소 주변 하천 수질 중금속을 분석한 결과, Fe을 제외한 대부분 항목에서 환경부 어류치사 농도 기준치에 미달하는 것으로 나타남.
 - 태안 화력발전소 하천바닥 저질의 중금속 농도는 지점 1에서 Cd 1.0 mg/kg, 지점 2에서 Pb 70.6 mg/kg으로 각각 검출되어 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것 (2등급)으로 확인됨.
- 보령에서는 수체 내 중금속 분석 결과, Fe는 어류폐사 기준치 0.5 mg/l의 3~5배, Zn은 어류폐사 기준치인 0.4~1.75 mg/l 내로 검출되어 어류폐사의 위험에 일부 노출됨.
 - 하천 저질의 중금속 농도는 지점 2에서 Cd이 2등급, 지점 1에서 Cu와 Zn이 3등급으로 저서생물에 독성이 있을 가능성이 비교적 높은 것으로 나타났고 지점 1에서 Pb가 4등급으로 측정되어 저서생물에 독성이 나타날 확률이 매우 높은 것으로 확인되어 수생태계에 부정적인 영향을 주고 있는 것으로 분석됨.
- 서천화력발전소 주변지역 하천 수질과 수체 내 중금속을 분석한 결과, 수체 중금속항목 중 3차년도에는 Al이 0.05 mg/L, Fe가 0.1 mg/L로 검출되어 큰 문제가 없는 것으로 나타남.

- 그러나, 지점 1이 발전소 주차장과 신서천화력발전소 공사장과 인접해 있어 차량 등에서 나온 오염물질이 하천에 유입되어 3차년도 보다 Al과 Fe가 각각 3.2배, 6.8배 증가된 것으로 추정됨. 하천 저질 내 중금속 농도는 구리 항목에서 2등급 (Cu 228 mg/kg 이하)으로 나타나 ‘약간 나쁨’ 으로 분석됨.
- 어류 중금속 분석 종으로 화력발전소 지역내에서 공통으로 출현하는 붕어의 중금속 분석 결과, 대조군과 화력발전소 간 중금속 농도는 큰 차이를 보이지 않았으나, 대조구에서는 검출되지 않았던 Fe가 당진은 63.0 mg/kg, 보령은 41.3 mg/kg, 태안 19.6 mg/kg으로 나타나 국내 유통 민물어류 붕어의 Fe 평균 농도 8.129 mg/kg 보다 높은 값을 나타냄.
 - Al의 경우는 대조군은 9.69 mg/kg이 검출되었으나, 4개 시군의 평균 농도는 10.8 mg/kg으로 나타나 대조군에 비교하여 1.1 mg/kg이 높은 것으로 확인됨.
 - 포유류 중금속 모니터링 결과, 화력발전소 주변지역(당진)의 설치류가 대조구(서산)의 설치류보다 체내 중금속 함량이 전반적으로 높게 검출되었으나(납(Pb) 약 0.08ppm 높게 검출, 카드뮴(Cd) 약 2.09ppm 높게 검출, 비소(As) 약 0.17ppm 높게 검출), 포획 개체수 및 분석시료의 양이 부족하여 향후 지점 및 샘플 수 확대를 통한 유의미한 통계적 해석이 필요한 것으로 분석됨.

4.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링

- 2차년도에서부터 4차년도까지 화력발전소 주변지역의 식물분야 조사결과 누적 분류군수는 당진은 2차년도 278분류군에서 4차년도 298분류군으로 20분류군이 증가하였고, 태안은 2차년도 250분류군에서 4차년도 290분류군으로 40분류군이 증가함.
 - 보령 2차년도 254분류군에서 4차년도 270분류군으로 16분류군 증가하였고, 대조군인 서산 팔봉산은 2차년도 367분류군에서 4차년도 495분류군으로 128분류군이 증가함.
 - 대조군 서천 희리산은 3차년도 205분류군에서 4차년도 346분류군으로 141분류군 증가된 것으로 분석됨
- 2차년도에서부터 4차년도까지 곤충분야 조사결과 누적 종수는 당진은 2차년도 166종에서 4차년도 191종으로 25종이 증가하였고, 태안은 2차년도 157종에서 4차년도 183종으로 26종이 증가함.
 - 보령은 2차년도 82종에서 4차년도 114종으로 28종이 증가하였고, 서천은 2차년

- 도 55종에서 4차년도 76종으로 21종이 증가함.
- 대조구인 서산 팔봉산은 3차년도 146종에서 4차년도 187종으로 41종이 증가하였고, 서천 희리산은 2차년도 157종에서 4차년도 199종으로 총 42종이 증가함.
- 2~4차년까지 포유류 분야 조사결과 누적 종수는 당진 2년차 8종에서 4년차 11종으로 3종이 증가하였고, 태안은 2차년도 6종에서 4차년도 9종으로 당진과 마찬가지로 3종이 증가함.
 - 보령은 2차년도 8종에서 4차년도 8종으로 종수 변화가 없었으며, 서천은 2차년도 7종에서 4차년도 10종으로 3종이 증가하였음.
 - 대조구인 서산 팔봉산은 2차년도 8종에서 4차년도 8종으로 종 증가가 없었고, 희리산은 3차년도 6종에서 4차년도 8종으로 2종이 증가함.
- 2~4차년까지 어류분야 조사결과 누적종수는 당진은 2차년도 14종에서 4차년도 22종으로 8종이 증가하였고, 보령은 2차년도 17종에서 4차년도 19종으로 2종 증가함. 서천과 태안은 2차년도 각각 2종과 15종이고 4차년도의 종수 변화는 없었음.

4.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

- 3차년도에서부터 4차년도까지 화력발전소 주변지역 식물분야 주요종 모니터링은 3차년도에 선정된 지역별 모니터링 대상종 17분류군을 대상으로 4차년도에는 대상종 주변 방형구 내의 식생 조사, 층별 피도 분석함.
 - 대상종의 개체수 변화 추이 및 생육상태와 훼손 위험도를 고려하여 지역별 2분류군, 2개 지점씩 총 10분류군, 10개 지점을 선정하였음.
 - 주요종 모니터링 결과, 개체수 감소를 보인 대상종은 예덕나무(서천)로 칙, 노박덩굴 등 덩굴성 식물의 피압으로 인해 개체수가 감소된 것으로 판단되며, 개체수 증가를 보인 대상종은 수리딸기(태안, 보령, 희리산)로 최소 2개체에서 최대 14개체 증가 등 전반적인 개체수 증가 추세를 보였음.
- 곤충 분야는 주요종 모니터링을 위해 생태계 내의 역할, 조사지역 내 서식 여부, 개체의 풍부도 등을 고려하여 8종의 모니터링대상종(검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레, 윤납작먼지벌레, 일본칠납작먼지벌레, 폭탄먼지벌레, 쌍무늬먼지벌레, 고려소똥풍뎡이)을 선정함.

- 채집된 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수는 조사구와 대조구 사이에서 일정한 경향성이 나타나지 않아 곤충상 조사와 유사한 결과를 보였으며, 모니터링 대상 중 중 대형딱정벌레류에 속하는 검정명주딱정벌레, 홍단닥정벌레, 멧쟁이딱정벌레가 확인된 지역은 그렇지 않은 지역에 비해 종수 및 개체수가 많은 경향성을 확인함.
- 포유류 분야는 멸종위기야생생물 I급 수달과 멸종위기야생생물 II급 삵을 모니터링 종으로 선정하고, 무인센서카메라를 이용하여 모니터링함.
 - 모니터링 결과 수달은 보령과 태안 지역에서 확인되었고, 보령 CB02 지점에서 수달 상대풍부도 지수가 18.18로 가장 높게 나타남. 삵은 보령, 태안, 서천, 당진 지역에서 확인되었으며, 태안 CT03 지점에서 상대풍부도 지수가 21.57로 가장 높게 나타남.
- 어류분야 모니터링종으로 환경변화에 대한 내성이 강한 붕어와 송사리로 선정하여 2021년 2월과 4월에 출현한 개체들 대상으로 모니터링 실시함.
 - 당진조사구 붕어와 송사리의 성장도 b값은 3.0을 넘지 못하였으며 비만도(K)도 음(-)의 값을 나타내 서식환경이 양호하지 못하거나 개체군 크기가 큰 관계로 종내 및 종간 경쟁이 발생하였을 가능성이 높았음. 또한, 수생태 조절자 역할을 하는 핵심어종(keystone species) 소실로 인해 성장도와 비만도가 낮게 나타난 것으로 분석됨.
 - 태안조사구 붕어와 송사리의 성장도와 비만도는 모두 양호한 값을 보여 두 개체군 모두 본 서식지에서 잘 정착하였으나 다른 조사구 지역에 비해 크기가 큰 붕어 개체가 관찰되지 않았음.
 - 보령조사구 붕어 성장도는 3.0을 조금 넘고, 비만도는 양(+)의 값을 보여 비교적 안정적인 것으로 확인, 2차년도 2019년 6월에는 3.07, 3차년도 2020년 3월은 3.16 값을 나타내어 전년 대비 성장도가 다소 낮아짐. 송사리 성장도 b값은 1차, 2차 각각 1.43과 2.13으로 나타났고 비만도도 모두 음(-)의 값을 나타났는데 2차년도 2019년 6월에 3.03, 3차년도 2020년 3월에는 3.36의 ‘매우 양호한 값’에서 급격히 낮아짐.
 - 서천조사구 붕어 성장도 b값은 2.7이고 비만도는 음(-)의 값을 보여 개체군 성장이 양호하지 못한 것으로 나타남. 2차년도 2019년 6월에 붕어의 성장도는 3.10, 3차년도 2020년 3월은 2.88로 개체군 성장도가 지속 낮아지는 것으로 확인되었음. 특히, 4차년도 2021년 4월에 붕어의 성장도가 2.70으로 나타나 3차년도 2020년 3월보다 성장도가 0.18 더 낮아진 것으로 확인되어 서천 하천 연속성 단절로 인하여 수환경이 점차 나빠진 결과로 판단됨.

5. 연구성과 활용 및 확산

5.1. 브로슈어 배포·확산

- 2차년도와 3차년도의 화력발전소 주변지역 생물상 조사 결과를 바탕으로 3차년에 화력발전소 주변 생물종 현황을 알리고자 브로슈어를 제작하였고, 4차년도에 관련 브로슈어를 확대 배포·홍보·확산하고자 노력함.
 - － 보고회 개최시 지자체, 전문기관, NGO 등에 브로슈어 배포를 통한 화력발전소 주변지역 생물상 조사결과를 홍보함.

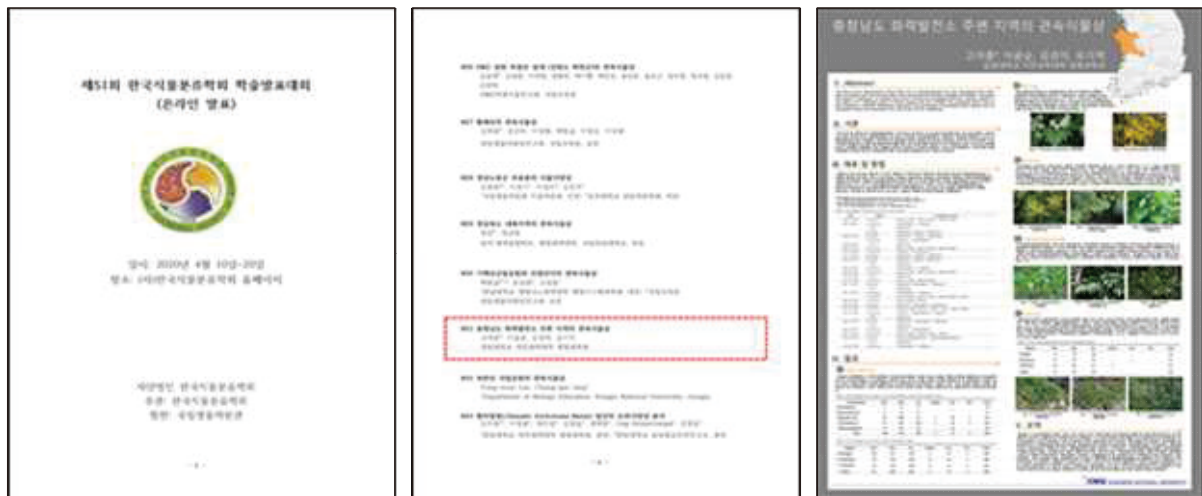


[그림 1.1] 2-3차년도 연구 성과물로 화력발전소 주변지역의 동식물상에 대한 브로슈어 제작

5.2. 학술대회 발표 및 논문 투고

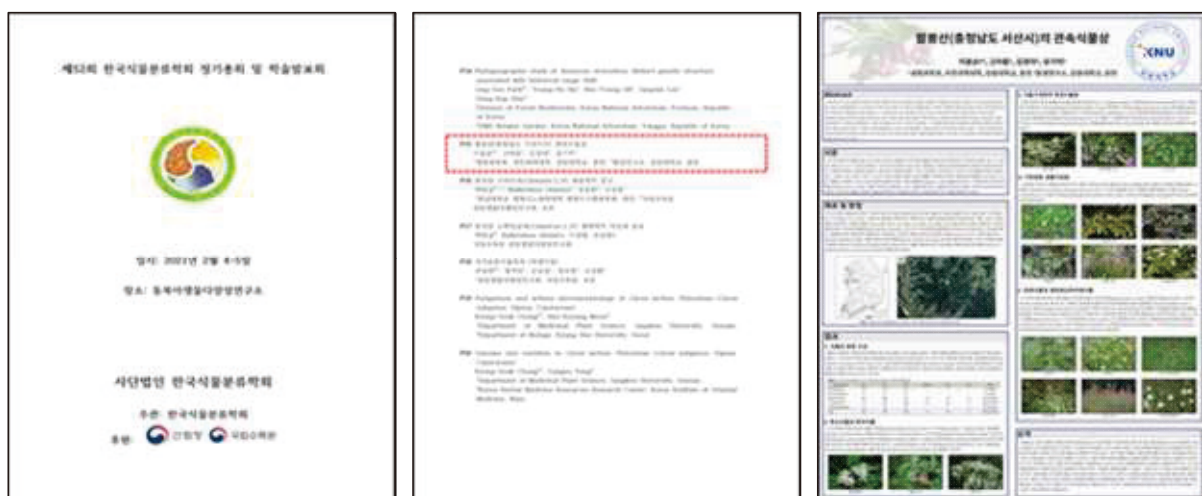
5.2.1. 학술대회 발표

- 한국식물분류학회 주관 2020년도 제 51회 학술발표회에 식물분야 연구결과를 활용하여 충청남도 화력발전소 주변 지역의 관속식물상을 주제로 학술 논문집에 게재함. (일시: 2020년 4월 10일 ~ 4월 20일, 온라인 발표)



[그림 1.2] 학술적 성과(학술대회 참가 및 게재 논문)

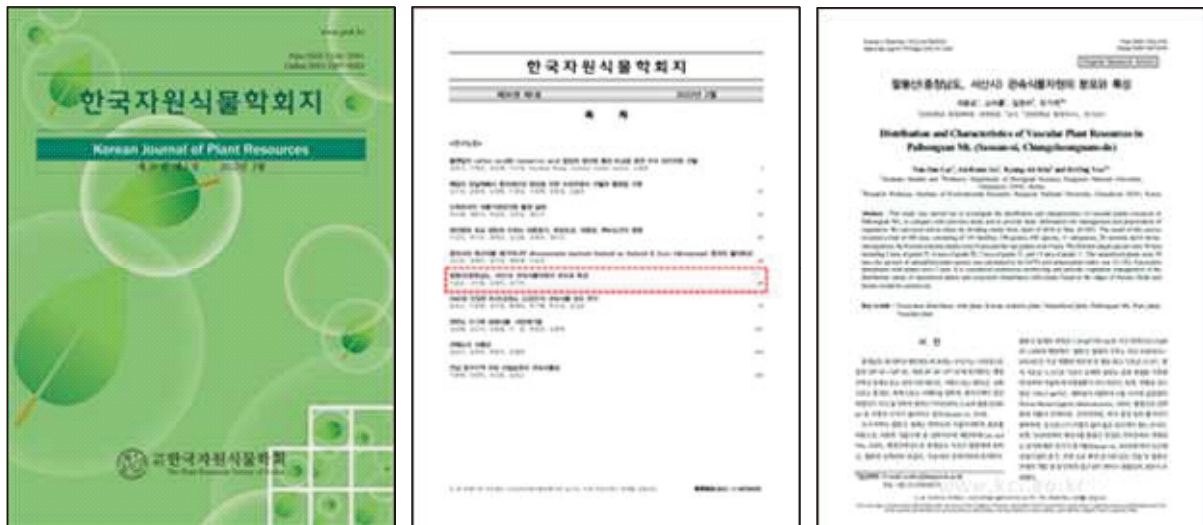
- 한국식물분류학회 주관 2021년도 제52회 학술발표회에 식물분야 연구결과를 활용하여 대조구 지역인 팔봉산의 관속식물상을 주제로 학술 논문집에 게재함. (일시: 2021년 2월 4일 ~ 2월 5일, 온라인 발표)



[그림 1.3] 학술적 성과(학술대회 참가 및 게재 논문)

5.2.2. 논문 게재

- 한국자원식물학회에서 발간하는 한국자원식물학회지 (KCI 등재)에 식물분야 연구결과를 활용하여 대조구 지역인 팔봉산의 관속식물상을 주제로 논문을 게재하였음.
 - 게재 정보: 이운순, 고아름, 김정아, 유기억. 2022. 팔봉산(충청남도, 서산시) 관속식물 자원의 분포와 특성. 한국자원식물학회지 35권 1호 pp. 44-70 (ISSN 1226-3591)



[그림 1.4] 학술적 성과(학술대회 참가 및 게재 논문)

- 2차년도 식물분야 연구결과를 활용하여 (홍상균: 충청남도 화력발전소 일대의 관속식물 상) 화력발전소 주변지역의 식물상 분포 연구에 관한 학사학위논문을 작성하여 학술적 성과에 기여함. (발표: 2018년 10월 12일)



[그림 1.5] 학술적 성과(학사 학위논문)

6. 5차년도 연구계획

- 5차년도에는 화력발전소 주변지역 오염정도를 보다 명확히 하고 과학적 근거를 축적하고자, 수목 나이테 및 산림토양 수은 농도 분석과 화력발전소 인근 하천 퇴적물 및 어류 중금속 분석, 포유류 중금속을 집중적으로 분석할 계획이며, 2차년도부터 4차년도까지 진행한 화력발전소 주변지역 생물종과 기후환경영향 취약종을 종합 정리한 도감을 제작할 예정임.
- 화력발전소 중심으로 거리별 수목의 나이테 및 산림토양 수은 농도 분석을 위해 3차년도와 4차년도에 수목 나이테 수은농도를 분석한 결과를 토대로 5차년도에는 시험구와 충남 화력발전소 기준 이격거리의 범위를 1~25km로 선정하고, 약 5km 간격으로 시험구를 배치하여 수목 나이테 및 산림토양의 수은농도를 분석하고자 함.
 - 또한, 시료채취 시기에 대한 차이로 나타나는 수은농도 분석결과의 오차를 최소화하기 위하여 최대한 유사한 시기에 각 시료를 채취하여 분석할 계획임.
- 화력발전소 인근 수계의 하천, 퇴적물 및 어류의 중금속 오염농도 분석을 위해 화력발전소 인근 하천의 상류, 중류 및 하류뿐만 아니라 오염지역과 중금속 농도를 비교하고 대조 하천을 선정하여 각 지점에서 물과 퇴적물 시료를 채취하는 한편, 화력발전소와 연관성 있는 중금속 항목에 대하여 분석할 계획임. 아울러 어류는 각 하천별우점종, 아우점종, 우세종으로 구분하고 종별 중금속 분석을 실시할 예정임.
- 화력발전소 주변 지역 포유류 중금속 농도 분석을 위해 충남 내 화력발전소 주변지역 및 대조지역(청정지역, 산업공단지역, 타 화력발전소 지역 등)의 소형포유동물을 포획하여 화력발전소와 연관성이 있는 중금속 분석과 중금속 오염 정도를 파악할 예정임.
- 2차년부처 4차년도까지 진행한 화력발전소 주변지역 생물종 및 기후환경영향 취약종은 향후 환경변화를 파악하는데 이용할 수 있고 타 연구에 기초자료를 활용할 수 있도록 종별 주변환경, 개체수, 모양, 연차별 변화, 특징 등을 종합적으로 반영하여 디지털로 도감을 제작할 계획임.

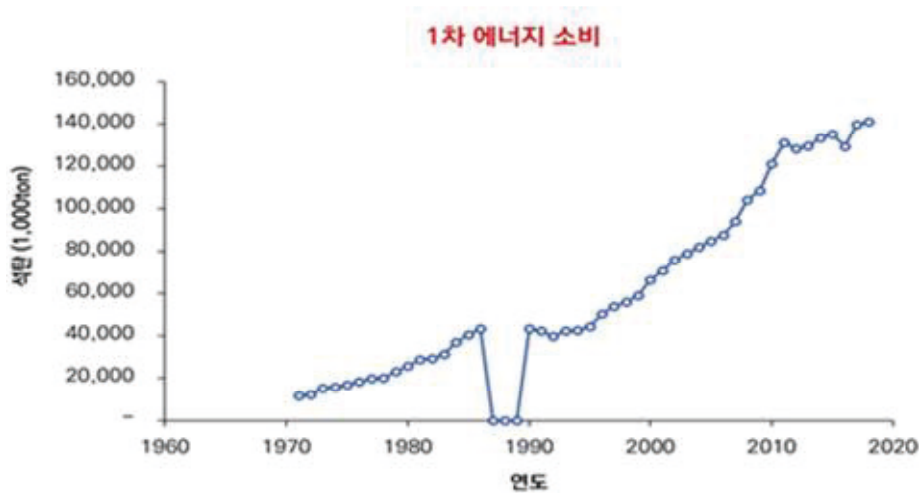
제2장 산림생태계 오염물질 모니터링

1. 화력발전소 주변지역 수목 나이트 수은농도
2. 화력발전소 주변지역 산림토양의 수은농도

1. 화력발전소 주변지역 수목 나이트 수은농도

1.1. 국내 화력발전시설 기반 에너지 소비량

- 에너지경제연구원의 2021년 1월 에너지통계월보에 따르면 1차 에너지 공급의 주요 구성원은 석탄, 석유, 액화천연가스, 수력, 원자력, 신재생에너지로 2019년 기준 각 구성비는 석탄 28.2%, 석유 38.5%, 액화천연가스 18.0%, 수력 0.5%, 원자력 9.2%, 신재생에너지 5.6%임.
- 1인당 에너지 소비량이 증가함에 따라 1차 에너지 공급량 또한 많아지고 있으며, 전체 공급원의 2번째로 높은 비율을 차지하는 석탄의 소비량 또한 해를 거듭할수록 증가하고 있음 (그림 2.1).



[그림 2.1] 1차 에너지 공급에 사용된 석탄의 연도별 총량

1.2. 석탄화력발전시설의 수은배출

- 2004년 12월 31일까지 적용되는 수은배출허용기준에는 화력발전시설이 별도의 배출시설로 분류되지 않고 기타 시설에 포함되어 있었으며, 수은배출허용기준은 $5\text{mg}/\text{Sm}^3$ 였음. 이는 2005년 1월 1일부터 적용되는 배출허용기준과 동일하였으며, 2000년대 중반까지 화력발전시설에 대한 수은배출허용기준이 구체적으로 마련되어있지 않았음.

[표 2.1] 2005년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준

배출시설명	적용기간 및 수은배출허용기준	
	2004년 12월 31일까지	2005년 1월 1일부터
소각시설 또는 소각보일러	5mg/Sm ³ 이하	0.1mg/Sm ³ 이하
기타 시설	5mg/Sm ³ 이하	5mg/Sm ³ 이하

- 2005년 이후 수은배출허용기준이 적용되는 배출시설에 ‘생활폐기물 고형연료제품 (RDF) 또는 폐플라스틱 고형연료제품 (RPF)’ 가 추가되었으나, 2009년 12월 31일까지 적용되는 수은배출허용기준에도 이전과 마찬가지로 화력발전시설은 ‘그 밖의 배출 시설’ 에 포함되었음. 또한 ‘그 밖의 배출시설’ 의 수은배출허용기준은 개정 없이 5mg/Sm³ 이하를 유지하였음.
- 2010년 1월 1일부터 적용되는 수은배출허용기준에 ‘발전시설 (고체연료 사용시설)’ 의 배출시설명이 신설되었으며, 배출허용기준은 0.1mg/Sm³ 이하로 기존 (2009년 12월 31일까지)의 5mg/Sm³ 이하에 비해 대폭 감소되었음.

[표 2.2] 2010년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준

2009년 12월 31일까지 적용		2010년 1월 1일부터 적용	
배출시설명	배출허용기준	배출시설명	배출허용기준
소각시설 또는 소각보일러	0.1mg/Sm ³ 이하		
생활폐기물 고형연료제품 (RDF) 또는 폐플라스틱 고형연료제품 (RPF) 전용시설	0.1mg/Sm ³ 이하	폐수 · 폐기물 · 폐가스 소각처리시설(소각보일러를 포함한다) 및 고형연료제품 사용시설	0.1mg/Sm ³ 이하
〈신 설〉	—	발전시설(고체연료 사용시설)	0.1mg/Sm ³ 이하
〈신 설〉	—	제차 금속제조시설 중 소결로	0.1mg/Sm ³ 이하
〈신 설〉	—	시멘트 · 석회 · 플라스터 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설	0.1mg/Sm ³ 이하
그 밖의 배출시설	5mg/Sm ³ 이하	그 밖의 배출시설	5mg/Sm ³ 이하

- 2010년 1월 1일부터 적용되는 수은배출허용기준은 2014년 12월 31일까지 동일하게 적용되었으며, 2015년 1월 1일부터 개정된 수은배출허용기준은 고체연료 사용 발전시설에 대해 0.05mg/Sm³로 확인되었음.

[표 2.3] 2020년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준

2014년 12월 31일까지 적용		2015년 1월 1일부터 적용	
배출시설명	배출허용기준	배출시설명	배출허용기준
폐수·폐기물·폐가스 소각처리 시설(소각보일러를 포함한다) 및 고형연료제품 사용시설	0.1mg/Sm ³ 이하	폐수·폐기물·폐가스 소각처리 시설(소각보일러를 포함한다) 및 고형연료제품 사용시설	0.08mg/Sm ³ 이하
발전시설(고체연료 사용시설)	0.1mg/Sm ³ 이하	발전시설(고체연료 사용시설만 해당한다)	0.05mg/Sm ³ 이하
제1차 금속제조시설 중 소결로	0.1mg/Sm ³ 이하	금속제조시설 중 소결로	0.05mg/Sm ³ 이하
시멘트·석회·플라스터 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설	0.1mg/Sm ³ 이하	시멘트·석회·플라스터 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설	0.08mg/Sm ³ 이하
그 밖의 배출시설	5mg/Sm ³ 이하	그 밖의 배출시설	2mg/Sm ³ 이하

- 2015년 1월 1일부터 2019년 12월 31일까지 동일한 수은배출허용기준이 적용되었고 2020년 1월 1일부터 적용되는 고체연료 사용 발전시설의 수은배출허용기준은 $0.04\text{mg}/\text{Sm}^3$ ($40\mu\text{g}/\text{Sm}^3$)로 개정 전 대비 $0.01\text{mg}/\text{Sm}^3$ 낮아졌음.

[표 2.4] 2020년부터 적용되는 배출시설 별 수은배출허용기준

2019년 12월 31일까지 적용		2020년 1월 1일부터 적용	
배출시설명	배출허용기준	배출시설명	배출허용기준
폐수·폐기물·폐가스 소각처리 시설(소각보일러를 포함한다) 및 고형연료제품 사용시설	$0.08\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하	폐수·폐기물·폐가스 소각처리 시설(소각보일러를 포함한다) 및 고형연료제품 사용시설	$0.05\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하
발전시설(고체연료 사용시설)	$0.05\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하	발전시설(고체연료 사용시설만 해당한다)	$0.04\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하
제1차 금속제조시설 중 소결로	$0.05\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하	제1차 금속제조시설 중 소결로, 용광로(용광용반사로를 포함한다), 용해로, 전로 및 건조로	$0.04\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하
시멘트·석회·플라스터 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설	$0.08\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하	시멘트·석회·플라스터 및 그 제품 제조시설 중 시멘트 소성시설	$0.05\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하
그 밖의 배출시설	$2\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하	그 밖의 배출시설	$0.1\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하

- 국립환경과학원은 석탄화력발전시설의 배출계수(석탄 1톤 연소 시 배출되는 수은의 양)가 2020년 $2.86\text{mg}/\text{ton}$ 으로 2007년 대비 약 84% 감소했다고 보고함. 이는 농도로 환산할 경우 $0.3\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 로 수은배출허용기준인 $40\mu\text{g}/\text{Sm}^3$ 에 비해 낮은 수치임.
- 2008년부터 석탄화력발전시설에 대해 질소산화물, 황산화물 등의 미세먼지 원인물질에 대한 배출허용기준을 5차례에 걸쳐 강화됨에 따라 발전시설 내 원인물질 처리를 위한 시설의 설치 및 운영이 이루어져 왔음.

- 국립환경과학원은 최근 ‘일반적으로 석탄화력발전시설에 수은만을 처리하기 위한 대기오염방지시설이 있지 않지만, 질소산화물 등 미세먼지 원인물질을 처리하기 위한 시설의 운영이 대기 중으로 방출되는 수은의 농도를 동시에 감소시켰다’ 고 발표함.
 - 안명찬 외 (2008)가 수은의 습식 침적에 가장 기여도가 높다고 알려진 입자상 수은이 대부분 PM_{2.5}의 형태로 대부분 존재한다고 보고한 것으로 보아 대기로 방출되는 수은이 미세먼지 저감시설에 의해 감소되었을 수 있을 것으로 판단됨.

1.3. 수은으로 인한 대기오염

- 수은은 상온에서 액체 상태인 은빛 금속으로 환경중 잔류성, 장거리 이동성, 독성이 있는 화학물질로, 원소상태의 수은과 수은화합물로 존재함 (환경부, 2015).
- 수은화합물은 원소수은 (Hg^0), 산화수은 (Hg^{2+}), 입자상수은 (Hg_p)로 크게 3가지형태로 존재하며, 원소수은과 산화수은은 인위적 배출원에 의해 대기 중으로 배출된다고 알려져 있음 (Pudasainee 외, 2009).
 - 원소수은은 대기 중 존재하는 수은의 대부분을 차지하고 대기 중에서 150~350일, 길게는 1년 이상의 장기적으로 체류한다고 보고된 바 있음 (환경부, 2020; Li 외, 2009). 이에 반면, 산화수은은 체류시간이 0~5일이고 입자상수은은 0~10일 동안 대기 중에서 체류하는 것으로 알려져 있음 (환경부, 2020).
- 한편, Jody Ericksen의 연구결과에 따르면 수목의 수은 흡수기작은 대기 중의 수은이 수목 잎의 기공으로 흡수된 후 낙엽 및 낙지가 부식되어 토양으로 수은이 누적되고, 다시 대기로 방출되는 과정으로 순환됨을 설명하고 있음.

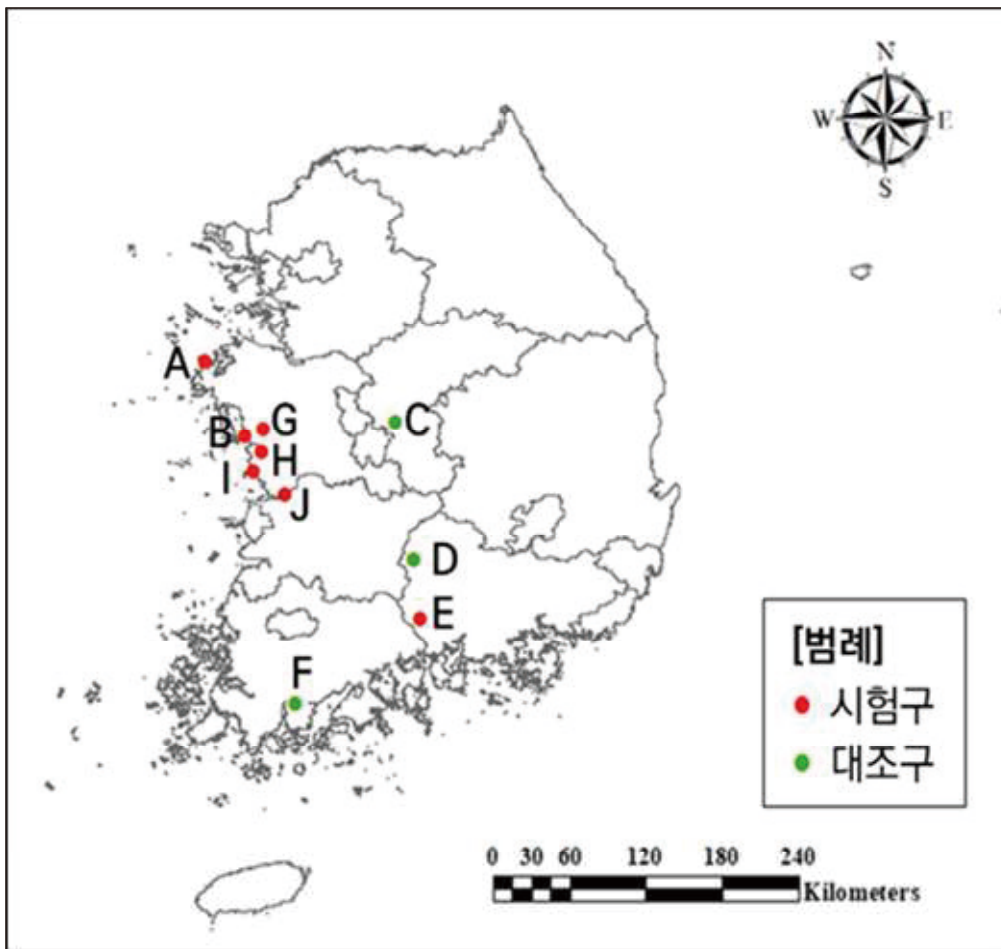
1.4. 화력발전소 주변 지역 수목 나이트의 수은농도

- 화력발전이 수은 배출에 미치는 영향을 구명하기 위해 화력발전소의 직접 영향지역인 중부 화력발전소(태안 및 보령) 인접 지역의 수목 원판을 채취하였고, 대조구는 화력발전소의 영향이 없는 충북 보은 및 전남 장흥 지역의 수목 원판을 채취하여 수은 농도를 분석 실시함.
 - － 타 지역의 화력발전소와 비교하여 중부화력발전소의 수은 배출 규모를 파악하기 위해 남부 및 호남화력발전소 주변의 수목 원판을 추가로 채취하여 수은 농도를 분석함.
 - － 또한, 화력발전소로부터 1km 이내의 인접지역 뿐 아니라 화력발전소로부터 10~20km 떨어진 지역 수목의 나이트에서 수은 농도를 분석하여 수은의 장거리 이동을 파악함.

1.4.1. 수목 나이트 수은농도 연구방법

가. 조사지 개요

- 3차년도 연구(2020년)의 시험구는 화력발전소에 따라 서부화력발전의 충남 태안과 중부 화력발전의 충남 보령 내 발전소 인접 지역(발전소로부터 1km 이내)으로 선정하였으며, 타 지역 화력발전소 인근 지역과의 비교를 위하여 남부 화력발전의 경남 하동 내 발전소 인근지역으로 선정하였음. (그림 1.1, 표 1.1).
- 4차년도 연구(2021년)에서는 수은농도 장거리 이동의 영향을 파악하기 위해 화력발전소 원거리 지점에 시험구를 정하였음.
 - － 보령 화력발전소로부터 10~15km 떨어진 ‘보령 청소면’ 과 15~20km 떨어진 ‘보령 성주면’ , 서천화력발전소로부터 5~10km 떨어진 ‘서천 서면’ 을 시험구로 선정함. (그림 1.1, 표 1.74)
 - － 대조구의 경우 화력발전소의 위치와 거리가 멀고 화력발전소의 영향이 비교적 적은 충북 보은, 경남 함양 및 전남 장흥 산림 지역으로 선정하였음.
 - － 5차년도 연구에서는 화력발전소 기준 거리별 시험구를 추가하여 4차년도에 비해 공간적으로 촘촘한 범위의 연구 결과를 도출할 예정이며 1세부의 ‘지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정’ 연구의 결과를 화력발전소의 수은 배출에 따라 화력발전소 인접 지역 시험구 수목의 수은 농도 변화 분석의 근거로 활용하여 고찰할 계획임.



[그림 2.2] 공시목 및 토양 시료 채취를 위한 시험구 및 대조구 선정

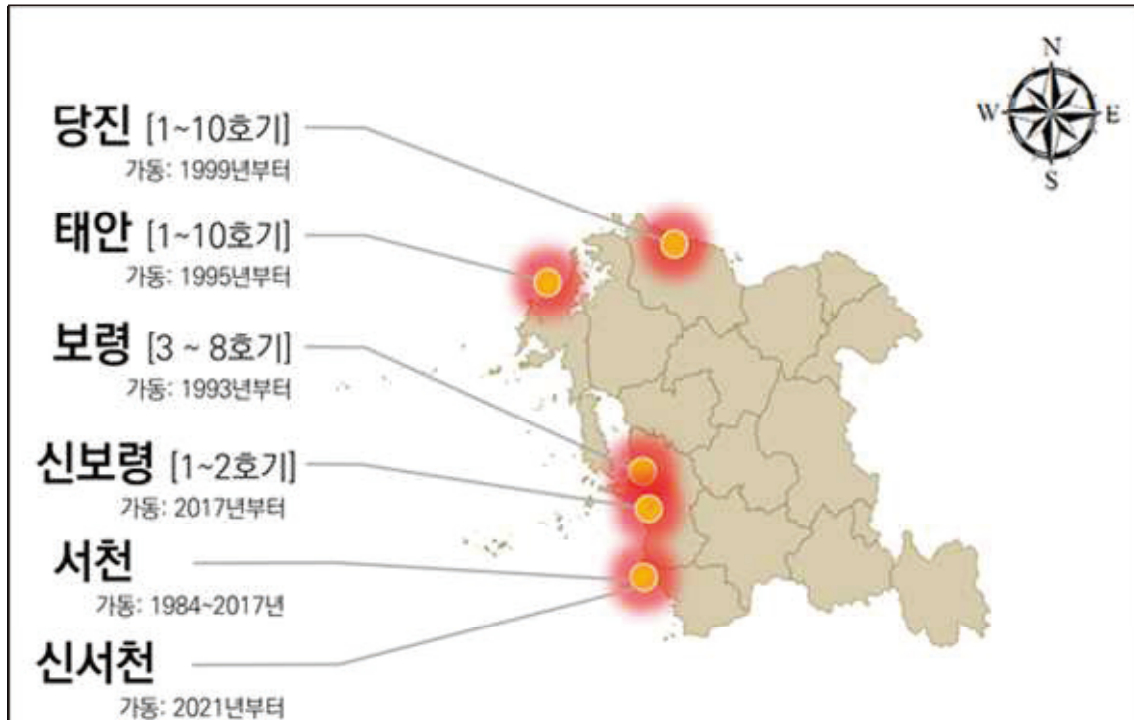
[표 2.5] 환경오염분야 시험구 및 대조구 공시목 현황

분석 연도	조 사 대상지	구분	주 소	화력발전소 기준 이격거리 (km)	수 종	근주 직경 (cm)	시료 채취 시기	
2020년 (3차년)	A	충남 태안	태안 화력	충남 태안군 원북면 방갈리830, 830-2	〈1	적송 적송	약 35 약 40	2020.02.
	B	충남 보령	보령 화력	충남 보령시 오천면 오포리 산200	〈1	적송 적송	약 30 약 40	2020.02.
	C	충북 보은	대조구	충북 보은군 회인면 용촌리 산68-1	-	적송 적송	약 30 약 30	2019.05.
	D	경남 함양	대조구	경남 함양군 병곡면 광평리 산23	-	적송 적송	약 30 약 30	2019.05.
	E	경남 하동	하동 화력	경남 하동군 청암면 상이리 산366	25~30	적송 적송	약 30 약 25	2019.05.
	F	전남 장흥	대조구	전남 장흥군 운주리 산65-25	-	리기다 리기다	약 40 약 35	2019.05.
2021년 (4차년)	G	충남 보령	중부 화력	충남 보령시 청소면 성연리 산48	10~15	적송	약 30	2021.07.
	H	충남 보령	중부 화력	충남 보령시 성주면 개화리 산23-15	15~20	적송	약 30	2021.07.
	I	충남 서천	중부 화력	충남 서천군 서면 월리 산45	5~10	곰솔	약 50	2021.08.
	J	전북 군산	군산 화력	전북 군산시 성산면 성덕리 산38-3	약 5	곰솔	약 30	2021.08.

- 태안화력발전소는 1995년부터 2017년까지 10호기의 화력발전소가 준공되었으며, 전기집진기는 1994년, 탈황설비는 1996년, 탈질설비는 2005년에 최초로 준공됨.
- 보령화력발전소는 1983년부터 2008년까지 8호기의 화력발전소가 준공되었으며, 보령 1, 2호기가 2020년 12월 조기 폐쇄되면서 현재는 6호기가 운영중에 있음. 전기집진기는 1984년, 탈황 및 탈질설비는 2009년에 최초로 준공됨.
- 신보령화력발전소는 2017년에 총 2호기의 화력발전소를 준공하였으며, 전기집진기, 탈황 및 탈질설비를 발전소 건립 시 함께 준공함.
- 서천화력발전소는 1984년에 준공되었으며, 2017년에 가동이 중지되었음. 이후 서천화력 발전소 부지 인근에 신서천화력발전소가 2021년에 완공되어 가동이 시작되었고, 전기집진

기, 탈황 및 탈질설비는 신보령화력발전소와 마찬가지로 발전소 건립 시 함께 준공하였음.

* 화력발전소별 세부 환경설비 설치시기는 3차년도 보고서 505쪽 참조



[그림 2.3] 충남 석탄화력발전소 현황

나. 수은 분석을 위한 수목 원판 채취 및 선정기준

- 수목 나이테 내 수은농도 분석을 위하여 충남 태안·보령 화력발전소 인근지역과 경남 하동지역의 수목 원판을 실험구로, 충북 보은과 전남 장흥, 경남 함양을 대조구로 연구하였음. (표 2.6)
 - 2019년도에 취득한 경남 하동 수목 원판과 3차년도(2020년)에 취득한 충남 보령·태안 화력발전소 인근지역 수목 원판 그리고 4차년도(2021년)에 추가로 취득한 충남 보령 청소면 및 성주면, 충남 서천 서면에서 수목 원판(화력발전소로부터 거리가 5~20km 떨어진 지역의 수목 원판임)을 실험구로 활용함.
 - 대조구는 3차년도 연구에 사용한 2019년 5월에 채취하였던 충남 보은과 전남 장흥 그리고 경남 함양 수목 원판을 활용하여 비교·분석하였음.

[표 2.6] 토양 시료 및 수목 원판 채취시기

구 분	지 역	수목 원판 채취 시기
실험구	충남 태안	2020.02.
	충남 보령	2020.02.
	충남 보령	2021.07.
	충남 서천	2021.08.
	전북 군산	2021.08.
	경남 하동	2019.05.
대조구	충북 보은	2019.05.
	전남 장흥	2019.05.
	경남 함양	2019.05.

- 조사 대상지에서 별도한 공시목의 근주직경은 평균 33cm(25~40cm)이며, 평균 수령은 40년생(29~55년생)으로 경남 하동의 ‘공시목 2’를 제외하고 3영급 이상의 공시목 선정기준에 부합함. (표 2.7)
 - 경남 하동 실험구의 경우 3영급 이상의 건전목을 2본 이상 확보하기 어려워 공시목1은 흉고직경 30cm, 공시목 2는 흉고직경 25cm로 선정하였음.

- 시험구인 충남 태안과 보령 그리고 경남 하동의 경우 평균 수령은 42년생(29~55년생)으로 각 지역의 화력발전소 최초 설립 시기인 1983년(보령화력), 1995년(태안화력), 1997년(하동화력)보다 이른 시기에 생장을 시작하였기 때문에 화력발전소 설립 전과 후의 대기오염물질 농도의 비교가 가능함.

[표 2.7] 벌도 대상 임목 선정 기준

항목	기준	내용(근거)
수종	소나무류	- 연구대상지들의 공통적인 수종 - 국내 대표 수종
흉고직경(DBH)	30cm 이상*	- 화력발전소 설립 전·후 기간의 비교를 위한 - III영급 이상의 임목
본수	대상지 별 1~2본	- 비교 분석의 오차를 고려

* 경남 하동 공시목2의 경우 시험구 내 3영급 이상의 건전목 확보가 어려워 25년생 적송으로 선정함. 이외의 공시목은 모두 흉고직경 30cm 이상을 기준으로 선정하였음.

- 수목 원판은 3차년도 연구 시 2020년 2월에 중부화력발전소(태안·보령) 및 남부·호남화력발전소 주변에서 조사지 당 2본의 공시목을 벌도한 후 각 공시목 당 밑둥 부분에서 2개의 10~15cm 두께로 원판을 취득함. (그림 2.4)
 - 4차년도에는 충남 보령 청소면 및 성주면에서 공시목을 각 1본씩 벌도하였으며, 충남 서천에서 공시목을 2본 벌도하였음.
 - 또한 타지역 화력발전소 인근 지역의 실험구인 전북 군산에서 공시목을 1본 벌도하여 각 공시목 당 2개의 원판을 취득함.
 - 서천의 공시목은 서면의 공시목만 분석되었으며, 나머지 1본의 공시목도 분석 중임.



[그림 2.4] 충남 보령 및 서천의 공시목에서 취득한 원판

- 대조구는 2019년 전남 영광군과 진도군에서 공시목을 각 1본씩 벌도하여 공시목 당 2개의 원판을 취득하였음. (그림 2.5)



[그림 2.5] 전남 영광 및 진도의 공시목에서 취득한 원판

1.4.2 2021년도 채취 시료 분석 결과

- 화력발전소 가동에 따른 수은 배출 영향을 분석하기 위해 화력발전소에서 원거리 (약 10~20km)에 위치한 산림지역의 수목을 채취하여 공시목 나이트를 분석함.

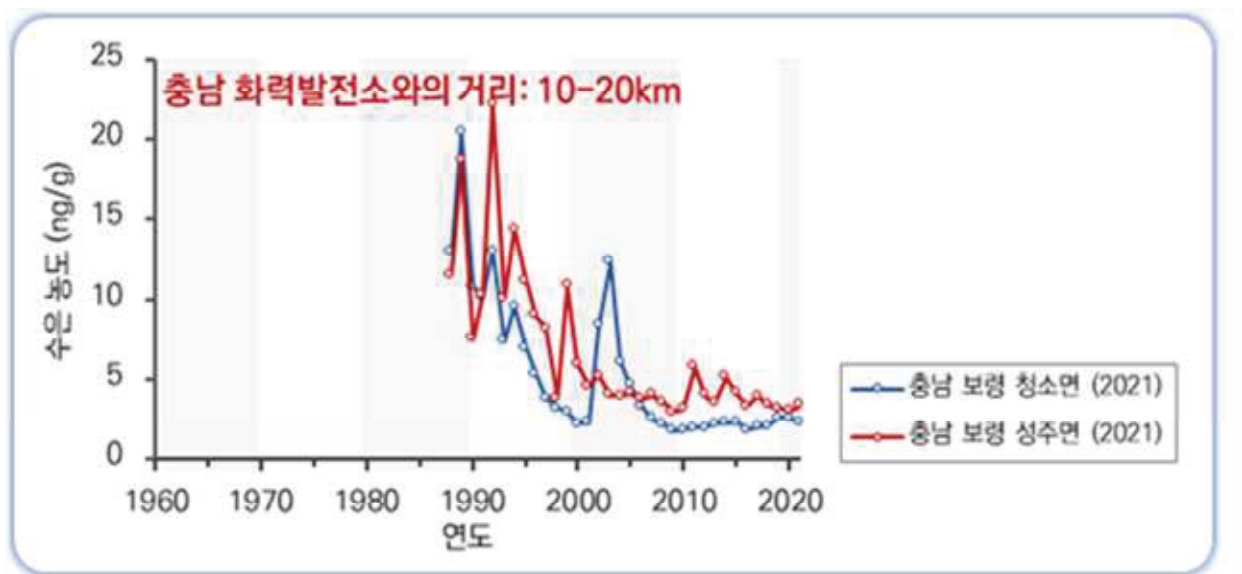
[표 2.8] 시험구 및 대조구 수목 나이트 평균 수은농도 (최소값 ~ 최대값)

조사대상지 (채취년도)	화력발전소부터 거리	수목 나이트 수은농도	
		공시목 1	공시목 2
충남 태안 (원북면) (2020. 02.)	1km 이내	평균 5.1 ng/g (1.6 ~ 12.7 ng/g)	평균 3.2 ng/g (1.7 ~ 5.7 ng/g)
충남 보령 (오천면) (2020. 02.)	1km 이내	평균 2.9 ng/g (0.9 ~ 10.7 ng/g)	평균 2.0 ng/g (0.7 ~ 7.5 ng/g)
충남 보령 (청소면) (2021. 07.)	10~15km	평균 5.3 ng/g (1.8 ~ 20.4 ng/g)	—
충남 보령 (성주면) (2021. 07.)	15~20km	평균 6.7 ng/g (3.0 ~ 22.1 ng/g)	—
충남 서천 (서면) (2021. 08.)	5~10km	평균 2.6 ng/g (1.6 ~ 7.3 ng/g)	—
전북 군산 (2021.08.)	약 5km	평균 2.4 ng/g (1.2 ~ 4.6 ng/g)	—
경남 하동 (2019.05.)	25~30	평균 3.8 ng/g (0.8 ~ 12.3 ng/g)	평균 3.0 ng/g (0.8 ~ 9.7 ng/g)
충북 보은 (2019.05.)	—	평균 1.3 ng/g (0.7 ~ 1.9 ng/g)	평균 1.2 ng/g (0.7 ~ 1.9 ng/g)
전남 장흥 (2019.05.)	—	평균 1.2 ng/g (0.7 ~ 3.1 ng/g)	평균 1.4 ng/g (0.7 ~ 3.4 ng/g)
경남 함양 (2019.05.)	—	평균 2.0 ng/g (0.7 ~ 4.8 ng/g)	평균 1.8 ng/g (0.9 ~ 3.3 ng/g)

1.5. 시험구 공시목 수은농도 분석

1.5.1. 보령 시험구

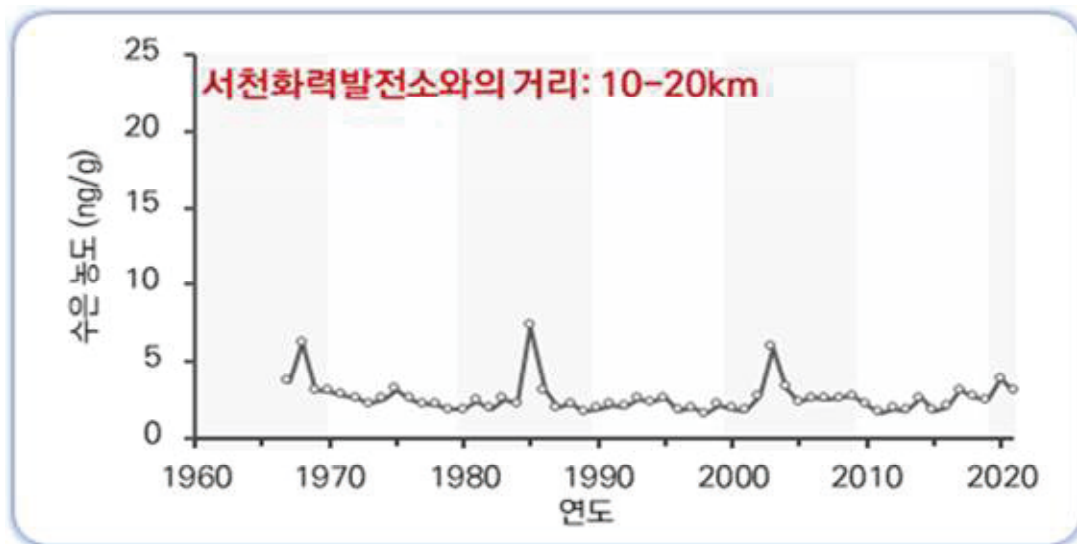
- 보령화력발전소에서 약 10~15km 떨어진 보령 청소면의 임내 공시목은 1990년대 및 2003년에 높은 수은농도 값을 나타냈고, 수은농도 범위는 1.8~20.4ng/g이고 평균 농도는 5.3ng/g로 분석됨.
- 보령화력발전소에서 약 15~20km 떨어진 보령 성주면의 임내 공시목 또한 1990년대에 높은 수은농도 값을 나타냈고, 수은농도 범위는 3.0~22.1ng/g이고 평균 농도는 5.7ng/g로 보령 청소면의 공시목과 유사한 경향을 보임.
- 화력발전소 및 산업단지에서 대기중으로 유출된 수은은 바람 등과 함께 이동하기 때문에 보령화력발전소에서 원거리 (약 10~20km)에 위치한 2개 공시목은 높은 수은농도 값을 나타내어 수은 모니터링에 적합하였음.



[그림 2.6] 보령 화력발전소 기준 원거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은농도

1.5.2. 서천 시험구

- 서천화력발전소는 1984년에 가동을 시작하여 2017년까지 운영하였으나, 나이테에서 1968년, 1985년 및 2003년을 제외하고 화력발전소에서 약 5~10km 떨어진 지점의 공시목은 수은 농도가 높지 않은 것으로 확인됨.
 - 1968년의 수은 농도 피크는 인근의 군산화력발전소의 설립연도와 일치해 군산화력발전소의 영향으로 수은 농도가 높게 나타났던 것으로 생각되며, 5차년도에는 군산화력발전소와 구서천화력발전소의 위치를 고려하여 20~30km 지점과 30km 이상의 지점에서의 추가 조사를 통한 수은 농도를 분석할 예정임.



[그림 2.7] 서천 화력발전소 기준 원거리 시험구의 수목 나이테 수은농도

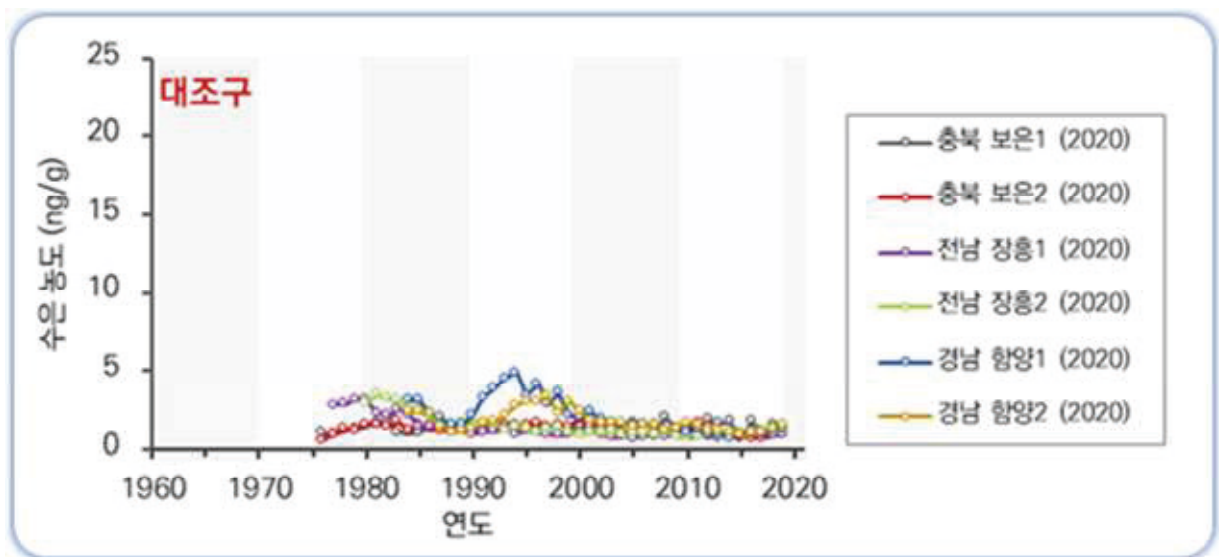
1.5.3 대조구-시험구 공시목 수은농도 비교 분석

가. 대조구 (3차년도 보고서 704~707쪽 자료 참조)

- 충북 보은 및 전남 장흥 지역은 주변에 수은이 유출될 수 있는 화력발전소나 산업단지가 위치하지 않아 시험지로 적합하여 대조구를 선정하였으며, 3차년도 연구와 동일하게 4차년도에도 실험구와 비교 분석하였음.
- 전남 장흥에 채취한 공시목1의 수은농도 범위는 0.7~3.1ng/g, 평균 농도는 1.2ng/g이

고 전남 장흥 공시목2 수은농도 범위는 0.7~3.4ng/g이고 평균 농도는 1.4ng/g으로 2곳 모두 화력발전소 주변의 시험구 수은농도보다 낮게 나타남.

- 충북 보은지역의 공시목1의 수은농도 범위는 0.7~2.0ng/g, 평균 농도는 1.3ng/g이고, 공시목2의 수은농도 범위는 0.5~1.9ng/g, 평균 농도는 1.2 ng/g으로 전남 장흥과 유사하게 시험구 화력발전소 주변의 수목 원판보다 수은농도가 낮게 나타남.
- 하동화력발전소에서 북쪽으로 직선거리 약 70km 떨어진 경남 함양의 공시목1의 수은농도 범위는 0.7~4.9ng/g, 평균 농도는 2.0ng/g로 하동화력발전소에서 북쪽으로 약 25~30km 떨어진 경남 하동의 공시목보다 수은농도가 낮게 나타났고, 공시목2의 수은농도 범위는 0.9~3.3ng/g, 평균 농도는 1.8ng/g로 공시목 1과 유사하게 나타났음.



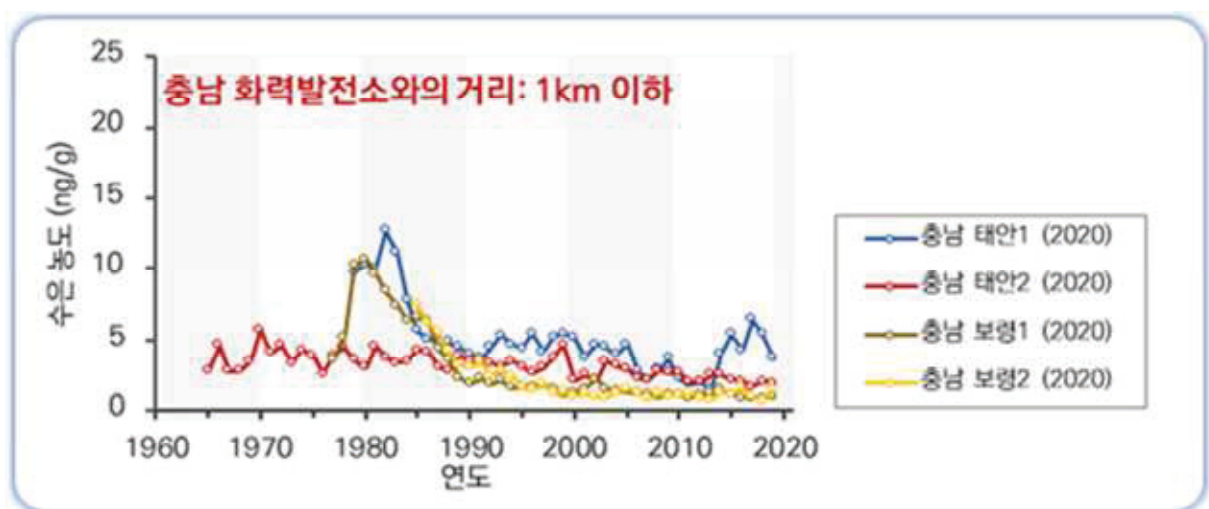
[그림 2.8] 대조구의 연도별 수목 나이테 수은농도

※ 지역명 뒤의 숫자 '1/2'는 동일 시험구 내 공시목 번호를 의미 (이하 동일)

나. 충남 화력발전소 기준 근거리 지역

- 화력발전소와의 거리가 1km 이내인 근거리 지역의 수목 나이테 수은농도는 태안의 공시목 2를 제외하고 1980~1990년에 높은 것으로 나타남. (그림 2.8).
 - 2000년대 수은농도가 낮아진 것은 2000년대 중반부터 주기적으로 개정된 수은 배출허

- 용기준에 따라 대기중의 수은 농도가 감소한 것으로 판단됨.
- 태안 공시목 1과 2는 모두 2000년대 들어서도 다른 지역 공시목에 비해 수은 농도가 높게 나타났음. 이는 태안의 공시목 1과 2는 충남 지역 중 가장 서쪽에 위치하였으며 해안과의 거리가 1km 이내로 서쪽에서 유입되는 오염물질의 영향을 타 시험구에 비해 많이 받았을 수 있기 때문으로 추정됨.
 - 태안 공시목 1과 보령 공시목 1은 1970년대 후반부터 1980년대 초까지 수은농도가 높게 나타났는데 이는 대기오염물질배출허용기준이 개정되기 이전에 화력발전소에서 배출되는 대기오염물질의 계수가 높았기 때문인 것으로 보임.
 - 하지만, 태안 공시목 2의 경우 다른 공시목과 비교하여 1980년대 초까지의 수은농도가 낮게 나타났는데 이는 급경사면 내의 미세지형으로 인한 차이 때문으로 추정되며, 공시목들 간의 차이로 미루어 보아 동일 시험구 내에서 공시목을 2본 이상 벌채하여 수은농도를 분석할 필요가 있을 것으로 판단됨.

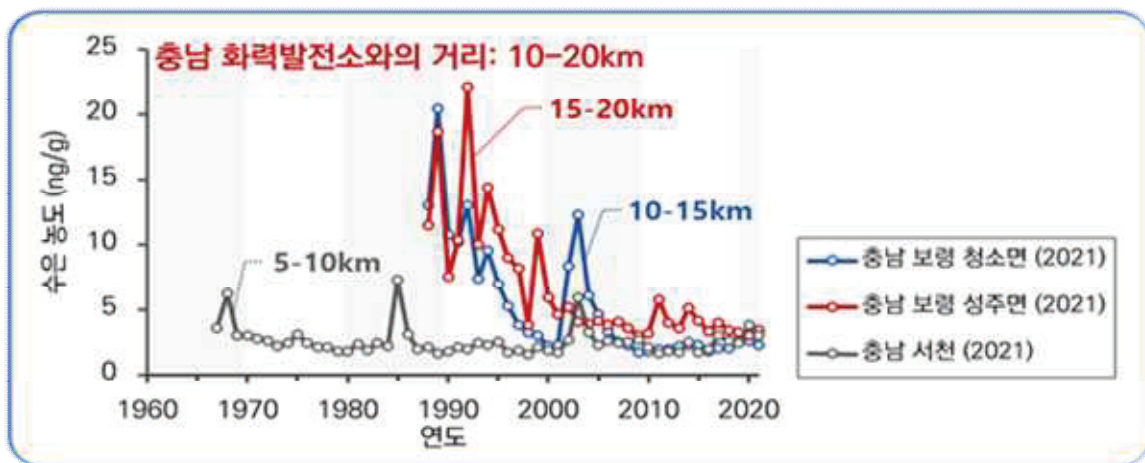


[그림 2.9] 충남 화력발전소 기준 근거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은농도

다. 충남 화력발전소 기준 원거리 지역

- 보령화력발전소에서 10~15km 떨어진 보령 청소면의 임내 공시목은 1990년대와 2003년에 높은 수은농도 값을 나타냈고, 보령화력발전소에서 15~20km 떨어진 보령 성주면의 임내 공시목은 1990년대에 높은 수은농도 값을 나타나 두 곳이 서로 유사한 수은 농도 경향성을 나타냄. (그림 2.10)

- 4차년도에 수행한 화력발전소시설 기준 거리별 수은농도의 경향성을 분석한 결과 보령 청소면과 성주면의 공시목은 화력발전소 기준 최소 10km 이상의 지점에 위치하였음에도 1km 이내의 시험구 공시목에 비해 수은농도의 평균값 및 최댓값이 높은 것으로 나타나 수은의 대기 중 장거리 이동성을 확인할 수 있었음.
 - 따라서 5차년도에는 화력발전소 기준, 보다 촘촘한 거리별 수목 원판을 채취하여 수은의 농도를 세밀하게 분석하고 거리별 경향성 확인이 필요할 것으로 판단됨.
- 충남 서천의 공시목은 서천화력발전소 기준 5km 이상 떨어진 지점에 위치하고 수은농도의 범위는 1.3~7.3ng/g, 평균 농도는 2.6ng/g로 나타남.
 - 충남 보령 화력발전소 기준 10~20km 지점의 공시목에 비해 수은 농도가 낮은 것으로 나타나, 수은의 장거리 이동을 추가로 확인하였고,
 - 5차년도에는 이를 토대로 5~10km 공시목 한 본을 추가 분석하거나 1km 이내 / 10km 이상의 거리에 위치한 공시목을 추가로 분석하여 수은은 장거리 영향의 논리적·과학적 근거를 보완 필요성을 확인함.

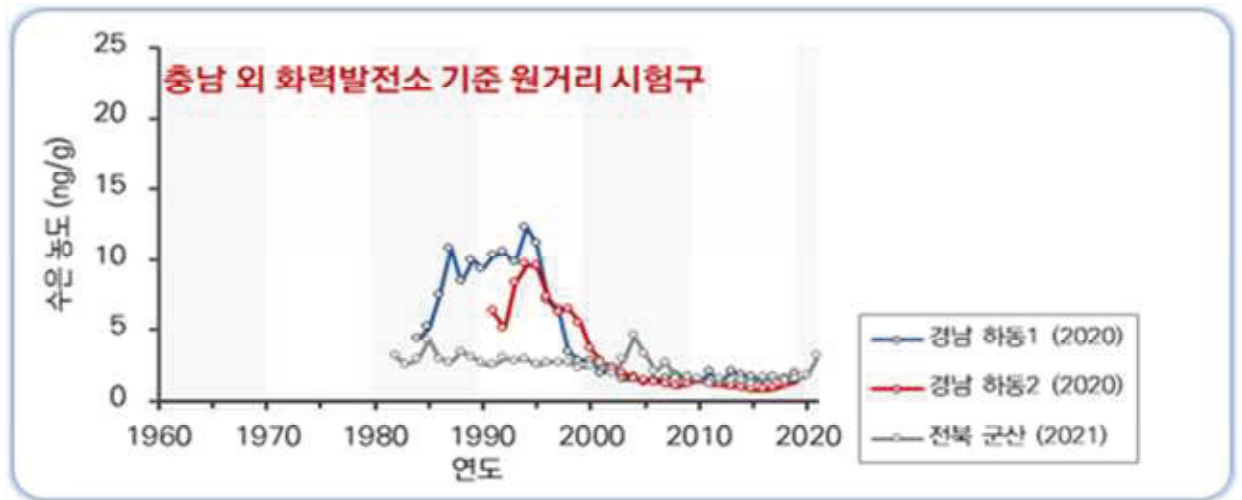


[그림 2.10] 충남 화력발전소 기준 원거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은 농도

라. 타지역 화력발전소 기준 원거리 지역

- 경남 하동의 시험구는 하동화력발전소로부터 직선거리로 25km 이상 이격된 지점에 위치하였음에도 불구하고 충남 지역의 시험구와 유사하게 2000년대 중반 이전의 수목 나이테 수은 농도가 높은 것으로 나타남.

- 경남 하동 대조구 수목 나이테 수은 농도가 1980년대 후반에 급격히 증가한 것은 하동화력발전소 기준 남서쪽으로 직선거리로 약 5~10km 이격된 지점에 위치한 광양제철소(1987년 가동 시작)의 영향이 있었을 것으로 판단되며,
 - 본 연구를 통해 하동화력발전소의 수은이 최소 25km(직선거리) 정도까지 영향을 줄 수 있음을 확인하였음.
- 경남 하동 공시목 2본에 대한 평균 수은 농도는 3.9ng/g (최소 0.8~ 최대 12.3ng/g)로 나타나 경남 지역의 대조구인 함양(평균 1.9ng/g)에 비해 높으며, 충남 태안 및 보령 시험구와 유사한 것으로 나타남.
- 전북 군산화력발전소의 공시목 수은농도 범위는 1.2~4.6ng/g, 평균 2.4ng/g로 다른 시험구와 달리 1990년대까지 수은농도가 높지 않은 것으로 나타나 서천화력발전소와 유사한 경향을 나타내었음.
- 타 시험구가 1990년대부터 수은 농도가 감소하기 시작하여 2000년대 중반 이후 2.0ng/g 수준으로 안정화가 된 것에 비해 서천과 군산의 공시목은 2000년대 중반 이전에 수은 농도가 높지 않은 것으로 나타남.
 - 따라서, 서천 및 군산 화력발전소의 수은 배출 영향 범위가 타 지역 시험구에 비해 적을 가능성을 고려하여 5차년도에는 5km 이내의 지점에 대한 시험구 및 대조구의 공시목을 재선정하고 추가적인 수목 나이테 수은 농도를 분석할 예정임.



[그림 2.11] 충남 외 지역의 화력발전소 기준 원거리 시험구의 연도별 수목 나이테 수은농도

마. 수목 나이테 수은농도 비교 분석

- 화력발전소로 인해 발생하는 대기오염물질의 장거리 이동 영향을 고려하여 화력발전소로부터 1km 이내에 있는 인접 지역뿐 아니라 화력발전소로부터 10~20km 떨어져있는 지역의 공시목 나이테를 대상으로도 수은농도를 분석하였음. (그림 2.11)
- 대조구는 화력발전소의 영향이 상대적으로 적은 충북 보은, 경남 함양, 전남 장흥 지역을 선정하고 화력발전소 주변 지역 수목 수은농도를 비교하였음.
 - 충북 보은의 1976~2019년도의 수목 나이테 수은농도는 최소 0.7 ng/g, 최대 1.9 ng/g였으며 평균은 1.3 ng/g
 - 경남 함양의 수목 나이테 수은농도는 1991~2019년 동안 최소 0.7 ng/g, 최대 4.8 ng/g였고, 평균 수은농도는 1.9 ng/g
 - 전남 장흥의 수목 나이테 수은농도의 1978~2019년도 중 최솟값은 0.7 ng/g, 최댓값은 3.4 ng/g, 평균은 1.3 ng/g로 나타남.
- 대조구의 수목 나이테 평균 수은농도는 1.3~1.9 ng/g으로 충북 보은과 전남 장흥의 수목 나이테 평균 수은농도(1.3 ng/g)와 유사한 것으로 나타났고, 경남 함양의 수목 나이테 평균 수은농도는 보은과 장흥에 다소 높았음

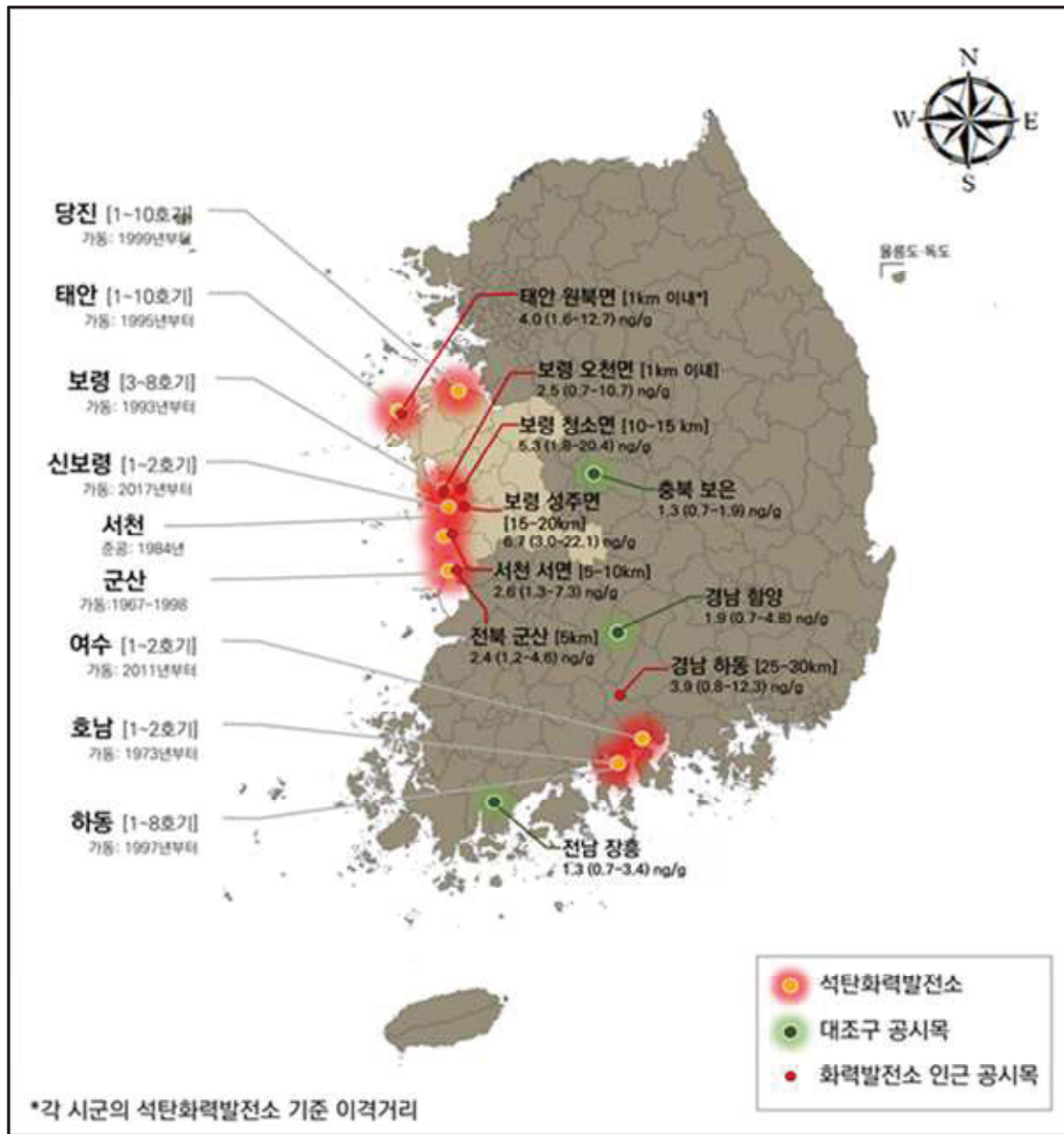
- 대조구의 수목 나이테 최솟값과 최댓값의 편차는 충북 보은이 1.2 ng/g로 가장 작았으며, 경남 함양이 4.1 ng/g로 가장 높게난 반면, 전남 장흥의 최솟값과 최댓값의 편차는 2.7 ng/g로 중간 수준을 나타냄.
- 실험구인 충남 태안 원북면과 보령 오천면에서 화력발전소와의 거리가 1km 이내인 인접 지역의 수목 나이테 수은농도 분석한 결과,
 - 태안의 수목 나이테 수은농도는 1967년부터 2019년까지 최소 1.6 ng/g, 최대 12.7 ng/g, 평균 4.0 ng/g로 나타났으며, 보령 오천면의 경우 1979년부터 2019년까지 최소 0.7 ng/g, 최대 10.7 ng/g, 평균 2.5 ng/g의 수은 농도를 나타냄.
 - 화력발전소 인접 지역인 태안 원북면과 보령 오천면의 수목 나이테 수은농도는 대조구인 충북 보은(1.3 ng/g)에 비해 높았으며
 - 특히, 태안지역의 공시목 1의 경우 충남의 다른 화력발전소 기준 시험구에 비해 다소 높게 나타나 이는 시험구의 위치가 시험구 중 최서단에 있어 서쪽의 중국 등에서 유입되는 대기오염물질의 영향과 타 화력발전소에 비해 전체 용량이 높기 때문인 것으로 추정됨.
- 보령 청소면 공시목은 화력발전소로부터 10~15km 떨어진 지점에 위치하였고, 성주면 공시목은 15~20km 떨어진 곳에 위치함. 1988년부터 2021년까지 수목 나이테 수은 농도는 보령 청소면의 경우 최소 1.8 ng/g, 최대 20.4 ng/g, 평균 5.3 ng/g 이었고, 보령 성주면은 최소 3.0 ng/g, 최대 22.1 ng/g, 평균 6.7 ng/g로 나타남.
- 충남 서천의 공시목은 서천화력발전소로부터 5~10km 떨어진 지점에 위치하였으며, 평균 수은농도는 2.6 ng/g, 최솟값은 1.3 ng/g, 최댓값은 7.3 ng/g로 나타남.
- 충남 화력발전소로부터의 원거리 지역에서 나타나는 수은농도의 경향성과 타지역 화력발전소의 경향성을 비교하기 위하여 경남 하동에서 수목 나이테 수은농도를 분석하였음.
 - 경남 하동의 공시목은 하동 화력발전소로부터 25~30km에 위치하였고, 1984년부터 2019년까지 평균 수은농도는 3.9 ng/g (최소 0.8 ng/g, 최대 12.3 ng/g)이었음.
- 대조구 세 지역(충북 보은, 경남 함양, 전남 장흥)의 수목 나이테 수은농도의 평균은 1.5

ng/g, 최소 0.7 ng/g, 최대 4.8 ng/g로 나타났으며, 화력발전소 인접 지역 (태안, 보령)의 경우 평균 3.3 ng/g, 최소 0.7 ng/g, 최대 12.7 ng/g이었음.

- 화력발전소로부터 멀리 떨어진 지역 (보령 청소면 및 성주면, 서천 서면, 경남 하동)의 경우에는 평균 약 4.6 ng/g, 최소 0.8 ng/g, 최대 22.1 ng/g이었음. 수목 나이테 수은농도의 최댓값과 평균은 화력발전소 기준 원거리 지점에서 가장 높았으며,
- 근거리 및 원거리 시험구 모두 2000년대 중반부터 수목 나이테의 수은농도가 감소한 것으로 나타나 2004년까지는 수은배출허용기준이 $5\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하로 운영하였던 것을 2020년 $0.04\text{mg}/\text{Sm}^3$ 이하로 제한 강화($4.96\text{mg}/\text{Sm}^3$ 감소)하면서 대기 중의 수은 농도가 감소한 것으로 분석되었으며,
- 대부분의 수은농도의 최솟값은 수은배출허용기준에 대한 국가 규제가 강화되면서 화력발전시설의 수은 배출계수*가 감소한 시기에 나타났음.

* 석탄 등 연료 사용량 당 발생하는 대기오염물질량을 의미하며 단위는 연료사용량 (ton) 당 오염물질배출량 (mg)으로 mg/ton으로 기재함

- 본 연구에서 채취한 원거리 시험구의 공시목 위치는 화력발전소의 영향범위를 파악하기 위한 적합한 지점이라 판단하고 5차년도에서 보다 세밀하게 화력발전소시설 기준 거리별 수목 나이테를 확보하여 분석을 확대할 예정임.





[그림 2.12] 대조구 및 화력발전소 인근 지역 수목 나이테 수은농도

1.6. 요약 및 소결론

- 충남(태안, 보령, 서천) 화력발전소 근처 및 원거리 수목 나이테의 수은농도를 분석한 결과, 산업공단 및 화력발전소의 공기정화장치 설치를 포함한 국가적인 대기오염물질 저감 정책이 강화된 2000년대 후반부터 수은 배출이 감소한 것을 확인할 수 있었음.

- 실제로 충남 화력발전소의 탈질설비는 2005년부터 2017년까지 설치되었고 석탄화력발전 시설에서 배출되는 수은의 양이 2007년에 비해 2020년에 약 84% 감소했다는 국립환경과학원 대기공학연구과(보도자료 2020년 5월 18일) 발표도 관련 연구를 뒷받침하는 것으로 확인함.

 환경부 	보 도 자 료		
	보도일시	2020년 5월 18일 조간 (5. 17. 12:00 이후)부터 보도하여 주시기 바랍니다	
	담당 부서	국립환경과학원 박정민 과장 / 공부주 연구관 / 김정훈 연구사 대기공학연구과 032-560-7330/ 7333/ 7337	
	배포일시	2020. 5. 15. / 총 6매	

미세먼지 배출기준 강화하니 수은도 줄었다

◇ 석탄화력발전소, 13년 전보다 수은 배출계수값 84% 감소

◇ 질소산화물·황산화물 저감정책이 수은 저감에 크게 기여

□ 환경부 소속 국립환경과학원(원장 장운석)은 석탄화력발전시설 석탄 1톤을 연소할 때 나오는 수은 배출량(배출계수)을 연구한 결과, 2020년 2.86mg/ton”으로 2007년 대비 약 84%(△14.76mg/ton)가 감소했다고 밝혔다.

[그림 2.13] 환경부 보도자료 “미세먼지 배출기준 강화하니 수은도 줄었다”

- 각 조사지의 공시목별 수목 나이테에서 수은농도를 분석한 결과, 서천과 군산을 제외한 공시목의 수은농도는 1980년대 급증하여 1990년대 중반까지 그 수치를 유지하다가 이후 점차적으로 감소하고 2000년대 중반 이후에는 안정화가 되었으나 여전히 대조구에 비해서는 높은 것으로 나타남.
 - 수목 나이테 수은 농도 분석 결과, 1993~2019년의 대조구 3곳과 시험구 4곳 (충남 태안 및 보령)의 수목 나이테 수은 농도는 각각 평균 1.37, 4.11ng/g로 나타나 대조구에 비해 시험구에서 약 3배 높은 것으로 나타남.

- 대기오염물질배출허용기준 개정에 따른 수목 나이테의 수은 농도 변화의 영향을 확인하기 위하여 1993~2004년, 2005~2009년, 2010~2014년, 2015~2019년으로 시간적 범위를 구분하여 충남 태안 및 보령 시험구 4곳의 평균 수은 농도를 확인한 결과 각 시기별로 4.20, 2.24, 2.02, 2.23ng/g로 나타나 2000년대 중반부터 수은 농도가 안정화된 것으로 확인함.
 - 하지만, 동일시기 대조구 평균 수은 농도는 1.69, 1.19, 1.11, 1.03ng/g로 나타나 2000년대 들어서도 대조구에 비해 시험구가 2배 내외로 더 높은 것으로 분석됨.
- 서천의 화력발전소는 다른 지역과 비교하여 규모가 작고 인근에 산업단지가 위치하지 않아 타지역에 비해 수은의 점오염원 수가 적어 상대적으로 수은 농도가 낮은 것으로 분석되었음.
- 화력발전소 및 산업단지에서 대기 중으로 배출된 수은은 대기 중 6개월에서 최대 2년간 체류하여 바람 등과 함께 이동하기 때문에 보령화력발전소에서 원거리 (약 10~ 20km)에 위치한 2개 공시목 (청소면과 성주면)은 근거리에 위치한 공시목보다 높은 수은농도 값을 나타내어 화력발전시설의 수은 배출 영향범위 모니터링에 적합한 것을 확인하였음.
- 5차년도 연구 시 화력발전소 기준 30km 이상 이격된 지점 내 수목 나이테 수은농도를 분석한다면 화력발전시설의 수은 배출 영향 범위를 보다 명확하게 파악할 수 있을 것으로 판단됨.
- 태안의 경우 공시목 1과 다르게 공시목 2에서는 1980~1990년대의 수은농도가 높은 경향이 확인되지 않았음. 이는 공시목 2가 주변 수목으로 인한 피압의 영향을 받아 화력발전소 가동에 따른 수은농도 변화 경향이 나타나지 않은 것으로 추정됨.
- 따라서 5차년도에는 이를 반영하여 피압되지 않은 공시목을 선정하여 연구할 필요성을 확인함.
- 화력발전소 기준 0~20km 지점에 위치한 수목 나이테의 수은 농도 분석 결과 2000년대 중반부터는 수은 농도가 감소한 것으로 나타났지만 2000년대 중반 이전의 나이테에서는 수은 농도가 대조구에 비해 높은 것으로 나타나 화력발전소 등에서 배출된 수은이 비교적 높게 농축되어 있다는 것을 확인할 수 있었음.

- 앞으로, 화력발전소가 다수 분포하고 있는 충남 지역은 산림관리에 있어 수목에 농축된 수은을 고려해야 할 것으로 보임.
 - 1차적으로 수목에 농축된 수은은 낙엽 및 낙지를 통해 토양으로 유입되어 다시 대기나 수계로 방출될 수 있고 2차적으로는 산불 발생 시 수목에 농축되어 있던 수은이 대기 중으로 대량 방출될 수 있음.
 - 따라서, 연료 혹은 비료로 사용될 수 있는 우드칩이나 우드펠릿 등으로 활용될 경우 수목에 농축되어 있던 수은이 인위적으로 이동하여 오염이 확산될 수 있으므로 수목의 수은 함량 가능성을 고려하여 산림관리 시 보완이 필요할 것으로 판단됨.

2. 화력발전소 주변지역 산림토양의 수은농도

가. 토양 수은 오염 분류 기준

- 토양 내 수은은 주로 양이온 2가의 산화물로 존재하며 높은 친화력으로 인해 토양에서의 수은은 이동성이 제한된다고 알려져 있음 (US EPA, 1997; Schwesig 외, 1999; 김평래 외, 2019). 또한 토양 내 2가 수은은 대기로 휘발되거나 유출 (run off)*을 통해 수생태계로 유입됨 (김평래 외, 2019).

- 따라서 토양 및 수생태계의 수은 오염 예방은 오염원에서의 배출량 저감이 핵심으로 취급됨에 따라 대기오염물질 배출허용기준이 지속적으로 강화되어왔음

* 지표면의 토양, 유기물, 오염물 등이 경사, 바람과 강우 등의 요인에 의해 쓸려 내려가는 것을 유출 (run off)라고 함.

[표 2.9] 토양측정망 및 토양오염실태조사를 위한 오염원 지역별 분류 (환경부, 2020)

오염원 지역 종류	지점수	비율
계	2,619	100(%)
1. 산업단지 및 공장지역	626	23.9
2. 공장폐수유입지역	42	1.6
3. 원고아석·고철 등 보관·사용 지역	161	6.2
4. 금속제련소 지역	9	0.3
5. 폐기물처리·재활용 관련지역	289	11.0
6. 지하수 오염지역	13	0.5
7. 교통 관련 시설 지역	626	23.9
8. 철도관련시설 및 철도 폐침목 사용지역	79	3.0
9. 산지 등의 복구 및 공유수면 매립지역	8	0.3
10. 토양오염 정화 및 정화토양 사용지역	29	1.1
11. 사고·민원 등 발생지역	77	2.9
12. 산업단지 주변 등의 주거지역	91	3.5
13. 어린이 놀이시설지역	454	17.3
14. 사격장 관련시설	16	0.6
15. 토양오염우려기준 강화 변경지역	1	0.1
16. 토지 개발지역	98	3.8

- 환경부는 「토양환경보전법」 제5조 제2항에 따라 1997년도부터 토양오염실태조사를 수행하고 있고 오염원 지역별 분류는 총 16개로 구분하여 ‘산업단지 및 공장지역(23.9%)’, ‘교통 관련 시설 지역(23.9%)’, ‘어린이 놀이시설지역(17.3%)’의 토양을 중점으로 오염도를 모니터링 중이나,
 - 화력발전시설이 ‘산업단지 및 공장지역’에 포함되어 있을 뿐 별도로 구분되어 있지는 않는 것으로 확인됨 (환경부, 2020)(표 2.5)
- 하지만, 김평래 외 (2019)의 연구에 따르면 토양수는 농도는 분석 담당기관에 따라 수치의 차이가 크게 나타나고 국내에 토양과 대기 간의 수은 교환 현상에 대한 논문이 일부 존재하지만, 토양 수은농도에 대한 지역적·장기적 추세에 대한 조사는 이루어지지 않고 있음.
- 우리나라는 토양오염우려기준⁶⁰⁾*, 토양오염대책기준⁶¹⁾**, 그리고 지하수 수질기준을 설정하여 관리하고 있으며, 각 기준은 1지역 (전, 답 등), 2지역 (임야 등), 3지역 (공장용지 등)으로 구분됨(표 2.10)

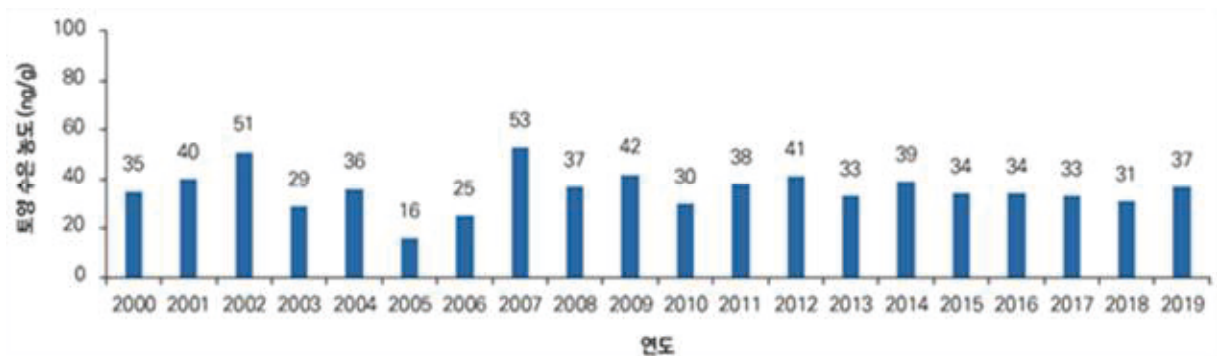
[표 2.10] 국내 토양 내 수은 오염 기준 (토양환경보전법 제1조의 5, 제 20조 관련)

구분	1지역 (전, 답 등)	2지역 (임야 등)	3지역 (공장용지 등)
토양오염우려기준 (mg/kg)	4	10	20
토양오염우려기준 (ng/g)	4,000	10,000	20,000
토양오염대책기준 (mg/kg)	12	30	60
토양오염대책기준 (ng/g)	12,000	30,000	60,000
지하수 수질기준 (mg/L)	≤ 0.001	≤ 0.001	≤ 0.001

- 환경부 시행 토양측정망 및 토양오염 실태조사 결과에 따르면, 2000년도부터 2020년도 까지 국내 토양측정망 내의 평균 토양 수은농도는 0.016~0.053mg/kg (16~53ng/g)으로 나타나 (그림 2.12), 토양오염 우려 기준 및 토양오염 대책 기준치보다 낮은 것으로 확인되었음.

