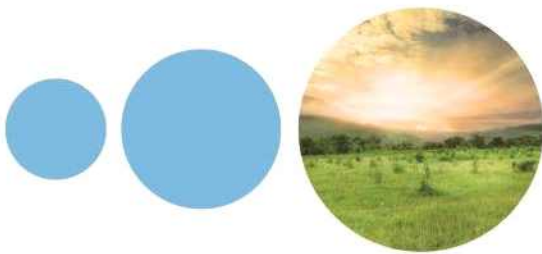


충청남도 미세먼지 저감을 위한 공동 연구방안 마련 세미나

기후변화대응연구센터



충청남도 서해안기후환경연구소



2019. 5. 16.

세부 프로그램

시 간		내 용	
5월 16일 (목)		공동연구방안 마련 세미나	
15:00~15:10(10')		참석자 소개	김종범 (책임연구원)
공동연구방안 마련 세미나	15:10~15:30(20')	대산지역 대기환경 영향 조사 (충남연구원 서해안기후환경연구소)	김종범 (책임연구원)
	15:30~15:50(20')	화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구 (충남연구원 서해안기후환경연구소)	윤수향 (연구원)
	15:50~16:10(20')	한국철도기술연구원의 미세먼지 관련 연구 동향 (한국철도기술연구원 교통환경연구팀)	김민정 (선임연구원)
	16:10~16:30(20')	VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사 (한국철도기술연구원 교통환경연구팀)	이용일 (선임연구원)
16:30~16:50(20')		Break time	
전문가 초청세 미나	16:50~17:10(20')	고분해능—실시간 분석장비 시스템의 구성과 적용 및 측정사례 (주)APM엔지니어링	김정호 (기술이사)
	17:10~17:30(20')	항공관측을 통한 미세먼지 물리화학적 특성 연구 (한국외대)	이태형 (교수)
17:30~17:50(20')		종합토론	
17:50~18:00(10')		정리 및 폐회	

1

대산지역 대기환경 영향조사

김종범 (충남연구원 서해안기후환경연구소)

충청남도 서해안 기후환경연구소 Seohaean Research Institute 충청남도 미세먼지 저감을 위한 공동 연구방안 마련 세미나


충남연구원 ChungNam Institute

대산지역 대기환경 영향 조사

2019. 05. 16


충남연구원 서해안기후환경연구소





CONTENTS

1. 서해안기후환경연구소 소개
2. 연구배경
3. 연구목적 및 개요
4. 연구진행 사항
5. 공동연구방안 모색



충남연구원 ChungNam Institute



1. 서해안기후환경연구소 소개



충남연구원
Chungnam Institute

설립목적 및 목표



설립목적 (2015. 3 개소)

- 충청남도 산하 지방출연기관인 충남연구원 부설 연구소
- 충청남도와 서해안 연안의 기후변화 대응 기반을 조성
- 환경보전을 통한 지속가능한 발전 도모

주요연구분야

- 기후변화 정책지원
- 에너지-온실가스 관리
- 기후변화적응대책 수립
- 연안환경관리
- 기후변화 모니터링
- 녹색경영지원

- 기후변화대응 정책개발
- 연안 기후변화 영향연구
- 기후변화 모니터링



출처 : 충남연구원 서해안기후환경연구소 (<http://shari.re.kr/>)

4/40



2. 연구배경

충청남도의 대기질은 왜 안 좋을까?

1. 지리적 영향

- ✓ 편서풍 지대
- ✓ 월경성 대기오염물질
- ✓ 중국발 황사 등 영향

2. 환경적 영향

- ✓ 전국 석탄화력발전소의 1/2
- ✓ 전국 3대 석유화학단지
- ✓ 대량배출사업장(제철소 등)

**대기오염물질배출량
전국 "2위"**

6/40

2. 연구배경



세계에서 대기오염이 가장 급격히 심해진 지역 : 서산 (대산읍)

자료 : 오마이뉴스
(17.09.19)

"충남서산지역은 세계 최악의 환경오염지역"

대산지역 대기환경정규제지역 지정을 위한 의정토론회... 『대기환경정규제지역 지정해야』

17.09.19 11:47 · 최종 업데이트 17.09.19 11:47 · 글 조우성(jwt1691) · 편집 박은복(betareed)

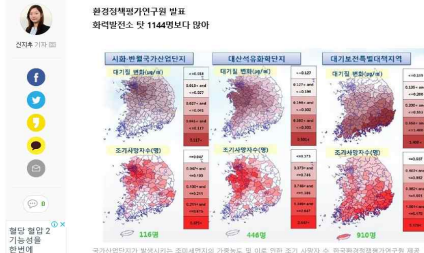
좋아요 22개 · 댓글 1개 · 공유 1개 · 댓글 1개 · 댓글 1개

충남서산지역은 세계 최악의 환경오염지역

26 · 5

산업단지 초미세먼지 탓 조기사망자 연간 1,500명 육박

입력 2017.11.10 10:09 · 댓글 1개 · 공유 1개



국내 주요 산업단지가 배출하는 초미세먼지(PM2.5)로 인한 조기사망자가 연간 1,472명에 달한다는 국제연구기관의 분석 결과가 나왔다. 지금까지 미세먼지 국내요인으로 화력발전소, 경유차 등이 지목됐지만 산업단지가 이에 못지 않다는 얘기다.

자료 : 한국신문 (17.11.10)

7/40

[취재파일] 대산...세계에서 대기오염이 가장 급격하게 심해진 도시

만영인 기자 youngin@sbs.co.kr 작성 2016.07.18 19:28 수정 2016.07.11 13:05 조회 279회



Daesan(Korea)

최근 미국 지구물리학회 저널(Journal of Geophysical Research)에 발표된 논문을 보다가 갑자기 눈에 띄는 단어가 있다. Daesan(대산)이라는 단어다. 그 앞에는 Jamnagar(잠나)라고, 인도라는 단어가 있었다. 세계적인 저널에 잠나와 대산이 함께 있는 것은 '대산'이라는 곳이 올라있는 이유는 무엇일까? 인도 잠나와 대산, 이 두 지역에는 무슨 공통점이 있을까?

자료 : SBS 취재파일 (16.10.19)



이 시각 연가사



이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

이 시각 연가사

3. 연구목적 및 개요



3. 연구목적 및 개요



충남연구원
Chungnam Institute

연구목적

- 유해화학물질의 직·간접 피해의 일차적인 매개체인 대기질 조사 · 실태파악 (한국대기환경학회)
- 조사결과가 반영된 대기모델링, 위해성 평가를 통해 종합대책 기초자료 마련 (충남서해안기후환경연구소)
- 대기질 개선대책 및 갈등해결방안 모색 (충남서해안기후환경연구소)

연구개요

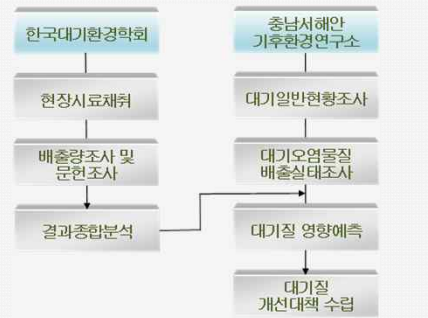
□ 공간적 범위 : 대산석유화학단지 주변지역 및 반경 10 km 이내

□ 사업기간 : 계약일로부터 24개월 (10.11 ~ 19. 10)

□ 수행기관 : (사)한국대기환경학회, (재)충남연구원

□ 연구내용 :

- 대기오염물질 조사 및 분석
- 대기일반 현황 조사
- 대기환경 영향예측
- 대기질 개선대책 수립



9/40

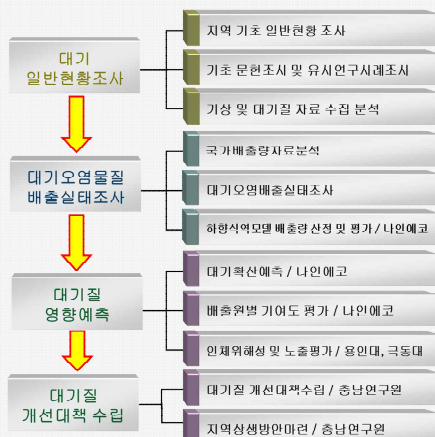
3. 연구목적 및 개요 (충남연구원)



충남연구원
Chungnam Institute

- 박사급 5명, 석사급 5명 총 10명 연구진 참여
- 대기배출실태조사 및 위해성평가 부분 외부 전문연구진 구성

과업 추진체계



최근 주요 연구경력 (16~18)

수행연도	과역명
2018	충청남도 대기오염 중점관리지역 정보관리 로드맵 수립
	국가대기오염물질 배출량 분석을 통한 미세먼지 대응정책 방향 설정
	화력발전소 주변지역 기후환경 영향 연구
	충남도민 생활 속 미세먼지 저감실천과 평가
2017	대기질 개선을 위한 지역 대기오염원 관리제도 홍보
	내포신도시 축산악취 모니터링을 통한 기상 특성 연계 분석
	고농도 미세먼지 발생시 기상학적 특성파악에 대한 연구
	충청남도 기후바람지도 제작
	노후화력발전소 가동중단과 대기질 개선효과 분석
	내포신도시 축산악취 개선 주민만족도 조사 지원
	충청남도 고농도 대기오염 발생 기상학적 특성 파악에 대한 연구
2016	당진시 대기보전특별지역 지정을 위한 시민 인식조사
	충청남도 대산지역 대기환경영향조사
	충청남도 지역 대기환경기준 설정 기초연구

10/40



4. 연구 진행 사항 : 대기오염물질 측정 및 분석

충남연구원
Chungnam Institute

대기오염물질 조사 개요

- 조사기간 : 4계절(봄, 여름, 가을, 겨울), 계절별 7일간 연속 측정
- 조사지점
 - 유해대기오염물질 조사 : 대산산단 주변 5곳 (대죽1리, 화곡1리, 대로3리, 오지리, 대산리)
 - 다이옥신 조사 : 소각장 주변 3곳
 - VOC 공간오염도 조사 : 31곳 마을
- 조사항목 : 휘발성(할로겐화 포함) 유기화합물 (50여종 이상)
 카보닐화합물 (5종 이상), 다환방향족탄화수소 (18여종 이상)
 프탈레이트류 (2종 물질), 중금속 물질 (7종), 불화수소
 다이옥신 (다이옥신류 및 퓨란류)
- 기 타 : 기존 국가산단 연구자료와 비교 평가
 - ☞ 유해대기물질 측정망(VOCs, PAHs) : 1곳 운영 중(독곶리)
 - ☞ 중금속 측정망 : 1곳 운영중(독곶리)

12/40

4. 연구 진행 사항 : 대기오염물질 측정 및 분석

충남연구원
Chungnam Institute

유해대기오염물질 측정지점 (5개소)



13/40

4. 연구 진행 사항 : 대기오염물질 측정 및 분석

충남연구원
Chungnam Institute

유해대기오염물질 측정지점 전경

< 대죽1리 : 마을회관 >



< 화곡2리 : 마을회관 >



< 대로3리 : 명지타워 >



< 오지리 : 별천포 >



< 대산을 대산리 : 대산종합시장 >



14/40

4. 연구 진행 사항 : 대기오염물질 측정 및 분석

충남연구원
Chungnam Institute

다이옥신 측정지점 (3개소) 및 전경



15/40

4. 연구 진행 사항 : 대기오염물질 측정 및 분석

충남연구원
Chungnam Institute

VOCs 공간분포 측정지점 (31개소)



16/40

4. 연구 진행 사항 : 대기오염물질 측정 및 분석



VOCs 공간분포 측정지점 전경



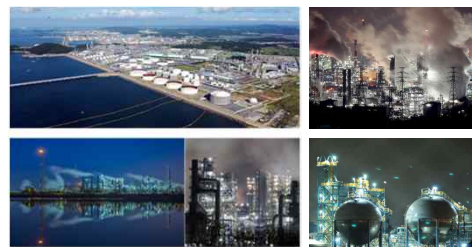
17/40

4. 연구 진행 사항 : 일반현황 조사



국내 석유화학단지 관리현황

국내 3대 석유화학단지 현황



여수석유화학단지

- 2004년 제1차 대기환경개선 실천계획
- 2011년 제2차 광양만권역 대기환경개선 실천계획
- 2017년 대기환경개선 실천계획 이행평가 수정

울산석유화학단지

- 2011년 대기질 개선 중장기 종합대책
- 2017년 울산광역시 대기환경 개선 실천계획 용역

18/40

4. 연구 진행 사항 : 일반현황 조사



충남연구원
Chungnam Institute

서산 산업단지 현황



* 출처 : 한국산업단지공단, 2018 전국산업단지 현황지도



서산 산업단지 현황 (15)

- 국가 (1) : 대죽자원비축
- 일반 (11) : 대산, 대산2, 대산3 등
- 농공 (3) : 성연, 수석, 고북

19/40

4. 연구 진행 사항 : 일반현황 조사



충남연구원
Chungnam Institute

대기오염물질 배출 현황 - 배출시설

전국 대기오염 배출사업장 : 57,500개소 (도내 3,293개 사업장(전국 대비 6.2%) 위치)
서산시 주요 배출시설(1,2종 사업장) : 34개소 위치(대산을 21개소, 62% 분포)

2016	전체	1종	2종	3종	4종	5종
인지면	3				1	2
부석면	3				3	
팔봉면	3		1		1	1
지곡면	14	5	1	1	3	4
성연면	27	3	1	2	6	15
음암면	20	1		2	4	13
운산면	14			1	9	4
해미면	11			1	3	7
고북면	14	1			6	7
부춘동	5				2	3
동문1동	3					3
동문2동	1					1
수석동	17			1	5	11
석남동	18				6	12
충청남도	3,293	125	117	122	1,057	1,872
전국	57,500	1,707	1,707	2,082	18,704	33,300
충남대비 서산시 비율	6.2%	21.6%	6.0%	9.0%	5.7%	5.3%
전국대비 서산시 비율	0.4%	1.6%	0.4%	0.5%	0.3%	0.3%

* 출처 : 서산시 통계연보(2017), 환경부 환경통계포털



* 출처 : 전준민, 대산공단지역 대기환경영향조사용역 발표자료(2017)

20/40

4. 연구 진행 사항 : 일반현황 조사



충남연구원
Chungnam Institute

국내 석유화학단지 관리현황 (대기배출사업장)

산업단지	대산	여수	울산	
			울산·미포	온산
총면적	12,710천m ²	31,711천m ² (2.6배)	45,594천m ² (3.8배)	20,475천m ² (1.6배)
대기배출 사업소 총계	51 개소	151 개소 (3.0배)	298 개소 (5.8배)	181개소 (3.5배)
1종	17 개소	42 개소	69 개소	24 개소
2종	4 개소	20 개소	21 개소	19 개소
3종	3 개소	10 개소	24 개소	20 개소
4종	11 개소	30 개소	83 개소	45 개소
5종	16 개소	49 개소	101 개소	73 개소

*출처: 각 지자체 산업단지 현황 통계자료 (대산:2018년 기준, 여수,울산:2017년 기준)

21/40

4. 연구 진행 사항 : 일반현황 조사

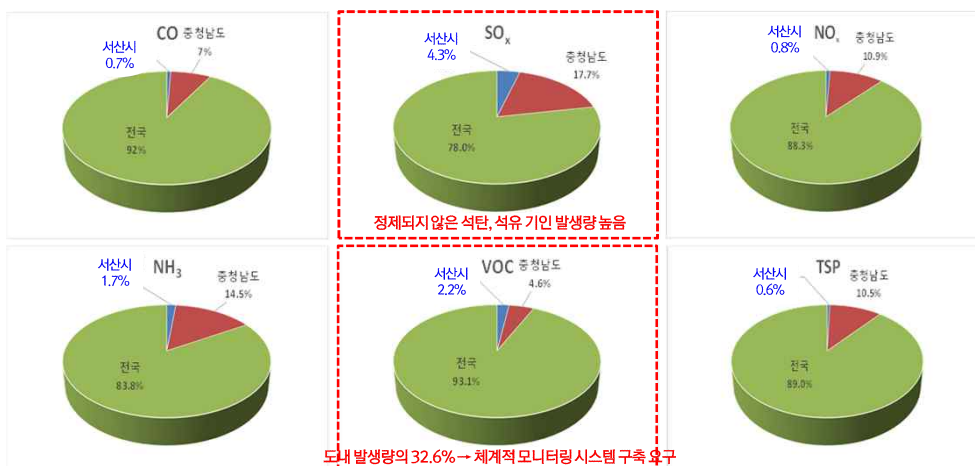


충남연구원
Chungnam Institute

대기오염물질 배출 현황 - 배출량

전국대비 NO_x, VOC, NH₃의 발생량 비율이 높은 것으로 분석(2015년 CAPSS 기준)

특히 SO_x의 경우 전국 배출량의 4.3%(15,070톤), VOC는 2.2%(22,646톤)을 배출하고 있음 → SO_x, VOC 중점관리 필요



* 출처: 국가대기오염물질배출량 서비스

22/40

4. 연구 진행 사항 : 일반현황 조사

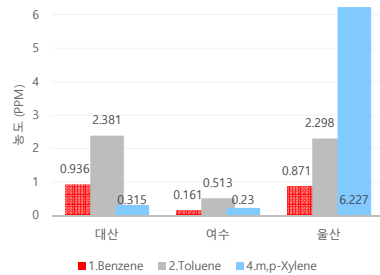


충남연구원
Chungnam Institute

국내 석유화학단지 대기오염물질 농도현황

유해대기오염물질 측정소 :

특정 도시지역, 산업단지, 배경농도지역에서 특정대기유해물질의 오염도를 파악하기 위해 측정



2017년 석유화학단지 주변 유해대기물질측정망 VOC 측정결과
대산(독곡리), 여수(여천동), 울산(여천동)

*출처: Airkorea 통계자료

업체	유해화학물질
현대오일뱅크	황산, 가성소다, 암모니아수, 염산, 테트라 클로로에틸렌, Merox Plus, AvTEL, 메탄올, 톨루엔 , 벤젠 , 자일렌
LG화학	메틸알콜, 수산화나트륨, 1,2-이염화에탄, 톨루엔 , 무수포름, 황산, 과산화수소, 벤젠 , 수산화칼륨, 아크릴로니트릴, 디메틸디치오카망산나트륨, 플루오르화수소, 아질산염류, 피닐디아민, 염산, 무수크로산, 디메틸벤젠아민테트라키스, 디니트로페놀, 하이드로퀴논, 페놀, 염화아연, 산화나트륨, 디메틸포름아이드, 부타디엔
롯데케미칼	벤젠 , 황산, 메탄올, MEK, 톨루엔 , 수산화나트륨, 수산화칼륨, 프루포랑, 오메가촉매, 무기아연염류, 아질산염류, 염화메틸, 히드라진수화물, 염화에탄, 자일렌 , 산화나트륨, 부타디엔, 디메틸로폼아이드
한화토탈	수산화나트륨, 메틸알콜, 자일렌 , 톨루엔 , 무수포름, 벤젠 , 하이드로퀴논수화물, 황산, 아질산나트륨

23/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석

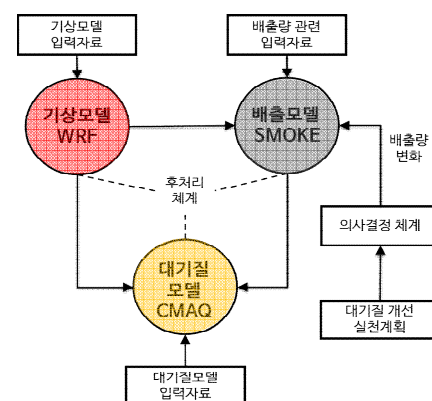


충남연구원
Chungnam Institute

모델링 수행 체계 및 개요

- 대기모델링 예측방법의 법적 근거 대기환경보전법 제18조, 제19조 제1항 및 동법 시행규칙 제18조 제1항에 따른 「대기환경규제지역의 실천계획 작성지침」 제시
- 대기모델링 수행방법은 “국가 대기정책 수립 및 평가를 위한 대기질 모델링 가이드라인, 국립환경과학원”에 준하여 수행
- 해당 가이드라인에 맞추어 충남도 대기오염도 예측 모델을 선정하였고 이를 통해 정책활동도 제고를 위한 신뢰성 있고 정확도가 높은 결과 산출
- 모델링 수행은 기상 모델, 배출량 모델, 대기질 모델로 나누어 수행되지만 서로 유기적인 관계로 운영
- 연구에 사용한 모델은 기상 모델 WRF(The Weather Research & Forecasting Model), 배출량 모델 SMOKE(The Sparse Matrix Operator Kernel Emissions), 대기질 모델로 광화학 격자모델인 CMAQ(Community Multi-Scale Air Quality), 확산모델 CALPUFF 선정

대기질 모델링 체계도



24/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
ChungKam Institute

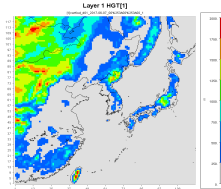
모델링 수행 체계 및 개요

대기질 예측을 위한 모델링 입력자료 구성

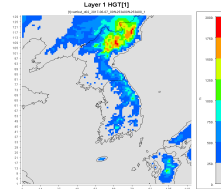
- 모델링 기간은 본 연구 평가 대상물질인 오존과 미세먼지의 농도가 높게 측정된 2017년 9월, 11월 대상
- 모사영역은 일반적으로 등지기법(nested method)을 사용하며 충남도의 모델운영을 위해 광역도메인인 **동아시아** 권역을 시작으로 **한반도, 수도권, 충청** 권역으로 nesting 함
- 기상모델 입력자료 구성 지표기상 관측자료를 이용하여 지표부분의 자료동화인 **surface FDDA** 과정을 수행하였으며 **지표 및 고층기상 관측자료**로는 **NCEP ADP**(Automated Data Processing)에서 제공하는 **세계 종관 기상자료** 사용
- 지형고도 자료는 **SRTM**, 토지이용자료는 **환경부** 작성자료 활용
- 배출량 모델 운영을 위한 입력자료로 동아시아 배출량은 **INTEX-B**를 이용, **MEGAN**모델을 이용하여 자연배출원 발생 배출량 사용, 국내 배출량은 **CAPSS** 최신자료인 2014년 자료 사용

모델링 도메인 구성(고도)

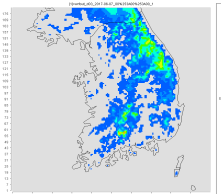
동아시아 권역



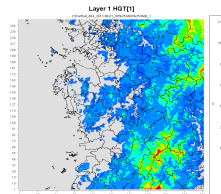
한반도 전체 권역



남한 권역



연구대상지역



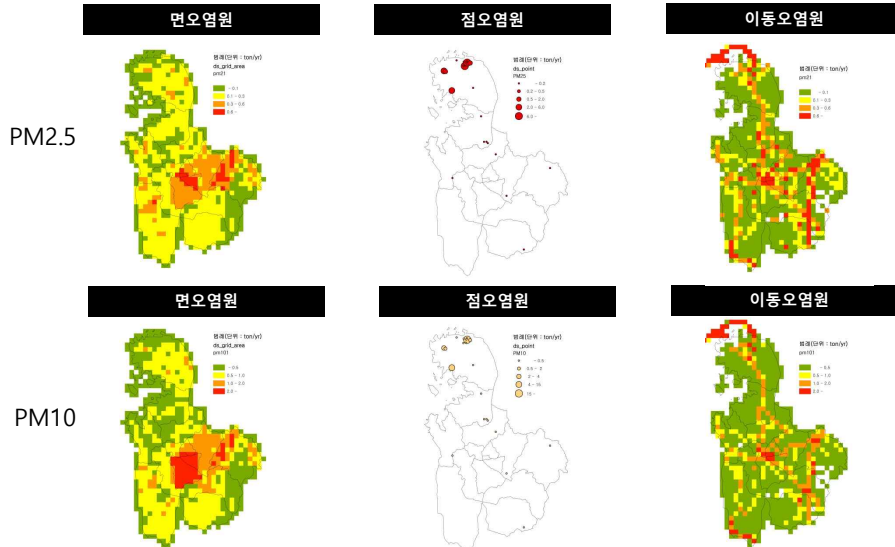
25/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
ChungKam Institute

서산시 대기오염물질 배출량 및 공간분포 현황



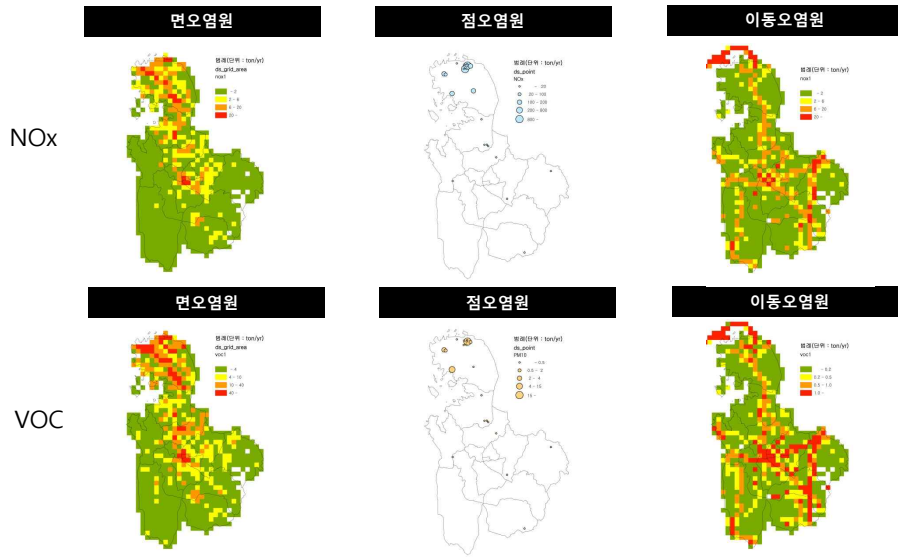
26/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
Chungnam Institute

서산시 대기오염물질 배출량 및 공간분포 현황

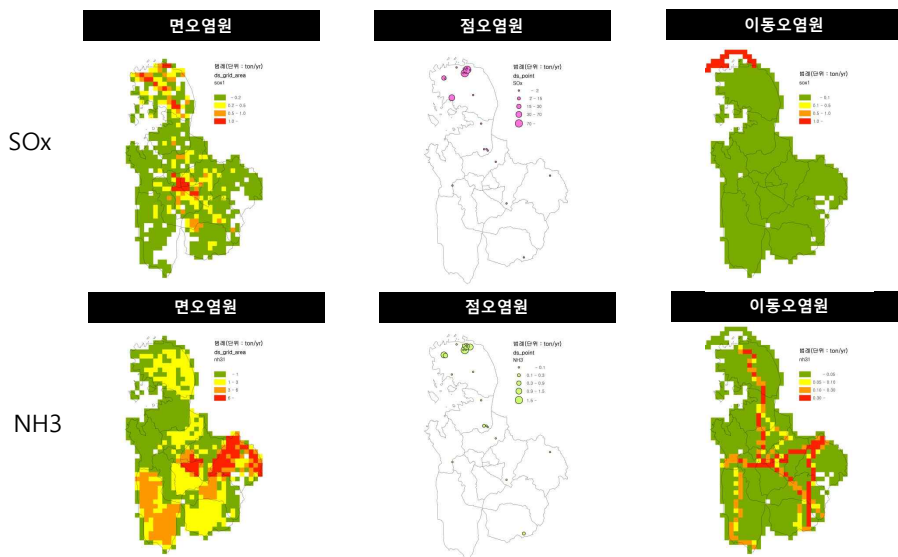


4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
Chungnam Institute

서산시 대기오염물질 배출량 및 공간분포 현황

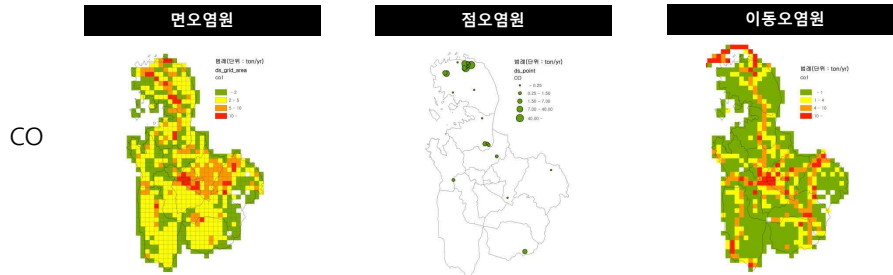


4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
Chungnam Institute

서산시 대기오염물질 배출량 및 공간분포 현황



점오염원 : 산업단지 주변 지역으로 배출강도가 높음

이동오염원 및 면오염원 : 서산시 중심지 및 대산 산업단지 주변이 배출강도가 높은 것으로 나타남

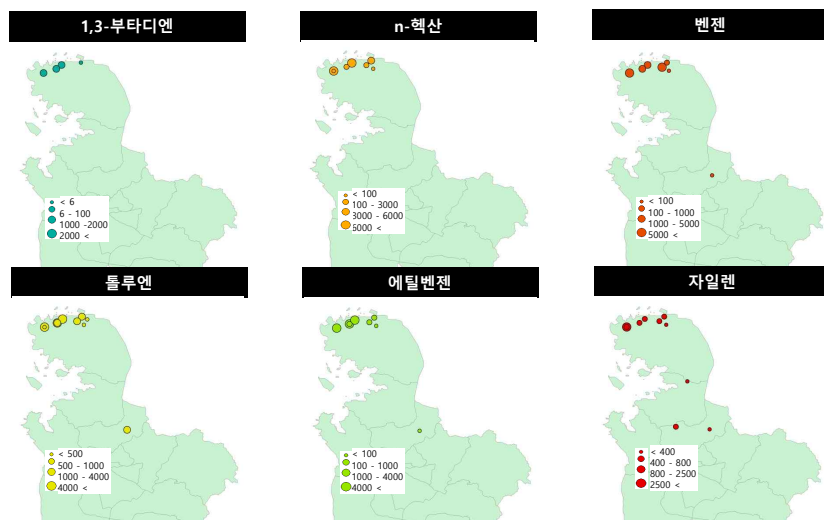
29/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
Chungnam Institute

서산시 유해화학물질 공간분포



단위 : kg/yr

30/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석



충남연구원
Chungnam Institute

서산시 유해화학물질 공간분포

포름알데히드



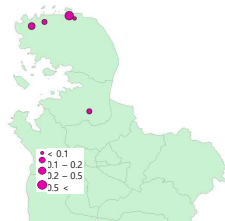
나프탈렌



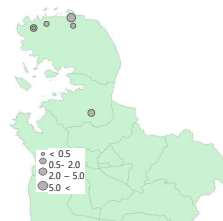
알루미늄 및 그 화합물



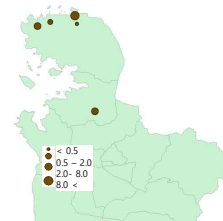
구리 및 그 화합물



니켈 및 그 화합물



크롬 및 그 화합물



단위 : kg/yr

31/40

4. 연구 진행 사항 : 대기영향 분석

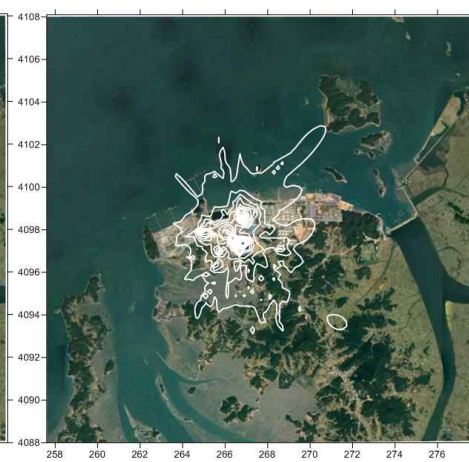
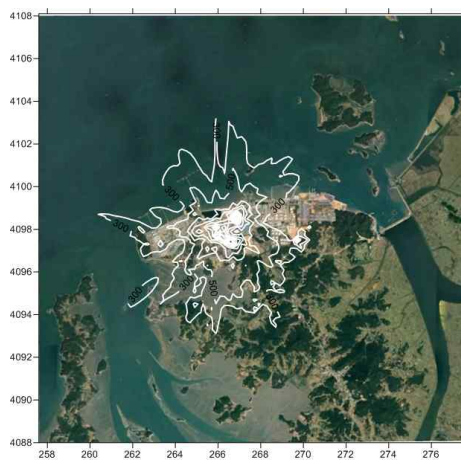


충남연구원
Chungnam Institute

유해화학물질 모델링 수행 결과

벤젠(24시간 최대 평균, ng/m³)