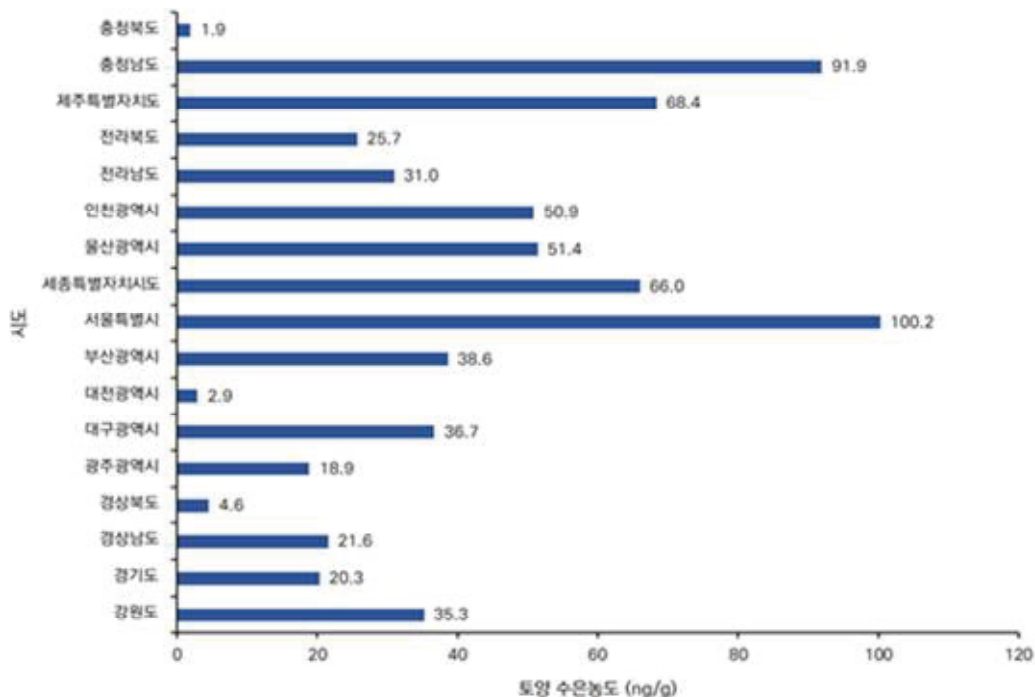
60) 사람의 건강·재산이나 동물·식물의 생육에 지장을 줄 우려가 있는 토양오염의 기준

61) 우려기준을 초과하여 사람의 건강 및 재산과 동물·식물의 생육에 지장을 주어서 토양오염에 대한 대책이 필요한 토양오염의 기준



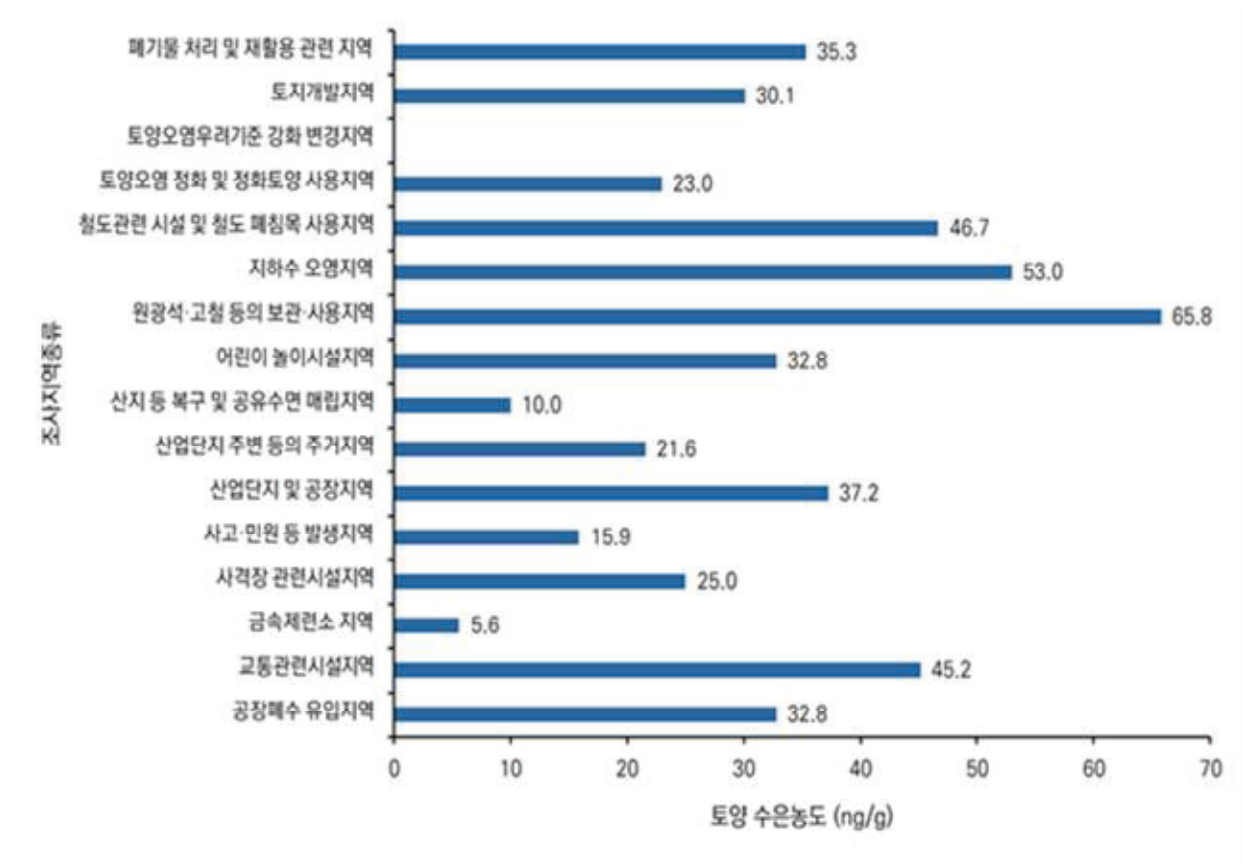
[그림 2.14] 환경부 시행 토양측정망·토양오염 실태조사 결과에 따른 전국 토양 수은농도

- 환경부 시행 토양오염실태조사 결과에 따르면 2000년도부터 2020년까지 전국 평균 토양 수은농도는 약 35.8ng/g 였으며, 2020년도에는 전국 토양 수은농도가 평균 약 38ng/g 로 나타났음 (그림 2.12.).
 - 2020년도 기준 전국 평균 토양 수은농도(38ng/g)를 초과하는 지역은 서울특별시 (100.2ng/g), 충청남도 (91.9ng/g), 제주특별자치도 (68.4ng/g), 세종특별자치시 (66.0ng/g), 인천광역시 (50.9ng/g), 울산광역시 (51.4ng/g), 부산광역시 (38.6ng/g) 로 나타나 충청남도는 전국에서 두 번째로 토양 수은농도가 높은 것으로 확인되었음 (그림 2.13.).



[그림 2.15] 환경부 2020년도 전국 시도별 평균 토양 수은농도

- 화력발전시설 관련 시설이 포함된 조사지역인 ‘산업단지 및 공장지역’의 토양 수은 농도는 환경부 시행 2020년도 토양오염실태조사 기준 전국 평균이 37.2ng/g으로 나타났다.



[그림 2.16] 환경부 2020년도 조사지역종류별 전국 평균 토양 수은농도

[표 2.11] 환경부 2020년 토양측정망·토양오염실태조사 오염원 지역별 분류

시도	시료수	비율
계	3,490	100(%)
경기도	793	22.7
서울특별시	396	11.3
전라남도	281	8.1
경상북도	272	7.8
충청남도	229	6.6
강원도	225	6.4
경상남도	199	5.7
부산광역시	170	4.9
전라북도	155	4.4
충청북도	153	4.4
대구광역시	116	3.3
제주특별자치도	110	3.2
대전광역시	109	3.1
광주광역시	100	2.9
인천광역시	90	2.6
울산광역시	77	2.2

나. 수은 분석을 위한 토양 시료

- 충남 화력발전소 주변지역과 충남 외 지역의 산업단지 및 화력발전시설 주변지역의 토양 내 수은농도를 측정하기 위하여 충남 태안과 보령 그리고 전남 여수를 실험구로 전남 순천을 대조구로 지정하고 비교 분석을 하였음.
 - － 충남 보령·태안 화력발전소 인근 지역의 토양 시료를 3차년도 연구시기인 2020년 2월에 채취하였고 전남 여수와 순천 토양 시료는 각각 2013년 7월 2015년 2월에 채취된 것으로 연구실에서 보유 중인 자료를 활용하여 연구하였음.

- 4차년도(2021년)에는 수목 나이테 수은 농도 분석을 중점적으로 수행하였으며 토양 시료 채취 지점을 수목 나이테 수은 농도의 결과를 고려하여 선정하기 위해 토양 시료 채취 및 수은 농도 분석을 수행하지 않고 문헌자료를 중심으로 연구하였음.
 - 따라서 5차년도에는 유사한 시기에 시험구 및 대조구의 토양 시료를 채취하여 수은 농도를 분석하고 화력발전소의 수은 배출 영향을 파악할 예정임.
- 전남 여수국가산업단지는 1979년 10월에 완성되고 단지 내에는 제7비료공장, 석유화학 단지, 주거단지, 화치단지 등이 조성되어 있어 충남화력발전소와 마찬가지로 수은의 영향을 받을 수 있는 유사한 환경으로 실험구에 포함하여 연구를 진행함.
 - 하지만, 대조구와 시험구의 토양시료 채취 시기의 차이로 인해 정확한 비교가 어려워 5차년도에는 대조구 및 시험구 추가 선정과 함께 토양 시료 채취 후 수은 농도를 분석할 예정임.

[표 2.12] 토양 시료 채취시기

구 분	지역	토양 시료 채취 시기
시험구	충남 태안	2020.02.
	충남 보령	2020.02.
	전남 여수	2013.07.
대조구	전남 순천	2015.02.

2.1. 충남지역의 토양 수은농도

- 수은 배출원인 화력발전시설 주변지역의 토양에 대한 수은농도 및 농축량에 대한 분석을 통해 화력발전소의 수은배출이 토양에 미치는 영향을 확인하고자 2020년도 환경부의 충남 토양오염 실태조사 결과 중 수은농도 자료를 활용해 분석을 실시함.

[표 2.13] 2020년도 환경부 시행, 충남지역 토양오염실태조사결과 중 수은농도

조사지역 종류	토양 수은 농도 (ng/g)			측정지점수
	평균	최솟값	최댓값	
공장폐수 유입지역	56.7	20.0	130.0	6
교통관련시설지역	42.2	0.0	120.0	37
사격장 관련시설지역	55.0	40.0	70.0	2
사고·민원 등 발생지역	33.3	20.0	50.0	3
산업단지 및 공장지역	206.2	0.0	9230.0	55
산업단지 주변 등의 주거지역	22.5	20.0	20.0	3
산지 등 복구 및 공유수면 매립지역	30.0	30.0	30.0	1
어린이 놀이시설지역	82.9	0.0	1070.0	41
원광석·고철 등의 보관·사용지역	70.0	10.0	290.0	16
지하수 오염지역	60.0	10.0	110.0	2
철도관련 시설 및 철도 폐침묵 사용지역	40.0	10.0	70.0	11
토양오염 정화 및 정화토양 사용지역	84.0	0.0	140.0	7
토지개발지역	35.5	0.0	170.0	11
폐기물 처리 및 재활용 관련 지역	47.6	0.0	210.0	34
계	61.8	0.0	9230.0	229

- 본 오염 실태조사는 충남지역의 토양 수은농도 분석을 위해 15cm 깊이의 토양을 대상으로 하였으며, 2020년 평균 토양 수은농도는 61.8ng/g로 나타나 2020년 전국 평균 토양 수은농도인 38ng/g에 비해 약 62% 더 높은 것으로 나타남. (환경부, 2020)
 - 전체 조사지역에서 산업단지 및 공장지역의 수은농도가 206.2ng/g로 가장 높았으며, 특정 공장지역에서는 9,230.0ng/g의 토양 수은농도가 확인되어 충남 조사지역 일부에서 토양의 수은농도가 가장 높게 검출됨.

- 2020년도 토양오염실태조사결과에 따르면 충남지역의 측정지점은 총 229개로, 산업단지 및 공장지역이 55개로 가장 많았으며, 어린이 놀이시설지역 41개, 교통관련시설지역 37개, 폐기물 처리 및 재활용 관련 지역 34개 순이었음.

[표 2.14] 2020년도 환경부 시행, 충남지역 화력발전시설 관련 지역 토양 수은농도

조사지역 종류	지점명칭	지목	토양 수은농도 (ng/g)
산업단지 및 공장지역	한국중부발전(주)보령화력	임야	190
산업단지 및 공장지역	태안화력발전소	공장용지	160
폐기물 처리 및 재활용 관련 지역	태안화력 회처리장	공장용지	0.0
사고·민원 등 발생지역	태안화력 인근 (민어도)	임야	20

- 2020년도 토양오염실태조사의 충남 조사지역 전체 229개 중 화력발전 시설과 관련있는 조사지역은 4개로 보령화력발전소 주변 임야와 태안화력발전소 주변 공장용지의 토양 수은농도가 각각 190, 160ng/g인 것으로 나타났으며, 태안화력발전소의 회처리장 주변 지역은 토양 수은농도가 정량한계 미만으로 검출되어 0.00ng/g으로 표기되었으며, 태안화력발전소 인근 사고 및 민원 발생지인 민어도의 경우 20ng/g의 토양 수은농도를 보였음. (환경부, 2020).
 - 충남지역의 토양오염실태조사 결과에 따르면, 화력발전시설 관련 지역의 토양 수은농도는 공장용지에 비해 임야에서 더 높게 검출될 수 있음을 확인하였음.
- 3차년도 연구에서 분석한 충남 태안과 보령 화력발전소 기준 1km 이내 지역의 토양 수은농도 중 토양 깊이 15cm에서 평균은 각각 2020년 2월 기준 약 28.71, 22.91ng/g로 나타나 토양오염실태조사의 화력발전소 주변지역에 비해 낮은 수치를 나타냈음.
 - 그러나, 2020년 토양오염실태조사(환경부, 2020)에 따르면 보령화력발전소 주변 산림에서 토양 수은농도가 태안화력발전소의 공장용지에 비해 높은 것으로 보아 화력발전소에서 배출된 수은이 산림 내로 침적될 가능성과 충남 지역 내 공시목에 수은이 농축되어있다는 점을 고려하여 5차년도에 화력발전소 주변 지역의 산림토양에 대한 수은 농도를 추가 분석할 필요가 있을 것으로 판단됨.

- 2020년도 환경부 시행 토양오염실태조사 결과에 따르면, 21개 지목 중 11개 지목에서 충청남도의 토양 수은농도가 전국 평균을 초과하였으며, 충청남도 지역 산림의 경우 토양 수은농도가 84.0ng/g으로 전국 산림지역의 평균인 31.9ng/g에 비해 약 2.6배 높았음. 또한, 충남지역의 공장용지(163.1ng/g)의 경우 전국의 공장용지(38.3ng/g)에 비해 평균 토양 수은농도가 약 4.2배 높은 것으로 나타남.
- － 하지만, 2020년도의 충청남도 토양오염실태조사 지역 중 산림은 5개 지점에 불과하였는데, 충남지역의 공장용지에서 국내 다른 지역에 비해 토양수은농도가 높게 검출된 것으로 보아 화력발전시설이 포함되어있는 공장용지 주변의 산림에 대해 주기적인 오염 현황 조사가 수행되어야 할 것으로 보임. (표 2.11)

[표 2.15] 2020년도 환경부 시행, 충남지역 화력발전시설 관련 지역 토양 수은농도

지목	토양 수은농도 (ng/g)	
	전국	충청남도
공원용지	32.5 (302)	47.0 (10)
공장용지	38.3 (887)	163.1 (71)
과수원	18.6 (7)	－ (0)
구거	80.0 (3)	－ (0)
답	20.8 (172)	73.5 (26)
대지(1지역외)	68.3 (412)	52.7 (15)
대지(주거)	36.4 (163)	108.0 (5)
도로	20.6 (47)	20.0 (2)
목장	97.9 (14)	－ (0)
묘지	0.0 (1)	－ (0)
수도용지	12.0 (5)	－ (0)
염전	60.0 (1)	60.0 (1)
유원지	20.0 (1)	20.0 (1)
유지	13.3 (6)	50.0 (1)
임야	31.9 (127)	84.0 (5)

지목	토양 수은농도 (ng/g)	
	전국	충청남도
잡종지	29.9 (431)	66.1 (23)
잡종지(3지역외)	36.6 (174)	34.0 (10)
전	17.8 (130)	63.3 (9)
제방	53.3 (3)	— (0)
종교용지	32.5 (4)	120.0 (1)
주유소용지	20.3 (144)	5.0 (2)
주차장	35.7 (113)	40.0 (7)
창고용지	38.2 (22)	80.0 (2)
철도용지	91.4 (111)	38.3 (12)
체육용지	4.2 (26)	0.0 (2)
하천	42.2 (27)	25.0 (2)
학교용지	25.9 (157)	75.5 (22)

- 2020년도 토양오염실태조사 결과에 따르면, 화력발전소 주변 조사지역은 ‘산업단지 및 공장지역’의 토양 수은농도인 206.2ng/g보다 다소 낮으나, ‘토양오염 정화 및 정화토양 사용지역(84ng/g)’과 ‘어린이 놀이시설지역(82.9ng/g)’은 다른 지역에 비해 약 2배 정도 높게 검출됨.
- 2022년 2월 기준 한국전력기술 자료에 따르면, 충남 석탄화력발전소는 태안(1~10호기), 보령(3~8호기), 신보령(1~2호기), 당진(1~8호기)로 국내에서 석탄화력발전소의 밀도가 가장 높은 지역임에도 불구하고 2020년 기준 환경부 시행 토양오염실태조사지역 229곳 중 화력발전소 주변 지역이 4곳에 불과함을 확인하였음.
 - 앞으로, 토양오염에 대한 명확한 분석을 위해 환경부의 토양오염실태 조사지역을 확대 요구하고 보다 세밀하게 농도를 수준을 검토할 필요성이 있으며,
 - 본 연구에서도 5차년도에 토양 시료 채취 지역을 확대하고 연구 샘플수를 추가하여 대조구 대비 시험구의 수은 농도 수준 및 경향성 등을 종합적으로 검토할 예정임.

2.2. 요약 및 소결론

- 토양 시료의 경우 수목 나이테와 달리 분석되는 수은농도가 연도별로 나타날 수 없고 시료 채취 시점의 수치로 나타남. 또한, 대기 중 수은의 토양 내 침적량과 침적 이후 지표면 혹은 토양 내 수은의 거동에 대한 규명은 매우 어렵기 때문에 토양측정망 및 토양오염실태조사와 같은 지속적인 모니터링을 통해 오염 관리가 이루어지고 있음.
- 충남은 전국 화력발전소 59기 중 약 50%인 29기가 소재하는 석탄화력발전소 밀도가 가장 높은 지역임에도 불구하고 2020년 기준 환경부 시행 토양오염실태조사지역 229개 중 화력발전소 주변지역은 4개에 불과하였음.
 - 2020년 토양오염실태조사 결과에 따르면 전국 평균 토양수은농도는 약 38ng/g였으며, 충청남도는 91.9ng/g로 나타나 전국에서 서울 (100.2ng/g) 다음으로 토양수은농도가 높은 것으로 나타났음. 하지만, 2020년 토양오염실태조사 지점 3,490개 중 충남지역의 조사지점은 229개로 6.6%를 차지하여 경기, 서울, 전남, 경북 다음에 해당되어 토양수은농도에 비해 상대적으로 토양오염실태조사지점이 다른 광역 시도에 비하여 적은 것으로 보임.
 - 2020년 환경부 토양오염실태조사 결과에 따르면 토양 수은농도는 보령 및 태안화력발전소 주변 임야지역에서 각각 190ng/g, 20.0ng/g, 태안화력발전소 공장용지에서는 160ng/g으로 나타나 화력발전시설의 공장용지에 비해 주변 산림지역에서 토양 수은농도가 더 높을 수 있음을 확인함.
 - 2020년도 환경부 시행 토양오염실태조사 결과에 따르면, 충청남도 지역 산림의 경우 토양 수은농도가 84.0ng/g으로 전국 산림지역의 평균인 31.9ng/g에 비해 약 2.6배 높았으며, 충남지역의 공장용지(163.1ng/g)의 경우 전국의 공장용지(38.3ng/g)에 비해 평균 토양 수은농도가 약 4.2배 높은 것으로 나타남.
 - 그러나 2020년도의 충청남도 토양오염실태조사 지역 중 산림지역의 측정지점은 전체 조사지점의 2.18%인 5개 지점에 불과하고, 조사지역 선정에 있어서도 화력발전소 주변 공장용지로 국한하고 있어, 보다 명확한 수은농도 분석을 위해서는 기존 지역뿐만 아니라 충남 전역에 걸친 산림지역으로 조사 규모를 확대하여 모니터링을 실시할 필요가 있는 것으로 판단됨.

- 3차년도에 분석에 따르면 충남 태안 및 보령 화력발전소 기준 1km 이내 지점에서 0~30cm 깊이의 산림토양 평균 수은 농도는 각각 37.8ng/g (11.8~219.3ng/g), 23.9ng/g (11.9~53.7ng/g)로 나타나 토양환경보전법 제1조의 5, 제 20조 관련 토양 내 수은 오염 우려 기준 (전, 답 등 4,000ng/g; 임야 등 10,000ng/g; 공장용지 등 20,000ng/g)에 따라 오염 우려 상태는 아닌 것으로 분석되었음.
 - 그러나, 수목 나이테 수은 농도 분석 결과 태안 및 보령 화력발전소 기준 1km 이내 지점의 수목에 수은이 각각 평균 4.0ng/g(1.6~12.7ng/g), 2.5ng/g(1.8~20.4ng/g)로 대조구 중 한 곳인 충북 보은 수목의 수은농도 1.3ng/g(0.7~1.9ng/g)에 비해 높게 검출되어 향후 수은이 농축되어 있는 낙엽 및 낙지의 부식으로 인해 토양 내로 수은이 유입되어 산림토양의 수은 농도가 증가하는 이벤트가 발생할 가능성이 있는 것으로 분석됨.
- 또한, 2020년도 토양오염실태조사결과에 따르면 보령화력발전소 주변 임야의 토양 수은 농도는 태안화력발전소의 공장용지에 비해 30ng/g 더 높은 것으로 나타났음.
 - 이러한 결과를 바탕으로 화력발전소에서 배출된 수은의 침적이 산림에서 더 활발히 일어날 수 있다는 가능성을 확인하였으며, 화력발전소 및 산업단지 부지 등 기준 거리별로 토양 수은농도를 파악할 필요가 있을 것으로 판단됨.
 - 따라서, 5차년도에는 화력발전소 기준 거리별로 토양 수은농도를 분석하여 이격 거리별경향성 및 농도 수준을 정밀하게 연구할 예정



제3장 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링

1. 물환경 모니터링
2. 어류 중금속 모니터링
3. 포유류 중금속 모니터링

1. 물환경 모니터링

1.1. 조사 시기 및 조사 방법

- 충남 화력발전소 주변 하천의 수질은 3차례에 걸쳐 2021년 2월부터 7월까지 지점별 2일씩 조사를 실시하였음 (표 3.1).
 - 하천 내 중금속 분석을 위한 수질 및 저질은 2021년 4월 1차례에 걸쳐 조사를 실시하였음 (표 3.1).

[표 3.1] 충남 화력발전소 주변지역 수질·수체 및 저질내 중금속 조사 시기

조사항목	조사차수	조사시기	조사일수
현장 수질	1	2021년 2월 19일~2021년 2월 20일	2
	2	2021년 4월 17일~2021년 4월 18일	2
	3	2021년 7월 28일~2021년 7월 29일	2
수체 및 저질 중금속	1	2021년 4월 17일~2021년 4월 18일	2

- 수질조사는 3차년도 조사방법(3차년도 보고서 499~500쪽 참조)과 동일하게 YSI 58 휴대용 다항목 수질측정기를 이용하여 수온, 전기전도도, 염분도, 용존산소포화도, 용존산소량을 측정함
- 중금속은 물 및 저질 시료를 전처리 후 분광광도계(철, 알루미늄) 또는 ICP-MS(납, 비소, 카드뮴, 크롬, 아연, 구리 등)를 사용하여 분석을 실시함.
 - 시료의 전처리: 1L의 물에 진한 질산 2ml를 가하고 잘 흔들어 주어 pH 2 정도에 맞춘 후 10분 정도 경과하면 시료를 0.45 μ m PTFE 필터로 여과함.

– A1 세부 분석 과정

과정	세부 내용
시약	<ul style="list-style-type: none"> – 알루미늄 저장(stock) 용액: 1000 mg/L – 알루미늄 표준 용액(5 mg/L): 0.5 mL의 저장 용액을 취하여 100 mL의 부피 플라스크에 넣고 초순수로 희석한다. – 10% Polyvinylpyrrolidone (PVP40) 용액: 10 g을 취하여 물에 녹여 100 mL로 희석한다. – 완충 용액(pH 4.5): 3.28 g의 sodium acetate(CH_3COONa)를 250 mL 부피 플라스크에 넣고 초순수로 희석하여 0.2 M의 sodium acetate 용액을 만든다. 2.29 mL의 acetic acid를 초순수로 희석하여 250 mL로 희석한다. 두 용액을 1:1의 부피 비로 섞은 후, 0.02 M의 황산과 1 M NaOH로 pH가 4.5가 되도록 조정한다. – Alizarin red S (0.15%) 용액: 0.15 g의 Alizarin red S를 물에 녹여 100 mL로 희석한다. – Ascorbic acid (0.05 M) 용액: 0.44 g의 ascorbic acid를 초순수로 녹여 50 mL로 희석한다. – L-histidine (0.01 M) 용액: 0.0775 g의 L-histidine을 초순수에 녹여 50 mL로 희석한다.
검량선 작성	<ul style="list-style-type: none"> – 표준 용액(5 mg/L)을 일정 부피씩(0.4, 0.8, 1.2, 1.6, 2.0 mL) 취하여 농도가 40, 80, 120, 160 및 200 g/L가 되도록 50 mL 부피 플라스크에 가한다. – 시료 분석과 동일한 과정을 거쳐 흡광도를 측정하여 직선의 검량선과 회귀식을 구한다.
시료분석	<ul style="list-style-type: none"> – 25 mL의 시료를 취하여 50 mL의 부피 플라스크에 넣는다. – 여기에 1 mL의 ascorbic acid 용액과 1 mL의 L-histidine 용액을 넣는다. – 그리고 나서 2.5 mL의 10% PVP40 용액을 가한다. – 10 mL의 완충용액과 2 mL의 alizarin red S 용액을 가한다. – 초순수로 50 mL의 표선까지 맞추어 준 후 상온에 놔두어 (무슨) 색깔이 나타날 때까지 기다린다. (15분 정도) – 파장 510 nm에서 흡광도를 측정하여 정량한다.

- Fe 세부 분석 과정

과정	세부 내용
시약	<ul style="list-style-type: none"> - 철 저장 용액: 1000 mg/L - 철 표준 용액(5 mg/L): 0.5 mL의 저장 용액을 취하여 초순수로 100 mL까지 희석한다. - 질산(1+1) - Ammonium acetate (50%) - Hydrochloric acid, HCl (1+2) - Hydroxylamine hydrochloride 용액(20%): 20 g을 물에 녹여 100 mL로 희석한다. - o-Phenanthrine 용액 (0.1 %): 0.12 g을 물에 녹여 100 mL로 희석한 후 80 °C에서 가열한다. - Ammonium acetate 완충 용액 (pH 6-7): 250 mL의 부피 플라스크에 1.14 mL의 acetic acid를 가하여 물로 희석하여 0.1 M 용액을 만든다. 1.54 g의 ammonium acetate를 250 mL의 부피 플라스크에 넣고 물로 희석하여 0.1 M 수용액을 만든다. 65(130) mL의 acetic acid 용액과 35(70) mL의 ammonium acetate 용액을 잘 섞어 준다.
검량선 작성	<ul style="list-style-type: none"> - 표준 용액(5 mg/L)을 일정 부피씩(2, 4, 6, 8, 10 mL) 취하여 농도가 100, 200, 300, 400 및 500 g/L가 되도록 100 mL 부피 플라스크에 가한다. - 시료 분석과 동일한 과정을 거쳐 흡광도를 측정하여 직선의 검량선과 회귀식을 구한다.
시료 분석	<ul style="list-style-type: none"> - 25 mL의 시료를 100 mL의 부피 플라스크에 넣고 50 mL의 물과 1 mL의 hydroxylamine hydrochloride 용액을 넣은 후 끓을 때까지 가열한다. - 상온으로 식힌 후 10 mL의 ammonium acetate 용액을 가한 후 잘 흔들어 준다. - 5 mL의 o-phenanthrine 용액을 가한 후 초순수로 100 mL까지 희석한다. - 잘 흔들어준 후 발색할 때까지(약 20분) 기다린다. - 510 nm의 파장에서 흡광도를 측정하여 정량한다.

1.2 당진화력발전소 주변 하천

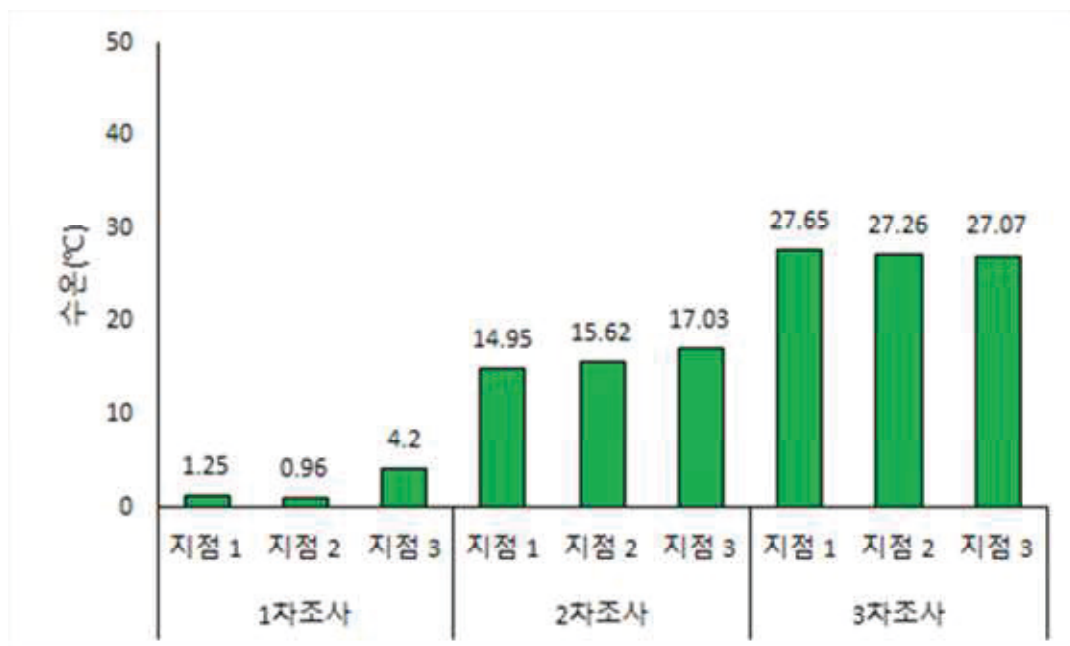
1.2.1 조사지 현황

[표 3.4] 당진화력발전소 조사지 현황

당진화력발전소			
지점 1 석문면 교로리 2695	하천유형	평지형	
	하폭(m)	10-17	
	유폭(m)	0.5-4	
	수심(m)	0.1-1.5	
	수체 탁도	약간 탁함	
	주변현황	농경지	
	제방	우: 흙제방 / 좌: 흙제방	
	주변식물	갈대와 부들 등	
지점 2 석문면 교로리 2709	하천유형	평지형	
	하폭(m)	13-20	
	유폭(m)	0.5-6	
	수심(m)	0.1-1.8	
	수체 탁도	약간 탁함	
	주변현황	농경지, 소도로	
	제방	우: 흙제방 / 좌: 흙제방	
	주변식물	갈대 고마리 등	
지점 3 석문면 교로리 2713	하천유형	평지형	
	하폭(m)	18-40	
	유폭(m)	2-32	
	수심(m)	0.1-1.5	
	수체 탁도	약간 탁함	
	주변현황	농경지, 소도로	
	제방	우: 흙제방 / 좌: 흙제방	
	주변식물	갈대와 부들 등	

1.2.2 수질 분석 결과

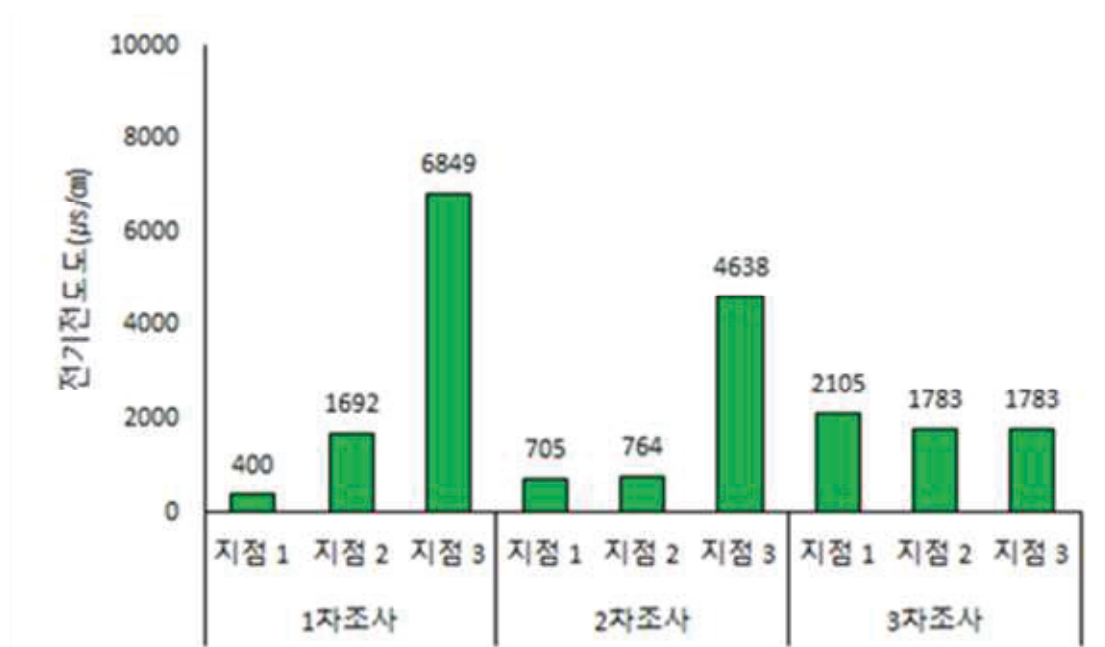
- 당진화력발전소 인근 하천에서 2021년 2월 19일부터 동년 7월 29일까지 수온을 측정한 결과 2021년 7월 28일경에 약 28℃에 가깝게 나타나 토속 어종이 서식하기에 비교적 높은 수온을 보였으나 다른 시기에는 평균 수온 15.11℃로 어류의 서식에는 지장이 없는 것으로 확인됨.
- 수온 측정결과 지점 1은 1.25-27.65℃로 평균 수온은 14.62℃였으며 지점 2는 0.96-27.26℃의 범위로 평균 수온은 14.61℃, 지점 3은 4.2-27.07℃ 범위로 평균 수온은 16.10℃로 나타났음.
 - 3곳의 조사지점은 멀리 떨어진 지역이 아니기 때문에 수온에서 서로 비슷한 경향성을 나타냄.



[그림 3.1] 당진화력발전소 주변 조사하천의 수온 변화

- 하천 주변 식물과 하천 내 수초 등의 분포는 수생동물에 서식처를 제공하여 생물 종다양성 증가에 긍정적인 영향을 미침.
- 당진화력발전소 인근 하천의 경우 갈대 및 기타 수생식물이 다량 분포하여 여름철 수온의 급격한 상승을 막아 어류가 서식하는데 적절하였음.

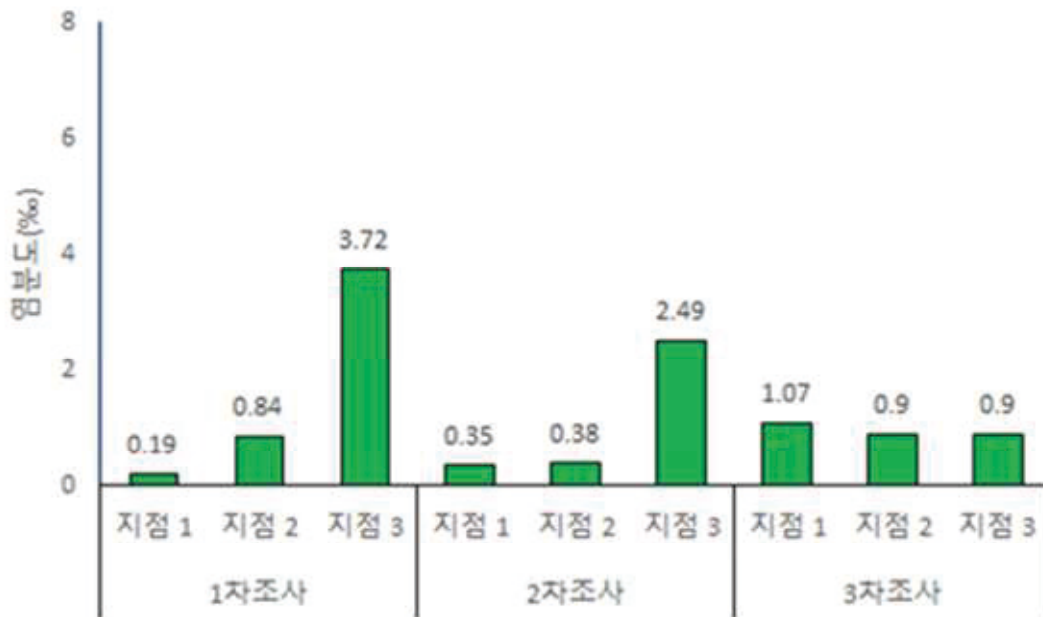
- 향후 지속적인 수변식물의 관리(과번성 억제, 수로 개설 등)를 통해 수로를 확보하여 적정 어류 서식지 유지가 필요할 것으로 판단
- 전기전도도⁶²⁾는 지점 1에서 400-2,105 μ S/cm 범위로 평균 1,070 μ S/cm로 나타났고, 지점 2에서는 764-1,783 μ S/cm 범위로 평균 1,413 μ S/cm, 지점 3에서는 1,783-6,849 μ S/cm 범위로 평균 4,423.3 μ S/cm로 일반적인 하천에 비해 전기전도도가 높게 나타남(그림 3.2) 이는 본 조사지역이 바다를 매워 형성된 간척지이므로 뿔 등에서 이온성분들이 많이 용출되어 전기전도도 상승에 영향을 줌.



[그림 3.2] 당진화력발전소 주변 조사 하천의 전기전도도 변화

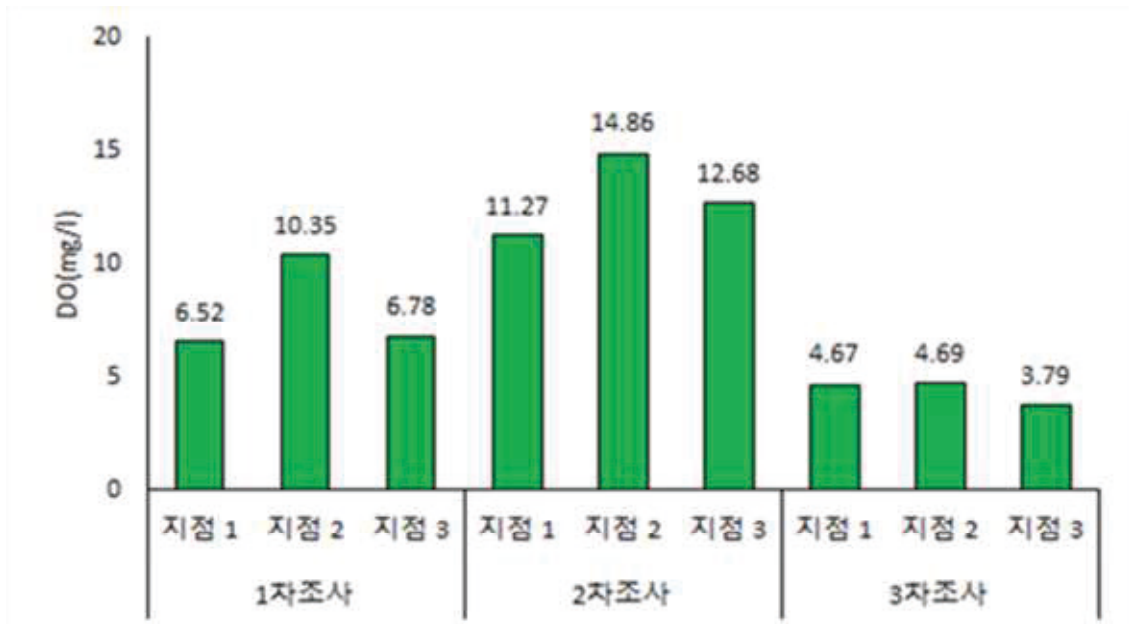
62) 물속에 녹아 있는 이온성분의 양을 전기로 측정한 값.

- 염분도는 지점 1에서 0.19–1.07‰로 평균 0.54‰이었고, 지점 2에서는 0.38–0.90 ‰로 평균 0.71‰, 지점 3에서는 0.90–3.72‰로 평균 2.37‰로 나타남. (그림 3.3) 이와 같이 염분도 값이 일반적인 담수에 비해 약간 높게 나타나 담수와 해수가 서로 섞이는 기수역 지역임을 보여줌.



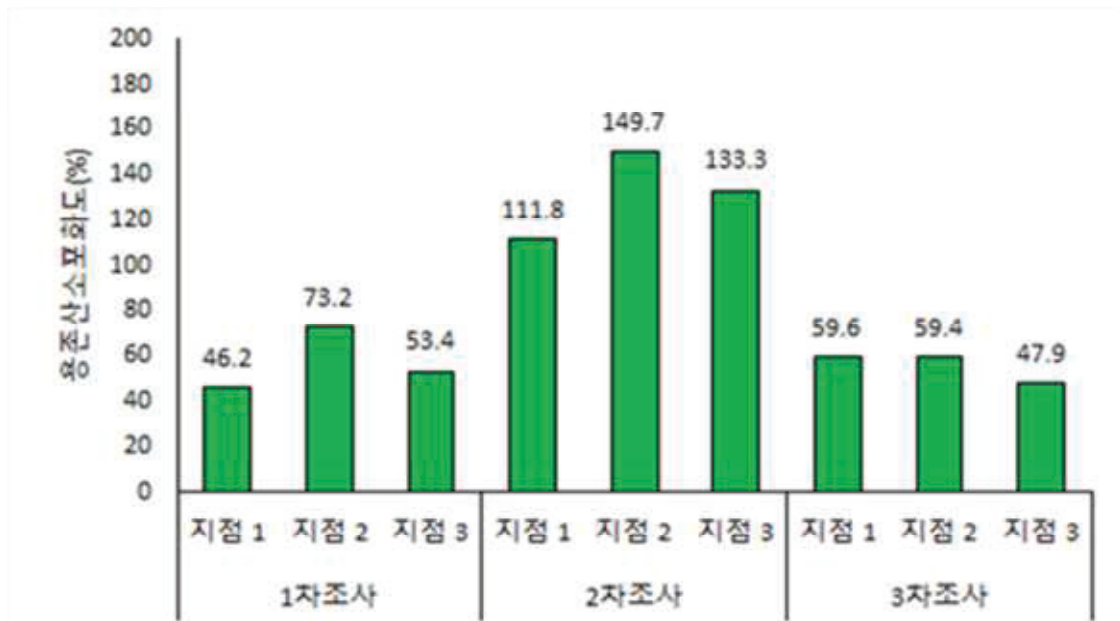
[그림 3.3] 당진화력발전소 주변 하천 염분도의 변화

- 용존산소량(DO)은 지점 1에서 4.67–11.27 mg/L의 범위로 평균 7.49 mg/L이었고, 지점 2는 4.69–14.86 mg/L의 범위로 평균 9.97 mg/L, 지점 3은 7.79–12.68 mg/L 범위로 평균 7.75 mg/L로 나타남 (그림 3.4).
- 일반적으로 어류는 4 mg/l 이하에서는 서식하기 어렵고 2 mg/l 이하에서는 폐사 가능성이 높음.
 - 여름철인 7월에 용존산소량이 일시적으로 낮아졌으나 지점별 평균 용존산소량은 4.38 mg/l으로 전반적으로 어류가 서식하는데 지장이 없는 것으로 확인됨.



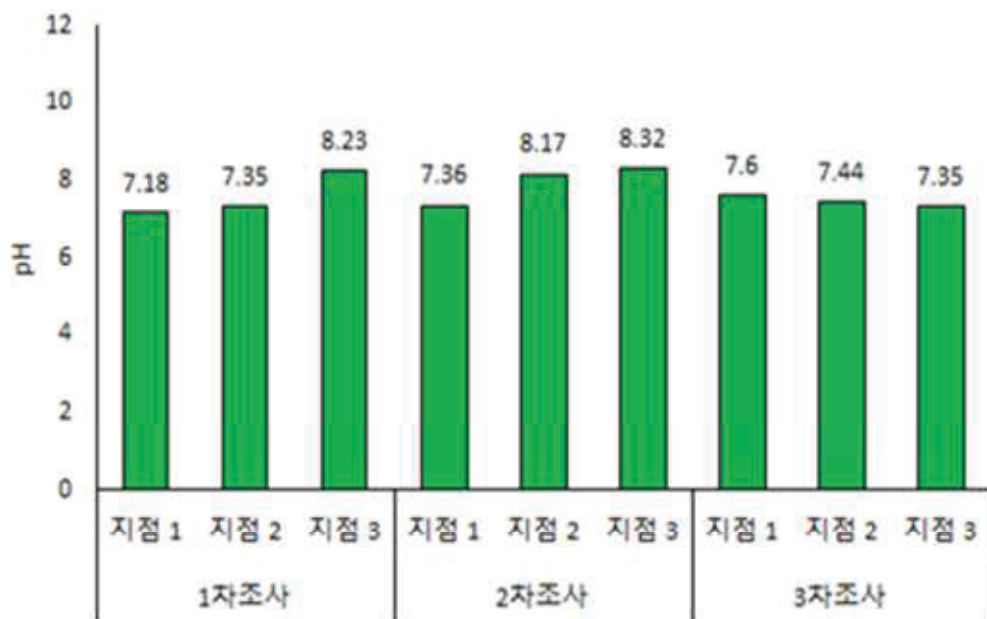
[그림 3.4] 당진화력발전소 주변 하천의 용존산소 농도

- 용존산소포화도(DO%)는 지점 1에서 46.2–111.8%로 평균 72.53%였으며, 지점 2는 59.4–149.7%의 범위로 평균 94.10%, 지점 3은 47.9–133.3%의 범위로 평균 78.20%로 나타나 용존산소 농도와 비슷한 경향성을 보임 (그림 3.5).



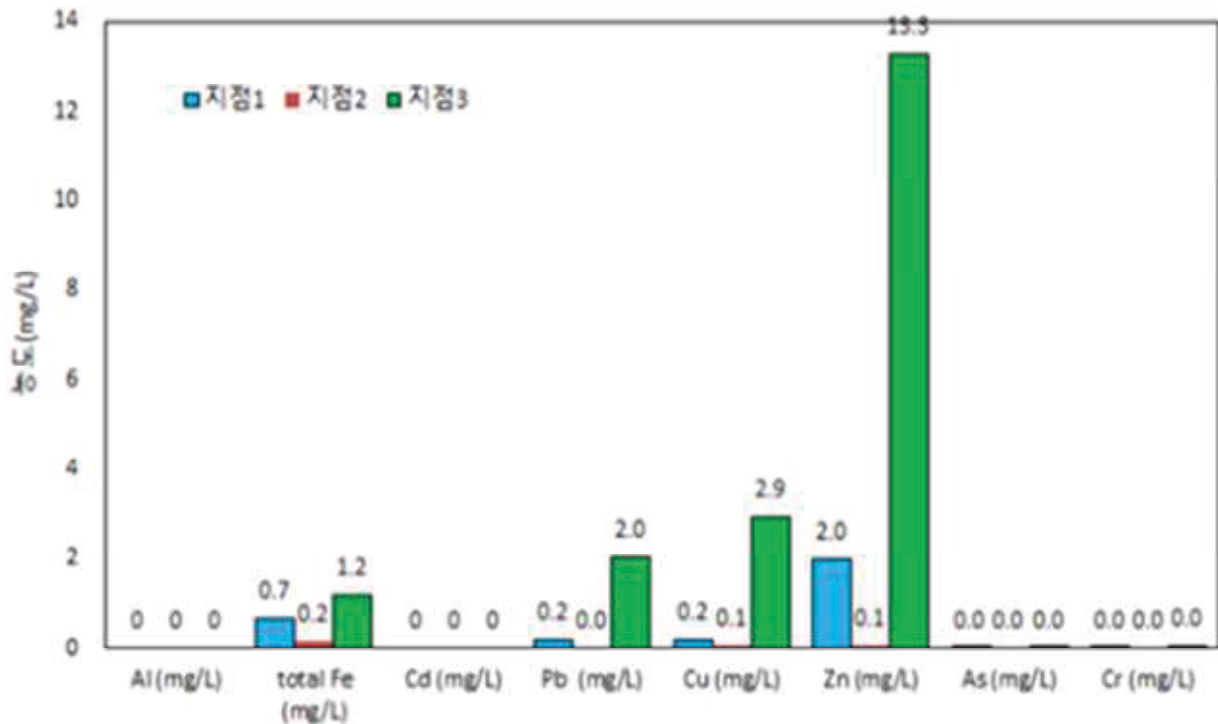
[그림 3.5] 당진화력발전소 주변 하천의 용존산소 포화도의 변화

- 일반적으로 어류들은 pH 6.5~8.5의 범위가 서식하기에 가장 적당하다고 알려져 있는데 3곳의 pH 평균 농도는 7.67이고 7.18~8.32의 정상범위에 있어 어류가 서식하기에 매우 적합한 pH 범위를 유지하고 있었음.
 - 지점 1에서 7.18~7.6의 범위로 평균 7.38로 나타났고, 지점 2에서는 7.35~8.17의 범위로 평균 7.65, 지점 3에서는 7.35~8.32의 범위로 평균 7.97로 나타남



[그림 3.6] 당진화력발전소 주변 하천의 pH 변화

- 수체의 중금속 농도를 분석한 결과 Al, Cd, As, Cr은 거의 출현하지 않아 문제가 없는 것으로 나타났으나,
 - 지점 1과 지점 3에서 Fe 어류폐사의 기준치인 0.5 mg/l를 초과한 0.7 mg/l와 1.2 mg/l가 검출되었고,
 - 지점 1과 지점 3에서 Zn이 각각 2.0 mg/l, 13.3 mg/l이 검출되어 어류폐사 기준치인 0.4~1.75 mg/l를 최대 7.6배 초과하는 것으로 나타남.
 - 지점 3에서는 Pb 어류폐사 기준치인 1.0~31.5 mg/l 내의 2.0 mg/l값을 나타내었고, 이외에도 Cu가 2.9 mg/l, 어류폐사 기준치인 0.03~0.7 mg/l(soft water), 0.6~6.4mg/l(hard water) 내로 검출되어 수체의 중금속 농도 개선을 위한 지속적인 관찰이 요구되었음.

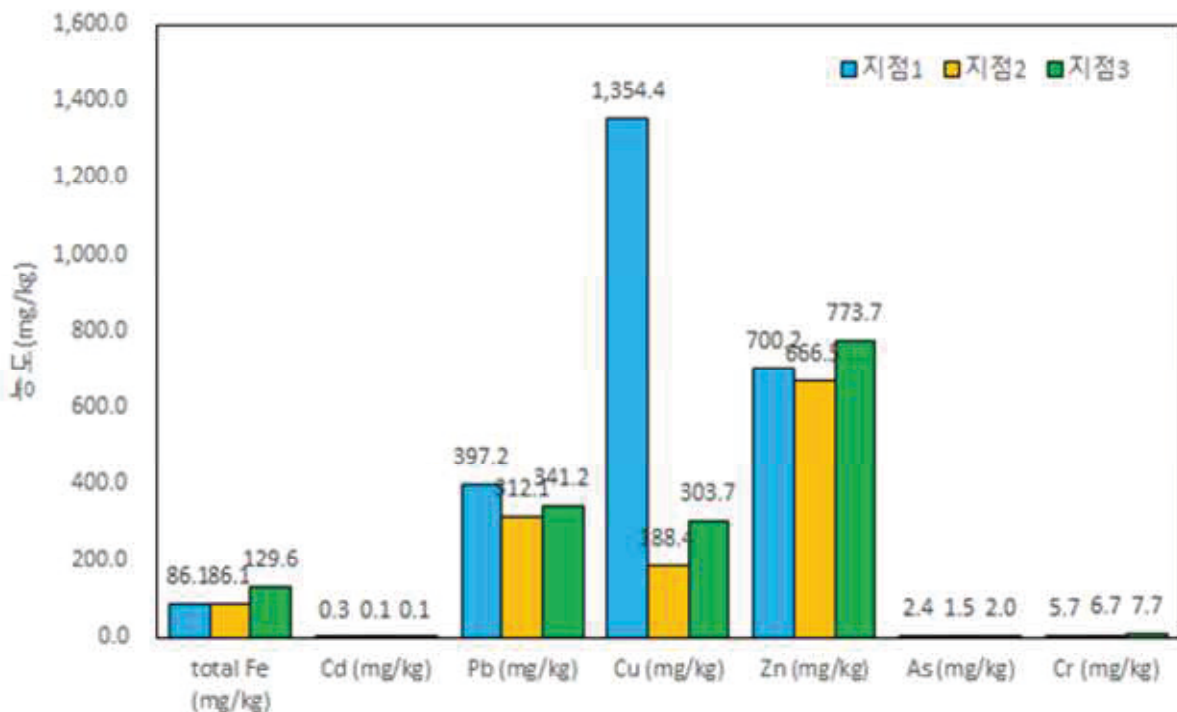


[그림 3.7] 당진화력발전소 주변 하천의 수체 중금속 분석 결과

1.2.2. 저질 분석 결과

- 우리나라의 해양하천 퇴적물오염분류기준은 상당히 포괄적이므로 하천바닥의 저질(퇴적물)에 포함된 오염물질이 수질오염이나 저서생물에 미치는 영향을 예측할 때 나타날 수 있는 불확실성이 크기 때문에 3차년도 연구와 마찬가지로 미국지역 환경보호청에서 설정된 담수퇴적물 오염분류기준을 활용하여 화력발전소 주변 하천 퇴적물의 전 함량 중금속 오염 정도를 평가함. (미국캐나다 퇴적물규정치기준 3차년도 보고서 621~622쪽 참조)
- 미국캐나다의 잠정퇴적물권고기준(ISQGs)에 따라 3차년도(2020년) 연구조사에서는 중금속 농도가 비오염으로 나타났지만 4차년도(2021년) 조사에서는 Pb는 심한오염의 기준치인 60 mg/kg 를 모두 넘는 397.2 mg/kg(지점 1), 312.1 mg/kg(지점 2), 341.2 mg/kg(지점 3)으로 나타남. Cu는 심한오염의 기준치인 50 mg/kg를 모두 넘는 지점 1에서 1,354.4 mg/kg, 지점 3에서 303.7 mg/kg, 지점 2에서 188.4 mg/kg으로 나타남. 그리고 Zn도 심한오염인 200 mg/kg를 모두 넘는 700.2 mg/kg(지점 1), 666.5 mg/kg(지점 2), 773.7 mg/kg(지점 3)으로 나타났음.

- 한편, 국내 환경부 기준 적용 시 당진화력발전소 하천 저질 중금속의 농도는 카드뮴, 비소 그리고 크롬은 1등급으로 안전한 반면, Pb은 3개 지점 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 3등급(154~459 mg/kg)으로 분석되었고, Cu는 지점 1과 지점 3에서 각각 1,354.4 mg/kg, 303.7 mg/kg는 3등급(229~1,890 mg/kg)으로, 지점 2에서 188.4 mg/kg으로 2등급(48~228 mg/kg)으로 각각 나타남. 그리고 Zn은 지점 2에서 2등급(364~1,170 mg/kg)으로 확인되어 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것으로 조사 됨. (그림 3.8)



[그림 3.8] 당진화력발전소 주변 하천 저질의 As, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn 등의 측정값

1.3 태안화력발전소 주변 하천

1.3.1 조사지 현황

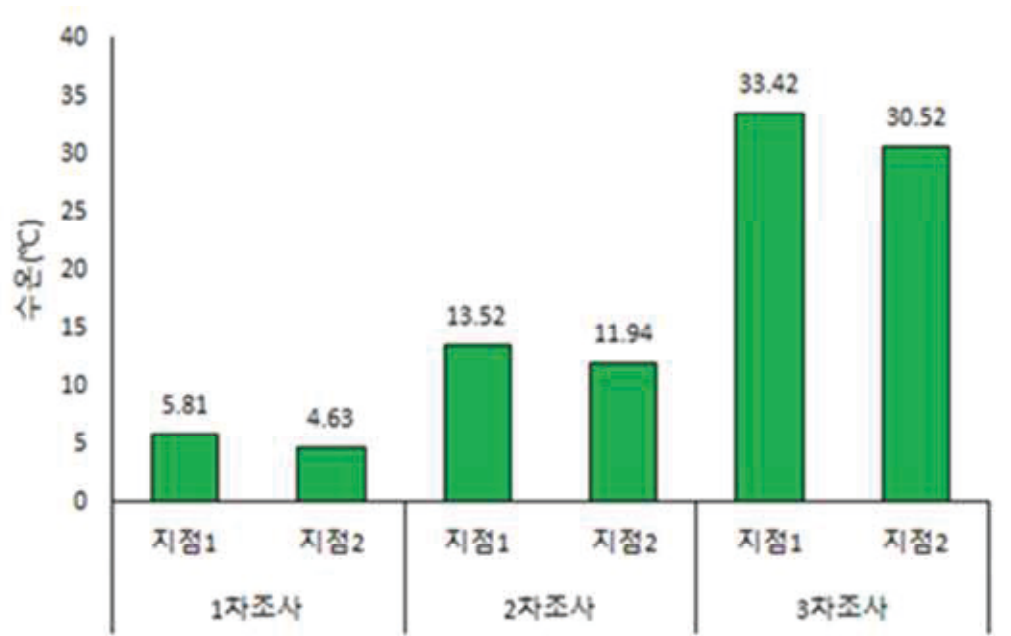
[표 3.5] 태안화력발전소 조사지 현황

태안화력발전소			
지점 1 원북면 방갈리 173-8	하천유형	평지형	
	하폭(m)	20-35	
	유폭(m)	0.5-4	
	수심(m)	0.1-0.5	
	수체 탁도	맑음	
	주변현황	농경지, 회처리장	
	제방	좌: 흙제방 / 우: 흙제방	
	주변식물	갈대, 갯버들, 부들	
지점 2 신재생로 263-187	하천유형	평지형	
	하폭(m)	30-40	
	유폭(m)	0.5-20	
	수심(m)	0.1-1.5	
	수체 탁도	매우 탁함	
	주변현황	회처리장, 농경지, 소도로,	
	제방	우: 석축 / 좌: 흙, 석축	
	주변식물	갈대, 갯버들, 등	

1.3.2. 수질 분석 결과

○ 태안화력발전소 주변 하천의 수온을 측정한 결과 지점 1에서 5.81–33.41℃ 범위, 평균 17.58℃였으며, 지점 2에서 4.63–30.52℃의 범위로 평균 수온은 15.70℃로 나타남. (그림 3.9).

- 3차년도 조사시 2019년 8월 초에 어류 서식에 안 좋은 영향을 줄 수 있는 28℃ 이상의 높은 수온이 조사되었는데 2021년 7월에도 2개의 지점에서 30℃ 이상의 수온이 확인되었음.



[그림 3.9] 태안화력발전소 주변 하천의 수온 변화

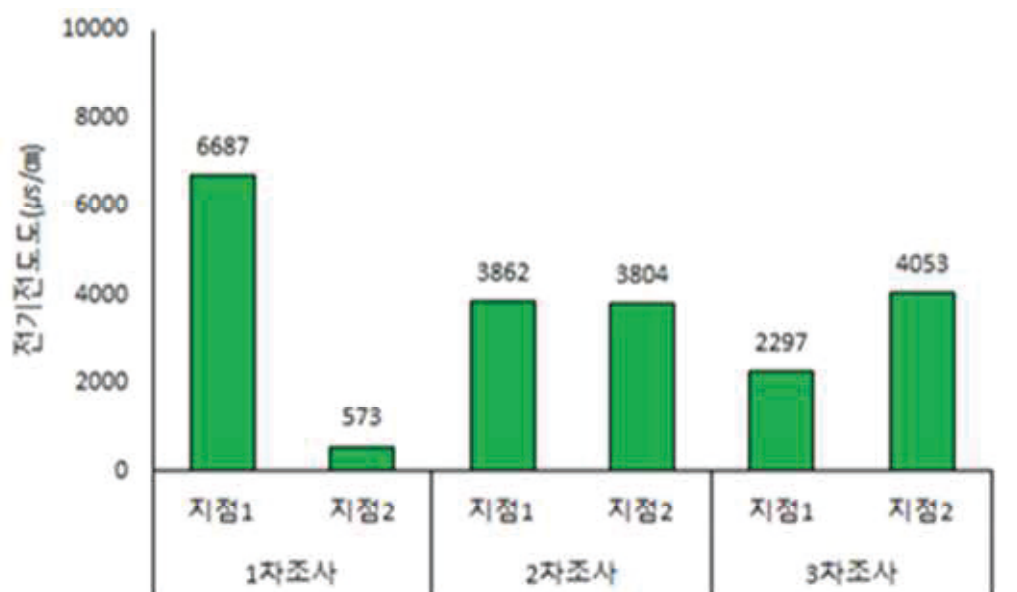
○ 2개의 지점 모두에서 수온이 높게 나타나 어류 폐사의 원인이 될 수 있으며 수온이 높게 나타난 주요 원인은 태안화력발전소 하천의 수체의 흐름을 막는 흙 보가 원인일 가능성이 높은 것으로 분석됨.

- 따라서 하천의 종적연속성을 확보하기 위해 하천에 설치된 흙 보를 제거하고 어류의 이동성을 확보하는 하천 서식지 개선이 필요한 것으로 확인되었음.



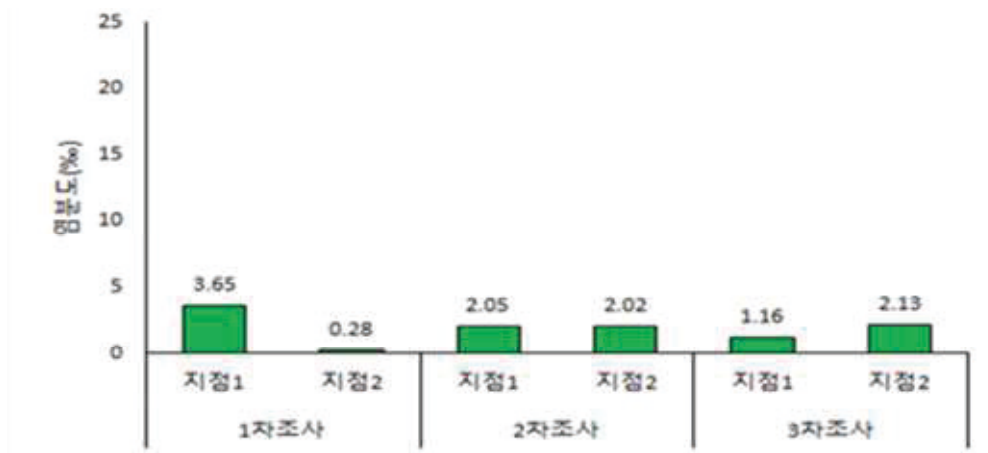
[그림 3.10] 태안화력발전소 주변 하천내 설치된 흙보(하천 내 여러 곳 있음)

- 전기전도도는 지점 1에서 2,297–6,687 μ S/cm 범위로 평균 4,282 μ S/cm, 지점 2에서 573–4,053 μ S/cm 범위로 평균 2,810 μ S/cm으로 나타남(그림 3.11)
 - 1차 조사 2021년 2월에 지점 1이 지점 2에 비하여 전기전도도가 11.7배 높게 나타났는데 3차년도 2020년 3월 조사에서도 4.1배로 차이가 다른 조사기간에 비하여 차이가 큰 것은 담수의 유입이 감소한 갈수기 때문으로 판단됨.



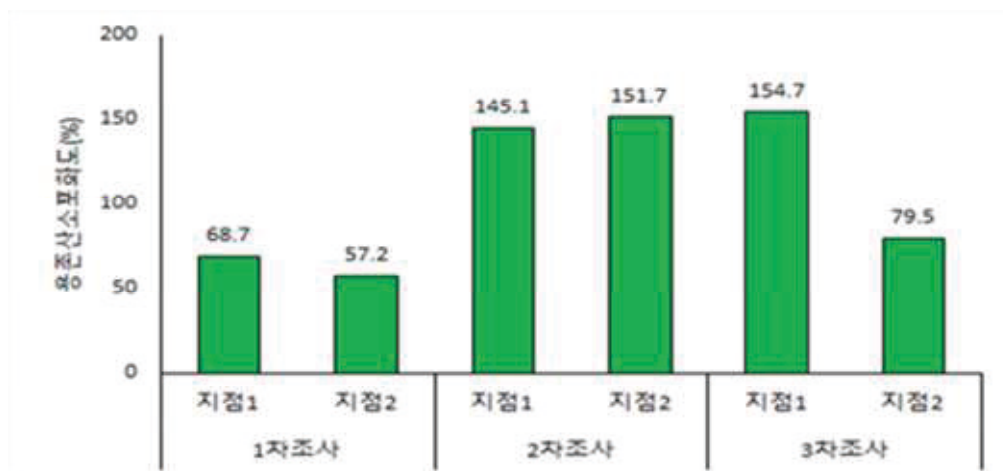
[그림 3.11] 태안화력발전소 주변 하천의 전기전도도 변화

- 염분도도는 지점 1에서 1.16–3.65 %로 평균 2.29%로 나타났고, 지점 2에서 0.28–2.29 %로 평균 1.48%로 나타나 지점 1에 비해서 지점 2가 비교적 높은 염분도도가 나타남.
- 지점 2가 지점 1에 비하여 염분도도가 높게 나타난 사유는 지점 1이 담수와 맞닿은 지점에 있어 지점 1에 비해 상대적으로 염분도도가 높게 나타난 것으로 분석됨.



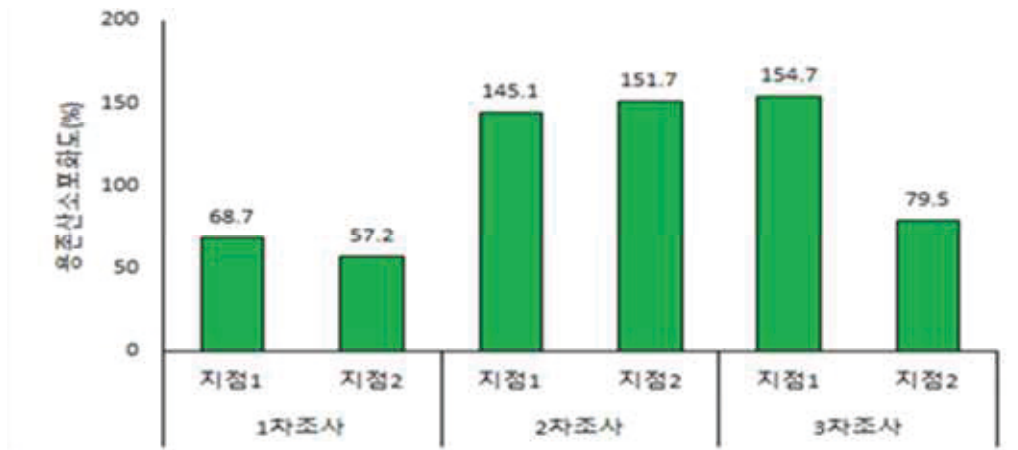
[그림 3.12] 태안화력발전소 주변 하천의 염분도 변화

- 용존산소량(DO)는 지점 1에서 8.38–14.92 mg/L의 범위로 평균 11.41 mg/L이고, 지점 2에서 5.89–16.17 mg/L의 범위로 평균 9.81 mg/L로 나타남
- 태안화력발전소 주변 하천의 용존산소량은 타지역 (당진 8.4 mg/L, 보령 8.9 mg/L, 서천 10.2 mg/L)에 비해 10.6 mg/L로 비교적 높게 측정되었는데 이는 수심이 얇고 영양염류가 많아 해캄과 같은 식물성플랑크톤의 광합성으로 인한 결과인(최 등, 2020) 것으로 판단됨.



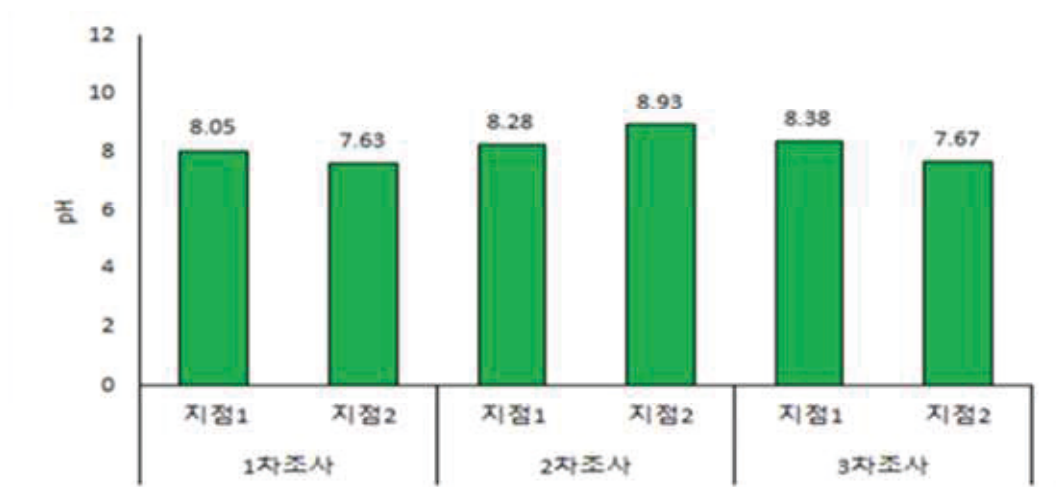
[그림 3.13] 태안화력발전소 주변 하천의 DO 포화도 변화

- 용존산소포화도(DO%)는 지점 1에서 68.7-154.7% 범위로 평균 122.83%였으며, 지점 2에서 57.2-151.7%의 범위로 평균 96.13%로 나타남. 이는 해감에 의한 광합성이 활발해지면 수체내 용존산소 농도가 증가하게 되면서 포화도가 높아진 것으로 분석됨.



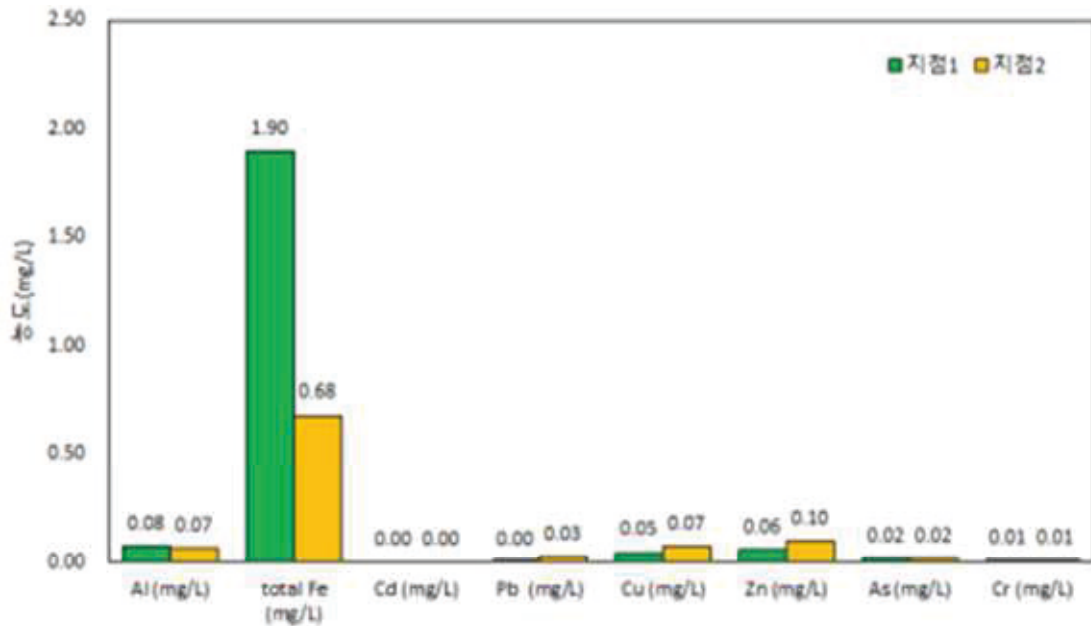
[그림 3.14] 태안화력발전소 주변 하천의 DO 포화도 변화

- pH는 지점 1에서 8.05-8.38의 범위로 평균 8.24로 나타났고, 지점 2에서는 7.63-8.93의 범위로 평균 8.08로 나타남.
 - 지점 1에서 모든 시기에 8.0 이상을 보이거나 지점 2에서 2차 조사시에 9에 가깝게 나타난 것은 어류에 영향이 있을 가능성이 있음을 보여주는 결과로 일반적으로 pH 8.5 이상부터 어류의 아가미나 기타 조직에 손상(조직 훼손, 붓기 증상, 출혈 등)이 나타날 가능성이 있음(김범철 등, 2009)



[그림 3.15] 태안화력발전소 주변 하천의 pH 변화

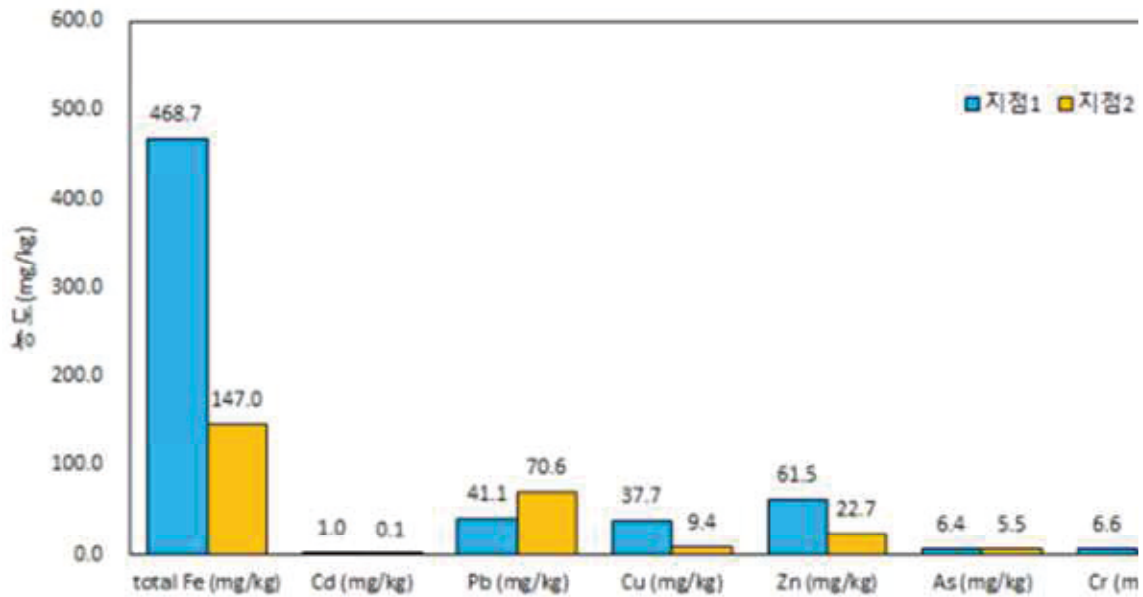
- 수체의 중금속 농도를 분석한 결과 대부분의 항목에서 환경부의 어류치사 농도 기준치에 미달하는 것으로 나타나 어류에 큰 문제가 없는 것으로 나타났으나, Fe 농도에서 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l 보다는 다소 높은 것으로 관찰되었으며, 특히 지점 1에서 1.4 mg/l 초과한 1.90 mg/l이 지점 2에서는 0.18 mg/l 초과한 0.68 mg/l이 확인되었음.



[그림 3.16] 태안화력발전소 주변 하천의 중금속 농도 분석 결과

1.3.2. 저질 분석 결과

- 태안화력발전소 주변 하천 저질의 퇴적물은 미국캐나다 담수퇴적물 오염분류 기준 (3차년도 연구보고서 622쪽 참조)에 따라 분류 시 지점 1이 Pb와 Cu의 중간오염(Pb 40~60 mg/kg / Cu 25~50 mg/kg)을 보였고 지점 2는 Pb가 심한오염(Pb >60 mg/kg)으로 나타난 반면, 그 외의 항목에서는 큰 문제가 없는 것으로 나타났음
- 태안화력발전소 하천바닥 저질의 중금속 농도를 우리나라 환경부 ‘하천 퇴적물 오염평가기준(3차년도 연구보고서 644쪽 참조)’ 으로 분류 시 지점 1에서 Cd 1.0 mg/kg, 지점 2에서 Pb 70.6 mg/kg으로 각각 검출되어 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 ‘2등급’ 으로 확인됨.



[그림 3.17] 태안화력발전소 주변 하천 퇴적물(저질)의 Pb, Fe, Cu 등 측정값

[표 3.6] 하천 퇴적물 오염평가기준(환경부)

등 급		I	II	III	IV
항 목	완전연소가능량(%)				13 초과
	총질소(mg/kg)				5,600 초과
	총인(mg/kg)				1,600 초과
	구리(mg/kg)	48 이하	228 이하	1,890 이하	1,890 초과
금속류	납(mg/kg)	59 이하	154 이하	459 이하	459 초과
	니켈(mg/kg)	40 이하	87.5 이하	330 이하	330 초과
	비소(mg/kg)	15 이하	44.7 이하	92.1 이하	92.1 초과
	수은(mg/kg)	0.07 이하	0.67 이하	2.14 이하	2.14 초과
	아연(mg/kg)	363 이하	1,170 이하	13,000 이하	13,000 초과
	카드뮴(mg/kg)	0.4 이하	1.87 이하	6.09 이하	6.09 초과
	크롬(mg/kg)	112 이하	224 이하	991 이하	991 초과

- * I 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 거의 없음
 II 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있음
 III 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 비교적 높음
 IV 등급 : 저서생물에 독성이 나타날 가능성 매우 높음

[표 3.7] 미국·캐나다 하천 퇴적물 오염기준

기준 항목	비오염 1) (mg/kg)	중간오염 1) (mg/kg)	심한오염 1) (mg/kg)	ERL 2) (mg/kg dry wet)	ERM 2) (mg/kg dry wet)	ISQG 3) (mg/kg)	PEL 3) (mg/kg)
Zn	<90	90~200	>200	—	—	123	315
Pb	<40	40~60	>60	47	220	35.0	91.3
Cu	<25	25~50	>50	34	270	35.7	197
Cd	—	—	>6	1.2	9.6	0.6	3.5
Ni	<20	20~50	>50	21	52	—	—

- 1) 미국지역환경청의 담수퇴적물 오염분류 기준
- 2) 미국해양대기청의 퇴적물권고치
- 3) 캐나다 환경부의 담수퇴적물 잠정기준

1.4. 보령화력발전소 주변 하천

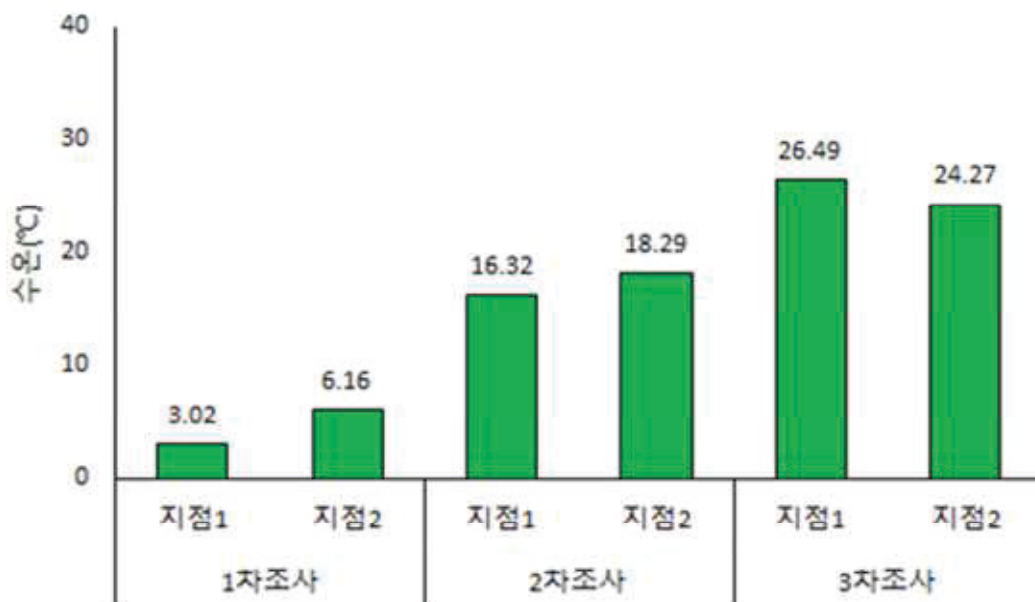
1.4.1. 조사지 현황

[표 3.8] 보령화력발전소 조사지 현황

보령화력발전소			
지점 1 오천면 오포리 산5	하천유형	평지형	
	하폭(m)	60-80	
	유폭(m)	1-20	
	수심(m)	0.1-0.6	
	수체 탁도	약간 탁함	
	주변현황	도로, 회처리장, 농경지	
	제방	우: 석축 / 좌: 석축	
	주변식물	고마리, 부들, 갈대 등	
지점 2 오천면 영보리 741	하천유형	평지형	
	하폭(m)	60-80	
	유폭(m)	15-30	
	수심(m)	0.3-1.2	
	수체 탁도	약간 탁함	
	주변현황	회처리장, 도로, 화력발전소 등	
	제방	우: 석축 / 좌: 석축	
	주변식물	갯버들, 갈대, 뽕나무 등	

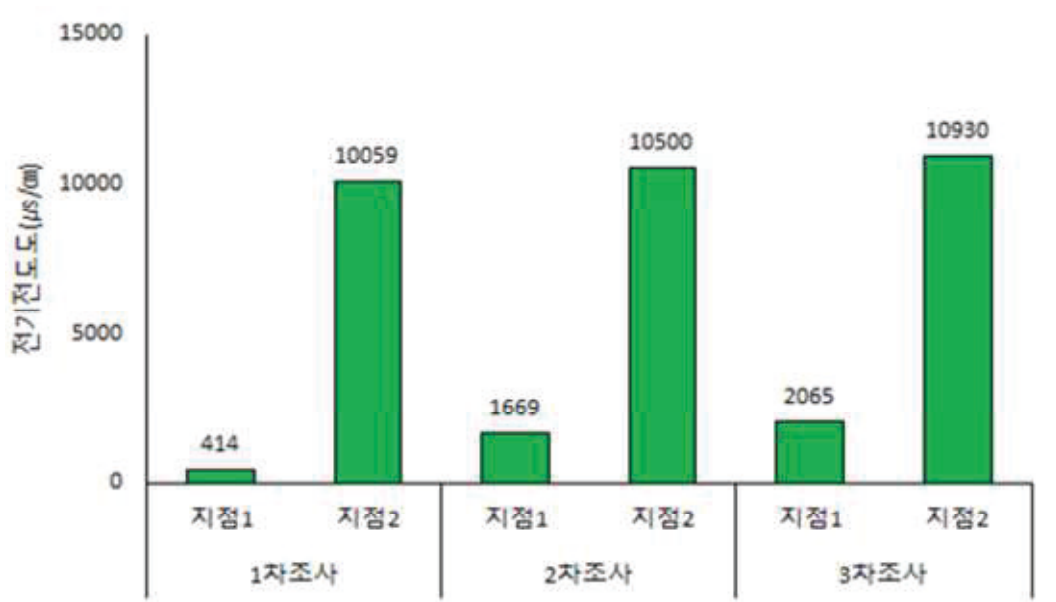
1.4.2. 수질 분석 결과

- 보령화력발전소 주변지역 하천 지점 1은 3.02~26.49℃로 평균 수온은 15.28℃로 나타났고, 지점 2에서 6.16~14.27℃의 범위로 평균 수온은 16.24℃로 관측됨.
- 보령화력발전소 주변지역 하천은 얇은 수심과 수체의 흐름이 거의 없는 곳으로 3차년도 연구 시 2019년 8월에 35℃ 가까이 수온이 높아져 여름철 어류의 서식환경이 불안정하였던 곳이었으나 4차년도 조사 때에는 2019년 조사 때보다 수온이 정상의 범위로 일부 회복되었음.



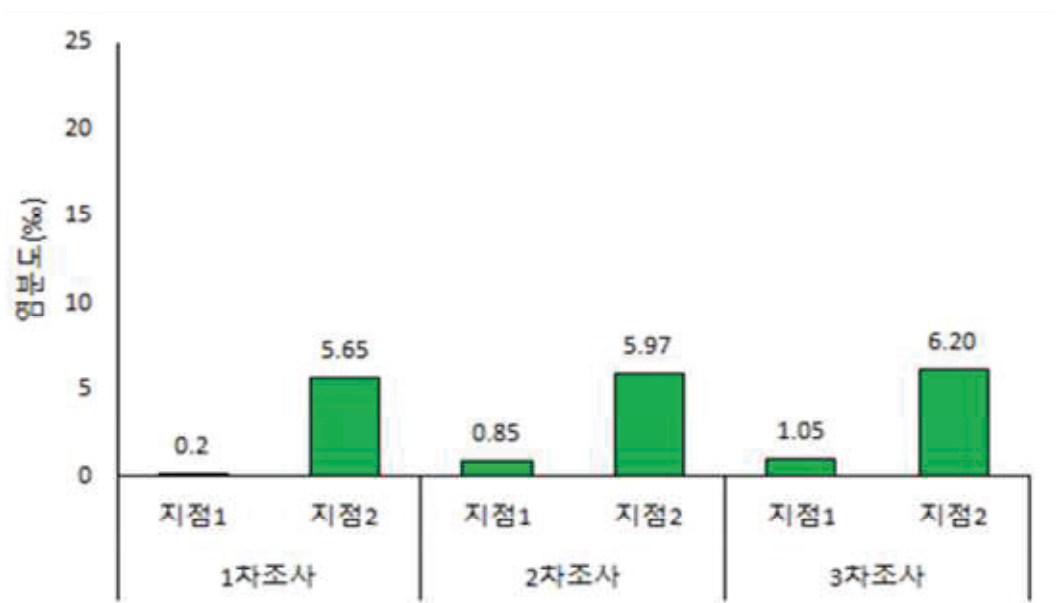
[그림 3.18] 보령화력발전소 주변 하천 수온의 변화

- 전기전도도는 지점 1에서 414~2,065 μ S/cm 범위로 평균 1,382.7 μ S/cm, 지점 2에서 10,059~10,930 μ S/cm 범위로 평균 10,496.3 μ S/cm로 관측되어 지점 1의 전기전도도가 지점 2보다 평균 9,113.6 μ S/cm 낮게 측정되었음.
- 지점 1이 지점 2보다 전기전도도가 낮게 측정된 사유는 지점 1이 지류의 유입지역이기 때문에 화력발전소 배수구 근처인 지점 2보다 염분의 영향을 덜 받아 전기전도도가 낮게 나타난 것으로 판단됨.
- 앞서 설명한 바와 같이 일반적으로 전기전도도는 수체내 이온성분이 많아지거나 염분 등의 농도가 높아질수록 높게 나타남.



[그림 3.19] 보령화력발전소 주변 하천의 전기전도도 변화

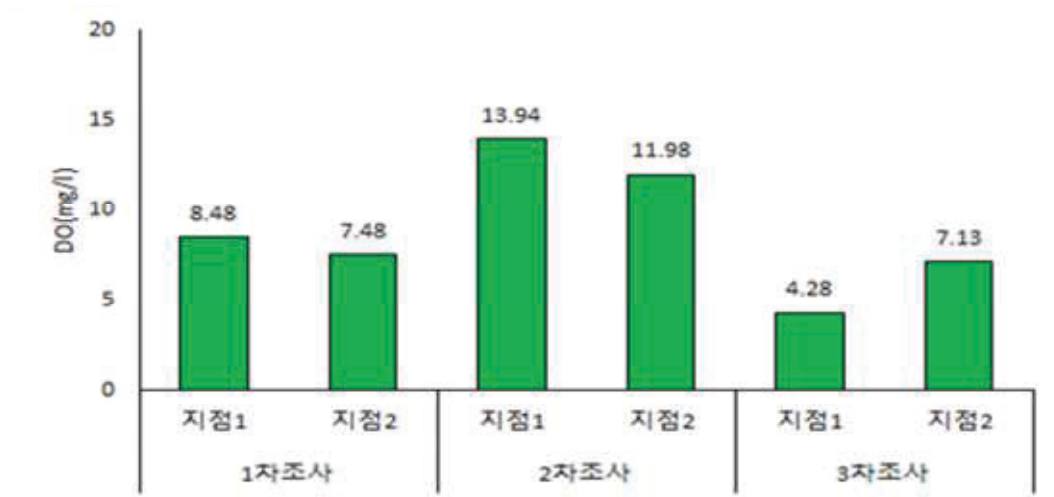
- 보령화력발전소 주변지역 하천의 염분도는 전기전도도와 마찬가지로 지류의 담수 영향을 받는 지점1에서 0.2-1.05 % 범위로 평균 0.70 %에 해당되어 담수에 가까웠으며 지점2는 5.65-6.20 % 범위로 평균 5.94 %로 확인되어 기수역(강물이 바다로 들어가 바닷물과 서로 섞이는 곳)과 유사한 염분도를 나타냄.



[그림 3.20] 보령화력발전소 주변 하천의 염분도의 변화 분석

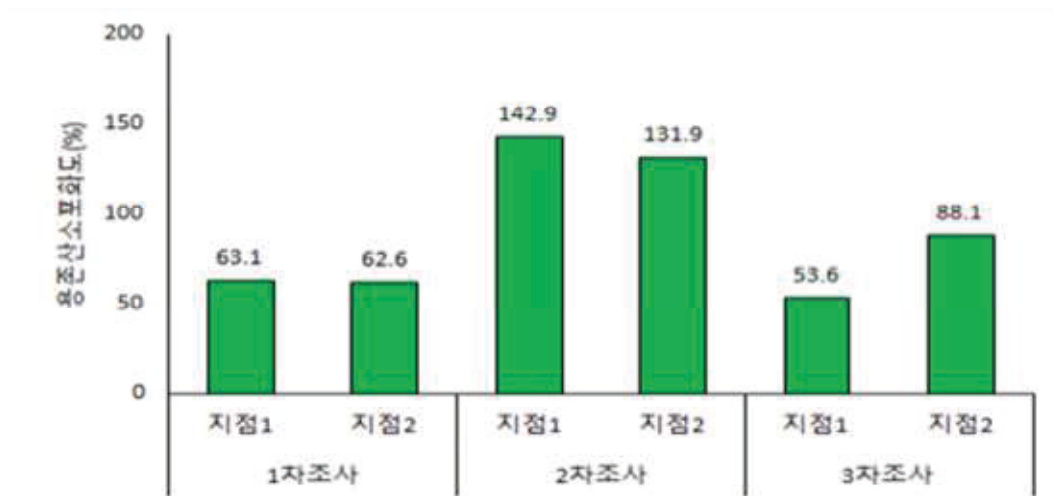
- 용존산소(DO)는 지점 1에서 4.28~3.94 mg/L의 범위로 평균 8.90 mg/L이었고, 지점 2에서 7.13~11.98 mg/L 범위로 평균 8.86 mg/L로 나타나 어류들의 서식에는 전혀 지장이 없는 것으로 확인되었음.

※ 용존산소 3-4 mg/l 이하부터 어류에 영향이 나타나기 시작하고 2 mg/l 이하면 폐사함.



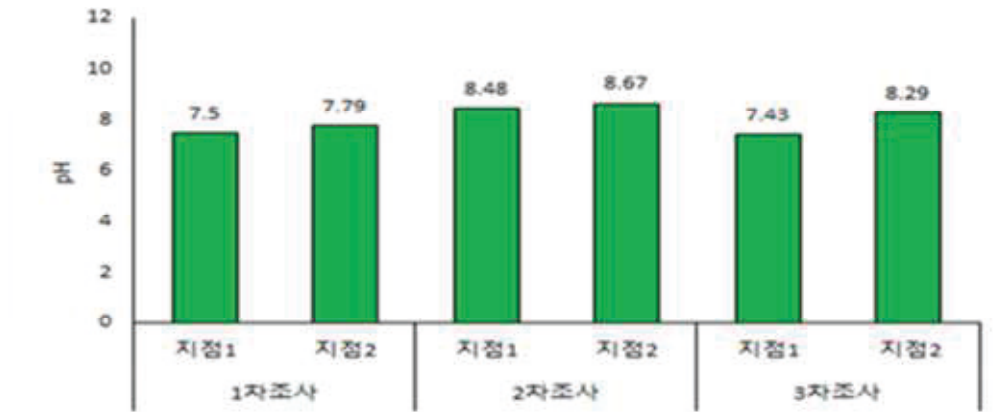
[그림 3.21] 보령화력발전소 주변 하천 용존산소의 변화

- 용존산소포화도(DO%)는 지점 1에서 53.6~42.9%로 평균 86.53%였으며, 지점 2에서 62.6~131.9%의 범위로 평균 92.2%로 나타나 용존산소와 같은 경향성을 가지는 것으로 확인되었고 어류 서식에는 무리가 없는 것으로 확인함.