1,3-부타디엔(24시간 최대 평균, ng/m³)



32

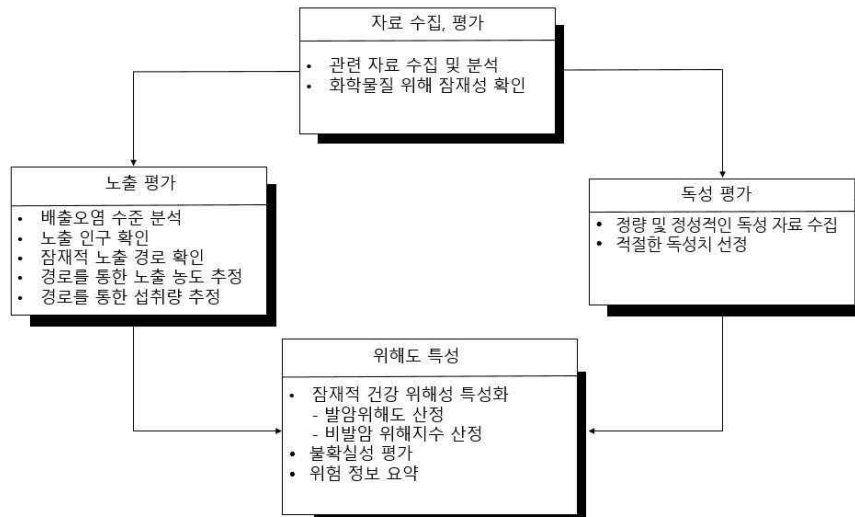
32/40

4. 연구 진행 사항 : 위해성 평가



충남연구원
Chungnam Institute

위해성 평가의 기본 구조



33/40

4. 연구 진행 사항 : 위해성 평가



충남연구원
Chungnam Institute

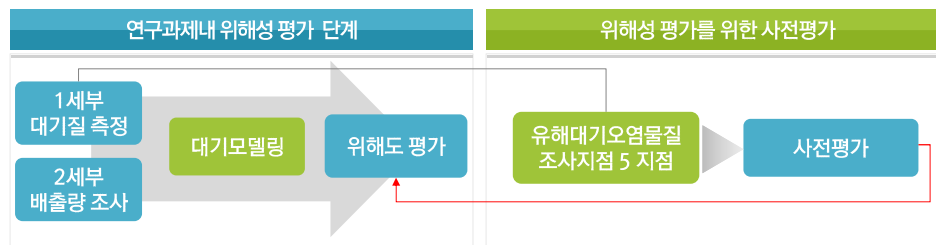
위해도 결정

- 위해도 결정은 용량-반응 평가의 결과값과 노출평가에서 추정한 노출량을 비교
 - 발암물질의 경우

$$\text{Excess Cancer Risk(초과발암위해도/CR)} = \text{LADD} \times \text{Inhalation Slope Factor(발암잠재력)}$$
 - 비발암물질의 경우

$$\text{Hazard Quotient(위해지수/HQ)} = \text{LADD} / \text{Inhalation RfD(호흡 노출 참고치)}$$

사전평가 단계



34/40

4. 연구 진행 사항 : 대기질 개선 대책 수립



충남연구원
Chungnam Institute

지역주민 의견조사 결과

□ 대산공단 지역 대기환경영향조사 1차 설문조사

- 기초자료 수집을 위한 설문문항작성
 - 거주지 내 환경문제 및 대기 오염수준 파악
 - 지역주민들의 대기 유해물질에 대한 인지도 파악
 - 대산공단지역 내 배출추정 유해물질 성분이해 및 중점관리대상 선정
 - 충청남도 및 서산시 정책 만족도
 - 마을단위 대기오염물질 측정망 구축에 대한 효과성 등

- 설문조사 기간 : 2018년 3월 21일~23일
- 조사대상 : 대산을 전 마을 이장단 (N:28)



□ 대산공단 지역 대기환경영향조사 2차 설문조사

- 정책 우선순위, 주민의견 수집을 위한 설문문항작성
 - 지역 국가 측정망 결과에 대한 인식조사
 - 대산환경조사 중간보고회 결과에 대한 인식조사
 - 지역주민이 바라보는 충남연구원의 역할 등

- 설문조사 기간 : 2019년 2월말 ~ 4월초(진행중)
- 조사대상 : 서산시(대산읍) 지역 및 환경 협의체 (N:86+@)



35/40

4. 연구 진행 사항 : 대기질 개선 대책 수립



충남연구원
Chungnam Institute

맞춤형 정책지원 방향 제시

□ 대기환경규제, 대기보전특별대책지역 등의 지정 건의 및 관련 과학적 자료 구축

□ 산업단지 지원정책 조례 제정 : 타산단 사례조사 및 조례 초안 작성 / 타당성 검토

□ 지역주민과 산업단지의 상생방안 마련 (거버넌스 및 소통의 창구 구축)

□ 시간대별 오염물질 거동특성 분석 (VOCs 등)에 따른 오염물질별 주민 대응방안 제시

□ 위해성이 높은 오염물질들에 대한 공정조사와 이에 대한 관리방안 제시

□ 향후 추가연구 방안 제시

36/40



5. 공동연구방안 모색



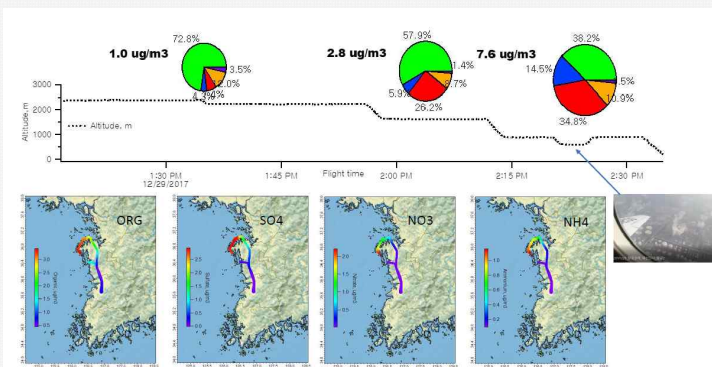
충남연구원
Chungnam Institute

■ 항공관측을 활용한 한반도 대기질 측정분석: 국립환경과학원/미세먼지사업단

□ 주관기관: 국립환경과학원

○ 연구목적: 입체관측을 통한 입자상 오염물질의 국가간 이동파악을 위한 항공관측

○ 과제기간: 2018.12~2019.03



38/40

5. 공동연구방안 모색



VOCs 연속 모니터링 기획 (한국철도기술연구원, ㈜APM엔지니어링)

□ 연속측정 장비를 활용한 공동 연구 협의 중 (한국철도기술연구원)

- 목적 : 연속측정을 통한 대산지역 VOCs 배출특성 조사
- 측정항목 : 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 등 16종
- 측정주기 : 30분

MITAP	Alkanes & Alkenes	Aromatics	Oxygenated VOCs	Chlorinated VOCs
35 cm 26 cm 19 cm	n-Heptane	Benzene	Acetone	Vinyl chloride
	Propene	Toluene	Buamone	Trichloroethylene
		Ethylbenzene		Perchloroethylene
	1,3-Butadiene	Xylenes	Ethyl acetate	1,2-Dichlorobenzene
		Styrene		1,4-Dichlorobenzene

Figure 2. MITAP P310 auto-GC and representative VOCs detected in this study.

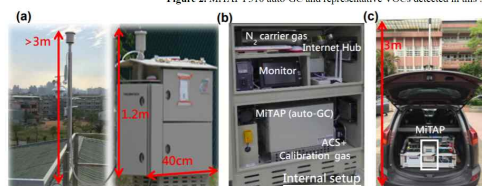


Figure 3. Monitoring station setup. (a) Fixed station stand-alone cabinet with auto-GC and anemometer (b) Internal setup of the fixed station (c) Mobile station setup and the anemometer on the top of the vehicle.

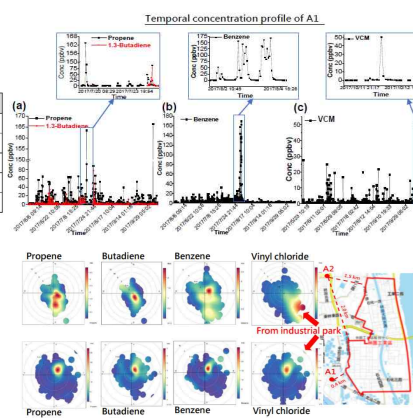


Figure 4. Geographic locations of Schools A1 and A2, and pollution roses observed by fixed stations.

39/40

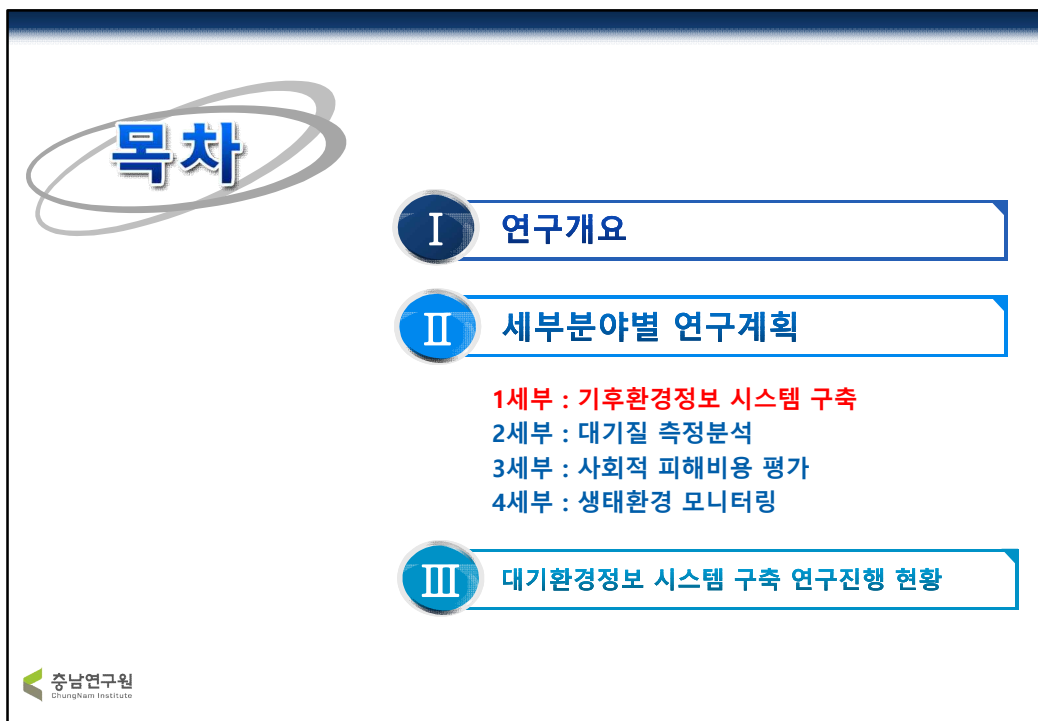
감사합니다



2

화력발전소 주변지역 기후환경
영향 연구

윤수향 (충남연구원 서해안기후환경연구소)



I

연구개요

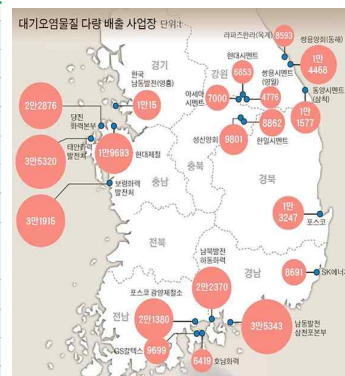
1. 연구배경 및 필요성
2. 연구목적과 연구범위
3. 연차별 연구진행 로드맵
4. 추진체계도 및 참여인력



1.1 연구개요 : 연구의 배경 및 필요성

- 충청남도 석탄에 의한 전력시설용량 전국 50.1% 담당(한국전력통계, 2016.6 기준)
- 석탄화력발전소에 의한 대기질, 기후변화 가속화 우려로 과학적 기반 기초자료 구축 필요

구분 (지역 및 발전소명)	설비용량	발전원	현재 설비용량	미래 설비용량	비고
당진 권역	한국동서발전 (1~8호기)	500 MW * 8기 = 4,000 MW	유연단	1,1306 MW (21.1% ▲)	
	한국동서발전 (9~10호기)	1,110 MW * 2기 = 2,220 MW	유연단		
	현대그린파워 (1~8호기)	100 MW * 8기 = 800 MW	제철소 부생가스		
	GS 당진발전소 (1~2호기)	538 MW + 550 MW = 1,088 MW	LNG		
	GS 당진발전소 (3호기)	415 MW	LNG		
	GS 당진발전소 (4호기)	903 MW	석탄연소, 배기보일러		17년 7월 준공
	GS 당진발전소 (5~6호기)	950 MW * 2기 = 1,900 MW	LNG		산설예정
태안 권역	SK E&S (1~2호기)	580 MW * 2기 = 1,160 MW	석탄연소		산설예정
	한국서부발전 (1~8호기)	500 MW * 8기 = 4,000 MW	유연단	6,446 MW	
	한국서부발전 (9~10호기)	1,050 MW * 2기 = 2,100 MW	유연단		
보령 권역	IGCC 플랜트	346 MW	석탄액화 가스(IGCC)		
	한국중부발전 (1~8호기)	500 MW * 8기 = 4,000 MW	유연단	7,350 MW	
	한국중부발전 (1~3호기)	1,350 MW	LNG		
	한국중부발전 (1~2호기)	1,000 MW * 2기 = 2,000 MW	유연단		17년 6월(1호기), 10월(2호기) 준공
서천 권역	한국중부발전 (1~2호기)	2,180 MW * 2기 = 4,360 MW	유연단	1,000 MW (150% ▲)	17년 9월 폐지
	한국중부발전 (1~2호기)	1,000 MW	유연단		19년 개성



중앙일보(2016.07.06.)

1.1 연구개요 : 연구의 배경 및 필요성

화력발전소 주변 기후환경 영향 연구의 배경

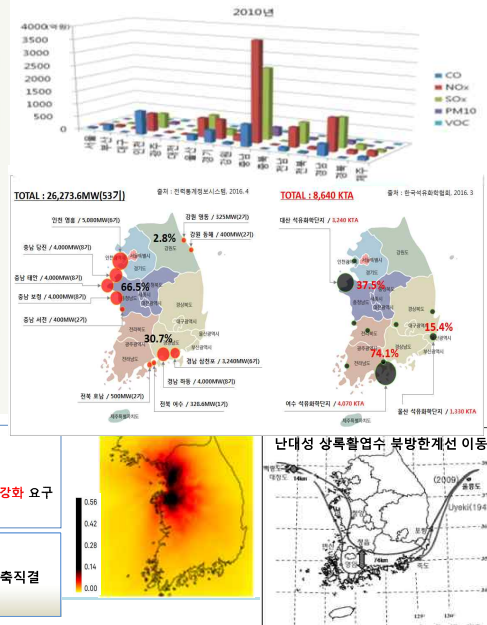


화력발전소 증설 관련 관심과 우려 확산

- ✓ 최근 화력발전소 증설 관련 Greenpeace 보고서 인용 보도
 - 도내 발전소 신규건설로 매년 750명 조기사망 증가(35기 확대 시 1,290명)
 - 그린피스 정부에 발전소 증설계획 철회, 발전량 제한 및 신재생에너지 전환, 환경영향평가 강화 요구
- ✓ 초미세먼지 원인으로 화력발전소 지목

한미 대기질 합동 연구(KORUS-AQ) 결과

- 지역내 오염원이 2차 미세먼지 생성에 지배적 기여(VOCs, NO₂ 등 감축이 PM_{2.5} 감축직결)
- 미세먼지로 인한 주민건강 보호 위해 NO₂, VOCs 배출 사업장 관리 강화 필요



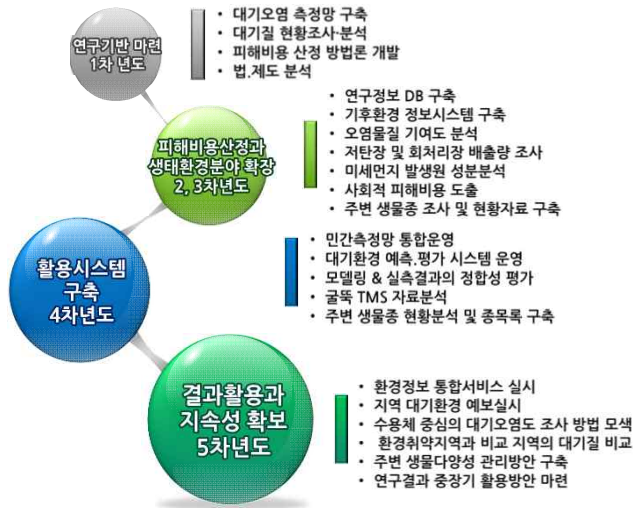
1.2 연구개요 : 연구목적과 범위

화력발전소 주변지역 환경복지 구현을 위한 기후환경변화 과학적 실증자료 구축



- (시간적 범위) 2017~2021년(5년차 중 2차년도, 2018년)
- (공간적 범위) 화력발전시설 및 그 주변지역을 중심으로 충청남도 전역고려

1.3. 연구개요 : 연차별 연구진행 로드맵



5년간 주요연구 결과

- 기준배출량 강화 방안 등 제언
- 민간측정망 통합운영(대기질 자료 활용성 제고)
- 환경정보 통합서비스 실시
- 지역 대기환경 예보
- 환경취약지역 대기오염도 자료구축 (오염도 Map 작성)
- 민간운영 측정망의 운영 실태 파악 (활용 방안 도출)
- 저탄장 및 회처리장 등의 실질적인 배출량 조사 (주변지역 피해량 파악)
- 미세먼지 발생원 성분분석
- 환경취약지역 수용체 중심 대기오염도 측정과 정보 수집 방안 도출
- 화력발전소 피해비용 산정과 비용분담 분석
- 화력발전소 주변 생물자원 종목록 구축 및 분포지도 작성
- 화력발전소 생물종 영향 분석
- 화력발전소 주변 기후변화 취약종 자료 구축
- 화력발전소 주변 생물 자원관리 방안 구축

1.4. 연구개요 : 추진체계도 및 참여인력

- 충남연구원 : 충청남도 지역 환경문제 등 정책연구 전문기관으로 지역적 특색에 맞는 핵심역량 보유
- 대전대학교 : 수질, 대기오염, 폐기물 처리, 토양오염 및 생태환경과 지속가능한 개발 등 환경오염문제 해결 능력에 대한 전문 역량 보유
- 한국품질재단 : 환경안전, 기후분야 평가, 검인증 전문기구로서 관련 정책연구 다수 수행, 풍부한 산학연 전문가 풀 활용 역량 보유
- 대전대학교 : 산림환경, 동물, 식물분야에 대한 다양한 전문가를 보유하고 있으며, 기후변화, 생태환경모니터링 분야의 다양한 연구경험 보유

총괄책임(대표제임기관) : 충남연구원 “화력발전소 주변지역 기후환경 영향연구”

제1부 1: 충남연구원

기후환경 정보 구축 분야 (이상진 책임연구원)

- 지역 기후변화 분석
- 고정측정망 운영
- 미기후 모니터링
- 생활권대기질 정보제공
- 대기모델링, DB 시스템 구축
- 거버넌스 및 환류체계 구축·운영
- 외부기관·도·시·군·구·읍·면·동·자치단체(ecoeye) 구축전문기관(ecoeye)

제2부 2: 대전대학교

대기질 측정 분석 분야 (김선태 교수)

- 환경오염 취약지역 조사·분석
- 현대기오염방지시설 조사·분석
- 간이측정망 운영
- 대기오염배출시설 조사·분석

제3부 3: 한국품질재단

사회적 피해비용 평가 분야 (이진성 책임연구원)

- 충남 석탄화력발전 피해비용 산정
- 피해비용 부담현황 분석과 피해지원방안 마련
- 외부연구원 : 환경피해비용 산정 전문가(KEI, KETI, 연세대, 가천대)

제4부 4: 강원대학교

생태환경 모니터링 분야 (채화문 교수)

- 화력발전소 주변지역 장기 생태환경모니터링
- 생물다양성 변화 추이 분석
- 기후변화 취약종 관리방안 마련

구분	인원
충남연구원	- 총89명(연구직 76, 행정직 13) - 계약직 제외
대전대학교	- 해당사항 없음
한국품질재단	- 총180명(연구직 155, 행정직 25) - 비상임심사원 포함
강원대학교	- 해당사항 없음

II

세부분야별 연구계획

1세부 : 기후환경정보 시스템 구축

2세부 : 대기질 측정분석

3세부 : 사회적 피해비용 평가

4세부 : 생태환경 모니터링



2. 세부분야별 연구계획

1차년도 주요 연구결과

· 현황 파악	· 개선 연구	· 정책 지원	· 도민 홍보
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 고정측정망 데이터분석 ✓ 민간측정망자료 수집 및 분석(연구활용기능성 검토) ✓ 이동측정망운영 (오염지역 공간분포 확보) ✓ 화력발전소 인근 고정측정망 설치 및 운영 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 대기모델링 시스템 구축 ✓ 원소합량분석 ✓ 충남 화력발전 사회적비용분석 모형 개발 ✓ 국가측정망 vs 이동측정망 보정계수 개발 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 시·군별 지역자원시설세사용 현황 및 조사 전문 분석 ✓ 충남 대기환경기준, 배출허용기준 조례 제정 지원 ✓ 환경오염 피해구제 문헌조사 및 정책구축방안 제시 	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 주변지역 마을 생활권 대기질 정보 제공 ✓ 2016년도 환경기준 초과율 조사 및 고시

향후 연구 계획

	2 차년도	3 차년도	4 차년도	5 차년도
기후환경정보 시스템 구축	고정측정망 운영 기후환경 정보시스템 구축 지역 기후변화 분석	연구정보 DB 구축 대기·예측·평가시스템 개발 시설세 증세 지원	민간측정망 통합 운영 환경정보 통합 DB 구축 지역 대기질 정보 제공	환경정보 통합서비스 실시 법·제도 개선방안 제정 연구결과 중장기 활용방안 검토
대기질 측정분석	환경취약지역 조사·분석 환경취약지역 대기질 조사 육외 저탄소 배출량 조사	환경취약 중심 대기질 조사 미세먼지 발생원 성분분석 회처리장 배출량 조사	환경취약 중심 대기질 조사 모델링 & 실측결과 분석 TMS 배출량 자료분석	수용체 중심 대기측정 및 정보 수집 환경취약지역과 비교지역 대기질 조사 대기질 예보시스템 정합성 검토
사회적 피해비용 평가분석	석탄발전소 피해비용 산정 농도반응함수 사례 분석 피해비용 지원방안 제안			
생태환경 모니터링	문헌분석 (생물다양성) 조사지역 선정 및 모니터링 조사지점별 list 구축	발전소 주변 생물분포 현황 조사 발전소 주변 취락종 파악	부문별 기후취약성 선정 기후취약종 모니터링 발전소 주변 생물종 분석	발전소 주변 생물종 분석 및 영향분석 기후취약종 조사 및 모니터링 발전소 주변 생물다양성 지속관리방안 구축

Ⅲ 대기환경정보 시스템 구축 연구진행 현황

1. 지역 기후변화 분석
2. 고정측정망 구축·운영
3. 기후변화 정보시스템 구축
4. 생활권 대기질 정보 제공
5. 거버넌스 환류체계 구축
6. 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

#. 지역주민 요구 대응 : 자원순환센터 주변 대기영향 조사

3.1. 지역 기후변화 분석

- 개선 기후변화 시나리오 결과 반영과 미기후모니터링 1.2 지역 기후변화 분석 및 고정측정망 운영
- 2년간 2기 고정측정망 구축 및 민간측정망과의 연계추진

기후변화 시나리오 분석과 미기후모니터링

미기후모니터링 최소 40개소로 확대 추진

구분	구분	거리	위치(경도)	측정항목	비고
지역	내륙	2km	36.425, 126.495	BR-C-02	○
		5km		BR-C-05	
		10km		BR-C-10	
지역	내륙	2km	36.401, 126.517	BR-L-02	○
		5km	36.413, 126.548	BR-L-05	○
		10km		BR-L-10	
지역	내륙	2km	37.037, 126.540	DJ-C-02	○
		5km	37.027, 126.570	DJ-C-05	○
		10km		DJ-C-10	
지역	내륙	2km		DJ-L-02	
		5km	37.012, 126.531	DJ-L-05	○
		10km	36.981, 126.553	DJ-L-10	○
지역	내륙	2km		SC-C-02	
		5km		SC-C-05	
		10km		SC-C-10	
지역	내륙	2km		SC-L-02	
		5km		SC-L-05	
		10km		SC-L-10	
지역	내륙	2km	36.903, 126.206	TA-C-02	○
		5km		TA-C-05	
		10km		TA-C-10	
지역	내륙	2km		TA-L-02	
		5km	36.880, 126.23	TA-L-05	○
		10km	36.813, 126.254	TA-L-10	○

민간측정망과의 연계추진

발전3사 상생발전 협력사업과의 연계



3.2 고정측정망 구축·운영

● 화력발전소 주변 미기후 변화, 대기환경 관리·평가와 배출원감시를 위한 측정망 구축 필요

고정측정망 구축을 위한 고려사항

- 1차년도에서 고려된 기상조건, 지형 특성, 건강영향, 설치·운영 비용, 주민의견 등을 반영하여 우선 선정
- 연구진 회의를 거쳐 광역단위 지자체 대기오염측정망과 유사한 수준의 장비 보유를 위해 동일스펙 장비 구입

제조사(제조국)	모델명	국내공급업체	측정소수 국내분포현황	비고
HORIBA(일본) + METONE(미국)	AP-370 Series + BAM1020	(주)JS에어텍	115(31.59%)	• 수도권, 부산, 충청권, 경남, 경북, 호남권 등 전국 상위업체 • 08~16년 신규공급 상위 업체
THERMO(미국)	i series	(주)KNJ엔지니어링	78(21.43%)	• 경기, 인천, 전국 중위, 강원 상위 업체
TAPI(미국) + METONE(미국)	i series + BAM1020	(주)하림엔지니어링	66(18.13%)	• 대구·경북 상위업체
KIMOTO(일본)	7 series	(주)동일그린시스	58(15.93%)	• 서울, 인천지역 전국 상위 업체
ECOTECH(호주)	Serinus series	(주)APM엔지니어링	38(10.44%)	• 경기도 중위업체
원스텍(한국)	ANA Series	원스텍	0%	• 실적 없음

구분	제조사	모델명	측정방식
PM10 측정기	METONE (미국)	BAM1020-PM10	베타선측정법
PM2.5 측정기		BAM1020-PM25	베타선측정법
NO2 측정기	HORIBA(일본)	APNA-370	화학발광법

난지도리 고정측정망 운영

- 고정측정망 구축·운영
(4년간 3기 고정측정망 구축 및 민간측정망과의 연계 추진)
- 난지도리 고정측정망 운영 (2018.01.01~)



3.2 고정측정망 구축·운영

● 충남 전 지역 중 발전소 영향권 측정망 구축을 위한 신규 지점 검토

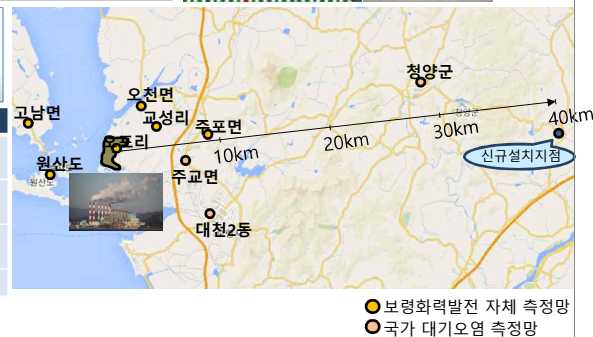
2차년도 고정측정망 구축·운영

정산면 고정 측정지점

- 충청남도 청양군 정산면 정현길 70-9, 정산농협
- 보령화력으로부터 동쪽으로 약 40km
- 보령화력 자체 측정망, 보령시와 청양군에 위치한 도시대기 측정망과 연계를 통한 발전소 배출오염물질 장기 이동관측 기대
- 보령화력 거리별 오염물질 농도변화 분석(고남-발전소-오포-주포-청양-정산)

- 1차년도에서 고려된 지자체 대기오염 측정망과 유사한 수준의 장비보유를 위해 동일 성능의 장비 구축
- PM10, PM2.5, NO2 등 대기오염물질을 포함한 풍향, 풍속, 온·습도 측정 가능

구분	제조사	모델명	측정방식
PM10	METONE (미국)	BAM1020-PM10	베타선측정법
PM2.5		BAM1020-PM25	베타선측정법
NOx	HORIBA(일본)	APNA-370	화학발광법
기상측정	RM young(미국)	RM young	-

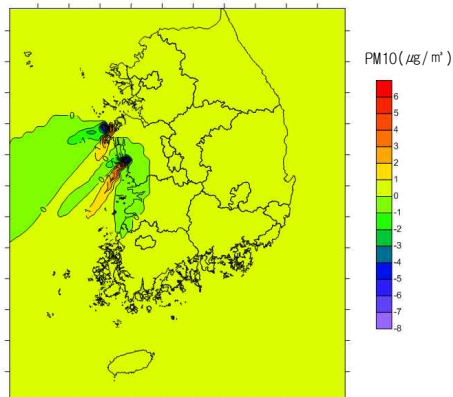


3.3. 기후변화 정보시스템 구축

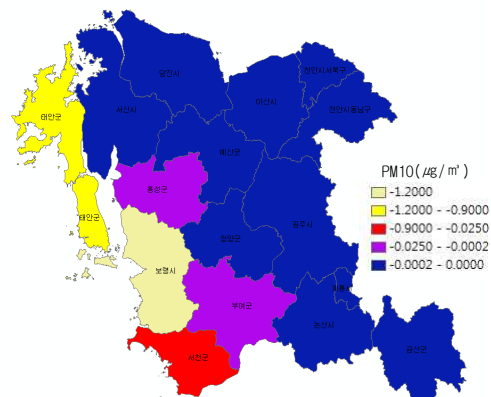
고농도 발생시 비상저감조치 분석 1

- ▶ 2018년 11월 6일 대비 7일 저감효과 분석
- ▶ 풍향특성에 따라 태안 보령지역에서 저감 효과가 크게 나타남

▶ 11월 6일 대비 7일 저감효과



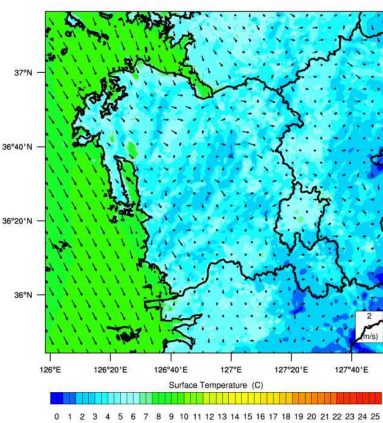
▶ 시군별 저감효과



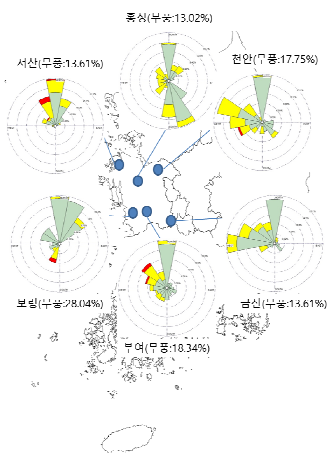
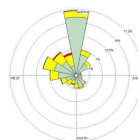
3.3. 기후변화 정보시스템 구축

고농도 발생시 비상저감조치 분석 2

- ▶ 2019년 3월 1일 ~ 7일 기상분석
- ▶ 미세먼지 농도에 큰 영향을 미치는 2m/s 이하의 풍속이 대부분을 차지

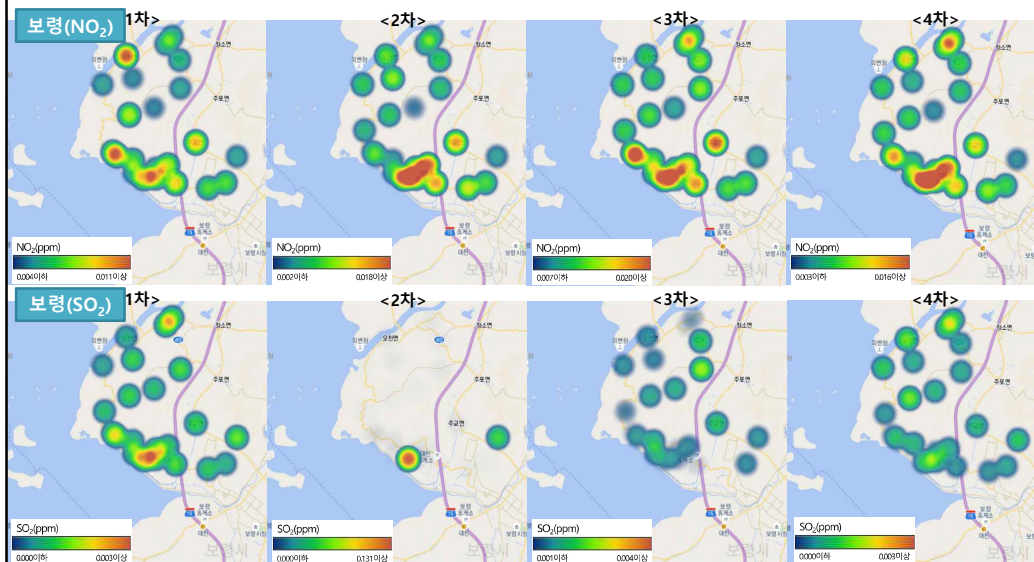


충남평균 (무풍:17.46%)