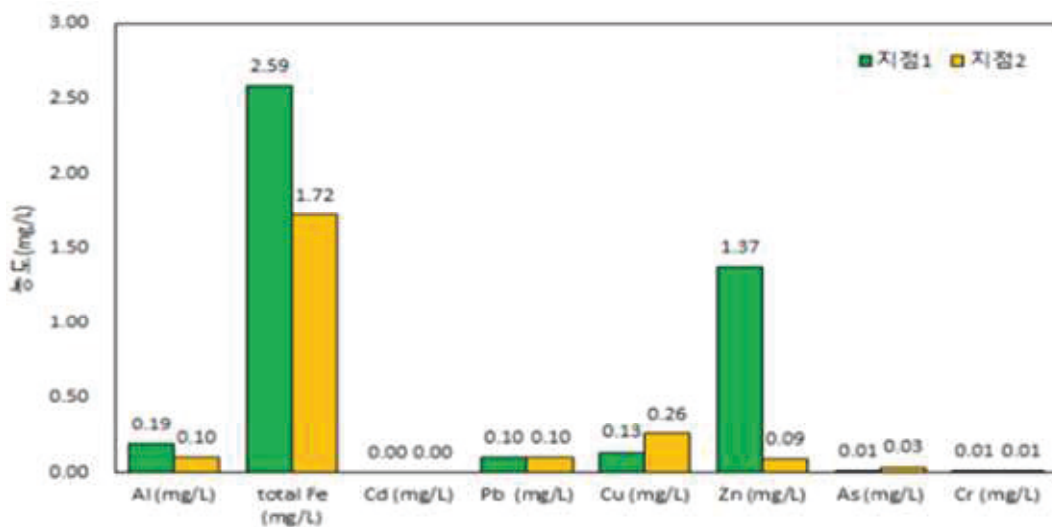
[그림 3.22] 보령화력발전소 주변 하천 용존산소포화도의 변화

- 보령화력발전소 주변 하천의 pH는 지점 1에서 7.43~8.48의 범위로 평균 7.80으로 나타났고, 지점 2에서 7.79~8.48 범위로 평균 8.25로 나타나 어류가 서식하기 위한 적정 pH 범위(6.5~8.5, 김 등, 2009)에 해당되어 서식 환경이 나쁘지 않은 것으로 확인됨.



[그림 3.23] 보령화력발전 주변 하천 pH의 변화

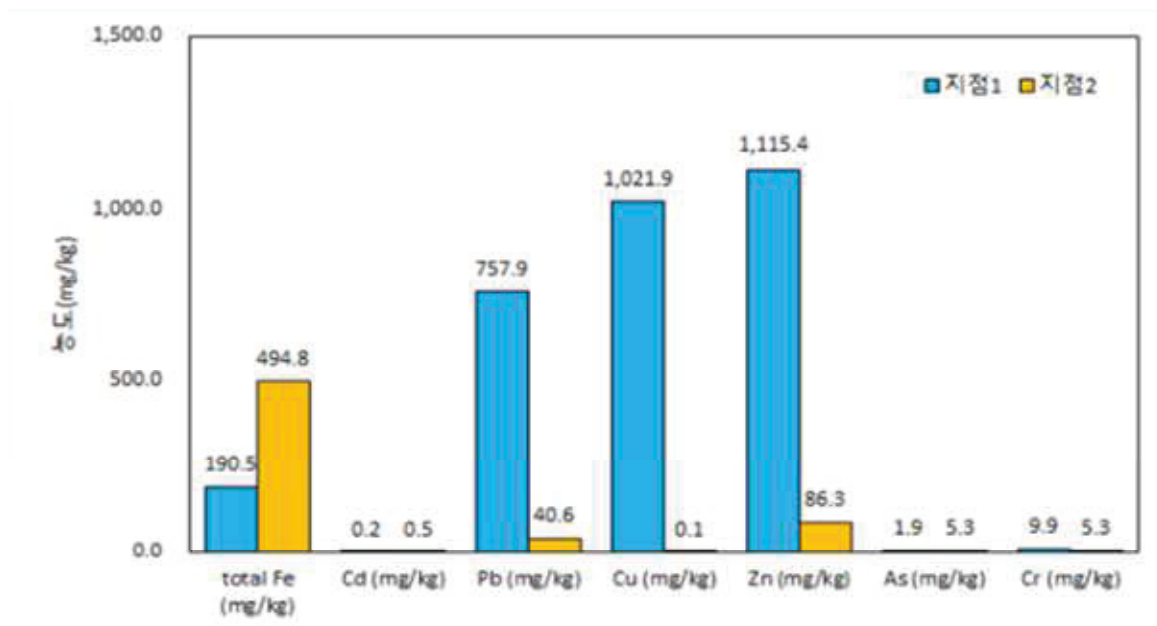
- 수체의 중금속 농도 분석 결과 Al 및 Pb는 환경부의 어류치사 농도 기준치 내에 있는 것으로 확인되었으나 Fe은 지점 1에서 2.59 mg/l, 지점 2에서 1.72 mg/l로 조사되어 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l의 3~5배를 초과하는 것으로 확인되었으며, Zn 역시 지점 1에서 1.37 mg/l가 검출되어 어류폐사 기준치인 0.4~1.75 mg/l 내로 검출되어 어류폐사의 위험요인에 일정부분 노출되어 있는 것으로 확인됨.



[그림 3.24] 보령화력발전소 주변 하천 중금속 농도 분석 결과

1.4.2. 저질 분석 결과

- 미국지역 환경보호청에서 설정된 담수퇴적물 오염분류 기준에 의하면 보령 지점 1에서 Pb, Cu, Zn이 심한오염으로, 지점 2에서 Pb가 중간오염인 것으로 확인되었음.
 - 3차년도(2020년) 저질 분석결과에서는 지점 1에서 Cu, Ni, Zn이 중간오염으로 나타났으나, 4차년도(2021년) 조사에서는 심한오염으로 측정되어 오염농도가 큰 폭으로 상승되었음.
 - 하천바닥 저질(퇴적물)은 주변의 오염원으로부터 쉽게 유입되는데 당진, 태안지역에 비하여 보령화력발전소 주변 하천의 저질 중금속 농도가 크게 증가한 것은 회처리장의 영향과 더불어 보령영보일반산업단지가 조사 지역에 인접하여 영향을 받은 것으로 추정됨.
- 보령 저질의 중금속 농도를 환경부 기준치와 비교해 보면 대부분의 항목에서 1등급이나 큰 문제가 없었지만,
 - 지점 2에서 Cd가 2등급, 지점 1에서 Cu와 Zn이 3등급으로 나타나 저서생물에 독성이 있을 가능성이 비교적 높은 것으로 나타났고 지점 1에서 Pb가 757.9 mg/kg으로 4등급으로 측정되어 저서생물에 독성이 나타날 확률이 매우 높은 것으로 확인되었음.



[그림 3.25] 보령화력발전소 주변 하천 저질의 Fe, Cr, Cu, Pb, Zn, As 등의 측정값

1.5 서천 화력발전소

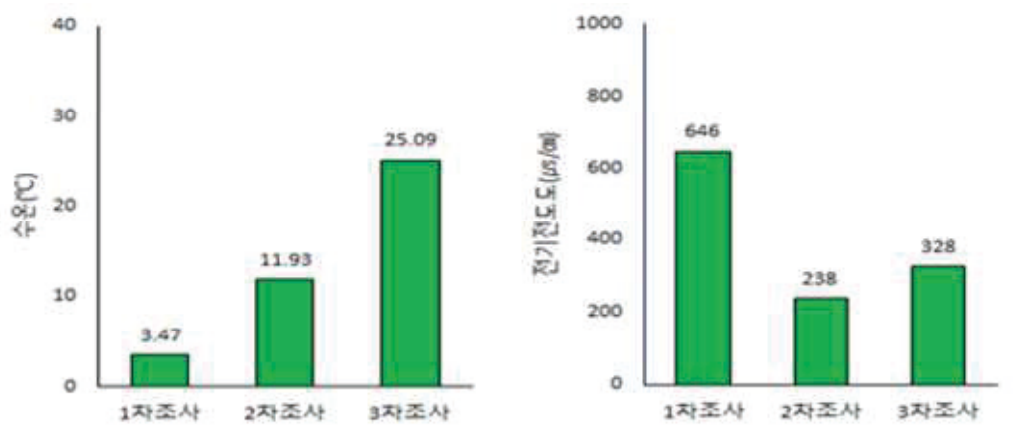
1.5.1 조사지 현황

[표 3.9] 서천화력발전소 조사지 현황

서천화력발전소			
지점 1 서면 마량리 313-10	하천유형	평지형	
	하폭(m)	23-30	
	유폭(m)	2-20	
	수심(m)	0.3-2.2	
	수체 탁도	맑음	
	주변현황	도로, 화력발전소	
	제방	우: 콘크리트 / 좌: 암석과 콘크리트	
	주변식물	갈대 등	

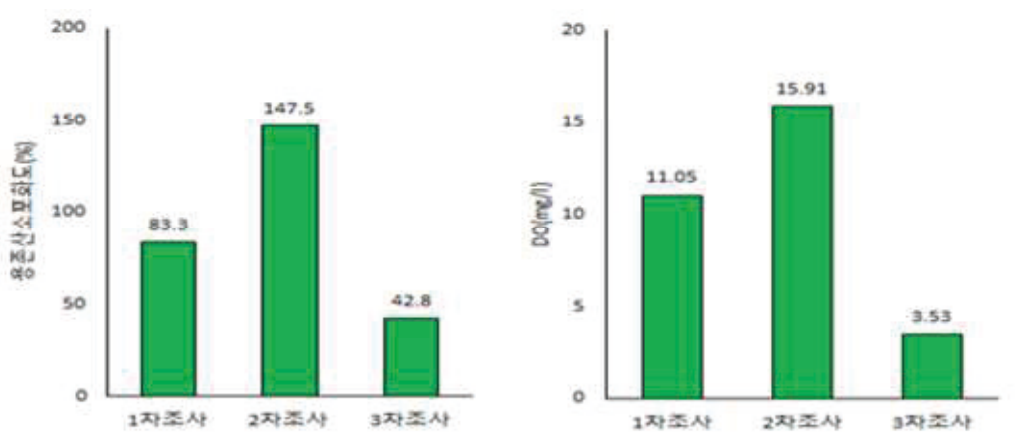
1.5.2. 수질 분석 결과

- 서천화력발전소 주변 하천의 수온은 3.47~25.09℃ 범위로 평균수온은 13.50℃로 나타나 어류 서식에 큰 문제는 없었음.
- 전기전도도는 238~646 μ S/cm 범위로 평균 404 μ S/cm로 관찰되어 다른 지역이 평균 1000 μ S/cm 이상 관찰된 것에 비하여 전기전도도가 낮게 나타났는데 이는 서천화력발전소 건설로 인해 하천이 매립되어 수체의 흐름이 없었기 때문인 것으로 분석됨.



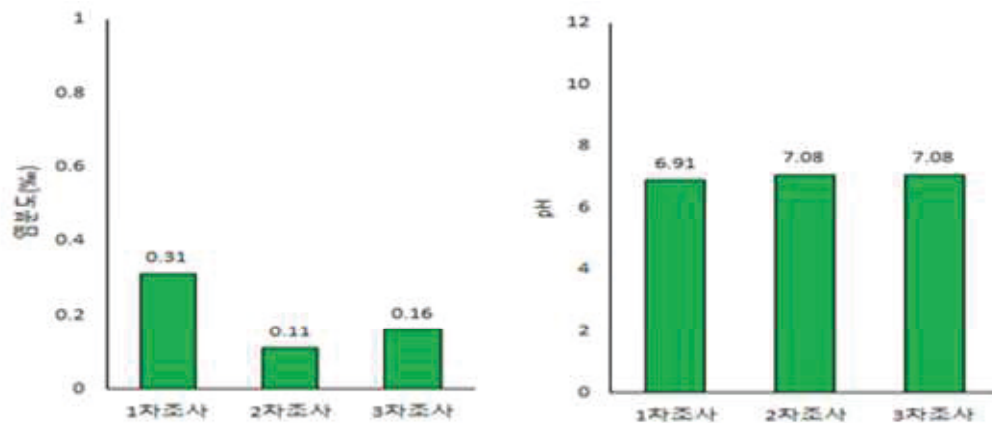
[그림 3.26] 서천화력발전소 주변 하천의 수온과 전기전도도의 변화

- 용존산소량(DO)는 3.53~15.91 mg/L의 범위로 평균 10.16 mg/L로 나타났으며 용존산소포화도도 42.8~47.5% 범위 평균 91.2%로 용존산소량 및 산소포화도 모두 비교적 높은 것으로 나타남



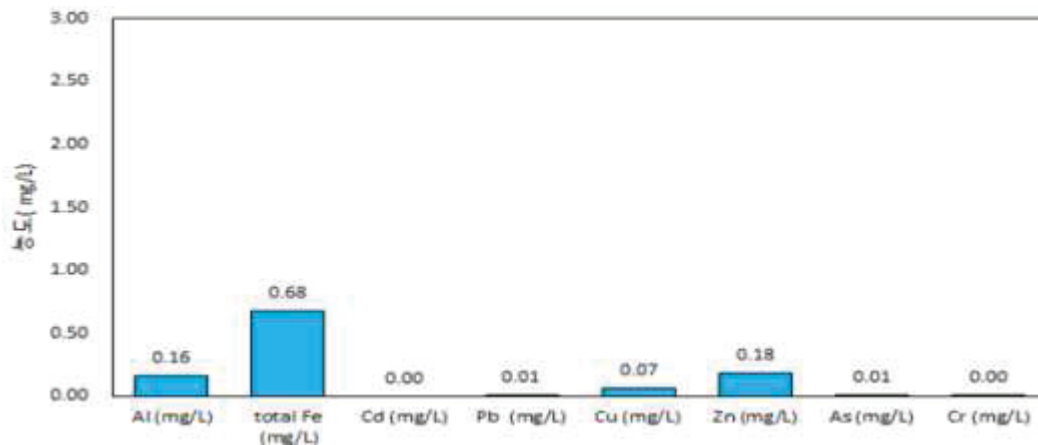
[그림 3.27] 서천화력발전소 주변 하천의 용존산소와 용존산소포화도 변화

- 염분도는 0.11~0.31 % 범위로 평균 0.19 %로 담수였으며 이는 앞서 설명한 바와 같이 발전소 건설로 수체의 흐름이 없어 염분이 유입되지 않은 환경이었기 때문에 염분도도가 낮게 나타났음.
- pH는 6.91~7.08의 범위로 평균 7.02로 나타나 일반적으로 어류들이 살기 좋은 pH 6.5~8.5(김 등, 2009)의 환경에 해당되었음.



[그림 3.28] 서천화력발전소 주변 하천의 염분도와 pH의 변화

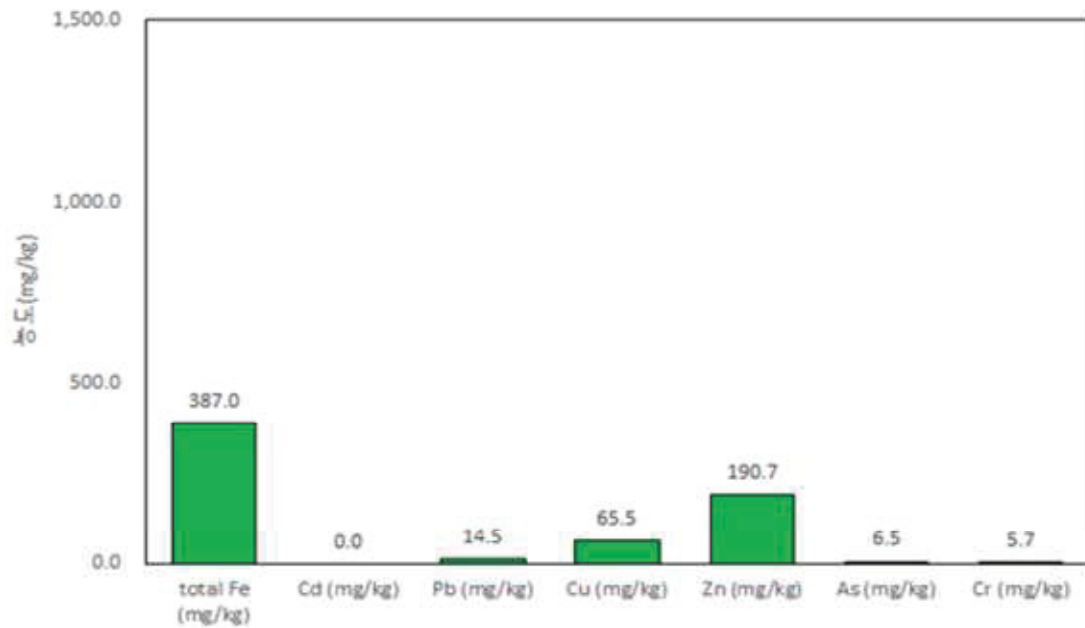
- 수체의 중금속 농도 분석 결과 대부분의 항목에서 환경부의 어류치사 농도 기준치에 미달하여 큰 문제가 없는 것으로 확인되었으나,
 - Al가 0.16 mg/L로 어류 폐사가 가능한 기준치 범위(환경부 공시 : 0.1~5.0)에 해당되었고, Fe은 0.68 mg/L로 어류 폐사 기준치인 0.5 mg/L를 0.18 mg/L 초과하는 것으로 나타났음.



[그림 3.29] 서천화력발전소 주변 하천의 중금속 분석

1.5.3. 저질 분석 결과

- 신서천화력발전소 하천의 저질 중금속 농도를 환경부 기준으로 분류하면 대부분의 항목에서 1등급으로 큰 문제가 없었지만 구리 항목에서 65.5 mg/kg로 측정되어 분류기준 2등급(Cu 228 mg/kg 이하)으로 나타나 약간 나쁨의 정도로 확인되었음.



[그림 3.30] 서천화력발전소 주변 하천 퇴적물(저질)의 Al, Fe, As, Cr, Cu, Pb, Zn 측정값

1.6. 요약 및 소결론

- 4차년도 충남 화력발전소의 주변 하천에 대한 수질과 수환경 그리고 저질을 조사한 결과 대체로 어류 서식에는 큰 문제가 없는 것으로 확인되었으나, 일부 지점 저질에서 중금속 일부가 어류폐사 기준치를 초과하거나 저서생물 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 것으로 나타나 지속적인 관찰이 요구되었음.
- 당진 화력발전소 인근 하천에서 수질을 조사한 결과 어류의 서식에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났으며, 수체 내 중금속을 분석한 결과, Fe은 지점 1과 3에서 어류폐사 기준치인 0.5를 초과한 0.7 mg/l와 1.2 mg/l로 나타났고, Zn은 지점 1과 지점 3에서 각각 2.0 mg/l, 13.3 mg/l로 검출되어 어류폐사 기준치인 0.4~1.75 mg/l를 최대 7.6배 초과함.
 - 3차년도 조사에서는 Fe은 지점 1·2에서 각각 0.07 mg/l과 0.13 mg/l로 낮은 농도였고, Zn은 전혀 검출되지 않았으나, 4차년도에는 Fe이 0.7 mg/l와 1.2 mg/l로 10배 정도 높아졌는데 이는 2021년 4월 조사 시 당진 하천 주변 농경지 객토로 인해 토양에 포함된 Fe이 주변 하천으로 유입되어 3차년도 대비 높게 검출된 것으로 추정됨.
 - 지점 3에서 Pb의 어류폐사 기준치(1.0~31.5 mg/l) 수준인 2.0 mg/l 검출되었고, Cu가 2.9 mg/l로 연수(soft water) 기준치인 0.03~0.7 mg/l를 넘겼고, 센물(hard water) 기준치(0.6~6.4mg/l) 범주 내로 검출되어 수체의 중금속 농도 개선을 위한 지속적인 관찰이 요구됨.
 - 저질 내 중금속을 국내 환경부 기준을 적용하여 살펴보면, Cd, As 그리고 Cr은 1등급으로 안전한 반면, Pb은 3개 지점 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 3등급(154~459 mg/kg)으로 분석되었음.
 - Cu는 지점 1과 지점 3에서 각각 1,354.4 mg/kg, 303.7 mg/kg는 3등급(229~1890 mg/kg)으로, 지점 2에서 188.4 mg/kg으로 2등급(48~228 mg/kg)으로 각각 나타났고 Zn은 지점 2에서 2등급(364~1,170 mg/kg)으로 확인되어 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것으로 조사됨.
- 태안 화력발전소 인근 하천 수질 및 수체 내 중금속을 분석한 결과, Fe을 제외한 대부분 항목에서 환경부 어류치사 농도 기준치에 미달하는 것으로 나타남.

- Fe 농도에서 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l 보다 다소 높은 것으로 관찰되었으며, 특히 지점 1에서 기준치를 1.4 mg/l 초과한 1.90 mg/l이, 지점 2에서는 0.18 mg/l 초과한 0.68 mg/l이 확인되었음.
 - 3차년도 수체검사에서는 Cu가 4.1 mg/l로 약간 높게 나타났으나 4차년도에는 지점 1에서 0.05 mg/l, 지점 2에서 0.07 mg/l로 안정화되고, Fe 검출량이 3차년도 지점 1의 0.13 mg/l 보다 14.6배, 지점 2에서 0.09 mg/l 보다 2배 초과한 값을 보였음.
 - 지점 1은 태안 화력발전소 회처리장에 인접한 하천 지점으로 유연탄, 침출수 등의 영향으로 Fe 성분이 높게 나타난 것으로 추정되나, 3차년도에는 비교적 낮게 검출되었다가 4차년도에 급격하게 증가된 보다 명확한 사유는 환경적 요인 등을 종합적으로 고려하여 중장기 모니터링이 필요할 것으로 판단됨.
 - 하천바닥 저질의 중금속 농도는, 우리나라 환경부 '하천 퇴적물 오염평가기준 분류를 적용할 경우 지점 1에서 Cd 1.0 mg/kg, 지점 2에서 Pb 70.6 mg/kg으로 각각 검출되어 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것 (2등급)으로 확인됨.
- 보령에서는 수질 항목 중 모든 항목이 어류 서식에 적합한 것으로 나타났고, 수체 내 중금속 분석 결과, Fe는 어류폐사 기준치 0.5 mg/l의 3~5배, Zn은 어류폐사 기준치인 0.4~1.75 mg/l 내로 검출되어 어류폐사의 위험에 일부 노출됨.
- Fe은 지점 1에서 2.59 mg/l, 지점 2에서 1.72 mg/l로 조사되어 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l의 3~5배를 초과하는 것으로 확인되었으며, Zn 역시 지점 1에서 1.37 mg/l가 검출되어 어류폐사 기준치 0.4~1.75 mg/l 범위로 검출되어 어류폐사의 위험요인에 일정 부분 노출되어 있는 것으로 확인됨.
- 3차년도에 비하여 Fe 농도는 지점 1에서 3.8배, 지점 2에서 19.1배 높아진 것으로 확인되었고 Zn는 지점 1에서 137배 상당히 높아진 것으로 나타났는데 이는 지점 1에서 2020년 하반기부터 2021년 상반기까지 행해진 공사로 인해 바닥 저질에 존재하던 성분들이 용출된 결과로 보여지며,
- 특히, 지점 1은 보령화력발전소 회처리장과 매우 인접해 있고, 지점 2는 화력발전소 배수구가 유출되는 곳으로 상대적으로 상류에 위치해 있는 지점 1의 영향을 받은 지점 2는 저질 바닥공사와 회처리장 영향, 배수구 등의 영향을 종합적으로 받아 Fe 성분이 지점 1보다 약 5배 높게 나타난 것으로 분석됨.

- 하천 저질의 중금속 농도는 대부분 항목에서 환경부 기준에 따라 1등급으로 나타나 큰 문제는 없었지만, 지점 2에서 Cd이 2등급, 지점 1에서 Cu와 Zn이 3등급으로 저서생물에 독성이 있을 가능성이 비교적 높은 것으로 나타났고 지점 1에서 Pb가 757.9 mg/kg으로 4등급으로 측정되어 저서생물에 독성이 나타날 확률이 매우 높은 것으로 확인되어 수생태계에 부정적인 영향을 주고 있는 것으로 분석됨.
- 서천 화력발전소 주변지역 하천 수질과 수체 내 중금속을 분석한 결과, 수체 중금속항목 중 Al과 Fe는 어류폐사가 발생할 일부 가능성이 있는 것으로 나타남.
 - Al이 0.16 mg/L로 어류 폐사가 가능한 기준치 범위(환경부 공시 : 0.1~5.0 mg/L)에 해당되었고, Fe은 0.68 mg/L로 어류 폐사 기준치인 0.5 mg/L를 0.18 mg/L 초과하는 것으로 나타났음.
 - 3차년도에는 Al이 0.05 mg/L, Fe가 0.1 mg/L로 검출되어 큰 문제가 없는 것으로 나타났으나, 지점 1이 발전소 주차장과 신서천화력발전소 공사장과 인접해 있어 차량 등에서 나온 오염물질이 하천에 유입되어 3차년도보다 Al과 Fe가 각각 3.2배, 6.8배 증가된 것으로 추정됨.
 - 하천 저질 내 중금속 농도를 환경부 기준치로 분류하면 대부분 항목에서 1등급으로 확인되었지만, 구리 항목에서 65.5 mg/kg로 측정되어 분류기준 2등급(Cu 228 mg/kg 이하)으로 나타나 ‘약간 나쁨’ 으로 분석됨.

2. 어류 중금속 모니터링

2.1. 조사 시기 및 조사 방법

- 충남 화력발전소 주변 하천의 중금속 분석을 위하여 2021년 10월 24~25일 2일간 한차례 조사하였음.

[표 3.10] 충남 화력발전소 주변지역의 어류 조사 시기

조사항목	조사차수	조사시기	조사일수
어류 조사 (중금속)	1	2021년 10월 24일~2021년 10월 25일	2

- 어류의 중금속을 분석을 위해 어류 샘플을 전처리하고 분광광도계 또는 ICP-MS를 사용하여 분석하였음.

[표 3.11] 어류 전처리 내용 및 분석방법

구분	주요내용
전처리 (어류)	<ul style="list-style-type: none"> - 붕어 5개체를 막자사발에 넣고 갈아 표본병으로 옮김 - 2g의 물고기 시료를 시험관에 투입 - 5 mL의 진한 질산을 가한 후에 식을 때까지 기다림. 이어서 2 mL의 70% 과염소산(perchloric acid, HClO₄)을 가함. - 뚜껑을 막고 초음파 세척기에서 80 °C에서 1시간 동안 가열하고 45 mm PTFE 필터로 여과하여 50 mL의 부피 플라스크에 넣고 초순수로 표선까지 묽힘.
분석	<ul style="list-style-type: none"> - 제조된 분석 시료는 분광광도계(철, 알루미늄) 또는 ICP-MS(납, 비소, 카드뮴, 크롬, 아연, 구리 등)를 사용하여 분석

2.2. 붕어 중금속 분석 결과

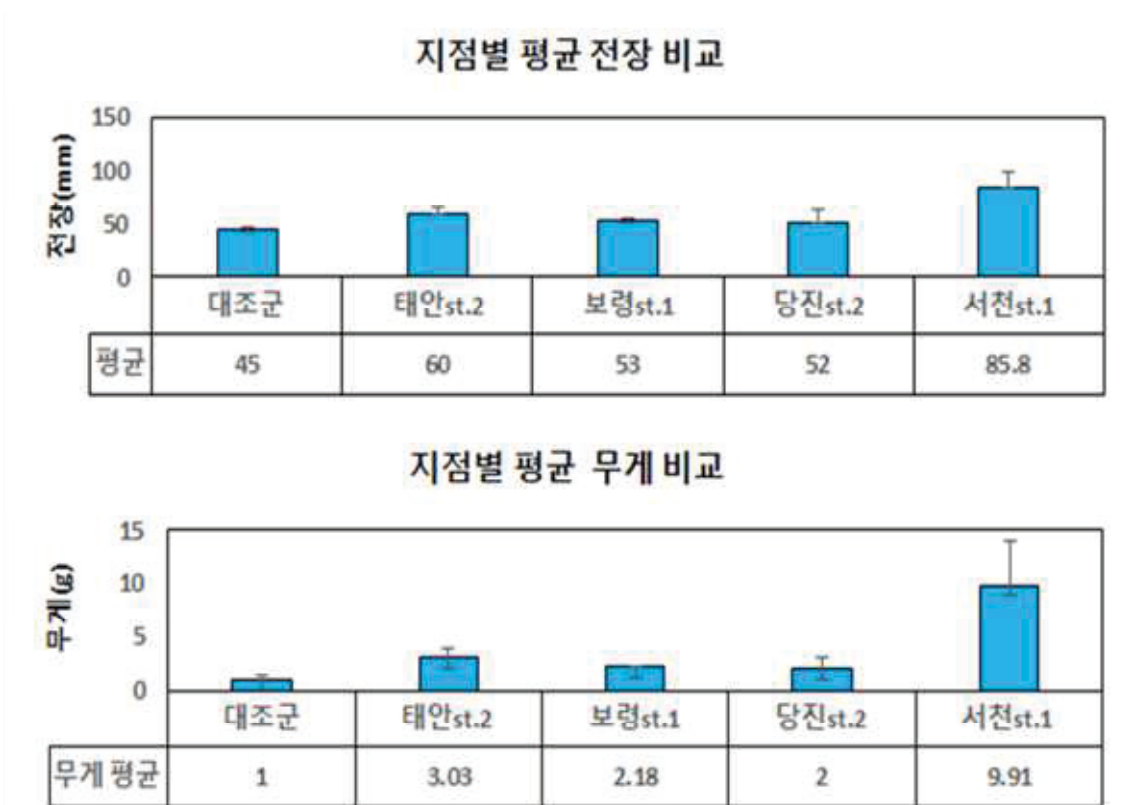
- 내성종인 붕어를 화력발전소 주변 지역별로 5개체씩 표본으로 하여 분석을 실시하고 대조군은 강원도 춘천의 지내천(소하천)에서 채집된 개체들로 비교 분석함.
- 붕어 중금속 분석 결과, 대조군과 화력발전소 간 중금속 농도는 큰 차이를 보이지 않았으나, 대조구에서는 검출되지 않았던 Fe가 당진은 63.0 mg/kg, 보령은 41.3 mg/kg, 태안 19.6 mg/kg (서천은 검출되지 않음)으로 나타나 국내 유통 민물어류 붕어의 Fe 평균 농도 8.129 mg/kg (범위 2.424~62.950 mg/kg, 김연천과 한선희, 1999년) 보다 높은 값을 나타냈고,
 - 수체에서 Fe 수치도 당진 지점 1과 3에서 각각 2.0 mg/l, 13.3 mg/l, 태안 수체 지점 1과 2에서 1.90 mg/l, 0.68 mg/l, 보령 수체 지점 1과 2에서 2.59 mg/l, 1.72 mg/l, 서천 수체에서 0.68 mg/l이 검출됨.
 - 이같이, 당진 지점 2를 제외한 모든 지점의 수체에서 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l를 넘는 것으로 나타났는데 수체의 높은 Fe 농도가 붕어 체내 철 농도에 영향을 미쳤을 가능성이 있으며, 관련 지점에서 큰 개체들이 출현하지 않은 것도 밀접한 관련성이 있다고 판단됨.
 - 다른 지역과 비교하여 상대적으로 높게 나타난 Fe의 중금속 오염 정도를 보다 명확하게 연구하기 위해 5차년도에는 수종 3종 이상 및 샘플 수 30표본 이상 분석이 필요할 것으로 분석됨.
- Al의 경우는 대조군은 9.69 mg/kg이 검출되었으나, 4개 시군의 평균 농도는 10.8 mg/kg으로 나타나 대조군에 비교하여 1.1 mg/kg이 높은 것으로 확인되었는데, Fe 오염도 분석과 마찬가지로 5차년도에는 샘플 수를 최대한 확보하여 대조군과 차이를 보다 면밀히 분석할 필요가 있을 것으로 판단

[표 3.12] 각 지역별 붕어의 중금속 분석 결과

지역 구분		Al (mg/kg)	Fe (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)
대조군	강원도 춘천	9.69	—	0.08	0.03	1.2
	충남 보령1	10.1	41.3	0.05	0.04	0.9
실험구	충남 태안2	11.6	19.6	0.10	0.06	1.0
	충남 서천	10.9	—	0.08	0.03	1.0
	충남 당진2	10.5	63.0	0.10	0.03	1.1

○ 중금속 실험에 사용된 붕어 개체들은 각 실험구에서 채집된 비슷한 크기들의 개체들을 실험에 사용하였음.

- 실험구별 개체 크기는 태안 60 ± 6.76 mm, 보령 53 ± 1.92 mm, 당진 52 ± 13.06 mm, 서천 85.8 ± 14.27 mm, 대조구는 45 ± 3.16 mm로 개체 크기가 크지 않은 작은 개체를 사용하여 실험함.



[그림 3.31] 붕어 개체들의 평균 전장과 무게 비교 분석

- 실험구내 붕어는 200 mm 이상의 큰 개체들이 거의 발견되지 않은 특이점이 관찰되었는데 이는 하천의 단절로 인한 이동의 결여에 따른 결과로 판단되며 앞서 설명한 바와 같이 Fe 고농도도 일부 영향을 미쳤을 것으로 판단되고 경우에 따라 큰 개체들의 서식지 이동 등에 따른 결과도 있을 수 있어 지속적인 모니터링이 요구됨.

3. 포유류 중금속 모니터링

3.1. 조사 시기 및 조사 방법

- 충남 화력발전소 주변에 서식하는 포유류의 중금속 정도를 확인하기 위해 2021년 9월부터 2021년 10월까지 총 2회에 걸쳐 조사를 실시함.
 - 등줄쥐(*Apodemus agrarius*)는 서식환경이 다양하여 농경지부터 하천 및 습지 지역까지 널리 분포하는 종(이상돈 2003)으로 화력발전소의 주변지역 중금속 오염정도를 확인하는데 적합한 포유류로 확인되어 실험 대상으로 선정함.

[표 3.13] 충남 화력발전소 주변지역의 포유류 조사 시기

차수	조사시기	조사일수
1차 조사	2021년 9월 27일~2021년 9월 29일	3
2차 조사	2021년 10월 12일~2021년 10월 13일	2

- 화력발전소 주변지역 포유류 중금속 농도를 측정하기 위해 당진 화력발전소 인근지역 3곳과 서산(팔봉산) 대조구 1개 지역에서 소형 포유류 총 4마리 포획함.
 - 포유류 포획을 위해 2021년 10월 12일 트랩을 지점별로 15개씩 총 60개 설치하고 2021년 9월 27일 1차 조사를 시행하였으나 포획된 소형 포유류 개체가 없었음
 - 유인 먹이로는 비스킷을 사용하고 Sherman live trap(셔먼트랩)을 이용하여 5~10m 간격으로 설치하였는데, 셔먼트랩을 이른 낮시간에 설치할 경우 다람쥐나 조류가 먹이를 먹기 위해 포획되는 경우가 있어 오후 4시 이후에 설치하고 다음날 오전 9시 이전에 트랩을 확인함.
 - 셔먼트랩을 이용하여 포획한 개체는 현장에서 종 동정 및 암수 구분 후 중금속 오염 분석을 위해 경추탈구를 진행하여 안락사함

[표 3.14] 소형 설치류 포획 지점 및 개체 정보

지역	코드명	날짜	주소	종명	개체수	성별	체장 (cm)
당진 (실험구)	DJ1	2021-10-13	충남 당진시 석문면 교로리 2709	등줄쥐	1	수컷	20
	DJ2	2021-10-13	충남 당진시 석문면 교로리 2712	등줄쥐	1	수컷	16
	DJ3	2021-10-13	충남 당진시 석문면 교로리 2712	땃쥐	1	암컷	9
서산 (대조구)	SS1	2021-10-13	충남 서산시 팔봉면 양길리 835-4	등줄쥐	1	수컷	16

- 소형 포유류를 포집하여 중금속을 분석하기 위해 신장(kidney), 간(liver)을 추출하고 (Hegstrom and West, 1989) 장기는 75℃에 48시간 동안 건조하였으며 건조된 장기의 무게 변화가 거의 나타나지 않을 때까지 지속 건조한 뒤 막자사발에 갈아 전처리 과정을 진행하였음.

－ 전처리 과정 :

- ① 시료를 0.01~0.1 g 사이로 무게를 측정함.
- ② 유리 바이알에 무게를 측정한 시료를 넣어줌.
- ③ 질산 5 mL 넣은 후 마이크로파 분해장치를 이용하여 처리함. (Milestone사의 Ultrawave 장비 사용)
- ④ 분해반응이 끝나면, 2% 질산으로 massup 한 후 검액을 만들고, ICP-MS를 이용하여 분석함.



[그림 3.32] 중금속 분석 과정

[표 3.15] ICP-MS분석 방법

구분	ICP-MS (NexlON2000) 측정 조건
매개변수	사양
전압	1600 W
플라즈마 가스 유량	15 L/min
보조 가스 유량	1.2 L/min
네블라이저 가스 유량	1.11 L/min
네블라이저	동심 네블라이저, 유리
토치 및 인젝터	2.5mm 인젝터가 장착된 원피스 쿼츠 토치
스프레이 챔버*	유리로 된 저기압 스프레이 챔버
스프레이 챔버 온도	10 °C
인젝터	알루미나, 내경 2mm
펌프 튜브	Yellow-Orange - id 0.51 mm PVC
콘*	샘플러콘/스키머콘/하이퍼스키머콘

※ Spray chamber(스프레이 챔버): 연속 기체상과 분산된 액체상 사이의 질량 및 열 전달에 이용되는 기체-액체 접촉기

※ Cone(콘): 플라즈마 내에서 생성된 분석물 이온이 질량 분석기의 사중극자로 이동하는 과정에서 분석 결과에 영향을 줄 수 있는 중성 입자를 배제하고, 전기적으로 양성인 분석물 이온만을 질량분석기로 보내는 역할을 하고 ICP-MS 감도에 있어서 중요한 요소

3.2. 화력발전소 주변지역 포유류 중금속 농도 현황

- 2020년 기준, 화력발전소 에너지원별 발전량은 유연탄(184,310,241 MWh), 무연탄(2,033,350 MWh), 중유(902,749 MWh), LNG(586,627 MWh) 순으로 유연탄이 발전 에너지원으로 가장 많이 이용됨. (한국전력공사, 2021)
- 충청남도 내 화력발전소에서 가장 많이 사용하는 원료는 ‘유연탄’ 으로(한국에너지공단, 2021), 유연탄 연소 시 비소, 카드뮴, 크롬, 구리, 납, 수은 등의 중금속을 배출함.
 - － 서천화력을 제외한 3개 지역의 발전사에서 사용되는 유연탄의 규모는 보령화력(13,619,653 ton), 태안화력(12,176,561 ton), 당진화력(11,691,394 ton) 순임.

[표 3.16] 발전소별 설비용량, 발전량 및 유연탄 사용량 비교

발전소	용량	설비용량 (단위: MW)	발전량 (단위: MWh)	유연탄 사용량(단위: ton)
당진화력	1호기(1999)	500	2,384,079	918,685
	2호기(1999)	500	2,672,034	1,023,360
	3호기(2000)	500	1,826,315	701,936
	4호기(2001)	500	2,500,099	948,042
	5호기(2005)	500	2,852,750	1,092,833
	6호기(2006)	500	2,080,143	792,231
	7호기(2007)	500	2,149,715	828,476
	8호기(2007)	500	2,577,432	966,210
	9호기(2016)	1,020	5,413,714	2,002,801
	10호기(2016)	1,020	6,561,700	2,416,820
	당진 합계	6,040	31,017,981	11,691,394
보령화력	1호기(1983)	500	2,322,870	900,764
	2호기(1984)	500	1,926,287	775,289
	3호기(1993)	550	3,774,848	1,415,769
	4호기(1993)	500	2,617,399	1,028,203
	5호기(1993)	500	1,751,211	684,554
	6호기(1994)	500	3,307,747	1,305,023
	7호기(2008)	500	3,314,764	1,254,413
	8호기(2008)	500	3,056,985	1,161,919
	신보령화력 1호기(2017)	1,019	7,370,272	2,854,066
	신보령화력 2호기(2017)	1,019	5,899,901	2,239,653
	보령 합계	6,088	35,342,285	13,619,653

발전소	용량	설비용량 (단위: MW)	발전량 (단위: MWh)	유연탄 사용량(단위: ton)
태안 화 력	1호기(1995)	500	3,332,751	1,279,542
	2호기(1995)	500	1,648,809	627,414
	3호기(1997)	500	3,120,452	1,154,996
	4호기(1997)	500	1,538,257	592,593
	5호기(2001)	500	557,042	212,484
	6호기(2002)	500	2,098,194	805,681
	7호기(2007)	500	2,090,124	807,470
	8호기(2007)	500	2,928,835	1,802,465
	9호기(2016)	1,050	5,515,515	2,195,163
	10호기(2017)	1,050	6,794,674	2,698,753
태안 합계		6,100	29,624,653	12,176,561

※ 보령 1·2호기는 ' 20년 12월 폐쇄되었고, 신서천1호기(1,000MW)는 ' 21년 6월 준공되어 표에는 포함되지 않음.

- 유연탄 연소과정에서 발생하는 원소들은 미국 환경보호청(US EPA)에서 모두 발암성 물질로 구분되고 특히, 비소, 카드뮴, 크롬, 니켈, 베릴륨은 세계보건기구(WHO) 산하 국제암연구소(IARC, International agency for research on cancer)에서 인체 발암물질로 분류됨
- 화력발전소 주변지역 소형 설치류 실험구 및 대조구 비교분석에 앞서 본 연구내용과 유사한 과거 소형 설치류 중금속 분석 문헌을 조사한 결과,
 - 동물실험에 의한 녹차음료의 카드뮴 및 납 제거효과(최성인 외, 1994), 한국산 등줄쥐 각 조직에 분포하는 미량금속류 및 셀레늄에 관한 연구(윤명희 외, 1999),
 - 금호강에 서식하는 소형포유류의 중금속축적에 관한 연구(이상돈, 2003)가 있으나 1) 야생에서 포획한 설치류, 2) 동일한 중금속 원소 분석의 두 조건을 충족하는 최신자료는 윤명희 외(1999) 연구가 해당되어 관련 데이터를 통해 비교 분석하였음.
- 설악산에서 채집된 등줄쥐 8개체 중금속 분석 결과(윤명희 외, 1999), 납은 평균 2.1ppm, 카드뮴은 평균 0.21ppm으로,

- 본 연구에서 수행한 설치류와 비교한 결과 납은 화력발전소 주변 실험구가 0.92ppm 대조구가 평균 1.68ppm으로 설악산에서 채집된 등줄쥐에 비해 모두 낮은 수치를 보였으나, 카드뮴은 실험구가 4.28ppm, 대조구가 0.95ppm로 확인되어 설악산 채집 개체보다 약 20배 높은 수치를 보였고, 일부 개체(DJ1, DJ3)에서는 매우 높게 측정되었음.
- 부산광역시 농촌지역에서 채집된 등줄쥐 30개체 중금속 분석 결과(윤명희 외, 1999), 납은 평균 3.1ppm, 카드뮴은 평균 0.17ppm으로 설악산 채집 등줄쥐와 마찬가지로 납은 화력발전소 주변지역 채집 설치류 실험구 및 대조구 모두 낮은 수치를 보였으나, 카드뮴은 부산광역시 채집 개체보다 약 25배 높은 수치를 보임.
- 소형 설치류에 카드뮴이 50ppm의 고농도로 체내 축적될 경우, 식이섭취량 및 체중 감소에 영향을 주는 것으로 보고(최성인 외, 1994)되어 향후 화력발전소 주변 서식 설치류 개체수를 확대하여 카드뮴의 농축 정도를 면밀히 살펴볼 필요성을 확인하였음.
- 화력발전소 주변지역 소형 설치류 중금속 분석을 위해 유연탄 연소시 발생하는 중금속 중에서 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 3가지 원소를 설정하여 비교 분석을 실시함.
 - 당진 화력발전소 인근 지역에서 등줄쥐 2마리, 땃쥐 1마리를 포획하고 대조군으로 서산 지역에서 등줄쥐 1마리를 포획하여 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 총 3개 중금속 항목을 ICP-MS를 이용하여 분석함. (표 1.8)

[표 3.17] 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) ICP-MS 분석 결과

지역	시료명	장기명	Pb (ppm-mg/kg)	Cd (ppm-mg/kg)	As (ppm-mg/kg)
당진	DJ1 (등줄쥐 1)	간	0.12	0.35	0.15
		신장	0.53	4.34	0.41
	DJ2 (등줄쥐 2)	간	0.2	0.06	0.11
		신장	0.94	0.04	0.05
서산 (대조구)	DJ3 (땃쥐 1)	간	0.98	8.05	0.41
	SS1 (등줄쥐 3)	간	0.08	0.11	0.07
		신장	1.6	0.84	0.14

- 중금속 납(Pb)의 경우, 당진 지역의 설치류의 간에서 0.12ppm, 0.2ppm, 0.98ppm이 각각 검출되어 평균 0.43ppm 함량이 확인되었고, 대조구인 서산 지역의 설치류에서는 0.08ppm이 검출되어 대조구 설치류보다 5.4배의 비교적 높은 납 함량이 확인됨.
 - 이에 반해, 신장에서 검출된 납의 함량은 당진 지역에서 0.53ppm, 0.94ppm이 각각 검출되어 평균 0.74ppm이 확인되었고, 서산 지역에서는 1.6ppm이 검출되어 실험구보다 대조구에서 신장에서의 납 함량이 실험구 보다 2.2배 높게 검출됨.
 - 간과 신장에서 확인된 납 함량의 양을 함께 비교 분석하면, 당진 지역의 설치류 납검출 평균량은 0.92ppm(납 함량의 등줄쥐 1 + 등줄쥐 2 + 땃쥐 1 합계를 평균계산), 서산은 0.84ppm으로 대조구에 비해 실험구에서 0.08ppm이 높게 검출됨.
- 카드뮴(Cd)의 경우, 당진 지역의 설치류 간에서 0.35ppm, 0.06ppm, 8.05ppm이 각각 검출되었는데 동일지역에서 포획한 땃쥐 1이 다른 표본 등줄쥐의 카드뮴보다 월등하게 높게 검출됨.
 - 신장에서는 등줄쥐 1이 4.34ppm, 등줄쥐 2가 0.04ppm이 확인되어 간에서 측정된 카드뮴과 마찬가지로 특정 표본 설치류에서 높게 검출되는 특이성이 있었음.
 - 실험구 간과 신장에서 검출된 카드뮴 총량의 평균은 2.57ppm이고, 대조구는 0.48ppm로 실험구 설치류가 5.4배 높게 나타났으나, 실험구 표본 간에 편차가 크게 발생하여 추후 포유류 표본 수를 확대하여 경향성을 보다 세부적으로 살펴보고 실험구 지역의 포유류에 대한 중금속 오염정도를 파악할 필요성을 확인함.
- 비소(As)의 경우, 당진 지역의 설치류의 간에서 0.15ppm, 0.11ppm, 0.41ppm이 검출되어 평균 비소 함량은 0.22ppm인 것으로 확인되었고, 대조구인 서산 지역의 설치류 간은 0.07ppm로 확인되어 대조구보다 실험구가 3.14배 높게 확인되었음.
 - 신장에서는 당진 지역의 설치류 간에서 0.41ppm, 0.05ppm이 각각 검출되어 평균 0.23ppm으로 확인되어 서산 지역의 설치류 0.14ppm에 비하여 1.64배 높게 확인됨
 - 실험구 간과 신장에서 검출된 비소 총량의 평균은 0.38ppm으로 대조구 0.21ppm보다 0.17ppm 높게 나타났으나, 실험구의 등줄쥐 1과 등줄쥐 2의 편차가 크고 실험구 등줄쥐 2와 대조구 등줄쥐 3을 비교하면 대조구가 0.05ppm 높아 5차년도에는 표본수를 확대하여 연구가 필요할 것임.

- 화력발전소 주변지역 오염정도를 파악하고자 포유류의 생체내 중금속 축적량에 대한 예비조사를 수행한 결과 화력발전소 주변지역(당진)의 설치류가 전반적으로 대조구(서산)인 설치류보다 체내 중금속 함량이 전반적으로 높게 나왔으나 포획 개체수 및 장기별 분석 시료의 양이 부족하여 통계적 해석에는 어려움이 있음
 - 따라서, 향후 지점 및 소형 설치류 샘플수를 늘려서 분석하여 유의미한 결과 도출이 필요할 것으로 판단됨.

3.3. 요약 및 소결론

- 화력발전소 주변에 서식하는 포유류의 중금속 정도를 확인하기 위해 2021년 9월부터 10월까지 총 2회에 걸쳐 조사를 실시한 결과, 화력발전소 주변 지역(실험군)에서 등줄쥐 2마리, 땃쥐 1마리를 포획, 서산 지역(대조군)에서 등줄쥐 1마리를 포획함
- 유연탄 연소시 발생하는 중금속 중 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As) 3가지 원소를 분석한 결과, 주변지역(당진)의 설치류가 대조구(서산)인 설치류보다 체내 중금속 함량이 전반적으로 높게 검출됨
 - 납(Pb): 당진 지역 설치류 납검출 평균량(0.92ppm) > 서산 지역 설치류 납검출 평균량(0.84ppm) ⇒ 대조구에 비해 실험구에서 약 0.08ppm이 높게 검출
 - 카드뮴(Cd): 당진 지역 설치류 카드뮴검출 평균량(2.57ppm) > 서산 지역 설치류 카드뮴검출 평균량(0.48ppm) ⇒ 대조구에 비해 실험구에서 검출량이 약 5.4배 높게 나타났으나, 실험구 표본 간에 편차가 크게 발생하여 추후 포유류 표본 수를 확대를 통해 경향성을 세부적으로 파악할 필요가 있음.
 - 비소(As): 당진 지역 설치류 비소검출 평균량(0.38ppm) > 서산 지역 설치류 비소검출 평균량(0.21ppm) ⇒ 대조구에 비해 실험구에서 0.17ppm 높게 나타났으나, 카드뮴 성분비교와 마찬가지로 표본 간 상이한 편차차이로 인해 경향성 파악이 필요함.
- 주변지역(당진)의 설치류가 전반적으로 대조구(서산)인 설치류보다 체내 중금속 함량이 전반적으로 높게 나왔으나, 통계적 해석을 위한 분석 시료의 양이 부족함.
 - 소형 설치류에서 중금속 연구는 국내에서 연구 진행이 미진한 상태이며, 특히 화력발

전소와 관련된 포유류 중금속 연구는 전무한 실정으로 향후 중요한 기초자료로 활용될 수 있기 때문에 포유류 중금속 연구를 확대할 필요가 있음.

- 5차년도 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구에서는 납(Pb), 카드뮴(Cd), 비소(As)를 포함한 포유류에게 유해한 영향을 미치는 중금속 원소를 추가하여 분석하고, 통계적 해석을 위한 분석 샘플의 양을 지역별로 최소 30개체씩 총 150개체 이상의 샘플로 분석이 필요할 것으로 확인됨

제4장 화력발전소 주변지역 생태모니터링

1. 연구개요
2. 식물분야
3. 곤충분야
4. 포유류분야
5. 어류분야

1. 연구개요

1.1. 조사지 선정

- 화력발전소 주변 지역의 생태환경 모니터링을 위한 조사지는 「발전소주변지역 지원에 관한 법률(산업통상자원부 2020. 10.)」 제2조(정의)에서 규정하는 발전기가 설치되어 있는 지점으로부터 반지름 5km 이내의 육지 및 섬지역이 속하는 읍면동을 기준으로 연구 분야별 특성을 고려하여 조사지를 선정하였음.
 - 식물 및 곤충분야는 화력발전소 주변 2km 이내에 조사지점을 선정한 후 연구조사를 진행함.
 - 포유류 분야 조사는 화력발전소 주변 지역의 포유동물 흔적 조사를 통하여 지점을 선정하고 무인 센서 카메라를 설치하였음.
 - 어류 분야 조사지점은 화력발전소 인근 하천 각 1곳을 선정하여 하천별로 2개 지점에서 어류 조사를 실시하되,
 - 서천 화력발전소 주변의 경우 화력발전단지 건설공사로 인하여 기존 하천이 매립되고 단절되어 하천 길이가 200m정도의 소 형태로 한 곳만 남아있어 관련 하천을 조사지점으로 선정하고 연구를 추진함.
- 대조군은 발전소주변지역법의 영향범위인 발전소 5km 이내를 고려하여 화력발전소로부터 이격거리가 10km 이상 떨어져 있으며 해안기후의 영향을 받으면서 충분한 산림을 가지고 있는 충남 서산지역의 팔봉산을 선정하였음. (2차년도 연구보고서 692~ 695쪽 참조)
 - 다만, 통계 분석 시 오류 발생 가능성 등 추가적인 대조구 선정 필요성이 제기되어 (2차년도 중간보고회) 3차년도에 충남 서천의 희리산을 추가지역으로 선정하여 진행하였음.
- 그러나, 대조군 선정 당시 화력발전소의 대기환경의 영향범위 설정 기준이 없어 대조군 선정범위를 기후환경 부분을 우선 고려하여 설정(표 4.1, 그림 4.1)하였고, 이에 따라 대조구 내 관광지가 포함되어 산림이 훼손된 부분이 있었고 일부 지역에서는 실험구 보다 환경변화가 더 심하게 나타나기도 하였음.
 - 서산 팔봉산은 서산시에서 명소 아홉 곳을 꼽은 서산9경 중 5경으로 높이 362m의

비교적 나지막한 산이지만 울창한 소나무숲과 아기자기한 코스로 유명세를 떨치고 있으며, 산과 바다가 어우러진 경치와 한눈에 들어오는 서해안 절경으로 전국각지의 수많은 관광객이 오는 곳으로(서산시청 홈페이지), 단풍철에는 하루 평균 1만여명의 등산객이 찾는 곳임(충남일보 2011. 11. 17.)

- 서천 희리산은 산림청에서 선정한 국유림 명품숲 45곳 중 국민들이 편안한 휴양을 즐길 수 있는 휴양·복지형 숲에 지정된 산으로 해송숲이 95%를 차지하고 있음. 또한, 산책로가 잘 정비되어 있어 산림욕의 명소로 꼽히고 있는 높이 329m 산으로 전국 유일의 해송자연휴양림이 위치하고 있으며, 특히 해송숲 주변에는 야영데크와 캠핑시설이 구성되어 있어 가족단위 방문객들의 캠핑장소로 인기가 많음. (산림청 홈페이지)

[표 4.1] 화력발전소 주변지역 생태모니터링 조사지 현황

조사 대상지	주 소	좌 표
실험구	당진 충남 당진시 석문면 왜목길 9	37° 02' 50.25" N, 126° 31' 23.59" E
	태안 충남 태안군 원북면 학암포길 243-6	36° 53' 48.68" N, 126° 13' 41.21" E
	보령 충남 보령시 오천면 오포리 727-2	36° 24' 03.80" N, 126° 30' 01.59" E
	서천 충남 서천군 서면 서인로 235번길 85	36° 08' 28.48" N, 126° 29' 55.85" E
대조구	서산 팔봉산 충남 서산시 팔봉면 어송리	36° 48' 54.97" N, 126° 22' 14.67" E
	서천 희리산 충남 서천군 중천면 희리산길 206	36° 06' 44.64" N, 126° 39' 51.34" E



[그림 4.1] 생태환경모니터링 실험구 및 대조구 위치

2. 식물분야

2.1. 조사시기 및 방법

가. 조사 시기

- 충남 화력발전소 주변의 식물분야 조사는 3차년도에 걸쳐 수행되었으며, 대조구인 희리산의 경우 자연휴양림 시설이 코로나19 확산 방지를 위한 해외입국자 격리시설로 이용되어 현장 조사를 수행할 수 없었음. 따라서 4차년도에 추가로 식물상 조사를 수행하였으며, 2020년 9월부터 2021년 9월까지 총 4회에 걸쳐 모니터링을 실시함.

[표 4.2] 희리산(대조구)에서 수행된 식물상 모니터링 조사

차수	조사시기	조사일수	조사장소
1차 조사	2020년 9월 5일 ~ 9월 6일	2일	휴양림 주차장→등산로 입구→6호 쉼터→5호 쉼터→4호 쉼터→정상→3호 쉼터→2호 쉼터→1호 쉼터→휴양림 주차장
2차 조사	2021년 5월 20일	1일	휴양림 주차장→등산로 입구→6호 쉼터→5호 쉼터→4호 쉼터→임도 삼거리→사방댐→산책로→휴양림 주차장
3차 조사	2021년 7월 2일 ~ 7월 3일	2일	휴양림 주차장→휴양림 순환 임도→임도 삼거리→4호 쉼터→정상→지석리 마을회관, 산천리 552-2→산천리 산 41-3
4차 조사	2021년 9월 24일	1일	휴양림 주차장→숲속의 집→등산로→ 숲속의 집→휴양림 주차장

나. 조사 방법

- 생물다양성 현황을 파악하기 위해 다양한 경로로 식물상 조사를 수행하였으며 분석 방법은 3차년도 연구방법(3차년도 보고서 494쪽)과 동일하게 수행함.
 - － 지역별 도시화지수 및 귀화율 산출을 위한 공식은 3차년도(3차년도 보고서 494~495쪽)와 동일하게 분석함.

2.2. 식물분야 조사결과

2.2.1. 서천 희리산(대조구) 지역의 생물 분포 추가 조사

- 대조구인 서천(희리산)의 봄 식물 조사가 미비하여 (본 보고서 4-114쪽) 4차년도에 희리산(대조구) 추가 조사를 수행하였으며, 3차년도 조사 결과(3차년도 보고서 546~ 551쪽)를 종합하여 분석하였음.

가. 식물의 종류조성

- 희리산(대조구) 일대에서 조사된 관속식물은 86과 233속 311종 10아종 21변종 4품종으로 총 346분류군으로 4차년도 조사를 통해 141분류군이 추가되었음.
- 희리산(대조구) 일대에 분포하는 것으로 확인된 346분류군의 종류조성은 쌍자엽식물(273분류군)-단자엽식물(56분류군)-양치식물(13분류군)-나자식물(4분류군) 순으로 높게 나타났다음.

[표 4.3] 희리산(대조구)에서 조사된 관속식물의 종류조성

분류계급	과	속	종	아종	변종	품종	합계
양치식물	9	10	12	•	1	•	13
나자식물	2	3	4	•	•	•	4
피자식물	75	220	295	10	20	4	329
쌍자엽식물	68	180	242	10	17	4	273
단자엽식물	7	40	53	•	3	•	56
합계	86	233	311	10	21	4	346

- 과별 구성 중에 의한 다양성은 국화과가 42분류군으로 가장 많았으며, 다음으로는 벼과(26분류군), 장미과(22분류군), 콩과(21분류군), 백합과(14분류군) 등의 순으로 나타났다음.

나. 특산식물

- 희리산(대조구)에서 조사된 특산식물은 병꽃나무와 벌개미취(재), 할미밀망, 오동나무(재), 왕벚나무(재), 개나리(재) 등 총 6분류군이었음.

[표 4.4] 희리산(대조구)에서 조사된 특산식물

과명	학명	국명
Ranunculaceae 미나리아재비과	<i>Clematis trichotoma</i> Nakai	할미밀망
Rosaceae 장미과	<i>Prunus X yedoensis</i> Matsum.	왕벚나무
Oleaceae 물푸레나무과	<i>Forsythia koreana</i> (Rehder) Nakai	개나리
Scrophulariaceae 현삼과	<i>Paulownia coreana</i> Uyeki	오동나무
Caprifoliaceae 인동과	<i>Weigela subsessillis</i> (Nakai) L.H.Bailey	병꽃나무
Asteraceae 국화과	<i>Aster koreaiensis</i> Nakai	벌개미취

다. 희귀식물

- 멸종위기식물과 희귀식물은 조사되지 않음.

라. 식물구계학적특정종

- 희리산(대조구)에서 조사된 식물구계학적특정종은 총 32분류군으로 이 중 4차년도 조사에서 11분류군이 추가로 확인되었음. 등급별로는 Ⅳ등급에 등(재)과 피막이 등 2분류군, Ⅲ등급에 왕모시풀, 고광나무, 산벚나무, 단풍나무, 팽팽나무 등 7분류군, Ⅱ등급에 홍괴불나무와 붉은병꽃나무 등 2분류군, 그리고 Ⅰ등급에 비목나무, 감태나무, 윤노리나무, 수리딸기, 산검양꽃나무, 대팻집나무 등 21분류군이었음.

[표 4.5] 희리산(대조구)에서 조사된 식물구계학적특정종

등급	학명	국명
IV	<i>Wisteria floribunda</i> (Willd.) DC. <i>Hydrocotyle sibthorpioides</i> Lam.	등 피막이
III	<i>Boehmeria pannosa</i> Nakai & Satake ex Oka <i>Philadelphus schrenkii</i> Rupr. <i>Prunus sargentii</i> Rehder <i>Acer palmatum</i> Thunb. <i>Indigofera pseudotinctoria</i> Matsum. <i>Ilex crenata</i> Thunb. <i>Callicarpa mollis</i> Siebold & Zucc.	왕모시풀 고광나무 산벚나무 단풍나무 낭아초 깽깽나무 새비나무
II	<i>Lonicera maximowiczii</i> (Rupr.) Regel <i>Weigela florida</i> (Bunge) A.DC.	홍괴불나무 붉은병꽃나무
I	<i>Lindera erythrocarpa</i> Makino <i>Lindera glauca</i> (Siebold & Zucc.) Blume <i>Chloranthus japonicus</i> Siebold <i>Ulmus davidiana</i> var. <i>japonica</i> (Rehder) Nakai <i>Hemiptelea davidii</i> (Hance) Planch. <i>Vaccinium oldhamii</i> Miq. <i>Lysimachia barystachys</i> Bunge <i>Malus baccata</i> (L.) Borkh. <i>Photinia villosa</i> (Thunb.) DC. <i>Rubus corchorifolius</i> L.f. <i>Sanguisorba X tenuifolia</i> Fisch. ex Link <i>Haloragis micrantha</i> (Thunb.) R.Br. ex Siebold & Zucc <i>Ilex macropoda</i> Miq. <i>Neoshirakia japonica</i> (Siebold & Zucc.) Esser <i>Cayratia japonica</i> (Thunb.) Gagnep. <i>Toxicodendron sylvestre</i> (Siebold & Zucc.) Kuntze <i>Hydrocotyle maritima</i> Honda <i>Ajuga decumbens</i> Thunb. <i>Paederia foetida</i> L. <i>Asparagus oligoclados</i> Maxim. <i>Hosta capitata</i> (Koidz.) Nakai	비목나무 감태나무 홀아비꽃대 느릅나무 시무나무 정금나무 까치수염 야광나무 윤노리나무 수리딸기 가는오이풀 개미탑 대팻집나무 사람주나무 거지덩굴 산검양꽃나무 선피막이 금창초 계요등 방울비짜루 일월비비추

마. 기후변화적응대상식물

- 희리산(대조구)에서 조사된 기후변화적응대상식물은 총 6분류군으로 남방계식물에 왕모시풀, 수리딸기, 산검양옻나무, 팡팡나무, 새비나무 등 5분류군이었고, 4차년도 추가조사에서 북방계식물에 야광나무 1분류군이 확인되었음. (표 4.6)

[표 4.6] 희리산(대조구)에서 조사된 기후변화적응대상식물

구분	과명	학명	국명
남방계	Urticaceae 쐽기풀과	<i>Boehmeria pannosa</i> Nakai & Satake ex Oka	왕모시풀
	Rosaceae 장미과	<i>Rubus corchorifolius</i> L.f.	수리딸기
	Anacardiaceae 옻나무과	<i>Toxicodendron sylvestre</i> (Siebold & Zucc.) Kuntze	산검양옻나무
	Aquifoliaceae 감탕나무과	<i>Ilex crenata</i> Thunb.	팡팡나무
	Verbenaceae 마편초과	<i>Callicarpa mollis</i> Siebold & Zucc.	새비나무
북방계	Rosaceae 장미과	<i>Malus baccata</i> (L.) Borkh.	야광나무

바. 귀화식물 및 생태계교란식물

- 희리산(대조구)에서 조사된 귀화식물은 소리쟁이, 미국자리공, 아까시나무(재), 토끼풀, 종지나물(재), 유럽점나도나물, 개비름 등 총 14과 32분류군으로 이 중 18분류군이 4차년도 조사에서 추가로 확인되었음. (표 4.7)
- 희리산(대조구)에서 조사된 생태계교란식물은 3차년도에 자생식물인 환삼덩굴 1분류군이 확인되었으며, 4차년도에는 환삼덩굴을 포함하여 애기수영, 돼지풀, 가시상추 등 분포가 새롭게 확인되어 총 4분류군이었음.
- 조사된 귀화식물을 기초로 산출한 희리산(대조구)의 도시화지수와 귀화율은 각각 10.03%와 9.25%였음. (표 4.8)

[표 4.7] 희리산(대조구)에서 조사된 귀화식물

과명	학명	국명
Polygonaceae 마디풀과	<i>Rumex acetosella</i> L.	애기수영*
	<i>Rumex crispus</i> L.	소리쟁이
Phytolaccaceae 자리공과	<i>Phytolacca americana</i> L.	미국자리공
Chenopodiaceae 명아주과	<i>Chenopodium ficifolium</i> Sm.	좀명아주
Caryophyllaceae 석죽과	<i>Cerastium glomeratum</i> Thuill.	유럽점나도나물
Amaranthacea 비름과	<i>Amaranthus blitum</i> subsp. <i>oleraceus</i> (L.) Costea	개비름
Brassicaceae 십자화과	<i>Lepidium apetalum</i> Willd.	다닥냉이
Fabaceae 콩과	<i>Amorpha fruticosa</i> L.	죽제비싸리
	<i>Robinia pseudoacacia</i> L.	아까시나무
	<i>Trifolium repens</i> L.	토끼풀
Simaroubaceae 소태나무과	<i>Ailanthus altissima</i> (Mill.) Swingle	가죽나무
Violaceae 제비꽃과	<i>Viola papilionacea</i> Pursh	종지나물
Onagraceae 바늘꽃과	<i>Oenothera biennis</i> L.	달맞이꽃
Rublaceae 꼭두서니과	<i>Diodia teres</i> Walter	백령풀
Solanaceae 가지과	<i>Solanum americanum</i> Mill.	미국까마중
Scrophulariaceae 현삼과	<i>Veronica arvensis</i> L.	선개불알풀
Asteraceae 국화과	<i>Ambrosia artemisiifolia</i> L.	돼지풀*
	<i>Bidens frondosa</i> L.	미국가막사리
	<i>Conyza canadensis</i> (L.) Cronquist	망초
	<i>Erechtites hieraciifolius</i> (L.) Raf. ex DC.	붉은서나물
	<i>Erigeron annuus</i> (L.) Pers.	개망초
	<i>Helianthus tuberosus</i> L.	동탄지
	<i>Lactuca serriola</i> L.	가시상추*
	<i>Rudbeckia bicolor</i> Nutt.	원추천인국
	<i>Erigeron hieraciifolius</i> (L.) Pers.	개썩갓
	<i>Sonchus asper</i> (L.) Hill	큰방가지똥

과명	학명	국명
	<i>Symphytotrichum pilosum</i> (Willd.) G.L.Nesom	미국쑥부쟁이
	<i>Taraxacum officinale</i> F.H.Wigg.	서양민들레
	<i>Xanthium strumarium</i> L.	도꼬마리
	<i>Dactylis glomerata</i> L.	오리새
Poaceae 벼과	<i>Festuca arundinacea</i> Schreb.	큰김의털
	<i>Phleum pratense</i> L.	큰조아재비

* 생태계교란식물

2.2.2. 지역별 도시화지수 및 귀화율 산출

- 지역별 생태 모니터링 조사로 분포가 확인된 식물은 기존 목록에 누적하여 도시화지수 및 귀화율을 산출하였으며, 실험구 4개 지역(당진, 태안, 보령, 서천), 대조구 2개 지역 (서산 팔봉산, 서천 희리산)을 구분하여 비교하였음.
 - 실험구 4개 지역의 식물 목록을 취합하여 산출한 도시화지수는 16.93%이었으며 대조구 2개 지역의 식물 목록을 취합하여 산출한 도시화지수는 15.05%로 대조구에 비해 화력발전소 일대가 1.88% 높게 분석되었음.
 - 실험구 4개 지역의 식물 목록을 취합하여 산출한 귀화율은 10.84%였으며, 대조구 2개 지역의 식물 목록을 취합하여 산출한 귀화율은 8.44%로 대조구에 비해 화력발전소 일대가 2.4% 높게 분석되었음.
- 화력발전소 인근 지역은 고압선 설치에 의한 산림 훼손 및 기타 자재 운반과 도로 설치 등(3차년도 보고서 527쪽, 그림 2.2 참고) 자연림이 유지되는 대조구에 비해 지속적인 교란이 발생해 온 것으로 판단됨.

가. 당진 화력발전소 지역

- 당진 화력발전소 일대에서 조사된 관속식물은 4차년도 조사에서 1분류군이 추가로 확인되어 82과 224속 271종 8아종 17변종 2품종의 총 298분류군이었음.
 - 조사된 전체 분류군 중 귀화식물을 기초로 새롭게 산출한 도시화지수 및 귀화율은 각각 11.91%, 12.75%였음.

나. 태안 화력발전소 지역

- 태안 화력발전소 일대에서 조사된 관속식물은 4차년도 조사에서 3분류군이 추가로 확인되어 84과 212속 266종 3아종 19변종 2품종의 총 290분류군이었음.
 - 조사된 전체 식물목록을 기초로 새롭게 산출한 도시화지수 및 귀화율은 각각 9.72%, 10.69%였음.

다. 보령 화력발전소 지역

- 보령 화력발전소 일대에서 조사된 관속식물은 4차년도 조사에서 1분류군이 추가되어 79과 212속 240종 9아종 19변종 2품종의 총 270분류군이었음.
 - 조사된 전체 식물목록을 기초로 산출한 도시화지수 및 귀화율은 각각 8.46%, 10.00%였음.

라. 서천 화력발전소 지역

- 서천 화력발전소 일대에서 조사된 관속식물은 4차년도 조사에서 6분류군이 추가되어 74과 199속 235종 6아종 17변종 3품종의 총 261분류군이었음.
 - 조사된 전체 식물목록을 기초로 새롭게 산출한 도시화지수 및 귀화율은 각각 13.48%, 16.48%였음.

마. 서산시 팔봉산 지역 (대조구)

- 팔봉산(대조구) 일대에서 조사된 관속식물은 4차년도 조사에서 3분류군이 추가로 확인되어 103과 317속 447종 12아종 29변종 7품종의 총 495분류군이었음.
- 조사된 전체 식물목록을 기초로 새롭게 산출한 팔봉산(대조구)의 도시화지수 및 귀화율은 각각 13.17%, 8.48%였음(표 4.8).

바. 서천군 희리산 지역 (대조구) : ‘귀화식물 및 생태계교란식물’에 기재(본 보고서 4-118쪽 참조)

[표 4.8] 지역별 도시화지수 및 귀화율

지역	4차년도 도시화지수(%)	4차년도 귀화율(%)
전체 실험구	16.93	10.84
당진	11.91	12.75
태안	9.72	10.69
보령	8.46	10.00
서천	13.48	16.48
전체 대조구	15.05	8.44
팔봉산(대조구)	13.17	8.48
희리산(대조구)	10.03	9.25

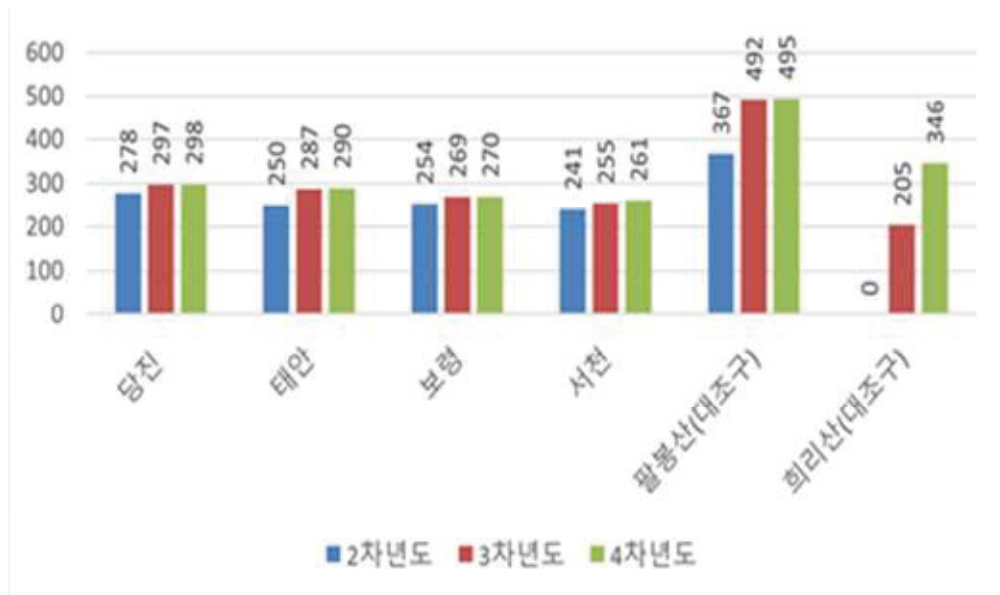
2.3. 연차별 비교

2.3.1. 연차별 전체 분류군 수 비교

- 충청남도 소재 화력발전소 일대에서 2차년도에 조사된 관속식물은 당진(278분류군)-보령(254분류군)-태안(250분류군)-서천(241분류군)의 순으로 많았으며, 3차년도에는 각 지역별로 새로운 분류군이 추가되어 당진(297분류군)-태안(287분류군)-보령(269분류군)-서천(255분류군)의 순으로 다소 변화가 있었음.
 - 4차년도에는 각 지역별로 당진(298분류군)-태안(290분류군)-보령(270분류군)-서천(261분류군) 순으로 분류군 수에만 일부 변화가 있었음. (표 4.9 / 그림 4.2)
- 팔봉산(대조구)은 2차~4차년도에 각각 차례로 367분류군, 492분류군, 495분류군이 조사되었고, 희리산(대조구)에서는 3차~4차년도에 각각 205분류군, 346분류군이 새롭게 조사되었음. (표 4.9 / 그림 4.2)

[표 4.9] 지역별 전체 분류군 수의 연차별 비교

지역	2차년도(분류군)	3차년도(분류군)	4차년도(분류군)
당진	278	297	298
태안	250	287	290
보령	254	269	270
서천	241	255	261
팔봉산(대조구)	367	492	495
희리산(대조구)	•	205	346



[그림 4.2] 지역별 전체 분류군수의 연차별 비교

2.3.2. 연차별 도시화지수 및 귀화율 비교

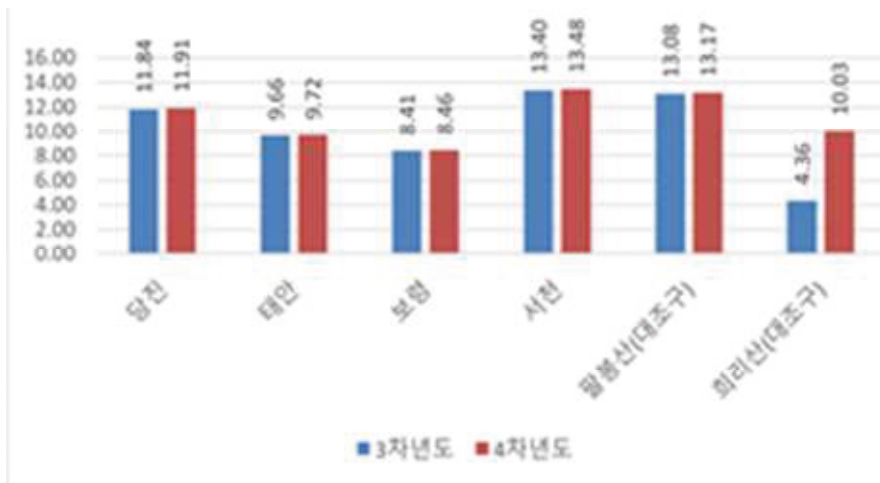
- 4차년도 식물 목록을 대상으로 산출된 도시화지수 및 귀화율은 3차년도 조사 결과(3차년도 보고서 553쪽)와 비교하였음. (표 4.10/ 그림 4.3, 4.4)
 - － 3차년도의 경우, 실험구 4개 지역의 도시화지수 및 귀화율은 각각 16.82%, 10.93%였으며, 대조구 2개 지역의 도시화지수 및 귀화율은 13.40%, 7.76%로 대조구에 비해 화력발전소 일대의 도시화지수 및 귀화율이 각각 3.42%, 3.17% 높게 분석되었음.
 - － 4차년도의 경우, 실험구 4개 지역의 도시화지수 및 귀화율은 각각 16.93%, 10.84%로 3차년도에 비해 각각 0.11%, 0.09% 차이로 변화가 거의 없었음.
 - － 대조구 지역의 4차년도 도시화지수 및 귀화율은 15.05%, 8.44%로 3차년도에 비해 1.65%, 0.68%로 약간 증가하였는데, 4차년도에 희리산 식물상 조사가 추가로 수행되어 전체 분류군수의 변화에 따른 결과로 환경적 변화에 의한 것은 아님.
- 4차년도 귀화율은 실험구 12.48%, 대조구 8.87%로 대조구에 비해 실험구에서 귀화식물 비율이 높은 것으로 분석되었음.
 - － 대조구 2개 지역의 경우, 유명 관광지로 등산객 및 차량의 이동으로 인하여 교란의 위험이 있으나, 비교적 자연림을 유지하고 있고 실험구에 비해 식물 다양성이 높음. 반

면, 실험구의 경우 인근지역의 고압선 설치에 의한 산림 훼손 및 기타 자재 운반을 위한 통행, 도로의 확장(3차년도 보고서 527페이지)으로 인해 대조구보다 지속적인 교란이 발생된 것으로 판단됨.

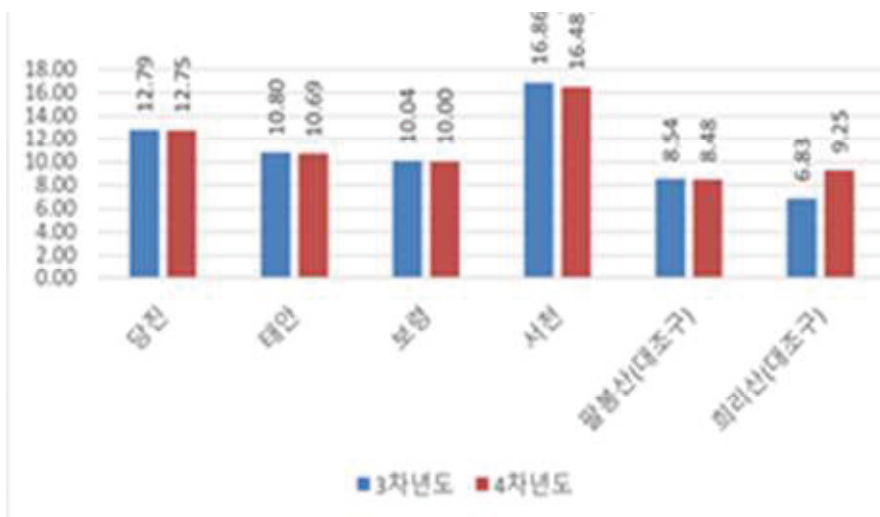
- 앞서 설명한 바와 같이 3차년 대비 4차년도 도시화지수 및 귀화율 각각 0.11%, 0.09%로 상승하여 그 변화가 미미하였는데, 식물의 경우 이동성이 없으므로 생존에 불리한 환경에 노출되는 등 다양한 스트레스에 대응하기 위한 방어 기작이 발달하여 (이 등, 2020), 환경변화에 따라 급변하기보다는 스트레스에 견디고자 하는 내성이 비교적 강함에 따라 도출된 결과로 판단됨.

[표 4.10] 도시화지수 및 귀화율의 연차별 비교

지역	3차년도 도시화지수(%)	4차년도 도시화지수(%)	3차년도 귀화율(%)	4차년도 귀화율(%)
실험구 전체	16.82	16.93	10.93	10.84
당진	11.84	11.91	12.79	12.75
태안	9.66	9.72	10.80	10.69
보령	8.41	8.46	10.04	10.00
서천	13.40	13.48	16.86	16.48
대조구 전체	13.40	15.05	7.76	8.44
팔봉산(대조구)	13.08	13.17	8.54	8.48
희리산(대조구)	4.36	10.03	6.83	9.25



[그림 4.3] 지역별 도시화지수의 연차별 비교



[그림 4.4] 지역별 귀화율 연차별 비교

2.4. 요약 및 소결론

- 희리산(대조구)의 정확한 식물 분포를 파악하기 위해 다양한 경로로 식물상 조사를 수행하였으며 3차년도(3차년도 보고서 546~551쪽)결과와 종합하여 희리산에서 조사된 관속 식물은 86과 233속 311종 10아종 21변종 4품종의 총 346분류군이 조사됨.
- 4차년도 지역별 모니터링 후보종 조사결과로 일부 분류군이 추가 확인되었으며 (당진 1분류군, 태안 3분류군, 보령 1분류군, 서천 6분류군), 대조구인 팔봉산(서산)은 3분류군이 추가로 확인되었음.
 - 따라서 지역별 전체 분류군수는 당진-298분류군, 태안-290분류군, 보령-270분류군, 서천-261분류군, 팔봉산-495분류군, 희리산-346분류군으로 전체 분류군수가 증가하였음.
- 지역별 식물 목록을 토대로 실험구 4개 지역(당진, 태안, 보령, 서천)과 대조구 2개 지역(팔봉산, 희리산)의 도시화지수 및 귀화율을 비교하였음.
 - 실험구 4개 지역의 도시화지수 및 귀화율을 산출한 결과, 3차년도에는 각각 16.82%, 10.93%였으며, 4차년도에는 각각 16.93%, 10.84%로 분석됨.
 - 대조구 2개 지역의 도시화지수 및 귀화율을 산출한 결과, 3차년도에는 각각 13.40%, 7.76%였으며, 4차년도에는 15.05%, 8.44%로 나타났는데 희리산의 식물상 추가 조사로 인하여 3차년도에 비해 도시화지수는 1.65%, 귀화율은 0.68% 증가함.
 - 3~4차년도에서 실험구 대비 대조구에서 도시화지수 및 귀화율 모두 낮게 나타났는데, 이는 대조구가 실험구에 비해 비교적 자연림이 유지되기 때문인 것으로 판단됨.
- 조사지역 관속식물 중 귀화식물의 비율을 나타내는 귀화율은 화력발전소 주변지역 실험구가 대조구에 비해 2.4% 더 높게 분석되었음.
 - 지정된 등산로 외 비교적 자연림이 유지되는 대조구에 비해 화력발전소 주변지역의 경우 고압선 등의 장비 설치, 기타 자재 운반을 위한 도로의 확장 및 설치 등 지속적인 교란이 발생해 온 결과로 실험구의 귀화율이 더 높게 나타난 것으로 판단되며 (3차년도 보고서 527쪽, 본 보고서 4-124쪽 참고) 1년간의 연차별 조사에 의한 도시화지수 및 귀화율의 변화는 미미하였음.

3. 곤충분야

3.1. 조사 시기 및 방법

가. 조사시기

- 화력발전소 주변의 곤충분야 조사는 2021년 5월부터 2021년 8월까지 총 3회에 걸쳐 실시함.

[표 4.11] 충남 화력발전소 주변지역의 곤충 조사 시기 및 장소

차수	조사시기	조사일수	조사장소 (본 보고서 4-112쪽)
1차 조사	2021년 5월 19일 ~ 2021년 5월 23일	5일	(실험구) 당진 석문면, 태안 원북면, 보령 오천면, 서천 서면, (대조구) 서산 팔봉면, 서천 종천면
2차 조사	2021년 7월 17일 ~ 2021년 7월 19일	3일	"
3차 조사	2021년 8월 17일 ~ 2021년 8월 20일	4일	"

나. 조사 방법

- 본 연구에서는 3차년도 조사와 동일한 방법(3차년도 보고서 495~496쪽)인 쓸어잡기(Sweeping), 채어잡기(Brandishing), 털어잡기(Beating)를 통해 주간에 하층식생 및 수관 하부에 서식하는 곤충을 채집하고, 함정트랩(Pitfall trap)을 이용하여 지표면을 배회하는 곤충을 채집함. 목질부를 섭식하는 천공성곤충을 다중깔때기트랩(Multifunnel trap)으로 포획하였으며, 주광성 곤충을 채집하기 위해 야간에 유아등트랩(Light trap)을 이용함.
 - 채집된 곤충의 종 구성, 종수 및 개체수를 바탕으로 지역별 군집 간 유사도를 산출하기 위해 MEDIAN(1)&KRUSKAL_WALLIS(2) 쌍대검정⁶³⁾을 실시하였음.

63) 분산 분석(ANOVA)에서 정규성 가정이 만족되지 않을 때 사용하는 비모수 검정법. ANOVA와는 달리 중앙값에 관한 결과를 얻을 수 있음

- 비모수검정 : 모집단의 모수에 대한 가정이 없이 유도된 검정법. 모집단이 정규성을 보이지 않거나 표본 수가 적은 경우 등에 사용

- 분산분석(ANOVA): 두 개 이상 집단들의 평균 간 차이에 대한 통계적 유의성을 검증하는 방법

3.2. 곤충분야 조사결과

가. 지역별 곤충상

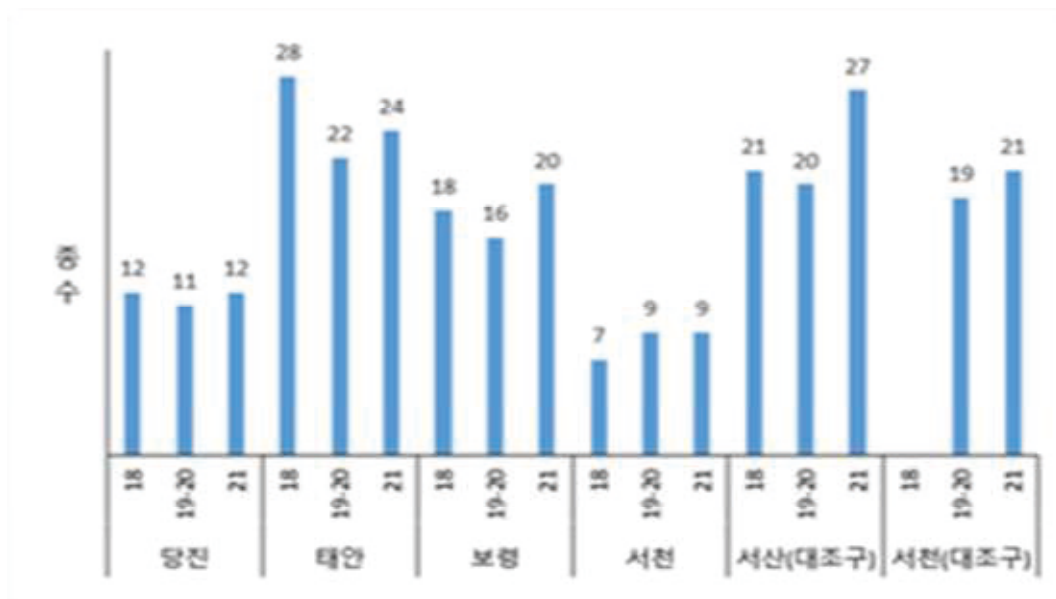
- 화력발전소 주변지역에 6개의 실험구를 선정하여 곤충상을 조사한 결과, 2018년부터 2021년까지 당진에서 191종, 태안에서 183종, 보령에서 114종, 서천에서 76종, 서산 대조구에서 199종, 서천 대조구에서 187종의 곤충이 확인됨.
 - 채집된 곤충의 종수는 당진, 태안, 서산 대조구, 서천 대조구에서 유사했으며 보령, 서천 조사구에서 현저히 적은 것으로 확인됨.
 - 보령 조사구와 서천조사구의 곤충상이 다른 조사구 및 대조구에 비해 단순한 것으로 나타남. 생물의 종수 및 개체수는 기온, 습도, 강수량, 먹이, 천적 등 자연환경과 환경오염, 서식지 파편화 등 인위적 환경에 종합적으로 반응하기 때문에 구체적인 이유를 특정할 수 없으나,
 - 이번 연구의 목적인 화력발전소의 영향을 확인하기 위해 대조구를 선정하여 군집 분석을 실시한 결과 조사구와 대조구의 군집구조 사이에 유의차는 확인되지 않아 화력발전소가 곤충군집에 미치는 영향에 대해 유의미한 결과를 도출하지 못하였음.



[그림 4.5] 지역별, 시기별 채집된 곤충의 종수

나. 지표배회성 곤충

- 당진조사구에서는 2018년 12종 81개체, 2019~2020년 11종 53개체, 2021년 12종 79개체의 지표배회성 곤충이 채집되었으며, 태안조사구의 경우 2018년 28종 239개체, 2019~2020년 22종 196개체, 2021년 24종 256개체가 확인됨.
- 보령조사구에서는 2018년 18종 103개체, 2019~2020년 16종 113개체, 2021년 20종 217개체의 지표배회성 곤충이 채집되었으며, 서천조사구의 경우 2018년 7종 48개체, 2019~2020년 9종 66개체, 2021년 9종 63개체가 확인됨.
 - 서산대조구에서는 2018년 21종 163개체, 2019~2020년 20종 182개체, 2021년 27종 196개체의 지표배회성 곤충이 채집되었으며, 서천대조구의 경우 2019~2020년 19종 162개체, 2021년 21종 1,833개체가 확인됨.
 - 채집된 곤충의 종수는 태안조사구와 서산대조구에서, 개체수는 태안조사구에서 비교적 많았으며, 지역별 곤충상과 같이 생물의 종수 및 개체수는 기온, 습도, 강수량, 먹이, 천적 등 자연환경과 환경오염, 서식지 파편화 등 인위적 환경에 종합적으로 반응하기 때문에 구체적인 이유를 특정할 수 없으나, 이번 연구의 목적인 화력발전소의 영향을 확인하기 위해 조사구와 대조구의 군집구조를 분석한 결과 유의미한 차이는 확인되지 않음.



[그림 4.6] 지역별, 시기별 지표배회성곤충의 종수



[그림 4.7] 지역별, 시기별 지표배회성곤충의 개체수

- 당진조사구의 전체 곤충 종수는 다른 지역과 유사했으나, 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수는 비교적 낮게 관찰되어, 토양 무척추동물을 먹이원으로 삼는 지표배회성 곤충의 생태적 특성상 토양의 습도, 표토층의 상태 등이 영향을 미친 것으로 판단되며 화력발전소의 대기오염물질로 인한 영향은 확인할 수 없었음.
- 서천조사구의 경우 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수 모두 6개의 조사구 및 대조구 중 가장 낮게 관찰되어 전체 곤충상 조사 결과와 유사하게 나타남.
 - 서천조사구의 경우 2018년 7종 48개체, 2019~2020년 9종 66개체, 2021년 9종 63개체가 확인되어 다른 지역에 비해 서천조사구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 다른 지역의 25~75%, 개체수는 다른지역의 20~125%로 나타났음.
 - 이러한 곤충 군집의 차이와 화력발전소의 영향 사이의 상관관계를 구명하기 위해 조사구와 대조구의 군집분석을 실시하였으나 유의미한 차이는 나타나지 않았음
- 다양도 지수는 2018년~2021년에 당진조사구에서 0.84~0.89, 태안조사구에서 0.95~1.01, 보령조사구에서 0.92~0.96, 서천조사구에서 0.66~0.71, 서산대조구에서 0.86~0.98, 서천대조구에서 1.15~1.17로 확인되어 서천대조구의 지표배회성곤충 군집에서 가장 높게 나타남.

- 다양도 지수는 곤충의 종수 및 개체수가 풍부하고 각 종의 개체수가 유사할 때 높게 산출되고 종수 및 개체수가 적거나 특정 종의 우점도가 높을 경우 낮게 나타나는데, 서천조사구의 경우 종수 및 개체수의 영향을 받아 다양도 지수가 낮게 나타난 것으로 확인됨.
 - 생물 종수 및 개체수는 매우 다양한 생물적, 무생물적 환경의 영향을 받아 변화하므로 단시간의 연구를 통해 군집 변화의 이유를 제시하기는 어려우나, 향후 지속적인 모니터링을 통해 자료가 누적될 경우 군집유사도 분석의 통계적 신뢰도를 제고할 수 있을 것임.

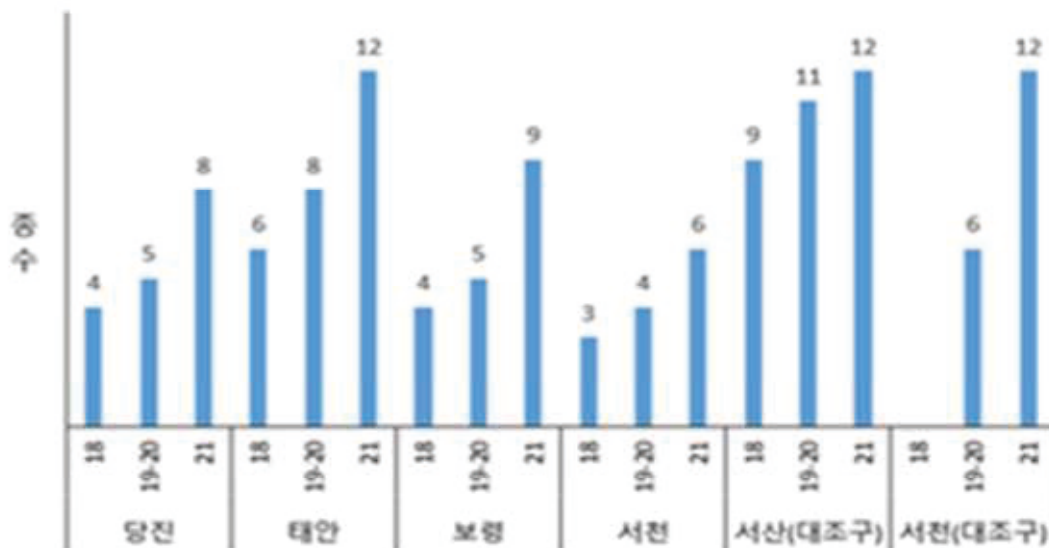


[그림 4.8] 지역별, 시기별 지표배회성곤충 군집의 다양도지수

다. 천공성 곤충

- 당진조사구에서는 2018년 4종 23개체, 2019~2020년 5종 33개체, 2021년 8종 34개체의 천공성 곤충이 채집되었으며, 태안조사구의 경우 2018년 6종 9개체, 2019~ 2020년 8종 19개체, 2021년 12종 23개체가 확인됨.
 - 보령조사구에서는 2018년 4종 12개체, 2019~2020년 5종 16개체, 2021년 9종 21개체의 천공성 곤충이 채집되었으며, 서천조사구의 경우 2018년 3종 3개체, 2019~ 2020년 4종 8개체, 2021년 6종 11개체가 확인됨.

- 서산대조구에서는 2018년 9종 26개체, 2019~2020년 11종 32개체, 2021년 12종 34개체의 천공성 곤충이 채집되었으며, 서천대조구의 경우 2019~2020년 6종 14개체, 2021년 12종 26개체가 확인됨.



[그림 4.9] 지역별, 시기별 천공성 곤충의 종수

- 2018년부터 2021년까지 채집된 곤충의 평균 종수는 당진조사구가 5.7, 태안조사구는 8.6, 보령조사구가 6, 서산대조구가 32, 서천대조구가 9로 서산대조구에서 가장 높게 나타났고, 평균 개체수는 당진조사구 30, 태안조사구 17, 보령조사구 16.3, 서천조사구 7.3이고, 서산대조구는 30.67, 서천대조구는 20으로 당진조사구와 서산대조구에서 높게, 서천조사구에서 가장 적게 나타남.
- 곤충의 종수 및 개체수는 다양한 기후인자 및 생물적 요인(천적, 기주식물 등)에 의해 변화하므로 이번 연구에서 조사 지역 간 종수 및 개체수 차이의 원인을 명확하게 제시할 수 없으나, 일반적으로 천공성 곤충은 수목의 목질부를 천공하는 생태적 특징을 지니므로 산림의 상태(수종, 수령, 수세, 임목 밀도 등)와 밀접한 관련이 있음
- 다양도 지수는 2018년~2021년에 당진조사구에서 0.32~0.64, 태안조사구에서 0.79~0.98, 보령조사구에서 0.63~0.72, 서천조사구에서 0.45~0.52, 서천대조구에서 0.82~0.94, 서산대조구에서 0.81~0.96로 확인되어 태안조사구의 천공성곤충 군집에서 높게 나타났으며, 당진조사구 및 서천조사구에서 다른 지역에 비해 낮게 나타남.

- 조사구와 실험구의 다양도 지수 차이는 전체 곤충상 조사 결과 및 지표배회성곤충 조사 결과와 유사하게 나타남.
- 당진조사구와 서천조사구는 채집된 곤충의 종수 및 개체수가 다른 지역에 비해 상대적으로 적어 다양도 지수가 낮게 산출되고, 군급 구성이 비교적 단순한 것으로 확인되었으나, 화력발전소에서 발생하는 대기오염물질이 곤충에 미치는 직접적인 영향은 확인할 수 없었음.



[그림 4.10] 지역별, 시기별 천공성곤충 군집의 다양도지수

라. 조사구-대조구 비교 분석

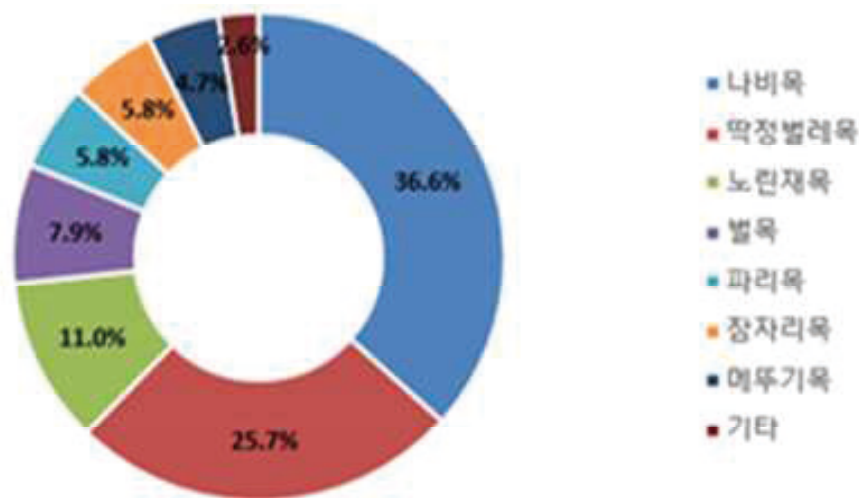
- 채집된 곤충의 종수는 대조구를 제외한 4개 조사구 중 당진조사구와 태안조사구에서 보령조사구 및 서천조사구에 비해 현저히 많은 것으로 확인됨.
 - 당진조사구, 태안조사구에서 채집된 곤충의 종 수는 각각 191종, 183종으로 서산대조구 199종 및 서천대조구 187종과 유사하게 나타났으나, 보령조사구는 114종, 서천조사구는 76종으로 대조구 곤충종수의 약 38~61%에 해당되는 적은 수준이었음.
- 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수는 대조구를 제외한 4개 조사구 중 태안조사구에서 가장 많았으며, 다양도 지수는 채집된 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수가 적었던 서천조사구에서 비교적 낮게 나타남.

- 서천대조구는 1.15~1.17로 지표배회성곤충 군집의 다양도 지수가 비교적 높았으나 서천조사구는 0.66~0.71로 가장 낮게 나타났고, 당진·태안보령 조사구는 각각 0.84~ 0.89, 0.95~1.01, 0.92~0.96으로 서산대조구 0.86~0.98와 유사한 수준으로 확인됨.
- 천공성 곤충의 종수 및 개체수는 시기별, 지역별로 편차가 심하게 나타나 일정한 경향성을 보이지 않았으나, 다양도 지수는 태안조사구에서 서산서천 대조구와 유사하게 나타났고 당진·보령·서천 조사구는 비교적 낮게 나타남.
 - 전체 곤충상 조사 및 지표배회성곤충, 천공성곤충 조사 결과 4개 조사구 중 태안조사구의 곤충 종 구성이 서산서천 대조구와 가장 유사한 것으로 확인되어 상대적으로 다른 조사구에 비해 인위적 교란이 적은 것으로 확인되었으며,
 - 이는 충남 내 국립공원(태안해안국립공원, 계룡산국립공원) 및 도립공원(덕산, 칠갑산, 대둔산)과 가장 가깝게 인접하고 있는 지역은 태안조사구(태안조사구의 조사지점이 태안해안국립공원과 약 1km 거리에 위치)이며 특히, 태안해안국립공원과 산림으로 직접 연결되어있어 국립공원의 풍부한 생물상의 영향을 받은 것으로 판단됨.

3.3. 조사지별 곤충 현황

가. 당진조사구

- 2018년 조사에서 10목 63과 166종, 2019~2020년 조사에서 10목 59과 142종, 2021년 조사에서 10목 62과 162종이 채집되어 총 11목 69과 191종의 곤충이 확인되었으며, 법정보호종(멸종위기 야생생물 및 천연기념물)은 확인되지 않음.
- 2021년 주간조사(쓸어잡기, 채어잡기, 털어잡기)에서 8목 40과 81종, 함정트랩에서 4목 9과 12종, 다중갈때기트랩에서 2목 5과 8종, 유아등트랩에서 8목 34과 73종이 채집됨.
 - 채집된 곤충 중 나비목이 36.6%로 가장 다양했으며, 딱정벌레목 25.7%, 노린재목 11.0%, 벌목 7.9%, 파리목 및 잠자리목 각각 5.8%, 메뚜기목 4.7% 순으로 나타남



[그림 4.11] 2018~2021년까지 채집된 당진조사구 곤충의 목별 종수 구성비

- 이번 연구에서 확인된 곤충의 종수(191종)는 당진화력 9, 10호기 건설사업 환경영향평가 보고서(환경부, 2019)의 석문지역 곤충 종수(81종)에 비해 큰 폭으로 증가하였으나, 이는 조사 인원, 조사 횟수, 조사 시기 등의 차이로 인한 것으로 판단되며,
 - 당시 환경영향평가 결과에서도 당진화력발전소 주변지역에 서식하는 곤충 중 법정 보호종(멸종위기 야생생물, 천연기념물)은 확인되지 않았음.

- － 본 연구를 통해 기후변화 생물지표종은⁶⁴⁾ 확인되지 않았고, 국외반출승인대상종⁶⁵⁾은 풍이, 제일줄나비, 쌍무늬먼지벌레 등 37종이 확인됨.

[표 4.12] 당진조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록

일련번호	과명	학명
278	꽃무지과	풍이
394	네발나비과	제일줄나비
464	딱정벌레과	쌍무늬먼지벌레
493	딱정벌레과	등빨간먼지벌레
518	딱정벌레과	팔점박이먼지벌레
529	딱정벌레과	폭탄먼지벌레
672	맷시벌과	대한맷시벌
767	메뚜기과	방아깨비
805	무당벌레과	무당벌레
833	물뽕뽕이과	애물뽕뽕이
846	물방개과	꼬마줄물방개
901	바구미과	흑바구미
1044	밤나방과	고려톱날무늬밤나방
1096	방아벌레과	루이스방아벌레
1162	부전나비과	극남부전나비
1228	뿔노린재과	에사키뿔노린재
1235	사마귀과	사마귀

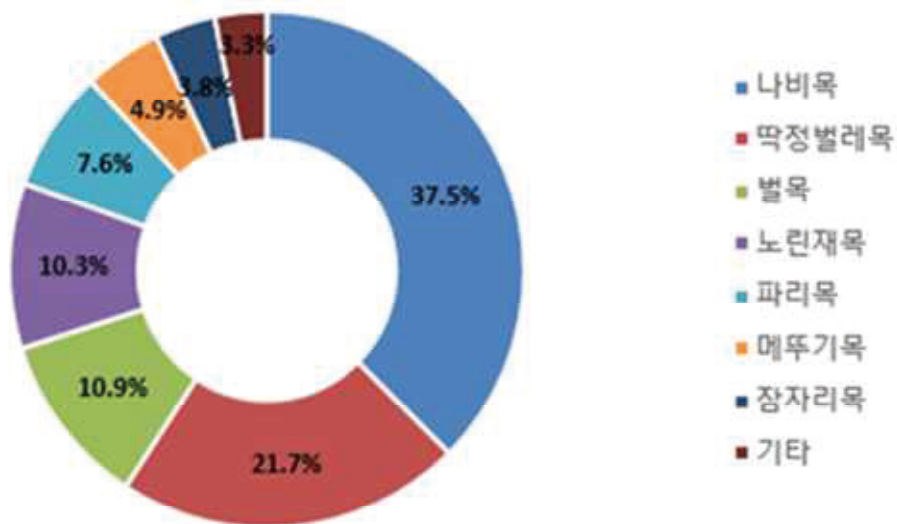
64) 기후변화 생물지표”란 기후변화로 인해 계절활동·분포역 및 개체군 크기 변화가 뚜렷하거나 뚜렷할 것으로 예상됨에 따라 지표화해 정부에서 지속적인 조사·관리가 필요한 생물종으로서, 곤충 15종을 포함하여 총 100종을 지정

65) "국외반출 승인대상 생물자원"이라 함은 생물다양성의 보전을 위하여 보호할 가치가 높아 국외로 반출할 경우 환경부령이 정하는 바에 따라 환경부장관의 승인을 얻어야 하는 생물자원을 의미

일련번호	과명	학명
1255	산누에나방과	옥색긴꼬리산누에나방
1272	소똥구리과	고려소똥퐁뎡이
1307	실잠자리과	새노란실잠자리
1311	실잠자리과	아시아실잠자리
1312	실잠자리과	북방아시아실잠자리
1382	애꽃벌과	등근허리아꽃벌
1585	잎벌레과	소요산잎벌레
1591	잎벌레과	붉은가슴잎벌레
1704	잠자리과	밀잠자리붙이
1705	잠자리과	넉점박이잠자리
1707	잠자리과	밀잠자리
1708	잠자리과	홀쭉밀잠자리
1712	잠자리과	노란잠자리
1713	잠자리과	두점박이좀잠자리
1718	잠자리과	들깃동잠자리
1873	침노린재과	다리무늬침노린재
2033	하늘소과	꽃하늘소
2035	하늘소과	홍가슴꽃하늘소
2044	하늘소과	홀쭉사과하늘소
2090	호랑나비과	산제비나비

나. 태안조사구

- 2018년 조사에서 10목 59과 157종, 2019~2020년 조사에서 9목 55과 140종, 2021년 조사에서 10목 62과 167종이 채집되어 총 11목 70과 184종의 곤충이 확인되었으며, 법정 보호종(멸종위기 야생생물 및 천연기념물)은 확인되지 않음.
- 2021년 주간조사(쓸어잡기, 채어잡기, 털어잡기)에서 8목 30과 54종, 함정트랩 4목 13과 24종, 다중깔때기트랩 3목 6과 12종, 유아등트랩 8목 40과 86종이 채집됨.
 - 채집된 곤충 중 나비목이 37.5%로 가장 다양했으며, 딱정벌레목 21.7%, 벌목 10.9%, 노린재목 10.3%, 파리목 7.6%, 메뚜기목 4.9%, 잠자리목 3.8% 순으로 나타남.



[그림 4.12] 2018~2021년까지 채집된 태안조사구 곤충의 목별 종수 구성비

- 이번 연구에서 확인된 곤충의 종수(184종)는 태안화력 9,10호기 건설사업 환경영향평가 보고서(환경부, 2013)의 곤충 종수(27종)에 비해 큰 폭으로 증가한 것으로 나타났으며, 곤충 종수의 단순 비교로 화력발전소의 영향을 명확히 구명할 수는 없으나, 화력발전소 주변지역에서 다양한 곤충의 서식이 확인되어 생태계가 안정적으로 유지되고 있는 것으로 사료됨

- 환경영향평가 결과 태안화력발전소 주변지역에 서식하는 곤충 중 법정보호종 (멸종위기 야생생물, 천연기념물)은 확인되지 않음.
- 기후변화 생물지표종은 말매미 1종이 확인되었으며, 국외반출승인대상종은 하이덴갈색줄풍뎅이, 왕귀뚜라미, 호박벌 등 39종이 확인됨

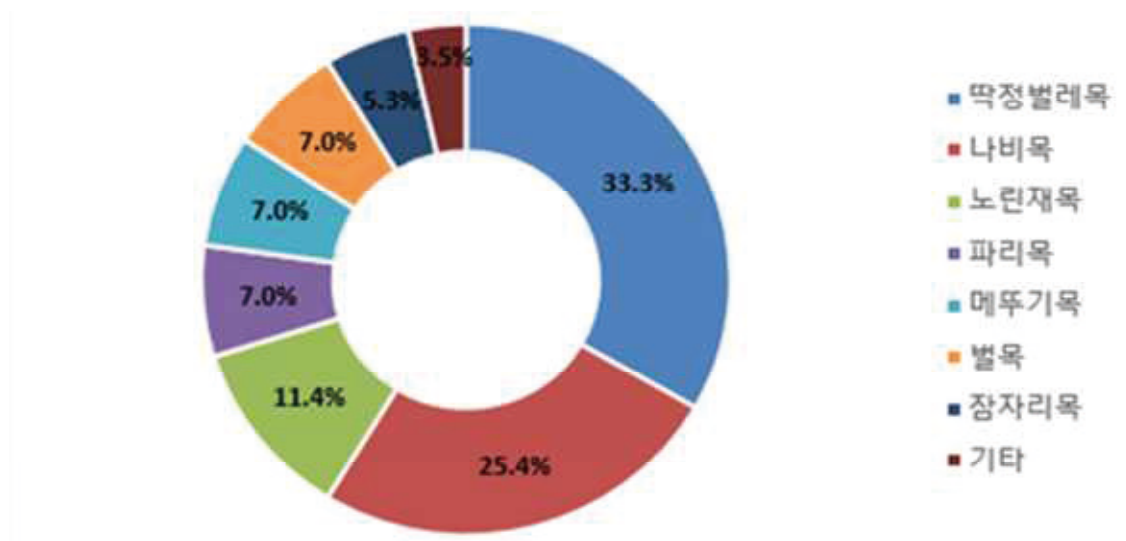
[표 4.13] 태안조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록

일련번호	과명	학명
104	검정풍뎅이과	하이덴갈색줄풍뎅이
138	귀뚜라미과	왕귀뚜라미
300	꿀벌과	호박벌
423	대모벌과	대모벌
458	딱정벌레과	검정명주딱정벌레
462	딱정벌레과	줄먼지벌레
464	딱정벌레과	쌍무늬먼지벌레
529	딱정벌레과	폭탄먼지벌레
549	땅강아지과	땅강아지
589	매미과	말매미
593	매미과	애매미
672	맷시벌과	대한맷시벌
805	무당벌레과	무당벌레
833	물땡땡이과	애물땡땡이
846	물방개과	꼬마줄물방개
903	바구미과	솔곰보바구미
966	반날개과	큰넓적송장벌레

일련번호	과명	학명
982	반날개과	수중다리송장벌레
1000	반날개과	홍딱지반날개
1029	밤나방과	마른잎노랑뒷날개나방
1075	방아벌레과	녹슬은방아벌레
1096	방아벌레과	루이스방아벌레
1161	부전나비과	남방부전나비
1244	사슴벌레과	넓적사슴벌레
1255	산누에나방과	옥색긴꼬리산누에나방
1272	소똥구리과	고려소똥풍뎡이
1311	실잠자리과	아시아실잠자리
1312	실잠자리과	북방아시아실잠자리
1419	왕바구미과	왕바구미
1707	잠자리과	밀잠자리
1708	잠자리과	흘쭉밀잠자리
1712	잠자리과	노란잠자리
1715	잠자리과	깃동잠자리
1928	파리매과	왕파리매
1930	파리매과	파리매
1931	파리매과	검정파리매
2064	하늘소과	툼하늘소
2075	하늘소과	검정하늘소
2092	호리병벌과	황습감당벌

다. 보령조사구

- 2018년 조사에서 10목 47과 82종, 2019~2020년 조사에서 9목 43과 80종, 2021년 조사에서 10목 51과 93종이 채집되어 총 10목 57과 114종의 곤충이 확인되었으며, 법정보호종 (멸종위기 야생생물 및 천연기념물)은 확인되지 않음
- 2021년 주간조사(쓸어잡기, 채어잡기, 털어잡기)에서 8목 23과 49종, 함정트랩에서 4목 10과 20종, 다중갈래기트랩에서 3목 5과 9종, 유아등트랩에서 8목 20과 39종이 채집됨.
 - － 채집된 곤충 중 딱정벌레목이 33.3%로 가장 다양했으며, 나비목 25.4%, 노린재목 11.4%, 파리목, 메뚜기목, 벌목 각각 7.0%, 잠자리목 3.5% 순으로 나타남



[그림 4.13] 2018~2021년까지 채집된 보령조사구 곤충의 목별 종수 구성비

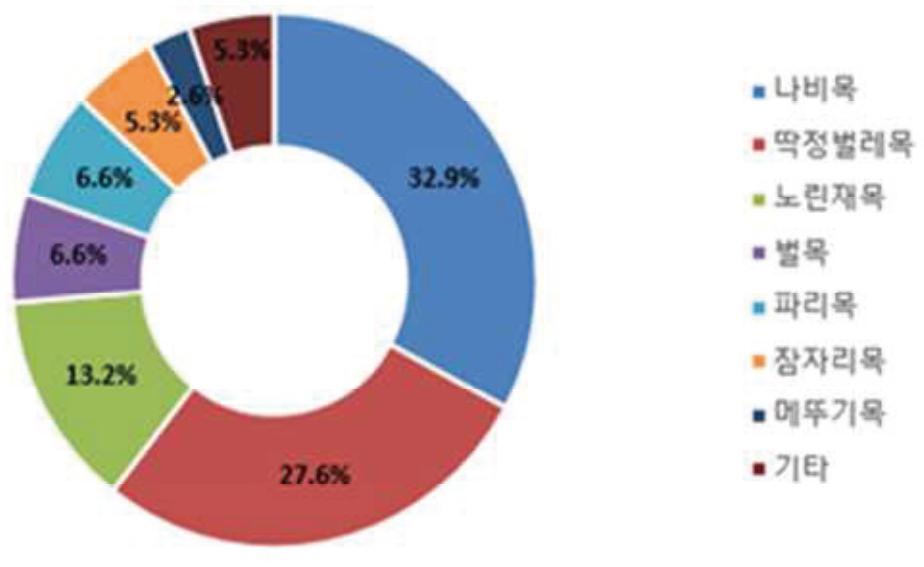
- 이번 연구에서 확인된 곤충의 종수(114종)는 보령화력 3호기 성능개선사업 환경영향평가 보고서(환경부, 2018)의 곤충 종수(131종)에 비해 다소 감소하였으나 차이가 근소하고 종 구성은 유사하게 나타남.
 - － 환경영향평가 결과 보령화력발전소 주변지역에 서식하는 곤충 중 법정보호종 (멸종위기 야생생물, 천연기념물)은 확인되지 않아 본 연구의 결과와 동일하게 나타남.
 - － 기후변화 생물지표종은 확인되지 않았으며, 국외반출승인대상종은 줄우단풍뎅이, 하이덴갈색줄풍뎅이, 왕귀뚜라미 등 23종이 확인됨.

[표 4.14] 보령조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록

일련번호	과명	학명
88	검정풍뎅이과	줄우단풍뎅이
104	검정풍뎅이과	하이덴갈색줄풍뎅이
138	귀뚜라미과	왕귀뚜라미
157	길앞잡이과	꼬마길앞잡이
458	딱정벌레과	검정명주딱정벌레
464	딱정벌레과	쌍무늬먼지벌레
493	딱정벌레과	등빨간먼지벌레
529	딱정벌레과	폭탄먼지벌레
593	매미과	애매미
767	메뚜기과	방아깨비
903	바구미과	솔곰보바구미
1000	반날개과	홍딱지반날개
1075	방아벌레과	녹슬은방아벌레
1235	사마귀과	사마귀
1244	사슴벌레과	넓적사슴벌레
1255	산누에나방과	옥색긴꼬리산누에나방
1311	실잠자리과	아시아실잠자리
1707	잠자리과	밀잠자리
1715	잠자리과	깃동잠자리
1930	파리매과	파리매
1931	파리매과	검정파리매
2044	하늘소과	홀쭉사과하늘소
2075	하늘소과	검정하늘소

라. 서천조사구

- 2018년 조사에서 10목 38과 55종, 2019~2020년 조사에서 8목 35과 50종, 2021년 조사에서 10목 40과 64종이 채집되어 총 11목 46과 76종의 곤충이 확인되었으며, 멸종 위기야생생물 II급인 애기뿔소똥구리가 확인됨.
- 2021년 주간조사(쓸어잡기, 채어잡기, 털어잡기)에서 7목 13과 31종, 함정트랩에서 4목 5과 9종, 다중갈매기트랩에서 2목 4과 6종, 유아등트랩에서 7목 21과 42종이 채집됨.
 - － 채집된 곤충 중 나비목이 32.9%로 가장 다양했으며, 딱정벌레목 27.6%, 노린재목 13.2%, 벌목 및 파리목 각각 6.6%, 잠자리목 5.3%, 메뚜기목 2.6% 순으로 나타남.



[그림 4.14] 2018~2021년까지 채집된 서천조사구 곤충의 목별 종수 구성비

- 이번 연구에서 확인된 곤충의 종수(76종)는 신서천 화력 건설사업 환경영향평가 보고서 (환경부, 2014)의 곤충 종수(173종)에 비해 크게 감소하였으나, 환경의 급격한 변화로 인한 원인보다는 조사 인원·횟수·시기 등의 차이에 의한 것으로 판단됨.
 - － 환경영향평가 결과 보령화력발전소 주변지역에 서식하는 곤충 중 범정보호종 (멸종위기 야생생물, 천연기념물)은 확인되지 않았으나, 본 연구에서 멸종위기 야생생물 II급인 애기뿔소똥구리 1개체가 확인됨.

- 기후변화 생물지표종은 말매미 1종이 확인되었으며, 국외반출승인대상종은 쌍무늬먼지벌레, 폭탄먼지벌레, 애매미 등 20종이 확인됨.



[그림 4.15] 서천조사구에서 확인된 애기뿔소똥구리

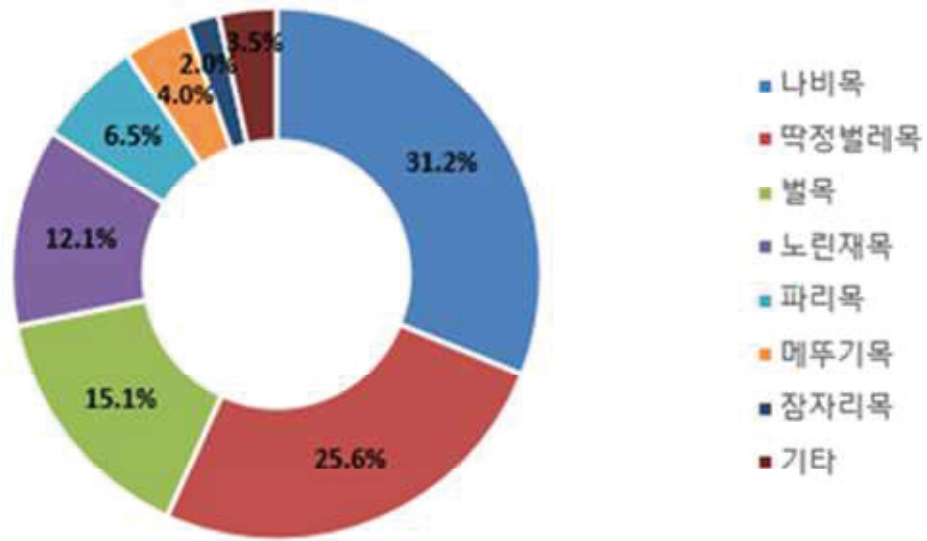
[표 4.15] 서천조사구 국외반출승인대상종 곤충 목록

일련번호	과명	학명
464	딱정벌레과	쌍무늬먼지벌레
529	딱정벌레과	폭탄먼지벌레
589	매미과	말매미
593	매미과	애매미
805	무당벌레과	무당벌레
808	무당벌레과	큰꼬마남생이무당벌레
1044	밤나방과	고려톱날무늬밤나방
1235	사마귀과	사마귀
1255	산누에나방과	옥색긴꼬리산누에나방
1272	소똥구리과	고려소똥풍뎡이

일련번호	과명	학명
1282	소바구미과	우리흰별소바구미
1312	실잠자리과	북방아시아실잠자리
1419	왕바구미과	왕바구미
1707	잠자리과	밀잠자리
1708	잠자리과	홀쭉밀잠자리
1715	잠자리과	깃동잠자리
1873	침노린재과	다리무늬침노린재
1930	파리매과	파리매
1931	파리매과	검정파리매
2075	하늘소과	검정하늘소

마. 서산(팔봉산) 대조구

- 2018년 조사에서 10목 65과 157종, 2019-2020년 조사에서 10목 60과 139종, 2021년 조사에서 10목 66과 159종이 채집되어 총 10목 71과 199종의 곤충이 확인되었고, 법정보호종(멸종위기 야생생물 및 천연기념물)은 확인되지 않음.
- 2021년 주간조사(쓸어잡기, 채어잡기, 털어잡기)에서 10목 40과 64종, 함정트랩에서 5목 15과 27종, 다중깔때기트랩에서 3목 6과 12종, 유아등트랩에서 8목 28과 63종이 채집됨.
 - 채집된 곤충 중 나비목이 31.2%로 가장 다양했으며, 딱정벌레목 25.6%, 벌목 15.1%, 노린재목 12.1%, 파리목 6.5%, 메뚜기목 4.0%, 잠자리목 2.0% 순으로 나타남.
- 기후변화 생물지표종은 말매미 1종이 확인되었으며, 국외반출승인대상종은 개미붙이, 큰 남색잎벌레붙이, 왕귀뚜라미 등 44종이 확인됨.



[그림 4.16] 2018~2021년까지 채집된 서산대조구 곤충의 목별 종수 구성비

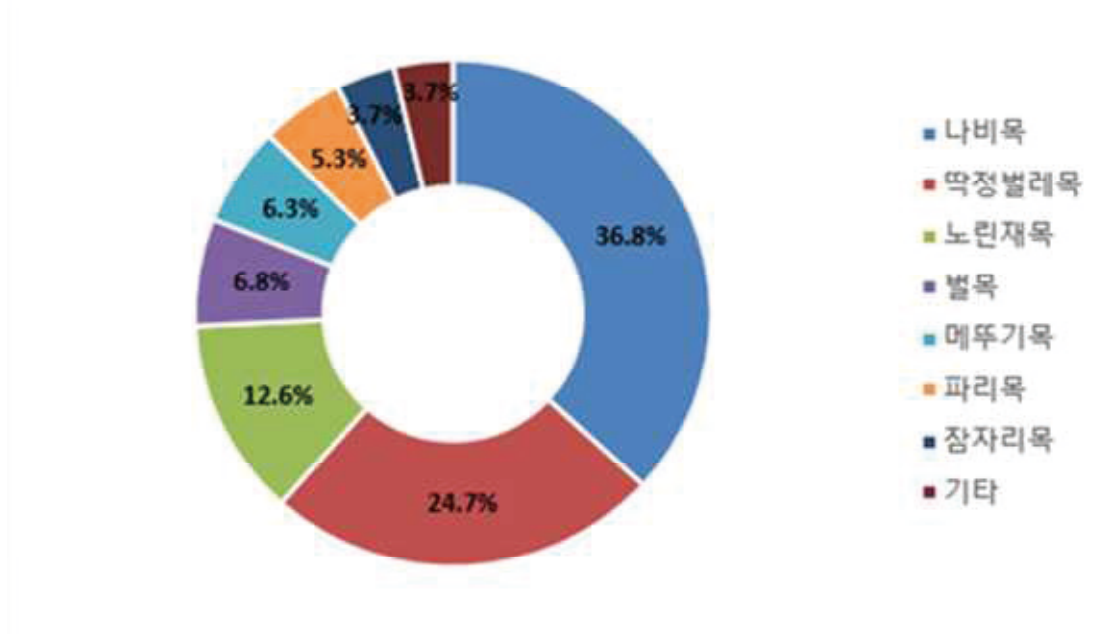
[표 4.16] 서산대조구 국외반출승인대상종 곤충 목록

일련번호	과명	학명
64	개미붙이과	개미붙이
70	거저리과	큰남색잎벌레붙이
138	귀뚜라미과	왕귀뚜라미
252	꽃등에과	반월넓적꽃등에
253	꽃등에과	물결넓적꽃등에
300	꿀벌과	호박벌
423	대모벌과	대모벌
449	딱정벌레과	먼지벌레
464	딱정벌레과	쌍무늬먼지벌레
518	딱정벌레과	팔점박이먼지벌레
589	매미과	말매미
593	매미과	애매미
672	매퓌리과	대한매퓌리
705	매퓌리과	두색매퓌리
767	메뚜기과	방아깨비

일련번호	과명	학명
805	무당벌레과	무당벌레
833	물땡땡이과	애물땡땡이
846	물방개과	꼬마줄물방개
900	바구미과	털보바구미
903	바구미과	솔곰보바구미
982	반날개과	수중다리송장벌레
1000	반날개과	홍딱지반날개
1075	방아벌레과	녹슬은방아벌레
1096	방아벌레과	루이스방아벌레
1241	사슴벌레과	애사슴벌레
1244	사슴벌레과	넓적사슴벌레
1255	산누에나방과	옥색긴꼬리산누에나방
1272	소똥구리과	고려소똥퐁땡이
1312	실잠자리과	북방아시아실잠자리
1419	왕바구미과	왕바구미
1606	잎벌레과	오리나무잎벌레
1707	잠자리과	밀잠자리
1708	잠자리과	흙쭉밀잠자리
1715	잠자리과	깃동잠자리
1757	장수풍뎅이과	장수풍뎅이
1758	장수풍뎅이과	외뿔장수풍뎅이
1928	파리매과	왕파리매
1930	파리매과	파리매
1931	파리매과	검정파리매
2035	하늘소과	홍가슴꽃하늘소
2064	하늘소과	톱하늘소
2075	하늘소과	검정하늘소
2089	호랑나비과	사향제비나비
2090	호랑나비과	산제비나비

바. 서천(희리산) 대조구

- 2019~2020년 조사에서 9목 43과 146종, 2021년 조사에서 10목 52과 166종이 채집되어 총 11목 78과 190종의 곤충이 확인되었으며, 법정보호종 (멸종위기 야생생물 및 천연기념물)은 확인되지 않음.
- 2021년 주간조사(쓸어잡기, 채어잡기, 털어잡기)에서 8목 37과 80종, 함정트랩에서 4목 5과 21종, 다중깔때기트랩에서 3목 5과 12종, 유아등트랩에서 7목 39과 89종이 채집됨.
 - 채집된 곤충 중 나비목이 36.8%로 가장 다양했으며, 딱정벌레목 24.7%, 노린재목 12.6%, 벌목 6.8%, 메뚜기목 6.3%, 파리목 5.3%, 잠자리목 3.7% 등으로 나타남.
- 기후변화 생물지표종은 확인되지 않았으며, 국외반출승인대상종은 개미붙이, 왕귀뚜라미, 호박벌 등 42종이 확인됨.



[그림 4.17] 2019~2021년까지 채집된 서천대조구 곤충의 목별 종수 구성비

[표 4.17] 서천대조구 국외반출승인대상종 곤충 목록

일련번호	과명	학명
64	개미붙이과	개미붙이
138	귀뚜라미과	왕귀뚜라미
300	꿀벌과	호박벌
449	딱정벌레과	먼지벌레
464	딱정벌레과	쌍무늬먼지벌레
493	딱정벌레과	등빨간먼지벌레
518	딱정벌레과	팔점박이먼지벌레
529	딱정벌레과	폭탄먼지벌레
549	땅강아지과	땅강아지
593	매미과	애매미
767	메뚜기과	방아깨비
805	무당벌레과	무당벌레
846	물방개과	꼬마줄물방개
900	바구미과	털보바구미
966	반날개과	큰넓적송장벌레
982	반날개과	수중다리송장벌레
1000	반날개과	홍딱지반날개
1029	밤나방과	마른잎노랑뽕날개나방
1075	방아벌레과	녹슬은방아벌레
1096	방아벌레과	루이스방아벌레
1228	뽕노린재과	에사키뽕노린재

일련번호	과명	학명
1235	사마귀과	사마귀
1241	사슴벌레과	애사슴벌레
1244	사슴벌레과	넓적사슴벌레
1255	산누에나방과	옥색긴꼬리산누에나방
1272	소똥구리과	고려소똥퐁덩이
1282	소바구미과	우리흰별소바구미
1311	실잠자리과	아시아실잠자리
1312	실잠자리과	북방아시아실잠자리
1419	왕바구미과	왕바구미
1585	잎벌레과	소요산잎벌레
1707	잠자리과	밀잠자리
1713	잠자리과	두점박이좀잠자리
1715	잠자리과	깃동잠자리
1873	침노린재과	다리무늬침노린재
1928	파리매과	왕파리매
1930	파리매과	파리매
2033	하늘소과	꽃하늘소
2035	하늘소과	홍가슴꽃하늘소
2075	하늘소과	검정하늘소
2089	호랑나비과	사향제비나비
2090	호랑나비과	산제비나비

사. 조사구-대조구 비교 분석

- 4개 조사구 및 대조구에서 확인된 곤충의 평균 종수는 당진조사구 11.7, 태안조사구 24.7, 보령조사구 18.0, 서천조사구 8.3, 서산대조구 22.7, 서천대조구 20.0으로 나타났으며, 조사구 전체 종수의 평균은 15.7, 대조구 전체 종수의 평균은 21.6으로 확인됨.
 - 조사구와 대조구의 평균 종수를 단순 비교 시 대조구의 평균값이 약 37.6% 높아 조사구의 곤충 다양성이 상대적으로 낮은 것으로 나타났고,
 - 각 조사구별 평균 종수를 2개 대조구 평균값과 비교 시 당진조사구 54.2%, 태안조사구 114.4%, 보령조사구 83.3%, 서천조사구 38.4%로 나타나 화력발전소 4개 지역별로 큰 편차를 보였음.
- 당진, 보령, 서천 조사구의 평균 종수는 대조구 평균 종수에 비해 낮게 나타난 반면, 태안조사구의 경우 대조구보다 높게 나타나 조사구-대조구간 평균 종수에서 일관된 경향성은 확인되지 않았음.
 - 생물의 종수는 매우 다양한 요인에 의해 복합적인 영향을 주고받으며 변화하므로 이번 연구의 결과만으로는 조사구별로 종수의 편차가 크게 나타난 원인을 정확히 규명할 수는 없으나,
 - 태안조사구의 사례를 볼 때 화력발전소의 유무보다는 주변지역의 산림건전성 (태안해안국립공원과 산림으로 연결되어 있는 지리적 여건) 등의 기존 환경요소가 곤충의 종수에 영향을 미쳐 타 조사구에 비해 높게 나타났을 가능성이 있음.
- 조사구와 대조구 내 지표배회성 곤충의 군집구조간 차이를 분석하여 화력발전소가 지표배회성 곤충에 미치는 영향의 유무를 통계적으로 확인하고자 해당 분석을 실시하였으나, 해당 분석에서 조사구와 대조구 사이의 유의차는 확인되지 않았고 화력발전소의 영향을 분석할 수 없었음.
 - 짧은 기간동안 모니터링으로는 군집구조의 변화를 확인하고 화력발전소에서 배출되는 오염물질의 영향 정도를 확인하기에 한계가 있어, 향후 지속적인 조사를 통한 자료의 누적 및 분석이 필요할 것으로 사료됨.

[표 4.18] 조사구-대조구 연차별 채집된 곤충 종수

구분	2018년	2019~2020년	2021년
당진조사구	10목 63과 166종	10목 59과 142종	10목 62과 162종
태안조사구	10목 59과 157종	9목 55과 140종	10목 62과 167종
보령조사구	10목 47과 82종	9목 43과 80종	10목 51과 93종
서천조사구	10목 38과 55종	8목 35과 50종	10목 40과 64종
서산대조구	10목 65과 157종	10목 60과 139종	10목 66과 159종
서천대조구	-	9목 43과 146종	10목 52과 166종

3.4. 요약 및 소결론

- 2018년부터 2021년까지 확인된 곤충은 당진조사구에서 11목 69과 191종, 태안조사구 11목 70과 184종, 보령조사구 10목 57과 114종, 서천조사구 11목 46과 76종, 서산대조구 10목 71과 199종, 서천대조구 11목 78과 190종이 확인됨.
- 각 지역에서 확인된 곤충의 종 구성, 종수 및 개체수를 바탕으로 군집분석 결과 조사구와 대조구 사이에서 유의미한 차이는 확인되지 않았고, 화력발전소에서 배출되는 대기오염물질로 인하여 발생된 곤충에 미치는 영향을 확인하는데는 어려움이 있었음.
 - 본 연구는 기후변화에 따른 지역의 취약종을 중심으로 모니터링에 대한 결과로 단기간(2018~2021년) 연구가 이루어져 통계적 신뢰도를 확보하는데 한계가 있었으며, 지역별 곤충의 종수·개체수·다양성 지수 데이터를 가지고 화력발전소의 영향권을 확인하는데도 유의미한 결과 도출 및 원인 규명에 어려움이 있었음.
- 하지만, 태안조사구와 서천조사구, 조사구 간 내에서 곤충군집구조 사이에 일부 유의차를 확인하였는데,
 - 다른 조사구에 비하여 곤충의 종수 및 개체수가 풍부한 것으로 확인된 태안조사구의 경우 태안해안국립공원과 인접(1km 이내)하여 국립공원 내 풍부한 생물자원의 영향을 받은 것으로 보이며,

- 서천조사구는 종수 및 개체수가 적은 원인을 단기간의 연구로 명확히 구명하기는 어려우나, 곤충 군집은 서식환경 (산림, 초지, 하천 등)의 다양성, 기주식물 및 먹이원의 다양성과 밀접한 관련이 있고, 기후인자 및 인간활동 등 다양한 요인에 의해 변화되므로,
 - 서천조사구의 종수 및 개체수에 대한 보다 명확한 원인 규명을 위해서는 지속적인 장기 모니터링을 통해 자료의 누적과 대조구와의 비교 분석이 필요할 것임.
- 2021년 조사 시에 특이점은 서천조사구에서 멸종위기 야생생물 II급인 애기뿔소뿔구리가 확인되었는데 법정보호종의 서식이 확인됨에 따라 생태자연도 등급 조정 및 해당 종의 서식지(서천군 서면 도둔리 산 82 일대의 산림)의 개발 제한, 원형보전 등 보호대책 수립이 필요할 것으로 판단됨.
- 해당 종은 포유류의 배설물을 먹이로 삼기 때문에 다른 포유류의 보호도 추가적으로 필요하며, 더불어 안내판 설치 및 주민을 대상으로 한 홍보 및 교육 등도 병행이 필요할 것으로 판단됨.

4. 포유류분야

4.1. 조사시기 및 조사방법

가. 조사시기

- 충남 화력발전소 주변의 포유류 조사는 2021년 1월부터 2021년 10월까지 총 4회에 걸쳐 실시함

[표 4.19] 충남 화력발전소 주변지역의 포유류 조사 시기

차수	조사시기	조사일수	조사장소 (본 보고서 4-112쪽 참조)
1차 조사	2021년 1월 28일~2021년 1월 29일	2	(실험구) 당진 석문면, 태안 원북면, 보령 오천면, 서천 서면, (대조구) 서산 팔봉면, 서천 중천면
2차 조사	2021년 7월 13일~2021년 7월 15일	3	"
3차 조사	2021년 9월 27일~2021년 9월 29일	3	"
4차 조사	2021년 10월 12일~2021년 10월 13일	2	

나. 조사 방법

- 포유류상 조사를 위해 3차년도 조사방법(3차년도 보고서 pp. 497-498)과 동일하게 흔적조사(Field Survey), 카메라 트랩 조사, 포획조사를 수행함. (그림 4.18-20)
 - 서면트랩을 이용하여 포획한 개체는 현장에서 종 동정 및 암수 구분 후 중금속 오염 분석을 위해 경추탈구를 진행하여 안락사함.



[그림 4.18] 수달 흔적조사



[그림 4.19] 무인센서카메라 설치 모습과 설치된 무인센서카메라(Browning BTC-6XD)



[그림 4.20] 포획된 땃쥐(좌) 및 등줄쥐(우)

- 무인센서카메라 사진 자료를 이용하여 종별 및 서식지 유형별 상대풍부도 지수(RAI, Relative Abundance Index)(Arroyo-Arce et al., 2017)를 산출하여 분석함.

※ 상대풍부도 지수 산출식(Arroyo-Arce et al., 2017)

RAI(Relative Abundance Index of species)

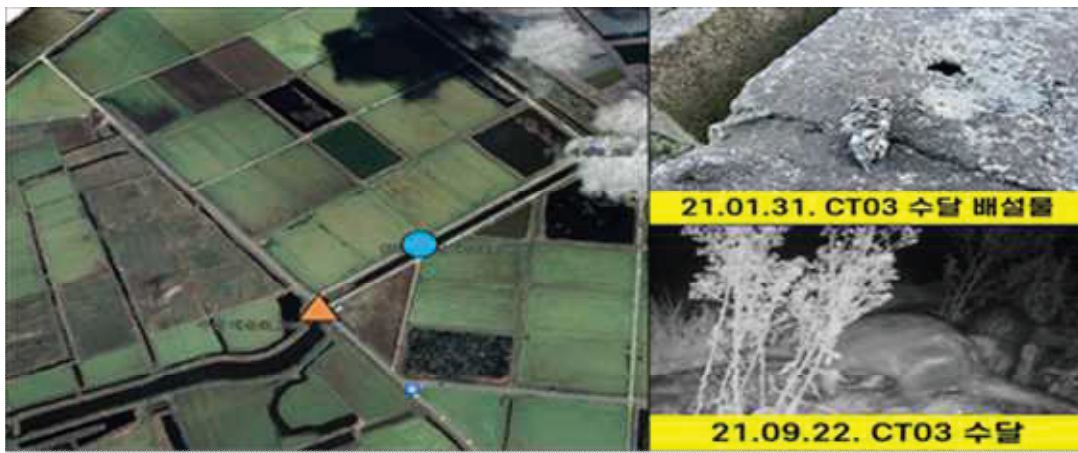
= Events x (100 camera trap nights / sampling effort)

- RAI(Relative Abundance Index of species) : 상대적 종풍부도 지수
- Events : 해당 종이 촬영된 사진 수
- 100 camera trap nights : 다른 연구들과 데이터를 비교하기 위한 표준단위
- Sampling effort : 무인센서카메라가 운용된 총 일수

4.2. 포유류분야 조사결과

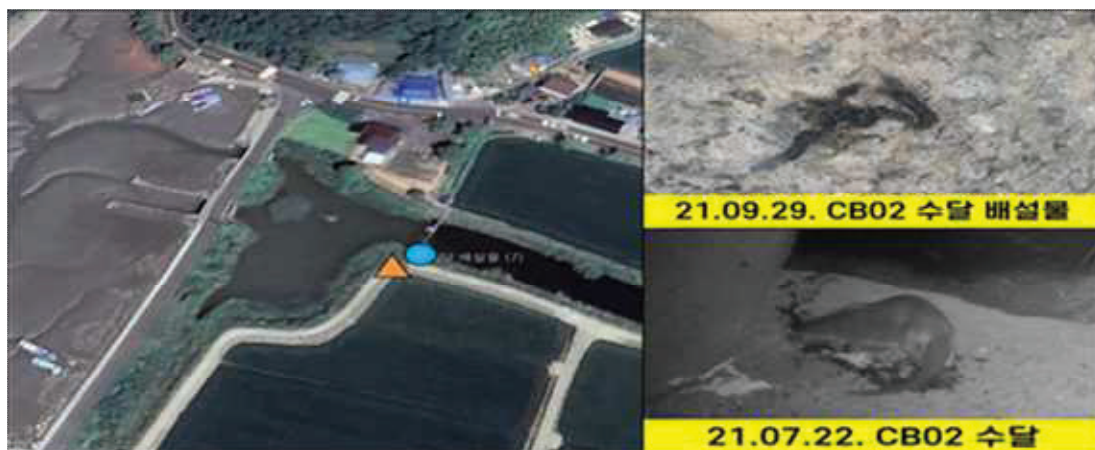
가. 지역별 조사내역

- 멸종위기야생동물 I 급이자 천연기념물 제330호인 수달 1종이 서천과 태안, 보령 화력발전소 주변에서 흔적이 확인되었고, 태안(CT03)과 보령(CB02, CB03)에서 무인센서카메라에 촬영되어 실체를 확인함. (그림 4.21-23)



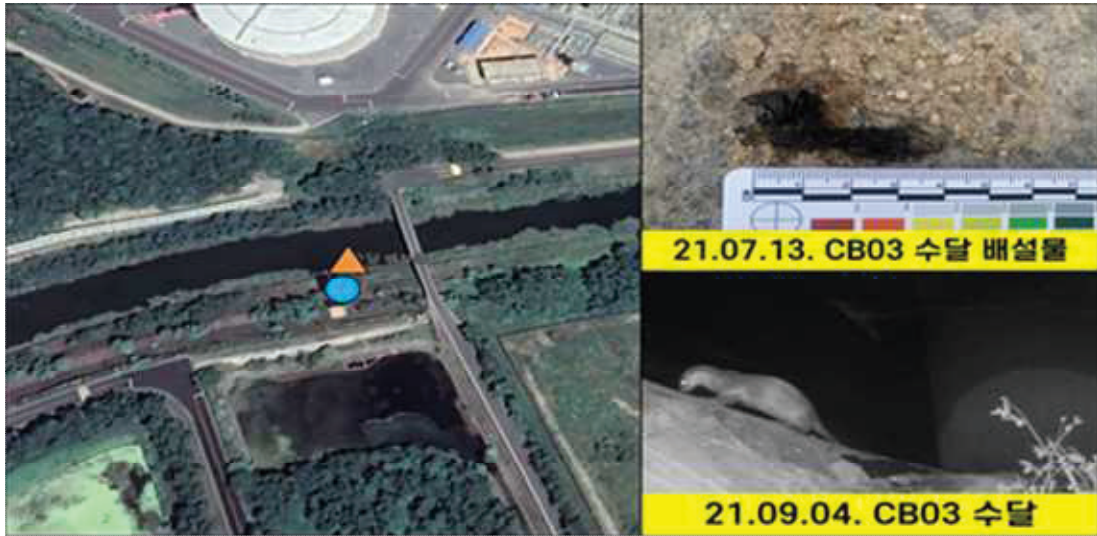
[그림 4.21] 태안 화력발전소 인근 CT03 수달 흔적

- 수달 흔적 확인지점(▲) 및 센서카메라 촬영지역(●) (이하동일)
- 우측상단 : 21년 1월 31일 CT03 지점에서 발견한 수달 배설물,
우측하단 : 21년 9월 22일 CT03 지점에서 촬영된 수달 사진



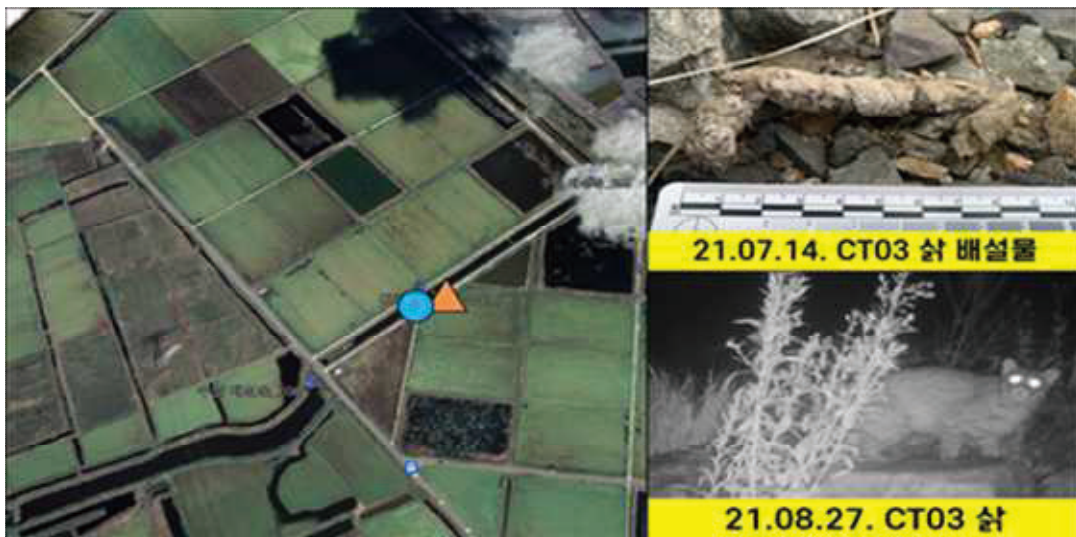
[그림 4.22] 보령 화력발전소 CB02 수달 흔적

- 우측상단: 21년 9월 29일 CB02 지점에서 발견한 수달 배설물,
우측하단: 21년 7월 22일 CB02 지점에서 촬영된 수달 사진



[그림 4.23] 보령 화력발전소 CB03 수달 흔적

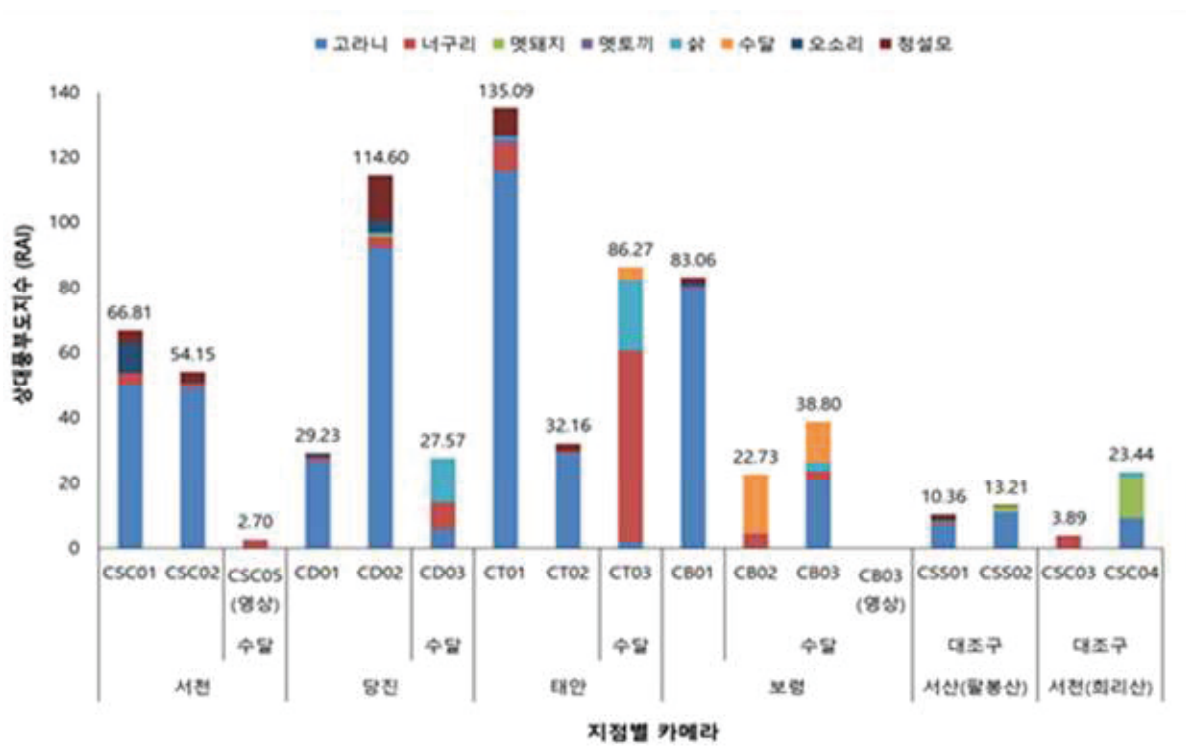
- 우측상단: 21년 7월 13일 CB03 지점에서 발견한 수달 배설물,
우측하단: 21년 9월 4일 CB03 지점에서 촬영된 수달 사진
- 멸종위기야생동물Ⅱ급인 삵은 태안에서 흔적으로 확인되었고, 당진(CD02, CD03), 태안(CT01, CT03), 보령(CB03) 및 서천 희리산(CSC04)에서 센서카메라에 촬영되어 실체를 확인함(그림 4.24)



[그림 4.24] 태안 화력발전소 CT03 삵 흔적

- 우측상단: 21년 7월 14일 CT03 지점에서 발견한 삵 배설물,
우측하단: 21년 8월 27일 CT03 지점에서 촬영된 삵 사진

- 지역별로는 당진에서 8종(땃쥐, 오소리, 너구리, 삵, 고라니, 멧돼지, 청설모, 등줄쥐)의 가장 많은 종이 확인되었고 태안에서 7종(오소리, 수달, 너구리, 삵, 고라니, 멧토끼, 청설모), 보령 7종(오소리, 수달, 너구리, 삵, 고라니, 멧토끼, 청설모), 서천 5종(오소리, 수달, 너구리, 고라니, 청설모)이 조사되었고, 대조구인 서산 팔봉산에서 6종(오소리, 너구리, 고라니, 멧돼지, 청설모, 등줄쥐), 서천 희리산에서 5종(너구리, 삵, 고라니, 멧돼지, 청설모)이 조사됨. (표 4.20)
- 가장 넓은 범위에 걸쳐 출현한 종은 고라니, 너구리, 청설모, 오소리 등으로 고라니, 너구리, 청설모는 전 지점에서 확인되었고, 오소리는 서천 희리산을 제외한 모든 지점에서 확인됨. (표 4.20)
- 지점별 상대풍부도 지수(RAI)를 평가한 결과 RAI 상위 10%에는 태안 CT01 (135.09), 당진 CD02(114.60), 태안 CT03(86.27) 지점이 포함되었으며, 하위 10%에는 서천 CSC05 (2.70), 서천 희리산 CSC03(3.89), 서산 팔봉산 CSS01(10.36) 지점이 포함됨. (그림 4.25)



[그림 4.25] 각 지점별 야생동물 상대풍부도 지수 비교

- RAI 상위 10%에 해당하는 지점들에서는 야생동물의 종 수가 6종으로 다양했으며, 멸종 위기 종의 출현 횟수도 더 많았음.
- RAI가 가장 높은 지점은 태안 CT01(135.09)이었으나, 야생동물이 다양하게 출현하였기보다 고라니의 상대풍부도(115.79)가 다른 지점보다 높게 나타나 상대풍부도 지수가 높게 산출된 것으로 판단됨. (그림 4.25)

나. 조사구-대조구 비교 분석

- 환경부 전국자연환경조사 보고서에 의하면, 당진 14종, 태안 12종, 보령 16종, 서천 10종, 서산 15종 등이 보고되어 있음(표 4.21)
- 당진에서는 문헌조사 결과 두더지, 땃쥐, 족제비, 너구리, 삵, 고라니, 멧돼지, 멧토끼, 청설모, 다람쥐, 흰넓적다리붉은쥐, 멧발쥐, 생쥐, 집쥐로 총 14종이 확인되었음. 이중 땃쥐, 너구리, 삵, 고라니, 멧돼지, 청설모, 등줄쥐 총 7종을 본 조사를 통해 확인하였고 문헌조사에 기록되지 않은 등줄쥐와 오소리를 추가적으로 확인하였음.
- 태안에서는 문헌조사 결과 두더지, 족제비, 너구리, 삵, 노루, 고라니, 멧돼지, 멧토끼, 청설모, 다람쥐, 멧발쥐, 생쥐로 총 12종이 확인되었는데, 이 중 너구리, 삵, 고라니, 멧토끼, 청설모 총 5종을 본 연구를 통해 확인하고 문헌조사에는 기록되지 않은 오소리와 수달을 추가적으로 확인하였음.
- 보령은 두더지, 땃쥐, 수달, 족제비, 너구리, 삵, 염소, 노루, 고라니, 멧돼지, 멧토끼, 청설모, 다람쥐, 멧발쥐, 생쥐, 집쥐로 총 16종을 문헌조사로 확인하였고 수달, 너구리, 삵, 고라니, 멧토끼, 청설모 총 6종을 실제 확인하였음. 문헌조사에는 기록되지 않은 오소리를 추가 확인함.
- 서천은 두더지, 땃쥐, 족제비, 너구리, 삵, 염소, 고라니, 멧토끼, 청설모, 다람쥐로 총 10종이 출현하는 것을 문헌조사를 통해 확인하였고, 이 중 너구리, 고라니, 청설모 총 3종을 확인하고 문헌조사에는 기록되지 않은 오소리와 수달을 추가적으로 확인함.
- 서산에서는 문헌조사 결과 고슴도치, 두더지, 오소리, 족제비, 너구리, 삵, 노루, 고라니, 멧돼지, 멧토끼, 청설모, 다람쥐로 총 15종이 확인되었고, 이 중 오소리, 너구리, 삵, 고라니, 멧돼지, 청설모 총 6종을 확인하였음. 문헌조사에는 기록되지 않은 포유류는 본 연구조사를 통해 등줄쥐를 추가적으로 확인함.

[표 4.20] 각 지역별 흔적, 무인센서카메라 및 포획 조사 결과

목 (Order)	과 (Family)	종 (Species)	조 사 지 역					
			당진	태안	보령	서천	서산 팔봉산 (대조구)	서천 희리산 (대조구)
참서목	참서과	땃쥐	●					
식육목	족제비과	오소리	◎	◎	◎	◎	◎	
		수달		▲◎	▲◎	▲		
	개과	너구리	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	고양이과	살	◎	▲◎	◎			◎
우제목	사슴과	고라니	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	멧돼지과	멧돼지	◎				◎	◎
토끼목	토끼과	멧토끼		◎	◎			
설치목	청설모과	청설모	◎	◎	◎	◎	◎	◎
	쥐과	등줄쥐	●				●	
유해야생동물종 수			2	1	1	1	2	2
멸종위기종 수			2	2	2	1	1	2
지역별 총 종 수			8	7	7	5	6	5
총 종 수			5목 9과 10종					

▲ : 흔적 조사, ◎ : 무인센서카메라 조사, ● : 포획 조사

[표 4.21] 문헌조사 결과 및 조사 결과 비교

목 (Order)	과 (Famaily)	종 (Species)	조 사 지 역				
			당진	태안	보령	서천	서산
고슴도치목	고슴도치과	고슴도치					○
참서목	두더지과	두더지	○	○	○	○	○
	참서과	땃쥐	●○		○	○	
식육목		오소리	◎	◎	◎	◎	◎○
	족제비과	수달		▲◎	▲◎○	▲	
		족제비	○	○	○	○	○
	개과	너구리	◎○	◎○	◎○	◎○	◎○
	고양이과	살	◎○	▲◎○	◎○	○	◎○
우제목	소과	염소			○	○	
	사슴과	노루		○	○		○
		고라니	◎○	◎○	◎○	◎○	◎○
	멧돼지과	멧돼지	◎○	○	○		◎○
토끼목	토끼과	멧토끼	○	◎○	◎○	○	○
설치목	청설모과	청설모	◎○	◎○	◎○	◎○	◎○
		다람쥐	○	○	○	○	○
		등줄쥐	●				●
	쥐과	흰넓적다리붉은쥐	○				
		멧밭쥐	○	○	○		○
		생쥐	○	○	○		○
		집쥐	○		○		○
문헌자료 총 종 수			14	12	16	10	15
조사 총 종 수			8	7	7	5	7

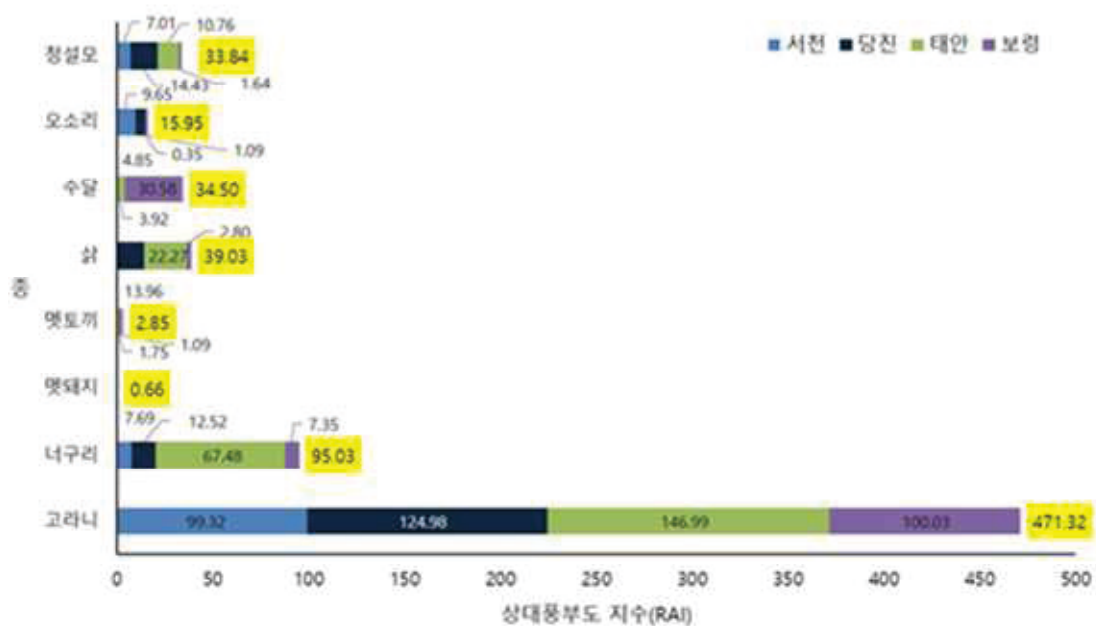
▲ : 흔적 조사, ◎ : 무인센서카메라 조사, ● : 포획 조사, ○ : 전국자연환경조사(문헌자료)



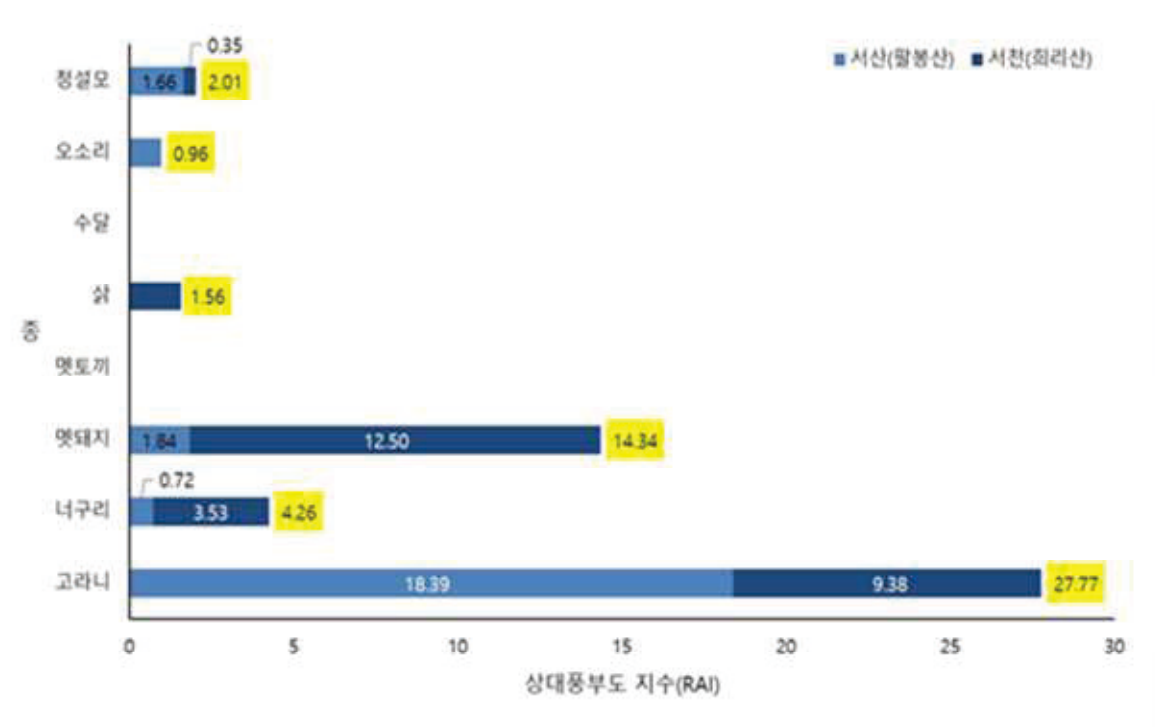
[그림 4.26] 화력발전소 인근 야생동물 센서카메라 촬영 사진

- 4개 화력발전소 인근 지역(서천, 당진, 태안, 보령) 야생동물 종별 상대풍부도 지수(RAI)를 평가한 결과 상위 3종은 고라니(471.32), 너구리(95.03), 삵(39.03) 순으로 고라니가 가장 높았으며, (그림 4.27)
 - 2개 대조구 지역(서산 팔봉산, 서천 희리산) 야생동물 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 고라니(27.77), 멧돼지(14.34), 너구리(4.26) 순으로 조사구와 마찬가지로 고라니의 상대풍부도가 높게 분석됨. (그림 4.28)
 - 실험구와 대조구에서 공통적으로 가장 높은 상대풍부도 지수(RAI)를 나타내는 고라니 수치를 비교한 결과, 화력발전소 주변 지역(471.32)이 대조구 지역(27.77)보다 약 17배 높은 상대 풍부도를 나타냄. (그림 4.27-28)
- 화력발전소 주변 지역과 대조구간 종별 상대풍부도 지수(RAI) 비교 결과, 화력발전소 주변 지역이 상대적으로 야생 포유동물의 풍부도가 높은 것으로 나타남.
 - 대조구 선정 시 화력발전소의 영향을 많이 받지 않은 충남 내 대조구 선정이 필요하다는 전문가 자문의견을 적극 반영하여, 2차년도에 서산시 팔봉산을, 3차년도에는 서천군 희리산을 대조구로 선정함.
 - 그러나, 대조구로 선정된 두 지역은 시군의 주요 관광지로 등산로가 잘 갖추어져 있음에도 등산객 및 관광객 등이 야생동물 서식지인 산림 지역에 빈번하게 출입하여 등산로가 없고 사람의 출입이 적은 화력발전소 주변 지역의 산림보다 일부 지역에서 훼손이 더 많이 이루어져 있음.
 - 서산 팔봉산에서는 2002년부터 매년 팔봉산 감자축제를 개최하고 있으며 축제기간 연간 약 5만 6000명의 관광객이 방문하고 있음. 2021년은 코로나19로 비대면 축제로 진행되었으나, 단풍절에는 하루 평균 1만 여명의 등산객이 찾는 곳임. (충남일보 2011. 11. 17.)
 - 서천 희리산 자연휴양림은, 산림청 국립자연휴양림관리소에서 제공한 국립자연휴양림 연령대별 선호휴양림 분석현황 공공데이터(2021. 10. 21. 기준)에 의하면, 전국 43개 국립자연휴양림관리소 중 30~40대 4순위, 70대 5순위, 80~90대 4순위로 30~40대와 70~90대에서 높은 선호도를 보였고 국립자연휴양림 이용객 정보 공공데이터(2018. 10. 18. 기준)에서는 2017년 30대 4순위, 40대 3순위의 인기 휴양림으로 선정됨.

- 대조구의 탐방객 방문 증가가 야생동물 출현에 부정적 영향을 미쳐(정승준, 2019) 포유류 상대풍부도 지수가 조사구보다 낮게 나타난 것으로 판단됨.
 - － 향후, 명확한 포유류 상대풍부도 지수를 비교·평가하기 위해서는 인위적 교란이 많이 발생하는 현재 대조구 보다는 사람의 출입이 적고 산림 훼손이 적게 이뤄진 곳을 재선정하여 진행하는 것이 바람직한 것으로 사료됨.
- 앞서 언급한 문헌조사는 종 목록 중심의 연구조사로 화력발전소의 대기오염물질 배출의 영향을 확인할 수 있는 포유류 풍부도가 누락되어 있어 화력발전소 영향정도를 판단하는 기준으로 활용되기에 다소 정확도가 부족함. (표 4.21)
 - － 문헌조사에서 이뤄진 종 목록 중심의 연구 또한, 조사된 포유류 종수가 적어 본 연구의 종수와 단순 비교하여 포유류 서식지의 화력발전소 기후환경 영향 정도를 평가하는 것은 매우 어려움.
 - － 따라서, 본 연구 결과를 기초로 화력발전소 주변 지역과 대조군 지역의 포유동물의 다양한 종수 분석과 풍부도 변화를 장기간 모니터링하여 비교 분석하는 것이 필요할 것으로 판단됨.



[그림 4.27] 조사구 포유류 종별 상대풍부도 지수(RAI)



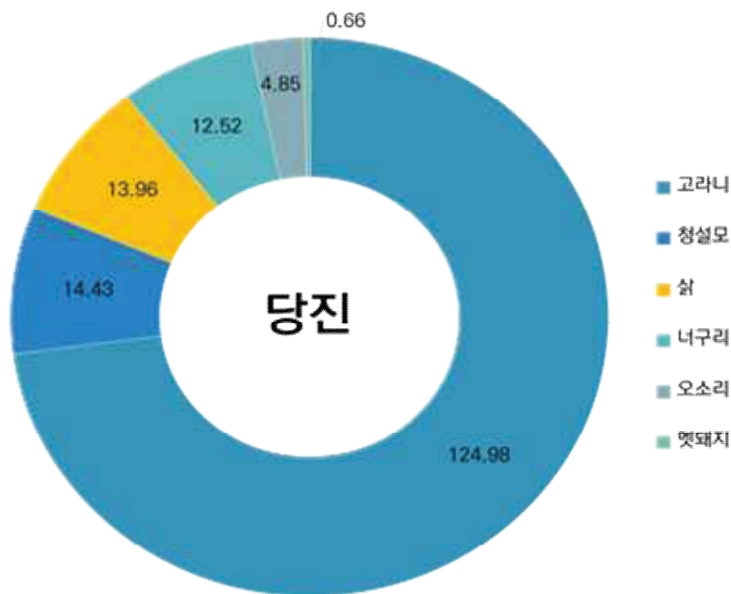
[그림 4.28] 대조구 포유류 종별 상대풍부도 지수(RAI) 비교

4.3. 조사구-대조구 조사결과

가. 당진조사구

- 당진조사구는 대부분 농경지로 이루어져 있고 일부만 산림 지역임. 당진 화력발전소 인근 지역에 설치된 카메라는 총 3대로 (CD01, CD02, CD03) 각 카메라별 운용일수는 366일, 452일, 185일임.
- 당진 화력발전소 인근 지역 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 고라니(124.98), 청설모(14.43), 살(13.96)이 높게 나타났고, 멧돼지(0.66), 오소리(4.85), 너구리(12.52)는 낮게 나타남. (그림 4.29)
 - 멸종위기야생생물 II 급 살이 관찰된 지점은 CD02(0.44), CD03(13.51)으로 포유류 종 내 지점간 비교 분석 결과에 따라 CD03 지점에서 살이 상대적으로 높은 상대풍부도 지수를 나타냄. (그림 4.29)

- 지역별 종별 상대적 상대풍부도 지수(RAI)는 당진 조사구에서 가장 높은 풍부도를 보이는 고라니(124.98)의 경우, 4개 지역 중 태안 조사구(146.99) 다음으로 높은 풍부도를 보였음. (그림 4.29)
- 멸종위기야생생물Ⅱ급 삶은 태안 조사구(22.27) 다음으로 당진 조사구가 높은 풍부도 지수를 나타냈는데, 대조구인 서천(희리산) 지역에서 출현한 삶의 상대 풍부도(1.56)와 비교 시 약 8.9배 높게 나타남. (그림 4.29)

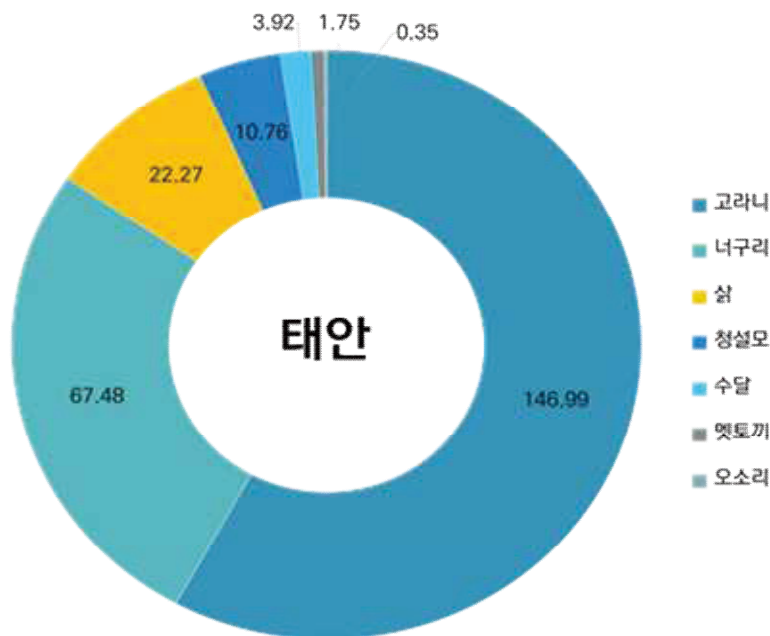


[그림 4.29] 당진 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)

나. 태안조사구

- 태안조사구는 화력발전소와 인접해있으며, 서식지는 좁고 차량의 이동량이 많은 지역으로 설치된 카메라는 총 3대(CT01, CT02, CT03) 각 카메라별 운용일수는 285일, 171일, 51일임.
- 태안 화력발전소 인근 지역 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 고라니(146.99), 너구리(67.48), 삶(22.27) 순으로 높게 나타났고, 상대적으로 오소리(0.35), 멧토끼(1.75), 수달(3.92)은 풍부도가 낮게 나타남. (그림 4.30)
- 멸종위기야생생물Ⅰ급 수달이 관찰된 지점 CT03(3.92)은 상대적으로 낮은 상대풍부도 지수(RAI)를 나타냄. (그림 4.30)

- 지역별 종별 상대적 상대풍부도 지수(RAI)는 태안 조사구에서 가장 높은 풍부도를 보이는 고라니(146.99)의 경우, 4개 지역 중 가장 높은 풍부도를 보였음. (그림 4.32)
- 멸종위기야생생물 I 급 수달은 보령 조사구(30.58) 다음으로 태안 조사구가 높은 풍부도 지수를 나타내었고, 대조구인 서산(팔봉산)지역과 서천(희리산) 지역에서는 출현하지 않았음. (그림 4.30)
- 멸종위기야생생물 II 급 삵은 태안 조사구에서 가장 높은 풍부도 지수(22.27)를 나타냈는데, 대조구인 서천(희리산) 지역에서 출현한 삵의 상대 풍부도(1.56)와 비교시 약 14.3배 높게 나타남. (그림 4.30)

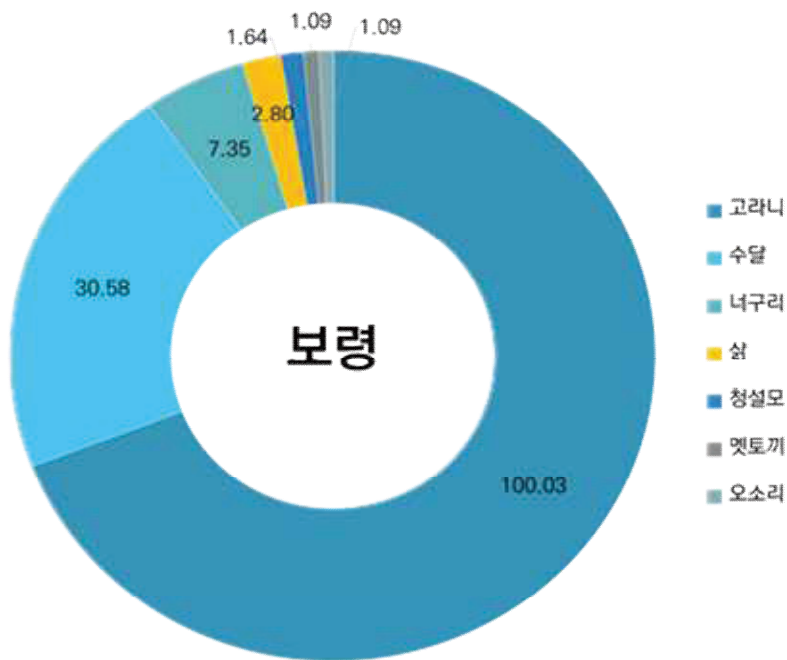


[그림 4.30] 태안 조사구 지역별-종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)

다. 보령조사구

- 보령조사구는 주변에 민가가 있고 관목이 발달해 있는 산림 지역으로 인근 지역에 총 3대 (CB01, CB02, CB03) 카메라를 설치하고 각각 183일, 22일, 250일 운용하여 포유류의 분포를 확인함.
- 보령 화력발전소 인근 지역 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 고라니(100.03), 수달(30.58), 너구리(7.35) 순으로 높게 나타났고, 오소리(1.09), 멧토끼(1.09), 청설모(1.64)는 상대적으로 낮게 나타남. (그림 4.31)

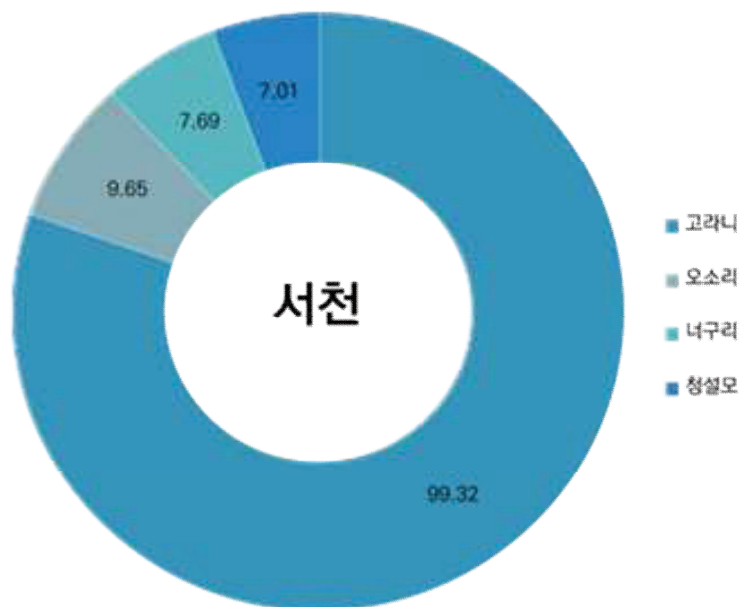
- 멸종위기야생생물 I 급 수달이 관찰된 지점은 보령 CB02(18.18), CB03(12.40)으로 CB02 지점에서 수달이 상대적으로 높은 상대풍부도 지수(RAI)를 나타냄. (그림 4.30)
- 지역별 종별 상대적 상대풍부도 지수(RAI)는 보령 조사구에서 가장 높은 풍부도를 보이는 고라니(100.03)의 경우, 4개 지역 중 태안 조사구(146.99), 당진 조사구(124.98) 다음으로 높은 풍부도를 보였음. (그림 4.31)
- 멸종위기야생생물 I 급 수달은 보령조사구가 4개 지역 중 가장 높은 풍부도(30.58)를 나타내었고, 멸종위기야생생물 II 급 삼의 상대풍부도 지수는 2.80으로 태안 조사구(22.27), 당진 조사구(13.96)과 비교 시 낮은 풍부도를 보였지만, 대조구인 서천(희리산) 지역에서 출현한 삼의 상대 풍부도(1.56)와 비교 시 약 1.8배 높게 나타남. (그림 4.31)



[그림 4.31] 보령 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)

라. 서천조사구

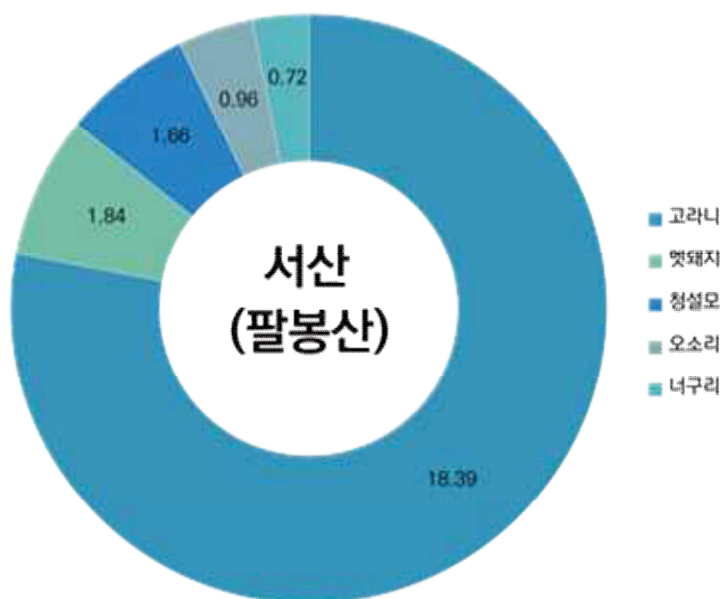
- 서천 화력발전소 조사지는 인근에 민가가 밀집해 있고 화력발전소 도로가 발달되어 있는 지역으로 설치된 카메라는 CSC01, CSC02, CSC05 총 3대로 각 카메라별 운용일수는 452일, 277일, 37일임.
 - － 서천 화력발전소 인근 지역 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 고라니(99.32)가 가장 높게 나타났고, 오소리(9.65), 너구리(7.69), 청설모(7.01) 순으로 다른 지역에 비해 야생동물 간의 출현 편차가 매우 크게 나타났음. (그림 4.32)
- 지역별 종별 상대적 상대풍부도 지수(RAI)는 서천 조사구에서 가장 높은 풍부도를 보이는 고라니(99.32)의 경우, 4개 지역 중 가장 낮은 풍부도를 보였으나, 2개 대조구에서 출현한 고라니의 평균 상대풍부도 지수(13.89)와 비교시 약 7.2배 높은 풍부도를 나타냄. (그림 4.32)
 - － 서천조사구는 당진·태안보령과 같이 멸종위기야생동물인 삵, 수달은 본 연구기간 동안 관찰되지 않았음.



[그림 4.32] 서천 조사구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)

마. 서산대조구

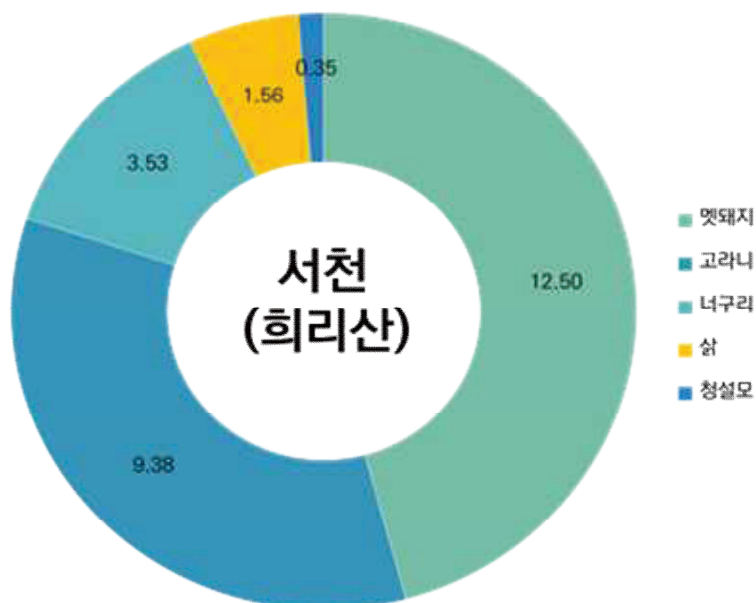
- 서산(팔봉산) 대조구 지역은 서산시 대표 관광지로 주변의 민가와 등산객 이용량이 많은 지역으로 설치된 카메라는 CSC01, CSC02 총 2대로 각 카메라별 운용일수는 415일, 439일임.
- 서산(팔봉산) 대조구 지역 평균 상대풍부도 지수(RAI)는 11.78로, 4개 조사구의 평균 RAI인 66.07 대비 약 5.6배 낮은 것으로 확인됨(그림 4.33)
 - 캐나다 국립공원 내 늑대의 경우, 인간의 활동이 적은 탐방로를 선호하는 것으로 보고되었고(James et al., 2011; Thunber et al., 1994), 스코틀랜드 붉은 사슴 또한 탐방로 이용자가 많아지면 탐방로에서 더 멀리 이동하는 것으로 보고됨.(Angela et al., 2011)
 - 국내의 경우, 설악산국립공원 내 등산객 이용량 증가에 따라 산양의 서식지가 축소되었으며(서창완 외, 2008), 등산객이 야생동물에게 미치는 영향연구에 따르면 등산객이 이용하는 능선이 포유류의 행동권과 중첩되어 기존 서식지를 떠난다고 알려짐. (이화진 외, 2019)
- 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 고라니(18.39)가 가장 높은 수치를 보였으며, 멧돼지(1.84), 청설모(1.66), 오소리(0.96), 너구리(0.72) 순으로 나타남. (그림 4.33)
 - 지역별 종별 상대적 상대풍부도 지수(RAI)는 서산 대조구에서 가장 높은 풍부도를 보이는 고라니(18.39)의 경우, 4개 조사구 지역에서 출현한 고라니 평균 상대풍부도 지수(117.83)와 비교 시 약 6.4배 낮은 풍부도를 보였음. (그림 4.33)



[그림 4.33] 서산 대조구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)

바. 서천대조구

- 서천(희리산) 대조구 지역은 넓은 산림을 가지고 있으나 팔봉산과 마찬가지로 서천 대표 관광지로 희리산 내 자연휴양림을 운영하고 있어 등산객 및 관광객 출입이 많고, 주위에 등산로가 잘 발달해 있음.
- 서천(희리산) 대조구 지역에 설치된 카메라는 CSC03, CSC04 총 2대로 각 카메라별 운용 일수는 283일, 64일임.
- 서천(희리산) 대조구 지역 평균 상대풍부도 지수(RAI)는 13.66으로, 4개 조사구의 평균 RAI인 66.07 대비 약 4.8배 낮은 것으로 확인됨. (그림 4.34)
 - 종별 상대풍부도 지수(RAI)는 멧돼지(12.50)가 가장 높았으며, 고라니(9.38), 너구리(3.53), 삥(1.56), 청설모(0.35) 순으로 나타남. (그림 4.34)
 - 멸종위기야생생물Ⅱ급 삥이 관찰된 지점은 CSC04(1.56)으로 4개 조사구에서 출현한 삥의 평균 RAI(13.01)와 비교했을 때, 약 8.3배 낮은 상대풍부도 지수를 나타냄. (그림 4.34)
- 지역별 종별 상대적 상대풍부도 지수(RAI)는 서천 대조구에서 가장 높은 풍부도를 보이는 멧돼지(12.50)의 경우, 당진 조사구에서 출현한 멧돼지 평균 상대풍부도(0.66)와 비교 시 약 18.9배 높은 풍부도를 보임. (그림 4.34)
 - 멸종위기야생생물Ⅱ급 삥의 상대풍부도 지수는 1.56으로 4개 조사구에서 출현한 삥의 평균 상대풍부도(13.01)와 비교 시 약 8.3배 낮게 나타남. (그림 4.34)



[그림 4.34] 서천 대조구 지역별·종별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)

4.4. 조사구-대조구 연차별 비교

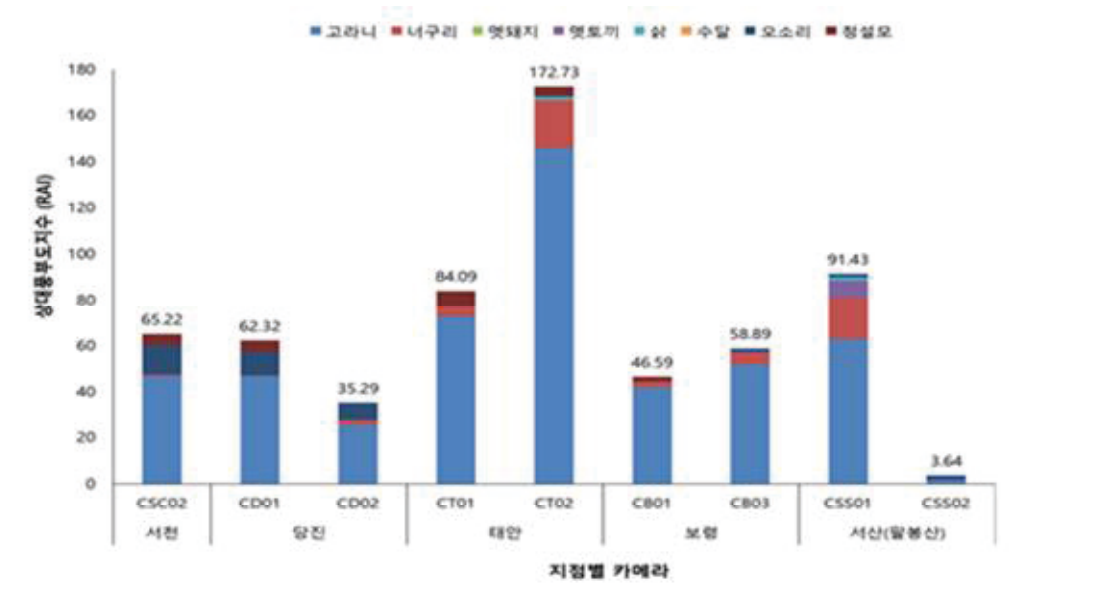
- 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구용역 2차년도(2019년), 3차년도(2020년), 4차년도(2021년) 생태모니터링 결과를 비교하기 위해 각 지역별 포유류 조사결과를 분석한 결과 총 6목 10과 12종이 확인됨. (표 4.22)
- 당진은 2차년도 4목 6과 8종(땃쥐, 족제비, 오소리, 수달, 너구리, 고라니, 청설모, 등줄쥐), 3차년도 4목 7과 9종(두더지, 족제비, 오소리, 수달, 너구리, 산, 고라니, 청설모, 등줄쥐), 4차년도 4목 8과 8종(땃쥐, 오소리, 너구리, 산, 고라니, 멧돼지, 청설모, 등줄쥐)을 확인함. (표 4.22)
 - 3년 동안 지속적으로 조사된 종은 오소리, 너구리, 고라니, 청설모, 등줄쥐로 멧돼지의 경우 당진 지역에서 3차년도에 최초로 발견되어 향후 지속적인 출현 여부를 확인해 볼 필요성이 있음.
- 태안은 2차년도 5목 6과 6종(오소리, 너구리, 고라니, 멧토끼, 청설모, 등줄쥐), 3차년도 5목 6과 7종(두더지, 오소리, 너구리, 고라니, 멧토끼, 청설모, 등줄쥐), 4차년도 4목 5과 7종(오소리, 수달, 너구리, 산, 고라니, 멧토끼, 청설모)이 확인됨. (표 4.22)
 - 3년 동안 지속적으로 조사된 종은 오소리, 너구리, 고라니, 멧토끼, 청설모이고, 멸종위기야생생물 I 급인 수달과 II 급인 산이 2021년도에 처음 발견되어 서식지 보호 및 관리가 필요할 것으로 확인됨.
- 보령은 2차년도와 3차년도에 5목 7과 8종(두더지, 오소리, 수달, 너구리, 산, 고라니, 멧토끼, 청설모), 4차년도에 4목 6과 7종(두오소리, 수달, 너구리, 산, 고라니, 멧토끼, 청설모)을 확인함. (표 4.22)
 - 3년 동안 7종이 지속적으로 조사되어 종 다양성이 높은 지역으로 멸종위기야생생물 II 급인 산의 경우, 보령 지역에서 3년간 연속 출현하였음. (표 4.22)
- 서천은 2차년도 3목 5과 7종(족제비, 오소리, 너구리, 산, 고라니, 청설모, 등줄쥐), 3차년도 4목 7과 7종(두더지, 오소리, 너구리, 산, 고라니, 멧돼지, 청설모), 4차년도 3목 5과 5종(오소리, 수달, 너구리, 고라니, 청설모)이 확인됨. (표 4.22)

- 오소리, 너구리, 고라니, 청설모가 3년간 지속적으로 출현하였고, 수달의 경우 서천 지역에서 최초로 발견되어 지속적인 출현 여부를 확인해 볼 필요가 있음.
- 서산(팔봉산) 대조구 지역에서는 2차년도 4목 8과 8종(두더지, 오소리, 너구리, 산, 고라니, 멧돼지, 청설모, 등줄쥐), 3차년도 4목 7과 7종(두더지, 오소리, 너구리, 산, 고라니, 멧돼지, 청설모), 4차년도 3목 6과 6종(오소리, 너구리, 고라니, 멧돼지, 청설모, 등줄쥐)을 확인함. (표 4.22)
 - 오소리, 너구리, 고라니, 멧돼지, 청설모가 3년간 지속적으로 출현하였으나, 3년간 출현 종수가 8종에서 6종으로 단계적으로 감소한 것으로 보아 등산객 등으로 인한 산림 훼손 및 야생동물 서식지가 일부 영향을 받은 것으로 판단되면 추가적인 야생동물 서식 환경을 방해하는 요인이 있는지 확인이 필요할 것으로 판단됨.
- 서천(희리산) 대조구 지역은 3차년도부터 조사가 시행되어 모니터링 결과가 2010~2021년까지이며, 3차년도 3목 5종 6과(두더지, 오소리, 수달, 산, 고라니, 멧돼지), 4차년도 3목 5과 5종(너구리, 산, 고라니, 멧돼지, 청설모)이 확인되었고 지속적으로 조사된 종은 산, 고라니, 멧돼지임. (표 4.22)
- 2021년 조사에서 멸종위기야생생물 I급인 수달이 당진과 서천 희리산에서, 멸종위기야생생물 II급인 산는 서천, 서산에서 확인되지 않았음. 멸종위기 야생생물은 개체수가 적고 환경변화에 민감하기 때문에 장기간에 걸친 모니터링을 통해 서식실태 파악이 필요하며, 개체수 보호를 위해 서식지 보전, 개체 방사 등 복원계획 수립이 수반되어야 할 것으로 판단됨.