3.4 생활권 대기질 정보 제공

● 핫스팟 지점 선정을 위한 Passive sampler 1~4차 측정결과(측정값) 분포도 작성



3.4 생활권 대기질 정보 제공

- (중점관리) 고농도 발생 빈도가 높은 마을로 정의, 측정 4회 중 3회 이상 5순위 안에 드는 지점 선정
- (우선관리) 충남대기환경기준치를 초과하는 마을로 정의, 기준을 초과하는 지점 선정

구분	이산화질소	아황산가스	TSP	오존
보령시	중점: 주교면 주교1리, 주교면 은포2리, 주교면 주교3리	-	-	주교면 은포2리, 주교면 송학2리
	우선: -	주교면 은포3리(0.131), 주교면 신대1리(0.051)	-	주교면 은포3리(0.080), 주교면 은포2리(0.061)
당진시	중점: 고대면 슬항1리, 고대면 용두1리, 석문면 통정2리	석문면 삼봉3리, 석문면 삼봉2리	고대면 용두1리, 고대면 당진포1리	-
	우선: -	고대면 당진포1리(0.042)	고대면 진관1리(201.0), 고대면 용두1리(186.3), 고대면 성산2리(106.7), 고대면 당진포1리(106.2), 석문면 삼화1리(105.2), 고대면 용두2리(94.2), 고대면 슬항2리(93.4), 고대면 장항2리(86.8), 석문면 삼화3리(85.7)	석문면 삼봉3리(0.127, 0.063), 고대면 진관2리(0.139), 석문면 삼화3리(0.137), 석문면 삼화1리(0.116), 고대면 옥현리(0.083), 고대면 장항2리(0.072), 석문면 삼봉1리(0.069), 석문면 통정1리(0.064), 석문면 교포1리(0.064)
서천군	중점: -	-	-	비인면 구북리, 비인면 다사2리
	우선: -	서면 대부사마을(0.097)	서면 홍원마을(103.0)	비인면 구북리(0.085, 0.061), 비인면 선도1리(0.095), 서면 내도둔마을(0.064)
태안군	중점: 원북면 반계2리, 원북면 이곡1리, 원북면 반계3리	-	이원면 권3리	원북면 방갈1리
	우선: -	이원면 당산2리(0.038)	이원면 포지2리(191.3), 원북면 황촌2리(100.0), 원북면 방갈1리(86.0)	이원면 포지2리(0.069), 원북면 신두1리(0.069), 원북면 양산1리(0.064), 이원면 당산4리(0.062), 원북면 방갈1리(0.060)

“중점·우선관리 대상의 영향조사, 모니터링 등 종합분석을 통한 정책지원 집중 필요”

3.5 거버넌스 환류체계 구축

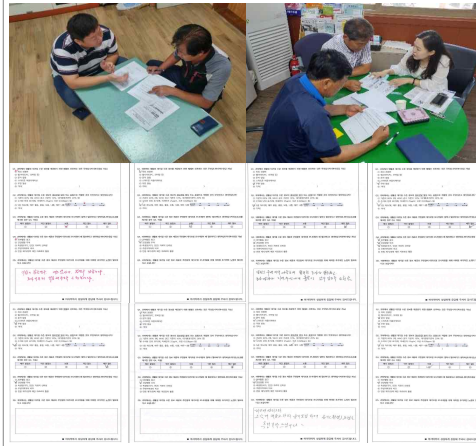
- 주민설명회 및 의견수렴을 통한 지역주민과의 연구결과·정보 공유, 대기질 측정 협조 요청
- 지역주민 불신 해소와 신뢰성 회복을 위한 대면설문조사 실시(응답률 72.3%)

지역주민과의 지속적인 소통

- 정보제공 마을별 주민설명회 및 대면설문조사
 - 보령시 주교면(19), 오천면(22) 대상 : 8/16~17
 - 당진시 고대면(18), 석문면(19) 대상 : 8/10, 8/20, 8/22
 - 서천군 비인면(22), 서면(24) 대상 : 8/6, 8/9
 - 태안군 원북면(24), 이원면(16) 대상 : 8/21, 8/27~28



대면설문조사 진행(2018.8.)

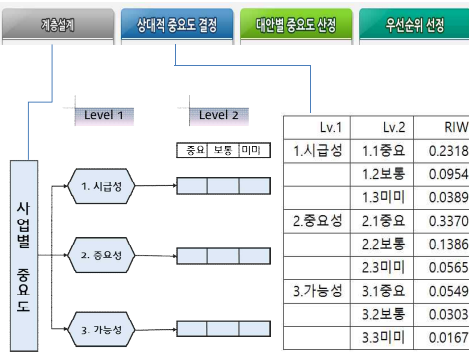


3.5 거버넌스 환류체계 구축

- 주민 개선의견을 반영한 지원사업 우선순위 도출을 위해 계층분석(AHP) 실시
- 주민참여 확대 정책개선사업에 대한 중요도 높음, 주체별 역할 정립과 세부 개선방안 마련 필요

계층분석(AHP)

- 계층분석과정으로 각 대안들의 상대적인 중요도 비교
- 각 사업별 중요도 분석에 적용



주민요구 사업별 우선순위 산정

화력발전소 주변지역 개선요구 대안	중요도	순위
1. 건강 연구조사 항목 개선	0.5991	2
2. 시각적 오염원 연구조사 항목 개선	0.4626	4
3. 측정분야 조사방법 개선	0.2642	7
4. 측정방식 조사방법 개선	0.4872	3
5. 정보공유체계 시스템 개선	0.2323	9
6. 정보공유 표현방식 개선	0.4307	6
7. 저감정책 강화 정책개선	0.2642	7
8. 주민지원 확대 정책개선	0.4626	4
9. 주민참여 확대 정책개선	0.6237	1

3.5 거버넌스 환류체계 구축

- 주민들의 개선요구에 따른 주체별 역할 분류 실시
- 연구조사항목 개선(관, 연, 산), 조사방법 및 정보공유체계 개선(연), 정책 개선(관, 산, 민)

Level 1.	Level 2.	세부내용
연구조사 항목 개선	건강	발전소(산)
	시각적 오염원	정책결정자(관)
조사방법 개선	측정분야	연구기관(연)
	측정방식	
정보공유체계 개선	시스템(체계)	
	표현방식	
정책 개선	저감정책 강화	정책결정자(관)
	주민지원 확대	발전소(산)
	주민참여 확대	도민(민)

3.5 거버넌스 환류체계 구축

- 수혜자-구조 모델, 권력-참여 모델 시뮬레이션 결과 분석을 통해 적합한 모델 선정
- 결과적으로 **권력-참여 모델**이 적합한 것으로 판단



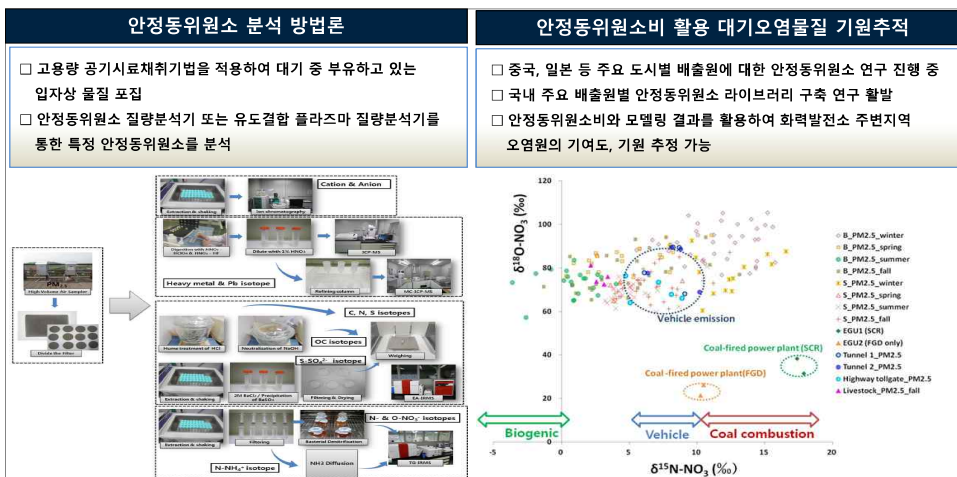
3.5 거버넌스 환류체계 구축

- 화력발전소 주변지역 관련 지원사업에 따른 주체별 역할 분류 실시
- 거버넌스유형에 적합한 실효성 있는 지원정책 마련, 지역 거버넌스의 효율적인 운영방안 수립 필요

사업목록	지원주체	사업목록	지원주체
1. 건강영향조사	지자체, 발전소	14. 노인 자원봉사클럽 운영	지자체
2. 건강검진	지자체	15. 냉·난방비 보조금 지원 관련 교육	지자체
3. 환경영향조사	지자체, 발전소	16. 웰다잉, 노인 안전 교육	지자체
4. 환경영향평가	지자체, 발전소	17. 주민교육 및 홍보	지자체
5. 정보공유체계 개선	지자체, 연구기관	18. 환경미화(꽃심기 등)	지자체
6. 발전소 저감시설 도입 및 개선	지자체, 발전소	19. 자원봉사 운영	지자체
7. 환경오염물질 및 영향 관련 교육	지자체, 연구기관	20. 지역주민 복지 및 편의시설 증진, 개선	지자체, 발전소
8. 주민 참여형 감시	지자체, 연구기관	21. 지속가능한 상생발전	연구기관
9. 모니터링(환경오염감시, 저감 등)	지자체, 연구기관	22. 지역민 이주	발전소
10. 환경 관련 인체유행물질, 업체 감시 및 고발	지자체	23. 피해보상	발전소
11. 노인 일자리 및 사회활동 지원·교육	지자체	24. 보조금 지원	지자체
12. 노인 지도자 전문교육	지자체	25. 혐오 및 환경오염 유발업체 입주 반대	지자체
13. 경로당 프로그램 활동 지원	지자체	26. 자연정화	지자체

3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 대기 중 미세먼지의 탄소(C), 납(Pb) 등 안정동위원소비 분석 실시
- 국내외 라이브러리와의 비교·분석을 통한 화력발전소 주변지역 오염물질 기원추적



3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 당진시 현장조사 4회(연차별) 실시 : 1차(4/9~12), 2차(7/11~13), 3차(10/17~19), 4차(1/16~18)
- 안정동위원소 탄소(C), 납(Pb) 측정결과는 모델 보정값, 기원 추정을 위한 기초자료로 활용

대기질 샘플링(고·저용량 공기시료채취기법 적용)



탄소, 납 동위원소 분석결과(한국기초과학지원연구원 분석)

□ 탄소 동위원소비($\delta^{13}C_{VPDB}$) 분석결과					(단위: ‰)		
구분	Mean	SD	Mean±SD	Median			
시청사	봄	-25.8	0.1	-25.8±0.1	-25.8		
	여름	-26.4	0.1	-26.4±0.1	-26.4		
	가을	-26.0	0.1	-26.0±0.1	-26.1		
	겨울	-24.9	0.8	-24.9±0.8	-24.9		
석문면	봄	-25.2	0.1	-25.2±0.1	-25.2		
	여름	-27.7	0.2	-27.7±0.2	-27.7		
	가을	-26.3	0.1	-26.3±0.1	-26.3		
	겨울	-25.1	0.0	-25.1±0.0	-25.1		
□ 납 동위원소비 분석결과					(단위: ‰)		
구분	$\frac{^{206}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{207}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{207}Pb}{^{206}Pb}$	$\frac{^{208}Pb}{^{204}Pb}$	$\frac{^{208}Pb}{^{206}Pb}$	$\frac{^{206}Pb}{^{207}Pb}$	
시청사	봄	18.111	15.606	0.862	38.024	2.099	1.161
	여름	18.266	15.614	0.855	38.148	2.088	1.170
	가을	18.341	15.628	0.852	38.140	2.080	1.174
	겨울	18.294	15.625	0.854	38.258	2.091	1.171
석문면	봄	18.214	15.610	0.857	38.092	2.091	1.167
	여름	18.318	15.599	0.852	38.252	2.089	1.174
	가을	18.205	15.608	0.857	37.947	2.084	1.166
	겨울	18.093	15.597	0.862	38.084	2.105	1.160

3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 당진시 대기오염물질 기원 파악을 위한 탄소 동위원소비 라이브러리 DB 구축
- “미세먼지, 초미세먼지 기원 추적에 적합”(측정값과 매칭 → 국가/지역적 오염, 발생원 추정)

국가	지역	구분	계절	$\delta^{13}C$	출처
뉴질랜드	Mount Victoria tunnel	자동차 배기가스		-25.9±0.8	S. Dai. (2015)
멕시코	멕시코시티	도로분진	봄~가을	-21±0.2	S. Dai. (2015)
멕시코	central Camionera del Norte	디젤차량 연소	봄	-24.6±0.3	S. Dai. (2015)
멕시코	tunnel of Avenida Chapultepec	가솔린차량 연소	봄	-25.5±0.1	S. Dai. (2015)
브라질	tunnel of Rio de Janeiro	자동차 배기가스	봄	-25.4	S. Dai. (2015)
브라질	tunnel of Rio de Janeiro	자동차 배기가스	봄	-24.8	S. Dai. (2015)
캐나다	Cassier tunnel	자동차 배기가스		-27.1	S. Dai. (2015)
캐나다	Cassier tunnel	자동차 배기가스		-26.9	S. Dai. (2015)
프랑스	파리	석탄연소	봄~가을	-23.9±0.5	S. Dai. (2015)
프랑스	파리	연료유(중유)연소	봄~가을	-26.0±0.5	S. Dai. (2015)
중국	베이징		여름	-26.9	J. Cao et al (2011)
중국	홍콩	자동차	겨울	-26.62	NIER (2016), NIER (2015a), NIER (2013)
중국	베이징		여름	-26.62	J. Cao et al (2011)
중국	베이징	석탄+자동차	겨울	-25.14	NIER (2016), NIER (2015a), NIER (2013)
중국	장춘		겨울	-23.27	J. Cao et al (2011)
중국	장춘	석탄연소	겨울	-23.13	NIER (2016), NIER (2015a), NIER (2013)
중국	장춘		겨울	-23.08	J. Cao et al (2011)
중국	Zhujiang tunnel	자동차 배기가스	여름	-25.0±0.3	S. Dai. (2015)

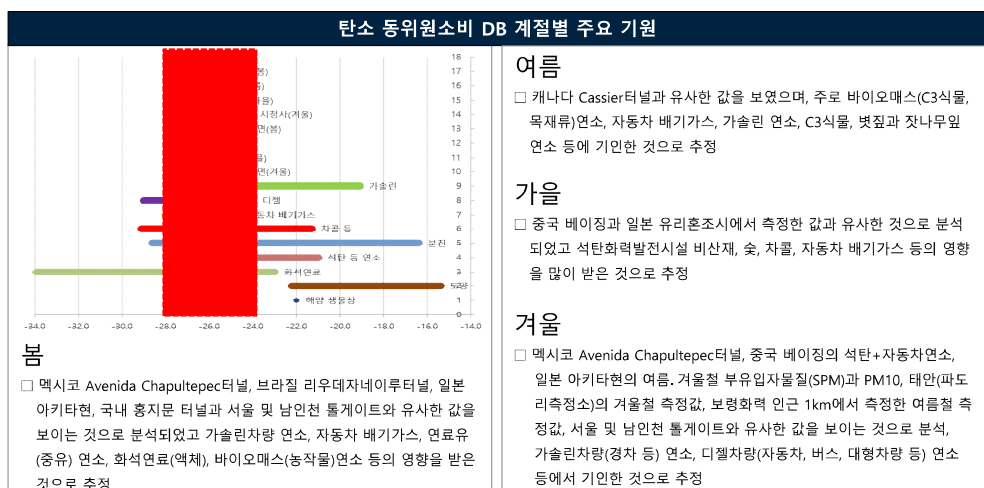
3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 당진시 대기오염물질 기원 파악을 위한 납 동위원소비 라이브러리 DB 구축
- “석탄, 비철금속 제련에 의한 오염원 추적에 적합”(측정값과 매칭 → 국가/지역적 오염, 발생원 추정)

국가	구분	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$	출처
러시아	러시아산 유연탄	1.181	NIER (2014b)
미국	미국산 유연탄	1.18	NIER (2014b)
미국	석탄화력발전시설 유연탄	1.18	NIER (2013a)
인도네시아	석탄화력발전시설 유연탄	1.19	NIER (2013a)
인도네시아	인도네시아산 유연탄	1.19	NIER (2014b)
일본	강우	1.158	NIER (2014a), NIER (2013a)
중남미	납 광상	1.175~1.206	NIER (2013b)
호주	납 광상	1.03~1.10	NIER (2013b)
호주	석탄화력발전시설 유연탄	1.19	NIER (2013a)
호주	호주산 유연탄	1.19	NIER (2014b)

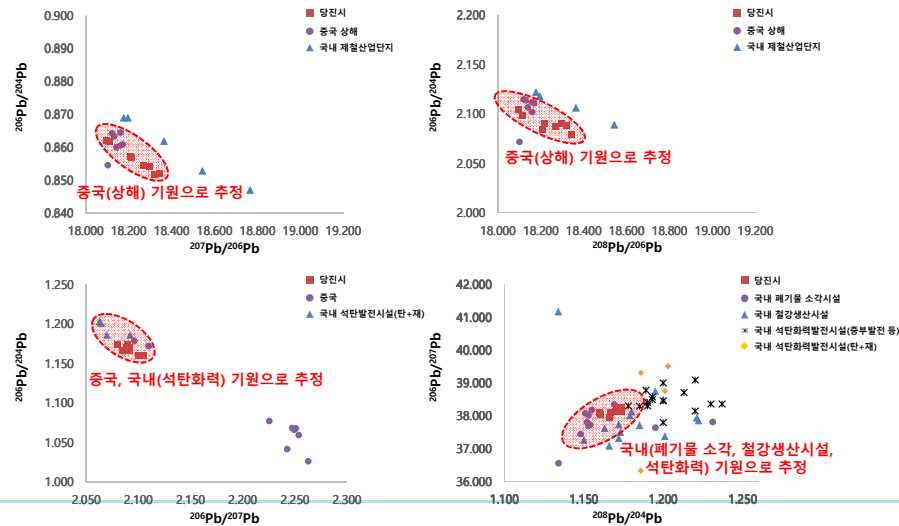
3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- 탄소, 납 동위원소비 분석결과와 라이브러리 DB와의 매칭을 통해 당진시 대기에 영향을 미친 것으로 추정되는 계절별 오염기원과 지역(유사정도를 근거로 추정) 추적



3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

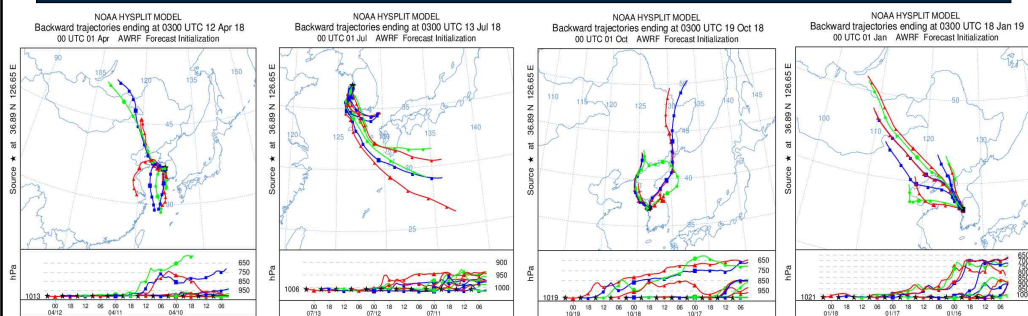
- 납 동위원소비($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : ^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : ^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} : ^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$, $^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb} : ^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$) 분포특성 비교



3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- HYSPLIT(Hybrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 모델 시뮬레이션
● 중국 기원 북서풍 유입 시 d^{13}C 와 $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ 증가, 해양 기원 남풍 계열 유입 시 낮은 값 측정

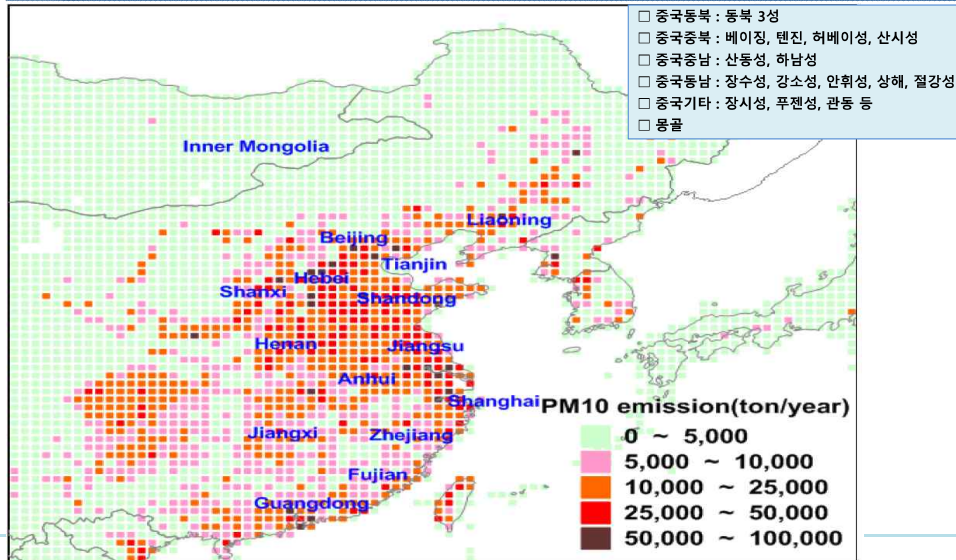
HYSPLIT(NOAA, US) model을 이용한 동위원소 측정기간별 72시간 역궤적 분석



구분	$\text{d}^{13}\text{C}_{\text{VPDB}}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{207}\text{Pb}$
04.09~12	-25.5	18.163	15.608	0.860	38.058	2.095	1.164
07.11~13	-27.2	18.292	15.607	0.854	38.200	2.089	1.172
10.17~19	-26.2	18.273	15.618	0.855	38.044	2.082	1.170
01.16~18	-25.0	18.193	15.611	0.858	38.171	2.098	1.165

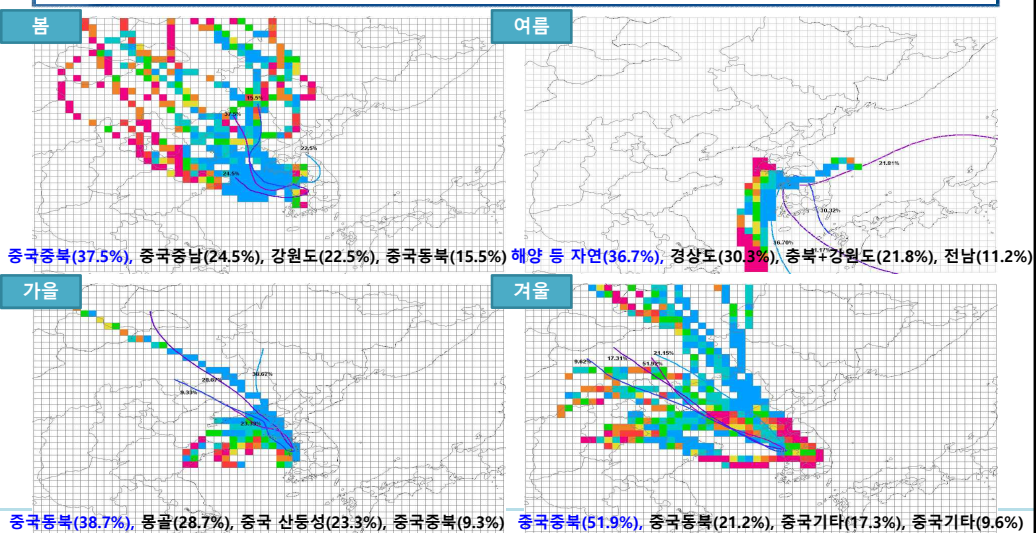
3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

기류 이동경로와 오염원 분포 관계 파악을 위해 인위적 배출량에 국외 배출량 INTEX-B자료 적용



3.6 지역 대기오염물질 기원 및 기여도 추정

- ◉ 궤적 클러스터링(4개 군집) 후 PSCF(Potential Source Contribution Function)모델 시뮬레이션
- ◉ 봄(중국 중북), 여름(해양 등 자연, 국내), 가을(중국동북, 몽골), 겨울(중국 중북) 영향 높음



지역주민 요구대응 : 자원순환센터 주변 대기영향조사

- 서천군 비인면 이장단 대상 주민설명회 및 의견수렴 중 자원순환센터 주변 악취 관련 조사요청
- 조사대상지 서천군 비인면 관3리와 서천군 자원순환센터 대기영향조사 실시

자원순환센터 주변 대기영향조사 요청(서천군 관3리)

Q1. 귀하께서는 생활과 대기질 수준 향상을 위한 대책을 강구하는 것은 무엇입니까(지속가능성 기준)?

① 육류 소비
② 플라스틱(PC, PET 등)
③ 물 사용
④ 스티로폼 사용
⑤ 기타()

Q2. 귀하께서는 생활과 대기질 수준 향상을 위한 대책을 강구하는 것은 무엇입니까(지속가능성 기준)?

① 가정의 에너지 소비, 에너지 절약, 에너지 절약(에너지 절약)
② 수돗물 사용, 에너지 절약, 에너지 절약(에너지 절약)
③ 5년 계획(에너지 절약, 에너지 절약, 에너지 절약, 에너지 절약, 에너지 절약)
④ 기타()

Q3. 귀하께서는 생활과 대기질 수준 향상을 위한 대책을 강구하는 것은 무엇입니까(지속가능성 기준)?

① 육류 소비
② 플라스틱(PC, PET 등)
③ 물 사용
④ 스티로폼 사용
⑤ 기타()

Q4. 귀하께서는 생활과 대기질 수준 향상을 위한 대책을 강구하는 것은 무엇입니까(지속가능성 기준)?

① 가정의 에너지 소비, 에너지 절약, 에너지 절약(에너지 절약)
② 수돗물 사용, 에너지 절약, 에너지 절약(에너지 절약)
③ 5년 계획(에너지 절약, 에너지 절약, 에너지 절약, 에너지 절약, 에너지 절약)
④ 기타()

Q5. 귀하께서는 생활과 대기질 수준 향상을 위한 대책을 강구하는 것은 무엇입니까(지속가능성 기준)?

① 육류 소비
② 플라스틱(PC, PET 등)
③ 물 사용
④ 스티로폼 사용
⑤ 기타()

■ 마지막으로 상설하게 응답해 주셔서 감사드립니다.

서천군 자원순환센터 현황



- 처리용량 : 40톤/일
- 재활용 : 15톤/일(플라스틱, 유리병, 철캔, 알루미늄캔, 스티로폼, 포장비닐)
- 소각 : 10톤/일
- 매립 : 15톤/일
- 기타(침출수처리) : 200 m³/일(물리화학적+생물학적+고도처리)
- 건축시설 : 496 m² (지상 3층)
- 소각용량 : 625 kg/시간 (16시간 운영시 10톤)
- 소각형식 : 이동화상식소각로 (환경친화적 2호)
- 소각시설 상시 모니터링 현황
- 염화수소(HCl), 질소산화물(NOx), 이산화황(SO₂), 일산화탄소(CO), 먼지(DUST), 산소(O₂), 배출량(Sm³), 토출온도(°C)

지역주민 요구대응 : 자원순환센터 주변 대기영향조사

- 서천군 자원순환센터, 서천군 비인면 관3리 현장조사 : 2019.02.20.~22.
- 중금속(한국기초과학지원연구원), VOCs(한국산업기술시험원) 항목 분석

중금속 측정결과

- 측정장비 : 로우볼륨샘플러(PMS104, 16.7 LPM)를 활용한 필터 시료채취
- 분석방법 : 원자흡수분광광도법(대기오염공정시험기준, ES01400.1a)
- 분석항목 : 구리(Cu), 납(Pb), 아연(Zn), 망간(Mn), 비소(As), 니켈(Ni), 크롬(Cr), 카드뮴(Cd)

□ 분석결과

(단위: mg/m³)

시료명	Cu	Pb	Zn	Mn	As	Ni	Cr	Cd
관3리	0.18	0.17	0.49	0.16	0.03	0.02	0.03	0.01
	0.54	0.44	1.36	0.40	0.07	0.04	0.08	0.01
소각장	0.87	0.50	1.41	0.56	0.09	0.06	0.09	0.02
	0.37	0.47	1.49	0.43	0.07	0.04	0.07	0.01

□ 대기오염물질의 배출허용기준(제15조 관련)

- 비소화합물 : 0.25ppm 이하 / 카드뮴화합물 : 0.1mg/Sm³ 이하
- 납화합물 : 0.5mg/Sm³ 이하 / 크롬화합물 : 0.3mg/Sm³ 이하
- 구리화합물 : 5mg/Sm³ 이하 / 니켈 및 그 화합물 : 2mg/Sm³ 이하
- 아연화합물 : 5mg/Sm³ 이하 / 망간 : 허용 기준 없음

- 중금속 미량 검출, 모두 기준치 충족

VOCs 측정결과

- 측정장비 : 흡착관(Tenax tube)에 포집(135ml/min, 30분 -> 4L)
- 분석방법 : 기체크로마토그래피(대기오염공정시험기준, ES01511.1a)
- 분석항목 : 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스타이렌
- 분석결과

(단위: ppm)

시료명	벤젠	톨루엔	에틸벤젠	자일렌	스타이렌
관3리	0.001	0.026	0.000	0.001	0.000
	0.002	0.069	0.001	0.002	0.000
소각장	0.001	0.031	0.000	0.001	0.000
	0.001	0.028	0.001	0.001	0.000

□ 대기오염물질의 배출허용기준(제15조 관련)

- 벤젠 : 10ppm이하 / 이외 항목 : 허용 기준 없음
- VOCs 미량 검출, 문헌비교 시 우려할 수준 아님
- 소각시설 원료별 배출 상이 : 지속적 관리와 도내 전수조사 필요



3

한국철도기술연구원의 대중교통
(초)미세먼지 저감 연구

김민정 (한국철도기술연구원 교통환경연구실)





< 도시철도 (초)미세먼지 저감 연구 >



연구개발의 개요



1. 연구개발의 필요성
2. 연구개발의 현황

1.1. 연구개발의 필요성

연구개발의 필요성

- **지하철 공기질 현황 및 문제점**

- (초)미세먼지

- 발생원: (승강장, 대합실) 승객 이동 / (터널) 차륜-레일 마찰, 브레이크 패드 마모 등
- 출퇴근 시간대 일부 객실은 「대중교통 공기질 가이드라인」을 초과

- 지하철 미세먼지 현황에 대한 정확한 파악은 어려운 실정

- 지하역사: 1회/년 측정 (근거: 실내공기질 관리법)
- 전동차: 1회/2년 측정 (근거: 대중교통수단 실내공기질 가이드라인)
- 터널: 측정, 관리 기준 없음

[illegible]

- 제3차 지하철 공기질 개선대책 [환경부, 2018.03]

- 목표: 지하철 미세먼지 13.5% 저감 (69.4 → 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)
- 시행내용
 - 지하역사 PM₁₀ 기준 강화, PM_{2.5} 기준 신설
 - 주요 역사 미세먼지 자동측정기 설치 의무화
 - 서울지하철 차량 공기질 개선장치 설치 등