[표 4.22] 1, 2, 3년차 각 지역별 포유류 조사 결과

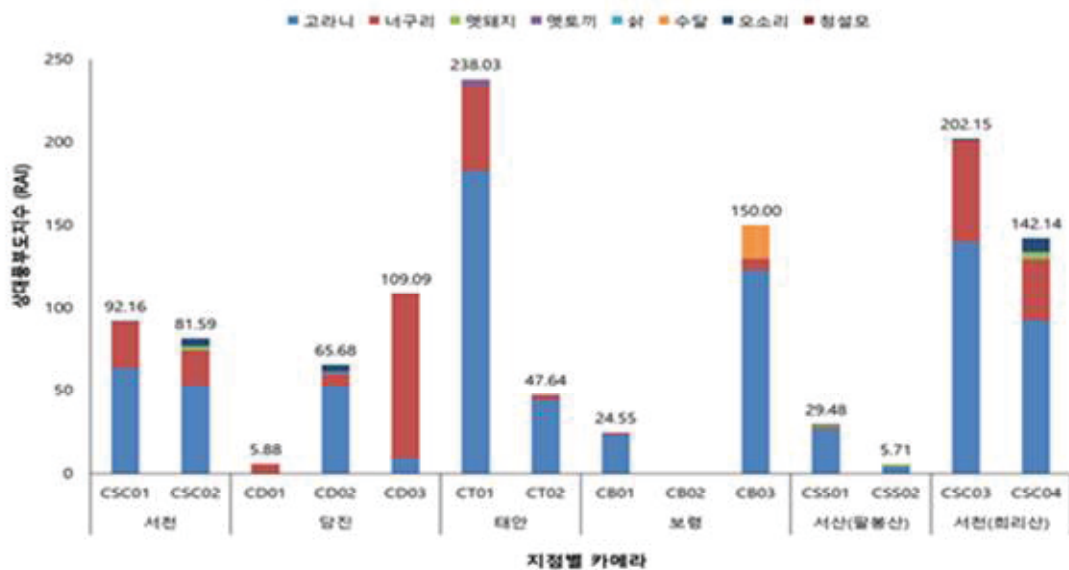
목 (Order)	과 (Family)	종 (Species)	조 사 지 역																	
			당진			태안			보령			서천			서산 (대조구)			희리산 (대조구)		
			1년	2년	3년	1년	2년	3년	1년	2년	3년	1년	2년	3년	1년	2년	3년	-	2년	3년
식충목	두더지과	두더지	×	○	×	×	○	×	○	○	×	×	○	×	○	○	×		○	×
침서목	침서과	땃쥐	○	×	○															
		족제비	○	○	×							○	×	×						
	족제비과	오소리	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	×
식육목		수달	○	○	×			○	○	○	○			○					○	×
	개과	너구리	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○
	고양이과	살	×	○	○			○	○	○	○	○	○	×	○	○	×		○	○
	사슴과	고라니	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○		○	○
우제목	멧돼지과	멧돼지			○							×	○	×	○	○	○		○	○
토끼목	토끼과	멧토끼				○	○	○	○	○	○									
	청설모과	청설모	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○			○
설치목	쥐과	등줄쥐	○	○	○	○	○	×				○	×	×	○	×	○			
유해야생동물 종 수		2	2			1			1			2			2					
멸종위기 종 수		2	2			2			2			2			1					
지역별 총 종 수			11			9			8			10			8					
총 종 수																				6목 10과 12종

- 2차년도(2019년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI)는 태안CT02(172.73), 서산(팔봉산) CSS01(91.43), 태안 CT01(84.09) 순으로 높게 나타났고,



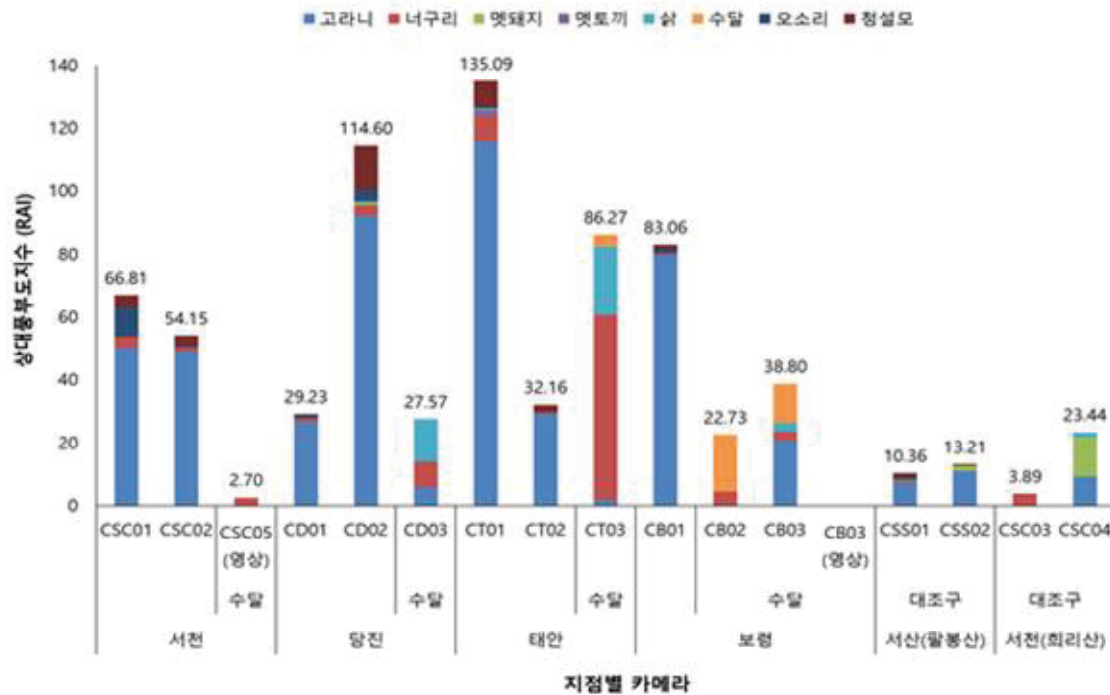
[그림 4.35] 2차년도(2019년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI) 비교

- 3차년도(2020년)에는 태안 CT01(238.03), 서천 희리산 CSC03(202.15), 서천 희리산 CSC04(142.14) 순으로 높게 나타났음.



[그림 4.36] 3차년도(2020년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI) 비교

- 4차년도(2021년)에는 태안 CT01(135.09), 당진 CD02(114.60), 태안 CT03(86.27) 순으로 상대풍부도 지수가 높게 산출됨.



[그림 4.37] 4차년도(2021년) 지점별 야생동물 상대풍부도 지수(RAI) 비교

- 2~4차년도 전체적으로 태안 조사구가 (2차년도-CT02 172.73, 3차년도-CT01 238.03, 4차년도-CT01 135.09) 상대풍부도 지수(RAI)가 높은 것으로 나타났는데
 - 태안 조사구와 태안해안국립공원은 약 1.8km 근거리에 산림으로 직접 연결되어 있어 국립공원의 풍부한 생물상의 영향을 받아 상대풍부도 지수가 높게 나타난 것으로 판단됨.
 - 국립공원 내 서식하는 고라니(1.65km²), 너구리(0.732km²), 삥(3.69km²) 등 야생동물의 행동권이 태안 조사구에 포함되어 출현하면서 상대풍부도 지수가 다른 지역에 비해 높은 것으로 분석됨.
 - 향후 태안조사구 지역의 지속적인 상대풍부도 지수를 유지하기 위해 무인센서카메라를 추가 설치하고 주요종에 대해 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 분석되었음.

4.5. 요약 및 소결론

- 2021년 1월부터 2021년 10월까지 총 4회 현지조사(흔적 조사, 무인센서카메라 조사 및 포획 트랩) 통해 조사결과 총 5목 9과 10종이 조사됨. (표 4.19)
 - 지역별로 당진에서 8종, 태안에서 7종, 보령에서 7종, 서천에서 5종이 조사되었고, 대조구인 서산 팔봉산에서 6종, 서천 희리산에서 5종이 조사됨.
- 멸종위기야생생물 I 급이자 천연기념물 제330호인 수달 1종이 서천과 태안·보령화력발전소 주변에서 흔적이 확인되었고, 태안과 보령에서 무인센서카메라에 촬영되어 실체를 확인함. (그림 4.19)
 - 멸종위기야생생물 II 급인 삶은 태안에서 흔적으로 확인되었고, 당진, 태안, 보령 및 서산 희리산에서 무인센서카메라에 촬영됨.
- 그러나, 멸종위기야생생물I급인 수달이 4차년도(2021년) 조사에서 당진과 서천 희리산 지역에서 관찰되지 않았고, 멸종위기야생생물II급인 삶은 서천, 서산 지역에서 관찰되지 않았음.
 - 멸종위기야생생물은 개체수가 적고 환경변화에 민감하기 때문에 장기적인 모니터링을 통해 서식지 확보 및 개체 방사 등 중장기적 보전방안 수립이 필요성을 확인함.
- 유해야생동물은 고라니와 멧돼지가 조사되었는데, 고라니의 경우 전 지점 센서카메라로 촬영되었고 멧돼지는 당진화력발전소 주변과 대조구인 서산 팔봉산과 서천 희리산에서 촬영되었음.
 - 조사구와 대조구에서 가장 높게 조사된 고라니의 상대풍부도 지수(RAI)를 비교한 결과 화력발전소 주변지역이 471.32로 대조구 주변지역(27.77)보다 17.0배 높은 상대 풍부도를 나타냄.
- 환경부 전국자연환경조사 보고서에 의하면, 당진 14종, 태안 12종, 보령 16종, 서천 10종, 서산 15종 등이 보고되었으나, 본 연구조사를 통해 당진에서 등줄쥐·오소리, 태안에서 오소리·수달, 보령 오소리, 서천 오소리·수달을 문헌조사에서 확인되지 않은 종을 추가로 확인하였음.

- 문헌조사 및 본 연구용역의 생태조사를 통해 화력발전소의 대기오염물질 영향을 분석하고자 하였으나, 문헌조사에서 조사된 포유류의 종수가 적고, 풍부도 조사가 이뤄지지 않아 화력발전소 영향 여부의 판단기준으로 활용되기에는 정확도가 부족하였음.
 - 문헌 및 본 연구 모두 단기 연구에 해당되어 화력발전소에서 배출되는 대기오염물질의 영향을 보다 명확하게 분석하기 위해서는 장기적 모니터링이 필요한 것으로 분석됨.
- 종별 상대풍부도 지수(RAI) 비교 결과 화력발전소 주변지역이 대조구 보다 야생 포유동물 상대 풍부도 지수가 높은 것으로 나타났음.
- 이는 서산 팔봉산, 서천 희리산 대조구 선정 당시 화력발전소의 영향정도 만을 중심으로 고려하여 선정하였고, 탐방객의 방문 증가가 야생동물출현에 부정적 영향을 미침에도 탐방객의 산림 훼손 여부는 고려되지 않았기 때문인 것으로 판단되며,
 - 그 결과 상대적으로 등산로가 없고, 방문객이 거의 없는 조사구의 종별 상대풍부도 지수가(RAI)가 대조구에 비하여 더 높은 것으로 확인됨.

5. 어류분야

5.1. 조사 시기 및 조사 방법

가. 조사시기

- 충남 화력발전소 주변하천의 어류 조사는 2021년 2월부터 2021년 7월까지 총 3회에 걸쳐 실시하였음.

[표 4.23] 충남 화력발전소 주변지역의 어류 조사 시기

차수	조사시기	조사일수	조사장소(세부지점 3장 자료 참조)
1차 조사	2021년 2월 19일~2021년 2월 20일	2	당진 석문면, 태안 원북면, 보령 오천면, 서천 서면
2차 조사	2021년 4월 17일~2021년 4월 18일	2	"
3차 조사	2021년 7월 28일~2021년 7월 29일	2	"

나. 조사 방법

- 어류조사 : 3차년도에 조사방법(3차년도 보고서 499쪽)과 동일하게 족대, 투망 등을 사용하여 조사 진행함.
- 군집분석 : 3차년도에 조사방법(3차년도 보고서 500~502쪽)과 동일하게 각 조사지점에 대하여 우점도, 종다양도, 종풍부도, 균등도를 산출함(Simpson 1949; Shannon and Weaver 1963; Pielou 1969)
- 어류에 의한 건강성 평가 모델 및 메트릭 분석(FAI) : ‘메트릭 1~8’ 로 구분하고 각 부문별 어류의 종수 및 개체수 비율을 확인함.

다. 메트릭 산정방법

① 메트릭 1(M1) : 국내 종의 총 종수

- 채집된 어류 중에서 외래도입 어종을 제외한 국내 종의 총 종수에 대한 메트릭으로 하천차수에 영향을 받으며, 수질오염 및 서식지 교란 등의 환경이 불량한 지역에서는 수가 감소하는 특성을 반영한 메트릭

② 메트릭 2(M2) : 여울성 저서종수

- 유속감소 및 하상 유기물 축적에 따라 종수가 감소되는 특성을 반영한 여울성 저서어 종 수에 대한 메트릭

③ 메트릭 3(M3) : 민감종수

- 높은 부유물질로 인한 서식지의 하상구조 변경, 수질 저하 및 독성 물질 등으로 인해 종의 감소가 기대되는 특성을 반영한 민감종 수에 대한 메트릭

④ 메트릭 4(M4) : 내성종의 개체수 비율

- 잉어(*Cyprinus carpio*), 붕어(*Carassius auratus*) 등과 같이 수질오염에 상대풍부도가 증가하는 내성종 특성을 반영한 내성종의 개체수 비율에 대한 메트릭

⑤ 메트릭 5(M5) : 잡식종(Omnivores)의 개체수 비율

- 서식지의 물리·화학적 질적 하강에 따라 풍부도가 증가하는 잡식종의 개체수 비율에 대한 메트릭

⑥ 메트릭 6(M6) : 국내종의 충식종(Insectivores)의 개체수 비율

- 수중 무척추동물을 섭식하며 서식지의 물리·화학적 질적 하강에 따라 풍부도가 감소하는 국내종의 충식종 개체수 비율에 대한 메트릭으로 충식종의 개체수(잡종과 외래도입종을 제외)를 총 개체수(외래도입종을 포함한 채집된 전체 개체수)로 나누어준 메트릭

⑦ 메트릭 7(M7) : 채집된 국내종의 총 개체수

- 채집된 국내종의 총 개체수에 대한 메트릭으로 잡종과 외래도입종을 포함하지 않으며, 개체군의 풍부도를 평가하는 항목으로 채집된 어류의 개체수를 과거의 어류상 조사 결과를 기초로 최대종풍부도선(maximum species richness line)을 이용하여 산정한 메트릭임.

⑧ 메트릭 8(M8): 비정상중(Anormalities)의 개체수 비율

- 어류의 외형적 건강상태를 대표하는 항목으로 기형(deformity), 지느러미의 손상(erosion), 피부손상(lesions) 및 종양(tumors)의 4 부류로 구분된 비정상종의 개체수 비율에 대한 메트릭임.

라. 메트릭 평가방법

① 메트릭 산정법

- 우리나라 하천차수(규모)에 따라 달라지는 메트릭은 M1, M2, M3, M7로써 (표 4.24)에 의거하여 산정하고 나머지 메트릭(M4, M5, M6, M8)은 상대 비율에 의거하여 산정함.

② 모델값 산정법

- 각 등급에 대한 점수는 계급구간을 0, 6.25, 12.5로 구분하여, 8개 메트릭이 모두 최고 점수인 12.5점을 획득할 경우, 메트릭의 최대 가능 점수는 $8 \times 12.5 = 100$ 점이고, 최소 가능 점수는 $8 \times 0 = 0$ 점임. 어류가 전혀 채집되지 않을 경우에는 최소 가능 점수인 0점을 부여함.

③ 최종등급 평가법

- 어류평가지수는 매우 좋음(75~100, Excellent, A), 좋음(60~75, Good, B), 보통(35~60, Fair, C), 나쁨(15~35, Poor, D) 매우 나쁨(0~15, E)의 5등급으로 구분함. (표 4.24)

[표 4.24] 어류를 이용한 건강성 평가 메트릭 구간 설정

	하천차수	메트릭값				하천차수	메트릭값		
		0	6.25	12.5			0	6.25	12.5
총 국내종수 (M1)	1	0 ~ 1	2	> 2	민감종수 (M3)	1	0	1 ~ 2	> 2
	2	0 ~ 2	3 ~ 5	> 5		2	0	1 ~ 3	> 3
	3	0 ~ 4	5 ~ 8	> 8		3	1	2 ~ 4	> 4
	4	0 ~ 5	6 ~ 11	> 11		4	1	2 ~ 4	> 4
	5	0 ~ 7	8 ~ 14	> 14		5	1	2 ~ 4	> 4
	6	0 ~ 9	10 ~ 18	> 18		6	0	1 ~ 3	> 3
	7	0 ~ 11	12 ~ 22	> 22		7	0	1 ~ 2	> 2

	하천차수	메트릭값				하천차수	메트릭값		
		0	6.25	12.5			0	6.25	12.5
여울성 저서종수 (M2)	1	0	1	> 1	채집된 국내종의 총 개체수 (M7)	1	0 ~ 10	11 ~ 20	> 20
	2	0	1 ~ 2	> 2		2	0 ~ 30	31 ~ 55	> 55
	3	0	1 ~ 2	> 2		3	0 ~ 50	51 ~ 90	> 90
	4	1	2 ~ 3	> 3		4	0 ~ 60	61 ~ 115	> 115
	5	0	1 ~ 2	> 2		5	0 ~ 80	81 ~ 160	> 160
	6	0	1 ~ 2	> 2		6	0 ~ 100	101 ~ 200	> 200
	7	0	1	> 1		7	0 ~ 120	121 ~ 240	> 240

내성종의 개체수 비율 (M4)	메트릭값			국내종의 총식종 개체수 비율 (M6)	메트릭값		
	0	6.25	12.5		0	6.25	12.5
	> 70	70 ~ 30	< 30		< 20	20 ~ 45	> 45

잡식종의 개체수 비율 (M5)	메트릭값			비정상종의 개체수 비율 (M8)	메트릭값		
	0	6.25	12.5		0	6.25	12.5
	> 70	70 ~ 30	< 30		> 1	0 ~ 1	0

[표 4.25] 어류를 이용한 건강성 등급

등급구분	환경상태	어류평가지수 (FAI)	지표생물군
A	매우 좋음	$80 \leq \sim \leq 100$	금강모치, 독종개, 미유기, 버들치, 산천어, 새미, 열목어, 참갈겨니
B	좋음	$60 \leq \sim < 80$	갈겨니, 감돌고기, 꺾저기, 꺾지, 꾸구리, 남방종개, 눈동자개, 대륙종개, 돌고기, 돌마자, 돌상어, 배가사리, 새코미꾸리, 수수미꾸리, 쉬리, 왕종개, 자가사리, 통가리, 통사리
C	보통	$40 \leq \sim < 60$	각시붕어, 강준치, 기름종개, 긴물개, 납자루, 대농갱이, 동사리, 모래무지, 밀어, 쏘가리, 얼룩동사리, 점줄종개, 줄납자루, 줄종개, 참마자, 참종개, 참중고기, 피라미
D	나쁨	$20 \leq \sim < 40$	가물치, 가숭어, 꼬리, 누치, 눈불개, 메기, 물개, 미꾸라지, 민물검정망둑, 살치, 치리, 왜물개, 웅어, 풀망둑
E	매우 나쁨	$0 \leq \sim < 20$	붕어, 잉어, 참붕어

5.2. 어류분야 조사결과

5.2.1. 당진조사구

가. 어류상 및 어류 군집

○ 당진화력발전소 주변의 어류를 조사한 결과 1차 조사에서는 총 4목 7과 14종 585개체가 출현하였고, 이중 법적보호종이 없었으며, 한국고유종은 얼룩동사리 1종이 나타남. 특히 2021년이 예년에 비해 많은 개체수가 출현하였는데 당진화력발전소 주변 하천의 수로 확장으로 어류들의 활동이 증가됨. (표 4.25).

－ 1차 조사에서는 왜물개가 43.42%로 가장 높았고, 붕어 39.15%, 송사리 11.73%, 미꾸라지 3.08%, 민물두줄망둑 2.74%, 떡붕어 1.88%, 버들붕어 1.03%, 동자개 0.68%, 얼룩동사리와 참붕어 0.51%, 잉어와 흰발망둑 0.34%, 미꾸리와 꺾저구 0.17% 순이었음. (그림 4.42).

- 2차 조사에서는 4목 7과 15종 856개체가 출현하였고 법적보호종은 없었으며, 한국고유종은 쉬리와 얼룩동사리 2종이 출현하고 외래도입종은 블루길(생태계교란어종) 1종이 채집됨. (표 4.26).
 - 비교풍부도는 송사리가 38.67%로 가장 높았으며, 붕어 16.17%, 왜물개 14.14%, 살치 8.29%, 참붕어 6.66%, 미꾸라지 4.44%, 민물검정망둑 3.04%, 잉어 2.10%, 버들붕어 1.99%, 민물두줄망둑 1.52% 얼룩동사리 1.05% 순이었음. (그림 4.42)
 - 작년과 비교하여 종수가 현격히 증가하였는데 이는 수변식물을 제거 수로를 만들어 주었기 때문인 것으로 판단되며 지속적 관리를 위해서는 3~4년에 한번씩 수로를 개통해줄 필요가 있고 폭은 1~3m, 깊이는 0.3~1.0 m 정도로 유지하는 것이 적합하고 공사시기는 어류의 활동성이 적은 겨울이 좋을 것으로 분석됨.
- 3차 조사에서는 3목 7과 16종 624개체가 출현하였고, 법적보호종은 채집되지 않았으며, 한국고유종은 얼룩동사리 1종이 채집되었고, 외래도입종은 블루길과 배스(생태계교란어종) 2종이 확인(표 4.26)되어 예년에 비해서 종수가 증가된 것으로 확인됨.
 - 비교풍부도는 송사리가 34.94%로 가장 높게 나타났고, 붕어 12.82%, 살치 11.86%, 민물두줄망둑 11.54%, 블루길 7.37%, 문절망둑 4.17%, 민물검정망둑 3.53%, 버들붕어배스, 미꾸라지 등 3종이 2.24%, 참붕어 1.92%, 얼룩동사리 1.60%, 떡붕어 1.28% 순이었음. (그림 4.42)
- 1~3차 어류조사를 종합한 결과 당진화력발전소 주변에서는 총 5문 9과 22종 2,418개체로 예년보다 5종이 증가하여 출현하였고, 이중 법적보호종은 출현하지 않았으며, 한국고유종은 얼룩동사리와 쉬리 2종이, 외래도입종은 떡붕어와 블루길, 배스(생태계교란어종) 3종이 채집됨. (표 4.27).
 - 비교풍부도는 송사리가 24.90%로 가장 높게 나타났고, 붕어 23.95%, 왜물개 22.62%, 살치 6.00%, 민물두줄망둑 5.05%, 미꾸라지 3.27%, 참붕어 3.06%, 블루길 1.99%, 버들붕어 1.65%, 민물검정망둑 1.45%, 문절망둑 1.08%, 떡붕어 1.03%, 얼룩동사리 0.99%, 잉어 0.91%, 배스 0.50%, 빙어 0.33% 순으로 나타남. (그림 4.42).
 - 쉬리는 우리나라만 서식하는 고유어종으로 유속이 비교적 빠른 곳과 하상이 돌이나 자갈이 깔린 여울역을 선호하는 어종으로 간척지이면서 평지형 하천에서 출현하는 것은 매우 특이한 사항으로 이에 대한 정밀한 조사가 필요할 것으로 판단됨.

- 어류 조사 결과 법적보호종은 없었고 한국고유종의 비율이 낮았으며, 출현 종의 대부분이 수질오염과 수온에 대한 내성이 강한 어종인 것으로 확인됨.

[표 4.26] 당진조사구 1차 조사 어류상

학명	국명	조사지점			합계	비교풍부도
		1	2	3		
CYPRINIFORMES	잉어목					
CYPRINIDAE	잉어과					
<i>Aphyocypris chinensis</i>	왜물개	176	78		254	43.42
<i>Carassius auratus</i>	붕어	97	131	1	229	39.15
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	9		2	11	1.88
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어			2	2	0.34
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어		3		3	0.51
COBITIDAE	미꾸리과					
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리			1	1	0.17
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	16	2		18	3.08
SILURIFORMES	메기목					
BAGRIDAE	동자개과					
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	동자개		4		4	0.68
BELONIFORMES	동갈치목					
ADRIANICHTHYOIDEAE	송사리과					
<i>Oryzias latipes</i>	송사리		11	24	35	5.98
PERCIFORMES	농어목					
ODONTOBUTIDAE	동사리과					
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리	1	2		3	0.51
GOBIIDAE	망둑어과					
<i>Acanthogobius lactipes</i>	흰발망둑			2	2	0.34
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구			1	1	0.17
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑			16	16	2.74
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과					
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	4	2		6	1.03
목		2	4	3	4	
과		4	6	4	7	
종		6	8	8	14	
개체수		303	233	49	585	

[표 4.27] 당진조사구 2차 조사 어류상

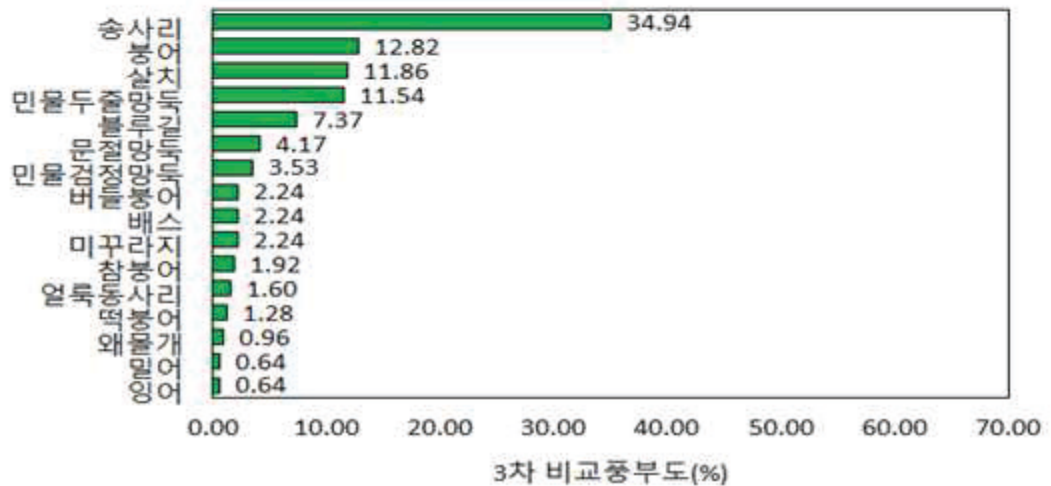
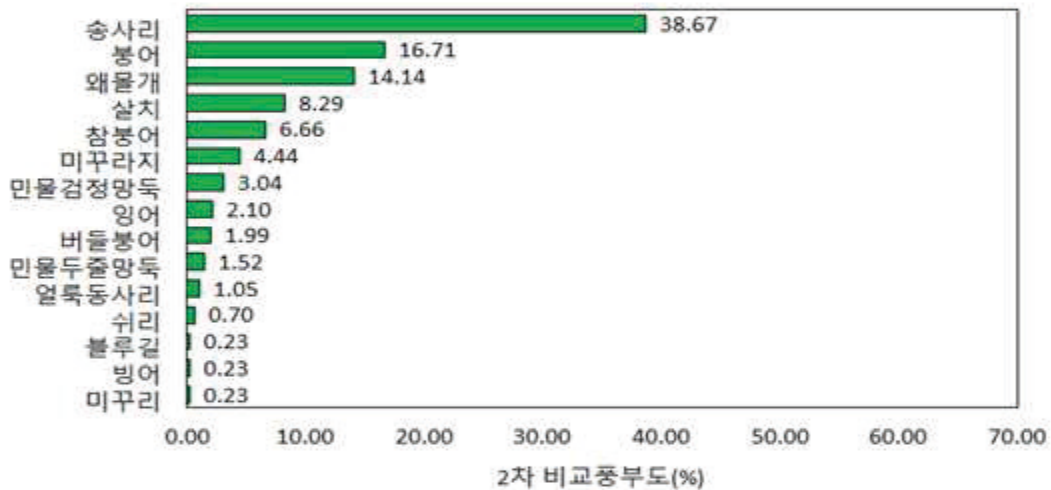
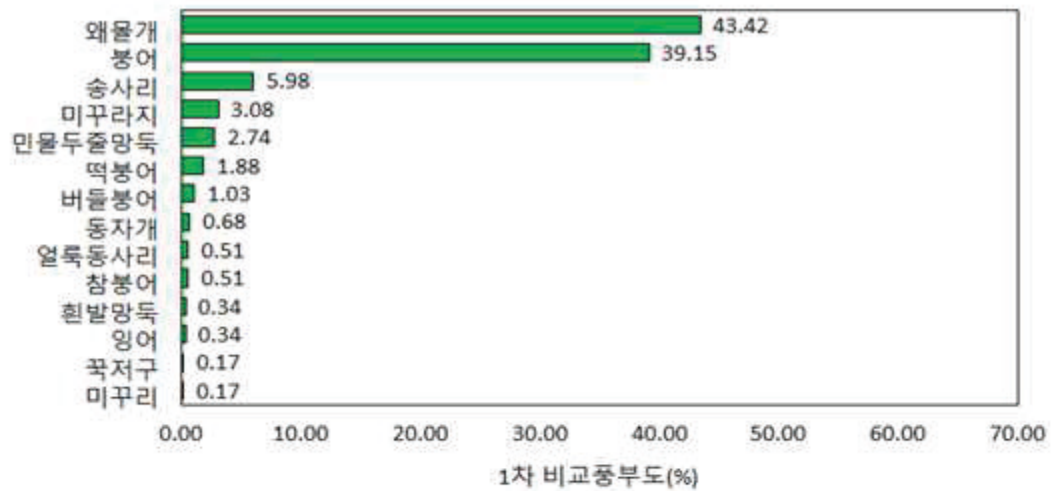
학명	국명	조사지점			합계	비교풍부도
		1	2	3		
CYPRINIFORMES	잉어목					
CYPRINIDAE	잉어과					
<i>Aphyocypris chinensis</i>	왜물개	108	11	2	121	14.14
<i>Carassius auratus</i>	붕어	50	72	21	143	16.71
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	쉬리	6			6	0.70
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		18		18	2.10
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치	10	57	4	71	8.29
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어		57		57	6.66
COBITIDAE	미꾸리과					
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	2			2	0.23
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	32	6		38	4.44
OSMERIFORMES	바다빙어목					
OSMERIDAE	바다빙어과					
<i>Hypomesus nipponensis</i>	빙어	2			2	0.23
BELONIFORMES	동갈치목					
ADRIANICHTHYOIDAE	송사리과					
<i>Oryzias latipes</i>	송사리	4	39	288	331	38.67
PERCIFORMES	농어목					
CENTRACHIDAE	검정우렁과					
<i>Lepomis macrochirus</i>	블루길		2		2	0.23
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리		9		9	1.05
GOBIIDAE	망둑어과					
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		7	6	13	1.52
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑		2	24	26	3.04
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과					
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	12	5		17	1.99
목		3	4	3	4	
과		4	7	3	7	
종		9	12	6	15	
개체수		226	285	345	856	100

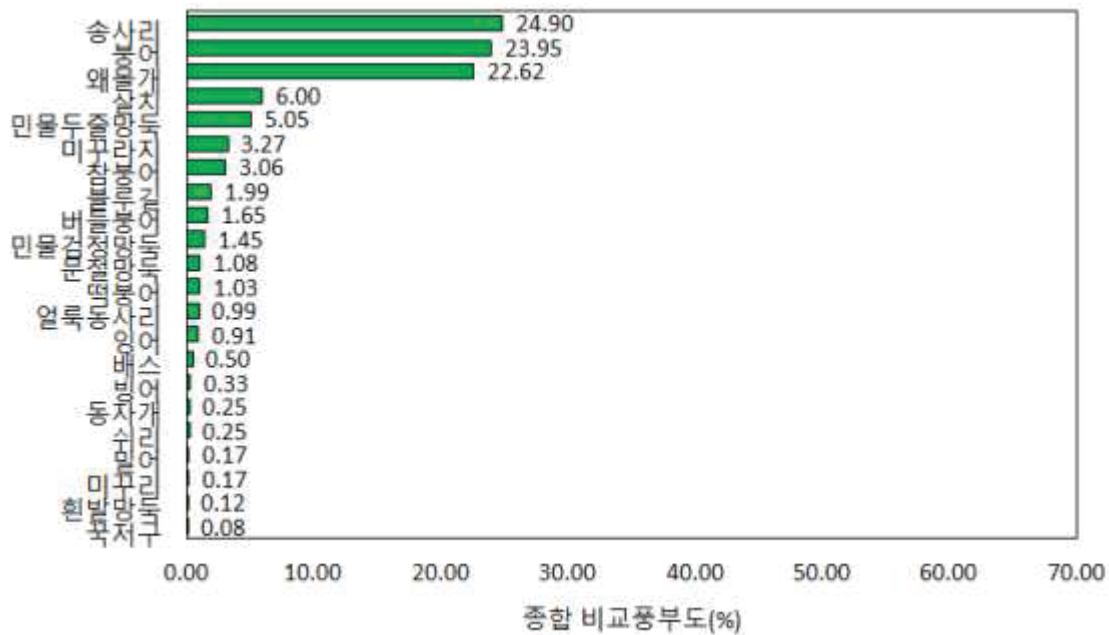
[표 4.28] 당진조사구 3차 조사 어류상

학명	국명	조사지점			합계	비교풍부도
		1	2	3		
CYPRINIFORMES	잉어목					
CYPRINIDAE	잉어과					
<i>Aphyocypris chinensis</i>	왜물개	6			6	0.96
<i>Carassius auratus</i>	붕어	30	26	24	80	12.82
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	2	4	2	8	1.28
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		2	2	4	0.64
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치		10	64	74	11.86
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	6	6		12	1.92
COBITIDAE	미꾸리과					
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	12	2		14	2.24
BELONIFORMES	동갈치목					
ADRIANICHTHYOIDAE	송사리과					
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	74	86	58	218	34.94
PERCIFORMES	농어목					
CENTRACHIDAE	검정우럭과					
<i>Lepomis macrochirus</i>	블루길		46		46	7.37
<i>Micropterus salmoides</i>	배스			14	14	2.24
ODONTOBUTIDAE	동사리과					
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리		10		10	1.60
GOBIIDAE	망둑어과					
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	문절망둑		4	22	26	4.17
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어	4			4	0.64
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		30	42	72	11.54
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	4	4	14	22	3.53
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과					
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	10	4		14	2.24
목		3	3	3	3	
과		5	7	3	7	
종		11	15	9	16	
개체수		148	244	242	624	

[표 4.29] 당진조사구 1~3차 조사 어류상 종합

학명	국명	조사지점			합계	비교풍부도
		1	2	3		
CYPRINIFORMES	잉어목					
CYPRINIDAE	잉어과					
<i>Aphyocypris chinensis</i>	왜몰개	393	152	2	547	22.62
<i>Carassius auratus</i>	붕어	236	298	45	579	23.95
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	16	4	5	25	1.03
<i>Coreoleuciscus splendidus</i>	쉬리	6			6	0.25
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		20	2	22	0.91
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치	10	67	68	145	6.00
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	6	68		74	3.06
COBITIDAE	미꾸리과					
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	2		2	4	0.17
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	68	11		79	3.27
SILURIFORMES	메기목					
BAGRIDAE	동자개과					
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	동자개		6		6	0.25
OSMERIFORMES	바다빙어목					
OSMERIDAE	바다빙어과					
<i>Hypomesus nipponensis</i>	빙어		8		8	0.33
BELONIFORMES	동갈치목					
ADRIANICHTHYOIDEAE	송사리과					
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	78	142	382	602	24.90
PERCIFORMES	농어목					
CENTRACHIDAE	검정우럭과					
<i>Lepomis macrochirus</i>	블루길		48		48	1.99
<i>Micropterus salmoides</i>	배스			12	12	0.50
ODONTOBUTIDAE	동사리과					
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리	2	22		24	0.99
GOBIIDAE	망둑어과					
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	문절망둑		4	22	26	1.08
<i>Acanthogobius lactipes</i>	흰발망둑			3	3	0.12
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구			2	2	0.08
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어	4			4	0.17
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		32	90	122	5.05
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	4	11	20	35	1.45
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과					
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	28	12		40	1.65
목		3	5	3	5	
과		6	9	5	9	
종		13	16	13	22	
개체수		856	910	655	2418	





[그림 4.38] 당진조사구 차수별 출현 어종 비교풍부도

나. 군집분석

○ 당진조사구 어류 군집분석 1차 조사에서는

- 다양도 지점 3에서 1.35로 가장 높게, 지점 1에서 1.02로 가장 낮게 나타났고, 균등도는 지점 3에서 0.65로 가장 높게, 지점 2에서 0.52로 가장 낮게 나타남.
- 종풍부도는 지점 3에서 1.80으로 가장 높게, 지점 1에서 0.88로 가장 낮았음. 우점도는 지점 1과 2에서 0.90으로 가장 높게, 지점 3에서 0.82로 가장 낮았음.
- 우점종과 아우점종은 지점 1과 2에서 붕어와 왜몰개가 번갈아 나타났고, 지점 2에서는 송사리와 민물두줄망둑으로 확인됨.

○ 2차 조사에서는 다양도는 지점 1에서 1.15, 지점 2에서 0.57로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.76, 지점 2에서 0.78로, 종풍부도는 지점 1에서 1.16, 지점 2에서 0.74로 나타남.

- 우점도는 지점 1에서 0.96, 지점 2에서 0.62로 비교적 높게 나타났고 우점종은 지점 1과 2에서 모두 붕어로, 아우점종은 지점 1에서 떡붕어, 지점 2에서는 왜몰개로 나타남.

- 3차 조사에서는 다양도는 지점 1에서 1.58, 지점 2에서는 1.51로 비교적 높게 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.76, 지점 2에서 0.65로 출현 어류의 개체수가 비교적 고르게 출현함.
 - 종풍부도는 지점 1에서 1.72, 지점 2에서 1.64로 나타났고, 우점도는 지점 1에서 0.62, 지점 2에서 0.69로 확인되었으며, 우점종은 지점 1과 2에서 붕어로, 아우점종은 지점 1과 2에서 모두 살치로 나타남.
- 어류 군집분석을 종합해 보면, 다양도는 지점 2에서 2.08로 가장 높았고, 지점 3에서 1.43으로 가장 낮게 나타남.
 - 균등도는 지점2에서 0.75, 지점 3에서 0.56이었으며, 종풍부도는 지점 2에서 2.20, 지점 1에서 1.78임.
 - 우점도는 지점 1에서 0.74, 지점 2에서 0.50으로 나타났고, 우점종은 지점 1과 2에서 붕어와 왜물개가 번갈아 가며 관찰되었고 지점 3에서는 우점종은 송사리, 아우점종은 민물두줄망둑으로 확인됨.

[표 4.30] 당진조사구 어류 군집지수

조사차수	지점	다양도	균등도	종풍부도	우점도	우점종	아우점종
1차조사	St.1	1.02	0.57	0.88	0.90	왜물개	붕어
	St.2	1.08	0.52	1.28	0.90	붕어	왜물개
	St.3	1.35	0.65	0.90	0.82	송사리	민물두줄망둑
2차조사	St.1	1.51	0.69	1.48	0.70	왜물개	붕어
	St.2	1.99	0.80	1.95	0.45	붕어	살치
	St.3	0.66	0.37	0.86	0.90	송사리	민물검정망둑
3차조사	St.1	1.57	0.71	1.60	0.70	송사리	붕어
	St.2	1.92	0.75	2.20	0.56	송사리	블루길
	St.3	1.85	0.84	1.46	0.50	살치	송사리
종합	St.1	1.52	0.59	1.78	0.74	왜물개	붕어
	St.2	2.08	0.75	2.20	0.50	붕어	왜물개
	St.3	1.43	0.56	1.85	0.72	송사리	민물두줄망둑

다. 어류건강성 평가(FAI)

- 당진화력발전소 주변 하천의 어류에 대해 어류건강성평가(FAI)를 이용하여 조사지점별 어류의 건강성을 평가함. (표 4.30)
 - 1차 조사에는 지점 1과 2에서 C등급으로 보통으로 나타났고 모든 지점에서 FAI는 30 점대를 기록하여 'D' 등급을 나타냈고, 환경 상태는 모두 나쁨으로 확인됨.
 - 2차 조사에는 지점 1과 2에서 모두 'C' 등급인 보통으로 관찰되었고 지점 3에서 'D' 등급인 나쁨으로 확인됨. 이같이 나쁨으로 확인된 것은 어류의 개체수가 부족한 영향도 있지만 서식 환경과 여건이 어류에 다소 좋지 않음을 보여줌.
 - 3차 조사에는 3개 지점 모두에서 모두 'C' 등급으로 나타났는데 1·2차 조사시기인 2월과 4월 대비 7월에 서식 환경이 일부 개선이 된 것으로 관찰되었고, 어류의 이동이 이전보다 자유로워진 것을 확인할 수 있었음.
- 1~3차 조사 결과를 평균 산정한 값은 모든 지점에서 'C' 등급으로 나타나 3차 조사와 같은 결과가 나타났음.
 - 3차년도(2020년)와 비교하여 4차년도(2021년)에 어류 종수가 증가한 것은 수변식물을 제거하여 수로를 만들어 주었기 때문이며 향후 3~4년에 한번씩 수로 정비(폭 1~3m, 깊이 0.3~1.0m 규모)를 통해 어류의 활동성을 확보해야 어류건강성을 높일 수 있을 것으로 분석됨.

[표 4.31] 당진조사구 지점별 어류건강성(FAI) 평가

구분	조사지점	FAI	등급	환경상태
평균	지점1	41.7	C	보통
	지점2	47.9	C	보통
	지점3	41.7	C	보통
1차	지점1	31.3	D	나쁨
	지점2	37.5	D	나쁨
	지점3	31.3	D	나쁨
2차	지점1	50.0	C	보통
	지점2	50.0	C	보통
	지점3	37.5	D	나쁨
3차	지점1	43.8	C	보통
	지점2	56.3	C	보통
	지점3	56.3	C	보통

5.2.2 태안조사구

가 어류상 및 어류 군집

- 1차 조사에서는 2목 4과 7종 109개체가 출현하고 법적보호종 및 한국고유종, 외래도입 어종은 출현하지 않음(표 4.31).
 - － 지점 1에서는 2목 3과 4종 20개체, 지점 2에서 2목 4과 7종 89개체가 출현하였고 예년에 비해 개체수가 감소한 것으로 확인되는데 이는 낮은 수온으로 인한 어류의 활동력 저하로 인한 것으로 분석됨.
 - － 비교풍부도는 붕어가 42.20%로 가장 높은 것으로 나타났고, 다음은 민물두줄망둑 32.11%, 송사리 10.09%, 민물검정망둑 9.17%, 꾀저귀 2.75%, 문절망둑과 미꾸리 1.83% 순으로 나타남. (그림 4.43)
- 2차 조사에서는 2목 4과 10종 424개체가 출현하였고, 법적보호종 및 한국고유종은 출현하지 않음. (표 4.32)

- 지점 1에서 2목 3과 6종 134개체, 지점 2은 2목 4과 10종 290개체가 출현하였는데 1차 조사에서 지점 2은 89개체가 관찰된 반면, 2차 조사에서는 290개체가 나타나 약 3.3배 상당량 증가한 것으로 확인되었고 이는 송사리와 민물검정망둑 및 민물두줄망둑이 다량으로 출현하였기 때문인 것으로 분석됨.
 - 비교풍부도는 송사리가 44.34%로 가장 높게 나타났고, 민물검정망둑 22.17%, 민물두줄망둑 13.92%, 흰발망둑 5.90%, 왜몰개 5.66%, 붕어 3.54%, 살치와 참붕어 1.42%, 꾀저구 0.94, 미꾸리 0.71% 순으로 나타남. (그림 4.43)
- 3차 조사에서는 3목 3과 9종 458개체가 출현하였고, 법적보호종 및 한국고유종은 관찰되지 않았음. (표 4.33) 그러나 외래종은 떡붕어 1종이 출현을 확인함.
- 지점 1에서는 2목 2과 5종 226개체, 지점 2에서 3목 3과 9종 232개체가 각각 출현하였는데 지점 2에서 붕어와 송사리 등의 치어들이 많이 출현하였기 때문에 개체수증가가 있었고, 특히 송사리는 산란을 위해 무리로 이동하기 때문에 3차년도 조사시기인 7월에 송사리 산란(수시 산란)과 맞물려 어류 개체수가 늘어난 것으로 판단됨.
 - 비교풍부도는 송사리가 41.92%로 가장 높게 나타났고, 붕어 24.02%, 참붕어 9.61%, 살치 8.30%, 민물검정망둑 7.86%, 문절망둑 3.49%, 민물두줄망둑 2.18%, 떡붕어 1.75%, 잉어 0.87% 순으로 나타남. (그림 4.43)
- 1~3차 어류조사를 종합한 결과 태안조사구에서 총 3목 4과 13종 1,062개체의 어류가 출현하였고, 법적보호종과 한국고유종은 확인되지 않았고 외래도입종은 떡붕어 1종을 확인함. 조사 지역별로는 지점 1에서 3목 3과 8종 423개체, 지점 2에서 3목 4과 13종 649개체가 각각 확인되었음.
- 비교풍부도는 송사리가 37.38%로 가장 높게 나타났고, 민물두줄망둑 17.14%, 붕어 17.04%, 민물검정망둑 10.36%, 참붕어 4.71%, 살치 4.14%, 흰발망둑 2.35%, 왜몰개 2.26%, 문절망둑 1.79%, 꾀저구 0.85%, 떡붕어 0.75%, 미꾸리 0.56%, 잉어 0.38% 순으로 나타남. (그림 4.43)
 - 출현 종의 대부분은 수질오염이나 수온의 변화에 내성이 강한 어종들이 본 하천에 서식하고 있는 것으로 확인됨.

[표 4.32] 태안조사구 1차 조사 어류상

학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 (%)
		1	2		
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Carassius auratus</i>	붕어	1	45	46	42.20
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리		2	2	1.83
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDAE	송사리과				
<i>Oryzias latipes</i>	송사리	9	2	11	10.09
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	문절망둑		2	2	1.83
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구	1	2	3	2.75
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑	9	26	35	32.11
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑		10	10	9.17
목		2	2	2	
과		3	4	4	
종		4	7	7	
개체수		20	89	109	

[표 4.33] 태안조사구 2차 조사 어류상

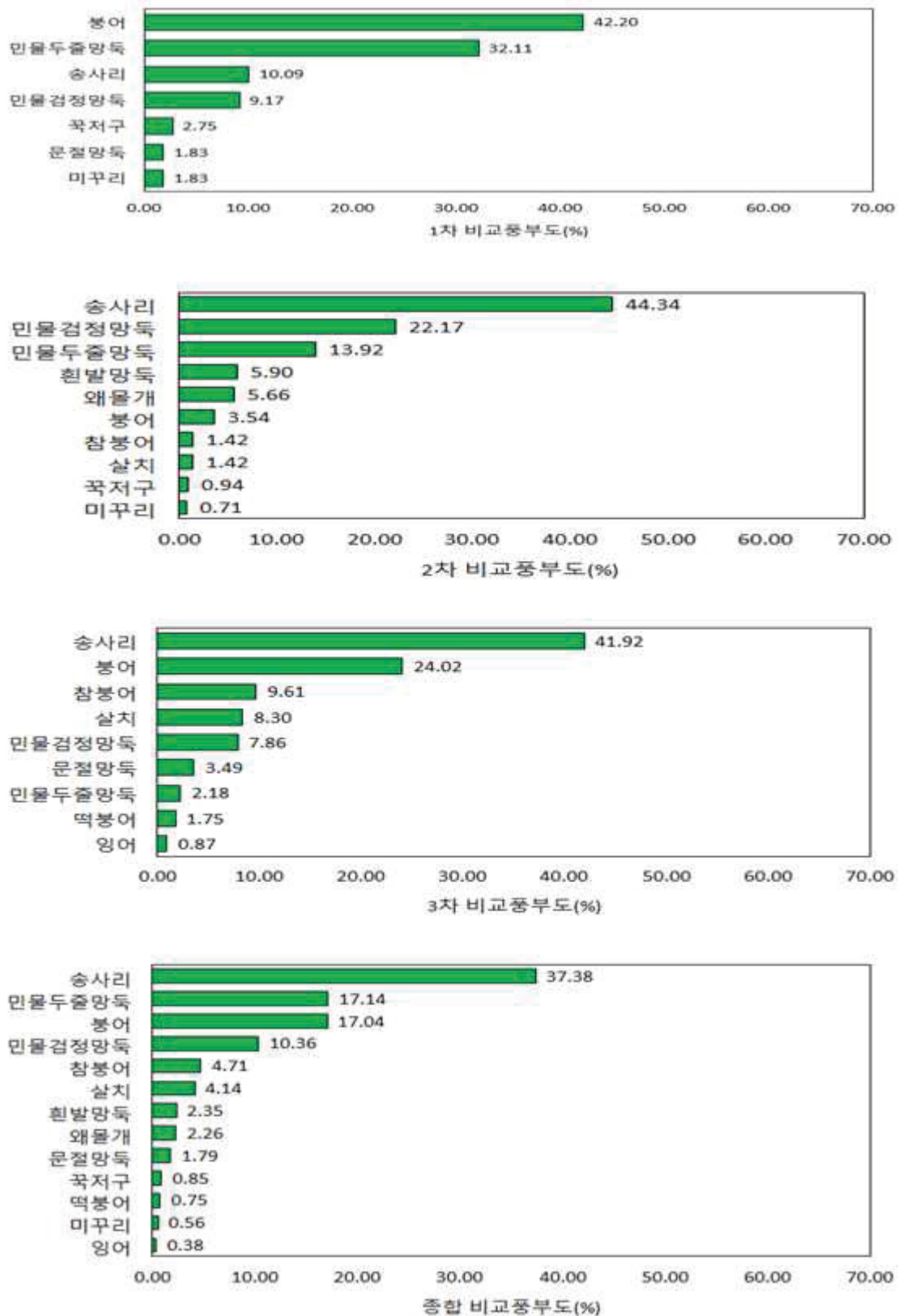
학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Aphyocypris chinensis</i>	왜물개	22	2	24	5.66
<i>Carassius auratus</i>	붕어	6	9	15	3.54
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치		6	6	1.42
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어		6	6	1.42
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리		3	3	0.71
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDAE	송사리과				
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	86	102	188	44.34
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Acanthogobius lactipes</i>	흰발망둑	4	21	25	5.90
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구	2	2	4	0.94
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		59	59	13.92
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	14	80	94	22.17
목		2	2	2	
과		3	4	4	
종		6	10	10	
개체수		134	290	424	100

[표 4.34] 태안조사구 3차 조사 어류상

학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Carassius auratus</i>	붕어	46	64	110	24.02
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어		8	8	1.75
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		4	4	0.87
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치		38	38	8.30
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	18	26	44	9.61
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDEAE	송사리과				
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	134	58	192	41.92
PERCIFORMES	농어목				
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	문절망둑		16	16	3.49
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑	6	4	10	2.18
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	22	14	36	7.86
목		2	3	3	
과		2	3	3	
종		5	9	9	
개체수		226	232	458	

[표 4.35] 태안조사구 1~3차 조사 어류상 종합

학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Aphyocypris chinensis</i>	왜물개	22	2	24	2.26
<i>Carassius auratus</i>	붕어	54	127	181	17.04
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어		8	8	0.75
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		4	4	0.38
<i>Hemiculter leucisculus</i>	살치		44	44	4.14
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	18	32	50	4.71
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리		6	6	0.56
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDEAE	송사리과				
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	234	163	397	37.38
PERCIFORMES	농어목				
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Acanthogobius flavimanus</i>	문절망둑		19	19	1.79
<i>Acanthogobius lactipes</i>	흰발망둑	4	21	25	2.35
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구	4	5	9	0.85
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑	59	123	182	17.14
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	22	88	110	10.36
목		3	3	3	
과		3	4	4	
종		8	13	13	
개체수		423	649	1062	



[그림 4.39] 당진조사구 차수별 출현 어종 비교풍부도

나. 군집분석

- 태안화력발전소 주변 하천의 어류 군집분석 1차 조사 결과,
 - 다양도는 지점 1에서 1.02, 지점 2에서 1.29로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.73, 지점 2는 0.66이었으며, 종풍부도는 지점 1에서 1.00, 지점 2에서 1.34로 나타남.
 - 우점도는 지점 1에서 0.90, 지점 2에서 0.80으로 나타남. 우점종은 지점 1에서 송사리 지점 2에서 붕어로 확인되었고, 아우점종은 지점 1과 2 모두에서 민물두줄망둑으로 나타남. 1지점에서 송사리의 개체수가 많이 나타난 것은 무리를 지어 활동하는 송사리 특성에 따른 결과로 판단됨.
- 2차 조사결과 다양도는 지점 1에서 1.12, 지점 2에서 1.62로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.63, 지점 2에서 0.70, 종풍부도는 지점 1에서 1.02, 지점 2에서 1.59로 나타남.
 - 우점도는 지점 1에서 0.81, 지점 2는 0.63으로 나타나 다른 시기에 비해 우점도가 비교적 높게 나타났는데 이는 특정종(송사리)이 차지하는 비율이 매우 높아 하천내 다양한 서식지가 없다는 것을 대변하는 결과라 판단됨.
 - 우점종은 지점 1과 2 모두에서 송사리였고 아우점종은 지점 1에서 왜물개, 지점 2에서 민물검정망둑으로 나타남.
- 3차 조사 결과 다양도는 지점 1에서 1.16, 지점 2에서는 1.85로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.72, 지점 2에서 0.84이었으며, 종풍부도는 지점 1에서 0.74, 지점 2에서 1.47로 나타났고, 우점도는 지점 1에서 0.80, 지점 2에서 0.53으로 나타남. 우점종은 지점 1에서 송사리, 지점 2에서 붕어, 그리고 지점 2에서는 이와 반대로 나타남.
- 1~3차 조사를 종합한 결과 다양도는 지점 1에서 1.40, 지점 2에서 1.99로 나타났고, 균등도는 지점1에서 0.67, 지점 2에서 0.78이었으며, 종풍부도는 지점 1에서 1.16, 지점 2에서 1.86, 우점도는 지점 1에서 0.70, 지점 2에서 0.45로 나타남.
 - 이와 같이 결과값이 점진적으로 양호해진 것은 수온(계절적)의 차이로 인해 4월과 7월에 어류의 활동력이 증가했기 때문으로 판단되며,
 - 지점 1에서 3차년도(2020년)에 비해 다양도, 균등도, 종풍부도가 높아지고 모든 시기에 송사리가 우점종으로 출현한 것은 계절적 원인과 더불어 수체의 흐름, 수초의 번성 등이 역할(송사리 먹이원, 서식처 증가)을 하여 개체수가 증가하였기 때문으로 판단됨.

- 우점종은 지점 1과 2 모두에서 송사리, 아우점종은 지점 1에서 민물두줄망둑이었고, 지점 2에서 붕어로 나타남.

[표 4.36] 태안조사구 어류의 군집지수

조사차수	지점	다양도	균등도	종풍부도	우점도	우점종	아우점종
1차조사	St.1	1.02	0.73	1.00	0.90	송사리	붕어
	St.2	1.29	0.66	1.34	0.80	민물두줄망둑	민물두줄망둑
2차조사	St.1	1.12	0.63	1.02	0.81	송사리	왜물개
	St.2	1.62	0.70	1.59	0.63	송사리	민물검정망둑
3차조사	St.1	1.16	0.72	0.74	0.80	송사리	붕어
	St.2	1.85	0.84	1.47	0.53	붕어	송사리
종합	St.1	1.40	0.67	1.16	0.70	송사리	민물두줄망둑
	St.2	1.99	0.78	1.86	0.45	송사리	붕어

다. 어류건강성 평가(FAI)

- 태안화력발전소 주변 하천의 어류 조사 결과를 바탕으로 어류건강성평가(FAI)를 이용하여 각 조사지점의 어류 건강성을 평가한 결과,
 - 1차 조사에는 지점 1에서 'D' 등급(나쁨), 지점 2에서 'C' 등급(보통)으로, 2차 조사에는 지점 1에서 'C' 등급(보통), 지점 2에서 'B' 등급(좋음)으로 1차 조사 때보다 수환경이 점진 개선되었는데 이는 2월에서 4월이 되면서 수초가 다양하게 분포하게 되어 어류의 서식처가 양호해졌기 때문인 것으로 판단됨.
 - 3차 조사에는 지점1에서 'D' 등급(나쁨), 지점 2에서 'C' 등급(보통)으로 나타나 2차 시기 보다 수환경이 다시 다소 악화되었는데 계절별(2월, 4월, 7월)로 서식환경이 변화됨을 보여주며, 계절에 따라 서식환경을 개선할 필요성을 확인하였음.

- 1~3차를 종합하여 평균을 산정한 결과 지점 1에서 'D' 등급(나쁨), 지점 2에서는 'C' 등급(보통)으로 분석됨.
- 이처럼, 어류건강성 평가(FAI) 등급이 낮은 것은 태안화력발전소 주변의 하천이 흙보가 있어 어류 이동이 끊어진 하천종적연속성 단절에 따라 나타난 결과로 판단되며, 향후 서식환경 개선과 하천 건강성을 회복하기 위해서는 흙보를 없애고 어류의 이동 연속성을 복원하는 것이 매우 중요하다고 판단됨.

[표 4.37] 태안조사구 지점별 어류건강성(FAI) 평가

구분	조사지점	FAI	등급	환경상태
평균	지점1	39.6	D	나쁨
	지점2	54.2	C	보통
1차	지점1	37.5	D	나쁨
	지점2	43.8	C	보통
2차	지점1	43.8	C	보통
	지점2	68.8	B	보통
3차	지점1	37.5	D	나쁨
	지점2	50.0	C	보통

5.2.3. 보령조사구

가. 어류상 및 어류 군집

- 보령화력발전소 주변의 어류를 조사한 결과 1차 조사에서 53목 8과 12종 156개체가 출현하였고, 법적보호종과 외래도입종은 없었음. 한국고유종은 얼룩동사리 1종이 출현함. 지점별로는 지점 1에서 4목 7과 9종 113개체, 지점 2에서 3목 3과 4종 43개체가 출현함.
 - － 비교풍부도는 참붕어가 46.79%로 가장 높게 나타났고, 송사리 28.21%, 밀어 9.62%, 가숭어 7.05%, 민물두줄망둑 1.92%, 꼭저구, 떡납줄갱이 그리고 붕어 1.28%, 그리고 버들붕어, 얼룩동사리, 동자개, 미꾸리 0.64% 순으로 나타남. (그림 4.44).
- 2차 조사에서 3목 5과 12종 571개체가 출현하였고, 법적보호종은 없었으며, 한국고유종은 가시납지리 1종이, 외래종은 떡붕어 1종이 확인됨. 1차 시기보다 어류 종수와 개체수가 증가한 것은 수로 및 산란기 등으로 인해 어류상에 직·간접적으로 영향을 받았기 때문인 것으로 판단됨.
 - － 비교풍부도는 송사리가 54.29%로 가장 높게 나타났고, 다음은 참붕어 25.04%, 붕어 11.28%, 밀어 2.80%, 흰줄납줄개 2.10%, 민물검정망둑 1.23%, 꼭저구와 미꾸리 1.05%, 민물두줄망둑과 동자개 0.35%, 가시납지리와 떡붕어 0.18% 순으로 나타남. (그림 4.44)
- 3차 조사에는 4목 6과 14종 753개체가 출현하였고, 법적보호종과 외래도입종은 없었으며, 한국고유종은 가시납지리 1종이 출현함. 3차시기에 어류상이 다른 시기보다 비교적 다양한 종이 출현하였는데 어류들의 활동이 활발한 수온대를 형성하고 수온 상승을 억제하는 수초가 형성되어 서식환경이 개선되었기 때문인 것으로 판단됨.
 - － 비교풍부도는 송사리가 59.92%로 가장 높게 나타났고, 붕어 15.51%, 민물검정망둑 7.17%, 참붕어 5.26%, 검정망둑과 꼭저구 1.84%, 떡붕어와 가시납지리 1.58%, 버들붕어 1.31%, 잉어와 흰줄납줄개 1.05%, 미꾸라지 0.53%, 밀어 0.26%, 뱀장어 0.13% 순이었음. (그림 4.44)
 - － 희귀종은 본 지역에서 비교풍부도 기준 0.3% 이하인 개체들로 선정하였으며, 동자개, 떡납줄갱이, 얼룩동사리, 뱀장어 그리고 미꾸라지 해당함. (그림 4.44)

- 1~3차의 어류조사를 종합한 결과 총 5목 8과 19종 1,513개체의 어류가 출현하였고, 법적보호종은 없었으며, 한국고유종은 가시납지리와 얼룩동사리 2종이, 외래종은 떡붕어 1종이 출현함.
 - 비교풍부도는 송사리가 56.11%로 가장 높게 나타났으며 참붕어로 17.05%, 붕어 12.23%, 민물검정망둑 4.03%, 밀어 2.18%, 꼭저구 1.52%, 흰줄납줄개 1.32%, 검정망둑 0.93%, 떡붕어와 가시납지리 0.86%, 버들붕어 0.73%, 잉어 0.53%, 민물두줄망둑과 미꾸리 0.46% 그리고 미꾸라지, 동자개, 떡납줄갱이, 얼룩동사리, 뱀장어 등 5종은 비교풍부도 0.3% 이하로 나타났음.
 - 보령발전소 주변 하천에서 출현한 어류의 종 조성을 살펴보면, 대부분이 높은 수온에 서식하고, 유기물 오염 및 해수나 기타 오염에 강한 어종들이 대부분이었음.
- 3차년도(2020년)에 출현한 한국고유종은 각시붕어를 포함하면 총 3종이 출현한 것이며 이는 지류인 교성천에서 유입되었기 때문인 것으로 판단됨.
 - 보령조사구에서 출현한 어종은 대부분 오염에 강한 어종이었으나, 한국고유종 및 납자루아과 어종이 일부 분포한다는 것은 지류인 교성천에서 지속적으로 본 하천으로 유입되는 것을 확인할 수 있으며, 교성천의 생태학적 보존 가치가 있음을 의미함.
 - 한국고유종은 우리나라에서만 서식하는 어종으로 돌이나 자갈이 많고, 유속이 빠른 우리나라 하천의 중류지역에 많이 분포하고,
 - 납자루아과 어종은 이때패류인 말조개, 펄조개, 대칭이 등으로 서해 하천이나 호수바닥에 저서생물의 서식이 가능함을 보여주어 보령조사구로 유입되는 교성천에 종 다양성의 긍정적인 영향이 있음을 확인할 수 있었음.

[표 4.38] 보령조사구 1차 조사 어류상

학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Carassius auratus</i>	붕어	2		2	1.28
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	73		73	46.79
<i>Rhodeus notatus</i>	떡납줄갱이	2		2	1.28
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	1		1	0.64
SILURIFORMES	메기목				
BAGRIDAE	동자개과				
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	동자개	1		1	0.64
MUGILIFORMES	송어목				
MUGILIDAE	송어과				
<i>Chelon haematocheilus</i>	가송어		11	11	7.05
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDEAE	송사리과				
<i>Oryzias latipes</i>	송사리	17	27	44	28.21
PERCIFORMES	농어목				
ODONTOBUTIDAE	동사리과				
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리	1		1	0.64
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구		2	2	1.28
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어	15		15	9.62
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		3	3	1.92
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과				
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	1		1	0.64
목		4	3	5	
과		7	3	8	
종		9	4	12	
개체수		113	43	156	

[표 4.39] 보령조사구 2차 조사 어류상

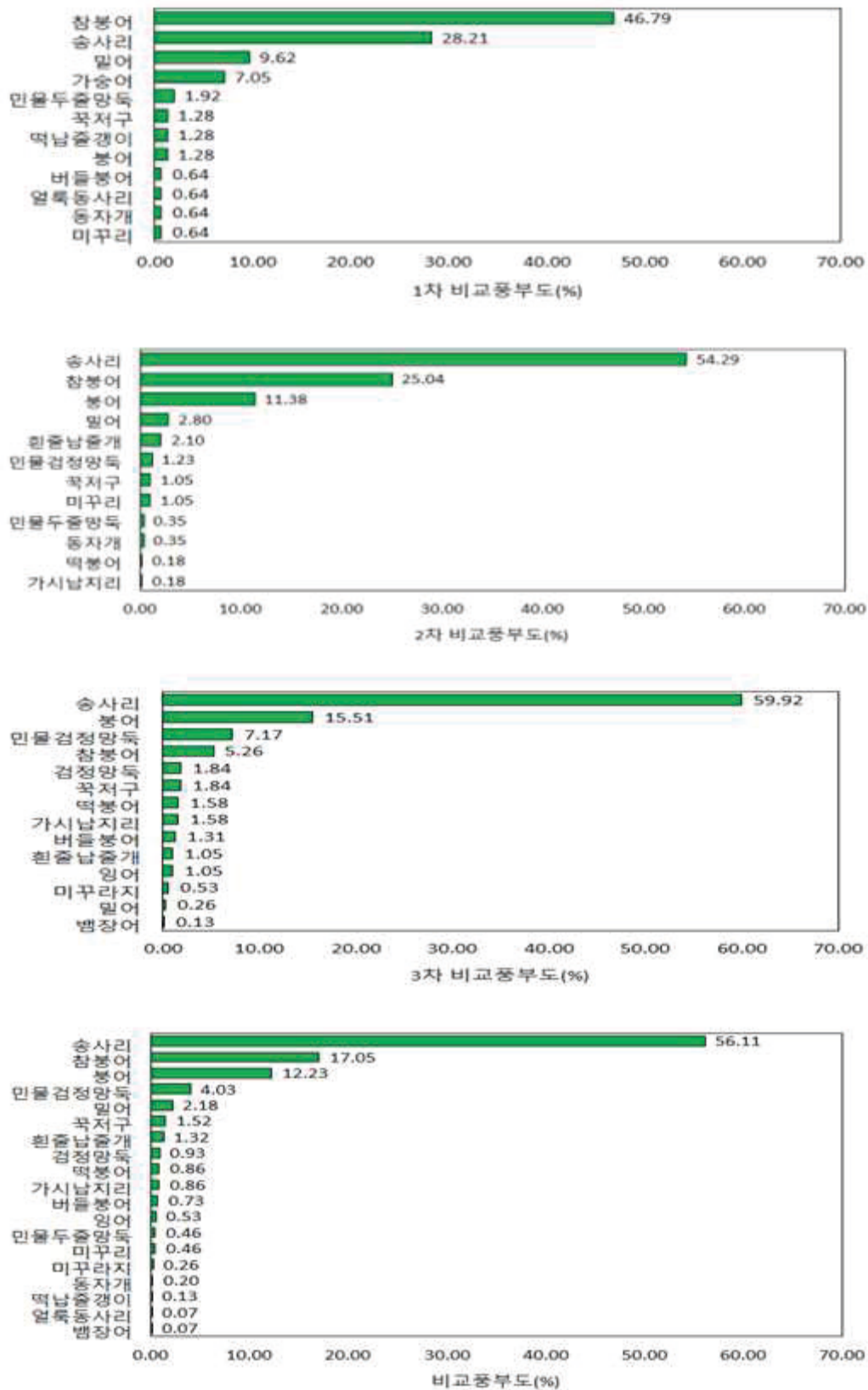
학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Acheilognathus chankaensis</i>	가시납지리	1		1	0.18
<i>Carassius auratus</i>	붕어	46	19	65	11.38
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	1		1	0.18
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	111	32	143	25.04
<i>Rhodeus ocellatus</i>	흰줄납줄개	12		12	2.10
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	5	1	6	1.05
SILURIFORMES	메기목				
BAGRIDAE	동자개과				
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	동자개	2		2	0.35
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDAE	송사리과				
<i>Oryzias latipes</i>	송사리	104	206	310	54.29
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구	1	5	6	1.05
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어	15	1	16	2.80
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		2	2	0.35
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑		7	7	1.23
목		3	2	3	
과		5	4	5	
종		10	8	12	
개체수		298	273	571	

[표 4.40] 보령조사구 2차 조사 어류상

학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
ANGUILLIFORMES	뱀장어목				
ANGUILLIDAE	뱀장어과				
<i>Anguilla japonica</i>	뱀장어		1	1	0.13
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Acheilognathus chankaensis</i>	가시납지리	12		12	1.58
<i>Carassius auratus</i>	붕어	64	54	118	15.51
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	12		12	1.58
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		8	8	1.05
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	34	6	40	5.26
<i>Cyprinus carpio</i>	흰줄납줄개	8		8	1.05
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	4		4	0.53
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDEAE	송사리과				
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	192	264	456	59.92
PERCIFORMES	농어목				
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구		14	14	1.84
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어		2	2	0.26
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	38	16	54	7.10
<i>Tridentiger obscurus</i>	검정망둑		14	14	1.84
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과				
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	8	2	10	1.31
목		3	3	4	
과		5	5	6	
종		9	10	14	
개체수		372	381	753	

[표 4.41] 보령조사구 1~3차 조사 어류상 종합

학명	국명	조사지점		합계	비교풍부도 %
		1	2		
ANGUILLIFORMES	뱀장어목				
ANGUILLIDAE	뱀장어과				
<i>Anguilla japonica</i>	뱀장어		1	1	0.07
CYPRINIFORMES	잉어목				
CYPRINIDAE	잉어과				
<i>Acheilognathus chankaensis</i>	가시납지리	13		13	0.86
<i>Carassius auratus</i>	붕어	112	73	185	12.23
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	13		13	0.86
<i>Cyprinus carpio</i>	잉어		8	8	0.53
<i>Pseudorasbora parva</i>	참붕어	220	38	258	17.05
<i>Rhodeus notatus</i>	떡납줄갱이	2		2	0.13
<i>Cyprinus carpio</i>	흰줄납줄개	20		20	1.32
COBITIDAE	미꾸리과				
<i>Misgurnus anguillicaudatus</i>	미꾸리	6	1	7	0.46
<i>Misgurnus mizolepis</i>	미꾸라지	4		4	0.26
SILURIFORMES	메기목				
BAGRIDAE	동자개과				
<i>Pseudobagrus fulvidraco</i>	동자개	3		3	0.20
BELONIFORMES	동갈치목				
ADRIANICHTHYOIDAE	송사리과				
<i>Oryzias sinensis</i>	송사리	313	536	849	56.11
PERCIFORMES	농어목				
ODONTOBUTIDAE	동사리과				
<i>Odontobutis interrupta</i>	얼룩동사리	1		1	0.07
GOBIIDAE	망둑어과				
<i>Gymnogobius urotaenia</i>	꼭저구	1	22	23	1.52
<i>Rhinogobius brunneus</i>	밀어	30	3	33	2.18
<i>Tridentiger bifasciatus</i>	민물두줄망둑		7	7	0.46
<i>Tridentiger brevispinis</i>	민물검정망둑	38	23	61	4.03
<i>Tridentiger obscurus</i>	검정망둑		14	14	0.93
OSPHRONEMIDAE	버들붕어과				
<i>Macropodus ocellatus</i>	버들붕어	9	2	11	0.73
목		4	4	5	
과		7	6	8	
종		15	12	19	
개체수		785	728	1513	



[그림 4.40] 보령조사구 차수별 출현 어종 비교종부도

나. 군집분석

- 보령화력발전소 주변 하천에서의 지점별 어류 군집분석 차 조사 결과 다양도는 지점 1에서 1.15, 지점 2에서 0.97로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.52, 지점 2의 0.70이었으며, 종풍부도는 지점 1에서 1.69, 지점 2에서 0.80로 나타남.
 - 우점도는 지점 1에서 0.80, 지점 2에서 0.88로 나타남. 우점종은 지점 1에서 참붕어, 지점 2에서 송사리, 아우점종은 지점 1에서 송사리, 지점 2에서 가숭어로 나타남.
- 2차 조사에서 다양도는 지점 1에서 1.46, 지점 2에서 0.89로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.64, 지점 2에서 0.43, 종풍부도는 지점 1에서 1.58, 지점 2에서 1.25로 나타남.
 - 우점도는 지점 1에서 0.87, 지점 2에서 0.69로, 우점종은 지점 1에서 참붕어, 지점 2는 송사리로 나타났고, 아우점종은 지점 1에서 송사리, 지점 2에서는 참붕어로 확인됨.
- 3차 조사에서 다양도는 지점 1에서 1.53, 지점 2에서는 1.12로 나타났고, 균등도는 지점 1에서 0.70, 지점 2에서 0.49, 종풍부도는 지점 1에서 1.35, 지점 2에서 1.51로 나타남.
 - 우점도는 지점 1에서 0.69, 지점 2에서 0.83으로 나타났고 우점종은 지점 1과 2에서 모두 송사리, 아우점종도 지점 1과 2에서 모두 붕어로 나타남.
- 1~3차 조사를 종합해 군집분석을 실시한 결과, 종다양도는 지점 1에서 1.87, 지점 2에서 1.05로 나타났고, 균등도는 지점1에서 0.62, 지점 2에서 0.42, 종풍부도는 지점 1에서 2.10, 지점 2에서 1.67로 나타남.
 - 우점도는 지점 1에서 0.68, 지점 2에서 0.84로 나타났고 우점종은 지점 1과 2 모두에서 붕어, 아우점종은 지점 1에서 참붕어, 지점 2에서 붕어로 나타남.

[표 4.42] 보령조사구 어류의 군집지수

조사차수	지점	다양도	균등도	종풍부도	우점도	우점종	아우점종
1차조사	St.1	1.15	0.52	1.69	0.80	참붕어	송사리
	St.2	0.97	0.70	0.80	0.88	송사리	가숭어
2차조사	St.1	1.46	0.64	1.58	0.72	참붕어	송사리
	St.2	0.89	0.43	1.25	0.87	송사리	참붕어
3차조사	St.1	1.53	0.70	1.35	0.69	송사리	붕어
	St.2	1.12	0.49	1.51	0.83	송사리	붕어
종합	St.1	1.87	0.62	2.10	0.68	송사리	참붕어
	St.2	1.05	0.42	1.67	0.84	송사리	붕어

다. 어류건강성 평가(FAI)

- 보령화력발전소 주변 하천의 어류건강성 평가(FAI)를 확인한 결과, 1차 조사에는 지점 1에서 'D' 등급(나쁨), 지점 2에서 'E' 등급(매우 나쁨)으로 나타남.
- 2차 조사에는 지점 1과 2 모두에서 'D' 등급(나쁨)으로 나타났으며, 3차 조사에도 2차 조사와 같은 결과가 나타났음. 3차를 종합하여 평균을 산정한 결과에서도 지점 1과 2 모두 'D' 등급인 나쁨 상태로 확인되었음.
 - 보령조사구 하천은 수심이 대부분 낮고(0.1~0.3 m) 유속(0.01 m/sec 이하)이 거의 없어 쉽게 수온이 높아지는 곳으로 수환경이 어류가 서식하기에 매우 나쁨으로 확인되었으며, 수생태 건강성을 회복하기 위해서는 우선적으로 유로를 좁히고 수심을 깊게 하여 유속을 높일 필요성이 있는 것으로 분석됨.

[표 4.43] 보령화력발전소 지점별 어류건강성(FAI) 평가

구분	조사지점	FAI	등급	환경상태
평균	지점1	31.3	D	나쁨
	지점2	31.3	D	나쁨
1차	지점1	25.0	D	나쁨
	지점2	18.8	E	매우나쁨
2차	지점1	31.3	D	나쁨
	지점2	37.5	D	나쁨
3차	지점1	37.5	D	나쁨
	지점2	37.5	D	나쁨

5.2.4. 서천조사구

가. 어류상 및 어류 군집

- 2020년 4월 서천화력발전소 주변 하천을 조사하였을 때에는 송사리가 출현하고 매년 붕어나 떡붕어 등이 출현하였으나, 4차년도(2021년) 1차 조사에는 어류가 출현하지 않았음.
- 2차 조사에서는 1목 1과 1종 166개체가 출현하였고, 법적보호종 및 한국고유종은 출현하지 않았음. (표 4.43)
- 3차 조사에서 1목 1과 2종 38개체가 출현하였고, 법적보호종 및 한국고유종은 출현하지 않았으며, 외래도입어종은 떡붕어 1종이 출현하였음. (표 4.44)
 - 비교풍부도는 붕어가 89.47%의 출현율로 우점종으로 나타났고, 떡붕어가 10.53%로 아우점종으로 나타남.
 - 이 지역은 과거 소하천으로 다른 어종들이 분포하였을 것으로 예상되나, 화력발전소 단지 건설로 인하여 폐쇄된 하천(길이 250m, 폭 1-15m)으로 가뭄 시 줄어든 수체와 높아진 수온 그리고 각종 오염 등의 영향으로 대부분의 어종이 죽거나 폐사하고 오염 및 기타 내성에 강한 어종만 살아남을 것으로 판단됨. (그림 4.45)

- 1~3차의 어류조사를 종합한 결과 서천화력발전소 주변 하천에서는 총 1목 1과 2종 204 개체의 어류가 출현하였고, 법적보호종 및 한국고유종은 출현하지 않았으며 외래도입 어 종은 떡붕어 1종이 출현하였음. (표 4.45)
 - 비교풍부도는 붕어가 98.04%로 가장 높게 나타났고, 떡붕어가 1.96%로 나타남. (그림 4.45)

[표 4.44] 서천조사구 2차 조사 어류상

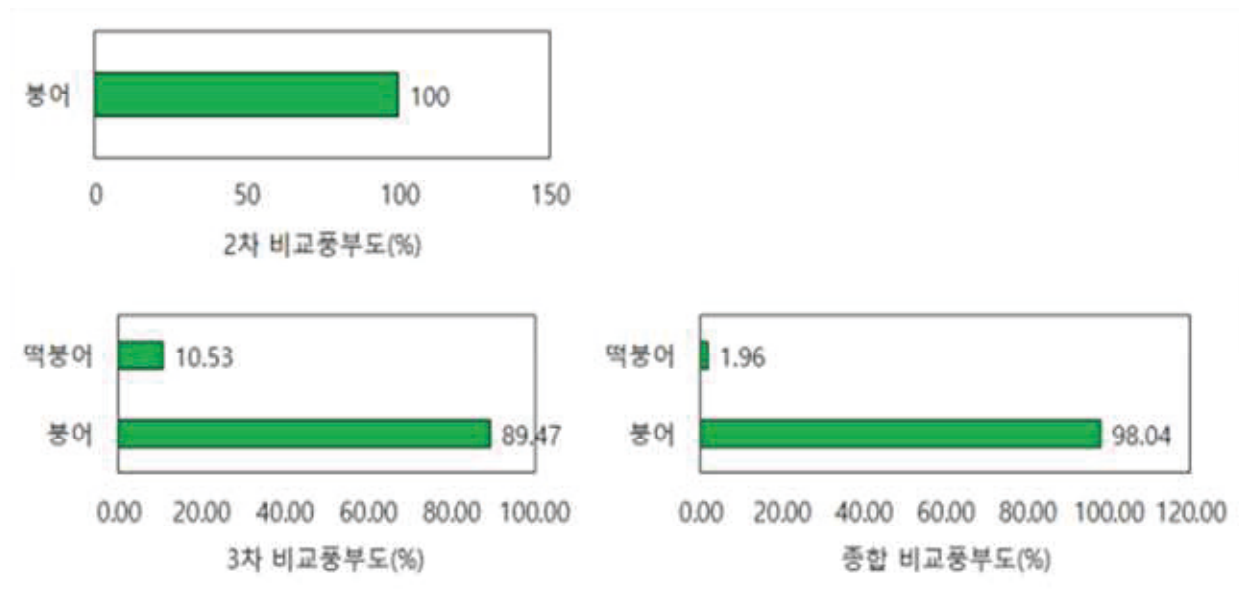
학명	국명	지점 1	합계	비교풍부도 (%)
CYPRINIFORMES	잉어목			
CYPRINIDAE	잉어과			
<i>Carassius auratus</i>	붕어	166	166	100
목		1	1	
과		1	1	
종		1	1	
개체수		166	166	

[표 4.45] 서천조사구 3차 조사 어류상

학명	국명	지점 1	합계	비교풍부도 (%)
CYPRINIFORMES	잉어목			
CYPRINIDAE	잉어과			
<i>Carassius auratus</i>	붕어	34	34	89.47
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	4	4	10.53
목		1	1	
과		1	1	
종		2	2	
개체수		38	38	

[표 4.46] 서천조사구 2~3차 조사 어류상 종합

학명	국명	서천	합계	비교풍부도 (%)
CYPRINIFORMES	잉어목			
CYPRINIDAE	잉어과			
<i>Carassius auratus</i>	붕어	200	200	98.04
<i>Carassius cuvieri</i>	떡붕어	4	4	1.96
목		2	2	
과		2	2	
종		2	2	
개체수		204	204	



[그림 4.41] 서천조사구 출현 어종 비교풍부도

나. 군집분석

- 서천화력발전소 주변지역의 어류 군집분석을 실시한 결과 1차 조사에서 어류 출현이 없었고, 2차 조사에서 붕어 1종만 출현하여 군집분석을 실시할 수 없었음.
- 3차 조사에서는 다양도 0.34, 균등도 0.49, 종풍부도는 0.27, 우점도는 1.00으로 나타났고, 우점종은 붕어, 아우점종은 떡붕어로 확인됨.
- 1~3차 조사를 종합한 결과 다양도는 0.10, 균등도는 0.14, 종풍부도는 0.19, 우점도는 1.00으로 나타났고, 우점종은 붕어, 아우점종은 떡붕어로 나타남.

[표 4.47] 서천조사구 어류의 군집지수

조사차수	다양도	균등도	종풍부도	우점도	우점종	아우점종
1차조사	-	-	-	-	-	-
2차조사	-	-	-	1.00	붕어	-
3차조사	0.34	0.49	0.27	1.00	붕어	떡붕어
종합	0.10	0.14	0.19	1.00	붕어	떡붕어

다. 어류건강성 평가(FAI)

- 서천화력발전소 주변 하천의 어류건강성 평가(FAI)를 이용하여 조사지점별 어류의 건강성을 평가한 결과, 1차 조사시에는 어류가 출현하지 않아 평가등급 'E' 등급인 매우 나쁨으로 평가됨.
 - 어류가 출현하지 못한 것은 관련 하천 바로 옆에 관로가 연결되어 있어 붕어 등의 어종들이 겨울철에는 이곳으로 이동하여 서식하는 것으로 판단됨.
- 2차 조사에는 'D' 등급(나쁨)이었으나, 3차 조사에는 'E' 등급(매우 나쁨)으로 수 환경이 더욱 악화되었고, 1~3차를 종합하여 평균을 산정한 결과는 'E' 등급으로 나타남.
 - 서천화력발전소 주변 하천이 어류가 서식하기에 매우 나쁜 환경을 가지는 주요원인은 화력발전소 건설로 인해 하천 구간이 매립되어 수체가 단절된 상황에서 계절적 영향에

따라 수온이 급격하게 상승하거나, 오염물질이 유입되고 이동이 전혀 이뤄지지 않았기 때문인 것으로 판단됨. (그림 4.46-47)

- 또한, 2020년 4월 송사리를 채집하던 지점도 신화력발전소 건설에 따라 하천이 일부 사라지면서 수체가 거의 사라졌고 이에 따라 서식환경이 매우 나쁜 상황으로 악화되었음.



[그림 4.42] 서천화력발전소 주변 사라진 하천 구간(좌측 2016년 / 우측 2020년)



[그림 4.43] 서천화력발전소 옆 하천 과거 대륙송사리 채집 위치 (2020년 4월)

[표 4.48] 서천조사구 지점별 어류건강성(FAI) 평가

구분	조사지점	FAI	등급	환경상태
평균	지점1	18.8	E	매우나쁨
1차	지점1	—	E	매우나쁨
2차	지점1	25	D	나쁨
3차	지점1	12.5	E	매우나쁨

5.3. 어류건강성 평가(FAI)를 통한 안정성 평가

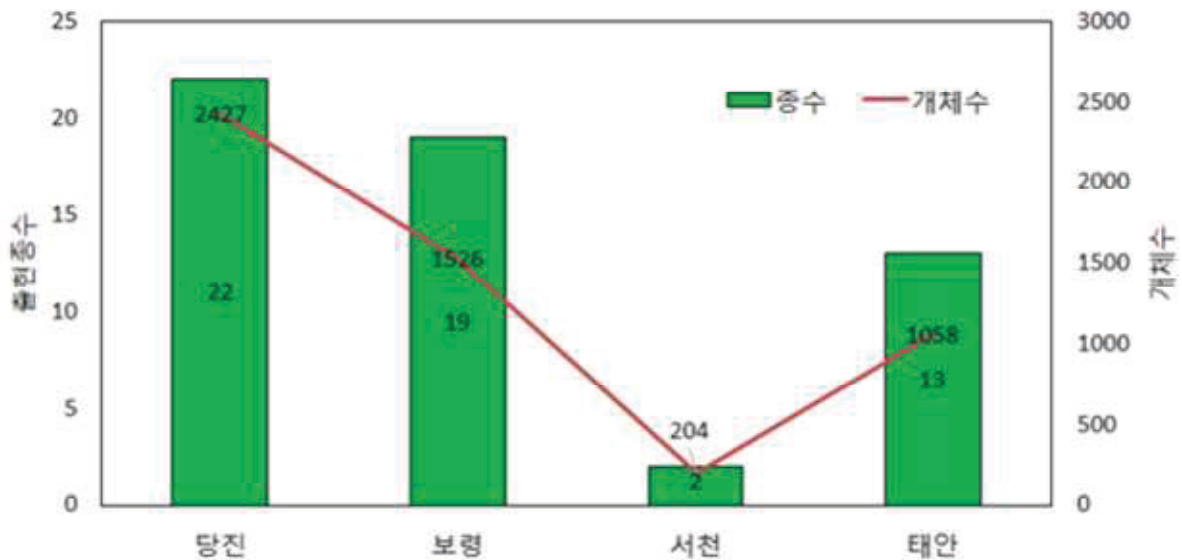
- 충남화력발전소 주변 및 상류의 대조지점에 어류 조사결과를 바탕으로 어류건강성평가(FAI)를 실시하여 지점별 건강성을 검토함.
- 당진조사구는 조사된 모든 지점에서 ‘C’ 등급(보통)으로 평가되어 건강에 그리 나쁜 여건은 아닌 것으로 분석되었고, 하천에 대한 지속적인 하천 종적연속성(유로 연결) 및 시간의 연속성(개체군 생활사)을 확보하면 큰 무리가 없을 것으로 판단됨.

- 태안조사구는 지점 1은 'D' 등급(나쁨), 지점 2에서 'C' 등급(보통)으로 나타나 하천 환경이 당진조사구에 비해 양호하지 못한 것으로 확인되었음.
 - 태안조사구 지점 1의 건강성을 높이기 위해서 수변식물을 제거하여 하천 연속성을 높이고, 지점 2에서는 흙 보를 제거하여 생태이동통로를 확보하는 생태하천 복원사업이 필요할 것으로 분석됨.
- 보령조사구는 지점 1과 2 모두에서 'D' 등급(나쁨)으로 하천의 관리 필요성이 매우 높은 것으로 나타남. 지점 1·2 모두 하천의 폭에 비해 유로가 너무 넓어 유속이 낮기 때문에 하천의 건강성이 낮은 것으로 분석됨.
 - 따라서, 하천 수심을 0.5~1.5m로 깊게 파고 유로를 좁히는 한편 수변 환경을 긍정적으로 변경(적정 수변식물 식재, 흙보 제거 등)하면 하천 건강성이 회복될 것으로 판단됨.
- 서천조사구의 어류 건강성은 'E' 등급 매우 나쁨 상태로 신화력발전소 건설로 인해 하천이 단절되어 물이 고여있는 상황으로 출현 종수가 2종(붕어, 떡붕어)뿐이어서 하천의 역할을 거의 상실한 것으로 분석되었음.