구분	주요 추진과제
지형역사 (승강권, 태생성)	· 지형역사 공간기술 관리체계 강화 · 외부 이해관계자 유망 지원 · 향가마을 온종일 오픈형 제로 · 스마트 공간기술 관리 시스템 도입 · 지형역사 특별관리지역 지정 관리
터널	· 터널 내부 방화벽 설치 · 터널 내부 물청소 강화 · 터널 입출로 통행 안전 확보 · 터널내 화물 차량정지 구간
지형역 사 용	· 지형 공간기술 관리체계 강화 · 지형 공간기술 개성화 사업 지원 · 지형 공간정보관리 지형 이해관계자 수립 및 지원 · 교육 및 홍보사업

〈 제3단계 지하철 공기질 개선 대책의 추진 내용 〉

1.2. 연구개발의 현황

한국철도기술연구원의 연구개발 현황

[illegible]

II

나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거

1. 연구개발 목표
2. 연구개발 내용 및 성과
3. 시범노선 현장 운행 및 평가

2.1. 연구과제의 목표

나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

국민이 체감할 수 있는 공기질 확보를 위한 지하구간 실시간 오염물질 제거기술 개발

1세부 (KRII)

도시철도 터널 공기질 Map
작성 및 공기질 관리기술 개발

모니터링 시스템
구축

2세부 (KIST)

전동차 부착형 미세먼지
저감기술 개발

미세먼지 객실유입
차단기술

3세부 (서울교통공사)

터널 초미세먼지 집진차량 개발

초미세먼지 집진기술

총괄

시범터널 초미세먼지, 미세먼지 **30% 이상 저감** 달성 [1+2+3 세부과제]

Hot Spot 종합관리 기술

2.2. 연구개발 내용 및 성과 나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

도시철도 터널 공기질 측정 및 오염도 지도 작성

» 전국 도시철도 터널 공기질 측정 및 오염도 지도 작성



〈터널 공기질 측정〉



Hot spot: 오염도가 지속적으로 높은 구간

» 도시철도 터널 공기질 상세 측정 및 성분 분석



〈공기질 상세 측정〉



〈성분 분석〉

〈오염원 기여도〉

KRI 한국철도기술연구원

2.2. 연구개발 내용 및 성과 나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

도시철도 공기질 모니터링 시스템 구축

» LPWAN망을 이용한 도시철도 모니터링 시스템 망 구축



개노피 설치, 대관실 설치, 승강장 A 설치, 승강장 B 설치, 터널(PSD) 설치

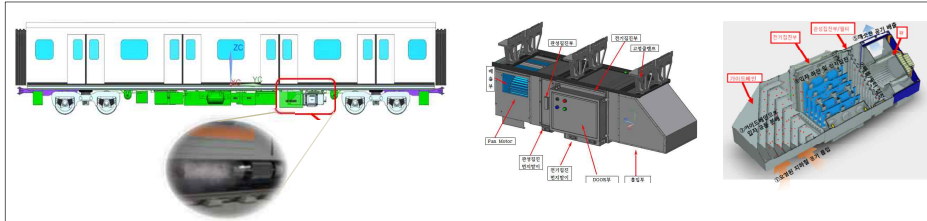
LPWAN, 웹 서버, Internet, LAN, LTE, 도시철도 공기질 모니터링 시스템

2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하공간 오염물질 제거기술 개발

전동차 부착형 미세먼지 집진장치 개발

» 운행 중인 도시철도 차량에 부착 가능한 터널 내 미세먼지 제거기술



전동차 부착형 미세먼지 제거장치

- 미세먼지 제거율(단품) : 50% 이상 / 초미세먼지 제거율 : 30% 이상
- 미세먼지 수거량 : $2 \times 10^9 \mu\text{g}/\text{월}$ 이상 / 세정주기 : 1개월 (약 25일)
- 주요 구성품 : (1안) 하이브리드형 : 유동 가이드베인 + 관성집진 + 전기집진
(2안) 전기식 : 유동 가이드베인 + 전기집진 + 전도성필터

재생형 집진 카트리지 세정장치

- 미세먼지 세정효율 : 90% 이상 / 세정시간 : 20초 이내 / 건조시간 : 30초 이내
- Batch당 집진 카트리지 수 : 4 set
- 세정대상 : (1안) 전기집진판, (2안) 전도성필터

2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하공간 오염물질 제거기술 개발

전동차 부착형 미세먼지 집진장치 현장평가

- 현장시험 실시
 - 서울교통공사 5호선 (2017.11)
 - 광주도시철도 1호선 (2018.02 / 2018.07)
 - 서울교통공사 5호선 (진행 중)
- 현장평가 목적
 - 집진장치의 전기 및 기계적 안정성 검증
 - 미세먼지 집진효율 테스트
- 집진장치 공인시험평가
 - 집진성능, 진동 내구성, 전파 시험 등



<동력 집진장치>



<무동력 집진장치>

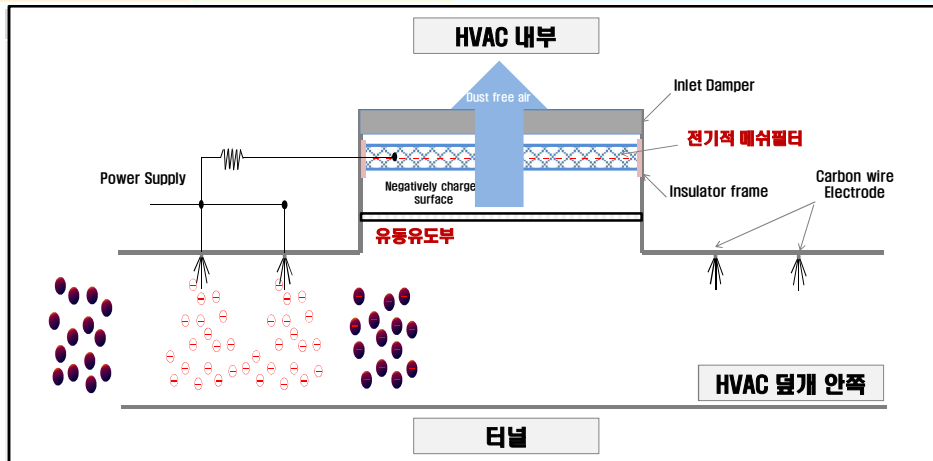


<5호선에 설치된 집진장치>

2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하공간 오염물질 제거기술 개발

터널부유 미세먼지 객실 유입 차단장치 개발



- 낮은 미세먼지 제거 효율의 메쉬필터 사용 (HVAC 시스템 보호 목적)
- 작업자가 차량 상부에서 수작업으로 교체
- 터널 내 오염물질 객실 유입통로

- 입자 하전 장치와 전기적 메쉬필터 적용
- 미세먼지 하전 특성을 활용한 유입부 차단기술
- 필터 먼지축적 감소에 따른 유지보수 편의성 증대

2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하공간 오염물질 제거기술 개발

터널부유 미세먼지 객실 유입 차단장치 현장평가

■ 현장시험 실시

- 서울교통공사 5호선 [2017.11]
- 광주도시철도 1호선 [2018.02 / 2018.07]
- 서울교통공사 5호선 [진행 중]

■ 현장평가 목적

- 객실 유입 차단효율 테스트 [설치부, 미 설치부 간 미세먼지 개수농도 차이 비교]
- 인터페이스 부품의 HVAC 내부 설치 안정성 검토



<미세먼지 차단장치>



<상부인터페이스 제작 및 설치>



<5호선 HVAC에 설치한 차단장치>

2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

터널 (초)미세먼지 제거차량 개발

» 3량 1편성(총 길이 약 30m, 배터리 구동 집진 차량)



1호차 (운전, 제어, 공기압축기 등)	2호차 (미세먼지 집진장치)	3호차 (운전, 제어, 대형집진팬)
제어차(구동모터, 제어장치), 배터리, 충전기, 공기압축설비	흡진부, 집진부(프리필터, 증배기, 전기집진장치), 덕트부(팬 및 부유먼지 흡입덕트, 제어반)	제어차(구동모터, 제어장치), 배터리, 대형집진팬

주요 제원

- 집진차량 3량1편성 구성 : 최고속도 60Km/h, **작업속도 5km/h**, 길이 약30m(폭2.6m, 높이3.5m 이하), 총중량 약 65ton
- 최대운행시간 : **3시간 집진작업**을 포함하여 4.5시간(충전시간 최소 8시간), 탑승인원 최대 10명
- 1,3호차 (운전, 차량제어) : 양방향 운전, 구동 모터, 배터리 전원장치(병렬구성 이중화), 대형집진팬 등 탑재
- 2호차(미세먼지 집진장치 탑재) : 흡입 공기량 최대 2000CMM, **집진효율 PM2.5 입자 95%이상**

KRI 한국철도기술연구원

2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

터널 (초)미세먼지 제거차량 개발

» 2호차: 초미세먼지 처리 차량





2.2. 연구개발 내용 및 성과

나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

터널 (초)미세먼지 제거차량 개발

» (초)미세먼지 제거차량 성능 공인시험




시험 결과 (Test Results)

1. 미세먼지(PM₁₀) 제거효율 및 입막손실

1.1. 1차 측정

항목	측정별 PM ₁₀ 측정값 (㎍/㎥, 5분 평균)					미세먼지 제거차량 효율(%)
측정위치	①통전부	②사이클론 후단	③정기정압기 1월 후단	④정기정압기 2월 후단	⑤정기정압기 3월 후단	(①-⑤)/①×100
미세먼지 (PM ₁₀)	13,614	6,769	579	2	0	99.99%
입막손실	52 mmH ₂ O					

1.2. 2차 측정

항목	측정별 PM ₁₀ 측정값 (㎍/㎥, 5분 평균)					미세먼지 제거차량 효율(%)
측정위치	①통전부	②사이클론 후단	③정기정압기 1월 후단	④정기정압기 2월 후단	⑤정기정압기 3월 후단	(①-⑤)/①×100
미세먼지 (PM ₁₀)	6,585	3,276	254	3	0	99.99%
입막손실	52 mmH ₂ O					

KTL 2018-05-02

차량의 성능 사전 검증
량기지 / 공인인증시험 진행
전기집진 성능 측정(2회)
론장치, 전기집진(3개소)
압력손실, 오존 농도
: 15m/s

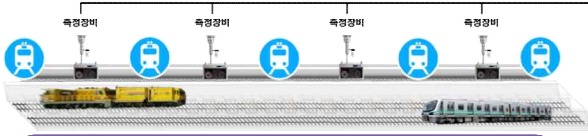
지측정기 설치 후 입자
투입 후 30분간 측정

2.3. 시범노선 현장 운행 및 평가

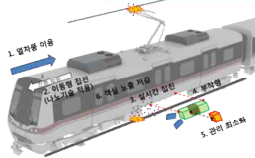
나노기술을 적용한 실시간 지하구간 오염물질 제거기술 개발

목표: 시범노선 (초)미세먼지 30% 저감

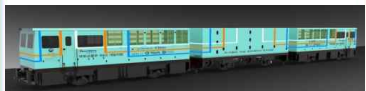
1. 시범구간 (수유-성신여대입구)



시범구간은 5개 역이 연결된 7.5 km의 터널구간을 선정




• 미세먼지 저감장치 처리공기량 2.5 m³/s (150 CMM), 집진효율 50%, 집진시간 750 s (12.5 min)
→ 집진 미세먼지량 1.875×10⁵ μg [~3%]
• 10량 적용 시 미세먼지 30% 제거

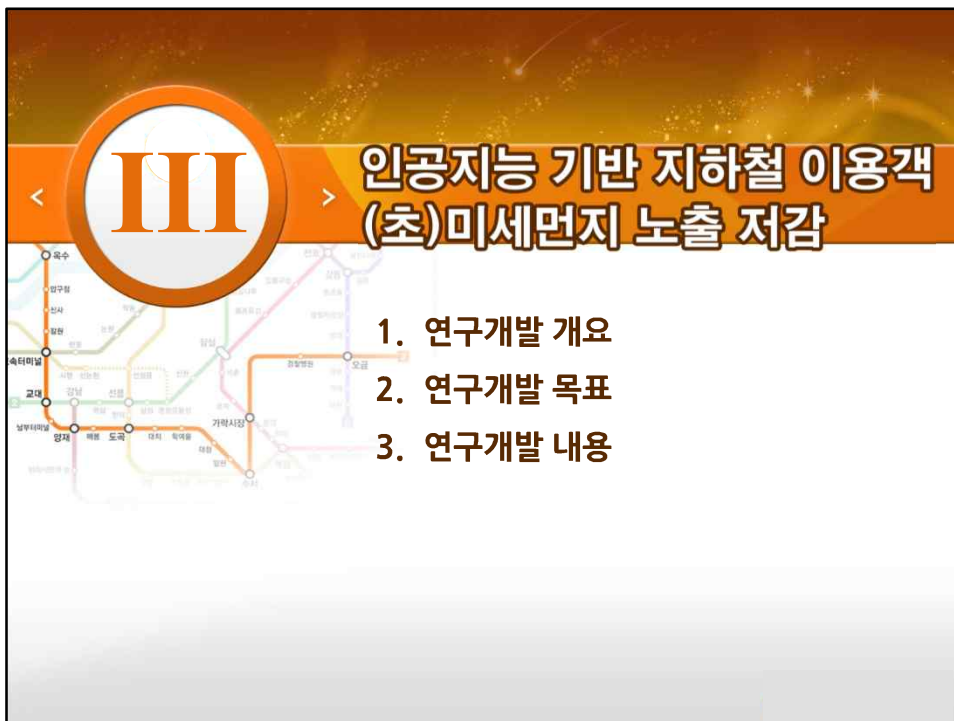


• 구간 운영방식 구체화

실시간 모니터링 시스템

- 미세먼지 농도 200 μg/m³, 터널 단면적 4.2 m², 터널 길이 7.5 km
→ 부유 미세먼지량 6.3×10⁶ μg





III

인공지능 기반 지하철 이용객 (초)미세먼지 노출 저감

1. 연구개발 개요
2. 연구개발 목표
3. 연구개발 내용

3.1. 연구개발 개요

연구과제 개요 - 연구단

과제명

인공지능 기반 지하철 이용객의 (초)미세먼지 노출 저감기술 개발

연구목표: 지하철 이용 승객의 (초)미세먼지 노출 50% 저감 기술 개발

총 연구기간

2019.04 – 2023.12 (총 4년 9개월)

주관연구기관

한국철도기술연구원 [연구단장: 박덕신 수석연구원]

협동연구기관

한국기계연구원, 고려대학교, EHS기술연구소

공동연구기관

경희대학교 외 8개 기관

위탁연구기관

한국철도공사 외 3개 기관

3.2. 연구개발 목표

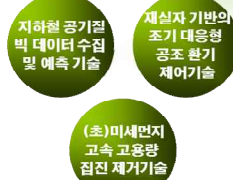
연구개발의 목표

- 인공지능 기반의 지하철 (초)미세먼지 저감기술 개발을 통한 지하철 이용 승객의 (초)미세먼지 노출 50% 저감

지하철 이용 승객의 (초)미세먼지 노출 50% 저감

- 승객 이동 경로·의 (초)미세먼지 농도 저감
(* 승객 이동 경로: 대합실, 승강장, 객차, 환승 통로 등 승객이 머무는 지하철 공간)
- 호흡을 통한 승객의 (초)미세먼지 노출 저감

인공지능 기반 (초)미세먼지 예측 및 고속 저감기술 개발



(초)미세먼지 저감시설의 효율 향상 핵심기술 개발



지하철 (초)미세먼지 전구체 저감기술 개발



KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

연구단 과제의 최종 목표

1세부

인공지능 기반 초기 대응형 (초)미세먼지 저감 기술

- 고속 대응량 (초)미세먼지 제거 기술
- 전통차 HVAC 부착형 기술 (미세먼지 객실 유입 차단 50% 이상)
- 고속 대응량 상시 집진시스템 ((초)미세먼지 제거율 90% 이상)

2세부

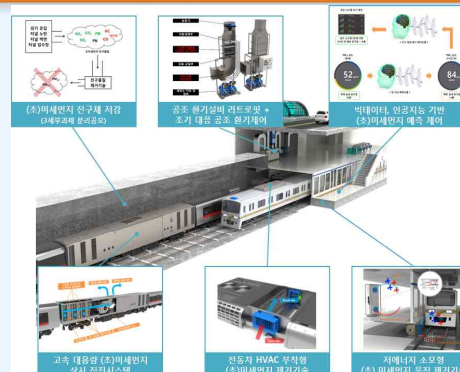
저에너지 소모형 초미세먼지 제거 기술
(초미세먼지 응집 저감 60% 이상)공조 환기시스템 리트로핏 기술
((초)미세먼지 제거율 90% 이상)

3세부

지하철 터널 내 미세먼지 전구체·현황 파악 및 원인 규명
(전구체: 라돈, 질소산화물, VOCs 등)(초)미세먼지 전구체 저감 기술
(전구체 저감 30% 이상)

총괄

시험노선 내 지하철 이용객의
(초)미세먼지 노출 저감 50% 달성
[1 + 2 + 3 세부과제]

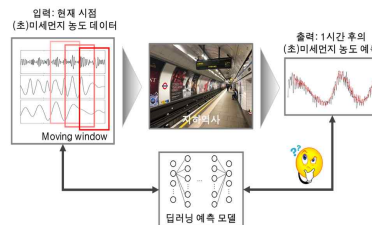


3.3. 연구개발 내용

연구개발 핵심 기술

1. 지하철 공기질 빅 데이터 수집 및 인공지능 예측기술

- 지하철 공기질 빅 데이터 구축
 - 인공지능 기반 (초)미세먼지 예측 모델 학습을 위한 실시간 데이터베이스(RTDB) 구축
 - RTDB = 공기질 실시간 측정 데이터 + 공공데이터 (기상청, 교통정보 데이터 등)
- 공기질 측정 센서 이상진단 기술
 - 다변량 통계 분석방법 기반의 센서 이상진단 및 이상치 복원 모델 개발
 - 센서 이상진단 및 복원 정확도 90% 이상
- 인공지능 기반 지하철 (초)미세먼지 예측모델 개발
 - 데이터 분해 및 moving window 기법을 결합한 딥 러닝 기반 (초)미세먼지 예측 모델 개발
 - 예측 신뢰도 90% 이상



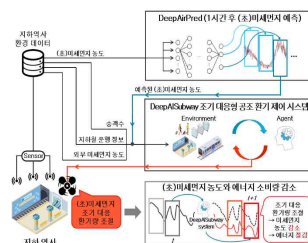
KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

3.3. 연구개발 내용

연구개발 핵심 기술

2. 재실자 기반의 조기 대응형 공조 환기 제어기술

- 지하철 재실인구 추정모델 개발
 - 교통 공공데이터를 활용한 지하철 대합실 및 승강장 재실자 수 예측 모델 개발
- 인공지능 기반의 조기 대응형 공조 환기제어 알고리즘 개발
 - 심층 강화학습 기반 최적 자율운전 및 조기 대응 공조 환기제어 모델 개발
 - 환기제어 미적용 대비 (초)미세먼지 제거효율 30% 증대
- 조기 대응형 공조 환기시스템의 현장 구축 및 운영
 - 인공지능 제어 알고리즘 동작이 가능한 제어부(하드웨어 플랫폼) 개발
 - 수도권 및 대전지하철 등에 설치하여 장기간 운영을 통해 제어 정확도 및 안정성 검증



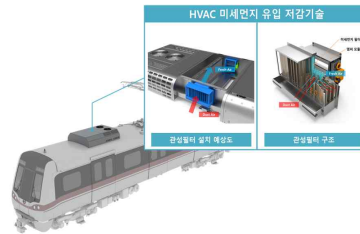
KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

3.3. 연구개발 내용

연구개발 핵심 기술

3. 전동차 HVAC 부착형 (초)미세먼지 집진기술

- HVAC 부착형 (초)미세먼지 집진장치
 - 관성에 의해 미세먼지를 분리, 집진하는 유로를 전동차 HVAC 측면에 설치
 - 역할 1. 지하철 터널에 부유하는 미세먼지를 집진 (dust box)
 - 역할 2. 객실 내로 유입되는 미세먼지를 저감
 - 미세먼지 객실 유입 차단효율 50% 이상
- 도시철도 현장 적용을 통한 기술 안정성 및 성능 평가
 - 시제품 실용화를 위한 철도안전법 및 철도차량기술기준 검토
 - 집진장치를 부착한 전동차의 오송 철도종합시험선로 주행 운전을 통한 안전성 검증
 - 수도권 및 대전지하철 등 현장운용을 통한 성능 검증



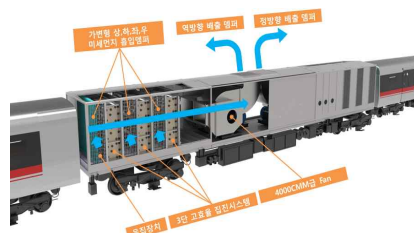
KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

3.3. 연구개발 내용

연구개발 핵심 기술

4. 고속 대용량 (초)미세먼지 집진시스템

- 고속 대용량 (초)미세먼지 집진기술
 - 전기 집진기술을 이용하여 열차풍에 의해 비산된 (초)미세먼지를 단시간에 집진
 - 전동차 동력카에 연결하여 지하철 터널을 고속으로 이동하며 (초)미세먼지를 제거 (70 km/h)
 - (초)미세먼지 집진효율 90% 이상
- 도시철도 현장 적용을 통한 기술 안정성 및 성능 평가
 - 시제품 실용화를 위한 철도안전법 및 철도차량기술기준 검토
 - 집진장치를 부착한 전동차의 오송 철도종합시험선로 주행 운전을 통한 안전성 검증
 - 수도권 및 대전지하철 등 현장운용을 통한 성능 검증



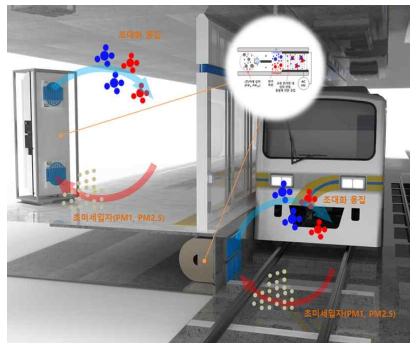
KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

3.3. 연구개발 내용

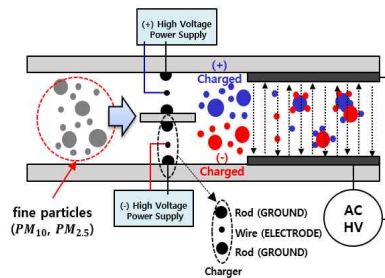
연구개발 핵심 기술

5. 저에너지 소모형 초미세먼지 제거기술 개발

- 초미세먼지 응집, 조대화 기술 개발
 - 초미세먼지 응집 농도 저감 비율 : 60 % 이상
 - 차량 또는 공조환기장치 장착형 저에너지 소모형 초미세먼지 제거장치 설계 및 제작
 - 철도시설의 기존 집진장치(공조환기설비, 전기집진설비 등)와의 연계 운전체계 구축



< 초미세먼지 응집조대화 기술 개념도 및 적용안 예시 >



< 정전 방식의 초미세먼지 응집조대화 개념도 >

KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

2.3. 2세부과제

연구개발 핵심 기술

6. 공조 환기시스템 리트로핏 기술 개발

- 초미세먼지 제거장비의 모듈화 기술 개발
 - 하전, 집진, 응집, 건습식 세정 장치 등 모듈 상호 결합 및 환기 공조 설비 인터페이스 기술 개발
 - 공조 환기설비 구조, 형태별 최적 모듈 조합 도출 및 시스템 개발
- 초미세먼지 제거효율 : 90% 이상 (처리 유량 6,000 CMH급)
- 초미세먼지 제거량: 80 g/일
- 초미세먼지 저감 시스템 압력손실 : 40 mmAq 이하
- 초기 성능 대비 세정효율 : 90% 이상
- 세정 주기 : 20 시간 이상
- 오존 발생량 : 0.03 ppm 이하 (24시간 연속 운전 기준)
- 리트로핏 모듈 제작 및 현장 적용 · 구축 기술공지능 기반의 초기 대응형 공조 환기제어 알고리즘 개발




< 공조 환기시스템 리트로핏 기술 개념도 >

KRI 한국철도기술연구원 컨소시엄

< 버스정류장 (초)미세먼지 저감 연구 >

I

연구개발 개요



1. 연구개발의 필요성
2. 연구과제의 개요
3. 연구과제의 목표

1.1. 연구개발의 필요성


연구 배경 및 필요성

- 미세먼지 도로 발생원: 자동차 및 버스의 배기가스, 연료 연소
 - 자동차 통행량이 높은 지역의 미세먼지 농도가 매우 높은 것으로 보고됨
 - 매연에 노출되는 버스 정류장 미세먼지 농도는 흡연실과 비슷한 수준으로 보고됨
 - ⇒ **버스 정류장의 미세먼지 오염도는 심각한 수준임**

표. 부천시 버스정류장의 미세먼지 농도 (한국철도기술연구원 측정, 2018.04.19)

[$\mu\text{g}/\text{m}^3$]	A 버스정류장		B 버스정류장	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
정류장 내 농도	138	74	154	77
도시 대기 농도	113	62	114	65

- 승객은 버스를 대기하는 동안 **미세먼지에 무방비로 노출됨**
- 이에 대중교통 이용 시민의 건강 보호를 위해 **버스 정류장 미세먼지 저감 시스템의 개발이 필요함**



1.2. 연구과제의 개요

연구과제의 개요

과제명

버스 정류장 공간분리형 미세먼지 저감 시스템 개발

연구목표: 리빙 랩(Living Lab) 기반의 시민 체감형
버스 정류장 미세먼지 저감시스템 개발

연구기간

2018.06 - 2020.12 (총 31개월)

주관연구기관

한국철도기술연구원

협동연구기관

㈜디에이피, 케이엘이에스㈜

위탁연구기관

한양대학교, 가천대학교

KRI 한국철도기술연구원

1.3. 연구과제의 목표

연구과제의 목표 및 구성

최종 목표

대중교통 이용 시민의 건강 보호를 위한
공간 분리형 버스 정류장 미세먼지 저감 시스템 개발

총괄 목표: 버스 정류장 내 미세먼지 50% 이상 저감



총괄

버스 정류장
미세먼지 저감
실용화 기술개발

- 버스 정류장 형태별 미세먼지 오염 현황 및 문제점 분석
- 버스 정류장 승객 유동해석
- 버스 정류장 형태별 최적 미세먼지 저감 시스템 구성
- 버스 정류장 Living Lab 설치, 운영 및 평가 (부천시, 구리시)

협동1

버스 정류장용
스마트 집진모듈
개발

- 미세먼지 스마트 집진모듈 개발
- Living Lab 적용 스마트 집진모듈 최적화
- 미세먼지 스마트 집진 시스템 현장 설치 및 효과 검증

협동2

버스 정류장
안전펜스 개발

- 도로 비산먼지 차단 및 안전펜스 기능의 공간 분리기술 개발
- 버스 정류장 자체 전력수급을 위한 태양광 시스템 적용
- 버스 정류장 안전펜스의 현장 설치 및 효과 검증

KRI 한국철도기술연구원

< II > 연구개발 내용

1. Living Lab 운용 및 시민 평가
2. 세부 연구개발 내용

2.1. Living Lab 운용 및 시민 평가

Living Lab 및 시민 평가단 구성·운용

Living Lab 이란?

- Living Lab = 일상 생활의 실험실
- 부천시, 구리시 버스정류장 = 미세먼지를 저감하기 위한 실험실
- 시민이 직접 참여하여 평가하고 의견을 제시하여 연구개발에 반영함으로써 연구자와 수요자가 공동으로 버스정류장 내 미세먼지를 저감하는 혁신적 방법

■ 시민 평가단 구성 및 Living Lab 평가 방법

- 버스정류장 이용 빈도, 연령 등을 고려하여 인근 지역 시민 1,000명으로 구성 (지자체 환경과 지원)

Living Lab 대상 선정
(4-5개 후보 중 시민 투표로 선정)

시민 참여 app

SNS 홍보
(Living Lab 소식을 SNS에 게재)

Living Lab 평가
(공기질, 쾌적도 개선 효과, 개선사항 등)

버스정류장 모니터링 시스템 서버

LTE 망을 통한 실시간 전송

< 시민 평가단의 Living Lab 평가 방법 >

KRI 한국철도기술연구원

2.2. 세부 연구개발 내용

공간 분리형 미세먼지 저감 시스템 개발



KRI 한국철도기술연구원

다중이용 교통시설의 (초)미세먼지 저감 연구

연구개발의 기대효과



KRI 한국철도기술연구원



4

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

이용일 (한국철도기술연구원 교통환경연구팀)



1. 휘발성 유기화합물

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

휘발성 유기화합물(VOCs)**• 휘발성 유기화합물(Volatile Organic Compounds: VOCs)**

- 비점(끓는 점)이 낮아서 대기 중으로 쉽게 증발되는 액체 또는 기체상 유기화합물을 총칭으로서 VOC라고도 하는데, 산업체에서 많이 사용하는 용매에서 화학 및 제약공장이나 플라스틱 건조공정에서 배출되는 유기가스에 이르기까지 매우 다양하며 끓는점이 낮은 액체연료, 파라핀, 올레핀, 방향족화합물 등 생활주변에서 흔히 사용하는 탄화수소류가 거의 해당됨.

- VOC는 대기 중에서 질소산화물(NOx)과 함께 광화학반응으로 오존 등 광화학산화제를 생성하여 광화학스모그를 유발하기도 하고, 벤젠과 같은 물질은 발암성물질로서 인체에 매우 유해하며, 스티렌을 포함하여 대부분의 VOC는 악취를 일으키는 물질로 분류할 수 있음.