5.4 연차별 연구결과 비교분석

- 충남화력발전소 주변 하천의 어류조사 결과를 바탕으로 2차년도(2019년)~4차년도까지(2021년) 비교·분석한 결과,
 - 당진조사구가 22종과 2,427개체가 출현하여 가장 많은 종과 개체수가 출현하였고, 보령조사구는 19종 1,526개체, 태안조사구는 13종 1,058개체였으며 서천조사구에서 가장 적은 2종 204개체 순으로 확인됨.
- 당진조사구에서 가장 많은 종과 개체수가 출현한 것은 기존 갈대 등 수생물로 가득찼던 수로를 2020년 상반기에 수생물을 걷어내고 수로를 개통해 어류의 이동성을 확보하였기 때문(하천 종적연속성 개선)인 것으로 분석되었음.

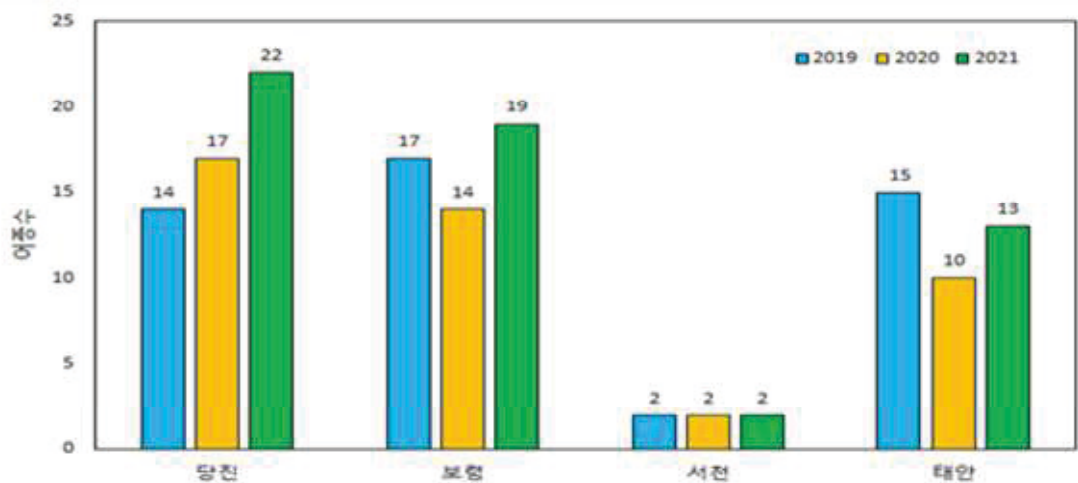
- 보령화력발전소 주변 하천의 어류조사 결과 1차에는 7종, 2차에 12종 그리고 3차에 16종이 출현하였고 종합적으로 19종이 출현하였는데 출현 종수가 조사시기 마다 달라지는 것은 계절적인 원인과 수초에 의한 수환경 개선효과로 인한 결과 판단되며,
 - 지점 2는 1차에서 4종, 2차에서 8종, 3차에서 10종으로 나타나 시기별 어류상 차이를 보였는데 이는 하구역 특성상 밀물과 썰물 그리고 계절에 따른 출현 어종 차이의 영향과 2021년이 2020년보다 수온이 높지 않았던 것이 일부 작용한 것으로 판단됨.
 - 보령조사구에서는 19종의 가장 많은 종수가 출현하였는데 지점 1에서 지천의 합류가 이뤄지고 수체는 적지만 수초가 많아 어류들의 서식처 및 피난처 역할을 하기 때문인 다른 조사구보다 많은 어종이 확인된 것으로 판단되며, 특별히 2021년 초에 수로 공사가 완료되면서 서식지가 점차 안정화되면서 수환경의 개선에 긍정적 영향을 준 것으로 확인됨.
- 서천조사구는 3차년도(2020년)에도 2종이 출현하였고 4차년도(2021년)에도 2종만 출현하였으며 어종 및 개체수를 확인하기 매우 어려웠음. 이는 신서천화력발전소 공사로 인하여 하천 대부분이 소실되어 발생한 결과로 보여지며 과거 송사리가 출현했던 지점(그림 4-56)도 공사로 인하여 완전히 갇힌 하천이 되면서 수체가 없어진 ‘지역절멸’이 이뤄졌을 가능성이 높다고 분석됨.
 - 서천은 1차에 어류가 출현하지 않았고 2차에 1종 붕어 그리고 3차에 붕어와 떡붕어 2종이 출현하였는데 하천이 폐쇄되면서 환경변화에 따라 오염 내성이 강한 어종만 살아남은 것으로 판단됨.
- 화력발전소 주변지역 4곳의 하천을 중심으로 연차별 연구를 통해 수환경 상태 및 개선 필요사항을 찾아내고자 노력하였으나, 연구기간이 짧고 대기오염물질의 이동 및 낙진 등이 규명이 이뤄지지 않아 화력발전소에서 배출되는 대기오염물질의 명확한 원인 분석에는 한계가 있었음.
 - 향후 어류 서식의 환경개선을 위해서는 어류상 및 어류군집, 어류건강성 등 종합적인 생태 데이터 분석을 장기적으로 축적하여 연구가 필요할 것으로 보이며, 화력발전소의 영향분석은 대기오염물질의 기여농도 등을 통해 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단됨.



[그림 4.44] 당진, 보령, 서천, 태안조사구의 출현 어류 종수와 개체수

- 태안조사구는 1차에 12종, 2차에 10종, 3차에 9종으로 계절적인 차이에 따른 종수의 차이가 다소 보이는 것으로 나타남.
 - 태안조사구는 흙보가 조사수역 내에 다수 위치하여 큰 비가 오지 않으면 어류의 이동이 거의 없어, 어류 조사시기에 따른 종수의 차이가 거의 없는 것으로 나타났고, 3차 조사시기인 7월에는 하천의 유량이 적은 관계로 어류의 이동이 더욱 감소하여 1차2차와 비교하여 종수가 감소한 것으로 판단됨.
 - 지점 2에서 봄철 족대 조사(4월)에서 어류의 비늘(최소 3년생 이상 20cm 대형 개체로 추정)이 대량으로 발견되었는데 매우 특이한 현상으로 연속적으로 유사(동일) 사건이 발생되지 않아 발생 원인을 추측하기는 어려우나, 지난 겨울 붕어, 떡붕어, 잉어 등의 개체가 대량으로 폐사하였기 때문인 것으로 보이며, 보다 명확한 원인은 유사 사건 발생 시 수환경 조사 및 지속적 개체 관찰을 통해 분석이 필요할 것으로 판단됨.
- 화력발전소 주변 하천의 어류상의 차이는 화력발전소의 대기오염물질에 대한 영향보다는 기타 환경학적 요인들에 의한 교란이 어류상 및 어류군집에 영향을 주어 나타난 결과라 판단됨.
 - 지역별 어류상 및 어류군집의 차이는 당진은 수로 개선, 보령은 수온(넓은 유향), 서천은 갇힌 하천, 태안은 흙보에 의한 어류 이동 장애 등이 원인으로 판단됨.

- 각 화력발전소 주변 하천들의 과거 어류상과 비교·분석한 결과 당진과 보령이 어류 종수가 증가하였고 태안은 종수가 감소한 것으로 나타남.
 - 태안의 경우 어종수가 감소한 원인은 수로 단협(종적연속성 단절)의 영향일 가능성이 높은 것으로 판단되며, 지점 1은 갈대가 가득한 영향과 지점 2는 흙보의 영향으로 어류의 이동이 거의 불가능해 생긴 결과라 판단됨.
 - 따라서 당진조사구와 같이 하천에 대한 수로 등의 관리가 필요(생태하천 복원사업)하다는 것을 확인하였음.
- 태안조사구에서 다른 조사구에 비해 어류의 종수가 가장 많이 감소하였는데 이는 회처리장의 배수에 의한 가능성과 하천내 작년보다 증가한 수변식물 그리고 하천내 흙으로 만들어진 제방으로 인해 어류의 이동이 자유롭지 못한 결과 가능성이 있을 것으로 판단됨.
- 보령조사구의 어종수의 증가는 지점 1에서 실시한 하천 공사 마무리로 서식지의 안정화된 결과로 판단되며, 특히 지점 2에서는 밀물과 썰물이 어류의 이동을 증가 시키는 역할을 하여 영향을 미쳤을 가능성이 있다고 보여짐.
 - 그러나, 어류건강성 평가에서는 지점 1·2 모두 ‘D’ 등급(나쁨)으로 나타나 위에서 위의 긍정적 개선효과가 어류건강성 개선에는 크게 영향을 미치지 못한 것으로 판단되며 향후 하천의 관리 필요성이 매우 높은 지역으로 확인됨.



[그림

[그림 4.45] 조사구별 연차별 어류 출현 종수

5.5 요약 및 소결론

- 충남지역 4개 화력발전소의 어류조사를 실시한 결과 총 6목 10과 27종 5,189개체가 출현한 것으로 나타남. 출현어종 중 법적보호종은 출현하지 않았고, 한국고유종은 가시납지리, 쉬리, 얼룩동사리 등 3종이 출현하였고, 외래도입어종은 떡붕어, 블루길과 배스(생태계교란어종) 3종이 출현함.
- 당진화력발전소 주변 하천에서 어류조사를 종합한 결과, 총 5문 9과 22종 2,418개체로 예년보다 5종이 증가하여 출현하였고, 법적보호종은 출현하지 않았으며, 한국고유종은 얼룩동사리와 쉬리 2종이 출현함. 외래도입종은 떡붕어와 블루길, 배스(생태계교란어종) 3종이 채집됨.
 - 한국고유종의 출현은 긍정적인 메시지를 주지만, 일부 수질오염과 수온에 대한 내성이 강한 어종들의 출현은 본 지역이 수환경이 양호하지 않음을 반영함.
 - 당진 하천에 대한 어류건강성평가(FAI) 결과 모든 지점에서 ‘C’ 등급, ‘보통’으로 평가된 것은 긍정적으로 평가됨. 따라서 지속적인 하천 종적연속성(유로 연결) 및 시간의 연속성(개체군 생활사)을 확보하면 어류건강성을 더욱 회복할 수 있을 것으로 판단됨.
- 태안화력발전소 주변 하천에서 어류 조사 결과를 종합한 결과, 총 3목 4과 13종 1,062개체의 어류가 출현하였고, 법적보호종과 한국고유종은 출현하지 않았으며, 외래도입종은 떡붕어 1종이 출현함. 출현 어종 대부분은 수질 오염이나 수온 변화에 내성이 강한 어종이었음.
 - 태안 하천에 대한 어류건강성평가(FAI) 결과, 지점 1에서 ‘D’ 등급으로 나뉘며, 지점 2에서는 ‘C’ 등급 보통으로 나타났는데 FAI 등급이 낮은 것은 흙보의 존재로 어류 이동이 끊어진 하천종적연속성 단절이 원인이므로 흙보를 없애고 연속성을 복원(생태하천 복원사업)하는 것이 하천 건강성을 회복하는데 중요할 것으로 판단됨.
- 보령화력발전소 주변 하천에서는 총 5목 8과 19종 1,513개체의 어류가 출현하였고, 법적보호종은 없었으며, 한국고유종은 가시납지리와 얼룩동사리 2종이 출현함. 외래종은 떡붕어 1종이 출현함.
 - 3차년도(2020년)에 출현한 한국고유종인 각시붕어를 포함하면 총 3종이 출현하였는데 이는 지류인 교성천에서 지속적으로 유입되기 때문인 것으로 판단됨.

- 보령 하천에 대한 어류건강성평가(FAI) 결과, 지점 1과 2 모두에서 'D' 등급으로 나뉘어 평가되었는데 하천의 수심이 대부분 낮고(0.1-0.3 m) 유속(0.01 m/sec 이하)이 거의 없어 쉽게 수온이 높아지는 경향 때문인 것으로 분석되어 향후 유로를 좁히고 수심을 깊게 하여 수생태 건강성을 개선해야 될 필요성을 확인함.
- 서천화력발전소 주변에서는 총 1목 1과 2종 204개체의 어류가 출현하였고, 법적보호종 및 한국고유종은 출현하지 않았으며 외래도입어종은 떡붕어 1종이 출현하였음.
- 서천 하천에 대한 어류건강성평가(FAI) 결과, 'E' 등급으로 나타남. 주요 원인은 화력발전소 건설로 인해 하천 구간이 매립되어 단절된 상황으로 하천 기능이 거의 상실된 상황이므로 하천 존재에 대한 재검토가 필요할 것임.

제5장 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

1. 식물분야
2. 곤충분야
3. 포유류분야
4. 어류분야

1. 식물분야

1.1. 조사시기 및 방법

가. 조사시기

- 충남 화력발전소 주변 지역 식물분야 조사는 3차년도 조사를 통해 취약종을 선정하였으며(3차년도 보고서 pp. 713-715), 현지조사 후 후보종을 분석하여 대상종을 선정하였음. 이후 대상종 1차 조사 등 2020년 9월부터 2021년 9월까지 총 6회에 걸쳐 현지 조사를 수행함.

[표 5.1] 충남 화력발전소 주변지역의 식물상 조사 시기

구분	차수	조사시기	조사 일수	조사지
후보종 현지 조사	1차 조사	2020년 9월 25일~ 2020년 9월 28일	4일	당진(왜목마을, 석문산), 태안(학암포길), 서산(팔봉산), 보령(오천해안로-토정로), 서천(희리산), 서천(서인로 225번길)
	2차 조사	2021년 4월 30일~ 2021년 5월 1일	2일	당진(석문산), 태안(학암포길), 보령(오천해안로-토정로), 서천(서인로225번길), 서산(팔봉산)
대상종 분석·선발	3차 조사	2021년 5월 18일~ 2021년 5월 20일	3일	당진(왜목마을, 석문산), 태안(학암포길), 서산(팔봉산), 보령(토정로-오천해안로), 서천(서인로225번길), 서천(희리산)
대상종 모니터링	4차 조사	2021년 7월 1일~ 2021년 7월 3일	3일	서천(서인로225번길), 서천(희리산 자연휴양림), 서천(희리산-지석리 마을회관)
	5차 조사	2021년 7월 28일~ 2021년 7월 30일	3일	당진(왜목마을, 석문산), 태안(학암포길), 서산(팔봉산), 보령(토정로-오천해안로), 서천 (서인로225번길)
	6차 조사	2021년 9월 23일~ 2021년 9월 25일	3일	당진(석문산), 태안(학암포길), 서산(팔봉산), 보령(오천해안로-토정로), 서천(희리산), 서천 (서인로225번길)

나. 조사 방법

- 모니터링 조사는 대상종 집단을 포함하는 조사 방형구를 설치하여 생육상태 및 자생지 환경을 분석하였으며 주변 식생을 포함하여 조사하였음.
 - 조사 방형구 내에서 대상종의 개체군 증감 및 생육상태 확인을 위해 스프레이, 수목 라벨 등을 사용하여 구분함. (그림 5.1)
 - 조사 방형구 내에서 층상구조별로 차지하는 면적에 따라 피도(%)를 계산하고 계절 변화에 따라 변화하는 식생구조 파악을 위해 계절별 반복조사를 수행함.
- 모니터링 지점에서 다양한 식생을 파악하고자 지점당 2회 이상 반복조사를 수행하고 선정된 최종 모니터링 대상종의 1차 모니터링 조사를 수행함.



[그림 5.1] 주요종(좌) 및 조사지(우) 라벨 표시 방법

다. 선정기준

- 3차년도에서 화력발전소 일대의 식물 조사 및 분석을 통해 특산식물, 희귀식물, 식물구계학적특정종, 그리고 기후변화적응대상식물을 통합하여 비교적 중요도가 높은 종류를 구별하여 지역별로 선정함. (3차년도 보고서 pp. 713-714)

- 3차년도 연구성과로 모니터링 후보종은 12분류군의 17지점을 선정하였으며, 장기간 모니터링이 가능한 지역별 2분류군의 2지점을 선발하기 위해서 후보종의 개체수 및 식생조사를 수행하고 선별된 지점별로 2회 이상 조사를 추진하였음.

1.2. 대상종 및 선정사유

1.2.1. 당진 조사구

가. 대상종 선정

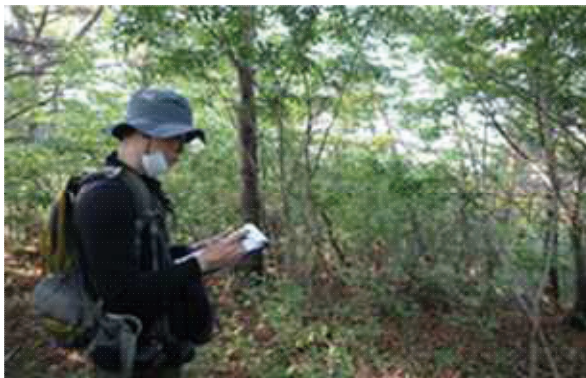
- 당진 모니터링 후보종은 고란초(지점 1)와 장구밥나무(지점 2, 지점 3)로 총 2분류군 3개 지점을 대상으로 예비 조사를 수행함.
- 지점 1의 고란초는 3~4개체가 하나의 patch를 이루며 절벽 바위틈에서 자생하고 있으며 총 5개의 patch가 확인되었고, 절벽이라는 자생지 특성상 주변 식생의 다양성과 피도는 낮았음.
 - 교목층은 없었으며, 아교목층에 소나무 1분류군이 확인되었고 관목층에는 우점하는 진달래를 포함하여 떡갈나무, 신갈나무 등 4분류군, 초본에는 고란초, 대나물 등 2분류군이 조사됨.
- 지점 2의 장구밥나무는 3개체가 산림 내부 등산로 옆에서 자생하고 있었으며, 주변 식생으로는 교목층에 소나무, 아교목층에 소나무, 굴피나무, 밤나무 등 7분류군, 관목층에는 찔레꽃, 땅비싸리, 진달래 등 11분류군이 확인됨. 초본층에는 자주알록제비꽃, 큰까치수염, 털새 등 6분류군이 조사됨.
- 지점 3의 장구밥나무는 4개체가 산림 내 등산로를 가로질러 자생하고 주변 식생으로는 교목층에 소나무 1분류군, 아교목층에 소나무, 굴피나무 등 7분류군, 관목층에 땅비싸리, 진달래 등 11분류군, 초본층에 자주알록제비꽃, 큰까치수염 등 6분류군이 조사됨.

[표 5.2] 당진의 모니터링 대상종 후보

구분	지점 1	지점 2	지점 3
대상종	고란초	장구밥나무	장구밥나무
자생환경	절벽	수림	수림
개체수	5 patch	3개체	4개체
생육상태	양호	양호	양호

나. 선정사유

- 지점 1의 고란초를 반복 조사한 결과, 일부 patch 내의 개체가 건조로 인해 감소하는 경향을 보였으나 여름 이후 조사에서 patch 개수에 변화는 없었으며, patch내에서 개체수가 다시 증가하는 등 생육상태가 양호하였음.
 - 지점 1의 고란초 군락은 절벽에 자생하며 높은 곳에 위치하므로 인위적 훼손이 어려워 지속적인 모니터링이 가능할 것으로 판단되어 최종 대상종으로 선정함.
- 지점 2, 지점 3의 경우 동일 분류군이며 지점이 근접하여 식생이 매우 유사하였으나 지점 2에 장구밥나무는 등산로 옆 산림 초입에 위치하여 인위적 훼손이 우려되고 2차 모니터링에서 개체수가 감소하는 경향을 보여 최종 대상종에서 제외하였음.
- 지점 3의 장구밥나무는 지점 2와 유사한 입지로, 등산로 옆 수림 초입에 위치하였으나, 어린 개체가 새로 나오는 등 조사 방형구 내의 개체수가 증가하는 경향을 보여 최종 모니터링 지점으로 선정함.



[그림 5.2] 모니터링의 조사(좌) 및 지점 3의 장구밥나무 수목 라벨 표시(우)

1.2.2. 태안 조사구

가. 대상종 선정

- 태안 모니터링 후보종은 수리딸기(지점 1)와 팽팽나무(지점 2)로 총 2분류군 2개 지점을 대상으로 예비 조사를 수행함.
- 지점 1의 수리딸기는 16개체가 산림 입구에서 확인되었고, 교목층은 없고 아교목층에 소나무와 곰솔 등 4분류군, 관목층에는 수리딸기, 진달래 등 8분류군, 초본층에 꼬리고사리, 뱀딸기 등 11분류군이 조사됨.
- 지점 2의 팽팽나무는 산림 입구에서 12개체가 조사되었고, 교목층에 소나무 1분류군, 아교목층에 소나무, 밤나무 등 2분류군, 관목층에 신갈나무, 산벚나무 등 10분류군이 확인됨. 초본층에는 꼬리고사리, 오이풀 등 11분류군이 조사됨.

[표 5.3] 태안의 모니터링 대상종 후보

구분	지점 1	지점 2
대상종	수리딸기	팽팽나무
자생환경	수림 초입	수림 초입
개체수	16개체	12개체
생육상태	양호	양호

나. 선정사유

- 지점 1의 수리딸기는 지하경을 통해 새로 올라오는 개체를 포함하여 30개체 이상으로 증가하는 등 생육이 매우 활발하였음.
 - 지점 1은 차량 통행이 가능한 도로 옆에 위치하였으나, 자생지와 도로 사이에 초지가 있어 인위적 훼손 위험은 비교적 낮았음.
 - 왕성한 번식 및 양호한 생육상태 조건을 고려하여 지속적인 모니터링이 가능할 것으로 판단되어 최종 대상종으로 선정함.

- 지점 2의 팽팽나무는 도로 옆 산림 초입에 위치하나, 도로와 수림 사이에 약 0.5m 너비의 수로가 위치하여 인위적인 훼손 위험도가 낮았음.
- 예비 조사에서 개체수 유지 및 생육상태가 양호하여 지속적인 모니터링이 가능할 것으로 판단되어 최종 대상종으로 선정함.



[그림 5.3] 지점 1의 수리딸기 지하경 번식

1.2.3. 보령 조사구

가. 대상종 선정

- 보령 모니터링 후보종은 대팻집나무와 정금나무(지점 1), 병꽃나무(지점 2), 수리딸기(지점 3)으로 총 4분류군 3개 지점을 대상으로 예비 조사를 수행함.
- 지점 1은 대팻집나무 2개체와 정금나무 4개체 산림 내 등산로를 사이에 두고 자생하고 있음. 주변 식생으로는 교목층에 소나무 1분류군, 아교목층에 소나무, 노간주나무 등 7분류군, 관목층에 정금나무, 쥐똥나무 등 10분류군이 조사됨.
- 지점 2의 병꽃나무는 10개체가 확인되었으며, 주변 식생으로는 교목층에 소나무, 졸참나무 등 2분류군, 아교목층에 때죽나무, 쪽동백나무 등 3분류군, 관목층에 곶딸기, 병꽃나무 등 10분류군이 확인됨. 초본층에는 고비, 대사초 등 3분류군이 조사됨.

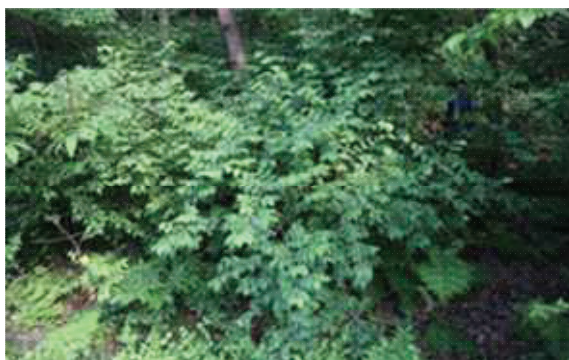
- 지점 3의 수리딸기는 15개체가 확인됨. 주변 식생으로는 교목층에 소나무 1분류군, 아교목층에 굴피나무, 때죽나무 등 3분류군, 관목층에 산벚나무, 수리딸기 등 7분류군, 초본층에 고사리, 노루발 등 7분류군이 조사됨.

[표 5.4] 보령의 모니터링 대상종 후보

지점	지점 1	지점 2	지점 3
대상종	대팻집나무, 정금나무	병꽃나무	수리딸기
자생환경	산림 내부	산림 내부	산림 내부
개체수	대팻집나무 2개체, 정금나무 4개체	10개체	15개체
생육상태	양호	양호	양호

나. 선정사유

- 지점 1의 대팻집나무와 정금나무는 묘소로 가는 임도 옆에 자생하여 벌초 및 이장으로 인한 훼손이 우려되어 최종 대상종에서 제외하였음.
- 지점 2의 병꽃나무는 산림 초입에 위치하였으나 임도와 1m 이상 떨어져 있어 비교적 훼손 위험이 낮았으며 예비 조사에서 개체수가 유지되고 생육상태가 양호하여 대상종으로 선정함.
- 지점 3의 수리딸기는 등산로 옆 산림 초입에 위치하여, 등산객에 의한 훼손이 우려되나, 지하경 번식을 통해 새로 올라오는 개체를 포함하여 총 20개체 확인하고 조사 방형구 내의 대상종의 개체수도 증가하는 경향을 보여 최종 대상종으로 선발함.



[그림 5.4] 보령-지점 2, 3의 병꽃나무(좌)와 수리딸기(우)의 생육상태

1.2.4. 서천 조사구

가. 대상종 선정

- 서천 모니터링 후보종은 검노린재나무(지점 1), 예덕나무(지점 2)로 총 2분류군 2개 지점을 대상으로 예비 조사를 수행함.
- 지점 1의 검노린재나무는 15개체가 확인되었으며, 주변 식생으로는 교목층에 곰솔 1분류군, 아교목층에 검노린재나무, 꾸지뽕나무 등 2분류군, 관목층에 담쟁이덩굴, 명석딸기 등 7분류군, 초본층에 쑥, 주름조개풀 등 3분류군이 조사됨.
- 지점 2의 예덕나무는 6개체가 자생하며 주변 식생으로는 교목층은 없었으며 아교목층에 검노린재나무, 곰솔 등 3분류군, 관목층에 진달래, 찔레꽃 등 4분류군, 초본층에 각시붓꽃, 고사리 등 10분류군이 조사됨.

[표 5.5] 서천의 모니터링 대상종 후보

지점	지점 1	지점 2
대상종	검노린재나무	예덕나무
자생환경	산림 내부 (묘소 주변)	산림 내부 (묘소 주변)
개체수	15개체	6개체
생육상태	양호	양호

나. 선정사유

- 지점 1의 검노린재나무는 묘소 주변으로 분묘 이장 등의 인위적 훼손이 우려되나 묘소와 2m 이상 떨어져 있어 비교적 훼손 위험도가 낮아 최종 대상종으로 선발함.
- 지점 2의 예덕나무는 묘소 주변으로 분묘 이장 등의 인위적 훼손이 우려되나 묘소와 1m 이상 떨어져 있는 산림 초입에 위치하여 비교적 훼손 위험이 낮았음.
 - － 예비 조사결과, 6개체에서 4개체로 개체수가 감소하는 경향이 확인되었으며, 이는 덩굴성 식물인 노박덩굴, 칩이 우점하여 고사한 것으로 판단됨.

- 덩굴성 식물로 인해 조사지점으로의 접근이 어려워 일부 덩굴성 식물을 제거하였고, 이후 조사에서 덩굴성 식물 제거 후 고사목에서 어린순이 나오는 것을 확인한 후 최종 대상종으로 선발함.



[그림 5.5] 검노린재나무 표시 및 생육상태

1.2.5. 서산 팔봉 대조구

가. 대상종 선정

- 팔봉산(대조구)의 모니터링 후보종은 사람주나무(지점 1), 소사나무(지점 2), 붉은병꽃나무(지점 3), 수리딸기(지점 4)로 총 4분류군 4개 지점을 대상으로 예비 조사를 수행함.
- 지점 1의 사람주나무는 10개체가 확인되었고, 주변 식생으로는 교목층에 소나무, 굴참나무 등 2분류군, 아교목층에 굴피나무, 사람주나무 등 2분류군, 관목층에 진달래, 생강나무 등 13분류군, 초본층에는 애기나리 1분류군이 조사됨.
- 지점 2의 소사나무는 4개체가 확인됨. 주변 식생으로는 교목층이 없었으며, 아교목층에 신갈나무, 소나무 등 5분류군, 관목층에 진달래, 생강나무 등 10분류군, 초본층에 그늘사초, 둥굴레 등 4분류군이 조사됨.

- 지점 3의 붉은병꽃나무는 10개체가 조사되었으며, 주변 식생으로는 교목층이 없었으며 아교목층에 굴참나무, 신갈나무 등 3분류군, 관목층에 진달래, 쥐똥나무 등 13분류군, 초본층에 말뚝비름, 개별꽃 등 10분류군이 조사됨.
- 지점 4의 수리딸기는 5개체로 조사되었고, 교목층에 졸참나무, 신나무 등 2분류군, 아교목층에 졸참나무, 쪽동백 등 2분류군, 관목층에 곰솔, 산벚나무 등 8분류군, 초본층에 꿩의밥, 서양민들레 등 8분류군이 조사됨.

[표 5.6] 팔봉산(대조구)의 모니터링 대상종 후보

지점	지점 1	지점 2	지점 3	지점 4
대상종	사람주나무	소사나무	붉은병꽃나무	수리딸기
자생환경	산림 내부	산림 내부	산림 내부	임도 옆 사면
개체수	10개체	4개체	10개체	5개체
생육상태	양호	양호	양호	양호

나. 선정사유

- 지점 1의 사람주나무는 정비된 등산로 옆에 위치하였으나 1.5m 이상 떨어져 있는 산림 초입으로 등산로와 자생지 사이에 큰 바위가 위치하여 등산객 접근에 의한 인위적 훼손 위험도는 낮았음. 2회 이상의 예비 조사결과, 개체수 유지 및 생육상태가 양호하여 최종 대상종으로 선발함.
- 지점 2의 소사나무는 등산로 옆에 위치하였으나 큰 바위가 가로막고 있고, 경사진 사면에 자생하여 등산객 접근에 의한 인위적 훼손 위험도는 낮았음. 2회 이상의 반복조사 결과, 개체수 유지 및 생육상태가 양호하여 최종 대상종으로 선발함.
- 지점 3의 붉은병꽃나무는 계단으로 정비된 정상부 등산로 옆에 위치하였으며, 경사가 급하고 계단에서 식물체로의 접근이 어려워 인위적 훼손 위험도는 낮았음. 그러나 장마 등 폭우에 의한 사면 토양유실이 우려되어 최종 모니터링 대상종에서 제외함.

- 지점 4의 수리딸기는 정비된 임도 옆 사면에 위치하였으나, 차량 통행이 가능한 임도로 도로 정비 및 등산객 접근에 의한 인위적 훼손 위험이 높아 지속적인 모니터링이 불가능할 것으로 판단되어 최종 대상종에서 제외함.



[그림 5.6] 사람주나무 모니터링 현장 조사(좌)와 대상종 생육상태(우)

1.2.6. 서천 희리산 대조구

가. 대상종 선정

- 희리산(대조구)의 모니터링 후보종은 검노린재나무(지점 1), 수리딸기(지점 2), 팽팽나무(지점 3)로 총 3분류군 3개 지점을 대상으로 예비 조사를 수행함.
- 지점 1의 검노린재나무는 6개체가 확인되었으며, 주변 식생으로는 교목층에 곰솔, 소나무 등 2분류군, 아교목층에 검노린재나무, 굴참나무 등 4분류군, 관목층에는 졸참나무, 감태나무 등 11분류군, 초본층에 그늘사초, 털새 등 4분류군이 조사됨.
- 지점 2의 수리딸기는 10개체가 확인되었으며, 주변 식생으로는 교목층이 없었고, 아교목층에 곰솔, 소나무 등 2분류군, 관목층에 굴참나무, 팽팽나무 등 15분류군, 초본층에 가는잎죽제비고사리, 고비 등 9분류군이 조사됨.

- 지점 3의 팽팽나무는 1개체가 확인되었으며, 주변 식생으로는 교목층은 없었고, 아교목층에는 곶술, 소나무 등 2분류군, 관목층에는 수리딸기, 진달래 등 12분류군, 그리고 초본층에는 삼주, 그늘사초 등 2분류군이 조사됨.

[표 5.7] 희리산(대조구)의 모니터링 대상종 후보

지점	지점 1	지점 2	지점 3
대상종	검노린재나무	수리딸기	팽팽나무
자생환경	산림 내부	산림 내부	산림 내부
개체수	6개체	10개체	1개체
생육상태	양호	양호	양호

나. 선정사유

- 지점 1의 검노린재나무는 등산로 옆 1m 이상 떨어진 곳에서 자생하고 있으나, 등산로가 명확하게 잘 정비되어 있어 검노린재나무의 자생지로 등산객의 접근 가능성이 낮아 인위적 훼손 위험도가 낮았음.
 - 2회 이상 조사로 개체수 유지 및 생육상태가 양호하여 지속적인 모니터링이 가능할 것으로 판단되어 최종 대상종으로 선발함.
- 지점 2의 수리딸기는 지점 1의 검노린재나무와 유사한 입지로, 등산로 옆 1m 이상 떨어진 곳에 자생하고 있었음. 그러나 휴양림의 등산로가 잘 정비되어 있어 등산객의 접근 가능성이 낮으므로 인위적 훼손 위험도가 낮았음.
 - 지하경 번식을 통해 어린 개체 다수가 새로 확인되는 등 개체수 증가 경향을 보여 최종 대상종으로 선발함.
- 지점 3의 팽팽나무는 등산로와 약 1.5m 가량 떨어져 있어 등산객 접근에 의한 인위적 훼손 위험도는 낮았으나, 1개체가 확인되어 등산로 정비 등 훼손에 매우 취약하여 최종 대상종에서 제외함.



[그림 5.7] 사람주나무 생육상태(좌)와 수리딸기 대상종 표시(우)

[표 5.8] 예비 조사결과 선정된 최종 대상종 목록

지역	모니터링 후보종 (3차년도 선정)	최종 대상종 선정 여부 (약어)	비고
당진	고란초	○ (당진 1)	장구밥나무의 서로 다른 지점(지점 2, 3) 중에서, 다양한 식물상 및 지속적 모니터링이 가능한 지점으로 최종 선정
	장구밥나무	·	
	장구밥나무	○ (당진 2)	
태안	수리딸기	○ (태안 1)	개체수 유지 및 생육상태가 양호하여 최종 선정
	광광나무	○ (태안 2)	
보령	대팻집나무	·	대팻집나무(지점 1)는 묘소 옆으로 벌초 및 이장으로 인한 인위적 훼손 우려로 제외
	병꽃나무	○ (보령 1)	
	수리딸기	○ (보령 2)	
서천	검노린재나무	○ (서천 1)	개체수 유지 및 생육상태가 양호로 선정
	예덕나무	○ (서천 2)	
팔봉산	사람주나무	○ (팔봉산 1)	붉은병꽃나무(지점 3)는 급경사지로 사면 토양유실 우려로 대상종에서 제외
	소사나무	○ (팔봉산 2)	
	붉은병꽃나무	·	수리딸기(지점 4)는 임도 근처 사면으로 도로 정비 및 등산객에 의한 인위적 훼손 우려로 제외
	수리딸기	·	
희리산	검노린재나무	○ (희리산 1)	광광나무(지점 3)는 적은 개체수로 간벌 등 인위적 훼손 우려로 제외
	수리딸기	○ (희리산 2)	
	광광나무	·	

1.3. 주요종 모니터링

- 예비 조사를 통해 지역별로 각각 2분류군, 2개 지점을 최종 모니터링 대상종으로 선정하여 주요종의 생태환경 모니터링 및 대상종의 개체수 변화 추이를 파악함.
 - 지역별 2개체가 선정됨에 따라 대상종의 ‘지역명(분류군명)’으로 숫자와 모니터링 지점의 명칭을 새로 부여함. (표 5.8)
- 모니터링 대상종의 개체수 변화를 연차별로 비교 분석하였으며, 계절에 따른 생육상태가 다르므로 2021년 봄 조사를 기점으로 구분하였음. (표 5.1 참고)
 - 최종 선발된 대상종의 조사 방형구 내 층별 분류군수는 1~2차 조사와 3~6차 조사결과를 비교 분석하였음.

1.3.1. 당진 조사구

가. 모니터링 결과

- 고란초는 절벽 사면에 5 patch가 자생하고 있어 주변 식생이 빈약하였음. ▲교목층은 없었고 ▲아교목층은 소나무 1분류군, ▲관목층은 조록싸리, 소나무 등 2분류군을 추가하여 총 5분류군이 조사되었음 ▲초본층은 억새 1분류군이 추가로 조사되어 총 3분류군이 조사되었음.
 - 층별 피도는 아교목층, 관목층, 초본층 모두 1%미만이었음.

[표 5.9] 고란초 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	고란초
분포 면적	patch당 0.2 x 0.2 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N37 02.544 E126 31.375, 10m
교목층	.
아교목층	소나무
관목층	떡갈나무, 신갈나무, 진달래, 조록싸리, 소나무
초본층	고란초, 대나무, 억새

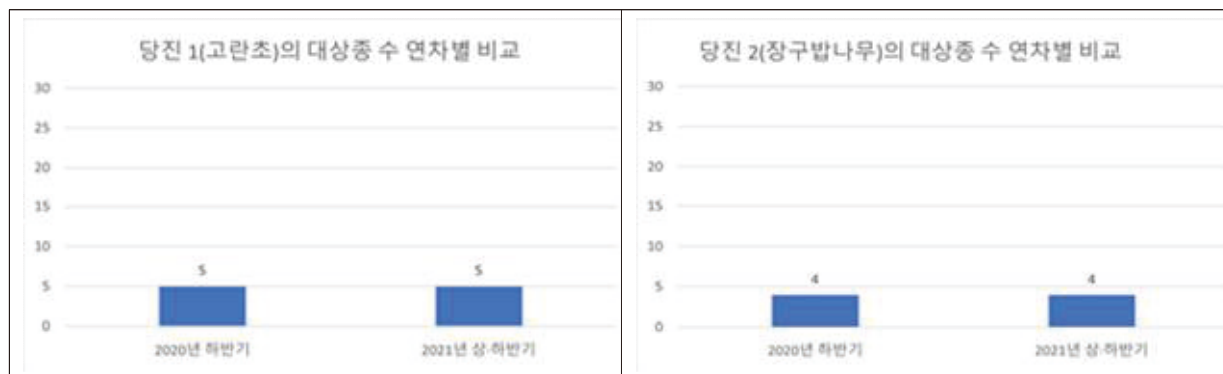
- 장구밥나무의 주변 식생으로는 ▲교목층에 소나무 1분류군, ▲아교목층은 다릅나무 1분류군이 추가되어 총 8분류군이 조사되었음. ▲관목층은 수리딸기, 떡갈나무 등 2분류군이 추가로 조사되어 총 13분류군이 확인되었음. ▲초본층은 방울비짜루, 으아리 등 6분류군이 추가로 조사되어 총 12분류군이 조사되었음.
- 층별 피도는 교목층 80%, 아교목층 80%, 관목층 10%였으며 초본층은 5%미만으로 빈약하였음.

[표 5.10] 장구밥나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	장구밥나무
분포 면적	4 x 4 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N37 02.912 E126 31.299, 38m
교목층	소나무
아교목층	소나무, 굴피나무, 밤나무, 굴참나무, 산벚나무, 산초나무, 장구밥나무, 다릅나무
관목층	굴피나무, 신갈나무, 떡갈나무, 졸참나무, 생강나무, 산벚나무, 짚레꽃, 땅비싸리, 아까시나무, 장구밥나무, 진달래, 청미래덩굴, 수리딸기
초본층	댕댕이덩굴, 자주알록제비꽃, 큰까치수염, 털새, 주름조개풀, 그늘사초, 방울비짜루, 으아리, 삼주, 당잔대, 실새풀, 파리풀

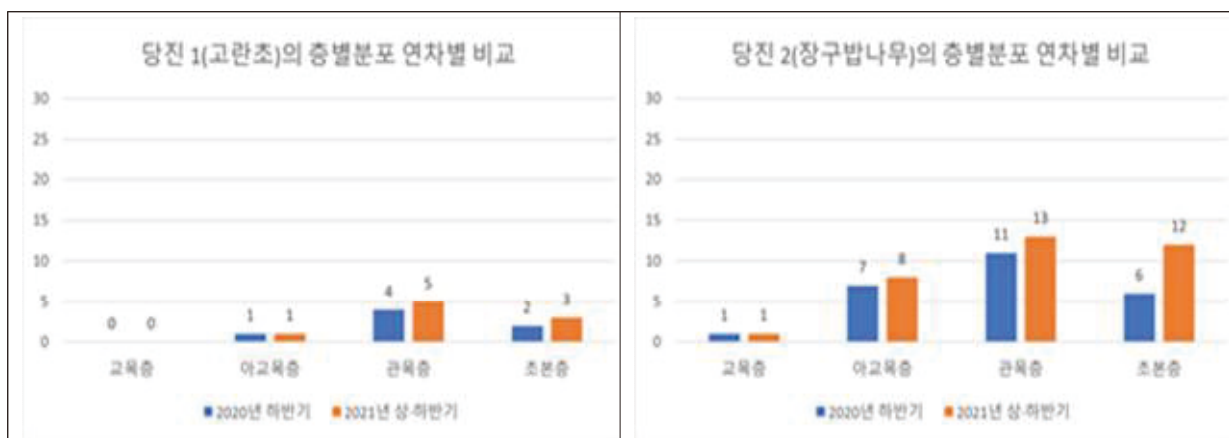
나. 연차별 비교

- 고란초 모니터링 조사결과, 5개 patch로 유지되었고, 장구밥나무는 4개체로 유지되었음.



[그림 5.8] 당진 1(고란초), 당진 2(장구밥나무)의 대상종 수 연차별 비교

- 고란초와 장구밥나무 층별 분포를 확인한 결과 고란초는 교목층은 없고, 아교목층에 1분류군으로 반복 조사에 의한 변화는 없었으며, 관목층은 4분류군에서 5분류군, 초본층은 2분류군에서 3분류군으로 새로운 식물종의 분포가 확인됨.
- 장구밥나무의 교목층은 1분류군으로 반복조사에 의한 변화는 없었으며, 아교목층은 7분류군에서 8분류군, 관목층은 11분류군에서 13분류군, 초본층에서 6분류군에서 12분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.



[그림 5.9] 고란초와 장구밥나무 층별 분포 연차별 비교

1.3.2. 태안 조사구

가. 모니터링 결과

- 수리딸기 조사 방형구내에 ▲교목층은 없었으며, ▲아교목층은 쪽동백 1분류군이 추가로 확인되어 총 5분류군이 분포하였음. ▲관목층은 조록싸리, 신갈나무 등 4분류군이 추가되어 총 12분류군이 조사되었고 ▲초본층은 개망초, 마타리 등 18분류군이 추가되어 총 29분류군이 조사되었음.
- － 층별 피도는 아교목층 100%, 관목층 100%, 초본층 40%로 조사됨.

[표 5.11] 수리딸기 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	수리딸기
분포 면적	1.5 x 1.5 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 54.007 E126 13.350, 37m
교목층	.
아교목층	소나무, 곰솔, 신갈나무, 졸참나무, 쪽동백
관목층	굴피나무, 고욤나무, 산딸기, 산벚나무, 산초나무, 수리딸기, 신갈나무, 싸리, 조록싸리, 졸참나무, 진달래, 청미래덩굴
초본층	개망초, 고깔제비꽃, 고사리, 그늘사초, 남산제비꽃, 두메담배풀, 둥근털제비꽃, 독갈, 마타리, 산조풀, 선밀나물, 쑥, 양지꽃, 억새, 오리새, 오이풀, 제비꽃, 주름조개풀, 참취, 청사초, 칩, 그령, 달맞이꽃, 들깨풀, 맑은대쑥, 실새풀, 매듭풀, 큰까치수염, 파리풀

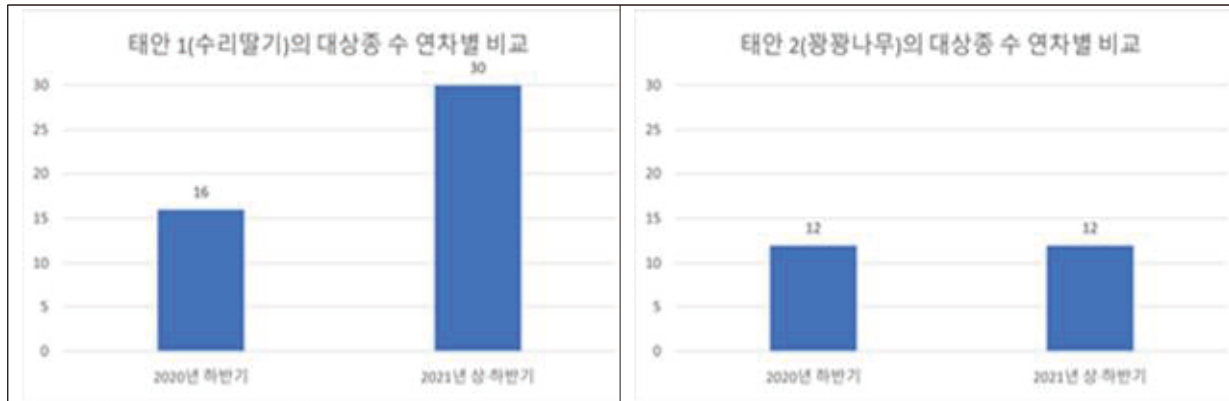
- 팥팥나무 조사 방형구내에 ▲교목층은 소나무 1분류군, ▲아교목층은 산벚나무, 아까시나무 등 4분류군이 추가 조사되어 총 6분류군의 분포가 확인되었음. ▲관목층은 굴피나무, 새머루 등 4분류군이 추가조사 되어 총 14분류군이 조사됨. ▲초본층은 강아지풀, 그령 등 24분류군이 추가되어 총 35분류군이 확인됨.
- 층별피도는 교목층 50% 아교목층 80%, 관목층 80%, 초본층은 10% 미만으로 조사됨.

[표 5.12] 팥팥나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	팥팥나무
분포 면적	2 x 5 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 53.950 E126 13.415, 40m
교목층	소나무
아교목층	밤나무, 굴피나무, 산벚나무, 소나무, 졸참나무, 아까시나무
관목층	굴피나무, 팥팥나무, 담쟁이덩굴, 밤나무, 산벚나무, 새머루, 신갈나무, 싸리, 조록싸리, 진달래, 쪽동백, 찔레꽃, 칩, 청미래덩굴,
초본층	가는잎죽제비고사리, 강아지풀, 고비, 그늘사초, 그령, 꼬리고사리, 썩의밥, 남산제비꽃, 땃쟁이덩굴, 더덕, 들깨풀, 등골나물, 마타리, 망초, 뽕나무, 미국자리공, 바랭이, 뽕딸기, 뽕쑥, 선밀나물, 실새풀, 쑥, 양지꽃, 억새, 오이풀, 우산나물, 제비꽃, 조밥나물, 주름조개풀, 쥐꼬리망초, 참취, 청미래덩굴, 청사초, 칩, 환삼덩굴

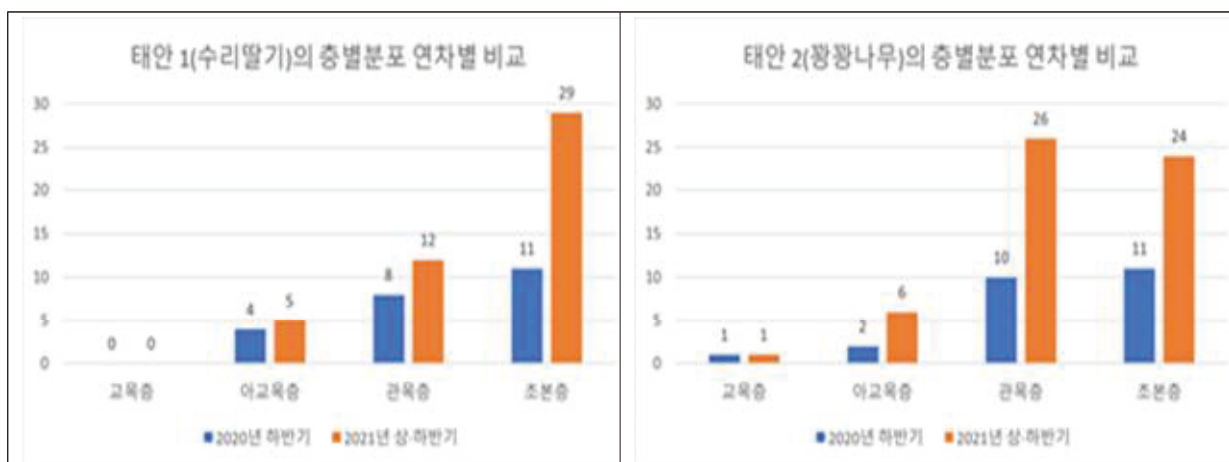
나. 연차별 비교

- 수리딸기는 16개체에서 30개체로 개체수가 증가하였고, 팽팡나무는 12개체로 유지됨.



[그림 5.10] 수리딸기와 팽팡나무 대상종 수 연차별 비교

- 수리딸기 교목층은 없었고, 반복조사에도 없었으며 아교목층은 4분류군에서 5분류군, 관목층은 8분류군에서 12분류군, 초본층은 11분류군에서 29분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.
- 팽팡나무 교목층은 1분류군으로 반복조사에 의한 변화는 없었으며, 아교목층은 2분류군에서 6분류군, 관목층은 10분류군에서 26분류군, 초본층은 11분류군에서 24분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.



[그림 5.11] 수리딸기와 팽팡나무 층별분포 연차별 비교

1.3.3. 보령 조사구

가. 모니터링 결과

- 병꽃나무의 조사 방형구 내에 ▲교목층 산벚나무 1분류군이 추가로 조사되어 총 3분류군이 조사됨. ▲아교목층은 졸참나무 1분류군이 추가 조사되어 총 4분류군이 확인되었음. ▲관목층은 굴참나무, 대팻집나무 등 13분류군이 추가되어 총 23분류군이 확인되었음. ▲초본층은 애기족제비고사리, 일월비비추 등 8분류군이 추가로 조사되어 총 11분류군이 확인되었음.
- 층별 피도는 교목층 100%, 아교목층 10%, 관목층 100%였으며 초본층은 5%미만으로 빈약하였음.

[표 5.13] 병꽃나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	병꽃나무
분포 면적	3 x 3 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 23.537 E126 30.049, 30m
교목층	소나무, 졸참나무, 산벚나무
아교목층	때죽나무, 붉나무, 쪽동백, 졸참나무
관목층	개암나무, 개웃나무, 곰딸기, 굴참나무, 굴피나무, 노간주나무, 대팻집나무, 덜꿩나무, 때죽나무, 멧석딸기, 밤나무, 병꽃나무, 산검양꽃나무, 산벚나무, 산초나무, 생강나무, 소나무, 으름덩굴, 조록싸리, 졸참나무, 진달래, 청미래덩굴, 팔배나무
초본층	고비, 고사리, 대사초, 들깨풀, 물레나물, 붉은서나물, 산박하, 실새풀, 오리새, 원추리, 파리풀

- 수리딸기의 조사 방형구 내의 ▲교목층은 소나무 1분류군이었고, ▲아교목층은 산벚나무, 산딸나무 등 4분류군이 추가 조사되어 총 7분류군의 분포가 확인되었음. ▲관목층은 굴참나무, 대팻집나무 등 8분류군이 추가되어 총 15분류군이 조사되었으며 ▲초본층은 솜나물, 미역취 등 5분류군이 추가되어 총 12분류군이 확인되었음.
- 층별 피도는 교목층 80%, 아교목층 80%, 관목층 50%였으며 초본층은 20%미만으로 조사됨.

[표 5.14] 수리딸기 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	수리딸기
분포 면적	5 x 2 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 23.507 E126 29.561, 50m
교목층	소나무
아교목층	굴피나무, 대팻집나무, 때죽나무, 산검양꽃나무, 산벚나무, 산딸나무, 소나무
관목층	굴참나무, 굴피나무, 노간주나무, 대팻집나무, 땅비싸리, 때죽나무, 산벚나무, 산초나무, 수리딸기, 싸리, 졸참나무, 쥐똥나무, 진달래, 청가시덩굴, 청미래덩굴
초본층	고사리, 기름나물, 노루발, 땃대덩굴, 미역취, 새, 송나물, 실새풀, 썸바귀, 억새, 제비꽃, 주름조개풀

나. 연차별 비교

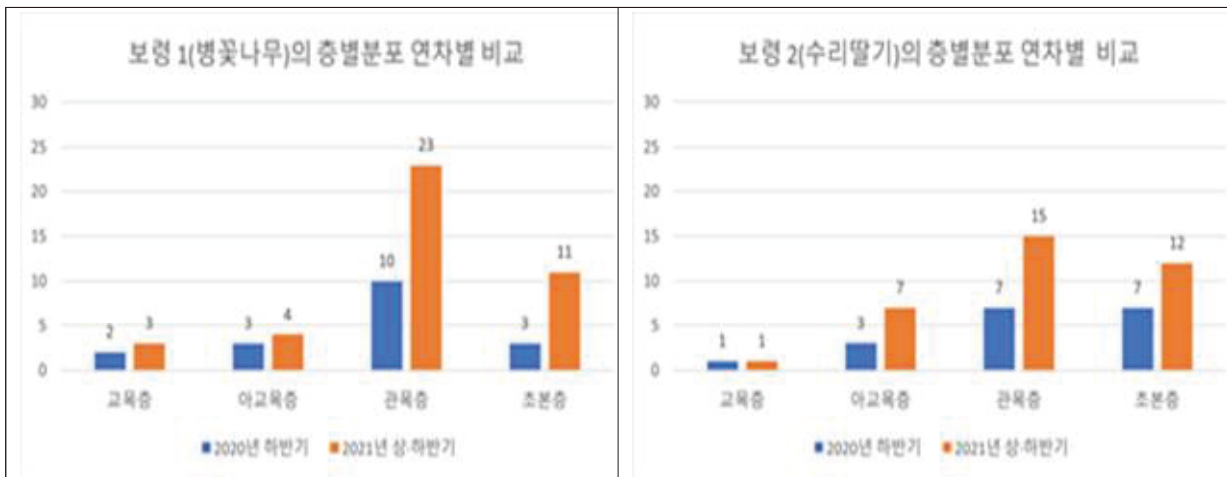
- 병꽃나무는 10개체로 유지되었고 수리딸기는 15개체에서 20개체로 개체수가 증가함.



[그림 5.12] 병꽃나무와 수리딸기 대상종 수 연차별 비교

- 보령 1(병꽃나무)의 교목층은 2분류군에서 3분류군으로 추가되었고 아교목층은 3분류군에서 4분류군, 관목층은 10분류군에서 23분류군, 초본층은 3분류군에서 11분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.

- 보령 2(수리딸기)의 교목층은 1분류군으로 반복조사에 의한 변화는 없었으며, 아교목층은 3분류군에서 7분류군, 관목층은 7분류군에서 15분류군, 초본층은 7분류군에서 12분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.



[그림 5.13] 병꽃나무와 수리딸기 층별분포 연차별 비교

1.3.4. 서천 조사구

가. 모니터링 결과

- 검노린재나무의 조사 방형구 내 ▲교목층은 곰솔 1분류군이었으며, ▲아교목층은 산벚나무, 곰솔 등 2분류군이 추가 조사되어 총 4분류군이 확인되었음. ▲관목층은 검노린재나무가 우점하며, 노박덩굴, 진달래 등 6분류군이 추가되어 총 13분류군이 조사됨. ▲초본층은 계요등, 땃대이덩굴 등 13분류군이 추가 조사되어 총 16분류군이 확인되었음.
- 층별피도는 교목층 40%, 아교목층 80%, 관목층 50%였으며 초본층은 5%미만으로 빈약하였음.

[표 5.15] 검노린재나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	검노린재나무
분포 면적	5 x 5 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 08.318 E126 30.087, 33m
교목층	곰솔
아교목층	검노린재나무, 꾸지뽕나무, 산벚나무, 곰솔
관목층	검노린재나무, 굴참나무, 꾸지뽕나무, 노박덩굴, 담쟁이덩굴, 땅비싸리, 멍석딸기, 사위질빵, 예덕나무, 졸참나무, 진달래, 찔레꽃, 청미래덩굴
초본층	개망초, 계요등, 닭의덩굴, 담쟁이덩굴, 땃덩이덩굴, 망초, 뽕싹, 속털개밀, 썩, 억새, 엉겅퀴, 인동덩굴, 주름조개풀, 참마, 파리풀, 환삼덩굴

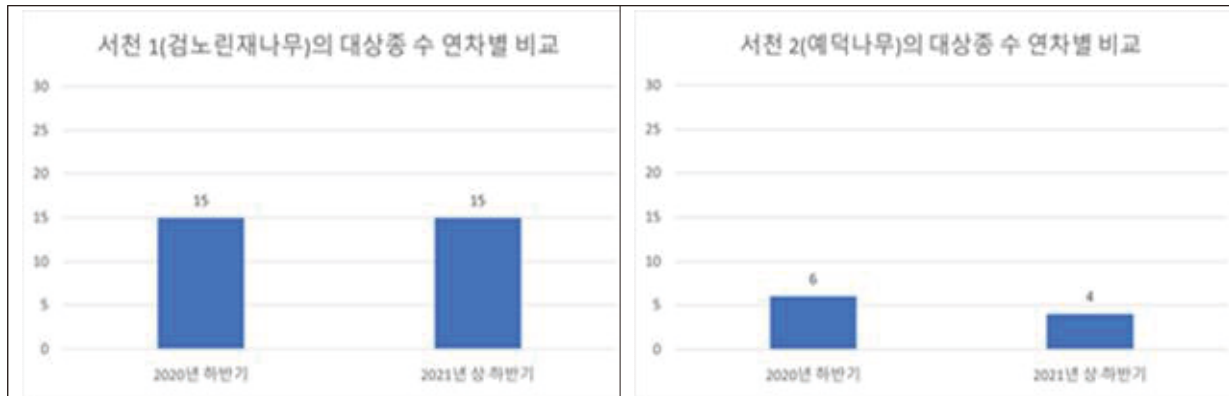
- 예덕나무 조사 방형구 내의 ▲교목층 없었으며, ▲아교목층에 노박덩굴, 아까시나무 등 2분류군이 추가 조사되어 총 5분류군이 확인되었음. ▲관목층은 칙, 멍석딸기 등 6분류군이 추가되어 총 10분류군이 조사되었고 ▲초본층은 개망초, 파리풀 등 11분류군이 추가로 확인되어 총 21분류군으로 조사됨.
- 층별 피도는 아교목층 40%, 관목층 80%였으며 초본층은 20%미만으로 조사됨.

[표 5.16] 예덕나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	예덕나무
분포 면적	5 x 5 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 08.541 E126 29.989, 24m
교목층	
아교목층	검노린재나무, 노박덩굴, 아까시나무, 예덕나무, 해송
관목층	노박덩굴, 멍석딸기, 산딸기, 예덕나무, 으름덩굴, 진달래, 찔레꽃, 청미래덩굴, 칙, 팽나무
초본층	각시붓꽃, 개기장, 개망초, 계요등, 고사리, 달맞이꽃, 땃덩이덩굴, 두메담배풀, 망초, 머느리배꼽, 미국개기장, 미역취, 실새풀, 양지꽃, 엉겅퀴, 인동덩굴, 산박하, 주름조개풀, 청사초, 큰까치수염, 파리풀

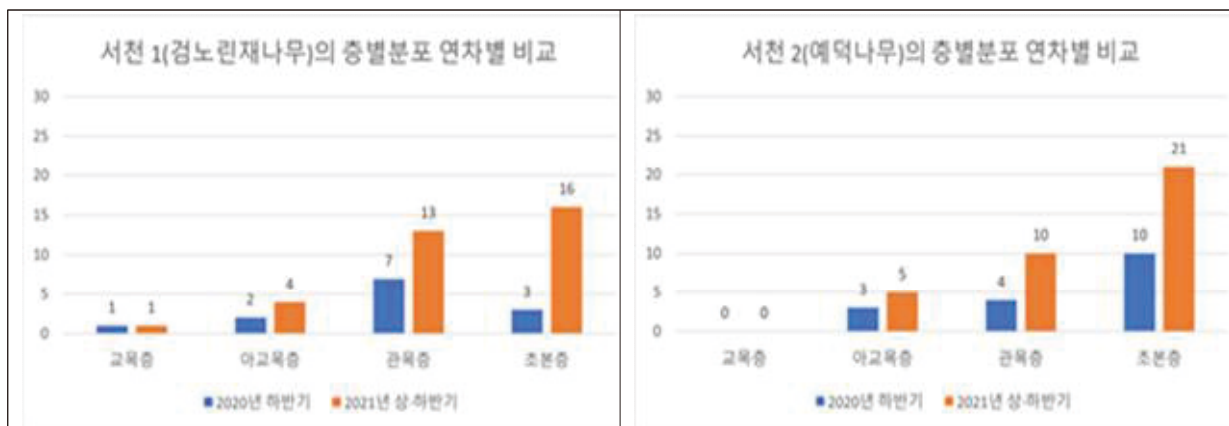
나. 연차별 비교

- 검노린재나무는 15개체로 유지되었고, 예덕나무는 6개체에서 4개체로 개체수가 감소함.



[그림 5.14] 검노린재나무와 예덕나무 대상종 수 연차별 비교

- 서천 1(검노린재나무)의 교목층은 1분류군으로 반복조사에 의한 변화는 없었으며, 아교목층은 2분류군에서 4분류군, 관목층은 7분류군에서 13분류군, 초본층은 3분류군에서 16분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.
- 서천 2(예덕나무)의 교목층은 없었고 반복조사에도 확인되지 않았으며, 아교목층은 3분류군에서 5분류군, 관목층은 4분류군에서 10분류군, 초본층은 10분류군에서 21분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.



[그림 5.15] 검노린재나무와 예덕나무 층별분포 연차별 비교

1.3.5. 서산 팔봉산 대조구

가. 모니터링 결과

- 사람주나무 조사 방형구 내의 ▲교목층 소나무, 굴참나무 등 2분류군이 조사되었으며, ▲아교목층에 노린재나무 1분류군이 추가 조사되어 총 3분류군이 확인되었음. ▲관목층은 청미래덩굴, 산초나무 등 9분류군이 추가되어 총 22분류군이 조사되었고 ▲초본층은 가는잎죽제비고사리, 땃대이덩굴 등 5분류군이 추가 조사되어 6분류군이 확인됨.
- 층별피도는 교목층 100%, 아교목층 50%, 관목층 80%, 초본층 5%미만으로 조사됨.

[표 5.17] 사람주나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	사람주나무
분포 면적	4 x 4 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 48.487 E126 22.123, 165m
교목층	굴참나무, 소나무
아교목층	굴피나무, 노린재나무, 사람주나무
관목층	고로쇠, 노린재나무, 다릅나무, 덜꿩나무, 등나무, 때죽나무, 붉은병꽃나무, 비목나무, 사람주나무, 산벚나무, 산초나무, 새머루, 생강나무, 신갈나무, 울괴불나무, 작살나무, 쥐똥나무, 진달래, 참빗살나무, 청가시덩굴, 청미래덩굴, 팔배나무
초본층	가는잎죽제비고사리, 남산제비꽃, 땃대이덩굴, 선밀나물, 애기나리, 주름조개풀

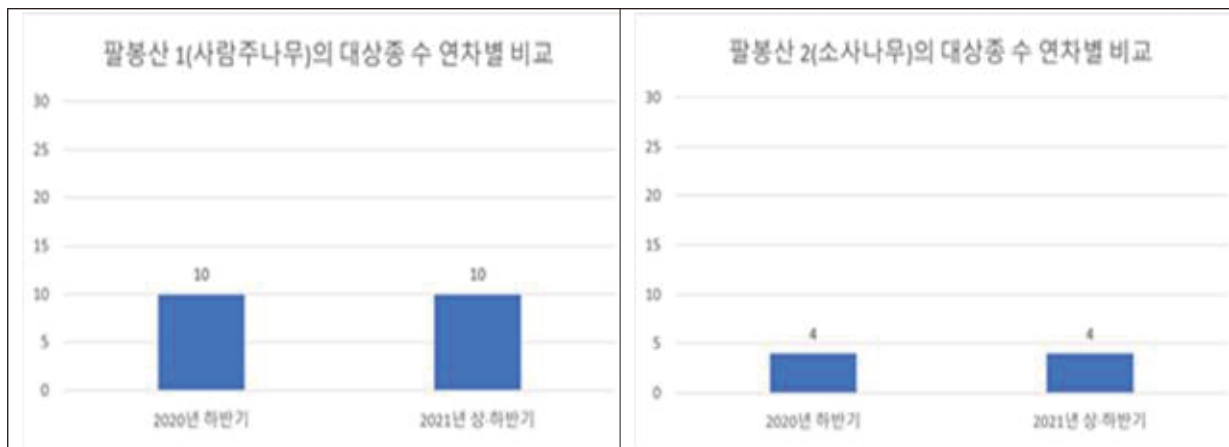
- 소사나무 조사 방형구 내의 ▲교목층은 없었으며 ▲아교목층은 팔배나무 1분류군이 추가 조사되어 총 6분류군이 확인되었음. ▲관목층은 굴참나무, 조록싸리 등 4분류군이 추가 되어 총 14분류군이 조사되고 ▲초본층은 털새 1분류군이 추가로 확인되어 총 5분류군이 조사됨.
- 층별 피도는 아교목층 90%, 관목층 60%, 초본층은 5%미만으로 조사됨.

[표 5.18] 소사나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	소사나무
분포 면적	5 x 3 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 48.413 E126 22.168, 263m
교목층	.
아교목층	산벚나무, 소나무, 소사나무, 신갈나무, 떡갈나무, 팔배나무
관목층	굴참나무, 때죽나무, 땅비싸리, 물푸레나무, 붉은병꽃나무, 비목나무, 산벚나무, 생강나무, 소사나무, 신갈나무, 조록싸리, 진달래, 초피나무, 팔배나무
초본층	그늘사초, 둥굴레, 억새, 주름조개풀, 털새

나. 연차별 비교

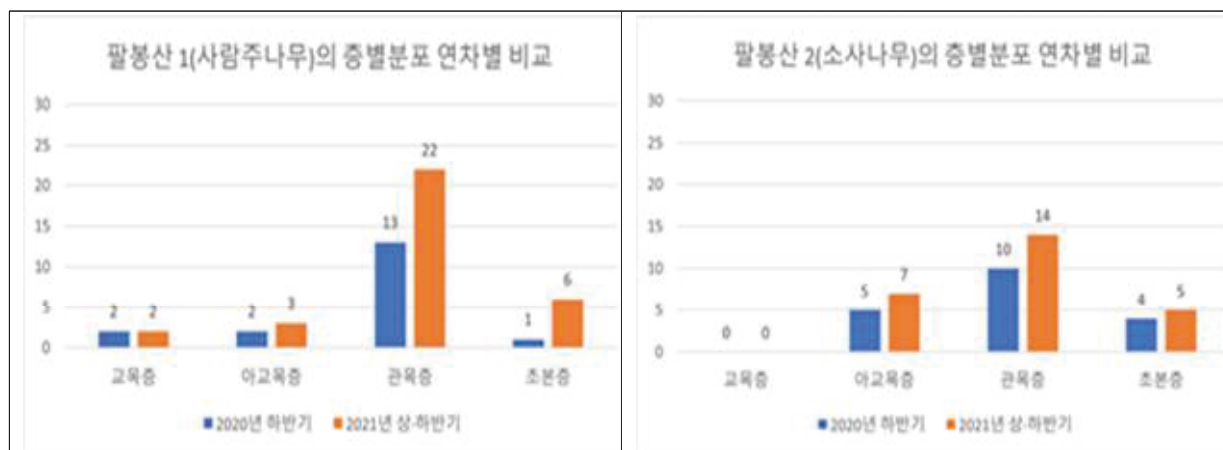
○ 사람주나무는 10개체로, 소사나무는 4개체로 유지됨.



[그림 5.16] 사람주나무와 소사나무 대상종 수 연차별 비교

- 팔봉산 1(사람주나무)의 교목층은 2분류군으로 반복조사에 의한 변화는 없었으며, 아교목층은 2분류군에서 3분류군, 관목층은 13분류군에서 22분류군, 초본층은 1분류군에서 6분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인되었음.
- 팔봉산 2(소사나무)의 교목층은 없었고 반복조사에도 없었으며, 아교목층은 5분류군에서

7분류군, 관목층은 10분류군에서 14분류군, 초본층은 4분류군에서 5분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.



[그림 5.17] 사람주나무와 소사나무 층별분포 연차별 비교

1.3.6. 서천 희리산 대조구

가. 모니터링 결과

- 검노린재나무 조사 방형구 내의 ▲교목층은 곰솔, 소나무 등 2분류군이 조사되었고 ▲아교목층은 산검양옻나무, 감태나무 등 2분류군이 추가 조사되어 총 6분류군이 확인됨. ▲관목층은 노간주나무, 청미래덩굴 등 4분류군이 추가되어 총 15분류군이 조사되었고, ▲초본층은 파리풀, 산조풀 등 5분류군이 추가 조사되어 총 9분류군이 확인됨.
- 층별 피도는 교목층 30%, 아교목층 100%, 관목층 50%였으며 초본층은 20% 미만으로 조사됨.

[표 5.19] 검노린재나무 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	검노린재나무
분포 면적	4 x 4 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 06.559 E126 39.533, 116m
교목층	곰솔, 소나무
아교목층	감태나무, 검노린재나무, 굴참나무, 밤나무, 산검양옻나무, 산벚나무
관목층	갈참나무, 개암나무, 굴참나무, 굴피나무, 노간주나무, 덜꿩나무, 땅비싸리, 감태나무, 산벚나무, 생강나무, 졸참나무, 조록싸리, 진달래, 찔레꽃, 청미래덩굴
초본층	고사리, 그늘사초, 땃대이덩굴, 도라지, 산조풀, 오리방풀, 주름조개풀, 털새, 파리풀

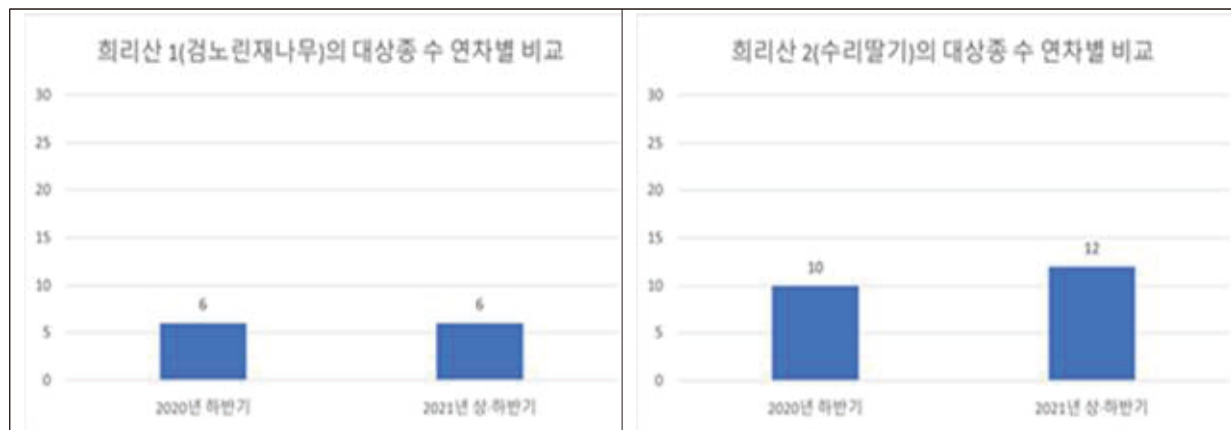
- 수리딸기 조사 방형구 내의 ▲교목층은 없었으며 ▲아교목층은 굴피나무, 산벚나무 등 2분류군이 추가 조사되어 총 4분류군이 확인됨. ▲관목층은 땅비싸리, 찔레꽃 등 4분류군이 추가로 조사되어 총 19분류군이 확인되었고, ▲초본층은 땃대이덩굴 1분류군이 추가로 확인되어 총 10분류군으로 조사됨.
- 층별피도는 아교목층 10%, 관목층 70%였으며 초본층은 10%미만으로 낮았음.

[표 5.20] 수리딸기 모니터링 조사결과

지점	주요 내용
대상종	수리딸기
분포 면적	5 x 5 m ²
위경도(GPS) 및 고도(m)	N36 06.541 E126 39.542, 89m
교목층	.
아교목층	소나무, 곰솔, 굴피나무, 산벚나무
관목층	개암나무, 굴참나무, 검노린재나무, 단풍나무, 담쟁이덩굴, 땃대덩굴, 달팽나무, 땅비싸리, 산검양꽃나무, 산딸기, 산벚나무, 생강나무, 수리딸기, 조록싸리, 졸참나무, 쥐똥나무, 찔레꽃, 청미래덩굴, 감태나무
초본층	가는잎죽제비고사리, 계요등, 고비, 그늘사초, 땃대덩굴, 삼주, 맑은대쭉, 실새풀, 주름조개풀, 큰까치수염

나. 연차별 비교

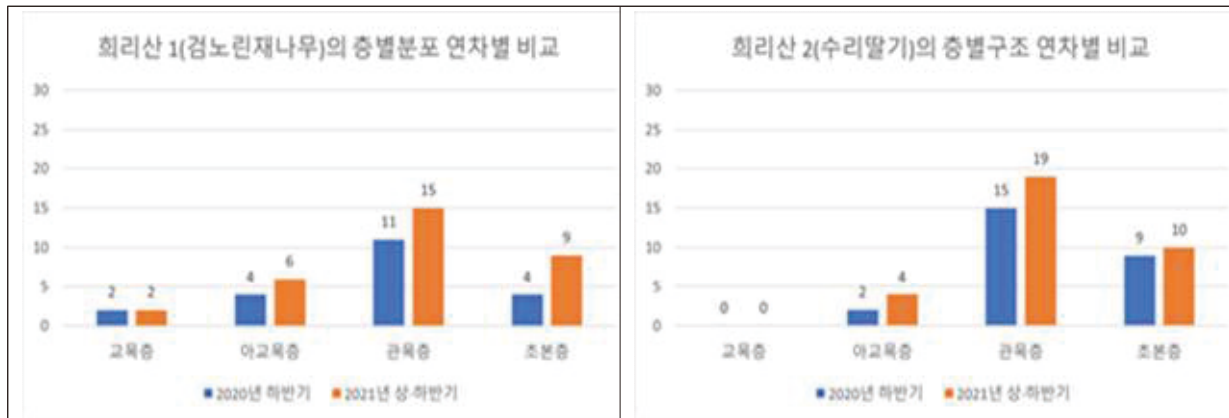
- 검노린재나무 6개체로 유지되었고, 수리딸기는 10개체에서 12개체로 개체수가 증가함.



[그림 5.18] 검노린재나무와 수리딸기 대상종 수 연차별 비교

- 희리산 1(검노린재나무)의 교목층은 2분류군으로 반복조사에 의한 변화는 없었으며, 아교목층은 4분류군에서 6분류군, 관목층은 11분류군에서 15분류군, 초본층은 4분류군에서 9분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.

- 희리산 2(수리딸기)의 교목층은 없었고 반복조사에도 확인되지 않았으며, 아교목층은 2분류군에서 4분류군, 관목층은 15분류군에서 19분류군, 초본층은 9분류군에서 10분류군으로 새로운 식물종의 분포가 추가로 확인됨.



[그림 5.19] 검노린재나무와 수리딸기 층별분포 연차별 비교

1.4. 요약 및 소결론

- 충청남도 소재 화력발전소 일대의 주요종 모니터링을 위하여 3차년도에서 선발된 후보종을 대상으로 예비 조사를 2회 이상 실시함.
 - － 예비 조사결과를 토대로, 인위적 교란 및 장마, 홍수 등 훼손의 위험도가 비교적 낮으며 지속적으로 변화 추이를 관찰할 수 있는 분류군 및 조사지점을 지역별로 각각 2분류군 2개 지점씩 선정하였음.
 - － 지역별로는 당진-고란초와 장구밥나무, 태안-수리딸기와 팡팡나무, 보령-병꽃나무와 수리딸기, 서천-검노린재나무와 예덕나무, 팔봉산-사람주나무와 소사나무, 희리산-검노린재나무와 수리딸기가 최종 선정됨.
- 지역별로 조사 방형구 내 귀화식물은 각각 당진 1분류군, 태안 6분류군, 보령 2분류군, 서천 8분류군이었으며, 대조구인 서산 팔봉산과 서천 희리산에서는 분포를 확인할 수 없었음.
 - － 실험구 4개 지역의 귀화율은 10.84%였으며, 대조구 2개 지역은 8.44%로 대조구에 비해 화력발전소 일대가 2.4% 높게 분석되었는데, 귀화식물 분류군의 수가 이를 뒷받침하는 것을 확인하였음.

- 주요종의 모니터링을 2회 이상 반복 조사한 결과, 개체수 감소 추세를 보인 대상종은 조사구인 서천의 예덕나무(6개체 → 4개체)이며, 이는 칩, 노박덩굴 등 덩굴성 식물의 피압으로 개체수가 감소된 것으로 판단됨.
- 개체수 증가 추세를 보인 대상종은 수리딸기로, 조사구인 태안 1(16개체 → 30개체), 보령 2(15개체 → 20개체) 지점에서 개체수 증가가 확인되었으며. 대조구인 희리산 2(10개체 → 12개체)에서 개체수 증가가 확인되어 지역별로 증가량 차이는 있었으나, 출현 지역에서 개체수가 모두 증가하였음. 이는 수리딸기가 지하경 번식을 통해 어린 개체 다수가 새로 출현(그림 5.3)하여 전반적으로 개체수가 증가한 것으로 판단됨.
- 3차년(2020년)과 4차년도(2021년) 연구를 위해 주요종 선정 후 화력발전소 주변 지역에 의한 영향을 파악하고자 특정종을 모니터링하였음.
 - － 연구 결과 화력발전소에 의한 영향보다는 주변 환경에 의한 일시적인 변화일 가능성이 있는 것으로 확인되었고 식물의 경우, 포유류 및 곤충 등 이동성을 갖는 동물에 비해 환경 변화에 대해 비교적 내성을 가지므로 짧은 기간 동안 식물 분포의 변화를 확인하기는 어려웠음.
 - － 따라서 본 연구에서 수행된 식물상 및 모니터링 조사를 토대로, 5년 이상의 장기간 모니터링 및 환경 스트레스 기작 등 식물 생리학적 연구가 필요할 것으로 판단됨.

2. 곤충분야

2.1. 조사시기 및 방법

가. 조사시기

- 곤충분야 주요종 모니터링은 후보종 현지조사 및 대상종 예비조사는 1차 2차로 구분하여 각각 2018년 6월 및 9월에 실시하고 대상종 모니터링은 2019년 9월과 2020년 7월, 2021년 5월에 걸쳐 3차례 진행함.

[표 5.21] 모니터링 대상종(곤충) 조사 시기

구분	차수	조사시기	조사일수	조사지역					
				A	B	C	D	E	F
후보종 현지 조사/ 모니터링 대상종 예비 조사	1차	2018년 6월 18일 ~ 2018년 6월 22일	5일	○	○	○	○	○	-
	2차	2018년 9월 03일 ~ 2018년 9월 07일	5일	○	○	○	○	○	-
대상종 선발/ 대상종 모니터링	3차	2019년 9월 19일 ~ 2019년 9월 22일	4일	-	-	-	○	○	○
대상종 모니터링	4차	2020년 7월 06일 ~ 2020년 7월 09일	4일	○	○	○	○	○	○
	5차	2021년 5월 24일 ~ 2021년 5월 27일	4일	○	○	○	○	○	○

나. 조사방법

- 선정된 모니터링 대상종은 지표배회성 곤충으로, 기존 함정트랩(Pitfall trap) 조사와 동일한 방법으로 조사 (3차년도 보고서 495~496페이지 참조)를 수행하였음.
- 모니터링 대상종을 포함하여 채집된 전체 지표배회성 곤충의 종 구성, 종수 및 개체수를 바탕으로 지역별 군집 간 유사도를 분석하기 위해 MEDIAN(1)&KRUSKAL_WALLIS(2) 쌍대검정을 실시하였음.

다. 선정기준

- 함정트랩을 이용해 조사하는 지표배회성 곤충은 다양도지수, 군집구조 등 정량적 분석이 용이한 분류군으로, 생태계 안정성 및 건정성 평가 등 환경평가지표로 이용되는 곤충 분류군을 조사 대상으로 선정함.
 - － 일반적으로 지표배회성 곤충의 다양성이 높은 지역은 생태적으로 안정된 지역으로 평가됨.
 - － 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레는 상위포식자인 동시에 광식성 포식자에 해당하며, 산림생태계 내의 다양한 종에 영향을 미침.
 - － 윤납작먼지벌레, 일본칠납작먼지벌레, 폭탄먼지벌레, 쌍무늬먼지벌레는 조사지역 내 지표배회성 군집에서 개체수가 풍부한 우점종으로 확인됨.
 - － 고려소똥풍뎡이는 포유류의 배설물을 섭식하는 분식성 곤충으로, 포유류의 다양성 및 개체수를 간접적으로 평가할 수 있는 지표 중 하나임.
- 선정기준에 따라 6개 조사지역에서 관찰된 지표배회성 곤충은 당진조사구에서 15종 204개체, 태안조사구에서 30종 565개체, 보령조사구에서 22종 327개체, 서천조사구에서 10종 159개체, 서산대조구에서 22종 466개체, 서천대조구에서 21종 266개체가 채집됨.

[표 5.22] 주요종 모니터링(곤충) 채집 결과

조사지역	조사시기별 채집결과					
	예비 1차 (' 18년 6월)	예비 2차 (' 18년 9월)	1차	2차	3차	합계
당진조사구	9종 65개체	7종 16개체	－	11종 53개체	11종 70개체	15종 204개체
태안조사구	18종 166개체	16종 73개체	－	22종 196개체	17종 130개체	30종 565개체
보령조사구	14종 85개체	10종 18개체	－	16종 113개체	16종 111개체	22종 327개체
서천조사구	5종 15개체	6종 33개체	6종 17개체	9종 49개체	7종 45개체	10종 159개체
서산대조구	12종 114개체	13종 49개체	4종 9개체	20종 173개체	15종 121개체	22종 466개체
서천대조구	－	－	5종 12개체	20종 121개체	11종 103개체	21종 266개체

2.2. 주요종 모니터링 결과

2.2.1. 당진 조사구

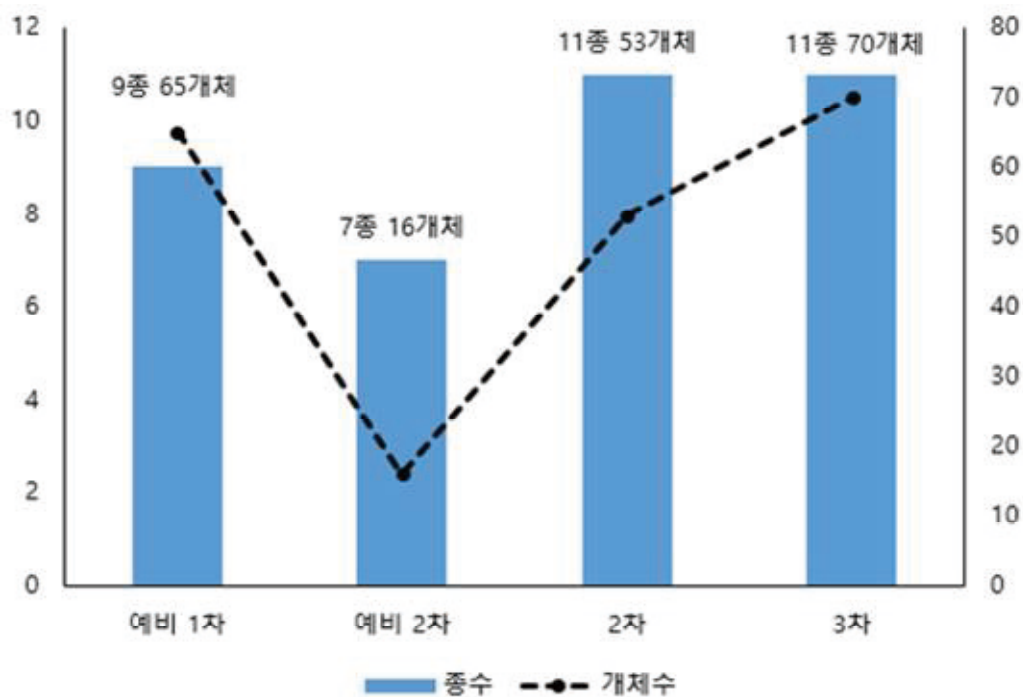
- 당진 조사구에서 채집된 15종 204개체의 지표배회성 곤충 중 모니터링 대상종은 5종 123개체였으며, 각종의 개체수 및 우점도는 윤납작먼지벌레가 60개체(29.4%), 일본칠납작먼지벌레가 30개체(14.7%), 폭탄먼지벌레가 19개체(9.3%), 쌍무늬먼지벌레가 11개체(5.4%), 고려소똥풍뎅이 3개체(1.5%)로 확인됨.

[표 5.23] 당진 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화

종명	개체수					우점도(%)
	예비 1차	예비 2차	2차	3차	합계	
윤납작먼지벌레	24	4	14	18	60	29.4
일본칠납작먼지벌레	—	—	9	21	30	14.7
쌍무늬먼지벌레	7	1	2	1	11	5.4
폭탄먼지벌레	—	—	6	13	19	9.3
고려소똥풍뎅이	—	—	1	2	3	1.5

- 당진조사구에서는 모니터링대상종 중 대형딱정벌레류인 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레가 확인되지 않았음.
 - 대형딱정벌레류는 토양무척추동물 군집에서 상위포식자에 해당하며, 해당 종들의 다양성 및 풍부도는 이들의 주요 먹이원인 곤충류, 지렁이류, 달팽이류 등 무척추동물의 다양성과 풍부도를 반영함.
 - 윤납작먼지벌레와 일본칠납작먼지벌레는 지표배회성 곤충 군집에서 일반적으로 우점하는 종들이나, 특정 종의 우점도가 지나치게 높을 경우 종다양성 지수 등의 군집지수가 감소하고 생태계의 안정성이 저감될 수 있으므로 지속적인 모니터링이 필요함.
 - 포유류의 배설물을 먹이로 하는 고려소똥풍뎅이의 출현을 통해 당진조사구 내 포유류의 서식을 간접적으로 확인할 수 있으며, 소똥풍뎅이류의 종수 및 개체수 변화를 통해 포유류의 다양성 및 풍부도를 간접적으로 평가할 수 있었음.

- 주요종 모니터링조사 시 당진조사구에서 확인된 지표배회성 곤충(모니터링 대상종 포함)의 종수는 예비 1, 2차 조사에서 각각 9종, 7종이었으며, 2차 및 3차 조사에서는 11종이 확인되어 예비 1, 2차 조사때 (2018년 6월, 9월) 보다 다소 증가하였음.
 - 개체 수의 경우 예비 2차 조사에서 일시적 감소 후 증가하여 종수와 유사한 경향을 보였고, 대상종의 종수는 예비 1, 2차에서 윤납작먼지벌레와 쌍무늬먼지벌레 2종이 확인되었으며, 2차 및 3차 조사에서 일본칠납작먼지벌레, 폭탄먼지벌레, 고려소똥풍뎡이가 추가로 확인되어 5종으로 증가하였음.
 - 2~3차와 같이 지표배회성 곤충 종수가 지속 증가하는 경향이 지속될 경우 당진조사구 내 곤충생태계 건전성 회복의 근거로 활용할 수 있을 것으로 판단됨.



[그림 5.20] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(당진조사구)

- 당진조사구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 대조구 평균 대비 69.8%, 개체수는 55.7%로 서산 팔봉산 및 서천 희리산 대조구에 비해 낮게 나타남.
 - 당진조사구의 경우 서산 팔봉산 및 서천 대조구에서 확인된 대형딱정벌레류가 출현하지 않아 무척추동물 군집의 다양성이 비교적 낮은 것으로 사료되며, 이는 대조구 평균에 비해 당진조사구의 종수 및 개체수가 낮게 나타난 점과 부합함.

2.2.2. 태안 조사구

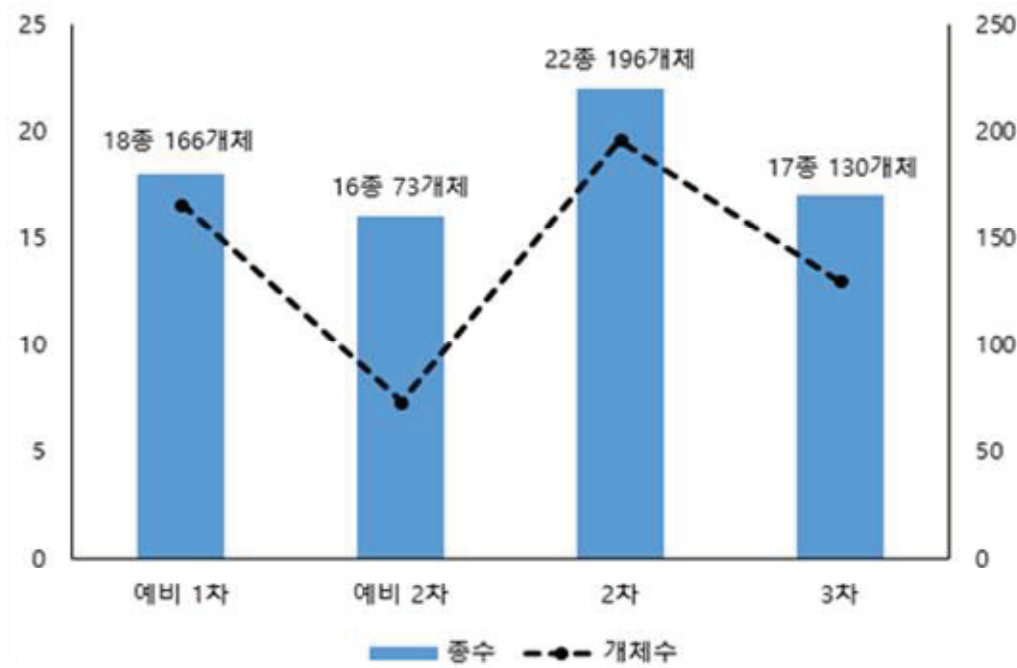
- 태안 조사구에서 채집된 30종 565개체의 지표배회성 곤충 중 모니터링 대상종은 6종 162개체였으며, 각종의 개체수 및 우점도는 윤납작먼지벌레가 77개체(13.6%), 쌍무늬먼지벌레가 71개체(12.6%)로 확인됨.
- 홍단딱정벌레, 검정명주딱정벌레, 폭탄먼지벌레, 멧쟁이딱정벌레는 5개체 이하가 출현하여 상대적으로 낮은 우점도를 보였음.

[표 5.24] 태안 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화

종명	개체수					우점도(%)
	예비 1차	예비 2차	2차	3차	합계	
검정명주딱정벌레	3	—	1	—	4	0.7
홍단딱정벌레	—	1	2	2	5	0.9
멧쟁이딱정벌레	—	—	—	2	2	0.4
윤납작먼지벌레	19	—	38	20	77	13.6
쌍무늬먼지벌레	26	18	—	27	71	12.6
폭탄먼지벌레	—	—	—	3	3	0.5

- 광식성 포식자인 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레와 같은 대형 딱정벌레류의 서식이 확인됨에 따라 태안조사구는 해당 종들의 먹이원인 곤충류 및 토양 무척추동물이 풍부한 것으로 판단됨.
- 윤납작먼지벌레, 쌍무늬먼지벌레, 폭탄먼지벌레는 흔하게 관찰되는 지표배회성 곤충으로서 일반적으로 개체수가 풍부한 종들이며, 향후 해당 종들의 개체수 및 우점도 변화를 통해 생태계 안정성 등을 간접적으로 평가할 수 있었음.
 - 주요종 모니터링 조사시 태안조사구에서 모니터링 대상종인 고려소똥벌레는 확인되지 않았으나, 생태적 특성이 유사한 꼬마외뿔소똥벌레, 마틴소똥벌레 등의 서식이 확인되어 해당 지역에 포유류가 지속적으로 서식하고 있는 것으로 판단됨.

- 주요종 모니터링조사 시 태안조사구에서 확인된 지표배회성 곤충(모니터링 대상종 포함)의 시기별 종수는 예비 1차에서 3차 조사까지 16~22종으로 불규칙한 증감을 보였으며, 개체수 역시 73~196개체로 일정한 경향을 보이지 않았음.
 - 태안조사구에서 확인된 모니터링 대상종의 종수는 예비 1차 3종, 예비 2차 2종, 2차 3종, 3차 5종이 확인됨.
 - 태안조사구에서 확인된 곤충의 종수 및 개체수는 4개 조사구 및 2개 대조구 중 가장 많았는데, 이는 시기별 곤충의 종수 및 개체수가 일정한 경향성을 나타내지 않은 것이 인위적 교란이나 생태계의 변화로 인한 것이 아닌 곤충 각 종의 생태적 특성에 따른 출현 및 활동 시기의 영향인 것으로 판단됨.



[그림 5.21] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(태안조사구)

- 태안조사구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 서산 팔봉산 및 서천 희리산 대조구의 평균 종수 대비 139.5%, 개체수는 154.4%로 대조구에 비해 높게 나타남.
 - 태안조사구는 서산 팔봉산 및 서천 희리산 대조구에 비해 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수가 많은 것으로 나타났는데, 이는 화력발전소에 의한 영향의 여부 또는 정도의 차이가 아닌, 태안해안국립공원으로 인한 풍부한 먹이 자원의 유입으로 인한 영향으로 판단됨.

2.2.3. 보령 조사구

- 보령 조사구에서 채집된 22종 327개체의 지표배회성 곤충 중 모니터링 대상종은 7종 156개체였으며, 각종의 개체수 및 우점도는 일본칠납작먼지벌레가 60개체(18.3%), 윤납작먼지벌레가 51개체(15.6%), 쌍무늬먼지벌레가 28개체(8.6%), 폭탄먼지벌레가 11개체(3.4%)였으며 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레, 검정명주딱정벌레는 4개체 이하로 상대적으로 낮은 우점도를 보였음.

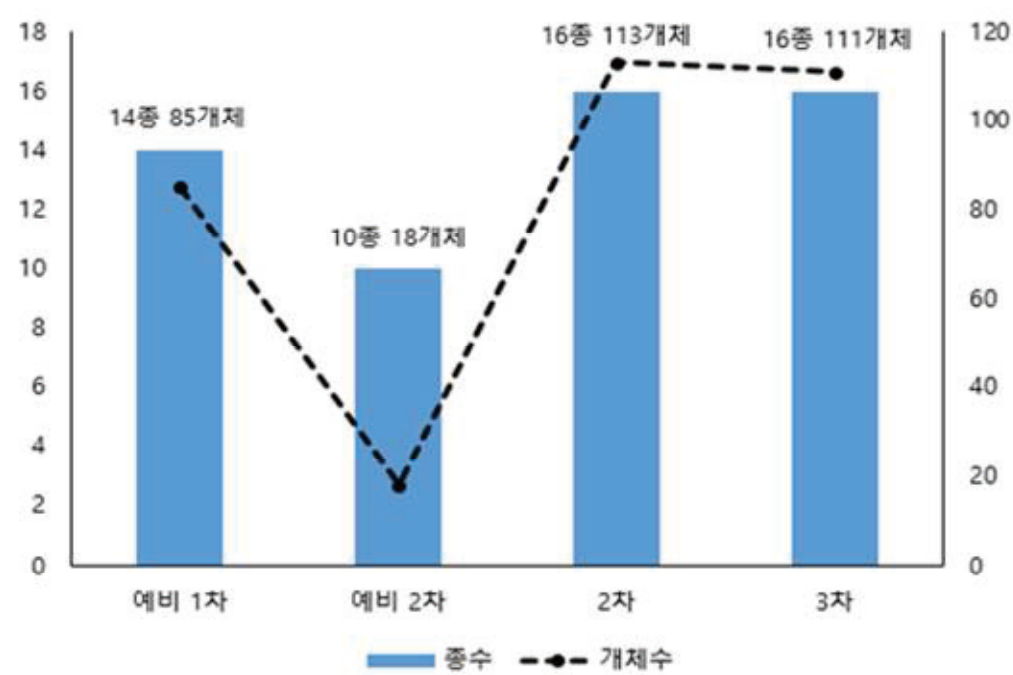
[표 5.25] 보령 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화

종명	개체수					우점도(%)
	예비 1차	예비 2차	2차	3차	합계	
검정명주딱정벌레	—	—	1	—	1	0.3
홍단딱정벌레	—	1	1	2	4	1.2
멧쟁이딱정벌레	—	—	—	1	1	0.3
윤납작먼지벌레	11	2	22	16	51	15.6
일본칠납작먼지벌레	—	—	29	31	60	18.3
쌍무늬먼지벌레	15	—	8	5	28	8.6
폭탄먼지벌레	—	—	6	5	11	3.4

- 검정명주딱정벌레 등 대형 딱정벌레류의 서식이 확인됨에 따라 해당 종들의 먹이인 곤충류 및 토양 무척추동물이 풍부한 것으로 판단됨.
- 윤납작먼지벌레, 일본칠납작먼지벌레, 쌍무늬먼지벌레, 폭탄먼지벌레 등 일반적으로 흔히 관찰되는 먼지벌레류의 서식이 확인되었으며, 모니터링 대상종 중 포유류의 배설물을 먹이로 하는 고려소똥풍뎅이의 서식은 확인되지 않았으나, 해당 종과 유사한 생태적 특성을 가진 혹가슴검정소똥풍뎅이가 확인되어 조사구 내 포유류의 서식을 간접적으로 판단할 수 있었음.
- 주요종 모니터링조사시 보령조사구에서 확인된 지표배회성 곤충(모니터링 대상종 포함)의 시기별 종수는 예비 1, 2차에서 각각 14종, 10종이 확인되었으며, 2, 3차 조사에서 각각

16종이 확인되어 예비 2차조사에서 일시적 감소후 증가하여 당진조사구의 시기별 종수와 유사한 경향을 나타냄.

- 보령조사구에서 확인된 모니터링 대상종의 종수는 예비 1차 2종, 예비 2차 2종, 2차 6종, 3차 6종이 확인되었고, 개체수의 경우 예비 1, 2차에서 각각 85종, 18개체가 확인되었으며, 2, 3차 조사에서 각각 113개체, 111개체가 확인되어 예비 2차 조사에서 일시적 감소 후 증가하여 시기별 종수 변화와 유사하게 나타남.
- 짧은 기간 동안 이루어진 모니터링으로 곤충군집의 변화를 구체적으로 판단하기는 어려우나, 향후 종수 및 개체수의 증가 경향이 지속적으로 확인될 경우 조사구 내 곤충군집의 건전성이 회복되고 있는 것으로 판단할 수 있었음.



[그림 5.22] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(보령조사구)

- 보령조사구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 서산 팔보산 및 서천 희리산 대조구 평균 대비 102.3%, 개체수는 89.3%로 대조구와 유사하게 나타남.
- 보령조사구는 태안조사구, 서산 팔봉산 및 서천 대조구와 마찬가지로 대형딱정벌레류의 서식이 확인되었고, 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수가 조사구 및 대조구에 비해 비교적 많은 것으로 확인되어 대형딱정벌레류의 서식 여부를 통해 곤충 군집의 건전성 및 안정성을 간접적으로 평가할 수 있었음.

2.2.4. 서천 조사구

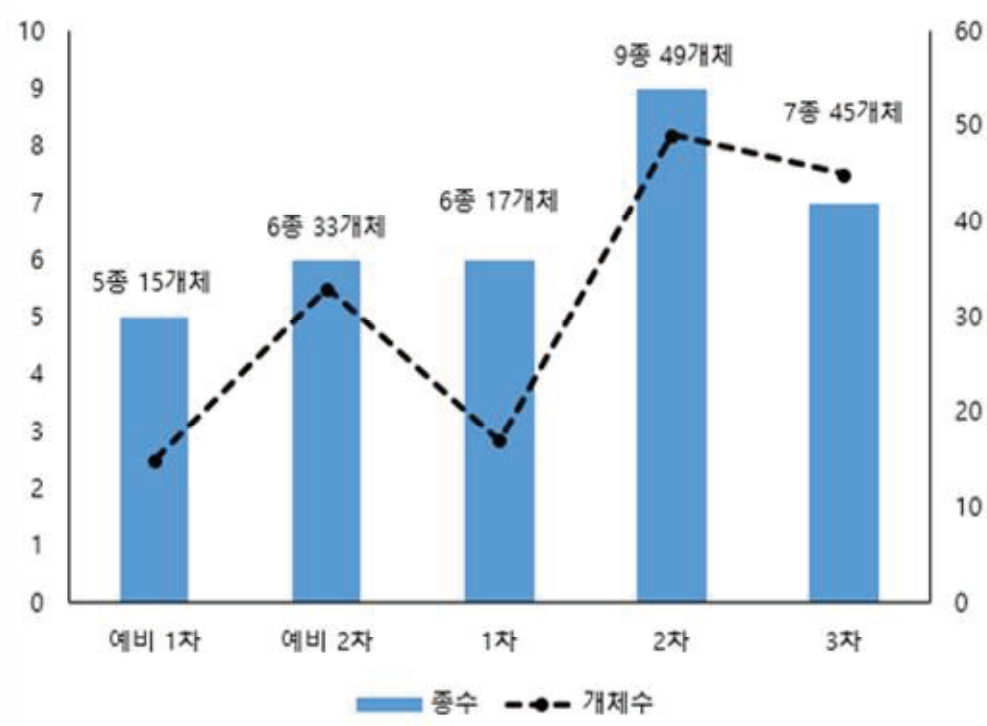
- 서천 조사구에서 채집된 10종 159개체의 지표배회성 곤충 중 모니터링 대상종은 4종 109개체였으며, 각종의 개체수 및 우점도는 일본칠납작먼지벌레와 쌍무늬먼지벌레가 각각 32개체(20.1%), 윤납작먼지벌레가 27개체(17.0%), 폭탄먼지벌레가 18개체(11.3%)로 확인됨.

[표 5.26] 서천 조사구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화

종명	개체수						우점도(%)
	예비 1차	예비 2차	1차	2차	3차	합계	
윤납작먼지벌레	1	4	3	11	8	27	17.0
일본칠납작먼지벌레	—	—	—	16	16	32	20.1
쌍무늬먼지벌레	4	12	6	6	4	32	20.1
폭탄먼지벌레	—	—	—	6	12	18	11.3

- 서천조사구에서는 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레와 같은 대형 딱정벌레류가 확인되지 않아 당진조사구와 유사한 경향을 보였으며, 이는 두 조사구 내 지표배회성 곤충 및 지표성 무척추동물 군집의 다양성 및 풍부도가 낮음을 의미함.
 - 대형딱정벌레류의 서식이 확인되지 않은 당진조사구 및 서천조사구의 지표배회성 곤충 종수 및 개체수는 대조구 평균에 비해 낮은 것으로 확인되어 대형딱정벌레류의 서식 여부에 따른 곤충 군집의 건전성 평가와 부합함.
 - 서천조사구에서는 이번 조사 중 고려소똥풍뎡이를 포함한 소똥풍뎡이류는 확인되지 않았으나, 포유류의 배설물을 먹이로 하는 멸종위기 야생생물Ⅱ급인 애기뿔소똥구리가 출현한 점을 고려할 때 소똥풍뎡이류의 서식가능성이 높으며, 이에 따라 조사구 내 포유류의 서식을 유추할 수 있음.
- 주요종 모니터링 조사시 서천조사구에서 확인된 지표배회성 곤충(모니터링 대상종 포함)의 시기별 종수는 예비 1, 2차에서 각각 5종, 6종이 확인되었으며, 1~3차 조사에서 각각 6종, 9종, 7종이 확인되어 조사 시기에 따른 일정한 경향이 나타나지 않음.

- 서천조사구에서 확인된 모니터링 대상종의 종수는 예비 1차 2종, 예비 2차 2종, 1차 2종, 2차 4종, 3차 4종이 확인되었고, 개체수의 경우 예비 1, 2차에서 각각 15종, 33개체가 확인되었으며, 1~3차 조사에서 각각 17개체, 49개체, 45개체가 확인되어 시기별 종수 변화와 유사한 경향을 보임.
- 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수는 조사시기에 따라 일정한 경향성을 보이지 않았으나, 향후 지속적인 연구를 통해 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수 변화에서 뚜렷한 경향성이 관찰될 경우 조사구 내 곤충군집의 건전성 변화를 판단할 수 있을 것으로 사료됨.



[그림 5.23] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(서천조사구)

- 서천조사구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 서산 팔봉산 및 서천 희리산 대조구 평균 대비 46.5%, 개체수는 43.4%로 대조구에 비해 현저히 적은 것으로 확인됨.
 - 서천조사구는 당진조사구와 동일하게 대형딱정벌레류의 서식이 확인되지 않았으며, 이는 해당 종들의 먹이원인 곤충류 및 지표성 무척추동물의 다양성 및 풍부도가 낮은 영향 때문인것으로 판단됨.

2.2.5. 서산 팔봉산 대조구

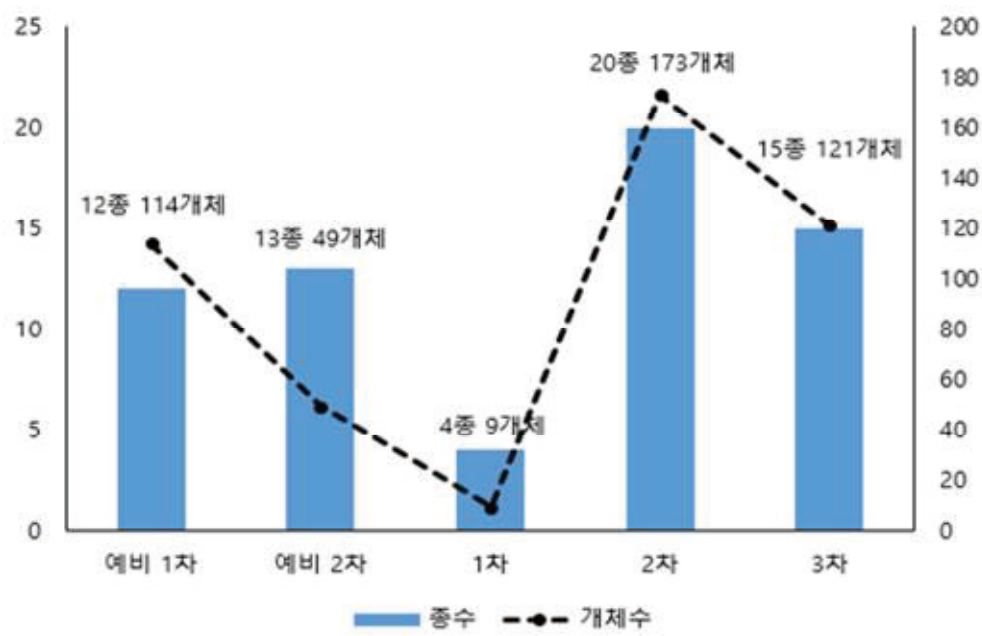
- 서산 팔봉산 대조구에서 채집된 22종 466개체의 지표배회성 곤충 중 모니터링 대상종은 4종 201개체였으며, 각종의 개체수 및 우점도는 윤납작먼지벌레가 106개체(22.7%), 쌍무늬먼지벌레가 83개체(17.8%), 홍단딱정벌레가 8개체(1.7%), 멧쟁이딱정벌레가 4개체(0.9%)로 확인됨.

[표 5.27] 서산 대조구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화

종명	개체수						우점도(%)
	예비 1차	예비 2차	1차	2차	3차	합계	
홍단딱정벌레	—	1	2	3	2	8	1.7
멧쟁이딱정벌레	—	—	—	2	2	4	0.9
윤납작먼지벌레	29	5	4	31	37	106	22.7
쌍무늬먼지벌레	37	17	2	19	8	83	17.8

- 서산 팔봉산 대조구에서는 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레의 서식이 확인되어 이 종들의 먹이원인 곤충, 달팽이류, 지렁이류 등 지표 무척추동물의 풍부성이 높은 것으로 판단됨.
- 윤납작먼지벌레, 일본칠납작먼지벌레, 쌍무늬먼지벌레, 폭탄먼지벌레 등 일반적으로 흔히 관찰되는 먼지벌레류의 서식이 확인되었으며, 해당 종들은 지표배회성 곤집에서 일반적으로 높은 우점도를 나타내는 종들로서 해당 지역의 지표배회성 곤충 군집의 다양성 변화를 판단하기 위해 우점도를 지속적으로 관찰할 필요가 있음.
 - 본 연구의 주요 모니터링 대상종인 고려소똥풍뎅이는 확인되지 않았으나, 해당 종과 유사한 먹이 범위를 보이는 서식 확인이 쉽지 않은 소똥풍뎅이, 왕똥풍뎅이 등이 출현하여 조사지역 내 포유류의 서식을 간접적으로 확인할 수 있었음.
- 주요종 모니터링조사 시 서산 팔봉산 대조구에서 확인된 지표배회성 곤충(모니터링 대상종 포함)의 시기별 종수는 예비 1, 2차에서 각각 12종, 13종이 확인되었으며, 1~3차 조사에서 각각 4종, 20종, 15종이 확인되어 조사 시기에 따른 일정한 경향이 나타나지 않았음.

- 서산 팔봉산 대조구에서 확인된 모니터링 대상종의 종수는 예비 1차 2종, 예비 2차 3종, 1차 3종, 2차 4종, 3차 4종이 확인되었고, 개체수의 경우 예비 1, 2차에서 각각 114종, 49개체가 확인되었으며, 1~3차 조사에서 각각 9개체, 173개체, 121개체가 확인되어 시기별 종수 변화와 유사한 경향을 보임.
- 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수는 조사시기에 따라 일정한 경향성을 보이지 않았으며, 지속적인 조사를 통해 자료가 누적될 경우 화력발전소 주변지역과의 군집구조 비교 시 통계적 신뢰도 및 객관성을 제고할 수 있을 것으로 판단됨.



[그림 5.24] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(서산 팔봉산 대조구)

- 서산 팔봉산 대조구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 조사구 평균 대비 114.3%, 개체수는 148.5%로 조사구에 비해 높은 것으로 확인됨.
 - 서산대조구와 각 조사구에서 확인된 지표배회성곤충 종수 및 개체수의 차이는 당진, 서천조사구에서 비교적 큰 것으로 나타났으며, 태안 및 보령 조사구의 경우 서산대조구와 유사하게 나타남.
 - 조사구와 대조구를 포함한 조사지역 중 종수 및 개체수가 상대적으로 높았던 태안, 보령조사구와 서산 팔봉산, 서천 희리산 대조구의 경우 대형딱정벌레류의 서식이 확인된 지역으로 대형딱정벌레류를 통해 곤충군집의 건전성을 간접적으로 평가할 수 있었음.

2.2.6. 서천 희리산 대조구

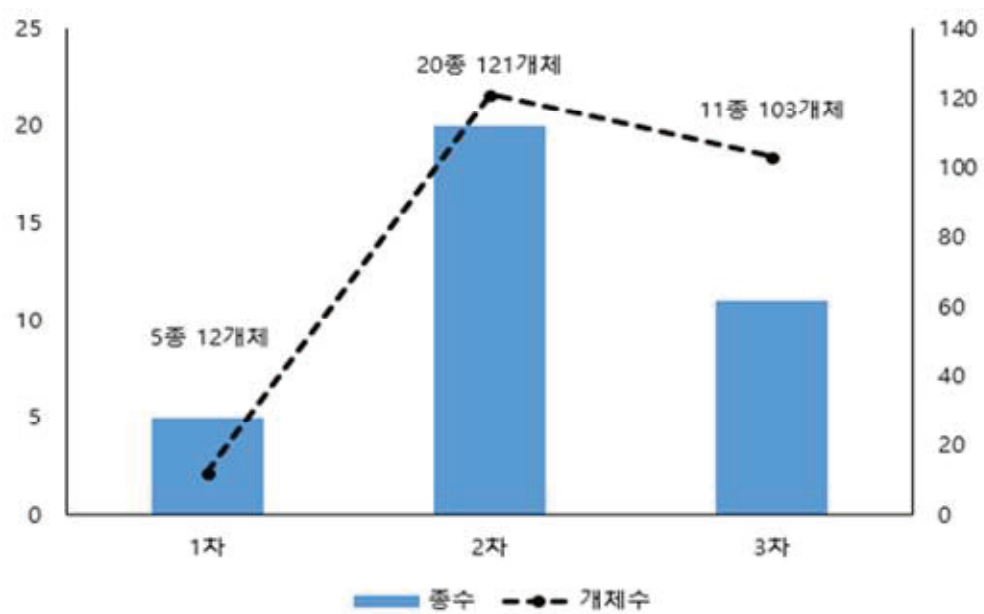
- 서천 희리산 대조구에서 채집된 21종 266개체의 지표배회성 곤충 중 모니터링 대상종은 6종 200개체였으며, 각종의 개체수 및 우점도는 일본칠납작먼지벌레가 88개체(33.1%), 윤납작먼지벌레가 61개체(22.99%), 폭탄먼지벌레가 21개체(7.9%), 쌍무늬먼지벌레가 20개체(7.5%), 홍단딱정벌레와 멧쟁이딱정벌레가 각각 5개체(1.9%)로 확인됨.

[표 5.28] 서천 대조구 모니터링 대상종의 시기별 개체수 변화

종명	개체수				우점도(%)
	1차	2차	3차	합계	
홍단딱정벌레	—	2	3	5	1.9
멧쟁이딱정벌레	—	2	3	5	1.9
윤납작먼지벌레	3	37	21	61	22.99
일본칠납작먼지벌레	—	56	32	88	33.1
쌍무늬먼지벌레	5	4	11	20	7.5
폭탄먼지벌레	—	7	14	21	7.9

- 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레의 서식이 확인되었으며, 외와 같은 대형 딱정벌레류는 곤충의 유충, 달팽이류, 지렁이류 등을 폭넓게 포식하므로, 해당 종의 서식은 먹이가 되는 토양 무척추동물의 풍부성을 반영함.
- 윤납작먼지벌레, 일본칠납작먼지벌레, 쌍무늬먼지벌레, 폭탄먼지벌레 등 일반적으로 흔히 관찰되는 먼지벌레류의 서식이 확인되었으며, 서천대조구의 우점종인 일본칠납작먼지벌레의 우점도가 타지역 우점종에 비해 1.5배 이상 높게 나타나 지표배회성 곤충 군집이 단순화될 가능성이 있음.
 - 이번 조사에서 모니터링대상종인 고려소똥벌레를 포함한 소똥벌레류는 확인되지 않았으나, 조사지역은 포유류의 서식에 적합한 수역, 산림, 농경지가 혼재되어 있으므로 향후 조사에서 소똥벌레류가 출현할 가능성이 높을 것으로 판단됨.
- 주요종 모니터링조사 시 서천 희리산 대조구에서 확인된 지표배회성 곤충(모니터링 대상종 포함)의 시기별 종수는 1~3차 조사에서 각각 5종, 20종, 11종이 확인되어 조사 시기에 따른 일정한 경향이 나타나지 않음.

- 개체수의 경우 1~3차 조사에서 각각 12개체, 121개체, 103개체가 확인되어 시기별 종수 변화와 유사한 경향을 보였고, 대상종의 종수는 1차 2종, 2차 6종, 3차 6종이 확인되었음.
- 조사시기별 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수에서 일정한 경향성은 나타나지 않았으며, 서천 희리산 대조구의 경우 검토의견에 따라 2019년 신규로 대조구로 선정되어 조사가 이뤄지면서 예비 1, 2차 조사가 수행되지 않아 타 지역 (4~5회)에 비해 적은 조사 (3회)가 이루어졌음.



[그림 5.25] 지표배회성 곤충의 조사시기별 종수 및 개체수(서천 희리산 대조구)

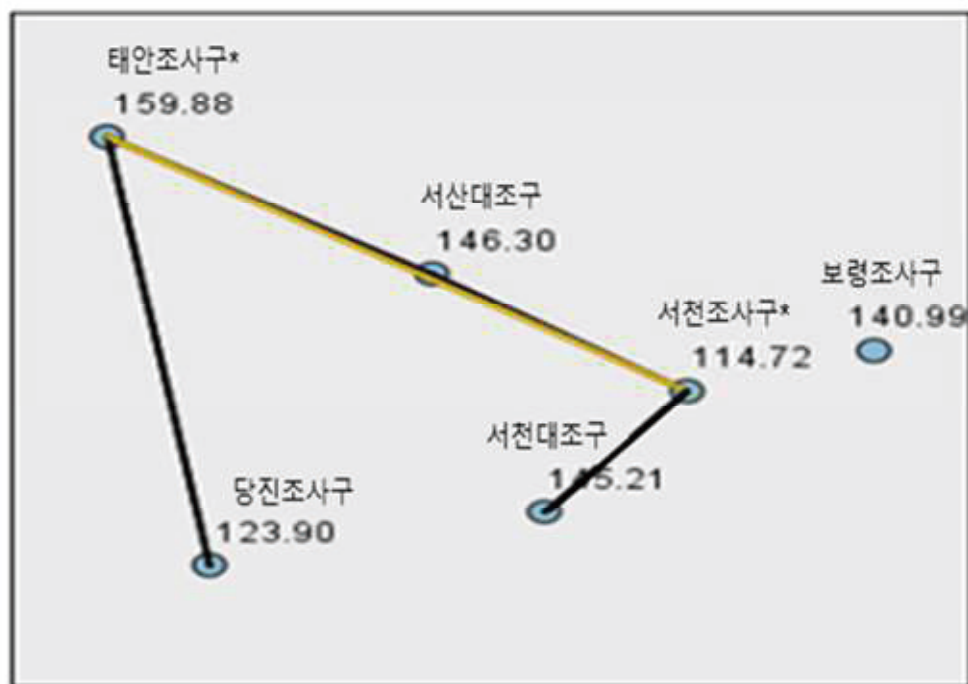
- 서천 희리산 대조구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수는 조사구 평균 대비 109.1%, 개체수는 84.8%로 조사구와 유사한 것으로 나타남.
 - 서천 희리산 대조구와 당진, 서천조사구의 종수 및 개체수(표 5.23)는 비교적 큰 것으로 나타났으며, 이러한 차이는 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레 등 대형 딱정벌레류의 서식 여부에서도 동일하게 나타남.
 - 조사구와 대조구를 포함한 조사지역 중 종수 및 개체수가 상대적으로 높았던 태안, 보령조사구와 서산 팔봉산, 서천 희리산 대조구의 경우 대형딱정벌레류의 서식이 확인된 지역으로서 해당 종의 먹이원인 지표무척추동물의 다양성 및 풍부도가 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수에 영향을 미친 것으로 판단됨.

2.3. 요약 및 소결론

- 곤충분야 주요종 모니터링을 위해 조사구 및 대조구 총 6개 지역을 대상으로 예비조사 (2018년 6월 및 9월)와 2019년 5월부터 2021년 5월까지 모니터링 조사를 포함하여 총 5차례 걸쳐 이뤄진 결과를 토대로 곤충의 종 구성, 종수, 개체수, 지역별 군집 간 유사도를 분석하였음.
- 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수, 주요종 모니터링, 군집구조 유사도 분석에서 조사구와 대조구 사이의 뚜렷한 차이는 확인되지 않았음.
 - 지표배회성의 종수 및 개체수는 당진조사구와 서천조사구에서 대조구에 비해 낮게 나타났으며 태안조사구와 보령조사구는 대조구와 유사하게 나타남.
 - 단기간의 모니터링으로는 조사구간 종수 및 개체수 차이의 원인을 명확히 제시하기 어려우나, 이번 조사를 통해 화력발전소 주변지역 중 종수, 개체수가 대조구와 유사한 지역, 대조구에 비해 적은 지역이 혼재되어 나타나 화력발전소의 영향이 아닌 서식지 조건, 인위적 교란 등 기타 요인에 의한 차이 가능성이 높은 것으로 분석됨.
- 모니터링 대상종 중 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레 등 대형 딱정벌레류가 서식하는 것으로 확인된 태안, 보령조사구와 서산, 서천 대조구는 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수가 상대적으로 높게 나타남.
 - 해당 종의 서식 여부가 지표배회성 곤충 군집의 종수 및 개체수에 민감하게 반응하는 것으로 분석되어 모니터링을 통해 조사지역 내 무척추동물의 다양성 및 풍부도를 간접적으로 평가할 수 있었음.
- 일본칠납작먼지벌레, 윤납작먼지벌레 등 먼지벌레류의 경우 종 구성의 차이는 있으나 모든 조사지역에서 확인되었으며, 해당 종들은 일반적으로 지표배회성 곤충 군집에서 높은 우점도를 나타내는 분류군으로 특정 종의 우점도가 급격히 증가할 경우 생태계 건전성의 저하를 의미하므로 지속적인 모니터링이 필요함.
 - 모니터링대상종인 고려소똥풍뎡이는 포유류의 배설물을 섭식하므로 해당 종의 서식은 조사지역 내 포유류의 서식을 반영할 수 있으나, 해당 종이 당진조사구에서 확인된 점, 다른 지역에서 확인된 보기 드문 소똥풍뎡이, 마틴소똥풍뎡이 등의 소똥풍뎡이류

가 고려소똥풍뎡이의 생태계 내 역할을 대체할 수 있는 점을 고려할 때 곤충을 통한 포유류의 서식 판단 시 본 연구의 주요 모니터링 대상종인 고려소똥풍뎡이와 소똥풍뎡이류의 서식 여부를 고려할 필요가 있음.

- 채집된 지표배회성 곤충군집의 유사성을 비교하기 위해 MEDIAN(1)&KRUSKAL _ WALLIS(2) 쌍대검정을 실시한 결과, 조사구와 대조구 사이에서 유의차($P \leq 0.05$)는 확인 되지 않았으며, 태안 조사구와 서천 조사구 간 유의차가 확인됨.
- 태안 조사구는 조사지역 중 종수 및 개체수가 가장 많은 지역이며 서천조사구는 종수와 개체수가 가장 적게 나타난 지역으로, 이러한 차이가 군집분석에서 유의차에 영향을 미친 것으로 판단됨.



[그림 5.26] MEDIAN(1)&KRUSKAL_WALLIS(2) 쌍대검정 결과

- 화력발전소 주변지역인 4개 조사구 중 태안, 보령 조사구는 종수 및 개체수가 대조구와 유사하게 나타난 점을 고려할 때, 서천조사구에서 종수 및 개체수가 상대적으로 낮게 나타난 이유는 화력발전소의 영향이 아닌 서식지 조건, 인위적 교란 등 기타 요인으로 인한 것으로 판단됨.

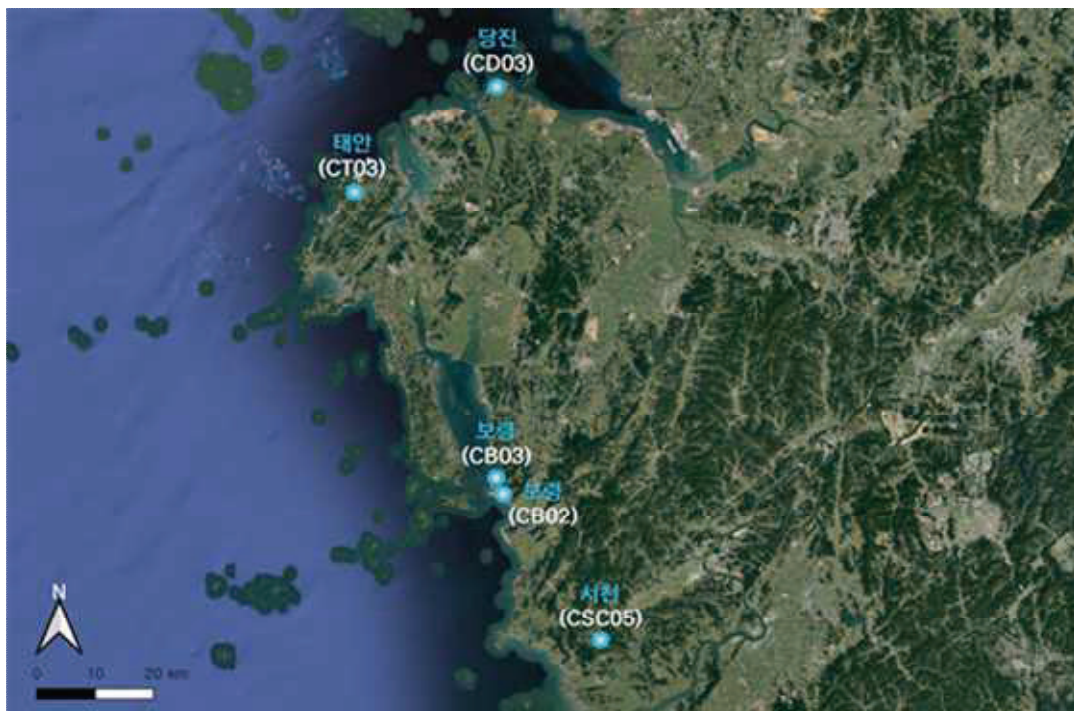
- 이번 조사에서 조사구와 대조구에 유의차가 확인되지 않아 화력발전소가 지표배회성 곤충의 군집구조에 미치는 영향을 분석할 수 없었으나, 생물의 군집은 자연재해, 오염 물질 대량 유출 등의 경우를 제외하면 일반적으로 장시간에 걸쳐 서서히 변화하므로 단기간의 모니터링을 통해 규명하기는 어려우며, 통계적 신뢰도 및 객관성 제고를 위해 지속적인 조사를 통해 자료의 누적이 필요함.
 - 반복 조사를 통해 누적된 자료가 많을수록 군집구조 사이의 작은 차이도 유의차로 나타날 수 있어 정기적인 모니터링이 선행될 필요가 있음.
- 군집 유사도 분석 결과, 화력발전소가 지표배회성 곤충 군집에 미치는 영향은 명확하게 나타나지 않았으나, 조사 결과 당진조사구 및 서천조사구의 곤충다양성이 상대적으로 빈약하게 나타났으며, 생태계 건전성 유지를 위해 해당 지역의 보전 및 복원이 필요할 것으로 판단됨.
- 모니터링 대상종 중 생태계 건전성 판단의 지표로 활용하기에 가장 적합한 분류군은 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레 등 대형 딱정벌레류로 확인됨.
 - 해당 분류군의 주 먹이원은 지렁이류, 달팽이류 등의 지표 무척추동물과 곤충의 유충이며, 대형딱정벌레류의 부재는 먹이원이 빈약함을 의미하므로 토양의 이화학적 특성 개선, 지표식물 보전 및 복원 등의 조치 필요할 것으로 판단됨.
- 이번 연구는 생태계의 변화를 확인하기에는 단기간 동안 수행되어 자료의 수집 및 해석에 있어 한계가 존재하며, 향후 지속적인 모니터링을 통해 자료가 누적될 경우 연구 결과의 통계적 신뢰도 및 객관성을 제고할 수 있을 것으로 사료됨.

3. 포유류분야

3.1. 조사시기 및 방법

가. 조사시기

- 충남 화력발전소 주변의 포유류분야 조사는 1차년도에 걸쳐 수행되었으며, 2021년 1월부터 2021년 9월까지 총 3회에 걸쳐 모니터링을 실시함.
 - － 센서카메라를 서천(1대), 당진(1대), 태안(1대), 보령(2대) 총 5대 설치하였는데, 보령 지역은 수달 흔적이 다른 지역에 비해 약 1.4배 많이 발견되고 기존 모니터링 데이터 분석 시 유일하게 수달이 촬영된 지역(CB03)이었기 때문에 센서카메라 2대를 설치함.



[그림 5.27] 멸종위기야생생물 주요종 모니터링 센서카메라(5대) 설치 지점

- 당진 지역의 경우, CD03에서 수달 흔적이 2019년, 2020년에 발견되어 주요종 모니터링 카메라로 설정하였으나 3차년도 모니터링시 실체 확인이 되지 않아 보고서에 수록하지 않음.
 - 서천 조사구 지역, 서산(팔봉산), 서천(희리산) 대조구 지역도 마찬가지로 센서 카메라에 수달 촬영 데이터가 확보되지 않아 보고서에는 수록하지 않음.

[표 5.29] 충남 화력발전소 주변지역의 포유류 조사 시기

구분	차수	조사시기	조사일수	조사장소
후보종 현지 조사	1차 조사	2021년 1월 28일~ 2021년 1월 29일	2일	당진 석문면, 보령 오천면, 서천 서면, 태안 원북면, 서천 중천면 (희리산), 서산 팔봉면 (팔봉산)
대상종 흔적조사 및 모니터링 카메라 설치	2차 조사	2021년 7월 13일~ 2021년 7월 15일	3일	당진 석문면, 보령 오천면, 서천 서면, 태안 원북면
대상종 흔적조사 및 모니터링 카메라 회수	3차 조사	2021년 9월 27일~ 2021년 9월 29일	3일	"

나. 조사방법

- 주요종 모니터링 조사를 위해 3차년도 조사방법(3차년도 보고서 pp. 497-498)과 동일하게 흔적조사(Field Survey), 카메라 트랩 조사를 수행함.
- 무인센서카메라 사진 자료를 이용하여 지점별 수달의 상대풍부도 지수(RAI, Relative Abundance Index)(Arroyo-Arce et al., 2017)를 산출하여 분석(3차년도 보고서 pp. 497~498)함.

다. 선정기준

- 환경부에서 선정한 기후변화 생물지표종(Climate-sensitive Biological Indicator Species, CBIS) 100종과 30 후보종에는 포유류가 포함되지 않음. (국립생물자원관, 2019)
 - 포유류는 번식속도가 느리며 긴 생활사(life cycles)를 가져 기타 분류군에 비하여 유전적으로 빨리 적응할 수 없기 때문에 기후변화에 대응하기가 어려운 분류군임. (김원명, 2008)

- 따라서, 인위적인 개입에 의한 환경변화에 가장 취약하여 멸종위기에 처했거나 가까운 장래에 멸종위기에 처할 우려가 있는 야생생물인 ‘멸종위기야생생물’ 을 모니터링 주요종으로 고려함.
 - 충청남도 화력발전소 조사구 지역에서 출현한 멸종위기야생생물은 I 급인 수달, II 급인 삶이 해당됨. 2·3차년도 센서카메라 모니터링에서는 보령 조사구에서 수달이 출현하였고, 당진·태안·보령·서천 조사구와 서천(희리산) 대조구에서 삶이 출현하였음.
 - 따라서, 개체수가 크게 줄어 멸종위기에 처한 종인 멸종위기야생생물 I 급 수달과 II 급 삶 모니터링을 통해 육상 및 수상 생태계 포유류의 화력발전소 주변지역 기후환경 영향을 모니터링함.
- 수달(Eurasian otters (*Lutra lutra*))은 식육목 족제비과에 속하며, 천연기념물 제330호 및 멸종위기야생생물 I 급으로 지정되어 있으며, 반수생동물로서 하천 생태계의 생물다양성을 균형 있게 조절하는 핵심종으로 (IUCN Otter Action Plan, 1990) 모니터링 종으로 선정함.
- 수달 서식지는 한 줄기 강으로, 좁고 기다란 선형 서식권(linear range)으로 이루어져 (Kruuk, 1995) 서식지 단절 발생 확률이 높고, 번식 및 유전자 확산에도 취약성을 가지고 있어 다른 육상 포유류에 비해 낮은 개체군 밀도를 보이는 것이 특징임.
 - 또한, 환경 변화에 민감하여 1950년대부터 세계 여러 곳에서 개체 수 감소가 보고되어 있으나 일부 지역에 환경 교란 요인이 사라지면 수달의 개체수가 회복된 사례가 보고된 바 있음. (차현기 외, 2017)
 - 따라서 수달 발견은 그 지역의 생태를 평가할 수 있는 척도 (Lim and Ryu, 2008)가 될 수 있어 수달을 4차년도 포유류 주요종으로 선정하고 모니터링하여 분석함.
- 삶(Leopard Cat (*Prionailurus bengalensis*))은 식육목 고양이과에 속하며, 멸종위기야생생물 II 급으로 지정되어 있고, IUCN 적색목록의 관심필요종(LC)과 CITES 부속서 II에 속해있는 종으로 (Sanderson et al., 2008) 모니터링 종으로 선정하였음.
- 삶은 담비와 함께 육상생태계 최상위 포식자로 설치류를 주요 먹이원으로 하고 있음. 따라서 먹이사슬 과정을 통한 오염물질이 체내에 농축되어 축적 농도가 증가되는 현상인 생물 농축(Bioaccumulation)에 대한 반응 정도를 확인할 수 있음. (Hwang and Kwon, 2009)

- 따라서 삶의 발견은 그 지역의 육상생태계를 평가할 수 있는 기준으로 적합하다 판단하여 삶을 4차년도 포유류 주요종으로 선정하고 모니터링하여 분석함.

3.2. 주요종 모니터링 결과

3.2.1. 태안 조사구

- 태안 조사구는 2021년 7월 2차 조사시 CT03 지역에 주요종 모니터링 카메라를 설치하였고, 모니터링 확인 결과, 2021년 9월 8일 오전 5:15분 수달 3개체 촬영, 2021년 9월 22일 오후 23:55분 수달 2개체가 촬영되었음.
- 수달이 촬영된 CT03은 멸종위기야생생물Ⅱ급인 삶의 상대풍부도 지수(21.57)가 가장 높은 지점 (본 보고서 4-159쪽 참조)으로 수달 가족이 2021년 9월 8일(3개체), 9월 22일(2개체) 출현하였음.
 - 멸종위기야생생물Ⅱ급인 삶은 잠수할 수 없으나 얇은 개울에서 어류를 사냥할 수 있는 등 수달과 중첩되는 먹이자원을 공유 (국립생물자원관, 2018)하여 삶이 풍부하게 출현하는 지역은 수달이 서식하기에도 적합한 환경임을 확인할 수 있음.
 - 따라서, CT03을 포함한 태안 조사구 지역은 주요 관찰 지역에 해당되어 주요종 생태 보호 구역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.



[그림 5.28] CT03 지점에서 촬영된 수달 가족(3개체)

- 태안 조사구는 2021년 7월 2차 조사시 CT03 지역에 주요종 모니터링 카메라를 설치하고, 모니터링하여 삼의 출현을 확인 결과, 2021년 8월 10일 오후 21:44분부터 2021년 9월 27일 오후 22:57분까지 삼 1개체가 촬영되었음.
 - 2021년 8월 삼 1개체 5회 촬영, 9월 삼 1개체 6회 촬영으로 총 11회 출현을 확인함.
- 삼이 촬영된 CT03은 상대풍부도 지수(21.57)가 가장 높은 지점으로 8~9월에 집중적으로 출현하는 패턴을 나타내었음.
 - 삼 식물물 계절별 분석결과, 가을철에 가장 많은 분류군(13종)을 섭식하는 것으로 확인되었고 (이오선, 2008), 먹이 섭취를 위한 확대된 사냥 행동권으로 인해 가을철(8~9월)에 높은 상대풍부도 지수를 보인 것으로 분석됨.
 - 생태계 먹이 피라미드의 최상위층에 위치한 포식자 삼의 출현은 그 지역의 안정적인 먹이사슬이 형성되었음을 간접적으로 알 수 있는 지표로 CT03을 포함한 태안 조사구 지역은 주요 관찰 지역에 해당되어 주요종 생태보호 구역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.



[그림 5.29] CT03 지점에서 촬영된 삼

3.2.2. 보령 조사구

- 보령 조사구는 2021년 7월 2차 조사시 CB02 지역에 주요종 모니터링 카메라를 신규 설치하고 기존 모니터링 지역인 CB03 지역에 동영상 모드로 센서카메라를 추가 설치함.
 - 모니터링 결과, CB02 지역에서 2021년 7월 수달 1개체가 3회 촬영되었고, 2021년 8월 수달 1개체가 1회 촬영되었음.
 - CB03 지역에서는 2020년 7월 수달 1개체 5회 촬영, 8월 수달 1개체 2회 촬영, 9월 수달 1~2개체 5회 촬영, 10월 수달 1~3개체 8회 촬영되었음. 이듬해 2021년에는 2월 수달 1~3개체 6회 촬영, 3월 수달 1개체 2회 촬영, 8월 수달 1~2개체 2회 촬영, 9월 수달 2개체 1회 촬영되어 총 31회 출현을 확인함.
- 수달이 촬영된 CB02는 멸종위기야생생물 I 급인 수달의 상대풍부도 지수(18.18)가 가장 높은 지점 (본 보고서 4-159쪽 참조)이고, CB03 지점 역시 상대풍부도 지수(RAI)는 12.40으로 주요종 모니터링을 위한 주요 관찰 지역에 해당됨.
 - 또한, CB03 지역은 보령 화력발전소에서 하수를 배출하는 지점에 해당되기 때문에 화력발전소에 의한 멸종위기야생생물 I 급에 해당하는 수달의 화력발전소 오염물질 등 교란 요인에 대한 영향을 모니터링하기 위한 주요 관찰 지역으로 분석됨.



[그림 5.30] CB02 지점에서 촬영된 수달 가족(3개체)



[그림 5.31] CB03 지점에서 촬영된 수달 가족(3개체)

- 보령 조사구는 2021년 7월 2차 조사시 CB02 지역에 주요종 모니터링 카메라를 신규 설치하고 기존 모니터링 지역인 CB03 지역에 동영상 모드로 센서카메라를 추가 설치함.
 - 모니터링 확인 결과, CB03 지역에서 2020년 7월 삥 1개체 1회 촬영, 2021년 8월 삥 1개체 2회 촬영, 9월 삥 1개체 4회 촬영으로 총 7회 출현을 확인함.
- 삥이 촬영된 CB03 지역은 삥의 상대풍부도 지수가 2.80으로 높은 지수는 아니지만, 2021년 8월을 기점으로 삥의 출현횟수가 증가하는 것으로 보아(2회→4회) 지속적인 모니터링이 요구되는 지점으로 판단됨.
 - 2021년 8월 25일 오전 8:09분에 조류를 사냥하는 삥의 모습이 촬영되어(그림 5.28) 최상위 포식자인 삥이 설치류뿐만 아니라 조류 등 다양한 분류군을 섭식함으로써 일어나는 생물 농축에 대한 반응 정도를 간접적으로 확인할 수 있음.
 - 따라서, CB03을 포함한 보령 조사구 지역을 모니터링 함으로써 주요종 생태보호 구역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.



[그림 5.32] CB03 지점에서 촬영된 조류를 사냥한 삶(1개체)

3.2.3. 당진 조사구

- 당진 조사구는 2021년 1월 1차 조사시 CD03 지역에 주요종 모니터링 카메라를 설치하였고, 모니터링 확인 결과, 2021년 1월 삶 1개체 1회 촬영, 2월 삶 1개체 14회 촬영, 3월 삶 1개체 8회 촬영, 4월 삶 1개체 6회 촬영, 5월 삶 1개체 2회 촬영으로 총 31회 출현을 확인함.
- 삶이 촬영된 CD03 지역은 상대풍부도 지수(16.76)가 태안 조사구(21.57) 다음으로 높은 지점임이 확인됨.
 - 번식기인 봄철(3~4월)에 짝짓기를 위한 넓어진 행동권역을 나타내 상대풍부도 지수가 높게 산출된 것으로 분석되며, 수변이 근접해있고 갈대가 우거진 식생환경을 갖춘 CD03 지역에서 번식활동을 나타냄으로써 높은 출현빈도를 나타낸 것으로 보임. (국립생물자원관, 2018)
 - 따라서, CD03을 포함한 당진 조사구 지역은 주요 관찰 지역에 해당되어 삶 가족이 서식하는지에 대한 확인을 목적으로 주요종 생태보호 구역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.

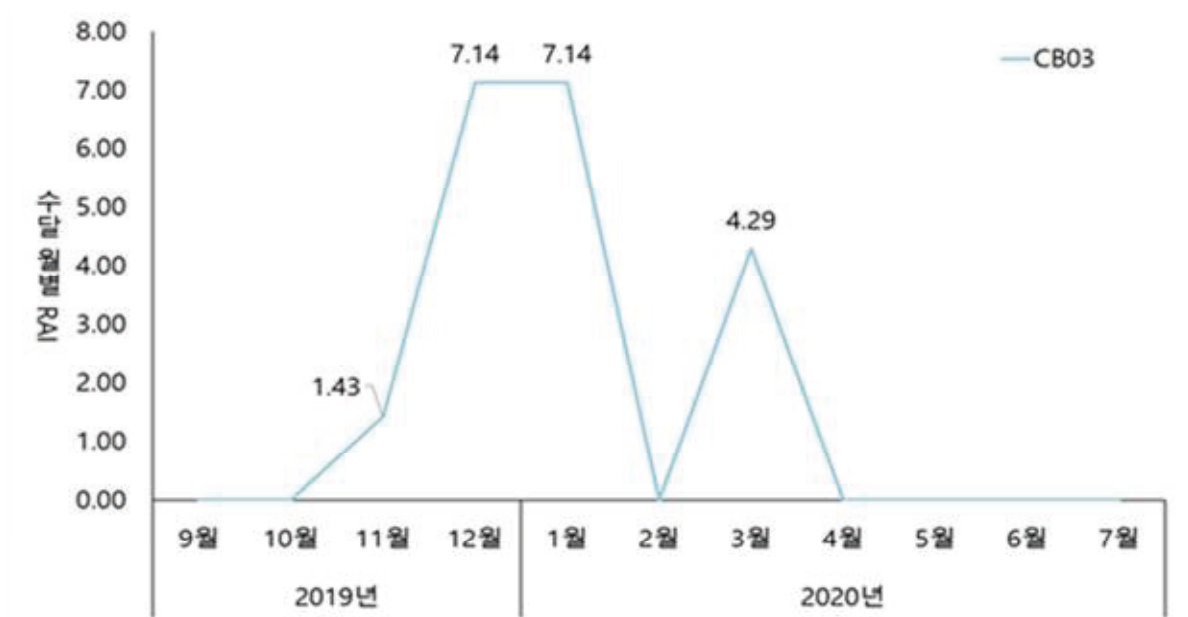


[그림 5.33] CD03 지점에서 촬영된 삶

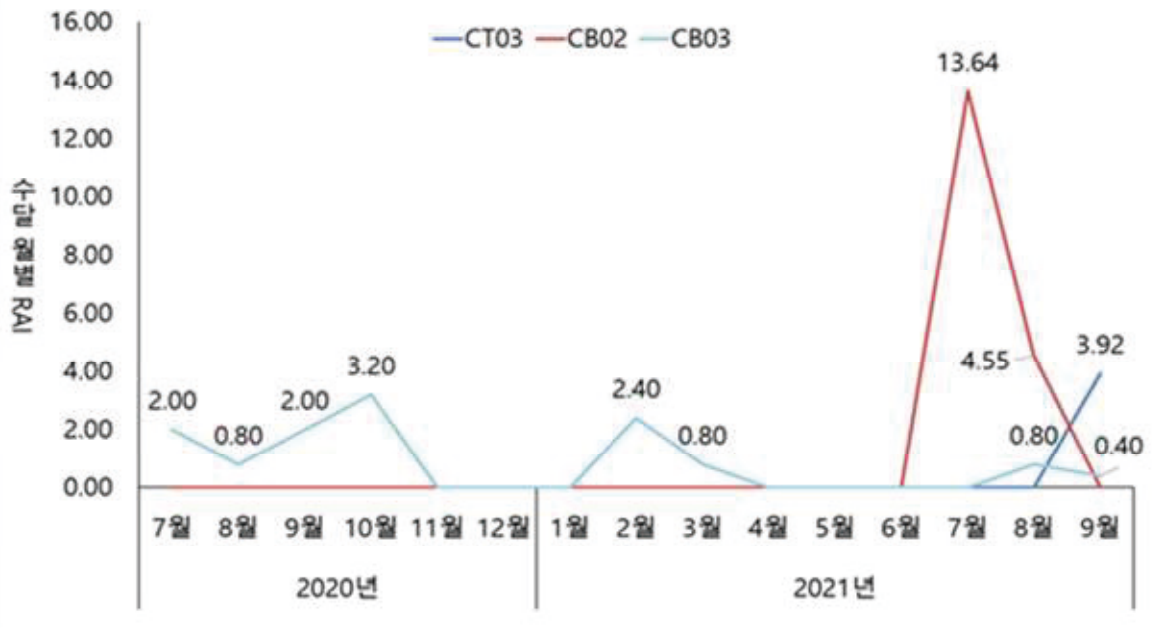
3.3. 연차별 비교

- 하천 생태계의 생물다양성을 균형 있게 조절하는 핵심종(keystone species)인 수달의 출현이 가지는 의미는 출현 지역의 하천 생태계의 건강성을 판단하는 지표가 될 수 있음. (김호걸 외, 2021).
 - 행동권역별 이동 거리는 황강 수달 15km, 경호강 수달 14km, 진양호 수달 9km로 약 12.6km의 넓은 행동권(낙동강유역환경청, 2006)을 가지며, 2~4년차 연구결과 보령, 태안, 당진 조사구 및 서천 희리산 대조구에서 수달의 서식을 확인함.
- 2차년도와 3차년도 조사 시 당진 조사구 지점과 서천 희리산 대조구 지점에서 흔적조사 시 배설물이 관찰되었으나, 4차년도 조사에서는 흔적조사 및 센서카메라 조사에 포착되지 않았음.
 - 서천 조사구와 서산(팔봉산) 대조구, 서천(희리산) 대조구의 센서 카메라에 수달이 촬영되지 않아 보고서에 수록하지 않음.
- 수달은 2019년 11월을 기준으로 2차년도부터 보령 CB03 지점에서 관찰되기 시작하였고, 12월부터 1월까지 상대풍부도 지수(RAI)가 7.14로 가장 높게 나타났음.

- 12월부터 1월까지 2달간 수달의 RAI가 전월인 11월(1.43)에 비해 약 4.9배 높게 산출된 것은 번식기인 1~2월에 맞춰 활동범위가 넓어지면서 센서카메라에 포착되는 출현 횟수가 높게 나타났기 때문인 것으로 분석됨. (한성용, 2004)
- 3차년도에는 보령 CB03 지점뿐만 아니라 보령 CB02 지점과 태안 CT03 지점에서도 출현하기 시작함. 특히, 보령 CB02 지점은 7월에 상대풍부도 지수(RAI)가 13.64로 가장 높게 나타남. (그림 5.34)
 - 교량 하부나 바윗돌과 같은 곳은 수달이 체온유지를 위해 털을 말리거나 영역 표시, 먹이자원을 관망하는 장소로 중요한 역할(하정욱 외, 2020)을 하는데, 보령 CB02 지점의 경우, 편편한 바윗돌이 넓게 있는 교량 하부 환경으로 여름철 장마를 피한 수달의 휴식처로 적합하여 7월에 비교적 높은 상대풍부도 지수를 나타낸 것으로 분석됨.
- 태안 CT03 지점은 9월(3.92), 보령 CB03 지점은 10월(3.20)에 수달 상대풍부도 지수(RAI)가 높게 산출되었고, 2~3개체의 수달이 촬영되었음.
 - 9~10월에 수달의 상대풍부도가 높게 나타난 것은 어미와 새끼의 먹이활동이 원인인 것으로 분석되었고, 가을철에는 출산 및 수유기로 새끼가 태어난 후 어미가 새끼를 데리고 하루에 1회 정도 먹이 활동함.



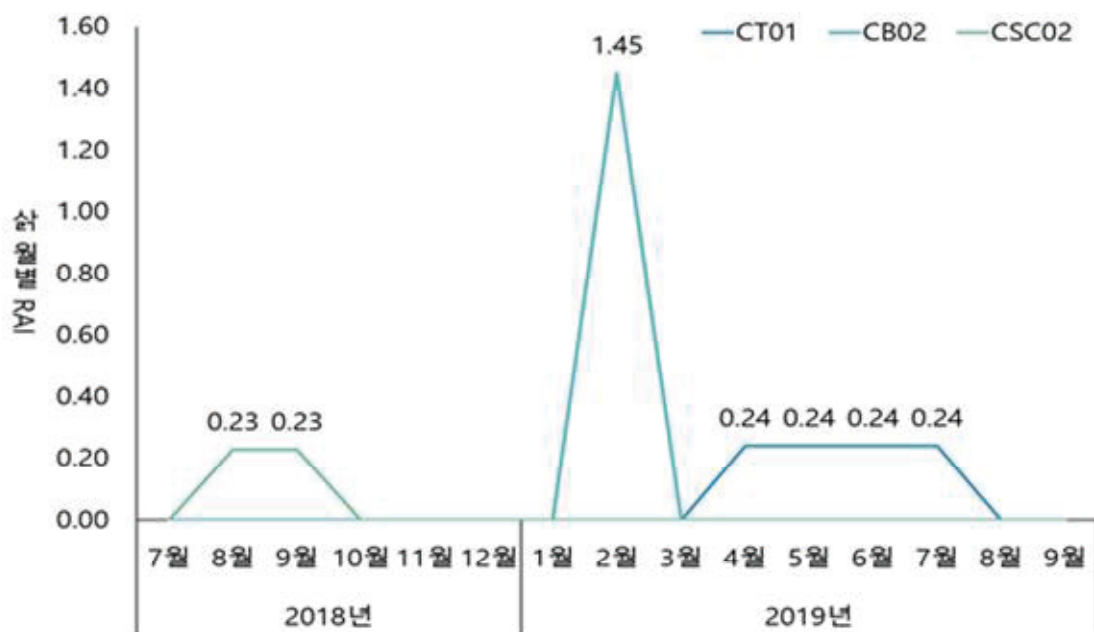
[그림 5.34] 2차년도(2020) 수달 월별 상대풍부도 지수(RAI)



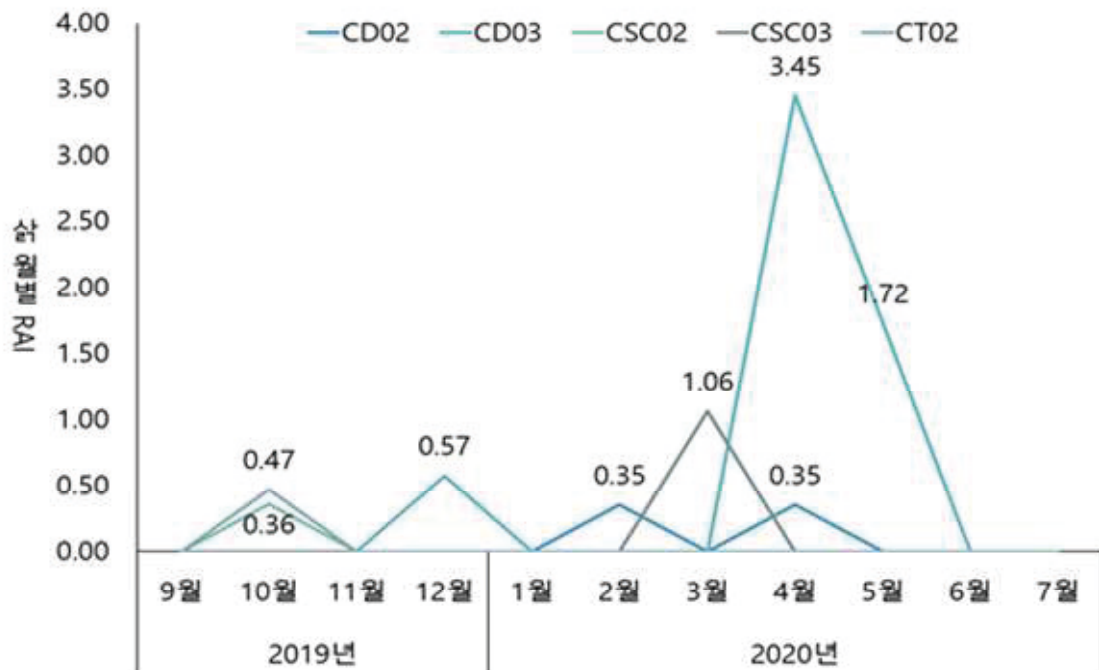
[그림 5.35] 3차년도(2021) 수달 월별 상대풍부도 지수(RAI)

- 육상 생태계의 생태계 먹이피라미드에 있어 최상위 포식자 위치에 있는 삶의 출현이 가지는 의미는 삶이 출현한 지역에는 다양한 생물상이 존재하고 있고 이들이 안정적인 먹이사슬을 형성하고 있음을 간접적으로 알 수 있는 지표로서의 의미가 존재함. (장갑수 외, 2008)
- 삶은 2018년 8월을 기준으로 1차년도부터 서천 CSC02 지점에서 관찰되기 시작하였고, 2019년 2월 보령 CB02 지점에서 삶의 상대풍부도 지수(RAI)가 1.45로 가장 높게 나타났다.
 - 이후 태안 CT01 지점에서 2019년 4월부터 7월까지 약 4개월간 상대풍부도 지수가 0.24로 지속적인 출현 빈도를 보임.
 - 2월 한달간 보령 지역에서 삶의 RAI가 다른 지역에 비해 약 6.17배 높게 산출되었는데 이것은 번식기(3~4월)에 접어들기 전 행동권이 확대되면서 수변지역을 따라 센서카메라에 촬영되는 빈도가 많아진 것으로 확인됨.
- 2차년도에는 기존에 출현하던 서천(CSC02), 보령(CB02), 태안(CT01) 지역에서 서천의 다른 지점인 CSC03과 태안의 다른 지점인 CT02에서도 출현이 확인되었음. 또한, 당진(CD02, CD03) 지역은 3차년도에서 처음으로 삶이 센서카메라에 촬영됨.

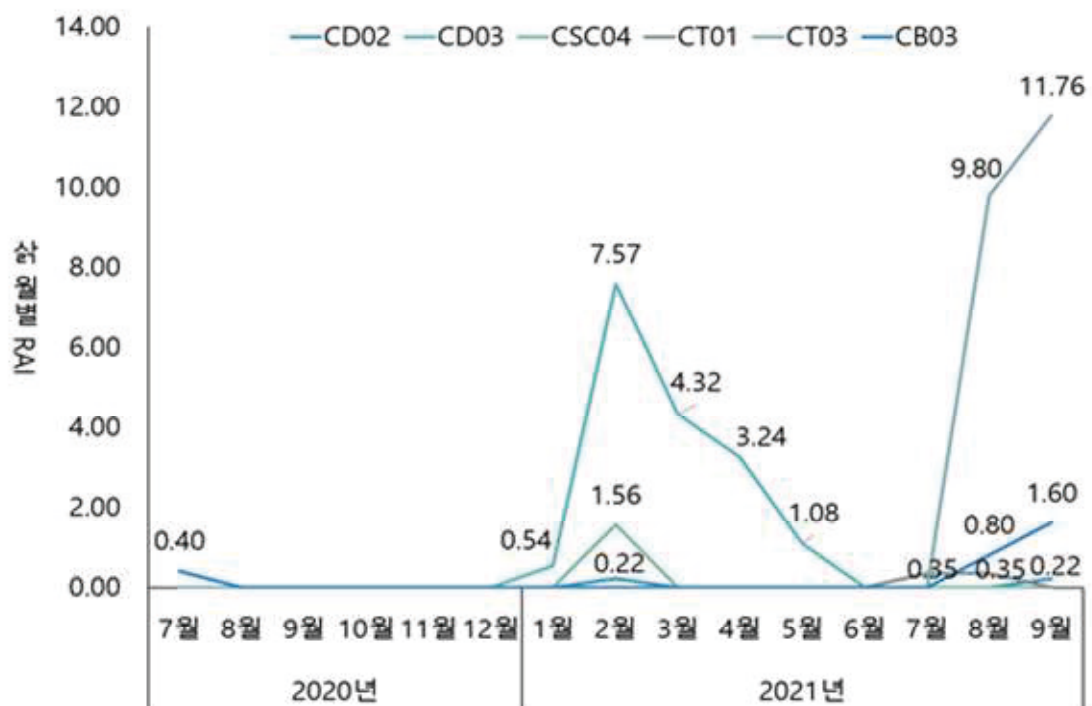
- 삶의 번식기인 3~4월에 접어들면서 행동범위가 넓어져 센서카메라에 촬영횟수가 많아진 것으로 보이며,
 - 당진 CD03 지점의 경우, 4월에 상대풍부도 지수(RAI)가 3.45로 가장 높게 나타났는데, 다른 지역에 비해 갈대가 많이 우거져있어 삶의 번식 및 출산을 위한 적합한 식생환경을 갖추었기 때문에 삶의 상대풍부도 지수가 다른 출현지점에 비해 약 8.85배 높게 나타난 것으로 판단됨.
- 3차년도에는 2차년도와 마찬가지로 당진, 태안, 보령 지역에서 삶의 모습을 확인할 수 있었음. 서천 CSC04 지점에서 삶 1개체가 촬영되었으나 단 1회만 촬영되었기 때문에 지점 내 서식으로 보기 어려운 부분이 있어 분석에서 제외함.
- 태안 CT03 지점에서 2021년 8월 9.80에서 9월 11.76으로 삶의 상대풍부도 지수가 급격하게 높게 산출됨. 이는 가을철 먹이 섭취를 위한 확대된 사냥 행동권의 영향과 동시에 태안 CT03 지점의 환경 특성이 작용한 것으로 분석됨.
 - CT03 지점의 경우, 인공 석재를 하천 제방용으로 배치하였는데 바위 틈 사이에 서식하는 설치류를 사냥하고자 하면서 센서카메라에 포착되는 빈도가 증가한 것으로 판단됨.



[그림 5.36] 1차년도(2019) 삶 월별 상대풍부도 지수(RAI)



[그림 5.37] 2차년도(2020) 삼 월별 상대풍부도 지수(RAI)



[그림 5.38] 3차년도(2021) 삼 월별 상대풍부도 지수(RAI)

3.4. 요약 및 소결론

- 수달(Eurasian otters (*Lutra lutra*))은 좁고 기다란 선형 서식권(linear range)을 가져 서식지 단절의 위험에 노출되어있으며 번식 및 유전자 확산에 있어서도 취약해 기타 육상 포유류와 비교 시 낮은 개체군 밀도를 가지고 있음.
 - 환경변화에 민감한 종인 수달과 삶의 발견은 해당 지역의 생태 평가의 척도로 작용할 수 있으며, 지속적인 멸종위기야생생물의 서식 확인을 통해 화력발전소가 생태계에 미치는 영향과 건강성을 회복하는 과정을 모니터링 할 수 있음.
 - 삶(Leopard Cat (*Prionailurus bengalensis*))은 육상생태계 최상위 포식자로 설치류를 주요 먹이원으로 하고 있어 생물 농축(Bioaccumulation)에 대한 반응 정도를 확인하는 지표종이며, 삶의 발견은 그 지역의 육상생태계의 풍부도 및 다양성을 평가할 수 있는 기준으로 안정적인 먹이사슬이 형성되었음을 간접적으로 확인할 수 있음.
- 하천 및 육상 생태계 생물다양성의 건강 정도를 판단하는 중요 지표인 멸종위기야생생물 I 급 수달과 II 급 삶의 모니터링을 통해 포유류의 화력발전소 주변지역 기후환경영향 모니터링을 추진함.
- 2019년 9월부터 2021년 9월까지 충청남도 소재 화력발전소 일대 무인센서카메라에 촬영된 수달은 보령 CB02 지점과 보령 CB03 지점, 태안 CT03 지점임.
 - 수달 주요종 모니터링을 위한 센서카메라 설치는 서천 1대, 당진 1대, 태안 1대, 보령 2대로 총 5대를 설치하였는데, 보령 지역의 경우 다른 지역에 비해 약 1.4배 많은 수달 흔적이 발견되어 다른 지역 대비 1대를 추가로 더 설치함.
 - 태안 CT03 지점은 수달 가족이 바윗돌 지역에서 2021년 9월 8일 오전 5:15분 (3개체), 9월 22일 오후 23:55분 (2개체) 출현함.
 - 보령 CB02 지점 수달 상대풍부도 지수(18.18)로 가장 높게 나타났고, 보령 CB03 지점은 12.40으로, 수달 가족(2~3개체)이 4차년도(2021년)에 CB03 지점에서 9회 출현하였음.
- 멸종위기야생생물 I급인 수달이 출현한 태안 CT03 지점과, 보령 CB03 지점에 대해 화력발전소 주변지역을 확대하여 모니터링 진행이 필요함.

- 수달 가족(2~3개체)이 촬영된 태안 CT03 지점은 멸종위기야생생물 Ⅱ급인 삥의 상대풍부도 지수(21.57)가 가장 높은 지점으로 먹이자원을 공유하는 삥이 빈번하게 출현하는 지역은 수달이 서식하기에도 적합한 환경으로 판단됨.
 - 보령 CB03 지점은 2019년 11월부터 2021년 9월까지 지속적으로 수달이 출현한 곳으로, 화력발전소에서 하수를 배출하는 교량 하부 지역에 해당되어 화력발전소에 의한 수달의 활동 패턴 교란 요인을 모니터링하기에 적합한 지역으로 판단됨.
 - 따라서, 태안 CT03, 보령 CB02~CB03 지점을 포함한 태안보령 조사구는 멸종위기 야생동물이 출현한 생태보호 구역으로써 수달, 삥 등 멸종위기야생동물 출현을 지속적으로 모니터링 하는 등 주요 관찰 지역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.
- 2018년 7월부터 2021년 9월까지 충청남도 소재 화력발전소 일대 무인센서카메라에 촬영된 삥은 보령(CB02, CB03), 태안(CT01, CT02, CT03), 서천(CSC02, CSC03), CSC04), 당진(CD02, CD03) 지역임.
- 태안 CT03 지점 삥 상대풍부도 지수(21.57)로 가장 높게 나타났고, 당진 CD03 지점이 16.76으로 두 번째로 높은 상대풍부도 지수를 나타내는 지점이었음.
- 멸종위기야생생물 Ⅱ급인 삥이 출현한 태안 CT03 지점과, 보령 CB03 지점, 당진 CD03 지점에 대해 화력발전소 주변지역을 확대하여 모니터링 진행이 필요함.
- 삥의 상대풍부도 지수(21.57)가 가장 높은 지점인 태안 CT03 지점은 소형 설치류 사냥을 위한 확대된 행동범위로 인해 가을철(8~9월)에 높은 상대풍부도 지수를 보인 것으로 분석됨.
 - 보령 CB03 지점에서는 2021년 8월 25일 오전 8:09분에 조류를 사냥하는 삥의 모습이 촬영되었고, (그림 5.28) 당진 CD03 지점의 경우, 수변이 근접해있고 갈대가 우거져 삥의 번식을 위한 적합한 식생환경을 갖추고 있어 삥 가족의 서식 여부에 대한 확인을 목적으로 주요종 생태보호 구역으로 관리가 필요할 것으로 분석됨.
 - 따라서, 태안(CT03), 보령(CB02, CB03), 당진(CD03)을 포함한 태안보령·당진 조사구는 멸종위기 야생생물이 출현한 생태보호 구역으로써 수달, 삥 등 멸종위기야생동물 출현을 지속적으로 모니터링 하는 등 주요 관찰 지역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.

4. 어류분야

4.1. 조사시기 및 방법

가. 조사시기

- 내성종 선정은 전년도에 데이터를 바탕으로 화력발전소 주변 하천 4곳 모든 곳에서 출현하는 종들을 대상으로 하였으며, 대상종에 대한 모니터링은 2021년 2월부터 2021년 7월까지 총 3회에 걸쳐 실시하였음.

[표 5.30] 충남 화력발전소 주변지역의 어류 조사 시기

구분	차수	조사(선정)시기	조사일수
후보종 선정	—	2019년 ~ 2020년 결과를 바탕으로 함	—
대상종 모니터링	1차 조사	2021년 2월 19일~2021년 2월 20일	2일
	2차 조사	2021년 4월 17일~2021년 4월 18일	2일
	3차 조사	2021년 7월 28일~2021년 7월 29일	2일

나. 조사방법

- 족대(5×5 mm), 투망(10×10 mm)을 사용하여 어류를 채집하였음. 채집된 개체는 현장에서 약품으로 처리한 후, 실험실에서 각 어종에 대한 전장(mm)과 무게(g)를 측정하여 기록하였음. (세부 조사방법 3차년도 보고서 pp. 499)
 - Length-weight relationship Length-weight relationship 분석은 체중에 대한 전장의 지수 함수적 관계로 표현한 것으로, 이때 나타나는 성장곡선의 회귀계수 값을 비교하여 각 개체군의 환경에 적응도를 판단할 수 있음.
 - 보통 회귀계수(b) 값은 3.0을 기준, 이보다 높으면 개체군 성장이 증가하는 추세를 보이고 반대로 낮으면 개체군 성장이 감소하는 경우임.

$$W=aTL^b \quad W: \text{무게} \quad TL: \text{전장}, a, b : \text{상수}, b=\text{회귀계수 값}$$

- Condition factor(K)는 개체군 전체 평균 체중을 전장의 세제곱 값으로 나누어 산출하며 어류의 비만화 정도를 평가함.
- 각 개체들의 condition factor(K)의 기울기 값이 양의 값을 보이면 비만화 경향을 나타내고, 음의 값을 보이면 왜소화 경향을 나타냄.

$$W = cTL^d, \quad d : \text{상수}, \quad c = \text{Condition factor의 기울기}$$

다. 선정사유

- 내성종은 오염에 내성이 강한 종들로 지역 내 오염정도를 평가하는 매우 좋은 판단 개체로 화력발전소 당진·태안보령·서천 4곳의 화력발전소에서 모두 출현하는 어종들을 대상으로 분석함.
- 내성종으로 선정된 붕어와 송사리는 서해안 지역에 폭넓게 분포하는 종들로 3차년도 어류조사에서와 마찬가지로 붕어⁶⁶⁾(*C. auratus*)와 송사리⁶⁷⁾(*O. latipes*)를 4차년도 어류 분야 모니터링 내성종으로 선정하였음.



[그림 5.39] 내성종인 붕어(*C. auratus* / 좌)와 송사리(*O. latipes* / 우)의 사진

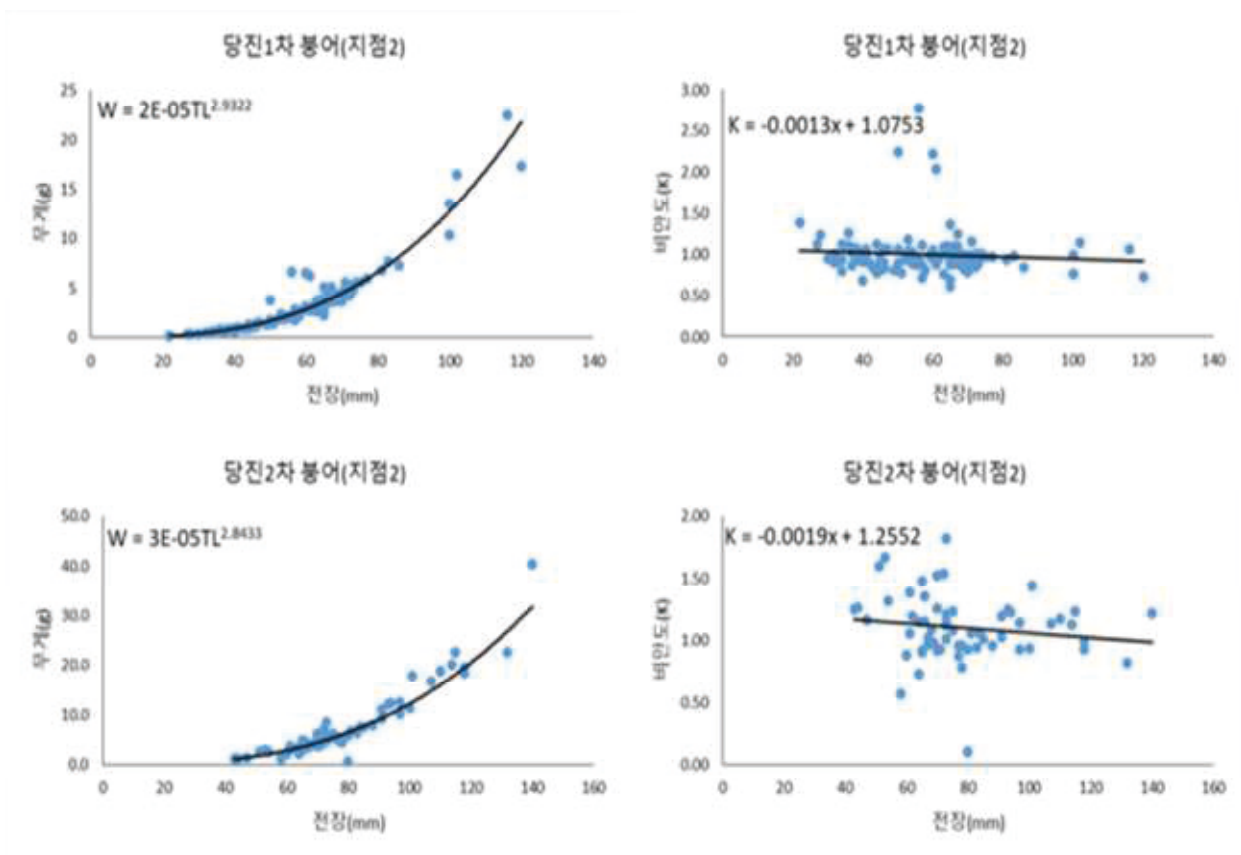
66) 잉어과에 속하며 오염과 높은 수온에 내성이 강한 어종으로 우리나라에서 서식의 폭이 상당히 넓고 유기물 등을 주로 섭식하여 1년에 2번까지도 산란이 가능한 어종임.

67) 송사리과에 속하며 떼를 지어 표층을 헤엄치면서 동물성플랑크톤을 주로 섭식하고 수온의 증가에 내성이 강하며 연중 수시로 산란을 하는 어종임.

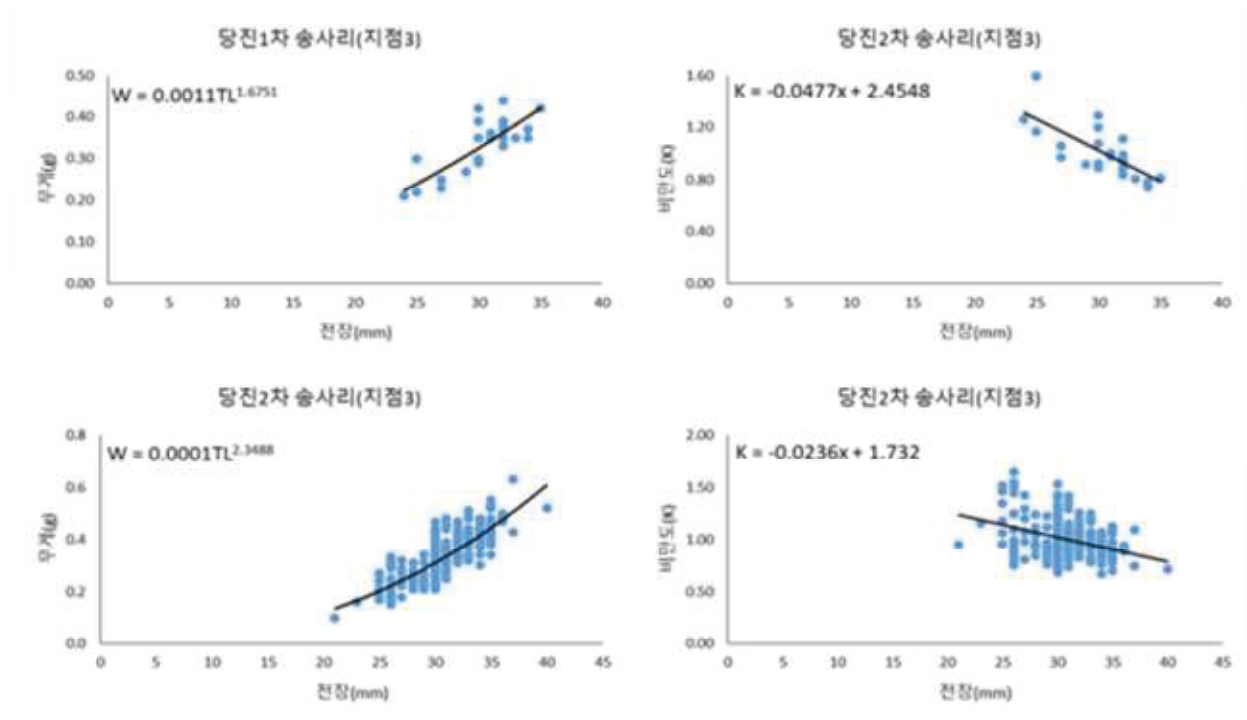
4.2. 주요종 모니터링 결과

4.2.1. 당진 조사구

- 당진 화력발전소 주변 하천의 붕어도 성장도와 비만도는, 1차 시기는 성장도 b값이 2.93, 비만도(K) 값은 음(-)으로 나타났고, 2차 시기에는 성장도 b값이 0.09 줄어든 2.84, 비만도(K) 값은 1차와 마찬가지로 음(-)의 값으로 나타남.
 - 아우점종인 송사리의 성장도 b값은 1차2차 각각 1.68과 2.35로 비만도는 음(-)의 값을 보여 붕어의 성장도와 비만도 값과 유사하게 나타남.



[그림 5.40] 당진 조사구 붕어 length–weight relationship과 condition factor 분석



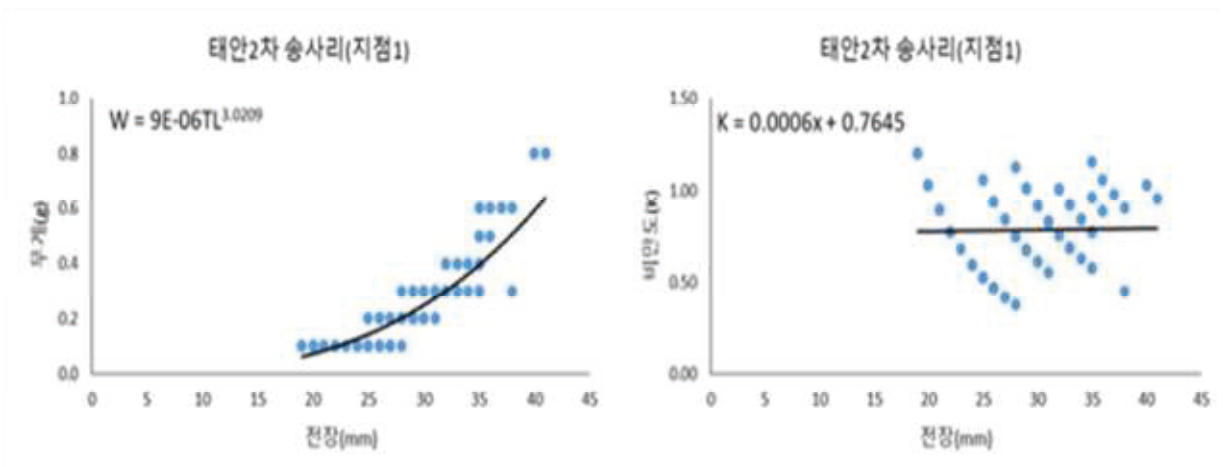
[그림 5.41] 당진 조사구 송사리 length–weight relationship과 condition factor 분석

- 당진의 우점종인 붕어와 아우점종인 송사리의 성장도 b값은 3.0을 넘지 못하였으며 비만도(K)도 음(-) 값을 나타내 서식환경이 양호하지 못하거나 개체군 크기가 큰 관계로 종내 및 종간 경쟁이 발생하였을 가능성이 높음.
 - 2019년 6월에 붕어는 성장도 2.88 그리고 2020년 3월에는 성장도 3.06으로 나타났으나 2021년 2월에 2.93 그리고 4월에 2.84로 해가 더 할수록 지속적인 감소 추세에 있는 것으로 나타남. 이와 같은 결과는 2021년 2월과 4월 조사 모두에서 아우점종으로 출현하는 등 비교적 많은 개체수로 인해 종내 경쟁이 발생하였을 가능성도 있음을 확인함.
 - 이외에도 2021년 2월에는 우점종 왜물개, 우세종 송사리, 그리고 4월에는 송사리가 우점종, 우세종으로 왜물개가 출현하여 종들간에 경쟁이 있음을 일부 보여주었고, 특히 왜물개와 송사리는 개체들의 크기가 작은 소형종에 해당되어 붕어의 치어나 미성어들과 종간 경쟁이 발생할 가능성이 있었을 것으로 판단됨.
 - 이처럼, 본 하천에 수생태의 조절자 역할을 하는 어식성의 핵심어종⁶⁸⁾(keystone species)이 적거나 거의 없기 때문에 발생한 결과일 수도 있어 보다 명확한 분석을 위해서는 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단됨.

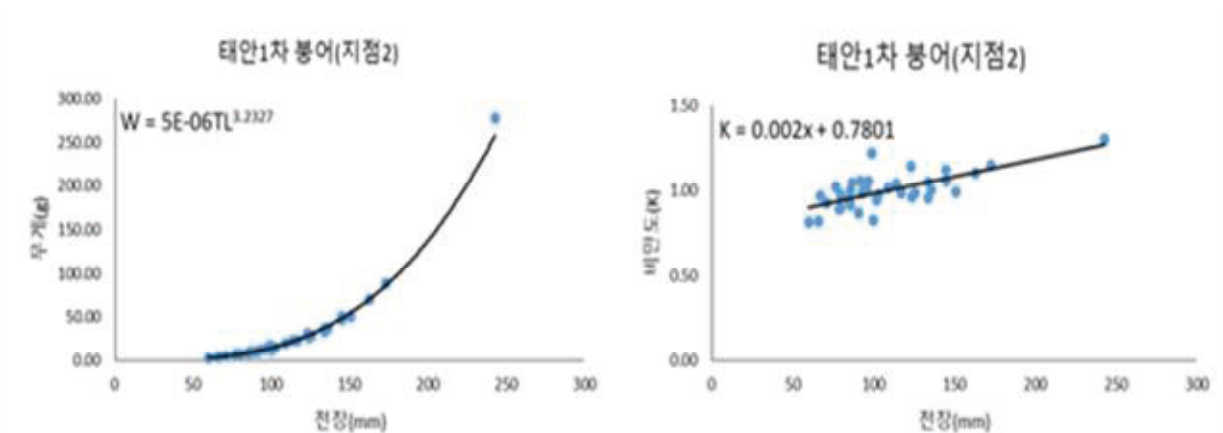
68) 하천 생태계내에서 제일 상위에 위치한 육식성 어종으로 생태적 지위가 가장 높은 어종임.

4.2.2. 태안 조사구

- 태안 조사구에서 1차 조사 시와 지점 2에서는 송사리 개체수가 적어 성장도와 비만도를 나타낼 수 없어, 2차 조사 시 지점 1에서 채집된 송사리를 가지고 분석하였으며, 성장도는 3.02, 비만도는 양(+)의 값을 보여 개체군 성장이 양호함을 확인함.
- 지점 1에는 수심이 얕은 곳도 많으나 일부에는 수초가 많은 40~50cm 되는 웅덩이가 존재하며 송사리 먹이원인 동물성플랑크톤이 육안으로 보일 정도로 풍부한 곳이었음.
 - 2차년도 2019년 6월 송사리 성장도 2.54, 비만도는 음(-), 3차년도인 2020년 3월은 2.71로 증가하였으나 비만도는 여전히 음(-)의 값을 나타냄. 4차년도 2021년 4월에는 성장도가 3.02, 비만도가 양(+)으로 긍정적으로 나타났는데 이는 조사구 수환경이 송사리가 서식하기에 좋은 환경으로 개선된 결과로 판단됨.



[그림 5.42] 태안 조사구 송사리 1차와 2차 조사 성장도와 비만도 분석

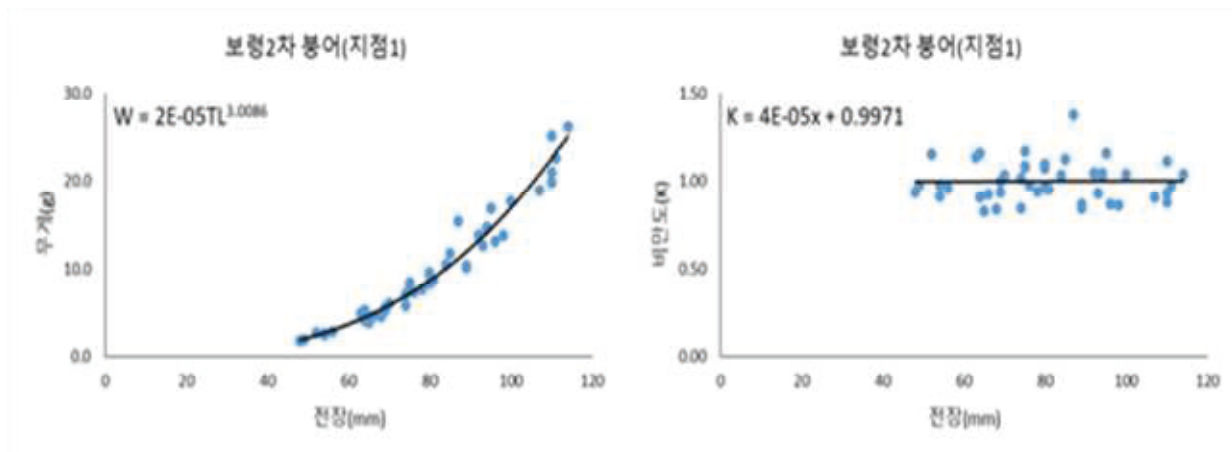


[그림 5.43] 태안 조사구 붕어 1차 조사 성장도와 비만도 분석

- 붕어 개체군 성장도는 1차(2021년 2월)시기에 3.23로 나타나 성장이 양호함을 보여주고 있었고, 비만도도 양(+)의 값을 나타내어 안정화된 개체군을 보여주는 것으로 나타남.
 - 2019년 6월에 붕어는 성장도 3.03, 2020년 3월에 3.12로 나타나 2021년 조사를 포함한 모든 시기에 성장도는 3.00 이상의 값을 보였고 비만도도 모두 양(+)의 값을 나타내 본 지역에서는 붕어의 개체군이 안정적으로 유지되고 있었음.
 - 그러나 개체들의 크기로 분석해 볼 때 대부분이 10cm 미만의 개체들로 큰 개체들이 보이지 않는 것은 큰 어류가 서식할 수 있는 깊은 수심이 없고, 하천종적연속성 단절로 인하여 개체 이동이 약하기 때문인 것으로 판단됨.
- 앞서 설명한 바와 같이, 4차년도 연구조사 결과 태안 조사구의 붕어와 송사리의 성장도 및 비만도는 모두 양호한 값을 나타내어 두 개체군 모두 본 지역에서 잘 정착하고 있는 것으로 확인됨.
 - 그러나 붕어의 경우 큰 개체들이 보이지 않고 50~150 mm 정도의 개체들이 대부분인 것은 2020년 겨울 최소 3년생 이상 20cm 대형 붕어, 떡붕어, 잉어 등의 개체가 폐사한 건이 영향을 미쳤을 것으로 추정되며, 관련 어류폐사는 단발적 현상으로 명확한 원인은 지속적인 개체 관찰을 통해 분석이 필요할 것으로 판단됨. (본 보고서 4-221쪽 참조)

4.2.3. 보령 조사구

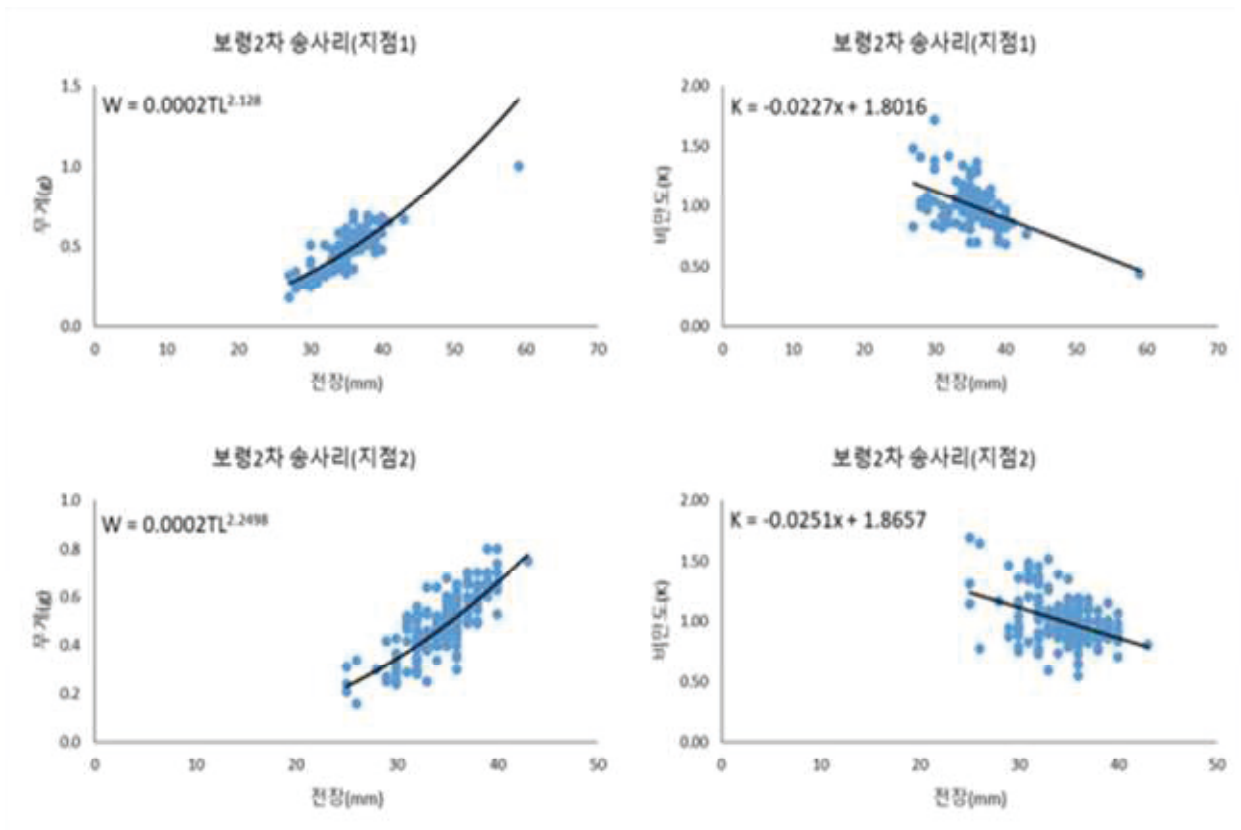
- 보령 조사구의 붕어는 1차 조사 때는 거의 출현하지 않아 성장도와 비만도의 수치를 구할 수 없었고 2차 조사시 지점 2에서 출현한 붕어의 성장도는 3.0을 조금 넘었고, 비만도도 양(+)의 값을 보여 비교적 안정화된 개체군을 보였음.
 - 이전 조사인 2019년 6월에 붕어의 성장도는 3.07, 비만도는 양(+)의 값을 나타냈고 2020년 3월에도 성장도는 2019년보다 더 높은 3.16의 값을 나타내어 전년도의 붕어들의 개체군 성장이 양호하였음을 보여주고 있음.
 - 이와 같이, 이전 조사와 달리 성장도나 비만도 값이 약간 낮아진 것은 지점 1에서 2020년 하반기부터 2021년 상반기까지 행해진 공사로 인해 탁수 및 서식지 교란의 등의 영향을 받은 것으로 판단됨.