3

KRI 한국철도기술연구원

1. 휘발성 유기화합물

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

휘발성 유기화합물(VOCs)의 주요 배출원

- | | |
|--------------------|------------------------|
| •화학공장 | •인쇄소 |
| •석유정제소 | •캔 코팅공장 |
| •제약, 페인트 공장 | •Wire enameling plants |
| •자동차,비행기,식품,섬유제조공장 | •Wood stove |

- ❖ 대부분의 제조공정에서 발생
- ❖ 유기물질이 화학물질, 용제, 코팅, 분해산물, 염료 등의 형태로 존재
- ❖ 저농도의 유기물질 함유 배가스가 대기 중으로 방출

4

KRI 한국철도기술연구원

1. 휘발성 유기화합물 VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

배출원별 VOC 종류

- OFFSET 인쇄 : Aldehyde, Keton 류 등
- GRAVURE 인쇄 : Toluene, 초산에칠, MEK 등
- 자동차도장 : Cation 전착도장, Aldehyde, Cellosolve 등
- 제관(외면도장, 내면도장) : Xylene, Cellosolve, MIBK 등
- 석유화학공업 : Propane, Propylene, Styrene, MMA, AN 등
- ENAMEL 전선 : Cresol, Phenol 등
- COATER : Toluene, 초산에칠, MEK 등
- 기타 유류저장 및 출하시설

5

1. 휘발성 유기화합물 VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

휘발성 유기화합물(VOCs)의 주요 배출원

- 인체에 유독
 - 대부분의 방향족 탄화수소류 : 발암성
 - 벤젠 : 백혈병, 중추신경 장애, 염색체 이상
 - 유기용매류 : 인체에 대한 독성이 높음
- 오존층 파괴 (염화탄소류)
- 지구온난화
- 광화학 스모그
 - 휘발성 유기화합물의 연쇄반응에 의하여 광화학 산화물 [aldehyde, ozone, PAN (peroxylacetyl nitrate)]을 생성
 - 눈의 자극, 가시거리 저하, 동식물 및 농작물 피해
 - Ozone : SO₂ 산화, 황산 Mist의 생성, 산성비 유발
- 악취

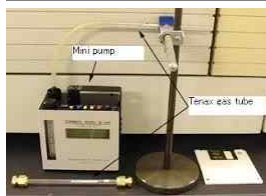
6

2. 휘발성 유기화합물의 분석

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

휘발성 유기화합물의 포집

- 대기오염공정시험기준(2018.12.07, ES 01804.1 & 2)
 - 환경대기 중 유해휘발성 유기화합물(VOCs) 시험방법: 캐니스터법
 - 환경대기 중 유해휘발성 유기화합물(VOCs) 시험방법: 고체흡착법
- 그 외 시료채취방법: 간접흡입방식

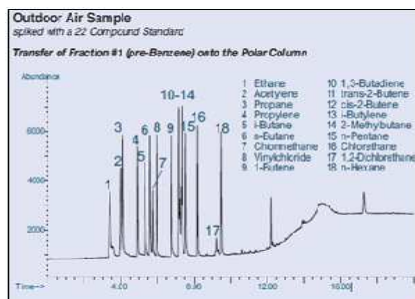
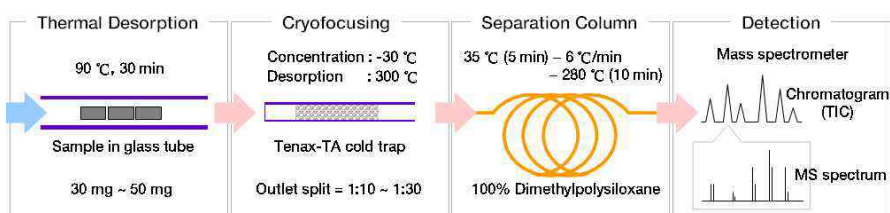


KRI 한국철도기술연구원

2. 휘발성 유기화합물의 분석

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

열탈착 시스템 및 가스크로마토그래피/질량분석기



8

KRI 한국철도기술연구원

3. VOC 연속측정장비

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

VOC 연속측정장비

Detection Capability

Individual VOCs	Detection Range	0 ~ 50 or 100 ppb
	Limit of Detection (LoD)	≤ 0.2 ppb for Toluene in 30 min
	List of VOCs (target) *	Benzene; Toluene; Carbon Tetrachloride; Chloroform; 1,2-dichlorobenzene; 1,4-dichlorobenzene; Dichloromethane; Ethylbenzene; Styrene; m,p-xylene; o-xylene; Tetrachloroethylene; Trichloroethylene etc. * Additional VOC may be included based on customization needs. Detection limit depends on VOC of interest. (e.g., toluene < 0.2 ppb)
Temp.	Detection Range	-10°C ~ 90°C (sensor only)
	Resolution	0.1°C
Humidity	Detection Range	0 ~ 100%(sensor only)
	Resolution	1%
CO	Detection Range	0 ~ 100ppm
	Resolution	0.5ppm
CO ₂	Detection Range	0 ~ 3,000ppm
	Resolution	1ppm



9

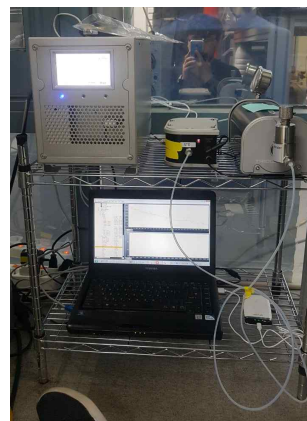
3. VOC 연속측정장비

VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

측정사례

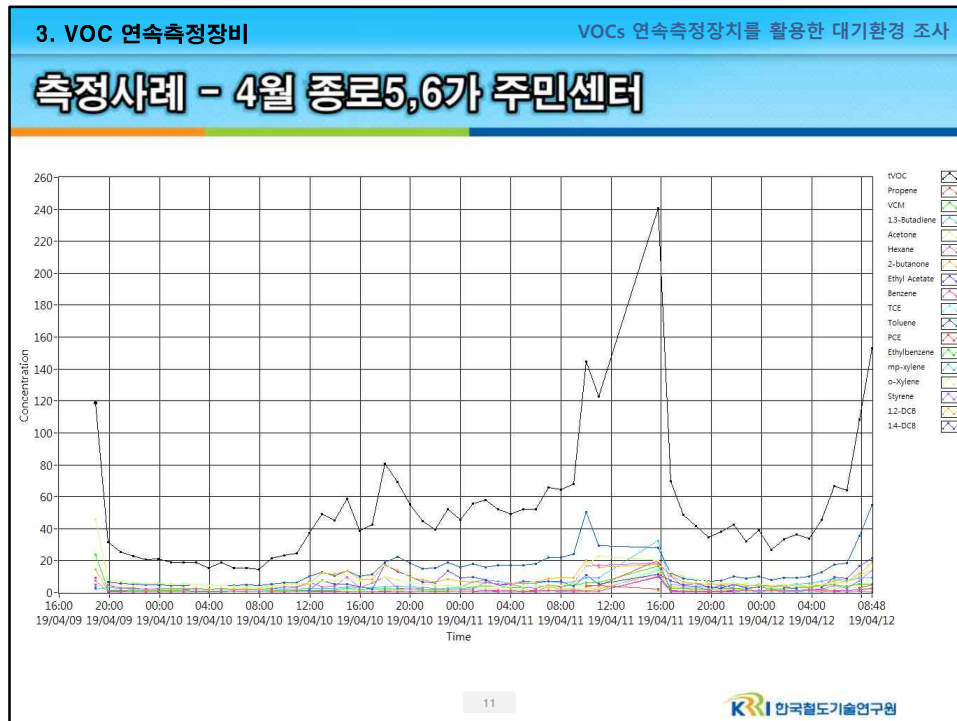


KIST 측정사진



종로 5.6가 주민센터 측정사진



10



4. 휘발성 유기화합물 측정계획 VOCs 연속측정장치를 활용한 대기환경 조사

측정계획

- **측정지점**
 - 대죽1리 마을회관
- **측정기간**
 - 미정, 약 2주간 측정
- **측정장비**
 - MiTAP(VOCs 연속측정장비)
 - Dust Monitor 1.108(Grimm, PM10 & PM2.5)
 - FMPS(TSI, 나노입자측정기, 미정)
- **현재 대죽1리 마을회관 바로 앞 도로 아스팔트 포장 공사로 인한 측정시점 조율 필요**

12

KRI 한국철도기술연구원



.....

5

AIRCRAFT MEASUREMENT

– High resolution Mass Spectrometer –

김정호 ((주)에이피엠엔지니어링 기술연구소)

AIRCRAFT MEASUREMENT

- High Resolution Mass Spectrometer

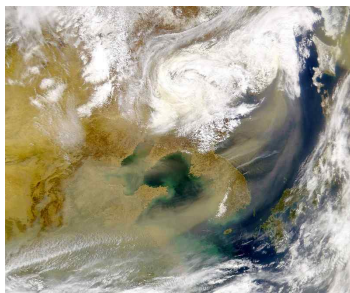
APM Engineering Co., LTD
Research Center
KIM JEONGHO



CONTENTS

- 1. Particulate Matter in KOREA**
- 2. Particulate Matter in Korea**
- 3. Aircraft Measurement in Korea**

1. Particulate Matter in Korea



1. <http://datadriven.yale.edu/air-quality-2/air-pollutions-hazy-future-in-south-korea-2/>
 2. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Asia_dust_2000-04-07.jpg

Beijing promises Seoul on air pollutants



People visiting the National Museum are silhouetted against N Seoul Tower shrouded in dust in Seoul, March 28. / AP-Yonhap

By Nam Hyun-woo

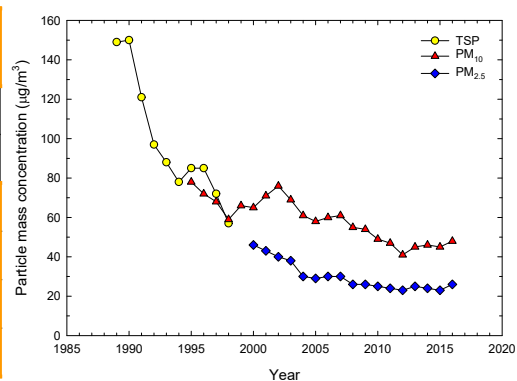
Seoul and Beijing Thursday agreed to closely cooperate on fighting pollution.

The Korea Times, 2014-04-03

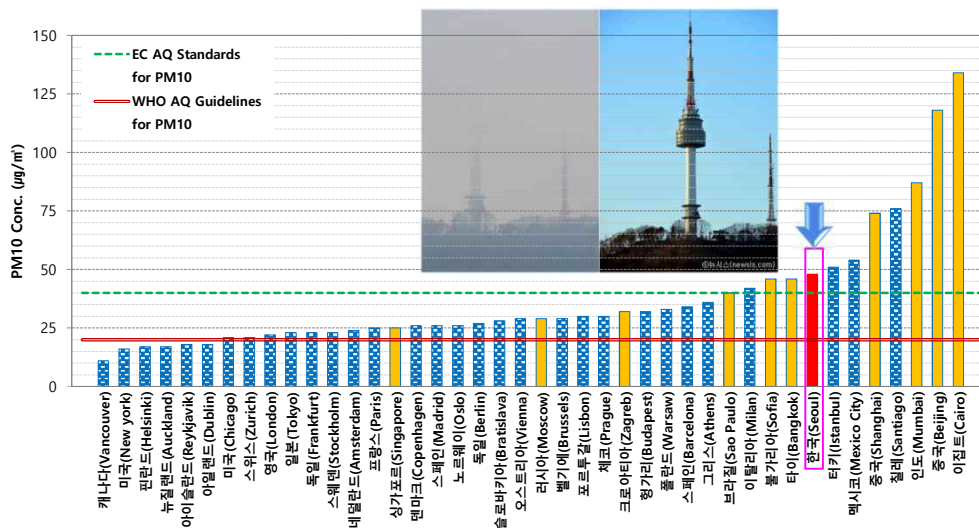
http://www.koreatimes.co.kr/www/news/nation/2014/04/116_154675.html

1.1 History of Particulate Matter Standards in Korea

Regulatory Item	Average ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	'83	'95	'01	'07	2015
TSP	Annual	150	150	-	-	-
	24hr(day)	300	300	-	-	-
PM10	Annual	-	80	70	50	50
	24hr(day)	-	150	150	100	100
PM2.5	Annual	-	-	-	-	25
	24hr	-	-	-	-	50

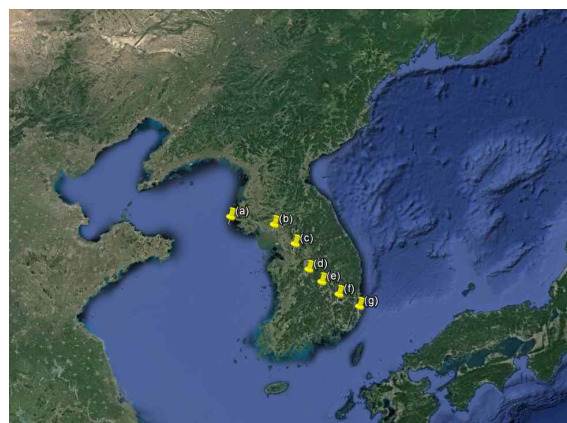
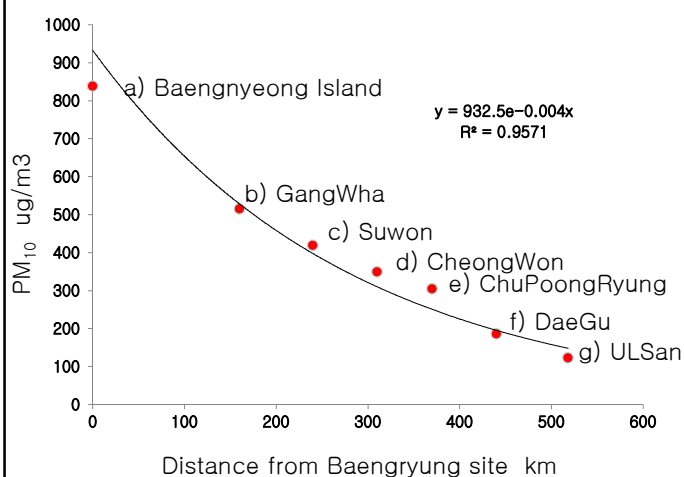


1.2 PM₁₀ Distributions in the Major Cities around the World



※ Source : The World Bank 「World Development Indicators」 2014 WHO, World Health Organization (http://www.who.int/topics/air_pollution/en/)
 - WHO Air quality guidelines for particulate matter
 European Commission's Air Quality Standards (<http://ec.europa.eu/environment/air/quality/standards.htm>)
 Lee KB(2015) Estimation of Unknown Components and Assessment of Source for PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul area, PHD Thesis.

1.3 Temporal Changes in PM₁₀ along passing Asian Dust



*. Lee KW (2012) Feasibility for background concentration monitoring at Baengryong Station, NIER 2012.12 meeting report

1.4 High PM_{2.5}&PM₁₀ Events in 2012, 2013

PM 2.5 High Concentration Events

>50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

'12	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	sum
6h	1	1	3	2	3	-	1	-	-	-	1	5	17
12h	2	-	-	-	1	-	-	-	-	2	1	-	6
18h	2	-	2	-	1	-	-	-	2	-	-	-	7
sum	5	1	5	2	5	0	1	0	2	2	2	5	30

PM 10 High Concentration Events

>100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$

'13	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	sum
6h	4	5	-	7	1	-	1	3	-	-	2	-	23
12h	4	2	1	-	2	1	-	1	-	-	1	-	12
18h	3	1	1	1	2	-	1	-	-	-	1	-	10
sum	11	8	2	8	5	1	2	4	0	0	4	0	45

'12	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	sum
6h	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0
12h	1	-	-	-	1	-	-	-	-	1	1	-	4
18h	1	-	-	-	1	-	-	-	1	-	-	-	3
sum	2	0	0	0	2	0	0	0	1	1	1	0	7

'13	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	sum
6h	2	1	2	2	1	-	-	-	-	-	1	3	12
12h	2	1	1	-	1	-	-	-	-	-	2	2	9
18h	3	1	2	-	1	-	1	-	-	-	2	10	31
sum	7	3	5	2	3	0	1	0	0	0	3	7	31

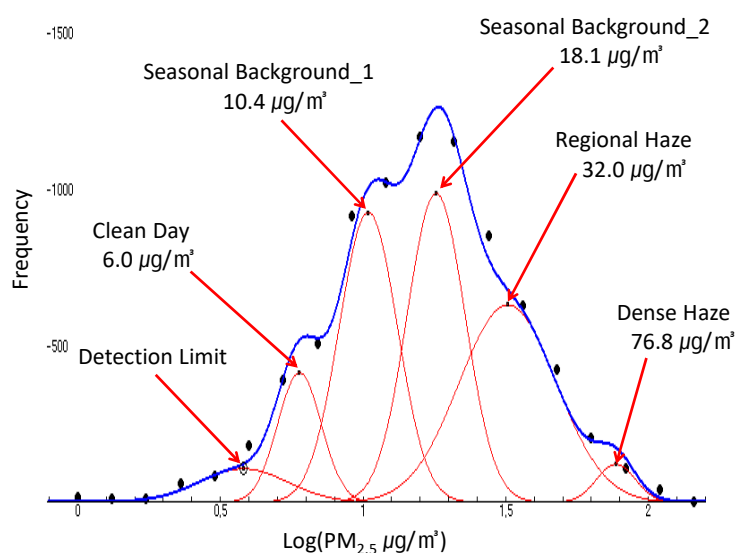
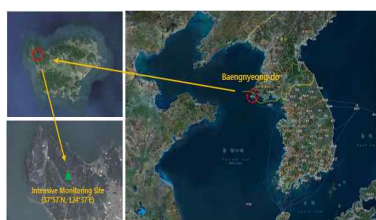


Image credit: Jeff Schmaltz MODIS Land Rapid Response Team, NASA GSFC

Uploader comment: A river of haze blew across eastern China, Japan and the Korean peninsula in early March, 2013. The Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) aboard NASA's Aqua satellite captured this true-color image on March 8 as it flew over the region.

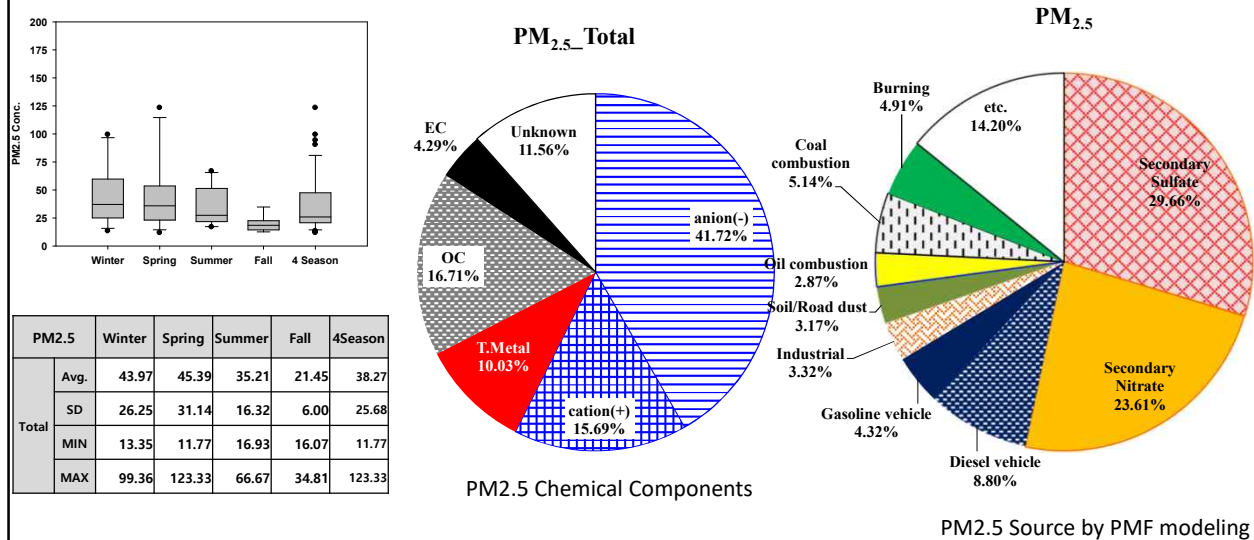
Thick haze blew across the Yellow Sea and Korean Peninsula toward Japan – NASA GSFC

1.5 PM_{2.5} Concentration-Frequency Distribution (Baengnyeong Island)



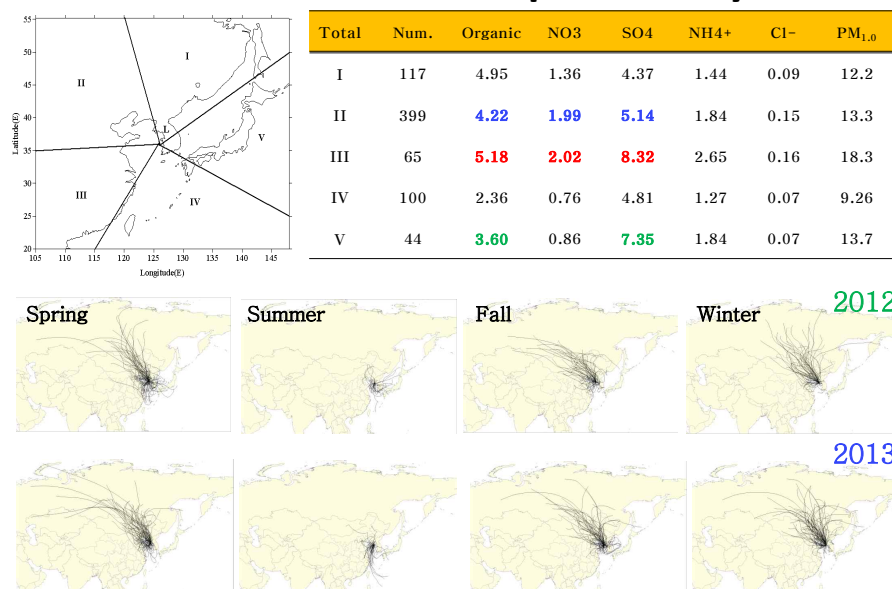
* Source :Ahn JY (2017) Estimation of Background level for PM_{2.5} using the HR-ToF-AMS, 2017 KOSAE workshop presentation

1.6 PM_{2.5} Chemical Components and Source in SEOUL, 2014



* Source :Lee KB (2015) Estimation of Unknown Components and Assessment of Source for PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul area, PhD Thesis.

1.7 PM_{1.0} and Chemical Components by Air Parcel

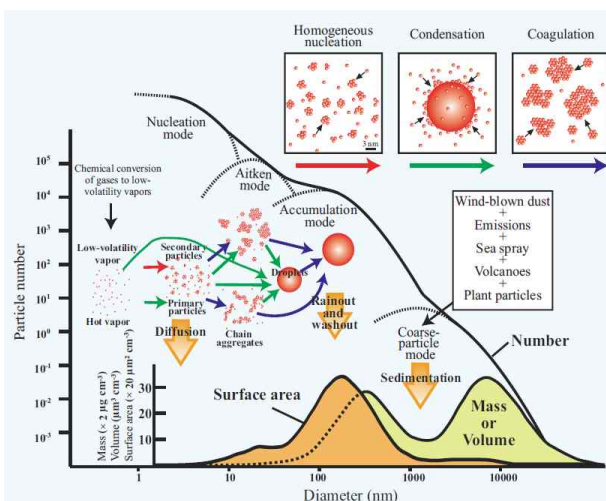
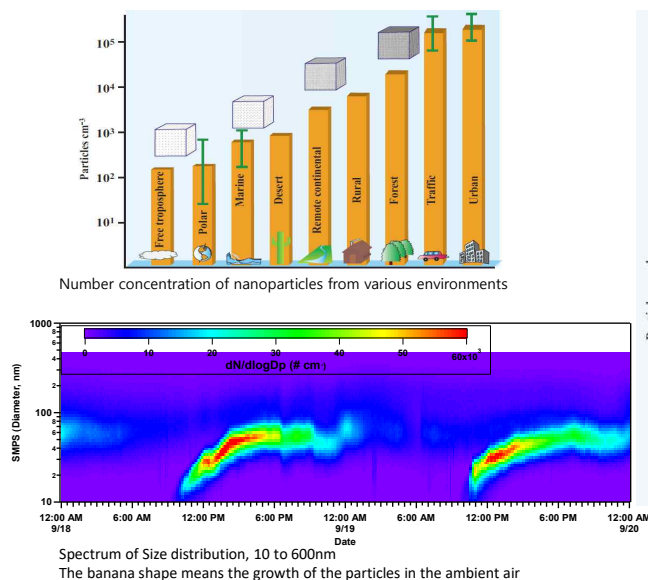


* Source :Choi JS(2016) A Study on Chemical Characteristics of Aerosol Composition at Baengnyeong Super site Using HR-ToF-AMS, PhD Thesis.

2. PM Measurement in Korea



2.1 Nano Particles Measurement in the Atmosphere



Schematic of the size distribution of aerosol particles

*Source : Peter R. Buseck and Kouji Adachi (2008) Nano particles in the Atmosphere, Element 4, 389-394

2.2 PM Measurement in the Atmosphere

Changes in environmental standards and development of measurement equipment



TSP – Hi-Vol
1 day sampling



PM10 & PM2.5
1 day sampling



PM2.5 Chemical Composition
On-line measurement(Ion, Carbon, Metal)

Manual analysis
Sampler
Laboratory manual analysis base on Filter
(Ion Chro., OCEC, XRF analysis)



Automatic equipment analysis
Monitor
Analyze mass and components at the field site

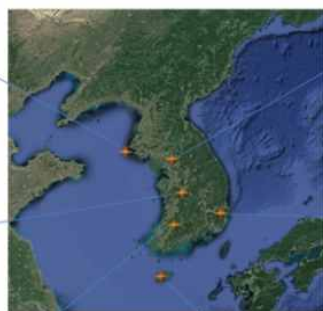
2.3 PM Measurement Super Sites in Korea



BN site



DJ site



GJ site



JJ site



Seoul site



US site

Instrumentation

PM10 Mass Conc., 1hr (beta attenuation, Meton, US)

PM2.5 Mass Conc., 1hr(beta attenuation, Meton, US)

PM2.5 Chemical Components

Ion Components, 1hr (diffusion and IC, URG, US)

OCEC components, 1hr (TOT, Sunset, US)

Black Carbon, 1hr (light attenuation, Magee, US)

Metal Components, 1hr(X-ray, CEI, US)

Size Distributions

10 to 650nm by 5mins (SMPS-CPC, TSI, US)

~20 um by 5mins (APS, TSI, US)

Gas Components

CO, SO2, NO2, O3, NH4 (every 1min – 1hr averaged)

nrPM1.0 Chemical Components, 5mins(HR-ToF-AMS, Aerodyne, US)

High Resolution-Time of Flight- Aerosol Mass Spectrometer

Organic, Sulfate, Nitrate, Ammonium, Chloride

CHONS atomic ratio, PMF modeling(POA, SOA)

VOCs components, 1 sec(PTR-ToF-MS, IONICON, AUT)

Proton transfer reaction-Time of Flight-Mass Spectrometer, IONICON, AUT

Volatile organic compounds (every 1 sec - 5min averaged)

Particle Size Calibration System(Seoul, Jeju)

Atomizer-Diffusion Dryer-SMPS-CPC system(TSI, US)

Meteorological Parameter

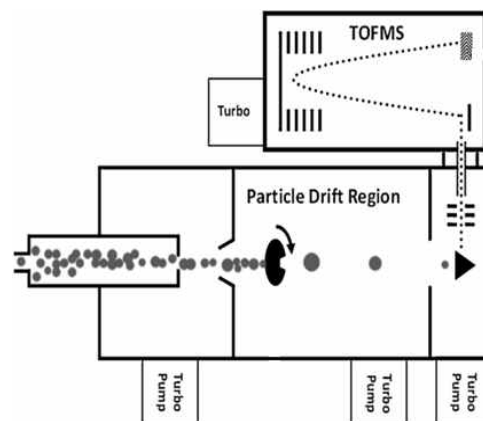
Temperature, Relative Humidity, Wind Speed, Wind Direction, UV

국립환경과학원 대기오염집중측정소 - 2019 : 충남 서산, 경기 안산 개소 예정

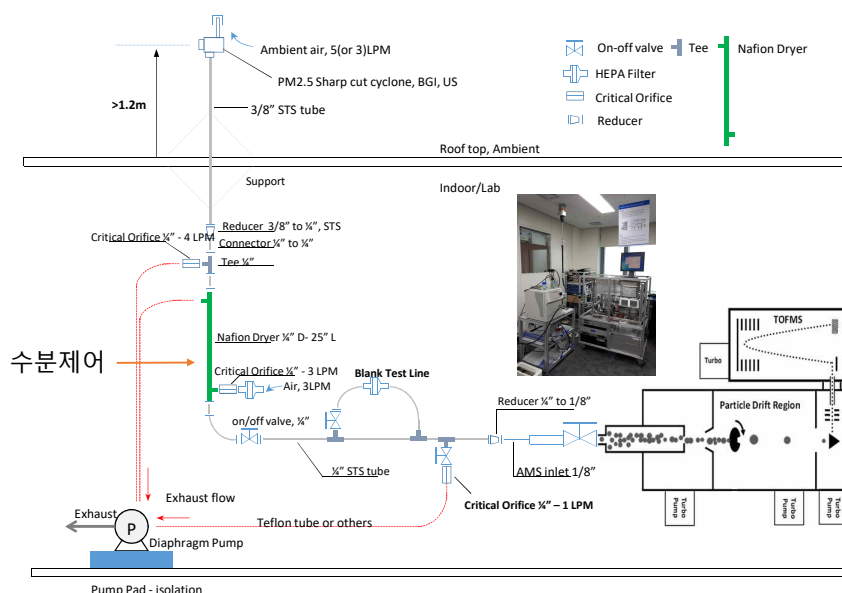
2.4 Case Study I. High Resolution Measurement in SEOUL

HR-ToF-AMS를 이용한 대기중 실시간 nrPM1.0 측정분석

Items		Contents
Model/Manufacture		HR-ToF-AMS / Aerodyne
Sampling Flow		1.5 ml/s (90 ml/m)
Critical orifice (aperture)		120 um pin hole
Vaporizer - Ionizer Chamber	Filament Emission	1.5 mA
	Electron Impaction Voltage	70 eV
	Heater Temperature	600 oC
ToF Analyzer	Mass Range	m/z 10 - m/z 300
	Mass Resolution	m/△m = 1,500 - 3,000
	Acquisition Mode	Scan Mode
	Pulse extraction	25 kHz
	Detector(MCP) Voltage	2,000 VdC
Data Acquisition	Mass Mode	30 sec
	PToF Mode	30 sec
	Mass + PToF mode	300 sec (5 min)



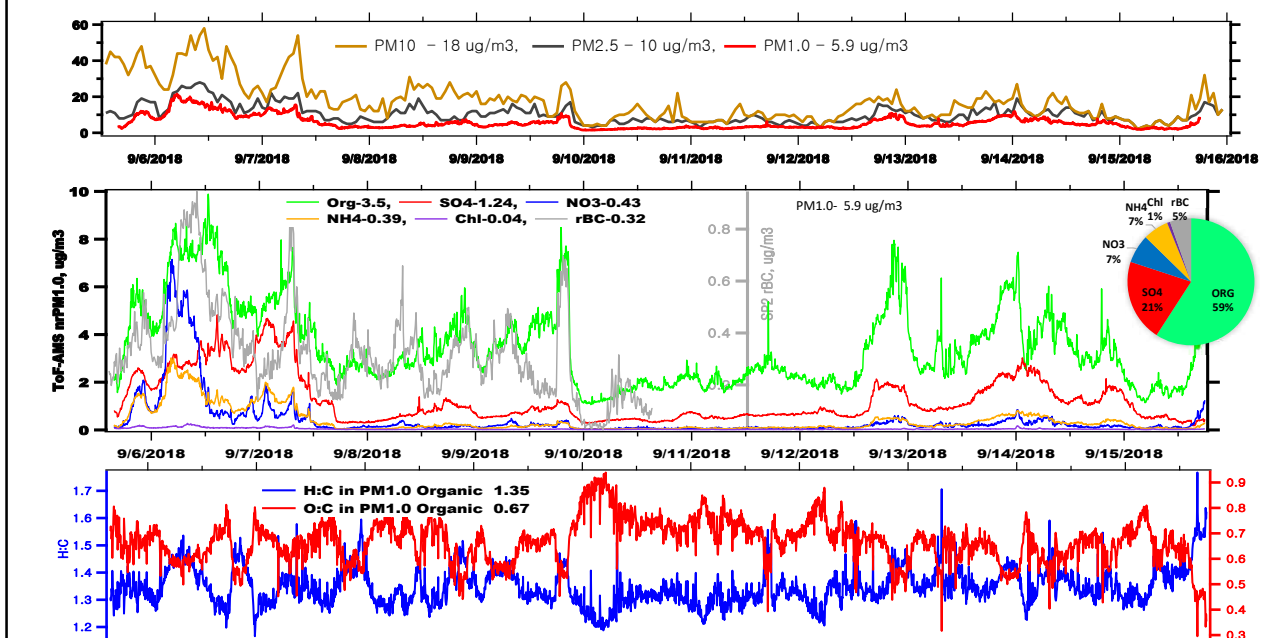
Real Time PM1.0 chemical component measurement using a HR-ToF-AMS HR-ToF-AMS system configuration



Step by Step for HR-AMS

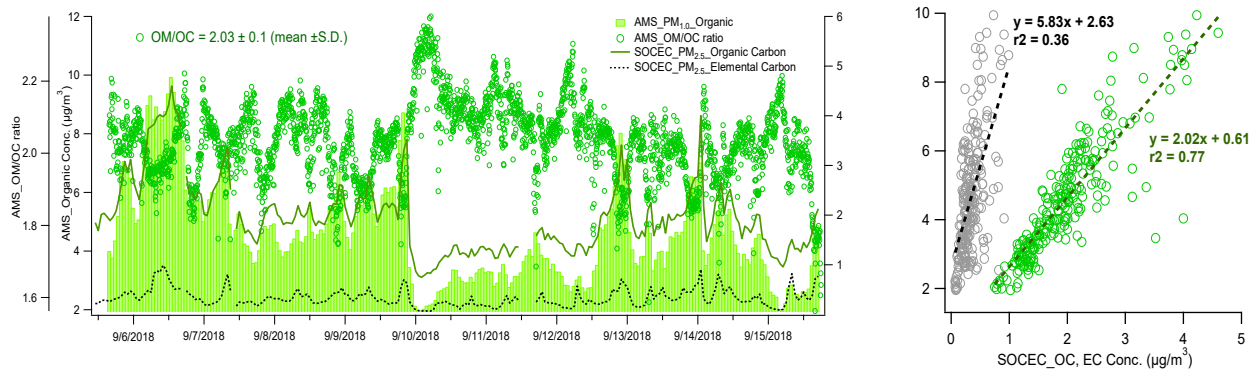
1. Vacuum Start~ 24hour more
2. Flow Calibration(pressure)
3. Tuning-Ion Intensity, Mass Cal.
4. IE Calibration
5. Size Calibration
6. Filter Blank Test(m/z 44, CO2+)
7. Scheduling
8. Field campaign Start
9. Data Acquisition
10. Field campaign End
11. Flow & IE calibration
12. Data Backup(HDF file)
13. Data Handling
 - 1) Squirrel(Unit Mass)
 - a. m/z calibration
 - b. base line
 - c. mass fragment
 - d. unit mass PMF data
 - 2) PIKA(High Resolution Mass)
 - a. peak shape, width
 - b. high resolution mass cal.
 - c. frag. Ion choice(~2000)
 - d. data output
 - f. high resolution PMF data

서울의 PM 농도 및 PM1.0 화학적 조성



PM 농도 및 PM1.0 화학적 조성검증 - 유기성분

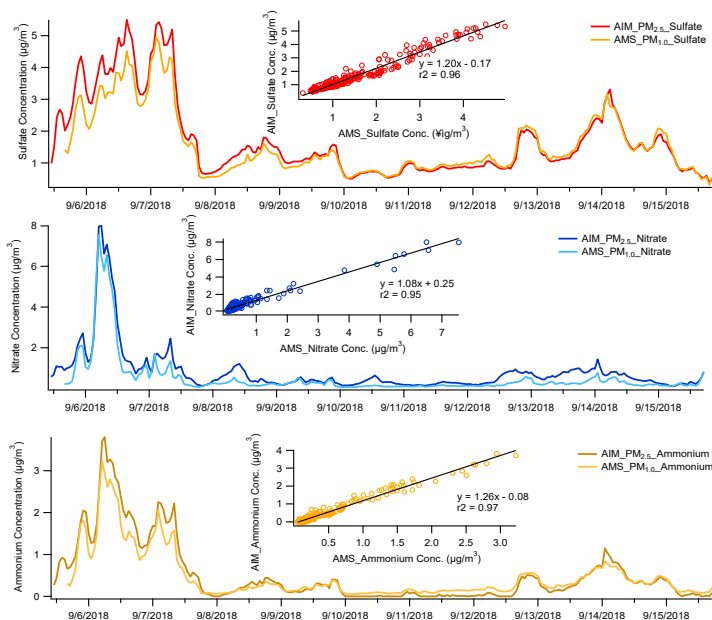
유기성분 검증



*. AMS = PM1.0 organic 성분 - OM

*. SOCEC = PM2.5 organic 성분 - OC

PM 농도 및 PM1.0 화학적 조성검증 - 무기성분



* . AMS = PM1.0 inorganic (무기성분)

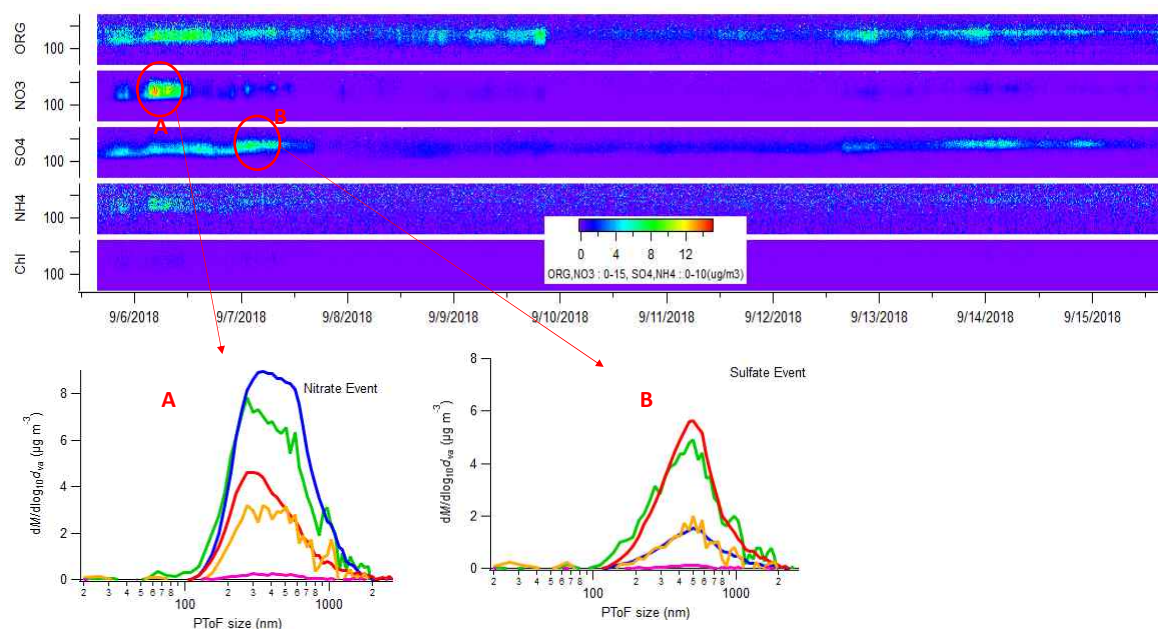
* . AIM = PM2.5 inorganic(무기성분)

Sulfate, SO4

Nitrate, NO3

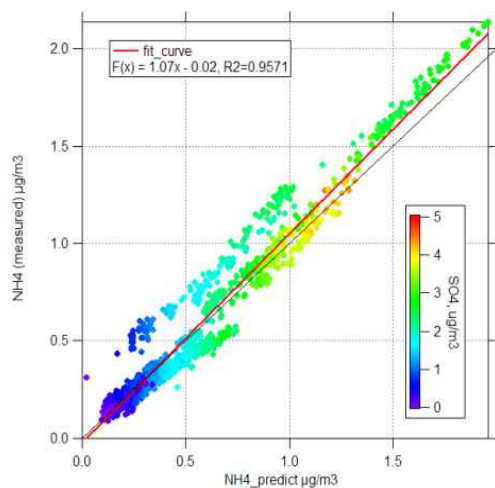
Ammonium, NH4

서울의 PM1.0 성분의 입경에 따른 화학적 성분 분포/Nitrate & Sulfate event

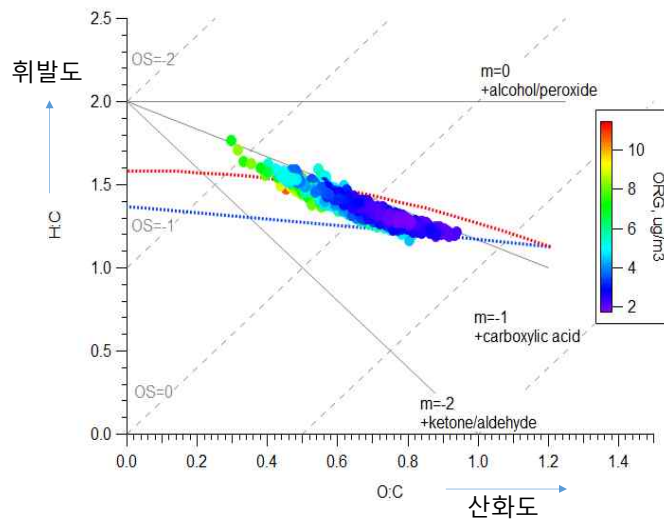


서울의 PM_{1.0} Acidity와 산화 휘발도 분석

Inorganic Acidity



Organic Volatility & Oxidation State

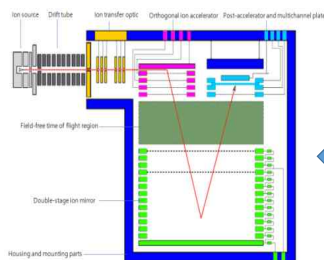


PTR-ToF-MS를 이용한 대기 중 VOCs 실시간 관측

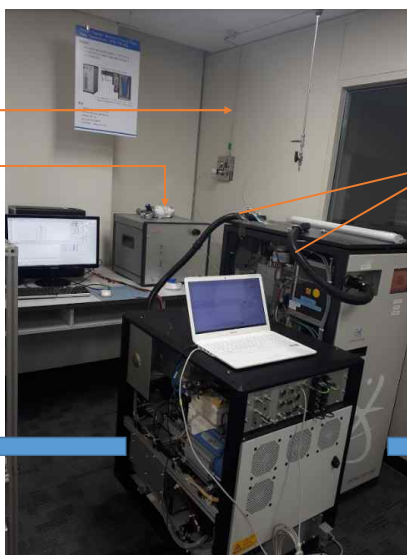
Zero Air Supply piping

Gas Calibration Unit

MFC1 : 1-20 ml/min(STD gas)
MFC2 : 1-1,000 ml/min(Dilution gas)
Mixing Chamber + H₂O, CO₂ control

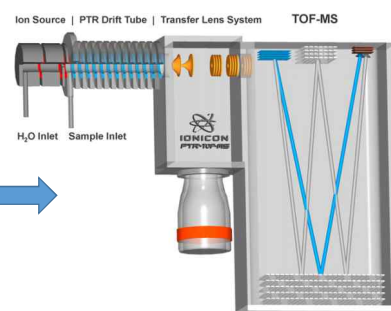


[PTR-ToF1000] (Müller et al., 2014)



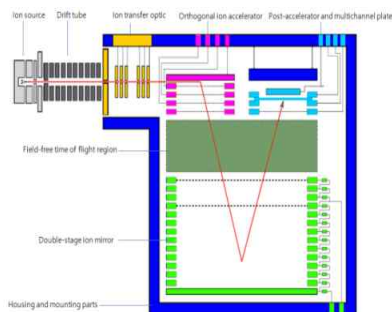
Ambient sampling line

Inlet Heating Tube(>60°C)



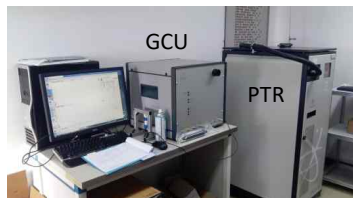
[PTR-ToF8000] (Jordan et al., 2009)

PTR-ToF-MS(Proton Transfer Reaction – Time of Flight – Mass Spectrometer) 측정분석의 개요



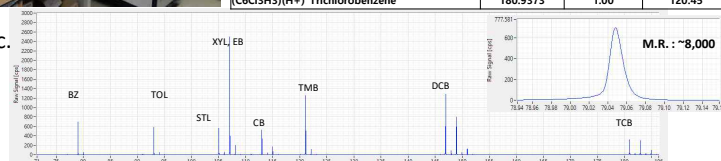
PTR-ToF-MS(Müller et al., 2014)

Items	Contents
Temp.	60 °C
Voltage	250~900 V
Drift Tube	E/N(electric field) 60~200 Td(townsend) (1 Td = 10 ⁻¹⁷ V·cm)
Pressure	2.3 mbar
Mass Range	m/z 20 - m/z 300
Ion Extration Rate	80kHz
Spectrum	every 1 second

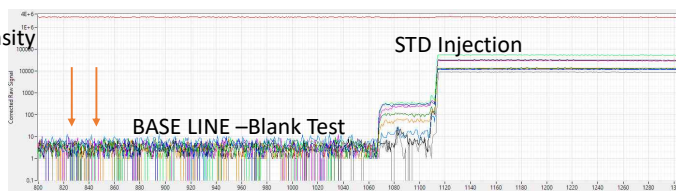


Transmission Ions	Exact Mass	Trans.	Sensitivity (cps/ppb)
H ₂ O(H ⁺) - Primary Ion	21.0221	0.17	NAN
(C ₆ H ₆)H ⁺ - Benzene	79.0542	0.52	55.55
(C ₇ H ₈)H ⁺ - Toluene	93.0699	0.60	72.18
(C ₈ H ₈)H ⁺ - Styrene	105.0699	0.66	85.96
(C ₈ H ₁₀)H ⁺ - Ethylbenz.Xylol	107.0855	0.66	79.16
(C ₆ H ₅)H ⁺ - Chlorobenzene	113.0152	0.63	90.50
(C ₉ H ₁₂)H ⁺ - thimethylbenzene	121.1012	0.73	88.13
(C ₆ H ₄)H ⁺ - Dichlorobenzene	146.9763	0.85	110.20
(C ₆ H ₃)H ⁺ - Trichlorobenzene	180.9373	1.00	120.45

Mass Spec.

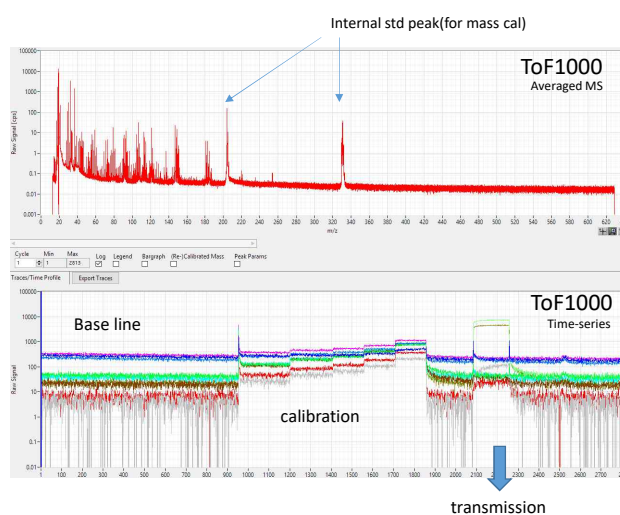
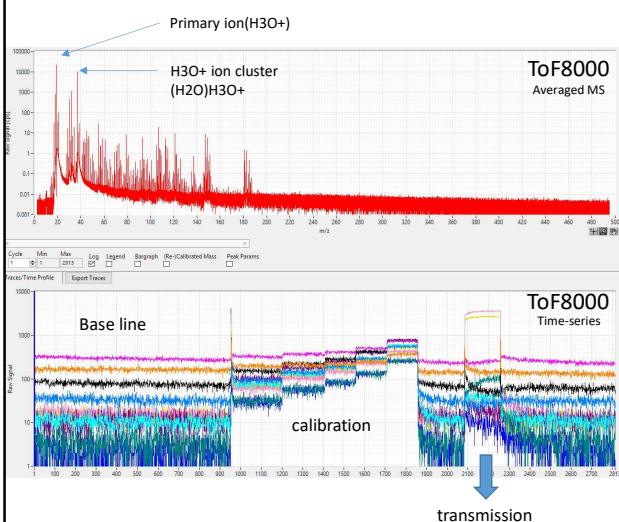


Ion Intensity



PTR-ToF-MS 실시간 분석 스펙트럼

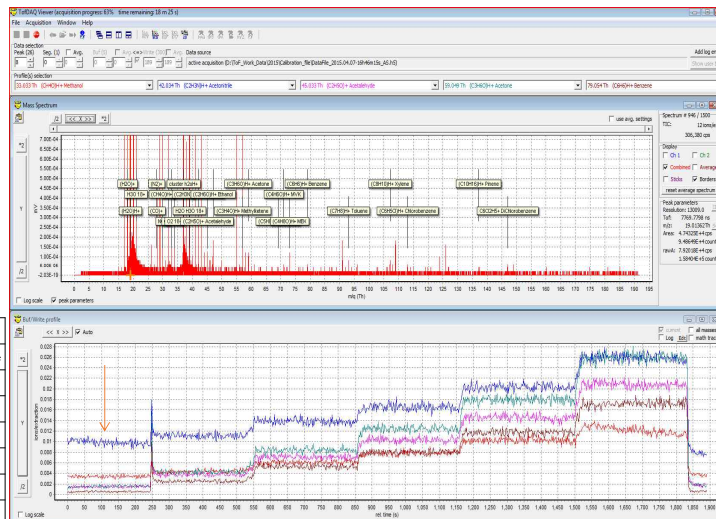
Real-time VOCs STD gas measurement(every 1 second)



Baseline 측정 → 교정곡선작성 → 자료수집 → 자료분석 → 자료확정

STD Compounds	ppm	Proton charge	Charge mass
Methanol	0.99	(CH4O)H+ Methanol	33.03349
Acetonitrile	0.99	(C2H3N)H+ Acetonitrile	42.03382
Acetaldehyde	0.95	(C2H5O)+ Acetaldehyde	45.03349
Ethanol	1.00	(C2H6O)H+ Ethanol	47.04914
Acrolein	1.01	(C3H4O)H+ Methylketene	57.03349
Acetone	0.98	(C3H6O)H+ Acetone	59.04914
Isoprene	0.95	(C5H8)H+ Isoprene	69.06989
Crotonaldehyde	1.01	(C4H8O)H+ MVK	71.04914
2-Butanone	0.99	(C4H8O)H+ MEK	73.06480
Benzene	0.99	(C6H6)H+ Benzene	79.05423
Toluene	0.99	(C7H8)H+ Toluene	93.06989
o-Xylene	1.02	(C8H10)H+ Xylene	107.08553
Chlorobenzene	1.01	(C6H5Cl)H+ Chlorobenzene	113.01527
a-Pinene	1.01	(C10H16)H+ Pinene	137.13248
1,2-Dichlorobenzene	1.02	(C6Cl2H5)+ DiChlorobenzene	146.97626

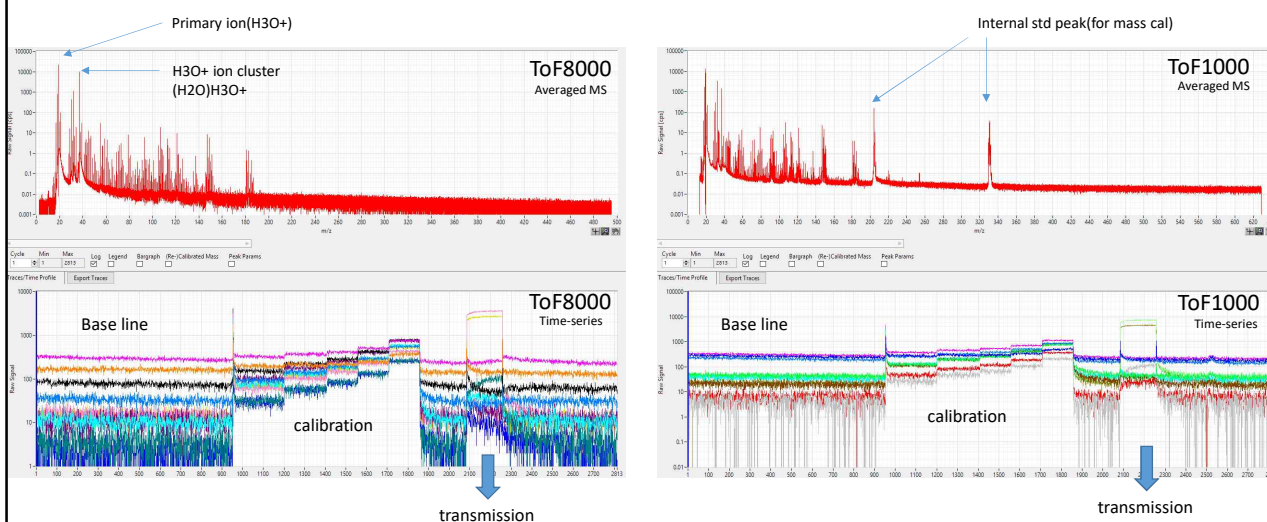
std conc. (ppb)	norm counts, avg. value(200 secs in each)									
	Methanol	Acetaldehyde	Acrolein	Acetone	Isoprene	Butanone	Benzene	Toluene	a-Pinene	Dichlorobenzene
0	56.5962	17.5045	20.2342	14.8279	2.93993	8.19926	4.38802	4.52358	1.54661	2.02691
2.2	71.1472	44.3175	40.631	40.9848	12.6765	30.5941	20.1444	21.618	7.45842	9.73995
5.6	99.1739	83.9542	72.8117	80.8713	27.6607	66.6727	42.6237	47.5701	17.02	22.2254
9	127.927	122.467	106.17	120.74	42.5488	101.777	64.5856	72.7716	27.266	34.7186
13.5	168.499	174.46	149.522	173.799	63.0551	149.669	95.1856	106.221	40.5759	51.6475
20.3	201.882	248.418	215.599	253.61	94.6003	225.629	140.272	158.83	61.9768	79.0196



Real-Time ToF acquisition window / every 1 sec

PTR-ToF-MS실시간 분석 스펙트럼

Real-time VOCs STD gas measurement(every 1 second)

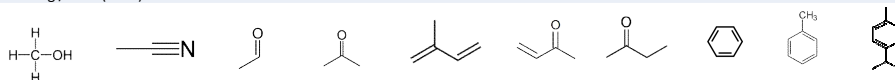


PTR-ToF-MS – Target Compounds in Real-time(1sec)

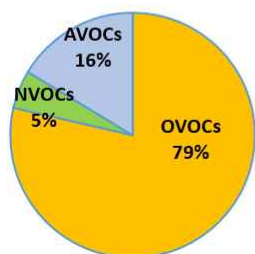
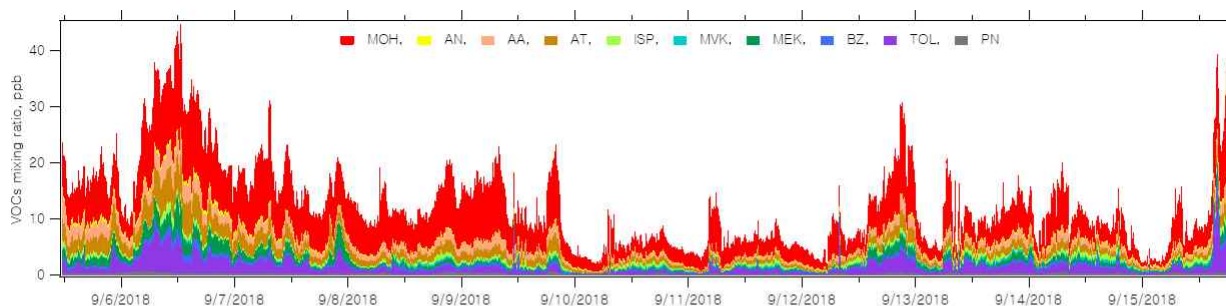
Target compounds(10)

Num.	Name	ABB.	Nominal Mass	CAS	Boiling point	Formular	Exact Mass	Protonated Mass	PA	α	k_rate
1	Methanol	MOH	33	67-56-1	-97.6 °C	CH ₄ O	32.0262	33.034	180.3	2.67	2.33
2	Acetonitrile	AN	42	75-05-8	81.3 to 82.1 °C	C ₂ H ₃ N	41.0265	42.0344	186.2	4.29	4.74
3	Acetaldehyde	AA	45	75-07-0	20.2 °C	C ₂ H ₄ O	44.0262	45.034	183.8	4.30	3.36
4	Acetone	AT	59	67-64-1	50.05 °C	C ₃ H ₆ O	58.0419	59.0497	194.1	6.09	3.00
5	Isoprene	ISP	69	78-78-5	34.067 °C	C ₅ H ₈	68.0626	69.0704	198.9	10.22	1.74
6	Methyl Vinyl Ketone	MVK	71	78-94-4	81.4 °C	C ₄ H ₆ O	70.0419	71.0497	199.5	8.16	3.83
7	Methyl Ethyl Ketone	MEK	73	79-93-3	79.64 °C	C ₄ H ₈ O	72.0575	73.0653	197.8	7.90	3.48
8	Benzene	BZ	79	71-43-2	80.1 °C	C ₆ H ₆	78.047	79.0548	179.3	10.78	1.97
9	Toluene	TOL	93	108-88-3	111 °C	C ₇ H ₈	92.0626	93.0704	187.4	12.90	2.12
10	Pinene	PN	137	99-85-4	α : 173.5-174.8 °C	C ₁₀ H ₁₆	136.1252	137.133	215.0	18.07	2.44

PA: Proton Affinity(kcal/mol), α : polarizability(E-24 cm³), k_rate: ion-molecule rate constant(E-9 cm³/s)
 J.Zhao, R.Zhang /AE 38(2004) 2177-2185



서울의 VOCs 농도 및 조성현황

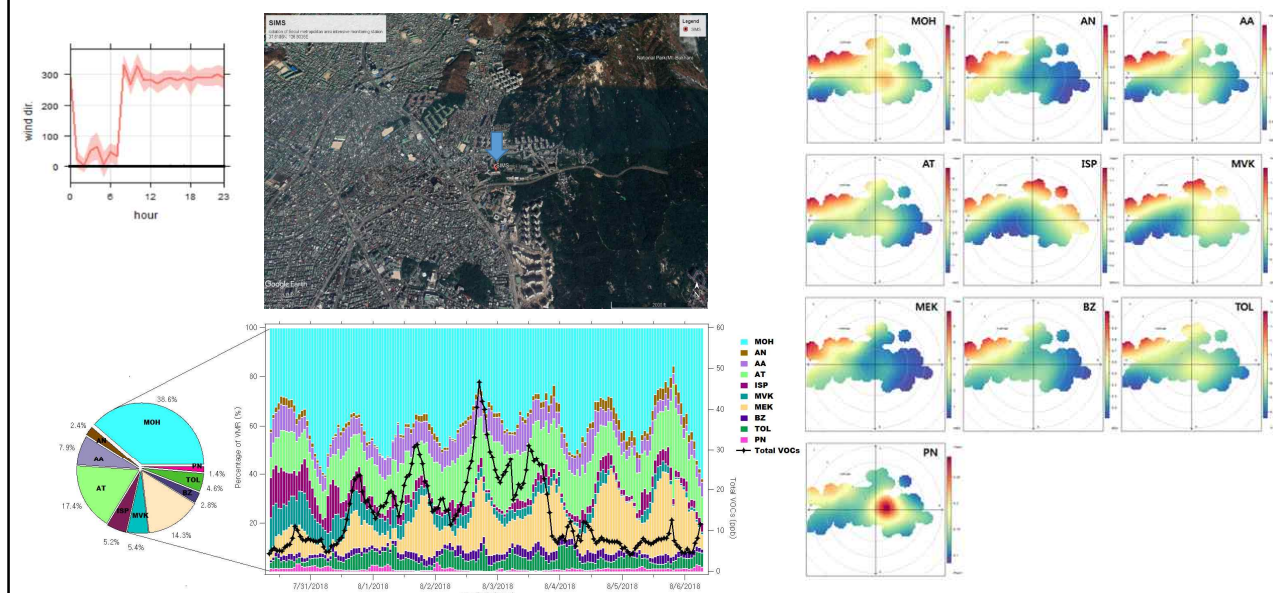


Summary on the VOCs mixing Ratio

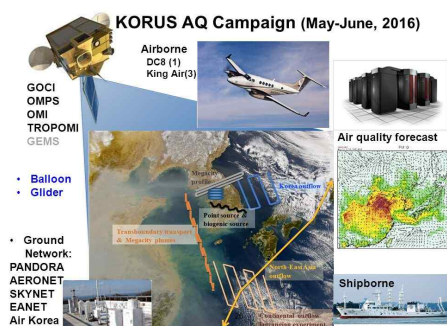
VOCs, ppb	MOH	AN	AA	AT	ISP	MVK	MEK	BZ	TOL	PN
Mean	5.33	0.27	1.11	1.39	0.41	0.22	0.70	0.36	1.19	0.15
Ratio, %	47.8	2.5	10.0	12.5	3.7	2.0	6.3	3.2	10.7	1.3
SD	3.37	0.16	0.77	1.18	0.26	0.13	0.77	0.35	1.28	0.11
Max	48.20	0.76	5.41	6.80	2.18	0.65	5.58	23.12	41.11	0.65
Min	0.135	0.002	0.001	0.015	0.001	0.001	0.003	0.003	0.002	0.003

서울의 VOCs 농도 및 조성 현황(국지적 기류 유입에 따른 영향)

VOCs measurement at SIMS using a PTR-ToF-8000



3. Aircraft Measurement in Korea



KORUS-AQ Observing system framework applied to atmospheric composition observations and modeling



3.1 우리나라 항공 관측의 역사

Chang-gong 91(1993)



SF-600(1994)



Sikorsky(1996)



Beechcraft 1900D(2018~)



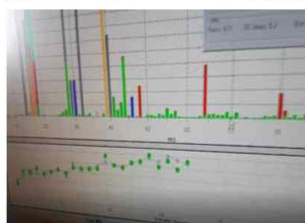
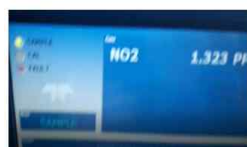
Beechcraft C90GT(2011~2018)



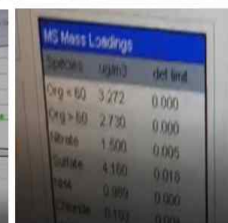
Piper Chieftain(1997~2010)

3.2 최근 항공관측 사례(2017-2018)

1st Test Flight(Fast Mode)

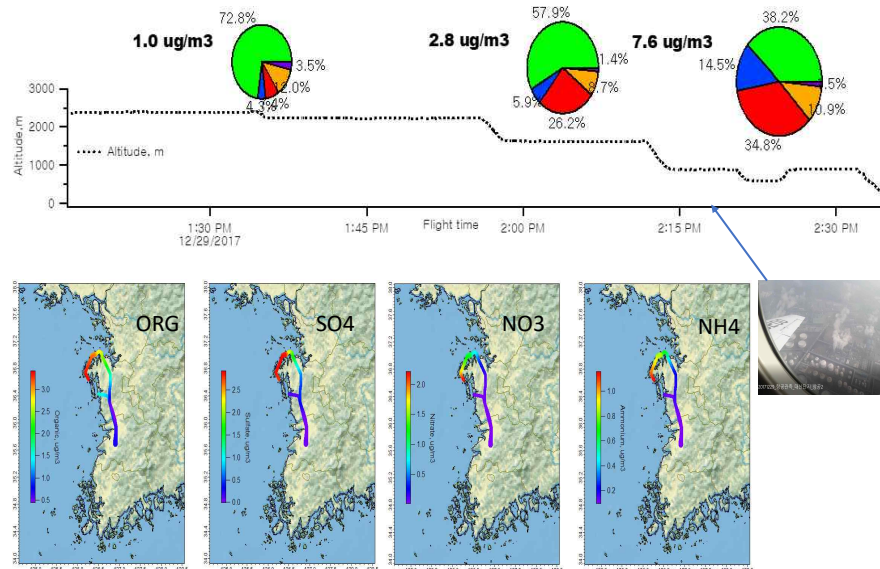


AMS Fast Mass Spec

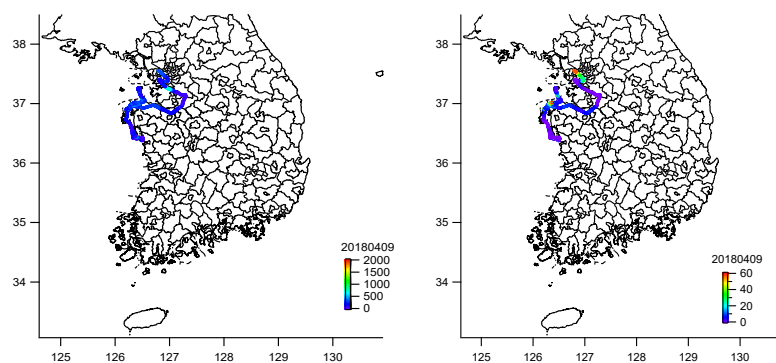


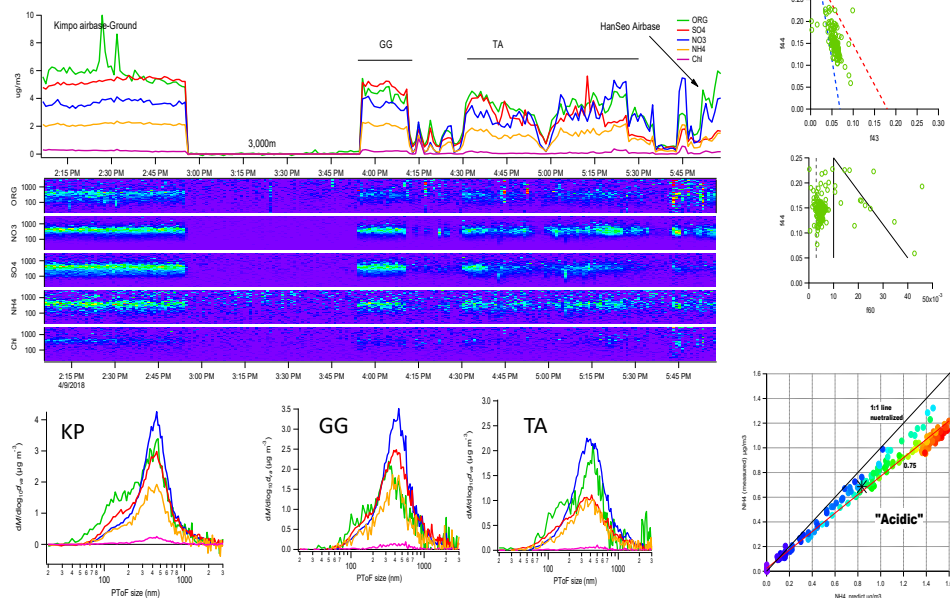
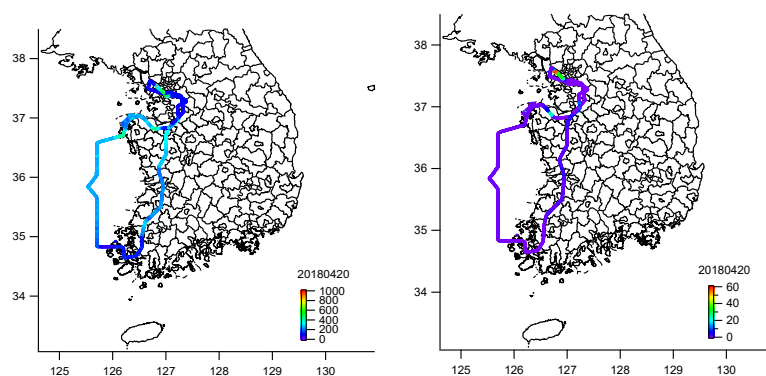
AMS Mass Loading

1st Test Flight(29, Dec. 2017) Results – PM_{1.0} Organic, Sulfate, Nitrate, Ammonium

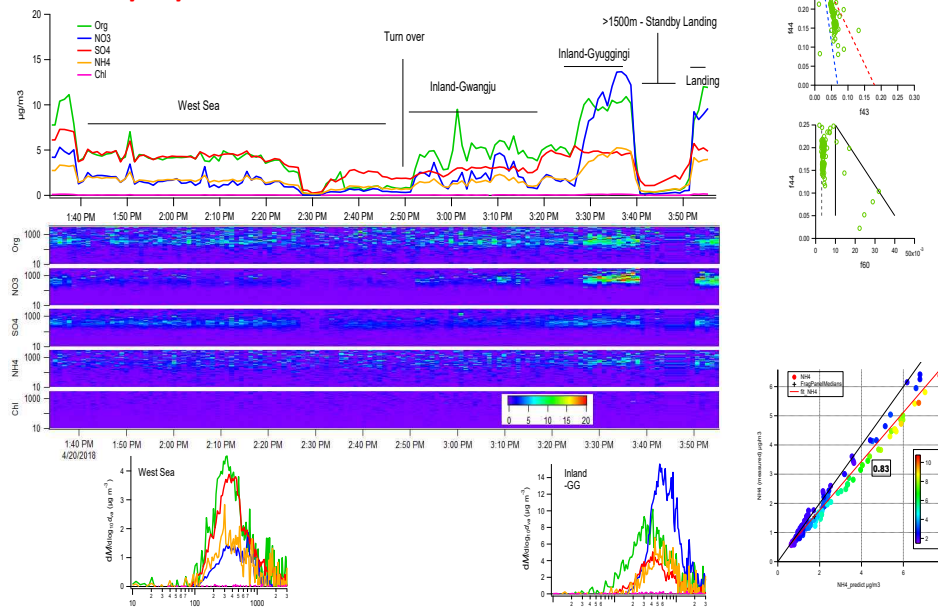


Case I – 4/9/2018: Seoul → TaeAhn Power Plant → Hanseo Univ.