[그림 5.44] 보령 조사구 붕어 성장도와 비만도 분석

- 송사리의 성장도 b값은 1·2차 각각 1.43과 2.13으로 나타났고 비만도도 모두 음(-)의 값을 나타나, 개체군 성장이 양호하지 못함을 보여주고 있음.
 - 이같이 성장도 및 비만도 값이 모두 낮게 나타난 것은 개체군 서식밀도가 높거나 먹이원이 적기 때문인 것으로 판단되며, 특히 전자의 경우 송사리 개체군 제어(포식)가 가능한 핵심어종이 없기 때문에 종내 경쟁으로 인해 비만도가 음(-)의 값을 보이고 이런 결과 개체군 성장이 양호하지 못한 것으로 추측됨.
 - 특히 본 조사지점은 앞서 언급한 바와 같이 (본 보고서 4-82쪽) 하천 폭이 넓고 수심이 얕은 곳이 많아 핵심 어종인 가물치 및 기타 핵심 어종들이 부재하거나 매우 적기 때문에 나타난 결과일 가능성도 있을 것으로 판단됨.

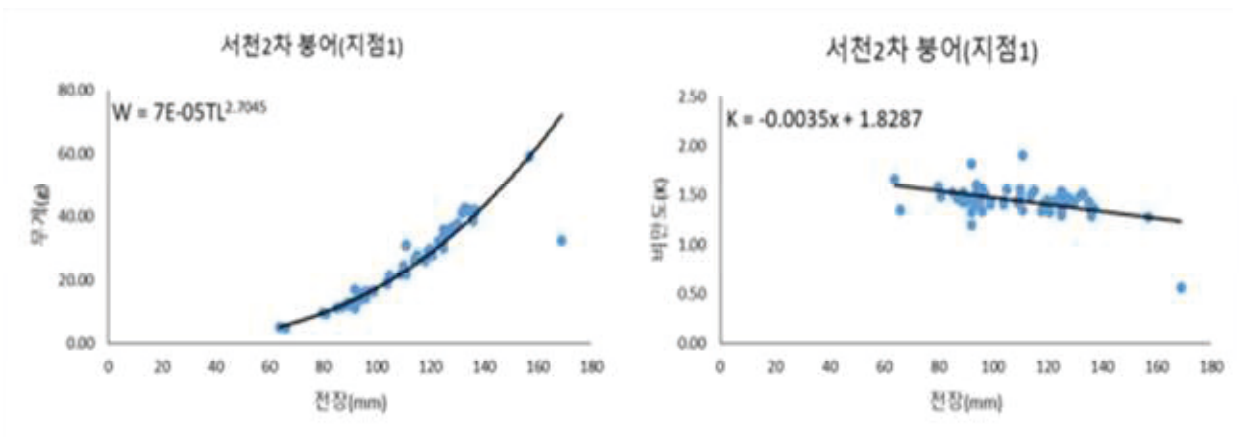
- 연차별로 송사리의 성장도와 비만도를 살펴보면, 3차년도인 2019년 6월에는 성장도가 3.03, 2020년 3월은 3.36으로 매우 양호한 값을 나타내고 비만도도 양(+)의 값이 나타났으나, 4차년도에는 성장도가 1.43~2.13로 감소하고, 비만도가 음(-)으로 낮아졌음.
- 이같이 성장도와 비만도 값이 2019~2021년 사이 급격히 감소한 것은 앞서 설명한 바와 같이 송사리를 포식하는 핵심어종인 민물두줄망둑과 민물검정망둑의 비교풍부도가 3차년도(2020년) 5.43%, 8.83%에서 4차년도(2021년)에 각각 0.46%, 4.03%로 급격히 감소하였는데 핵심어종의 비교풍부도가 감소되면서 송사리의 개체군 밀도가 증가하여 송사리의 성장도와 비만도가 감소한 것으로 분석됨.



[그림 5.45] 보령 조사구 송사리 성장도와 비만도 분석

4.2.4. 서천 조사구

- 서천 조사구 우점종 붕어의 성장도 b값은 2.70, 비만도는 음(-)의 값을 보였고, 2021년 조사 시에는 송사리가 출현하지 않았음.
 - 2019년 6월에 붕어의 성장도는 3.10, 비만도는 양(+)의 값을 나타내었으나 2020년 3월에는 성장도 2.88, 그리고 비만도는 음(-)의 값을 나타내어 개체군 성장이 낮아지고 비만도도 음(-)으로 전환되었음.
 - 특히 이번 4차년도 조사에서는 2020년 3월보다 성장도 값이 더 낮아진 결과로 나타나, 하천단절로 인한 하천 수환경이 점차 나빠지고 있음을 보여주는 것으로 판단됨.



[그림 5.46] 서천 조사구 붕어의 성장도와 비만도 분석

4.3. 요약 및 소결론

- 어류분야 모니터링종으로 환경변화에 대한 내성이 강한 붕어와 송사리로 선정하여 2021년 2월과 4월에 전장 및 체중을 계측하여 모니터링 하였음. 성장도는 개체군 성장의 양호함 정도를, 비만도는 개체들의 건강 상태를 보여주는 것임.
- 당진조사구 붕어와 송사리의 성장도 b값은 3.0을 넘지 못하였으며 비만도(K)도 음(-)의 값을 나타내 서식환경이 양호하지 못하거나 개체군 크기가 큰 관계로 종내 및 종간 경쟁이 발생하였을 가능성이 높고, 수생태의 조절자 역할을 하는 핵심어종(keystone species) 소실로 인해 성장도와 비만도가 낮게 나타난 것으로 분석됨.
 - 2차년도인 2019년 6월에 붕어의 성장도는 2.88, 3차년도인 2020년 3월에는 3.06으로 나타났고, 4차년도인 2021년 4월에는 2.93으로 확인되어 당초 성장도 2.88과 비교하여 해를 거듭할수록 감소 추세에 있는 것으로 확인됨.
 - 특히 4차년도(2021년)에는 우점종과 우세종들이 비슷한 크기들의 왜물개, 송사리 등이 많아 종간 경쟁으로 인한 결과로 성장도가 낮아진 것으로 판단됨.
- 태안조사구 붕어와 송사리의 성장도와 비만도는 모두 양호한 값을 보여 두 개체군 모두 본 서식지에서 잘 정착하고 있는 것으로 나타났고, 다른 조사구 지역에 비해 크기가 큰 붕어 개체들이 잘 보이지 않음.
 - 붕어의 성장도는 2019년 6월에 붕어는 성장도 3.03, 2020년 3월에 3.12, 2021년 2월에 3.23로 나타나 성장이 양호함을 보여주었고, 비만도도 모두 양(+)의 값을 나타내어 안정화된 개체군을 보여줌.
 - 송사리의 성장도는 2019년 6월 2.54, 2020년 3월에 2.71, 2021년 2월에 3.02이고, 비만도는 2019~2020년 음(-)에서 2021년 양(+)으로 개선되어 연차별 개체군 성장이 양호함을 확인하였음.
 - 그러나 개체들의 크기로 분석해 볼 때 대부분이 10cm 미만의 개체들로 큰 개체들이 보이지 않는 것은 큰 어류가 서식할 수 있는 깊은 수심이 없고, 하천종적연속성 단절로 인하여 개체 이동이 약하기 때문인 것으로 판단됨.
 - 아울러, 지점 2에서 발견된 20cm 이상의 큰 붕어가 2020년 겨울 대량 폐사하여 큰 붕어 개체가 보이지 않은 것에 영향을 미친 것으로 추정됨.

- 보령조사구 붕어 성장도는 3.0을 조금 넘고, 비만도는 양(+)의 값을 보여 비교적 안정적인 것으로 확인되었는데, 2차년도 2019년 6월에는 3.07, 3차년도 2020년 3월은 3.16 값을 나타내어 전년 대비 성장도가 다소 낮아짐.
 - 이는 지점 1에서 2020년 하반기부터 2021년 상반기까지 실시된 하천 바닥공사로 인하여 탁수 및 서식지 교란의 영향 (하천 바닥공사는 최소 3개월에서 최대 1년까지 영향을 줌)을 받아 나타난 것으로 추정됨.
 - 보령조사구 송사리 성장도 b값은 1차, 2차 각각 1.43과 2.13으로 나타났고 비만도도 모두 음(-)의 값을 나타냈는데 2차년도 2019년 6월에 3.03, 3차년도 2020년 3월에는 3.36의 '매우 양호한 값' 에서 급격히 낮아졌음.
 - 송사리의 성장도와 비만도가 급격히 낮아진 것은 붕어와 마찬가지로 지점 1의 하천 바닥공사의 영향과 핵심어종인 민물검정망둑 및 민물두줄망둑 등이 개체군이 급격히 감소하여 송사리의 개체군 밀도가 증가에 따른 결과로 분석됨.
- 서천조사구 붕어 성장도 b값은 2.7이고 비만도는 음(-)의 값을 보여 개체군 성장이 양호하지 못한 것으로 나타남.
 - 2차년도 2019년 6월에 붕어의 성장도는 3.10, 3차년도 2020년 3월는 성장도 2.88로 개체군 성장도가 낮아지는 것으로 확인되었음.
 - 특히, 4차년도 2021년 4월에 붕어의 성장도가 2.70으로 나타나 3차년도 2020년 3월보다 성장도가 0.18 더 낮아진 것으로 확인되었고, 서천 하천 단절로 인하여 수환경이 점차 나빠져 송사리가 출현하지 않았음.

제6장 결론 및 제언

1. 결론 및 제언

2. 정책제언(신규사업 제언)

1. 결론 및 제언

1.1. 산림생태계 오염물질 모니터링

- 석탄화력발전소의 수은 배출에 따른 수목의 영향을 확인하기 위하여 충남 화력발전소를 기준으로 이격거리별로 시험구를 선정하고, 화력발전소의 영향을 적을 것이라고 예상되는 산림지역을 대조구 (충북 보은, 경남 함양, 전남 장흥)로 선정하여 수목 나이트의 수은농도를 비교 분석함.
 - 충남 외의 화력발전소 주변 지역의 수목 나이트 수은농도를 분석하여 충남 지역 시험구 내 수은농도 변화의 양상이 화력발전시설의 영향으로 인한 것인지 여부를 확인하였음.
 - 본 과업의 대조구와 충남지역의 시험구 4곳(충남 태안 및 보령)의 수목 나이트 수은농도는 1993년부터 2019년까지 각각 평균 1.37, 4.11ng/g로 나타나 시험구가 대조구에 비해 약 3배 높은 것으로 나타남.
 - 수목 나이트 수은농도는 서천과 군산의 시험구를 제외하고 1980년대 급증하여 1990년대 중반까지 그 수치를 유지하다가 이후 점차적으로 감소하고 2000년대 중반 이후에는 안정화가 된 것으로 나타났음.
 - 이러한 결과는 대기오염물질배출허용기준의 규제 강화로 인해 화력발전시설 내 탈질설비 등 대기오염물질 배출 저감을 위한 시설이 수은의 배출계수를 감소시켰기 때문으로 판단됨. 실제로 국립환경과학원 대기공학연구과는 석탄화력발전시설의 수은 배출계수가 2007년에 비해 2020년에 약 84% 감소하였다고 발표한 바 있음.
 - 또한, 일반적으로 석탄화력발전시설에 수은만을 처리하기 위한 대기오염방지시설은 존재하지 않지만, 국립환경과학원은 대기오염물질 배출 저감시설의 운영이 대기 중으로 방출되는 수은의 농도를 감소시켰다고 발표한 바 있음.
 - 이는 수은의 습성 침적에 기여도가 높다고 알려진 입자상 수은이 대부분 PM_{2.5}의 형태로 존재하기 때문에 미세먼지 저감시설에 의해 감소될 수 있기 때문인 것으로 판단됨.
 - 환경부는 대기환경보전법 제16조(배출허용기준)에 따라 대기오염물질 배출시설에서 배출되는 대기오염물질의 배출허용기준을 규제하고 있음. 수은배출허용기준을 적용하는 배출시설 중 석탄화력발전소가 명시된 것은 2005년이 최초였으며, 2005년 1월 1일부터 수은배출허용기준이 5mg/Sm³ 이하였음. 해당 기준은 2009년도까

- 지 적용되었으며, 2010년 1월 1일부터는 0.1mg/Sm³ 이하였고, 이후 몇 차례의 규제 강화 후 2020년도부터 0.04 mg/Sm³ 이하로 수은배출이 규제되고 있음.
- 수목나이테 수은농도가 과거에 비해 감소하여 안정화된 것으로 보아 충남지역의 화력 발전시설에 대한 오염물질 배출 규제가 적절하게 이루어졌던 것으로 보임. 하지만, 수목 나이테 수은농도가 안정화되었음에도 불구하고 앞에서 설명한 대조구 3 곳과 시험구 4곳의 최근 5년(2015-2019년)간 수목 나이테 수은농도는 각각 평균 1.03, 2.23ng/g으로 여전히 시험구에서 대조구에 비해 2배 가량 수은농도가 높은 것으로 나타났음.
 - 시험구의 화력발전소 기준 이격거리와 상관없이 유사한 시기에 수목 나이테의 수은 농도가 증가하고 감소하는 것으로 보아 수은의 대기 중 장거리 이동성을 확인할 수 있었으며, 3, 4차년도의 충남 시험구의 화력발전소 기준 이격거리가 1~20km인 것을 감안하였을 때 화력발전소의 수은 배출 영향범위가 1~20km임을 확인할 수 있었음.
 - 또한, 화력발전소 주변의 수목 나이테 내 수은농도가 2000년대 중반부터 감소한 것으로 확인되었으나, 여전히 대조구에 비해 시험구의 수은농도가 높았으며 최근 27년간 수목 나이테 수은농도는 시험구에서 대조구에 비해 약 3배 높은 것으로 보아 수목 내에 수은의 농축에 대한 가능성을 확인할 수 있었음.
 - 이는 향후 산불 발생 시 수목의 연소로 인해 수은이 대기 중으로 환원될 수 있는 가능성을 제시하며, 벌채 후 목재 이용 측면에서 수은의 영향을 받을 수 있다는 것을 암시함.
 - 또한 분석 결과, 충남 화력발전소의 수은 배출 영향범위가 0~20km인 것이 확인됨에 따라 파악된 화력발전소 영향 범위 내의 수목의 활용 및 산림관리 측면에서 농축된 수은의 양을 고려할 필요가 있을 것으로 판단됨.
- 수목나이테의 수은농도 분석과 달리 토양의 수은농도 분석 결과는 단일 분석을 통해 시계열적인 분석을 수행할 수 없으며, 토양 내에서의 수은 거동을 파악하는 것은 어렵기 때문에 환경부에서는 전국을 대상으로 토양오염이 예상되는 지점에 대해 토양오염실태조사를 시행하고 있음.
- 해당 조사는 각 지자체에서 조사지점에 대한 수은농도를 분석하고 환경부에서 통합관리하고 있으며, 본 과업의 4차년도에는 환경부에서 공개하는 토양오염실태조사결과를 중심으로 문헌조사를 실시하였음.

- 토양환경보전법 제1조의5 및 제 20조와 관련하여 우리나라는 사람의 건강 및 재산이나 동물 및 식물의 생육에 지장을 줄 우려가 있는 토양오염의 기준을 토양오염우려 기준으로 명명하고 있으며, 해당 기준은 토지이용별로 구분하여 전, 답 등은 4,000ng/g, 임야 등은 10,000ng/g, 공장용지 등은 20,000ng/g로 규정하고 있음.
- 토양오염실태조사에 따르면 2000년도부터 2020년도까지 토양 수은농도는 전국 평균 35.8ng/g였으며, 2020년도의 평균은 38ng/g으로 나타남. 2020년도 기준 전국의 토양 수은농도는 서울특별시가 100.2ng/g로 가장 높았으며, 충청남도가 91.9ng/g로 두 번째로 높은 것으로 확인됨.
- 2020년도 토양오염실태조사결과에 따르면 충남지역의 산업단지 및 공장지역은 토양 수은농도가 206.2ng/g로 전국 평균인 37.2ng/g에 비해 약 5.5배 높은 것으로 나타남.
- 또한, 토양오염실태조사는 지목별로도 구분하여 조사를 수행하는데, 2020년도 기준 21개 지목 중 11개 지목에서 충남의 토양 수은농도가 전국 평균을 초과하였으며, 산림토양 수은농도의 경우 충남이 84.0ng/g, 전국 평균이 31.9ng/g로 나타났음.
- 공장지역의 토양 수은농도는 충남이 163.1ng/g, 전국 평균이 38.3ng/g로 나타나 전반적으로 충남지역은 국내 다른 광역 시도에 비해 토양 수은농도가 높은 것으로 확인되었음.
- 토양오염실태조사는 총 14개 조사지역 종류로 구분하여 시행되고 있으며, 화력발전시설 관련 조사지점은 주로 ‘산업단지 및 공장지역’에 포함되어 있으나, 충남지역은 국내 59기의 화력발전소 중 29기가 소재하여 석탄화력발전소의 밀도가 높은 지역임에도 불구하고 2020년도 기준 화력발전시설 관련지역에 대한 조사는 4건에 불과하였음.
- 충남지역 내 화력발전시설 관련 조사지점은 ‘공장용지’와 ‘임야’로 구분되었으며, 공장용지의 토양 수은농도는 0.00ng/g, 160ng/g였고 임야의 토양 수은농도는 20ng/g, 190ng/g로 나타나 공장용지에 비해 산림토양에서 화력발전소의 수은 배출영향을 많이 받는 것으로 분석됨. 그럼에도 불구하고 2020년도 기준 충남지역의 조사지점 229개 중 산림지역은 4개에 불과하였음.
- 2020년도 토양오염실태조사결과 기준 충남은 전국에서 토양 수은농도가 2번째로 높았고, 화력발전시설 관련 산림지역의 토양 수은농도가 전국 산림토양 대비 약 6배 이상 높은 케이스가 발견됨. 그럼에도 불구하고 조사 지역 중 화력발전시설 관련지역은 4개, 오염원과 상관없이 산림을 대상으로 한 조사지점이 4개에 불과한 것으로 나타났음.

- 따라서 화력발전시설의 밀도가 높은 충남지역에 대해서는 화력발전시설과 관련된 조사지역을 별도로 구분하거나, 조사지점에 대한 개수 및 공간적 범위를 확대시켜 지속적으로 모니터링하여 오염에 대한 관리가 필요할 것으로 보임.
- 특히, 본 과업의 3, 4차년도에 수행한 수목 나이트 수은농도 분석결과에 따르면 화력발전소의 수은 배출 영향 범위는 산림 기준 약 1~20km일 것이라고 추정됨에 따라 해당 범위 내에서 더 집중적으로 산림에 대한 오염 관리가 필요할 것으로 사료됨.
- 한편, 대기오염물질배출허용기준에는 2005년부터 석탄화력발전소에 대해 별도로 명시 후 규제에 대한 기준을 제시하기 시작하였을 만큼 석탄화력 발전시설의 대기오염물질 배출은 규제가 필수적이었음.
- 이는 화력발전소의 대기오염물질 배출이 사람뿐만 아니라 동물 및 식물에 영향을 미칠 수 있기 때문이며, 토양오염실태조사도 이러한 점을 고려하여 대기오염물질 배출허용기준의 대상 지점에 대해서는 조사지역 내 세부 범주로 구분하여 취급하는 것이 오염원 관리를 합리적·효율적으로 수행할 수 있을 것이라 판단됨.

1.2. 화력발전소 주변지역 중금속 농도 모니터링

- 충남지역 4개 화력발전소의 주변 하천에 대한 수질과 수환경 그리고 저질을 조사한 결과 대체로 어류 서식에는 큰 문제가 없는 것으로 확인되었으나, 일부 지점 저질에서 중금속 일부가 어류폐사 기준치를 초과하거나 저서생물 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 것으로 나타나 지속적인 관찰이 요구되는 것으로 확인되었음.
 - 당진 화력발전소 인근 하천에서 수질을 조사한 결과 어류의 서식에는 큰 문제가 없는 것으로 나타났으나, 수체 내 중금속을 분석한 결과, Fe은 지점 1과 3에서 어류폐사 기준치인 0.5 mg/l를 1.4배, 2.4배 초과하였고 Zn은 지점 1과 지점 3에서 어류폐사 기준치인 최대 7.6배 초과함.
 - 당진 화력발전소 인근 하천 저질 내 중금속을 국내 환경부 기준을 적용하면 Pb이 3개 지점 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높은 3등급(154~459 mg/kg)으로 분석되었음. Cu는 지점 1과 지점 3에서 3등급으로, 지점 2에서 2등급(48~228 mg/kg)으로 나타남. Zn도 지점 2에서 2등급으로 확인되어 모두 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 것으로 조사됨. 이에 따라 당진화력발전소 주변 하천 수질과 저질은 지속적인 모니터링이 요구되며 경우에 따라 준설도 필요할 것으로 판단됨.

- 태안 화력발전소 인근 하천 수질 및 수체 내 중금속을 분석한 결과, Fe을 제외한 대부분 항목에서 환경부 어류치사 농도 기준치에 미달하는 것으로 나타나 어류 서식에는 큰 문제가 없는 것으로 판단되었으나, Fe이 어류 폐사기준치 보다 지점 1에서 3.8배, 지점 2에서 1.36배 높게 나타나 회처리장의 침출수 영향 때문인것으로 추정됨.
 - 또한, 저질의 중금속 농도는, 우리나라 환경부 ‘하천 퇴적물 오염평가기준 분류를 적용할 경우 지점 1에서 Cd과 지점 2에서 Pb 각각 검출되어 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있는 2등급으로 확인됨.
 - 보령에서 일반 수질 항목은 어류 서식에 적합한 것으로 나타났으나, 하천 내 중금속 분석 결과, Fe는 어류폐사 기준치 0.5 mg/l의 3~5배로 검출되어 어류폐사의 위험에 일부 노출됨. 이와 같은 결과는 지점 1에서 2020년 하반기부터 2021년 상반기 까지 행해진 공사로 인해 바닥 저질에 존재하던 성분들이 용출된 결과로 보여짐.
 - 보령의 저질 중금속 농도는 지점 1에서 Cu와 Zn이 3등급, 지점 1에서 Pb이 4등급으로 측정되어 저서생물에 독성이 나타날 확률이 매우 높은 것으로 확인되었고 수생태계에 부정적인 영향을 주고 있는 것으로 분석돼 준설 필요성을 확인함.
 - 서천 화력발전소 주변지역 하천의 수질과 중금속을 분석한 결과, 중금속항목 중 Al은 어류폐사 가능 범위 (0.1 mg/l ~ 5 mg/l)인 0.16 mg/l에 해당하는 수치였고 Fe는 0.68 mg/l로 어류폐사 수치 0.5 mg/l보다 1.36배 높은 것으로 나타나 폐사 가능성이 일부 있는 것으로 나타남. 저질 내 중금속 농도를 환경부 기준치로 보면 Cu 항목에서 2등급으로 나타나 ‘약간 나쁨’ 으로 분석되고, 그 외 중금속은 1등급으로 문제가 없었음.
- 어류 중금속 분석에서는 Fe과 Al이 약간 높은 값으로 나타나 지속적인 모니터링이 필요한 것으로 판단됨.
- 붕어 중금속 분석 결과, 대조구에서는 검출되지 않았던 Fe이, 당진, 보령, 태안에서 국내 유통 민물어류 붕어의 Fe 평균 농도인 8.129 mg/kg 보다더 높은 63.0 mg/kg(당진), 41.3 mg/kg(보령), 19.6 mg/kg(태안)값을 나타냄. 그러므로 Fe을 포함한 중금속 오염정도를 보다 명확하게 연구하기 위해 5차년도에는 3종 이상 및 샘플 수 30표본 이상 분석 예정임.
 - Al의 경우 대조군보다 4개 시군의 평균 농도가 1.1 mg/kg이 높은 것으로 확인되어 차후 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단됨.

- 포유류 중금속 농도 분석에서는 화력발전소 주변지역(당진)의 설치류가 대조구(서산)의 설치류보다 체내 중금속 함량이 상대적으로 높게 나왔으나, 통계적 해석을 위한 분석시료의 양이 부족함.
 - 소형 설치류에서의 중금속 연구는 국내에서 뚜렷하게 진행된 케이스가 전무한 상태이며, 특히 화력발전과 관련된 포유류 중금속 연구는 기후변화와 관련하여 향후 중요한 기초자료로 활용될 수 있기 때문에 포유류 중금속 연구를 확대할 필요가 있음.
 - 1세부 대기 중 미량중금속 분석결과와 비교한 결과, 당진에서 상대적 고농도로 검출된 카드뮴(Cd)이 설치류에도 동일하게 검출되었음.
 - 5차년도에는 설치류 중금속 분석과 1세부 대기에서 지역별로 상대적으로 높게 검출된 중금속과의 연관성을 체계적으로 분석할 수 있도록 대기 중 중금속 분석 원소를 확대하고 통계적 해석을 위한 설치류 분석 샘플 양을 지역별로 최소 10개체씩 총 80개체 이상 분석이 필요할 것으로 확인됨.
- 화력발전소 주변지역의 생태환경 모니터링을 위한 조사지로 「발전소주변지역법(산업통상자원부 2020)」에서 정하는 발전소 5km 이내에서 분야별 특성을 고려하여 선정하였고, 대조구는 1차년도 기후변화 시나리오 연구를 바탕으로 화력발전소로부터 이격 거리가 10km 이상 떨어져 있으며 해안기후의 영향을 받고 충분한 산림을 가지고 있는 충남 서산 팔봉산과 서천 희리산을 대조구로 선정함.
 - 산림생태계 모니터링 결과 화력발전소와 연관성이 있는 수은의 영향 범위가 최소 20km로 나타나, 희리산은 서천 화력발전소와 15km 떨어져 있고, 팔봉산은 태안 화력발전과 15km 떨어져 있어 명확한 수은의 영향 범위를 파악하는데 한계가 나타남.
 - 따라서, 5차년도에는 중금속 오염분야의 대조군의 조정이 필요하며, 현재 조사 중인 대조구는 기후환경만 반영되었으므로 생태 모니터링을 위한 대조구 조정에 대한 추가 논의가 필요함.

1.3. 화력발전소 주변지역 생태 모니터링

- 식물분야 4차년도 모니터링 조사를 통해 일부 분류군이 추가 확인되어, 지역별로 1분류군 이상 추가되었음. 특히 희리산의 경우 4차년도에 식물상 조사를 추가로 수행하여 분류군수가 크게 증가함.

- 조사 결과, 귀화율은 화력발전소 주변지역인 당진, 태안, 보령, 서천은 10% 이상으로 분석되어 각각 10% 미만으로 분석된 팔봉산, 희리산보다 높았음. 이는 정비된 등산로 외에는 훼손 및 교란 빈도가 비교적 낮은 대조구에 반해, 화력발전소 주변 지역은 고압선 설치, 도로 개발 등에 의한 교란으로 귀화식물의 비율이 높게 나타난 것으로 판단됨.
- 곤충분야 모니터링 결과 2018년부터 2021년까지 당진 조사구에서 11목 69과 191종, 태안조사구에서 11목 70과 184종, 보령조사구 10목 57과 114종, 서천조사구 11목 46과 76종, 서산 팔봉산 대조구 10목 71과 199종, 서천 희리산 대조구 11목 78과 190종의 곤충이 확인되어 보령과 서천조사구에서 곤충의 다양성이 다른 지역에 비해 비교적 낮게 나타남.
 - 2021년 서천조사구에서 멸종위기 야생생물 II급인 애기뿔소뿔구리가 확인되어 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단되며, 각 조사구의 지표배회성곤충 군집과 천공성곤충 군집의 시기별 종수, 개체수, 다양도 지수는 일정한 경향성을 보이지 않아 각 조사구간, 조사구와 대조구간 차이가 나타나지 않았음.
 - 화력발전소 주변지역인 당진조사구 및 태안조사구에서 곤충의 종수 및 개체수가 대조구와 유사한 것으로 확인된 점을 고려할 때, 보령조사구 및 서천조사구의 곤충다양성이 낮게 나타난 것은 화력발전소의 영향이 아닌 서식지 조건 및 기타 인위적 요인에 의한 것으로 판단됨.
- 포유동물의 흔적조사, 무인센서카메라 조사 및 포획 트랩을 이용한 조사를 실시한 결과 총 5목 9과 10종이 조사됨. 지역별로 당진에서 8종, 태안에서 7종, 보령에서 7종, 서천에서 5종이 조사되었고, 대조구인 서산 팔봉산에서 6종, 서천 희리산에서 5종이 조사됨.
 - 화력발전소 주변지역과 대조구간 종별 상대풍부도 지수(RAI) 비교 결과 주변지역이 야생동물 상대풍부도 지수가 높은 것으로 나타남. 서산과 서천의 주요 관광지인 팔봉산과 희리산의 야생동물 상대풍부도 지수가 낮은 주요 원인은 많은 탐방객이 야생동물 서식에 영향을 준 것으로 판단됨.
 - 대조구 선정 당시, 화력발전소의 영향 정도만을 고려하여 선정하였고, 탐방객의 방문

증가가 야생동물 출현에 부정적 영향을 미침에도 탐방객의 산림 훼손 여부는 고려되지 않았기 때문에 상대적으로 등산로가 없고 방문객이 거의 없는 조사구의 종별 상대풍부도 지수(RAI)가 대조구에 비해 높게 산출된 것으로 분석됨.

- 멸종위기야생생물 I 급이자 천연기념물 제330호인 수달 1종이 서천과 태안, 보령 화력발전소 주변에서 흔적이 확인되었고, 태안과 보령에서 무인센서카메라에 촬영되어 실체를 확인함. 멸종위기야생생물 II 급인 삼은 태안에서 흔적으로 확인되었고, 당진, 태안, 보령 및 서산 희리산에서 센서카메라에 촬영됨.
- 충남지역 4개 화력발전소의 어류조사를 실시한 결과 총 6목 10과 27종 5,189개체가 출현한 것으로 나타남. 출현어종 중 한국고유종은 가시납지리, 쉬리, 얼룩동사리 등 3종, 외래도입어종은 떡붕어, 블루길과 배스(생태계교란어종) 3종이 출현함.
 - 당진화력발전소 주변 하천에서 어류조사를 종합한 결과, 총 5목 9과 22종 2,418개체로 예년보다 5종이 증가하여 출현하였고, 한국고유종은 얼룩동사리와 쉬리 2종이 출현함. 외래도입종은 떡붕어, 블루길과 배스(생태계교란어종) 3종이 채집됨.
 - 어류건강성평가(FAI) 결과 모든 지점에서 'C' 등급인 '보통' 으로 평가된 것은 긍정적으로 평가됨. 따라서 지속적인 하천 종적연속성(유로 연결) 및 시간의 연속성(개체군 생활사)을 확보하면 어류건강성을 더욱 회복할 수 있을 것으로 판단됨.
 - 태안화력발전소 주변 하천에서 어류 조사결과, 총 3목 4과 13종 1,062개체의 어류가 출현하였고, 외래도입종은 떡붕어 1종이 나타남. 출현 어종 대부분 수질 오염이나 수온 변화에 내성이 강한 어종임. 어류건강성평가(FAI) 결과, 지점 1에서 'D' 등급으로 '나쁨' , 지점 2에서는 'C' 등급인 '보통' 으로 나타났는데 FAI 등급이 낮은 것은 하천종적연속성 단절이 원인이므로 흙 보를 없애고 연속성을 복원(생태하천 복원사업)하는 것이 하천 건강성을 회복하는데 중요할 것으로 판단됨.
 - 보령화력발전소 주변 하천에서는 총 5목 8과 19종 1,513개체의 어류가 출현, 한국고유종은 가시납지리와 얼룩동사리 2종, 외래종은 떡붕어 1종이 출현함. 보령 하천에 대한 어류건강성평가(FAI) 결과, 지점 1과 2 모두에서 'D' 등급으로 '나쁨' 으로 평가되었는데 이는 하천의 수심이 대부분 낮고(0.1-0.3 m) 유속(0.01 m/sec 이하)이 거의 없어 쉽게 수온이 높아지는 경향 때문인 것으로 분석되며, 향후 유로를 좁히고 수심을 깊게 하여 수생태 건강성을 개선해야 될 필요성을 확인함.

- 서천화력발전소 주변에서는 총 1목 1과 2종 204개체의 어류가 출현하였고, 외래도입어 종은 떡붕어 1종이 출현하였음. 어류건강성평가(FAI) 결과, 'E' 등급으로 나타남. 주요 원인은 화력발전소 건설로 인해 하천 구간이 매립되어 단절된 상황으로 하천 기능이 거의 상실된 상황이므로 하천 존재에 대한 재검토가 필요한 것으로 분석됨.

1.4. 화력발전소 주변지역 주요종 모니터링

- 식물분야는 3차년도에 선발된 후보종 중 최종 대상종을 선발하기 위해, 대상종 주변 식생 조사, 층별 피도 분석, 대상종의 개체수 변화 추이 및 생육상태와 훼손 위험도를 고려하여 지역별 2분류군 등 총 10분류군을 최종 선정하였음.
 - 주요종 모니터링을 실시한 결과, 개체수 감소를 보인 대상종은 예덕나무(서천)로 칩, 노박덩굴 등 덩굴성 식물의 피압으로 인해 개체수가 감소된 것으로 판단됨. 개체수 증가를 보인 대상종은 수리딸기(태안, 보령, 희리산)로 최소 2개체에서 최대 14개체 증가 등 전반적인 개체수 증가 추세를 보였음. 이는 수리딸기가 지하경 번식을 통해 어린 개체 다수가 새로 출현하여 전반적인 개체수가 증가한 것으로 판단됨.
 - 4차년도에 수행된 모니터링 조사를 통해 일부 종의 개체수 증감이 확인되었으며, 화력발전소에 의한 영향보다는 주변 환경에 의한 일시적 변화로 추정됨. 이는 이동성이 없는 식물은 환경 변화에 의해 내성을 가지므로 짧은 기간 내에 분포 변화를 조사하기에는 한계가 있어, 본 조사 결과를 토대로 장기적인 모니터링 및 환경 스트레스 내성 등 식물의 생리학적 연구가 필요할 것으로 판단됨
- 곤충분야 주요종 모니터링 결과 조사구와 대조구에서 확인된 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수, 종구성, 군집구조 비교 결과 일정한 경향성 및 차이는 나타나지 않아 화력발전소가 지표배회성 곤충 군집에 미치는 영향은 확인되지 않음.
 - 각 조사구에서 채집된 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수 분석 결과, 태안조사구와 보령조사구는 대조구와 유사하게 나타났으며, 당진조사구와 서천조사구는 대조구에 비해 낮은 것으로 확인됨.
 - 4개 조사구 중 종수 및 개체수가 대조구와 유사한 지역이 2개소, 대조구에 비해 낮게 나타난 지역이 2개소로 확인되어 화력발전소 주변지역과 대조구의 종수 및 개체

- 수에서 일정한 경향성은 나타나지 않았으며, 조사구 간의 차이는 서식지 조건 및 인위적 교란 등 기타요인에 의한 것으로 판단됨.
- 군집구조 유사도 분석 결과 조사구와 대조구 사이의 유의미한 차이가 나타나지 않아 화력발전소에 의한 영향은 나타나지 않았으나, 생물의 군집구조는 일반적으로 장기간에 걸쳐 점진적으로 변화하므로 이러한 변화를 관찰하기 위해서는 지속적인 모니터링이 필요할 것으로 판단됨.
 - 8종의 모니터링 대상종 중 검정명주딱정벌레, 홍단딱정벌레, 멧쟁이딱정벌레와 같은 대형딱정벌레류의 서식이 확인된 태안, 보령 조사구 및 서산 팔봉산, 서천 희리산 대조구 지역은 그렇지 않은 당진, 서천 조사구 지역에 비해 지표배회성 곤충의 종수 및 개체수가 풍부한 것으로 확인되었으며, 이는 해당 종들의 먹이원인 곤충류, 지렁이류, 달팽이류 등의 풍부도 차이에 의한 것으로 분석됨.
- 무인센서카메라를 이용한 포유류 주요종 모니터링 결과, 수달은 2019년 9월부터 2021년 9월까지 보령(CB02, CB03), 태안(CT03) 지역에서 확인되었고, 삵은 2018년 7월부터 2021년 9월까지 보령(CB02, CB03), 태안(CT01, CT02, CT03), 서천(CSC02, CSC03, CSC04), 당진(CD02, CD03) 지역에서 확인되었음.
- 수달(*Eurasian otters (Lutra lutra)*)은 좁고 기다란 선형 서식권(linear range)을 가져 서식지 단절의 위험에 노출되어있으며 번식 및 유전자 확산에 있어서도 취약해 기타 육상 포유류와 비교 시 낮은 개체군 밀도를 가지고 있음.
 - 삵(*Leopard Cat (Prionailurus bengalensis)*)은 육상생태계 최상위 포식자로 설치류를 주요 먹이원으로 하고 있어 생물 농축(Bioaccumulation)에 대한 반응 정도를 확인하는 지표종이며, 삵의 발견은 그 지역의 육상생태계의 풍부도 및 다양성을 평가할 수 있는 기준으로 안정적인 먹이사슬이 형성되었음을 간접적으로 확인할 수 있었음.
 - 환경변화에 민감한 종인 생물 I 급 수달과 II 급 삵의 발견은 하천 및 육상생태계 생물 다양성의 건강 정도를 판단하는 생태 평가의 척도로 작용할 수 있으며, 지속적인 멸종위기야생생물의 서식 확인을 통해 화력발전소가 생태계에 미치는 영향과 건강성을 회복하는 과정을 확인할 수 있음.
 - 따라서, 태안(CT03), 보령(CB02, CB03), 당진(CD03)을 포함한 태안·보령·당진 조사구는 멸종위기 야생 생물이 출현한 생태보호 구역으로써 수달, 삵 등 멸종위기야생동물 출현을 지속적으로 모니터링하는 등 주요 관찰 지역으로 관리가 필요할 것으로 판단됨.

- 어류분야 모니터링종으로 환경변화에 대한 내성이 강한 붕어와 송사리로 선정하여 각 지역별로 성장도와 비만도를 통하여 개체군이나 개체 그리고 주변환경에 대한 건강상태를 확인함.
 - 당진조사구 붕어와 송사리의 성장도 b값은 3.0 이하로 나타났고 비만도(K)도 음(-)의 값을 나타내 서식환경이 양호하지 못하거나 개체군 크기가 큰 관계로 종내 및 종간 경쟁이 발생하였을 가능성도 있으며, 수생태의 조절자 역할을 하는 핵심어종(keystone species) 소실로 인해 성장도와 비만도가 낮게 나타난 것으로 분석됨.
 - 태안조사구 붕어와 송사리의 성장도와 비만도는 모두 양호한 값을 보여 두 개체군 모두 본 서식지에서 잘 정착하고 있는 것으로 나타났고, 다른 조사구 지역에 비해 크기가 큰 붕어 개체들이 잘 보이지 않는 것이 특징임. 이같이 큰 개체들이 보이지 않는 것은 큰 어류가 서식할 수 있는 깊은 수심이 없고, 하천종적연속성 단절로 인하여 개체 이동이 약하기 때문인 것으로 판단되며 지속적인 모니터링을 통해 환경개선이 필요함.
 - 보령조사구 붕어 성장도는 3.0을 조금 넘고, 비만도는 양(+)의 값을 보여 비교적 안정적인 것으로 확인되었는데, 2차년도나 3차년도에 비해 성장도가 다소 낮아짐. 이는 지점 1에서 행해진 하천 바닥공사로 인한 결과로 판단되며 송사리의 성장도와 비만도가 급격히 낮아진 것도 지점 1의 하천바닥공사의 영향과 핵심어종인 민물검정망둑 및 민물두줄망둑 등이 개체군이 급격히 감소하여 송사리 개체군 밀도가 증가에 따른 결과로 분석됨.
 - 서천조사구 붕어 성장도 b값은 2.7이고 비만도는 음(-)의 값을 보여 개체군 성장이 양호하지 못한 것으로 확인되고, 2차년도와 3차년도에 비해 개체군 성장도가 낮아지는 것으로 확인됨. 이는 서천 하천 단절로 인하여 수환경이 점차 나빠져 송사리가 출현하지 않았기 때문이며, 하천 존재에 대한 재검토가 필요함.

2. 정책제언 (신규사업 제안)

2.1. 수은 흡수 수목을 활용한 신재생에너지 발전사업

- 본 과업의 3, 4차년도에 수행한 수목 나이테 수은농도 분석 결과, 충남 화력발전소 기준 이격거리가 1~20km인 지점의 수목은 화력발전소의 수은 배출 영향을 받아 미교란 산림 지역의 수목에 비해 수은농도가 높은 것으로 나타남.
 - 특히, 대기오염물질배출허용기준이 강화되기 전인 2000년대 이전의 경우 시험구에서 수목 나이테 수은농도가 22.1ng/g으로 나타난 경우도 확인되었음. 이는 충남과 가장 인접한 대조구인 충북 보은의 평균 토양 수은농도 1.3ng/g에 비해 매우 높은 수치임.
 - 또한, 충북 보은을 포함한 대조구 3곳과 충남 시험구 4곳의 최근 5년(2015~2019년) 간 수목 나이테 수은농도는 각각 평균 1.03, 2.23ng/g으로 나타나 여전히 대조구에 비해 시험구에서 수은농도가 2배가량 높은 것으로 확인됨.
- 토양오염물질 중 유기물이나 무기염류의 경우 기상 및 기후 인자, 미생물의 활동 등 다양한 요인에 의하여 분해될 수 있는 반면, 중금속류는 제거되지 않고 장기간 잔류하여 결과적으로 동·식물체에 축적될 수 있기 때문에 그 위험성이 강조되어 왔음.
- 본 과업에서 도출한 수목 내에 수은이 축적되었다는 분석 결과는 화력발전시설 등의 대기오염물질 방출로 인한 영향으로 볼 수 있음. 또한, 수목에 축적된 수은이 낙엽 및 낙지의 부식으로 인해 토양 및 수계로 재유입될 수 있다는 가능성을 고려하여, 산림 관리 및 목재 사용에 주의를 기울일 필요성이 있음을 시사하고 있음.
 - 하지만, 다른 관점에서는 수목의 대기오염물질 흡수 및 고정을 통해 산림 내 오염물질이 정화되었다고 해석할 수 있으므로 이러한 관점을 통해 실제로 임업 선진국에서는 식물환경정화(Phytoremediation)라는 개념을 적용하여 2000년대 이전부터 속성수 혹은 뿌리의 생장이 좋은 수종의 도입을 통해 오염지역에 대한 정화기술을 실용화해왔음.
 - 정화식물종에 대한 연구는 초본류 등에서도 다양하게 수행되어왔으나, 장기적인 관점에서 중금속 흡수량 등을 비교하였을 때는 다년생이라는 특징 등으로 인해 초본류에 비해 수목류가 중금속 흡수 기능이 좋다고 알려져 있음.

- 식물환경정화의 대표적인 방법으로는 중금속 축적 식물종을 이용하여 뿌리조직에서 토양 중 중금속을 흡수하고, 지상부로 수송 및 축적시킨 후 수확하는 식물추출방법과 중금속 내성식물종을 식재하여 토양 중에서 중금속의 이동성을 제한하여 고정시키는 식물안정화 기법이 있음.
- 앞서 설명한 바와 같이 수목에 축적된 수은은 토양 및 수계로 유입될 수 있기 때문에 중금속 흡수 수목에 대한 제거를 통해 식물추출방법 적용이 필요한 실정임. 따라서 본 과업에서 추정된 화력발전소의 수은 배출 영향 범위인 1~20km 지점에 위치한 수목에 대한 제거 및 재조림을 통한 건전 산림 조성에 대한 필요성과 벌채 후 산물의 처리에 대한 방법을 제안하고자 함.
 - 벌채 이후 수은이 축적되어있는 산물은 환경으로의 수은 유입을 방지하기 위해 적절히 취급되어야 하므로 산물을 이용해 제작된 우드칩 및 우드펠릿을 바이오매스로 활용하여 화력발전에 사용할 것을 제안함.
 - 화력발전시설에는 탈질 및 탈황설비, 미세먼지 저감설비 등의 대기오염물질 배출 저감 시설의 설치로 석탄화력발전으로 인한 수은 배출계수가 저감되었다고 보고된 바 있기 때문에 수은 함유 우드칩을 화력발전시설에서 활용할 경우 수은이 대기 중으로 배출될 위험성이 상대적으로 낮다고 할 수 있음.



우드칩(Wood-chip)



우드펠릿(Wood-pellet)

[그림 6.1] 산물을 이용해 제작된 우드칩 및 우드펠릿

- 이뿐만 아니라, 기후변화 대응을 위해 2015년 제21차 파리 당사국 총회(Conference of Parties: COP)에서 파리기후변화협약을 체결함으로써, 우리나라는 2030년까지 국가 배출전망치(Business As Usual: BAU) 대비 37%의 온실가스를 감축하겠다는 목표

를 제시함. 이에 따라 신재생에너지를 이용한 발전설비 비중을 2029년 20%까지 확대할 계획이라고 밝힘. (「제 7차 전력수급기본계획」).

- 또한, 산업통상자원부는 2016년 「에너지신산업종합대책」을 발표함으로써 신재생 에너지 등 에너지신산업에 총 42조원을 투자할 계획이라 밝혔으며, 이 중 30조원을 2020년까지 13GW 용량의 신재생에너지 발전 확대에 투자하였음.

○ 우드펠릿의 신재생에너지로서의 활용성은 증가하고 있으나 2021년 기준 국내 우드펠릿 생산량 중 자급률은 17.2%에 불과함.

- 바이오 혼소발전 민간 3사는 2025년부터 수입산 목재 펠릿 (나무 톱밥을 원기둥 모양으로 압축해 가공한 연료) 사용을 중단하고, 국내 연료로 전환하겠다고 선언했음. 이에 따라 총 2조6천억 규모의 수입산 목재 펠릿이 국내 바이오매스로 대체되고, 관련 산업 생태계도 활성화될 전망이다. (연합뉴스 인용)



[그림 6.2] 최근 5년간 연도별 우드펠릿 생산량

○ 충남지역의 산림생태계 오염관리를 수행함과 동시에 국가적인 환경오염 저감 대책에 부합하며, 경제적 이득을 취할 수 있는 방안으로 화력발전소 주변지역의 수은 축적 수목에 대한 바이오매스로써의 활용을 제안하는 바임.

- 또한, 재조림 시 식재 수종에 포플러, 자작나무와 같이 중금속 흡수율이 높다고 알려진 수종을 포함할 것을 제안함.

2.2. 시민 과학을 이용한 수달 서식 현황 모니터링 사업

- 수달은 해양, 하천, 계곡 등 깨끗한 수환경에서 서식하는 반수생 포유동물로 먹이사슬의 최고 정점에 위치해 있어 수환경의 조절자 역할을 하는 핵심종이자 수환경의 건강 정도를 판단할 수 있는 지표종임.
 - 1900년대 중반까지만 해도 한반도에 널리 서식하고 있었으나 이후 모피획득을 위한 무차별 남획, 급속한 산업화로 인한 수질오염, 각종 개발사업으로 인한 서식지 파괴 등으로 개체군의 크기가 급격하게 감소되어 현재 멸종위기종 I급으로 지정하여 법적 보호를 받고 있음.
- 본 연구를 통해 수달을 모니터링한 결과, 태안 화력발전소 인근에서 2021년 9월 8일 3개체, 9월 22일 2개체가 촬영되었고 보령 화력발전소 인근에서 2021년 2월 18일 3개체, 7월 28일 3개체가 촬영되었음.
 - 조사지역뿐만 아니라 문헌 조사결과 최근 충청남도 내에서도 2021년 12월 7일 천안시 천안천에서 수달 5개체 목견 (파이낸셜뉴스), 2022년 1월 19일 예산 예당호에서 수달 1개체 목견 (MK뉴스) 등 화력발전소 인근뿐만 아닌 충청남도 내 여러 지역에서 수달이 발견되고 있음.
- 장기적인 수달 서식지 복원사업을 통해 충청남도 화력발전소 지역뿐만 아니라 충청남도 전체를 ‘수달이 서식하는 하천’으로 만들어 충청남도를 환경과 화력발전의 공존하는 친환경 광역 지방자치단체로 지역주민들에게 홍보할 수 있음.
 - 수달 서식현황에 대한 기초조사를 시민과학을 이용할 것을 제안함. 충청남도 전 지역에 대한 조사를 위해서는 많은 인원의 조사자가 필요한데, 시민과학을 이용하면 비용적인 부분과 짧은 시간내에 다량의 수달 관찰 데이터를 확보할 수 있는 부분에서 효율성을 나타낼 수 있음.
 - 데이터 수집과정에서 시민들의 생물다양성 보전 및 기후변화에 대한 인식 향상 효과를 기대할 수 있으며, 나아가 과학적 데이터 제공 및 지식생산 성과를 얻을 수 있음. 아래 제시된 시민조사단은 기존 타 사업을 통해 효과를 거둔 주요 사례에 해당됨.
 - 구제역 및 AI 시민조사단: 환경부에서 개발하였으나 사용되지 않던 측정 기법을 적용한 객관적인 데이터를 근거로 가축 매몰지 문제를 제기함.

- 지구사랑탐사대: 수원 청개구리 서식처와 멸종과정 분석에 중요한 기여 하였으며 그 결과가 국제학술지에 논문으로 게재됨.
 - 서울 도심 조류분포 시민모니터링: 도심 내 조류 서식환경 개선정책의 근거 자료를 구축함.
 - 익산시 악취 3355: 악취 발생 시점과 장소, 악취 유형에 대한 시민 과학 데이터를 정책 의사결정에 활용함.
- 충남도민이 참여하는 시민 과학을 통해 확보된 수달 데이터로 멸종위기야생생물 I 급인 수달에 대한 충남권 광역 생태네트워크 구축 및 중장기적인 보존계획 수립사업의 기초자료로 활용함.

2.3. 친환경 생태하천 복원사업

- 생태하천 복원사업은 재정이 열악한 상류지역 지자체에 기금 지원을 통해 생태하천복원 사업을 활성화하여 오염되고 훼손된 하천의 수질을 개선하고 수생태계 건강성을 회복하는데 있음.
- 생태하천 복원사업 관련 규정은 「수질 및 수생태계 보전에 관한 법률」 제19조의2 및 제69조, 「환경정책기본법」 제55조, 「자연환경보전법」 제54조, 「한강수계 상수원 수질개선 및 주민지원 등에 관한 법률 시행령」 제28조, 「한강수계관리기금운용규칙」 제13조제1항제6호가 있음.
 - 주요사업으로 인공습지, 자연형 하천정화시설, 퇴적오니 준설, 수중 폭기, 식생대 조성, 하천 사행화, 여울소, 식물식재, 수생생물 서식지 조성, 하중도·실개천 조성 등이 있음.
- 화력발전소 주변 하천에 대한 복원사업을 위해서는 ‘하천 수질개선사업’ 과 ‘생태복원 사업’ 그리고 ‘생태유지용수 공급’ 의 방법이 적절하다고 판단됨.
- 하천 수질개선사업은 퇴적오니 준설, 우수·생활하수 등 분리, 하상여과시설 설치, 수질정화습지 조성, 생태수로 조성, 정화식물 식재, 오염물질 침전·여과·분해·토양 흡착 등원리를 이용한 수질정화시설 설치가 해당됨.
 - 생태복원 사업은 여울·소·수제 조성, 어도 조성, 보·낙차공 철거 및 개량, 둔치부 식생복원, 샛강 조성, 자연형 호안 조성, 비오톱 조성, 생태저류지 조성, 수생생물 서

- 식지 조성, 수변 생태환경 조성, 수변 생태벨트 조성, 도랑 및 둠벙 조성, 생태관찰 관련 시설 조성 등 수생태계 복원과 관련된 사업이 있음.
- 그 외 건천화된 하천의 수질개선 및 수생태계 복원을 위해 필요한 생태유지용수 공급 시설이 있음.
- 어류 건강성평가결과 4개지역 7개 지점 중 등급이 보통인 ‘C’ 등급이 3개소(당진 2, 태안 1)이고 나머지 지역은 나쁨인 ‘D’ 등급 3개소(태안 1, 보령 2), 매우나쁨인 ‘E’ 등급 1개소(서천)로 전반적으로 어류 건강성평가결과가 낮게 나와 지역의 이미지를 개선하고 하천의 교란요인 제거를 위해선 생태하천 복원사업이 필요하다고 판단됨.
- 생태하천 복원사업은 하천별 약 50~150억이 예상되며 하천별 특징에 맞는 설계가 필요할 것으로 판단됨.
 - 당진은 하천종적연속성과 수직적연결성 회복, 태안은 하천종적연속성 확보와 생물 서식처 복원, 보령은 유로 복원과 서식처 복원 등 하천 특성에 맞는 복원사업 계획 수립이 필요함.

[표 6.1] 화력발전소 지역별 생태하천 복원사업 검토

지역명	당진		태안		보령		서천
지점	1	2	1	2	1	2	1
등급	C	C	D	C	D	D	E
필요 등급	C	C	C	C	C	C	-
등급 설명	보통	보통	나쁨	보통	나쁨	나쁨	매우 나쁨
어류건강성 악화 원인 및 평가	건강성 양호 직강화 하천 개선 필요		하천종적연속성 단절		낮은 수심과 유속 소질, 높은 수온		사라진 하천
생태하천 복원	논의 필요		매우 필요		매우 필요		존재 재검토
준설 필요성	검토		필요		필요		매립
소요예산	검토		50~100억		100~200억		5~10억

- 강원도 정선의 사북과 고한지역에 있는 지장천에서는 탄광 배수로 인해 망가진 하천을 “생태하천 복원사업”을 3년간 진행하고 이후 모니터링과 어류 방류 등을 통해 서서히 복원되고 있으며, 오염된 하천 복원과 지역주민 그리고 발전소 직원 등의 산책로, 친수공간, 운동공간 등의 조성을 통해 힐링 장소 제공될 수 있음.

- 충남 부여군 왕포천 생태하천 복원사업의 일환으로 생태습지 조성으로 환경 개선 및 이미지 제고에 성공한 사례가 있음.
 - 부여군 왕포천은 하수처리수와 농경지 비점오염으로 심각한 수질오염과 상습침수까지 발생했던 하천으로 치수, 정화기능이 우수한 생태하천으로 복원함
 - 부여군은 상습침수구역에 환경기술을 적용한 생태습지를 조성하여 왕포천의 홍수 시 빗물완충기능을 회복시켰고, 여울·정수식물을 활용하여 수질개선 효과도 뚜렷하게 나타남. 또한, 왕포천 생태습지를 주요 거점으로 금강 유역의 생태계와 서식처가 연계 되고, 하천을 따라 이동하는 종의 서식처로 제공함.
 - 그 결과, 복원 전에는 없었던 멸종위기 야생생물인 수달(Ⅰ급), 산(Ⅱ급) 등 포유류를 비롯해 고유종인 얼룩동사리가 발견됐으며, 지역 명소인 궁남지와 연계한 생태관광 명소로도 이름을 알리게 됨.



[그림 6.3] 부여군 황포천 생태하천 복원사업(출처: 환경부) 사례

2.4. 환경영향평가-사후환경영향 조사 연계 모니터링 사업

- 충남지역 내 신규 개발사업 중 화력발전소, 소각장 등 주변지역 환경에 지속적으로 영향을 미칠 가능성이 있는 사업을 대상으로 개발 전·후의 생물 군집의 변화를 정량적으로 비교할 수 있도록 고정 조사구를 설정하여 모니터링을 실시할 것을 제언함.
- 이번 연구와 같이 화력발전소의 운영이 주변지역의 생태계에 미치는 영향을 규명하는 것은 상당한 기간과 비용이 소요됨.
 - 일반적으로 생태계 변화는 시설의 운영시기가 아닌 공사시기에 가장 크게 나타나며, 개발행위로 인한 생태계의 변화를 정량적으로 분석하기 위해서는 개발 전과 개발 후의 군집구조 비교가 필요함.
 - 개발사업 후에 모니터링이 이루어지는 경우 군집구조 변화 관찰에 긴 기간이 필요한 반면, 개발사업 전에 이루어지는 전략환경영향평가 및 환경영향평가 시 모니터링을 시작하면 해당 시설이 주변환경에 미치는 지속적인 환경영향뿐만 아니라 개발행위 자체에 의한 변화 또한 확인 가능함.
 - 환경영향평가(전략환경영향평가 포함) 및 사후환경영향조사는 일정 규모 이상의 개발사업 또는 환경에 영향을 미칠 가능성이 있는 개발사업의 경우 의무적으로 시행되고 있어 고정조사구를 설정하여 모니터링을 실시하기 위해 별도의 연구과제를 수립할 필요가 없음.
 - 현재 개발 전 이루어지는 환경영향평가(전략환경영향평가 포함)와 개발 중-개발 후 이루어지는 사후환경영향조사는 예산 규모, 조사 인원, 수행 업체 등의 차이가 있는 경우가 많아 개발 전·후의 정량적 비교에 어려움이 있음.
 - 고정 조사구 설정, 조사 방법을 통일하여 환경영향평가 및 사후환경영향조사에 추가할 경우 정량적 비교가 가능하며, 이에 따라 개발행위 및 해당 시설이 주변지역에 미치는 지속적인 환경영향 여부를 판단할 수 있을 것으로 기대됨.
- 정량적 분석을 위한 모니터링의 경우 해당 분류군의 전문가에 의해 수행될 필요가 있으므로 환경영향평가 및 사후환경영향조사의 비용이 다소 증가할 것으로 판단되며, 필요할 경우 증가분의 일정 비율을 국비 또는 도비로 보조할 수 있음.
 - 고정 조사구는 개발 행위 및 시설의 운영으로 인한 환경영향이 예상되는 범위 내에

위치한 지점이나 원형보전지 등 향후 일정 기간 개발 행위가 없을 것으로 예상되는 장기적인 모니터링이 가능한 지점, 앞서 설명한 조건을 만족하는 지점 중 모니터링 대상 분류군의 서식에 알맞은 서식지로 예상되는 지점을 선택함.

- 모니터링 대상 분류군은 첫째, 곤충식물 등 종수 및 개체수가 풍부한 분류군, 둘째, 방형구 설정, 트랩을 이용한 채집 등 정량적 조사가 가능한 분류군, 셋째, 앞서 설명한 조건을 고려할 때 특정 식물의 군락, 주광성 곤충(유아등 트랩 이용), 지표배회성 곤충(함정트랩 이용) 등의 분류군이 적합할 것으로 판단됨.
- 모니터링 방법은 환경영향평가-사후환경영향조사 간의 연계성, 경제적 효율성, 조사자의 전문성, 해당 지점의 서식지 특성 등을 고려하여 모니터링을 실시하는 해당 분류군의 전문가가 수립하도록 함. (환경영향평가 또는 사후환경영향조사의 조사 방법에 모니터링 항목명시)
- 모니터링 결과는 개발 전·후 모니터링 대상 분류군의 군집구조에 변화가 관찰될 경우 개발사업의 시행자에게 추가적인 환경영향 저감대책 수립 및 시행 등을 요구할 수 있도록 활용하거나 계획된 사후환경영향조사의 기간이 종료된 후에도 지속적인 모니터링이 필요할 경우 후속 연구사업을 수립 지원함.

2.5. 충남지역 토양오염실태조사 개선 방향성 제시

- 4차년도에 수행한 문헌조사에 따르면 환경부는 「토양환경보전법」 제5조 제2항에 따라 1997년도부터 「토양오염실태조사」를 시행하고 있으며, 각 지자체에서 토양오염실태조사 가이드라인에 맞춰 조사지점을 선정하고 토양 시료 채취 및 오염물질의 농도 분석을 수행하고 있음.
- 2020년도 토양오염실태조사 결과에 따르면, 토양 수은농도는 전국 평균 38ng/g로 나타난 반면, 충남의 토양 수은농도는 91.9ng/g로 나타나 국내에서 서울특별시 다음으로 높은 것으로 확인됨.
- 충남에는 전국의 화력발전시설 59기 중 약 50%인 29기가 소재함에도 불구하고 2020년도 토양오염실태조사의 전체 조사지역 3,490개 중 충남지역 조사지역은 229개로 국내에서 5번째로 그쳤고 2020년 기준 화력발전시설 관련 조사지역은 전체 229개 중 4개에 불과하였음.

- 화력발전시설 관련지역은 별도의 조사지역 종류로 구분되지 않고 ‘산업단지 및 공장 지역’에 포함되어 있어 충남지역 내 대기오염물질 배출의 큰 비중을 차지하는 화력발전시설에 대한 관리의 필요성이 부각되지 못하고 있음.
 - 화력발전시설이 포함된 조사지역인 ‘산업단지 및 공장지역’의 토양 수은농도는 전국 평균 37.2ng/g, 충남 평균 206.2ng/g로 확인되었으며, 충남 화력발전소 관련 지역의 토양 수은농도는 임야에서 20, 190ng/g, 공장용지에서 0.00(정량한계 미만), 160ng/g로 확인됨.
 - 전국 산림토양의 평균 수은농도는 31.9ng/g로 충남의 산림토양 수은농도는 전국 평균 대비 2.5배 이상 높은 84.0ng/g로 나타났다.
- 화력발전소의 소재 비율이 높은 충남지역에 대해서 토양오염실태조사를 시행할 경우 다음과 같은 방향으로 개선할 것을 제안함.
- 첫째, 화력발전소를 별도의 세부 조사지역으로 구분하고 수은농도 분석이 필요함. 화력발전소에 배출되는 대기오염에 대한 영향정도를 파악하고 체계적 관리를 위해서는 특수 조사지역으로 관리될 필요성이 있음.
 - 둘째, 화력발전시설 관련 조사지역의 범위를 발전시설 기준 1~20km 반경으로 확대하여 수은의 이동범위 등을 체계적으로 살펴볼 필요가 있음. 본 과업에서 수행한 화력발전소 기준 이격거리별 수목의 수은농도 분석 결과에 따르면 화력발전소의 수은 배출 영향 범위는 1~20km인 것으로 추정됨에 따라 이격거리별 풍향에 따른 수은의 이동 범위의 연구가 필요할 것으로 판단됨.
 - 셋째, 산림 토양 수은농도 측정을 위한 조사지점을 추가하여 영향정도를 정밀하게 살펴볼 필요가 있을 것임. 충남지역은 ‘산업단지 및 공장지역’의 토양 수은농도가 높아 산림생태계가 오염 배출원에 의해 영향을 크게 받을 수 있으며, 실제로 전국 평균 대비 산림토양의 수은농도가 높음에도 불구하고 2020년 충남 토양오염실태조사의 조사지역 229개 중 산림지역에 대한 조사지점이 5개에 불과하였음. 이에 따라 오염수준 및 중요도를 종합적으로 판단하여 조사지점을 확대하여 운영이 필요할 것으로 판단됨.

Part 5

참고문헌

[참고문헌]

- 고승재, 김지현, 김미정, 조연배, 박영구. 2013. 화력발전소 NOx 제거를 위한 SCR 촉대특성, 한국유화학학회논문집. Vol.30, No. 3, pp. 451~460
- 공공기관의 데이터베이스 표준화 지침 개정 고시(행정안전부고시 제2021-32호, '21.6.7.
- 국가미세먼지정보센터. 2021 국가 대기오염물질 배출량. <https://www.air.go.kr/index.do>
- 국립기상과학원. 2020. 한반도 기후변화 전망보고서 2020
- 국립기상연구소. 2014. 수문 기상 관측망 플렉스 관측자료 품질관리
- 국립생물자원관. 2019. 우리 주변 생활 속 기후변화 생물지표종. 환경부 국립생물자원관.
- 국립생태원. 2017. 자연환경조사 30년.
- 국립자연휴양림관리소. 국립자연휴양림 연령대별 선호휴양림 분석현황 공공데이터(2021.10.21. 기준). 산림청. <https://www.data.go.kr/data/15052680/fileData.do>
- 국립자연휴양림관리소. 국립자연휴양림 이용객 정보 공공데이터(2018.10.18. 기준). 산림청. <https://www.data.go.kr/data/15052677/fileData.do>
- 국립환경과학원. 2008. 비산먼지 배출량 산정방법 개선 및 도로 재비산 먼지 실시간 측정방법 개발 (Ⅰ, Ⅱ)
- 국립환경과학원. 2013. CAPSS 전국 비산먼지 발생량
- 국립환경과학원. 2013b. 대기오염측정망 선진화를 위한 관리시스템 구축 기획 연구
- 국립환경과학원. 2019. 2016 국가 대기오염물질 배출량
- 국립환경과학원. 2019. 국가 대기오염물질 배출량 기초자료구축을 위한 표준업무절차서 2016년 배출량 기준
- 국립환경과학원. 2020. 대기환경연보 2019.
- 국민건강보험공단. 2017. 표본코호트2.0 DB 사용자 매뉴얼 (Ver 1.1).
- 기상청 기상자료개발포털(기상연보), 2021. <https://data.kma.go.kr/data/publication/publicationAsosList.do?pgmNo=143>
- 기상청 기상자료개방포털. 2021. <https://data.kma.go.kr/>
- 기상청 기상자료개방포털. 2021. <https://data.kma.go.kr/>
- 기상청 기후정보포털. 2021. http://www.climate.go.kr/home/CCS/contents_2021/33_2_areapoint_basic.php#

- 김동철. 2005. 대기오염연구를 위한 Traject 모델(part 2 : Trajectory 농도방법) Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences. 2005, vol.41, no.5, pp. 841-850 (10 pages)
- 김범철, 이재용, 정근, 최재석, 이새로미. (2009). 어류폐사발생지역의 환경조사. 한강수계관리위원회
- 김선태, 김주인, 강정호, 김승완, 어현준. 2020. 광산란 센서형 미세먼지 측정기의 정도관리. 한국대기환경학회 학술대회 논문집. 2020; 185-185
- 김선태, 어현준, 강정호, 전형재, 김건호. 2021. 면오염원의 악취 플렉스 배출량 산정 시스템 개발. 한국냄새환경학회 학술대회 논문집. 2021; 221-222
- 김연천, 한선희. (1999). 국내 유통 민물어류와 연안산 패류의 중금속 함량에 관한 조사. 한국식품위생안전성학회지, 14(3), 305-318.
- 김종범, 윤수향, 이상신, 김경환, 노수진, 배귀남. 2020. 충남지역 PM10과 PM2.5 농도의 시공간 분포 특징. 한국대기환경학회지.
- 김호걸, 모용원. 2021. 수달의 보전을 위한 전국자연환경조사 시계열 자료 기반 잠재 서식적합 지역 분석. 한국환경생태학회지 35(1): 24-36, 2021.
- 낙동강유역환경청. 2011. 진양호 서식 수달(Lutra lutra)의 혈연관계
- 낙동강유역환경청. 2006. 무선추적에 의한 수달의 행태 및 서식환경 연구.
- 데일리굿뉴스. 2020.06.05., [환경의날 기획] 코로나로 줄어든 환경오염...일회용품 증가로 '쓰레기 대란'
- 맹준호, 김은영, 강태순, 손민호. 2017. 화력발전소 건설사업의 해양환경 환경영향평가 가이드라인(안) 연구. 환경영향평가 26(1):78-93.
- 박보현, 김백준, 이상돈. 2009. 강원도 철원지역과 전라남도 동부지역에 서식하는 한국고라니(Hydromys inermis argyropus)의 중금속 축적 분석. 한국환경생물학회.
- 박선엽. 2020, 코로나바이러스감염증 2019(코로나19) 확산과 대기 중 PM10 및 PM2.5 농도 변화 간의 연관성: 대구광역시 사례 분석, 대한지리학회지 제55권 제5호, pp. 453~465
- 방준석. 2019. 약사를 위한 임상약학 연구와 논문 작성법: 역학 및 임상적 연구. 대한약국학회.
- 보령화력발전소. 2021. 보령화력발전소 일반현황자료
- 서창완, 최태영, 최윤수, 김동영. 2008. 설악산 산양을 대상으로 한 야생동물 서식지 적합성 모형에 관한 연구. J. Korean Env. Res. & Reveg. Tech. 11(3):28-38(2008).
- 서천화력발전소. 2021. 서천화력발전소 일반현황자료

- 송영호. 2019. 3MRA 모델을 이용한 석탄화력발전시설에서 배출되는 중금속의 통합적 인체 위해성 평가. 공주대학교.
- 에너지경제연구원. 2019. 지역에너지통계연보
- 유태현, 박상수. 2013. 특정부동산분 지역자원시설세 과표체계 개선 방안. 한국지방세연구원 정책연구보고서 2013권5호
- 유혜진. 2018. 대청호 주변 수달의 중금속 노출 모니터링. 서울대학교 대학원.
- 윤명희, 노영희. 1999. 한국산 등줄귀 각 조직에 분포하는 미량금속류 및 셀레늄에 관한 연구. 경성대학교 생물학과.
- 윤수향, 조봉연. 2021. 탄소 안정동위원소를 이용한 석탄화력발전소 인근 오염원 기원 추정 : 당진시를 중심으로, 한국콘텐츠학회 논문지, 2021, vol.21, no.3, pp. 567-575
- 이상돈. 2003. 금호강에 서식하는 소형포유류의 중금속축적에 관한 연구. Korean J. Environ. Biol. 21(3):257-261(2003).
- 이오선. 2008. 한국산 삶(*Prionailurus bengalensis*)의 식이습성 및 서식지 선호도에 관한 연구. 국내석사학위논문 전남대학교 대학원. 2008. 광주.
- 임재석, 류재근. 2008. 달천 수계에 서식하는 수달의 보존 방안에 관한 연구. 한국자연보존연구지 6(3):159-166.
- 장갑수, 정옥식, 이관규, 황아미, 김유훈, 장래익. 2008. 충청남도 야생동식물보호구역 지정에 관한 기초연구-조류·포유류를 중심으로. 충남발전연구원.
- 정승준, 권재환, 이선욱, 최대훈, 정태준, 최세준, 조우, 기경석. 2019. Recreation Ecology 관점에서 국립공원 탐방로 개설에 따른 식생 변화-설악산국립공원 곰배골 신규 탐방로를 대상으로-. 한국환경생태학회 학술대회논문집 29(2): 55-55.
- 정윤희, 김형준, 박흥식. 2018. 태안화력발전소 주변 암반조간대에 서식하는 대형저서동물의 종 조성 및 군집구조에 미치는 온배수의 영향. Ocean and Polar Research 40(2):59-67.
- 조성진·박광수. 2020. 발전부문 지역자원시설세 개선 연구. 에너지경제연구원
- 주재민, 윤대옥. 2019. 통계적 기법을 활용한 서해안 화력발전소 오염물질 배출에 따른 수도권 지표면 대기오염농도 영향의 분석. 한국지구과학회지 40(6):549-560.
- 차현기, 김지혜, 윤명희. 2017. 수달배설물 밀도 변화에 대한 연구(20112-2016)-부산신항만-. Journal of Environmental Science International. 26(4); 457~466; April 2017.

- 최성인, 이정희, 이서래. 1994. 동물실험에 의한 녹차음료의 카드뮴 및 납 제거효과. KOREAN J. FOOD SCI. TECHNOL. Vol. 26, No. 6. pp. 745-749(1994).
- 최재석, 장수길, 김범준, 홍두표. (2020). 인제군 하천의 어류상 및 어류군집 생태연구 -내린천, 인북천-. 인제군.
- 충청남도. 2016. 화력발전소 기후환경 영향에 따른 중장기 대응전략 수립연구
- 충청남도. 2017. 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(1차년도 보고서)
- 충청남도. 2019. 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(2차년도 보고서)
- 충청남도. 2020. 2019 제59회 충남 통계연보
- 충청남도. 2020. 충청남도 민간대기측정망 통합운영시스템 구축 보고서
- 충청남도. 2020. 화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(3차년도 보고서)
- 태안화력발전소. 2021. 태안화력발전소 일반현황자료
- 하정욱, 안경환, 배양섭, 김형후, 신화용, 송세규. 2020. 영산강 유역에 서식하는 수달의 서식지 이용 특성분석. 한국도서연구. 32(4). 253-267.
- 한국서부발전. 2021. 서부발전 미세먼지 대책
- 한국에너지공단. 2021. 2020년도 에너지사용량 통계(에너지사용량 신고업체).
- 한국에너지기산업진흥회. 2018. 광산란법을 이용한 화력발전소 주변 입자상 물질 측정 및 분석방법
- 한국전력공사. 2021. 연도별 한국전력통계
- 한국전력공사. 2021. 제90호(2020년) 한국전력통계.
- 한국중부발전. 2021. 폐기물처리시설 유지관리계획서
- 한국환경공단. 2021. 에어코리아 <https://www.airkorea.or.kr/index>
- 한국환경정책·평가연구원. 2015. 화력발전소 회처리에 따른 환경 영향최소화 방안 연구(II)
- 한국환경정책·평가연구원. 2015. 화력발전소 회처리장 조성에 따른 환경영향 최소화를 위한 석탄회 재활용 확대 방안에 관한 연구
- 한성용. 2004. 한국 수달의 생태 및 관리 체계. 한국환경생태학회 학술발표논문집. 2004(2), 3-12.
- 환경부. 2017. 비산먼지 관리 매뉴얼
- 환경부. 2017. 비산먼지 관리 선진화 방안 연구
- Angela Margaret Sibbald, Russell J. Hooper, James E. Mcleod, Iain J. Gordon. 2011. Responses of red deer (to regular disturbance by hill walkers. European Journal of Wildlife Research, Springer Verlag, 2011, 57(4), pp.817-825.

- Ashbaugh, Lowell L., William C. Malm, Willy Z. Sadeh. 1985. A residence time probability analysis of sulfur concentrations at grand Canyon National Park, Atmospheric Environment, pp.1263–1270. Vol.19, No. 8
- Atkinson et al. 2013. Long–Term Exposure to Outdoor Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Diseases
- Bai et al. 2019. Exposure to ambient air pollution and the incidence of congestive heart failure and acute myocardial infarction: A population–based study of 5.1 million Canadian adults living in Ontario
- Beelen et al. 2014. Long–term Exposure to Air Pollution and Cardiovascular Mortality: An Analysis of 22 European Cohorts
- Bo et al. 2021. Reduced ambient PM 2,5, better lung function, and decreased risk of chronic obstructive pulmonary disease
- Bonifacio, H.F, Maghirang, R.G, Trabue, S.L, McConnell, L.L, Prueger.
- Buteau et al. 2020. Air pollution from industries and asthma onset in childhood: A population–based birth cohort study using dispersion modeling
- Carey et al. 2013. Mortality associations with long–term exposure to outdoor air pollution in a national English cohort
- Cesaroni et al. 2014. Long term exposure to ambient air pollution and incidence of acute coronary events: prospective cohort study and meta–analysis in 11 European cohorts from the ESCAPE Project
- Chang–Woo Han, Youn–Hee Lim, Takashi–Yorifuji, Yun–Chul Hong. 2018. Air quality management policy and reduced mortality rates in Seoul Metropolitan Area: a quasi–experimental study. Environ. Int. 121; 600–609
- Coleman et al. 2021. Fine Particulate Matter Air Pollution and Mortality Risk Among US Cancer Patients and Survivors
- Di et al. 2017. Air Pollution and Mortality in the Medicare Population
- Dirgawati et al. 2019. Long–term Exposure to Low Air Pollutant Concentrations and the Relationship with All–Cause Mortality and Stroke in Older Men

- Dong-Su Kim, Byung-Hyuk Kwon, Il-Kyu Kim, Dong-Hwan Kang,
- EPA. 2018. Guidance on Significant Impact Levels for Ozone and Fine Particles in the Prevention of Significant Deterioration Permitting Program.
- ES 04412.2c 수질오염공정시험 기준: 철-자외선/ 분광법. 2015
- Foster-Turley P, Macdonald S, Mason C. 1990. Otters: An Action plan for their conservation. IUCN/SSC Otter Specialist Group.
- Gan et al. 2013. Associations of Ambient Air Pollution with Chronic Obstructive Pulmonary Disease Hospitalization and Mortality
- Gandini et al. 2018. Long term effect of air pollution on incident hospital admissions: Results from the Italian Longitudinal Study within LIFE MED HISS project
- Gharibvand et al. 2017. The Association between Ambient Fine Particulate Air Pollution and Lung Cancer Incidence: results from the Ahsmog-2 Study
- Guo et al. 2018. Effect of long-term exposure to fine particulate matter on lung function decline and risk of chronic obstructive pulmonary disease in Taiwan: a longitudinal, cohort study.
- Han et al. 2020. Long-term exposure to fine particulate matter and development of chronic obstructive pulmonary disease in the elderly
- Hanigan et al. 2019. All-cause mortality and long-term exposure to low level air pollution in the '45 and up study' cohort, Sydney, Australia, 2006-2015
- Hart et al. 2015a. The association of long-term exposure to PM_{2.5} on all-cause mortality in the Nurses' Health Study and the impact of measurement-error correction
- Hart et al. 2015b. Effect Modification of Long-Term Air Pollution Exposures and the Risk of Incident Cardiovascular Disease in US Women
- Hart et al. 2015c. Long-Term Ambient Residential Traffic-Related Exposures and Measurement Error-Adjusted Risk of Incident Lung Cancer in the Netherlands Cohort Study on Diet and Cancer
- Hegstrom LJ and SD West. 1989. Heavy metal accumulation in small mammals following sewage sludge application to forest. J. Environ. Qual. 18:345-349.
- Hvidtfeldt et al. 2021. Long-term low-level ambient air pollution exposure and risk of lung cancer - A pooled analysis of 7 European cohorts

- Hwa-Jin Lee, Jeong-Wook Ha, Seong-Joon Park, Woo-Yuel Kim, Jin-Yeol Cha, Jin-Young Park, Seung-Se Choi, Chul-Un Chung, Hong-Shik Oh. 2019. A study on the analysis of mammals' activity patterns and the effect of human hiker interference using camera trapping. *Journal of Asia-Pacific Biodiversity*. Vol. 12, Issue 1. 2019. pp.57-62.
- Hyeon-Jun Eo. 2021. The study on the calculation method and characteristics of scattering dust flux emission using turbulence model. Graduate School, Daejeon University
- J.H. and Razote. E.B. Particulate Emissions from a Beef Cattle Feedlot Using the Flux-Gradient Technique. *Journal of Environment Quality*. 2013; 42: 1341.
- James Kimo Rogala, Mark Hebblewhite, Jesse Whittington, Cliff A. White, Jenny Coleshill, Marco Musiani. 2011. Human Activity Differentially Redistributes Large Mammals in the Canadian Rockies National Parks. *Ecology and Society* 16(3):16.
- Jung et al. 2019. Fine particulate matter exposure during pregnancy and infancy and incident asthma
- Jung-Ho Kang. 2021. Quality control of light scattering type of PM10 sensor. Graduate School, Daejeon University
- Katanoda et al. 2011. An Association Between Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Mortality From Lung Cancer and Respiratory Diseases in Japan
- Kim et al. 2017a. Cardiovascular Effects of Long-Term Exposure to Air Pollution: A Population-Based Study With 900 845 Person-Years of Follow-up
- Kim et al. 2017b. Association between Long-Term Exposure to Particulate Matter Air Pollution and Mortality in a South Korean National Cohort: Comparison across Different Exposure Assessment Approaches
- Kim et al. 2019. Long-term exposure of fine particulate matter air pollution and incident atrial fibrillation in the general population: A nationwide cohort study
- Kim et al. 2020a. Long-term fine particulate matter exposure and cardiovascular mortality in the general population: a nationwide cohort study
- Kim et al. 2020b. Incident cardiovascular disease and particulate matter air pollution in South Korea using a population-based and nationwide cohort of 0.2 million adults
- Kim et al. 2021. Effects of long-term exposure to air pollution on all-cause mortality and cause-specific mortality in seven major cities of South Korea: Korean national health and nutritional examination surveys with mortality follow-up

- Krruk, H. 1995. Wild otters: Predation and Population. Oxford University Press, New York.
- Künzli, N., and I. B. Tager. 1997. The Semi-Individual Study in Air Pollution Epidemiology: A Valid Design as Compared to Ecologic Studies. *Environmental Health Perspectives* 105, no. 10: 1078-83. <https://doi.org/10.1289/ehp.105-1470382>.
- Künzli, N., S. Medina, R. Kaiser, P. Quénel, F. Horak Jr., and M. Studnicka. 2001. Assessment of Deaths Attributable to Air Pollution: Should We Use Risk Estimates Based on Time Series or on Cohort Studies? *American Journal of Epidemiology* 153, no. 11: 1050-55.
- Kwang-Ho Kim, Geun-Hoi Kim, Jun-Sang Park. 2008. Sensible heat flux estimated by gradient method at Goheung bay wetland. Bukyeong University
- L.K. Meredith, R. Commane, J.W. Munger, A. Dunn, J. Tang, S.C. Wofsy and R.G. Prinn. 2014. Ecosystem fluxes of hydrogen: a comparison of flux-gradient methods. *Atmospheric Measurement Techniques* 7 (9), 2787-2805
- Lavigne et al. 2019. Spatiotemporal Variations in Ambient Ultrafine Particles and the Incidence of Childhood Asthma
- Lee et al. 2020. Effects of PM 10 on mortality in pure COPD and asthma-COPD overlap: difference in exposure duration, gender, and smoking status
- Lee et al. 2021. Long-term exposure to fine particulate matter and incident asthma among elderly adults
- Leigh R. C, Marvin S, Ryan P, Louisa J. K, Robin P, Stuart Y, Alastair C. L, and Francis D. P. 2018. Evaluation of a low-cost optical particle counter(Alphasense OPC-N2) for ambient air monitoring. *Atmospheric Measurement Techniques*. 11: 709-720.
- Lepeule et al. 2012. Chronic exposure to fine particles and mortality: an extended follow-up of the Harvard Six Cities study from 1974 to 2009
- Li et al. 2018. All-cause mortality risk associated with long-term exposure to ambient PM 2.5 in China: a cohort study
- Li et al. 2020. Chronic Effects of High Fine Particulate Matter Exposure on Lung Cancer in China
- Liang et al. 2020. Long-Term Exposure to Fine Particulate Matter and Cardiovascular Disease in China

- Lim, JS., Ryu, JK. 2008. 달천 수계에 서식하는 수달의 보존 방안에 관한 연구. 한국자연보존연구지 6(3):159–166(2008).
- Liu et al. 2021a. Long-term exposure to low-level air pollution and incidence of chronic obstructive pulmonary disease: The ELAPSE project
- Liu et al. 2021b. Long-term exposure to ambient air pollution and road traffic noise and asthma incidence in adults: The Danish Nurse cohort
- Meteorology. 119; 431–447.
- Miller et al. 2007. Long-Term Exposure to Air Pollution and Incidence of Cardiovascular Events in Women
- Moon et al. 2020. Air Pollution and Incidence of Lung Cancer by Histological Type in Korean Adults: A Korean National Health Insurance Service Health Examinee Cohort Study
- Moon-Soo Park, Soon-Ung Park, Young-Sin Chun. 2011. Improved parameterization of dust emission (PM10) fluxes by the gradient method using the Naiman tower data at the Horqin desert in China. Sci. Total Environ. 412–413, 265–277
- Pielou, E. C. (1969). An introduction to mathematical ecology. An introduction to mathematical ecology.
- Pope III et al. 2019. Mortality Risk and Fine Particulate Air Pollution in a Large, Representative Cohort of U.S. Adults
- Puett et al. 2009. Chronic Fine and Coarse Particulate Exposure, Mortality, and Coronary Heart Disease in the Nurses' Health Study
- Puett et al. 2011. Particulate Matter Exposures, Mortality, and Cardiovascular Disease in the Health Professionals Follow-up Study
- Puett et al. 2014. Particulate Matter Air Pollution Exposure, Distance to Road, and Incident Lung Cancer in the Nurses' Health Study Cohort
- Qiu et al. 2016. Fine Particulate Matter Exposure and Incidence of Stroke: a Cohort Study in Hong Kong
- Raaschou-Nielsen et al. 2013. Air pollution and lung cancer incidence in 17 European cohorts: Prospective analyses from the European Study of Cohorts for Air Pollution Effects (ESCAPE)

- Shannon C B, W. W. (1963). The Mathematical Theory of Communication. Urbana (Illinois).
- Shin et al. 2021. Air Pollution as a Risk Factor for Incident Chronic Obstructive Pulmonary Disease and Asthma. A 15-Year Population-based Cohort Study
- Simpson, E. H. (1949). Measurement of diversity. nature, 163(4148), 688-688.
- Son et al. 2011. Survival Analysis of Long-Term Exposure to Different Sizes of Airborne Particulate Matter and Risk of Infant Mortality Using a Birth Cohort in Seoul, Korea
- Soo-Ung park, Jae-Won Ju, In-Hye Lee, Seung-Jin Joo. 2016. Parameterization of dust emission (PM10) fluxes of dust events observed at naiman in Inner mongolia using the monitored tower data. Atmospheric Environment 140; 420-431
- Stafoggia et al. 2014. Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Incidence of Cerebrovascular Events: Results from 11 European Cohorts within the ESCAPE Project
- Stephanny Arroyo-Arce, Ian Thomson, Carlos Fernandez, Roberto Salom. 2017. Relative abundance and activity patterns of terrestrial mammals in Pacuare Nature Reserve, Costa Rica. UNED Research Journal 9(1):15-21.
- SunTae-Kim, Juin-Kim, Il-Hwan Choi, Hui Li, Jung-Ho Kang, Hyeon-Jun Eo. 2020. Estimating fugitive particle emission from coal storage yard of thermal power plant using the flux-gradient method. Atmospheric Environment.
- Tagliabue et al. 2016. Atmospheric fine particulate matter and breast cancer mortality: a populationbased cohort study
- Thomas Foken. 2016. 50 Years of the Monin-Obukhov Similarity Theory. Boundary-Layer
- To et al. 2015. Progression from Asthma to Chronic Obstructive Pulmonary Disease. Is Air Pollution a Risk Factor?
- To et al. 2020. Early life exposure to air pollution and incidence of childhood asthma, allergic rhinitis and eczema
- Tomczak et al. 2016. Long-term exposure to fine particulate matter air pollution and the risk of lung cancer among participants of the Canadian National Breast Screening Study
- Turner et al. 2011. Long-term Ambient Fine Particulate Matter Air Pollution and Lung Cancer in a Large Cohort of Never-Smokers

- Wang, Y, I. Kloog, B. A. Coull, A. Kosheleva, A. Zanobetti, and J. D. Schwartz. 2016. Estimating causal effects of long-term PM_{2.5} exposure on mortality in new jersey. *Environ Health Perspect.* 124(8); 1182–1188.
- Ward–Caviness et al. 2020. Associations Between Long–Term Fine Particulate Matter Exposure and Mortality in Heart Failure Patients
- Yang et al. 2021. Association between long-term exposure to high levels of ambient air pollution and incidence of lung cancer in a population–based cohort
- Yazdi et al. 2019. Long-term Exposure to PM_{2.5} and Ozone and Hospital Admissions of Medicare Participants in the Southeast USA
- Yong–Soo Choi, Hong–Hyok Lim, Jong–Tae Lee. 2018. Temporal variability of short term effects of PM₁₀ on mortality in Seoul, Korea. *Sci. Total Environ.* 644, 122–128
- Yun, G. S. (2007). 관련 위해물질–식품의 중금속 오염 현황과 관리방안. *Bulletin of Food Technology*, 20(4), 37–49.
- Yunhao–Huang. 2021. Comparison of PM_{2.5} and PM₁₀ concentration between light scattering and β –ray absorption method under different humidity conditions. Graduate School, Daejeon University
- Zhang 2021. All–Cause Mortality Risk and Attributable Deaths Associated with Long–Term Exposure to Ambient PM_{2.5} in Chinese Adults

[참여 연구진]

연구총괄책임 이상신 충남연구원 서해안기후환경연구소

1세부 : 대기환경정보 구축

연구책임	이상신 충남연구원 연구위원
연구참여	김종범 충남연구원 책임연구원
	윤종주 충남연구원 연구위원
	최영남 충남연구원 연구원
	윤수향 충남연구원 연구원
	김아람 충남연구원 연구원
	이선엽 충남연구원 연구원
	조민철 충남연구원 연구원
	홍현수 (주)나인에코 대표이사
	김필수 (주)나인에코 과장
	김수향 (주)선일이앤씨 부장

2세부 : 대기질 측정분석

연구책임	김선태 대전대학교 교수
연구참여	강정호 대전대학교 석사과정
	김주인 대전대학교 박사과정
	어현준 대전대학교 석사과정
	전형재 대전대학교 석사과정
	김건호 대전대학교 연구보조원
	하인영 대전대학교 연구보조원

3세부 : 사회적 피해비용 평가

연구책임	정유심 한국품질재단 원장
연구참여	강영경 한국품질재단 선임연구위원
	이진섭 한국품질재단 선임연구위원
	이미정 한국품질재단 책임연구위원
	박수현 한국품질재단 선임연구위원
	조은정 연세대학교 박사과정

4세부 : 생태환경 모니터링

연구책임	채희문	강원대학교	교수
연구진	김종국	강원대학교	교수
	박영철	강원대학교	교수
	유기억	강원대학교	교수
	최병구	강원대학교	교수
	최재석	강원대학교	연구교수
	안영상	전남대학교	교수
	장태웅	강원대학교	박사
	임상진	강원대학교	박사
	김경아	강원대학교	박사
	홍성원	강원대학교	박사
	임찬진	강원대학교	연구보조원
	김익현	강원대학교	연구보조원
	정상민	강원대학교	연구보조원
	남궁헌	강원대학교	연구보조원
	한소현	강원대학교	연구보조원
	최주희	강원대학교	연구보조원
	김진금	강원대학교	연구보조원
	권지현	강원대학교	연구보조원
	박중열	강원대학교	연구보조원
	김태경	강원대학교	연구보조원
	고아름	강원대학교	연구보조원
	이윤순	강원대학교	연구보조원
	최지우	강원대학교	연구보조원
	김혜빈	강원대학교	연구보조원
	김범준	강원대학교	연구보조원
	백주원	강원대학교	연구보조원
	문제현	전남대학교	연구보조원

행정책임 및 지원

이남재 충청남도 기후환경국장

권영택 충청남도 기후환경정책과장

류광하 충청남도 기후환경정책과 기후변화대책팀장

이고은 충청남도 기후환경정책과 주무관

김영규 보령시 환경보호과 대기환경팀장

박경서 당진시 기후에너지과 기후변화대응팀장

나한일 서천군 환경보호과 환경정책팀장

이범욱 태안군 환경산림과 환경지도팀장

발행일 : 2021년 12월

발행인 : 충청남도지사

발행처 : 충청남도 기후환경정책과

(32258) 충청남도 홍성군 홍북면 충남대로21

홈페이지 www.chungnam.go.kr

발간등록번호 : 74-6440000-000417-01