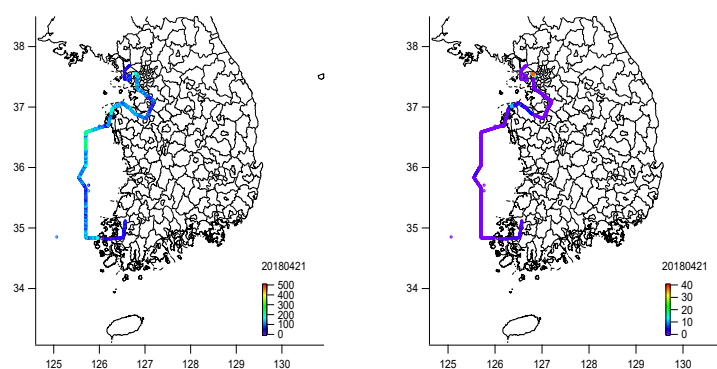
4/9/2018**Case II-4/20/2018 :****Seoul → TaeAn Power Plant → West Sea → Inland → Seoul**

Case II-4/20/2018

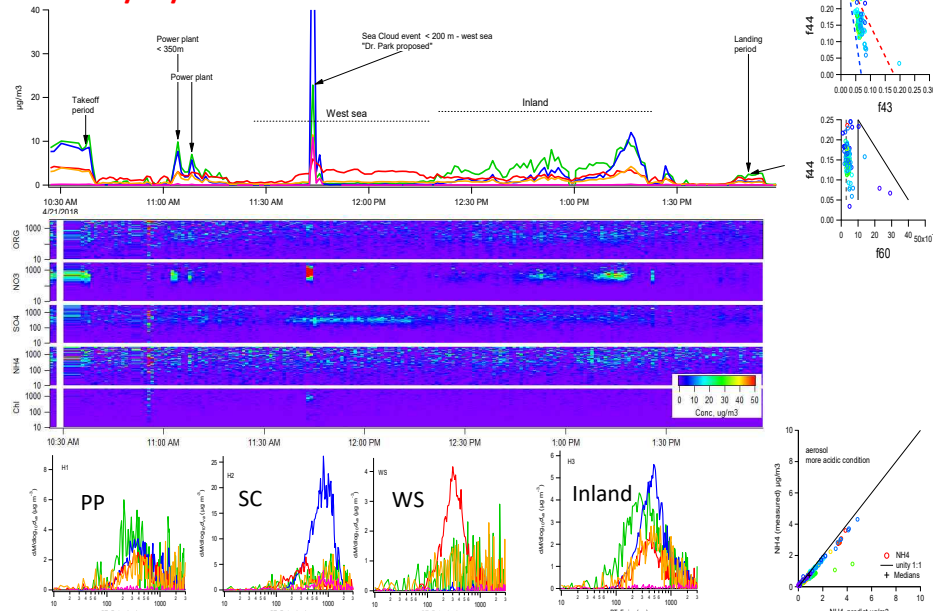


Case II-4/21/2018 :

Seoul → TaeAhn Power Plant → West Sea → Inland → Seoul

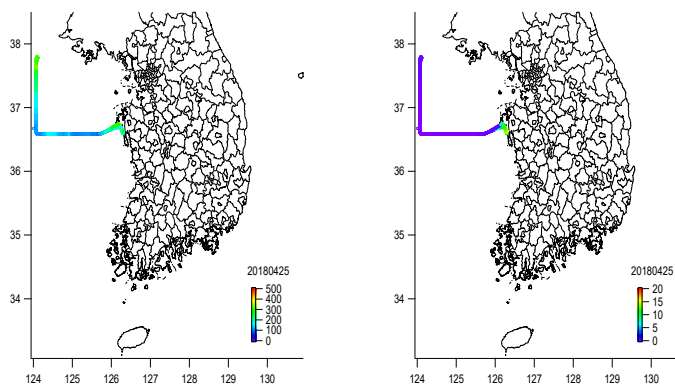


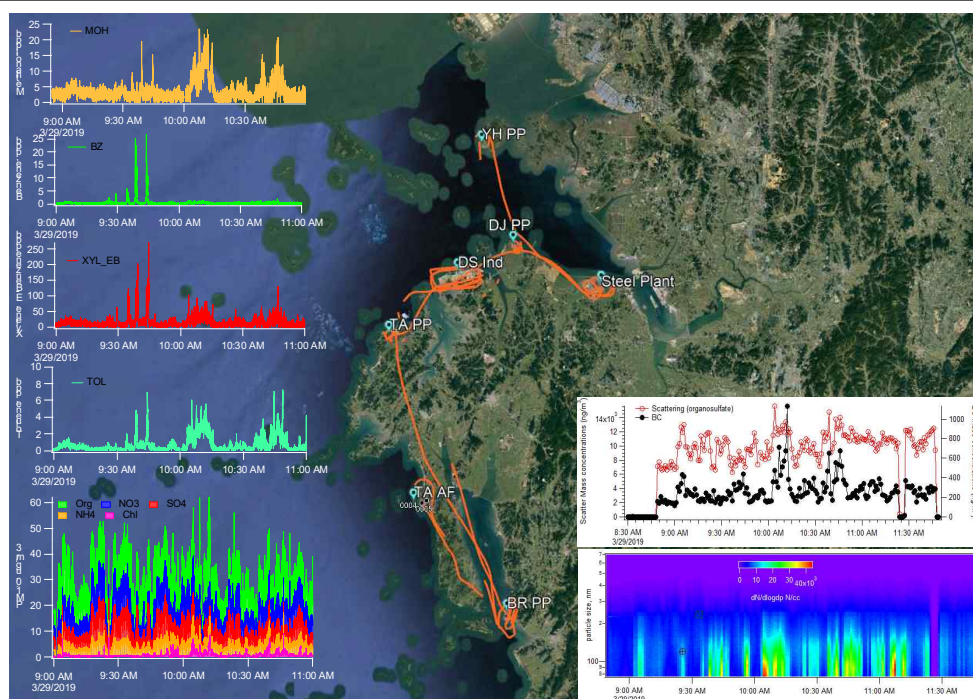
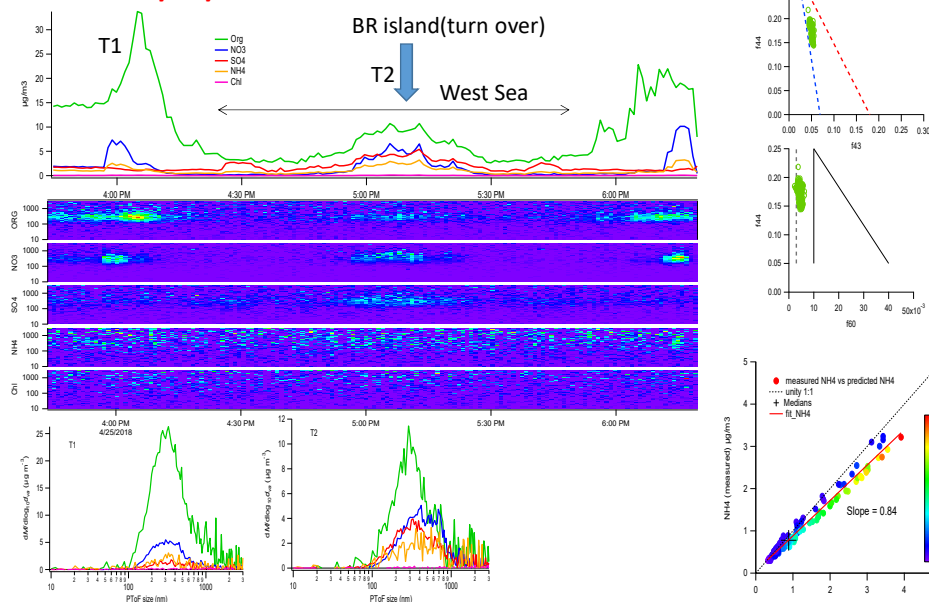
Case III-4/21/2018



Case IV – 4/25/2018

Hanseo Univ → West Sea → North Limit → West Sea → Hanseo





감사합니다.

6

지하철 미세먼지 모니터링 및 저감

조진환 (서울교통공사 보건환경처)



지하철 미세먼지 모니터링 및 저감

2019. 05. 16



목차

I. 연구 개요

II. 데이터 분석 결과

III. 미세먼지 예측모델 개발

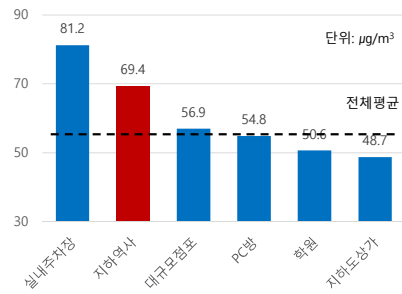
IV. 대시보드 개발

V. 관리체계 개선

1. 연구배경 > 지하역사 공기질 개선에 대한 사회적 요구 및 예측 모형의 필요성

지하철은 일평균 천만명이 이용하는 교통수단으로, 깨끗하고 쾌적한 환경조성이 중요하나 공기질 관리에 취약하며 사회적 관심 증대. 환경부 및 서울시의 미세먼지 비상저감조치에 등에 따라 내·외부 조건에 따른 지하역사 미세먼지 농도 예측 및 저감조치 방법 개선 필요

'17년 다중이용시설군 미세먼지 오염도 비교



[출처: 환경부, 2018]

- 지하역사는 자연환기가 어렵고 밀폐된 좁은 공간에 다수의 이용객이 밀집되어 공기질 관리에 취약함
- 2017년 환경부 자가측정 결과, 지하역사 미세먼지 21개 다중이용시설 중 실내주차장 다음으로 높은 오염도를 나타냄

지하철 미세먼지에 대한 사회적 관심 증대



터널보다 나쁜
대구지하철
(‘17.12, JTBC)

2016년 서울미세먼지 측정 결과

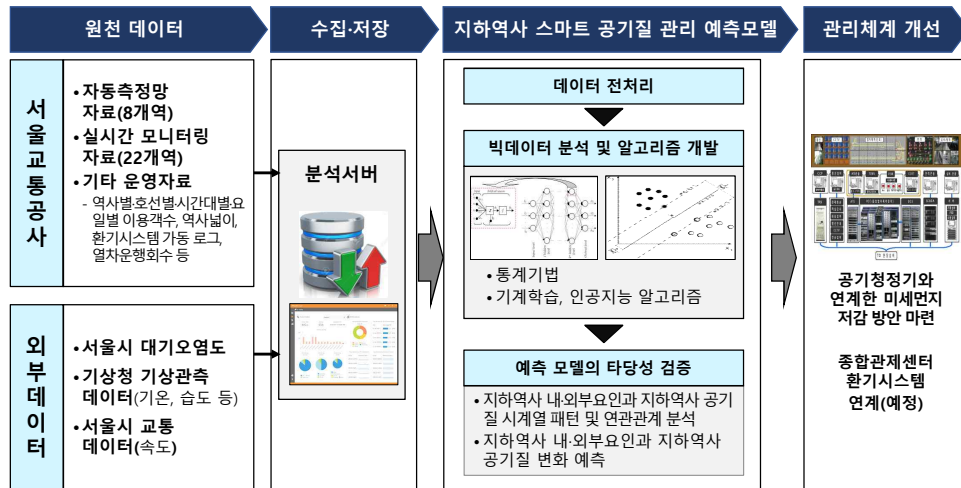
국내 기준치	150µg/m³ (서울 140µg/m³)
세계보건기구 기준치	50µg/m³
서울시내 평균	48µg/m³
지하역사 평균	81.2µg/m³
전동차내 평균	121µg/m³

지하철안 미세먼지
지상의 최대 2배
(‘17.6, 환경운동연합)

- 최근 지하역사 미세먼지 심각성에 대한 국회, 시민단체, 언론 등의 지속적인 문제제기로 국민들의 관심과 불안이 증가하는 등 공기질 개선에 대한 사회적 요구가 고조되고 있음

2. 서비스 구성도

서울교통공사에서 수집·관리하고 있는 공기질 및 지하철 운영 자료와 외부 공공기관에서 관리하고 있는 기상, 교통관련 데이터를 활용하여, 지하역사 공기질 관리예측 모형을 개발하고 관리체계를 개선함



목차

I. 프로젝트 개요

II. 데이터 분석 결과

III. 미세먼지 예측모델 개발 현황

IV. 대시보드 개발

V. 관리체계 개선

1. 활용 데이터 목록

예측 모델 개발을 위하여 서울교통공사와 외부 공공기관에서 관리하고 있는 데이터를 수집

구분	종류	출처	세부 데이터	기간	건수
서울교통공사 내부	자동 측정망(8역)	공사망 (1~4호선 각 1개역)	PM10, PM2.5	2015.1.1~2018.6.30	4,403,712
		환경부망	수유(4), 동대문(4)	PM10	2015.1.1~2018.6.30
			화곡(5), 청담(7)	PM10	2017.11.17~2018.6
	실시간 모니터링(22역)	철기원	2호선 19개역	PM10, PM2.5	2,254,464
		KT망	5호선 3개역	PM10, PM2.5	983,808
	지하철 운영자료	공사	열차운행 횟수, 이용객 수, 환기량 구간형태, 출입구수, 노후도, 승강장위치(층)/깊이/넓이/형태/급기량/배기량, 대합실넓이/급기량/배기량, 터널급기량/배기량, 곡선호/반경, 양옆과의거리	2015.1.1~2018.6.30	11,278,464
외부	대기오염도	한국환경공단	PM10, PM2.5	2015.1.1~2018.6.30	919,440
	기상 관측	기상청	기온, 습도, 강수량, 풍향, 풍속	2015.1.1~2018.6.30	2,298,600
	교통 데이터	서울시교통정보센터	교통속도	2015.1.1~2018.6.30	7,999,128

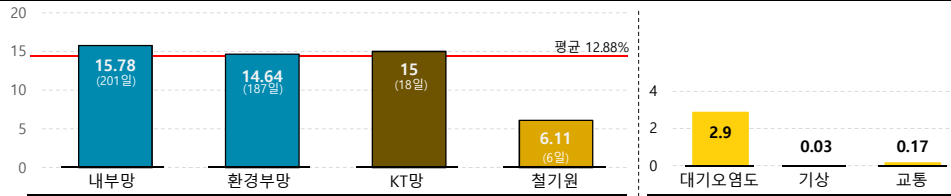
- 총 수집 데이터 : 3,247만 건
- 향후 실시간 시스템 운영을 고려하여 지속적 활용 가능한 데이터로 구성
 - 서울시교통정보센터 교통량 제외 : 현재 시점 1시간 이후에 데이터 수집 가능

2. 데이터 전처리 현황 > 비정상 데이터 현황

현재 수집된 데이터의 지하철역사 내 미세먼지 데이터의 약 13%가 비정상 데이터로 확인됨

비정상(결측치 및 이상치) 현황

(1시간 기준, 단위: %)



지하역사 미세먼지 (측정망별)

- 측정기간: (내)(한)2015.1.1~2018.6.30, (KT)2018.3.1~6.30, (철)2018.3.20~6.30
- 내부망의 측정 시스템 교체로 인한 결측 - 2015.11 1개월 간
- 전원단절이나 기기점검, 통신오류에 의한 결측
 - 2시간 이상 연속결측 비율: (내)60.7%, (한)97.7%, (KT)33.8%, (철)25.74%
 - 연속결측 평균일수: (내)1.5일, (한)1.2일, (KT)15.5일, (철)9.4일
 - 최장기간 결측: (내)동대문역사문화공원역, 64일간 (2017.8월~10월)
 - (한)수유역, 200일간 (2016.6월~2017.2월)
 - (KT)왕십리역 B1 대합실, 37일간 (2018.5월~6월)
 - (철)홍대입구역 PSD, 86일간 (2018.4.5~6.29)

외부 데이터

- 측정기간: 2015.1.1~2018.6.30
- 대기오염도
 - 전원단절, 기기점검에 의한 결측 발생
 - 연속결측 평균일수: 약0.5일(12시간)
 - 최장기간 결측: 강북구, 약 24일간(2015.8월~9월)
- 기상
 - 2015년 8회의 결측 외 모두 정상 데이터
- 교통 속도
 - 봉천역 외 4개 지점의 교통량 측정 센서 부재로 2015년 데이터 부재

3. 데이터 분석 > 데이터의 구분

미세먼지에 영향을 미치는 데이터를 시계열변수와 정적변수로 구분할 수 있음

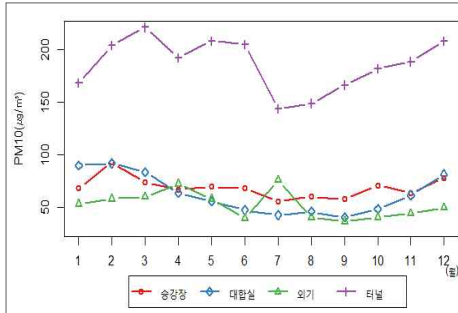
데이터 구분									
Date	역명	종속 변수		시계열 변수				정적 변수	
		PM10(내부)	습도	기온	풍속	PM10(외부)	승하차 인원	깊이(m)	출입구 수
2015-01-01 0:00	동대문역사문화공원역	52	41	-9.4	5.1	46	0	14	3
2015-01-01 1:00	동대문역사문화공원역	41	38	-8.5	5.4	44	0	14	3
2015-01-01 2:00	동대문역사문화공원역	39	36	-7.8	4.5	57	0	14	3
2015-01-01 3:00	동대문역사문화공원역	29	33	-6.6	4.2	76	0	14	3
2015-01-01 4:00	동대문역사문화공원역	23	33	-6.1	6	86	0	14	3
2015-01-01 5:00	동대문역사문화공원역	20	34	-5.3	5.6	106	64	14	3
2015-01-01 6:00	동대문역사문화공원역	22	33	-4.2	4.4	128	403	14	3
2015-01-01 7:00	동대문역사문화공원역	32	36	-4.5	5.2	139	336	14	3
2015-01-01 8:00	동대문역사문화공원역	49	39	-5.6	4.9	132	607	14	3
⋮									
2015-01-01 0:00	충무로역	18	41	-9.4	5.1	51	0	26.59	0
2015-01-01 1:00	충무로역	14	38	-8.5	5.4	57	0	26.59	0
2015-01-01 2:00	충무로역	11	36	-7.8	4.5	70	0	26.59	0
2015-01-01 3:00	충무로역	12	33	-6.6	4.2	92	0	26.59	0
2015-01-01 4:00	충무로역	8	33	-6.1	6	111	0	26.59	0
2015-01-01 5:00	충무로역	10	34	-5.3	5.6	127	109	26.59	0

- ① 시계열 변수: 동일 역사의 경우에도 측정시점별로 측정값이 달라짐
- ② 정적 변수: 동일 역사의 경우, 측정시점과 관계없이 동일한 측정값을 가짐

3. 데이터 분석 > [1] 역사내 미세먼지 패턴 분석 - 1/2

지하역사 내 위치별로 미세먼지 농도는 터널, 승강장, 대합실, 외기 순이며, 월별로는 U자패턴을 보임

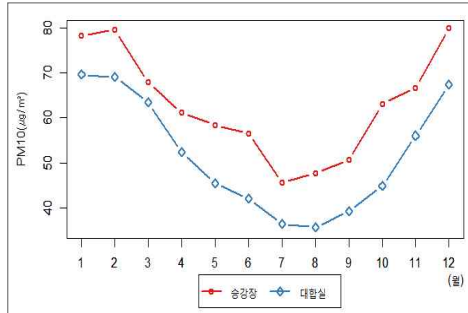
지하역사 내 위치 별 미세먼지 농도 비교



- 미세먼지 농도는 터널 > 승강장 > 대합실 > 외기 순
- 열차운행으로 발생하는 미세먼지와 지하철 환기시스템을 통하여 유입되는 배기가스의 지하 역사내 축적이 원인인 것으로 판단

*대상역: 수유역(터널, 승강장, 대합실, 외기의 모든 데이터가 존재하는 유일한 역), 기간: 2015~2017)

지하역사 내 미세먼지 농도 월별 패턴



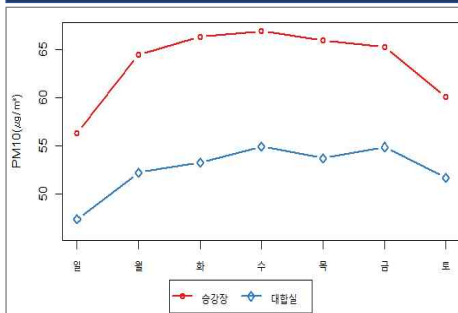
- U자 패턴을 보임
- 봄(3~4월)과 겨울(11, 12, 1, 2월)철에 증가하고, 여름(5~8월)과 가을철(9~10월)에 낮아지는 패턴을 보임

*대상역: 수유, 충무로, 동대문역사문화공원역(2015~2017년 3년간의 승강장, 대합실 데이터가 존재, 호선 및 지하철 위치 구가 상이한 역)

3. 데이터 분석 > [1] 역사내 미세먼지 패턴 분석 - 2/2

지하역사 내 미세먼지 농도는 요일별 시간별로 패턴이 존재하며, 지하철 운행횟수와 연관관계가 있는 것으로 나타남

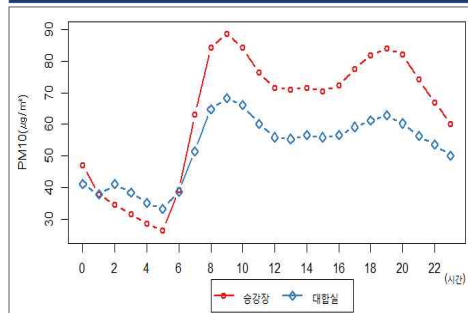
지하역사 내 미세먼지 농도 요일 별 패턴



- 평일보다 주말에 미세먼지 농도가 감소하는 패턴을 보임
- 주말보다 더 많은 평일 지하철 운행횟수(13% 더 많음)가 원인인 것으로 판단

*대상역: 수유, 충무로, 동대문역사문화공원역(2015~2017년 3년간의 승강장, 대합실 데이터가 존재, 호선 및 지하철 위치 구가 상이한 역)

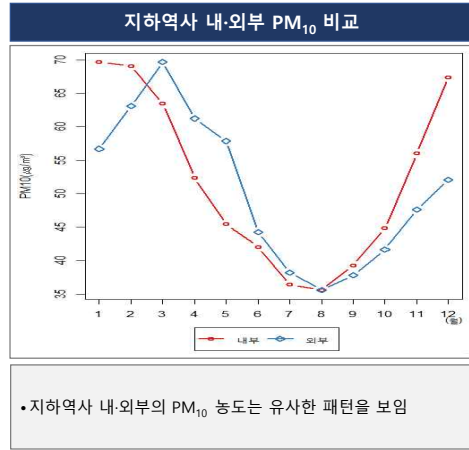
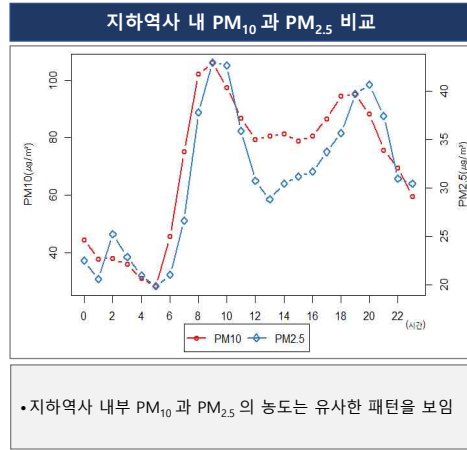
지하역사 내 미세먼지 농도 시간 별 패턴



- 지하철 운행이 시작되는 5시부터 급격히 증가(지하철 운행량은 8시, 18시대가 타시간의 1.5배)
- 19시부터 감소하기 시작하여, 지하철 운행이 종료되는 0시부터 5시까지 가장 낮은 수치를 나타냄

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 - 1/5

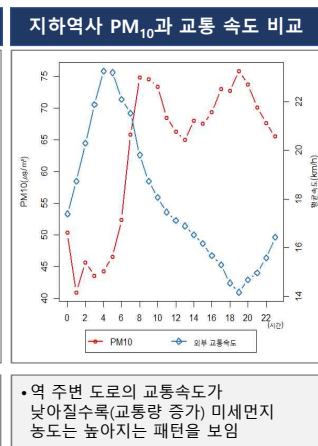
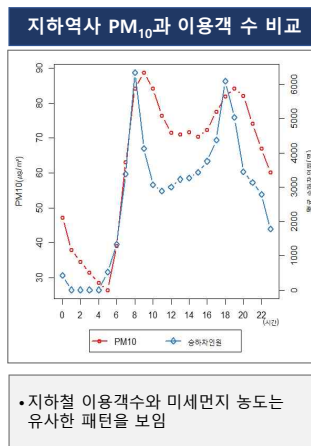
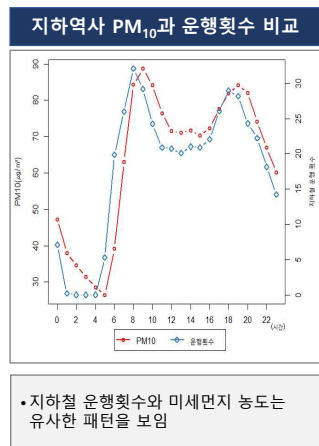
지하역사 내 미세먼지 농도는 내부 PM_{2.5} 수치, 외부 미세먼지 농도와 유사한 패턴을 보임



*대상역: 수유, 충무로, 동대문역사문화공원역(2015~2017년 3년간의 승강장, 대합실 데이터가 존재, 호선 및 지하철 위치 구가 상이한 역)

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 - 2/5

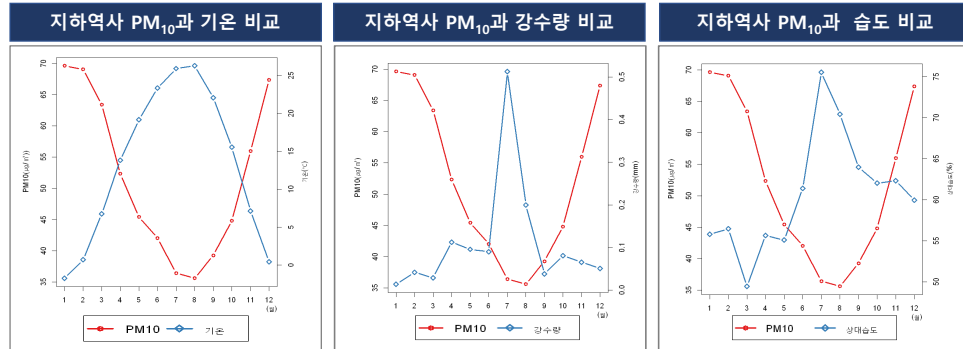
지하역사 내 미세먼지 농도는 지하철 운행횟수와 이용객수와는 유사하고, 교통 속도와는 반대방향으로 움직이는 패턴을 보임



*대상역: 수유, 충무로, 동대문역사문화공원역(2015~2017년 3년간의 승강장, 대합실 데이터가 존재, 호선 및 지하철 위치 구가 상이한 역)

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 - 3/5

지하역사 내 미세먼지 농도는 기온, 강수량, 습도와 반대되는 패턴을 보임

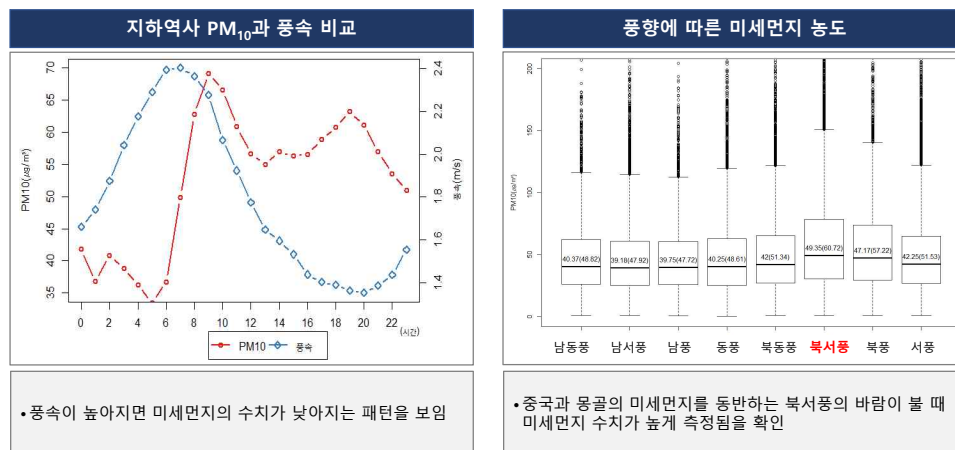


- 기온, 강수량, 습도가 높아질 수록 미세먼지 농도는 감소하는 패턴을 보임
- 여름철의 특징인 기온, 습도, 강수량의 증가가 미세먼지 농도에 영향을 미치는 것으로 보임
 - 여름철 기온의 상승으로 공기가 상층부로 올라가면서 대류활동이 활발해져서 공기의 활발한 순환
 - 강수량의 증가는 미세먼지를 씻어주는 효과
 - 습도가 올라가면 미세먼지가 물 분자와 만나서 재비산 하는걸 막고 무게가 무거워져서 가라앉음

*대상역: 수유, 충무로, 동대문역사문화공원역(2015~2017년 3년간의 승강장, 대합실 데이터가 존재, 호선 및 지하철 위치 구가 상이한 역)

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 - 4/5

지하역사 내 미세먼지 농도는 풍속과는 반대되는 패턴을 보이고, 북서풍이 불 때 높은 것으로 나타남



- 풍속이 높아지면 미세먼지의 수치가 낮아지는 패턴을 보임

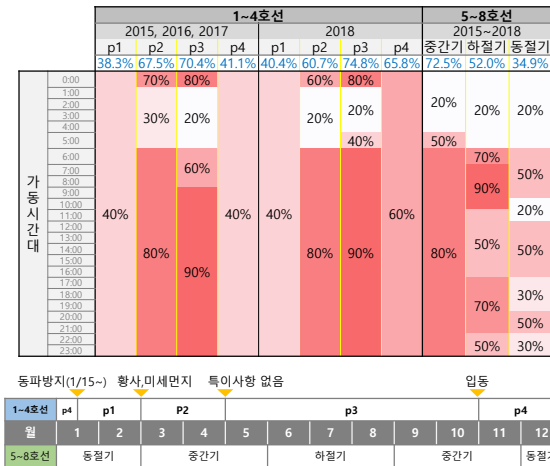
- 중국과 몽골의 미세먼지를 동반하는 북서풍의 바람이 불 때 미세먼지 수치가 높게 측정됨을 확인

*대상역: 수유, 충무로, 동대문역사문화공원역(2015~2017년 3년간의 승강장, 대합실 데이터가 존재, 호선 및 지하철 위치 구가 상이한 역)

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 - 5/5

현재 환기시스템은 지하철 운행시간 동안 거의 완전 가동 중이어서, 미세먼지 농도와 패턴을 비교하기 어려움

환기시스템 가동률



- 현재 오전 6시~24시까지
환기시스템을 80~90% 가동 중
- 전시간 거의 완전 가동(Near-Full Capacity) 중 이어서 환기시스템 운영(On-Off)과 미세먼지농도 간의 패턴을 비교하기는 어려움



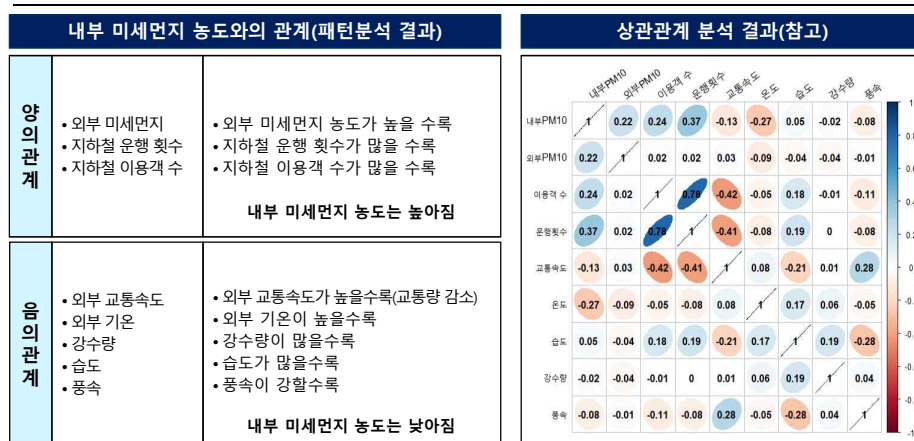
서울교통공사

15

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 > 요약

패턴분석 결과, 시계열 변수는 미세먼지 농도에 양의 영향을 미치는 변수와 음의 영향을 미치는 변수로 구분할 수 있음

시계열 변수와 미세먼지 농도와의 관계



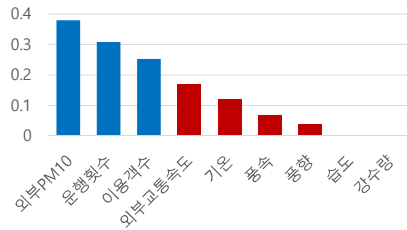
서울교통공사

16

3. 데이터 분석 > [2] 미세먼지와 시계열 변수와의 관계 분석 > 요약 > 시계열 변수 영향도

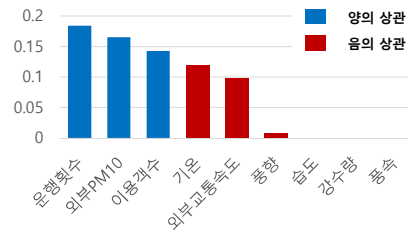
랜덤포레스트 모델을 활용하여 변수의 영향도를 평가한 결과, 외부미세먼지(PM10), 운행횟수, 이용객수의 영향도가 큰 것으로 평가됨

수유역 등 28개역 데이터(2018.04~2018.06)



외부미세먼지 > 운행횟수 > 이용객수 > 교통속도 > 기온 순으로 미세먼지에 영향을 많이 미치는 것으로 나타남

수유역 등 6개역 데이터(2015~2017년)



운행횟수 > 외부미세먼지 > 이용객수 > 기온 > 교통속도 순으로 미세먼지에 영향을 많이 미치는 것으로 나타남

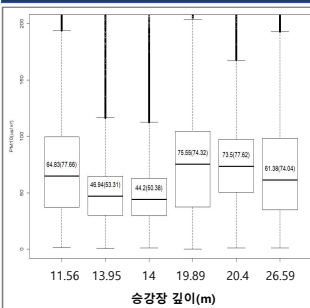
지하역사 미세먼지와 양의 관계에 있는 '외부미세먼지', '지하철운행횟수', '지하철이용객수'가 미세먼지 농도에 미치는 영향이 큰 것으로 판단됨

*변수 영향도(랜덤포레스트): 주요 양상불 모델인 랜덤포레스트 모델을 훈련시켜 실제값과 예측 결과의 오차를 바탕으로 중요성 점수를 계산하여 변수들의 영향도 순위를 판단

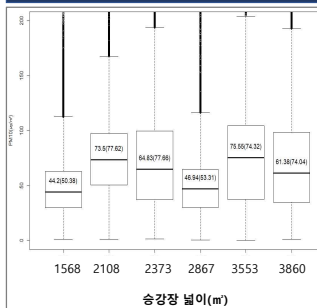
3. 데이터 분석 > [3] 미세먼지와 정적 변수와의 관계 분석 > 패턴분석

승강장의 깊이, 위치, 형태, 출입구수, 급배기구 수, 철로 곡선의 호 길이, 반지름 길이, 양 옆 역과의 거리 등 정적변수의 변화에 따른 지하역사 내 미세먼지 농도의 패턴은 발견하기 어려움

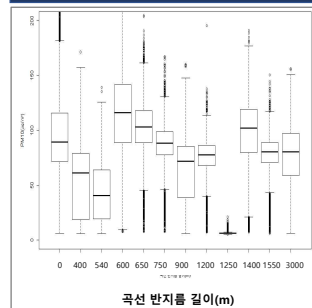
승강장 깊이에 따른 미세먼지 농도*



승강장 넓이에 따른 미세먼지 농도*



철로 곡선 반지름 길이에 따른 미세먼지 농도**



- *각 정적변수의 차이에 따라 미세먼지 농도는 다르지만 각 변수 값의 변화에 따른 증가나 감소의 패턴을 발견하기 어려움
- *승강장 깊이, 위치, 형태, 출입구수, 급배기구수, 대합실 넓이, 철로 곡선의 호 길이, 양 옆역과의 거리 등 다른 정적 변수의 경우에도 패턴을 발견하기 어려움 (그래프 생략)

대상역: *서울역 등 6개 역(2015~2017년 3년간의 승강장 데이터가 존재하는 역) **서울역 등 24개역(2018.04~2018.06까지 터널 데이터가 존재하는 역)

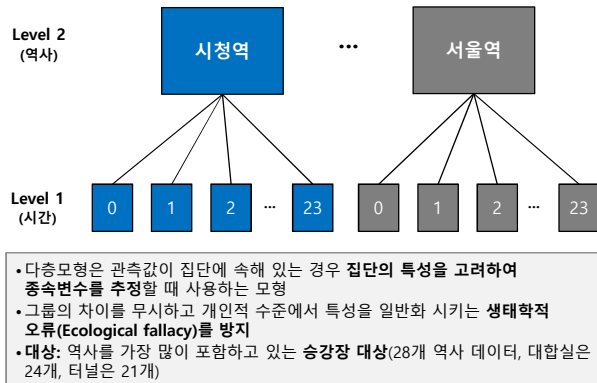
3. 데이터 분석 > [3] 미세먼지와 정적 변수와의 관계 분석 > 연관관계

정적 변수의 패턴분석 결과, 미세먼지 농도에 양의 영향을 미치는 변수와 음의 영향을 미치는 변수를 명확하게 구분하기 어려워 다중모형 분석을 실행함

정적 변수의 패턴분석 결과

- 지하역사 내 미세먼지 농도는 지하역사 특성 데이터들별로 차이가 존재하지만, 패턴을 발견하기 어려움
 - 곡선(호, 반경), 출입구수, 승강차위치, 승강장깊이, 승강장형태, 승강장넓이, 대합실넓이, 양옆역과의 거리, 급기구수, 배기구수
- 이는, 지하역사 특성이 미세먼지 농도에 영향을 미칠 것으로 사료되지만, 다양한 요인(기온, 습도, 이용객 수 등)들이 미세먼지에 복잡한 강도로 영향을 미치기 때문인 것으로 판단됨

다중 모형(Multi-level Model)



3. 데이터 분석 > [3] 미세먼지와 정적 변수와의 관계 분석 > 요약 > 연관관계

다중 모형을 통해 각 정적변수들이 PM10에 미치는 영향을 분석하였음

	변수	Value	Std.Err	p-value	설명
시계열 변수	외부PM10	0.286	0.033	0.000	• 시계열 변수의 경우 p-value값이 정적변수보다 작아 통계적 유의성이 높은 것으로 분석 • 정적변수의 경우 28개의 데이터만 존재하여 통계적 유의성이 높지 않아 해석의 주의가 필요한 것으로 사료됨
	이용객수	0.083	0.046	0.072	
	운행횟수	0.289	0.047	0.000	
정적 변수	구간형태 (U-type)	0.307	0.133	0.034	구간형태가 *U-type인 역이 터널인 역보다 미세먼지 농도가 더 높음(U-type의 경우 미세먼지 농도가 낮을 것으로 기대되지만, U-type인 역사는 28개 역사 중 3곳 뿐이라 결과의 신뢰성이 낮은 것으로 사료됨)
	출입구수	-0.030	0.040	0.465	출입구수가 많은 역의 경우 적은 역보다 미세먼지 농도가 낮음
	건물노후도	0.023	0.063	0.725	오래된 역사 일수록 미세먼지 농도가 더 높음
	승강장깊이	0.174	0.075	0.034	승강장 깊이가 깊은 역 일수록 미세먼지 농도가 더 높음
	승강장넓이	-0.049	0.078	0.542	승강장의 넓이가 넓은 역 일수록 미세먼지 농도가 더 낮음
	승강장형태 (상대식)	0.362	0.074	0.000	승강장의 형태가 쌍상대식, 섬식, 상대식인 순으로 미세먼지 농도가 높아짐**
	승강장형태 (쌍상대식)	-0.192	0.320	0.556	
	승강장급기량	0.038	0.040	0.349	승강장의 급기량이 많을수록 미세먼지 농도가 더 증가(p-value 높음)
	승강장배기량	-0.209	0.046	0.000	승강장의 배기량이 많을수록 미세먼지 농도가 더 감소함

*U-type : 지하철이 외부에서 터널로 들어오거나 터널에서 외부로 나가는 형식의 구간

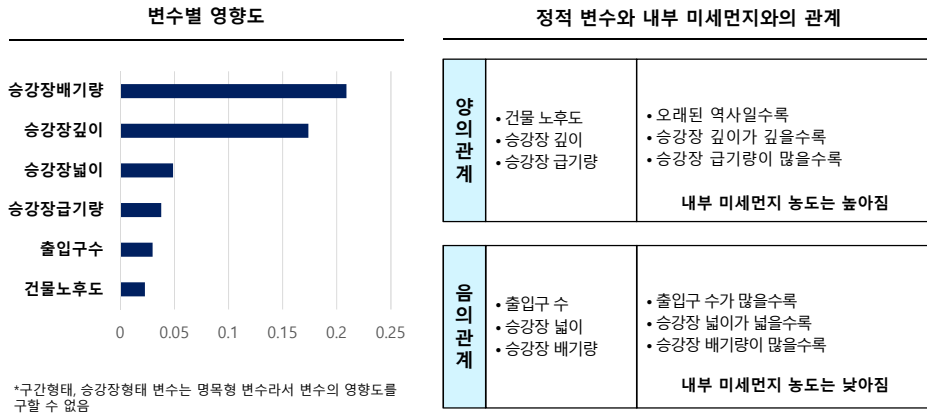
** 쌍상대식 형태의 승강장은 한 개 역사 뿐이라서 결과의 신뢰성이 낮을 것으로 사료됨

*** 다중모형의 기본가정(선형성, 정규성, 등분산성)을 충족하지 못하므로, 모형의 결과를 100%신뢰할 수는 없음

****대상역: 서울역 등 28개역(기간 : 18.04.01~18.06.30)

3. 데이터 분석 > [3] 미세먼지와 정적 변수와의 관계 분석 > 요약 > 정적변수 영향도

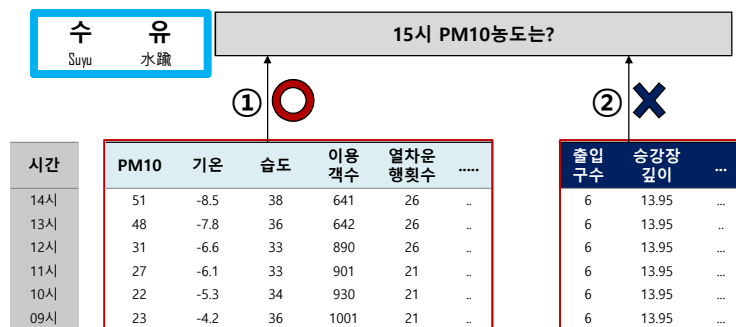
다중모형을 통해 정적변수들의 영향도를 평가한 결과, 배기량과 깊이의 영향도가 큰 것으로 나타남



3. 데이터 분석 > [4] 미세먼지 예측모델에서의 활용

미세먼지 예측 모델은 시계열 데이터만을 활용하여 구축함

설명변수별 미세먼지 예측 모델에서의 활용여부



- ① 시계열 데이터 : 예측모델에는 시계열 데이터만 활용됨
- ② 정적 데이터 : 역사내 동일값으로 예측에 영향을 주지 못하므로 활용하지 않음

목차

I. 프로젝트 개요

II. 데이터 분석 결과

III. 미세먼지 예측모델 개발 현황

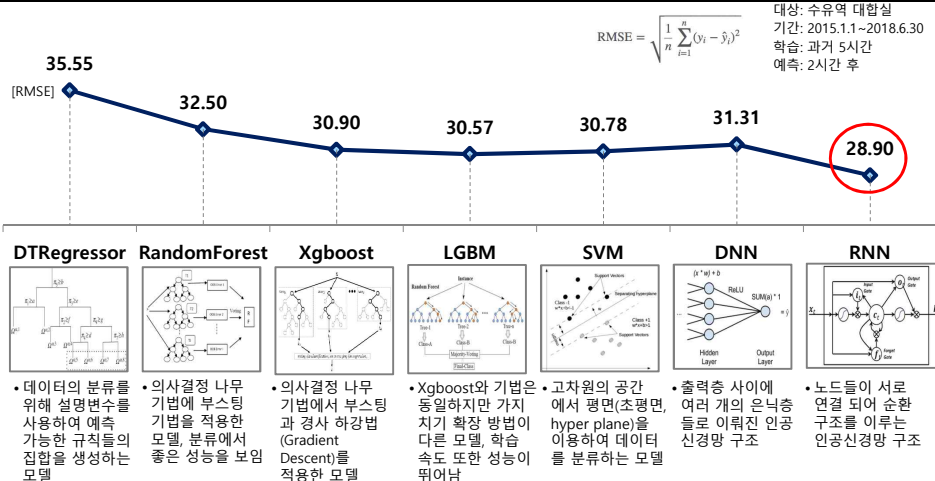
IV. 대시보드 개발

V. 관리체계 개선

2. 모델개발 > [1] 모델 선정 > 주요 모델별 예측 성능

미세먼지 농도 예측을 위한 다양한 기계학습 및 인공지능경망 모델 성능평가 결과, 딥러닝 기반의 순환신경망 (Recurrent Neural Network) 모델의 성능이 가장 뛰어난 것으로 나타남

모델별 미세먼지 농도 예측 성능

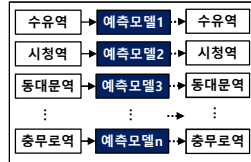


2. 모델개발 > [1] 모델 선정 > 역사별 학습 예측모델 vs. 통합학습 역사별 예측모델

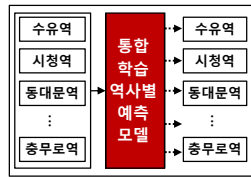
특정역의 미세먼지 예측 시, 당역의 데이터만을 학습하는 역사별 학습 예측모델과 전체 역사의 데이터를 이용한 통합학습 역사별 예측모델 비교 시 통합학습 모델의 성능이 더 뛰어난 것으로 나타남

역사별 학습 예측모델 vs. 통합학습 역사별 예측모델

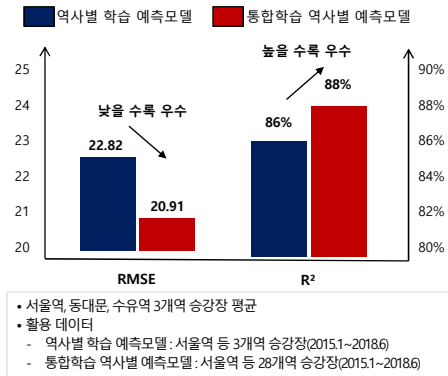
- ① 역사별 학습 예측모델
- 해당 역사의 데이터만을 학습 후, 해당역사 미세먼지 농도 예측
 - 277개 역사 x 위치(승강장, 대합실, 터널) = 831개의 모델을 관리하여야 함



- ② 통합학습 역사별 예측모델
- 전체 역사의 데이터를 학습 후, 개별역사 별 미세먼지 농도 예측
 - 위치(승강장, 대합실, 터널)별 모델 3개로 277개 역사의 미세먼지 예측
 - 전체 모델이 3개이므로 운영관리가 용이



모델 성능 비교



모델의 성능 및 추후 관리의 용이성을 고려하여 통합학습 예측모델을 선정하고, 통합학습 역사별 예측모델에 대한 성능향상을 추진

2. 모델개발 > [2] Parameter Tuning > Tuning 순서 결정

여러 논문과 관련 자료를 바탕으로 중요도에 따라 순차적으로 Parameter Tuning 진행하고, 예측 성능 향상을 위한 변수 선택을 진행함

참고

논문: LSTM A Search Space Odyssey(2017, Klaus Greff외)

- 총 세가지 경우로 test 진행
 - Speech corpus를 이용한 task 분류
 - Time series of pen movement data를 이용한 character 분류
 - 찬송가 piano roll을 이용한 다음 음 예측
- 총 4개 parameter에 대해 범위를 설정, random search를 진행
 - Hidden size: [20, 200]
 - Learning rate: $[10^{-6}, 10^{-2}]$
 - Momentum: [0.01, 1.0]
 - Standard deviation of Gaussian input noise: uniform samples from [0, 1]

결론: 3가지 실험에서 공통적으로 중요한 Parameter

- 1순위) Learning rate
- 2순위) Hidden size

Parameter Tuning

(1) Memory Cell 선택	BasicRNN, LSTMCell, GRUCell, LayerNormBasicLSTMCell 비교
(2) Learning Rate	[0.001, 0.01] 0.005단위, 20개 경우의 수
(3) Hidden size(unit)	[60, 200] 10단위, 15개 경우의 수
(4) Optimizer	[Nadam, Adam, RMSprop, Adagrad, Adadelta], 5개 경우의 수
(5) Batch size	[32, 288] 32단위, 9개 경우의 수
(6) Number of layer	1~5, 5개 경우의 수
(7) Activation function	[ELU, Relu, Leaky Relu, tanh] 4개 경우의 수
(8) Drop out	[0, 50%] 10%단위, 6개 경우의 수

• 기간: 2015년 1월 1일 ~ 2018년 6월 30일
• 승강장 예측 모형을 이용하여 튜닝작업 진행

변수 선택

• 예측 성능 향상을 위한 변수 선택

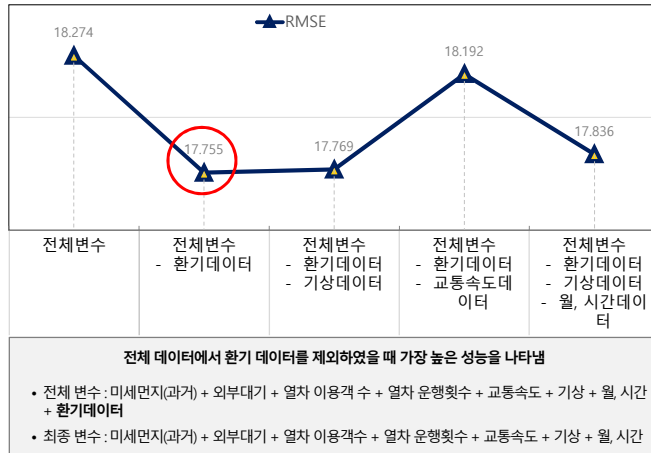
- 변수를 선택적으로 조합하여 투입함으로써 모델 성능을 테스트

2. 모델개발 > [2] Parameter Tuning > Tuning 결과 및 변수 선택

현재까지 결정된 Parameter로 모델을 조정하고, 변수를 선택적으로 조합하여 투입함으로써 최종 변수를 선택함

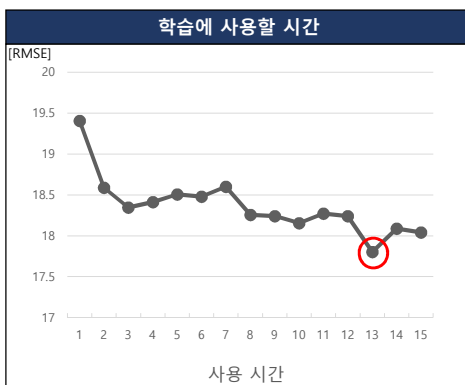
Parameter Tuning 결과

- 1) Memory Cell : BasicLSTM
- 2) Learning rate : 0.005
- 3) Hidden size(unit) : 200
- 4) Optimization function : Adam
- 5) Batch size : 96
- 6) Number of hidden layer : 1
- 7) Activation function : tanh
- 8) Drop out probability : 0%(사용하지 않음)

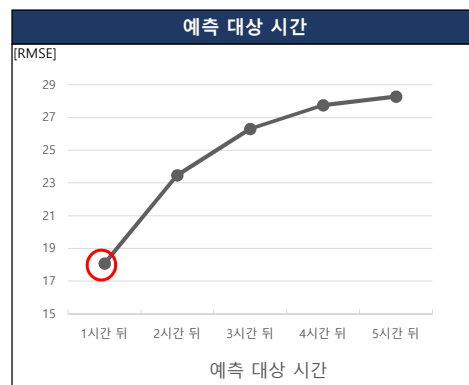


2. 모델개발 > [3] Time Simulation > 학습에 사용할 시간 및 예측 대상 시간

과거 13시간의 데이터로 1시간 후의 미세먼지를 예측할 때 가장 좋은 성능을 나타냄



- 테스트 : [1,15], 15개의 시간
- 결과 : 13시간 데이터를 활용 예측 시 Best Performance



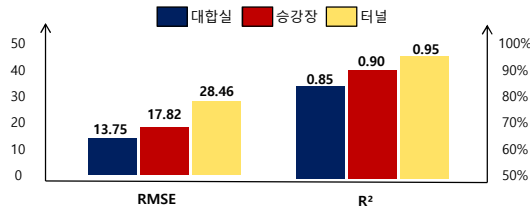
- 테스트 : [1,5], 5개의 시간
- 결과 : 1시간 뒤를 예측 시 Best Performance

3. 결과 > 미세먼지 측정 위치 별 예측모델의 성능

지하역사 내 위치별 미세먼지 농도 예측 결과는 다음과 같음

측정 위치 별 예측 성능 비교

위치	측정	평균 농도	RMSE	R ²
대합실		50.81	13.753	0.850
승강장		76.47	17.818	0.895
터널		139.15	28.455	0.947



- RMSE : 오차(실제값-예측값)가 작을수록 RMSE 값이 낮음, 0에 가까울 수록 낮은 오차, 예측대상의 크기에 영향을 받음
- R² : 실제값과 예측값으로 회귀식을 계산하였을 때, 데이터에 대한 회귀모델의 설명력, 1에 가까울수록 낮은 오차

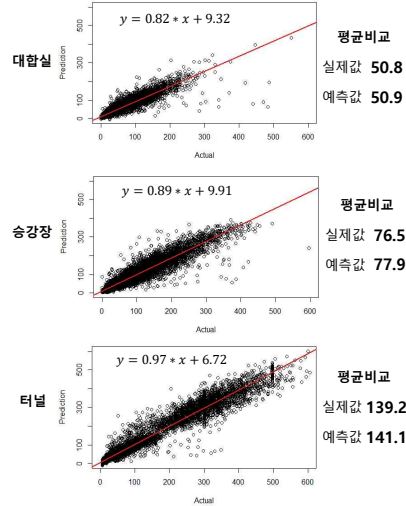
*데이터: 서울역 등 30개역의 데이터(기간: 2015.01~2018.06)

**PM2.5(RMSE/R²): 대합실(7.387/0.889), 승강장(8.626/0.907), 터널(6.666/0.869)



29

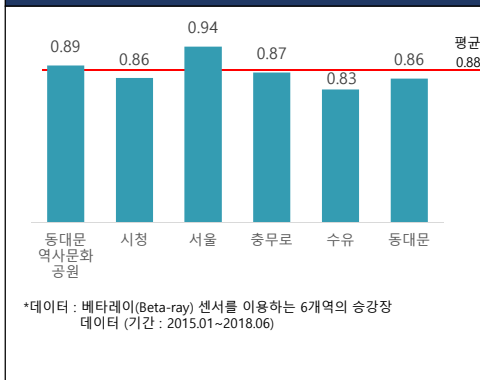
측정 위치 별 실제값 vs 예측값 비교



3. 결과 > 역사 별, 측정망 별 예측모델의 성능

역사별 예측모델 성능의 차이가 크지 않으나, 측정망별 예측모델의 성능에는 차이가 존재함

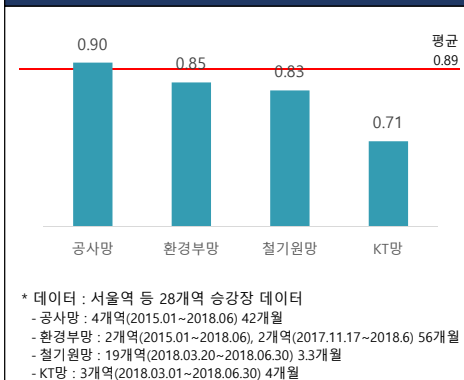
역사별 예측모델 성능 비교(R²)



*데이터: 베타레이(Beta-ray) 센서를 이용하는 6개역의 승강장 데이터 (기간: 2015.01~2018.06)

- 베타레이 센서를 이용하는 6개역의 예측모델 성능은 평균 88%로 역사별로 유사

측정망별 예측모델 성능 비교(R²)



* 데이터: 서울역 등 28개역 승강장 데이터

- 공사망: 4개역(2015.01~2018.06) 42개월
- 환경부망: 2개역(2015.01~2018.06), 2개역(2017.11.17~2018.6) 56개월
- 철기원망: 19개역(2018.03.20~2018.06.30) 3.3개월
- KT망: 3개역(2018.03.01~2018.06.30) 4개월

- 예측모델 성능은 공사망>환경부망>철기원망>KT망 순
- 학습데이터 수와 예측모델 성능이 비례

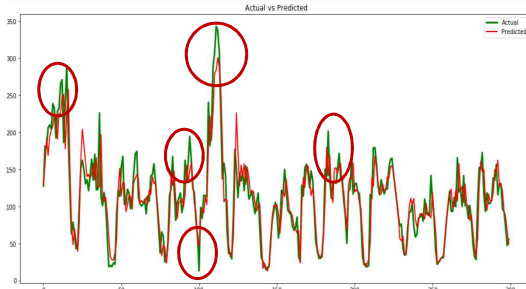


30

4. 결과 분석 > 예측모델 성능 원인 분석 > 변동폭

미세먼지 농도의 변동폭이 클 수록 예측력이 낮은 것으로 나타남

미세먼지 농도 예측값 vs. 실제값(일부)



•미세먼지 농도의 이전 이후 시간의 변동폭이 큰 경우의 예측력이 저하되는 것으로 나타남

*데이터: 서울역 등 28개역의 승강장 데이터(기간: 2015.01~2018.06)



31

변동 구간별 예측 성능

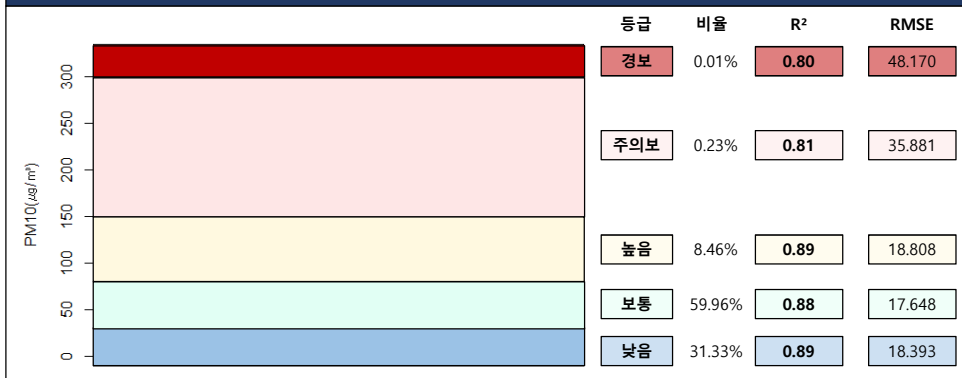
변동폭*	비율		구간별 R²	
매우 높음(100>)	1.2 %	0.40	0.40	0.89
중간(50~100)	5.3 %	0.80	0.91	
낮음(<50)	93.5 %	0.93		

* 변동 산식 : $|(T_n - T_{n-1}) - (T_{n+1} - T_n)|$

4. 결과 분석 > 예측모델 성능 저하 원인 분석 > 외부 미세먼지 농도

외부 미세먼지의 농도가 높은 구간일 수록 모델의 예측력이 떨어지는 것으로 나타남

외부 미세먼지의 농도 구간별 예측모델의 성능



•외부 미세먼지 농도가 매우 높아져 주의보, 경보 구간 시간대의 경우 다른 등급에 비해 R² 값이 작고, RMSE값은 매우 크게 나타남
•예측력이 낮아짐

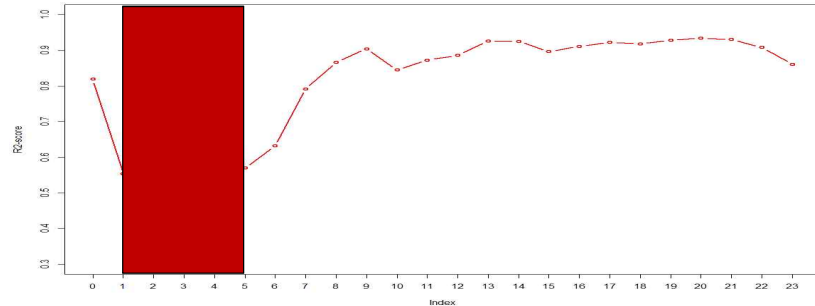
*데이터: 서울역 등 28개역의 승강장 데이터(기간: 2015.01~2018.06)



32

4. 결과 분석 > 예측모델 성능 저하 원인 분석 > 열차운행 정지 시간대

지하철 운행 정지시간대인 새벽 1시부터 5시까지의 예측력이 낮은 것으로 나타남



R ²	0.90	0.59	0.90
	0.89		

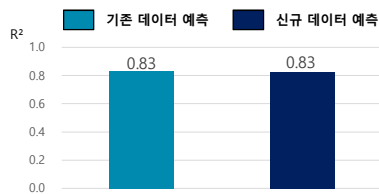
- 지하철 운행 정지시간대인 1시~5시의 미세먼지 농도 예측모델 성능이 다른 구간에 비하여 낮음
- 1~5시의 경우 예측모델의 주요 변수인 '열차 운행횟수, 이용객수'의 데이터값이 0으로 미세먼지 농도의 패턴과 무관하기 때문인 것으로 판단

*데이터: 서울역 등 28개역의 승강장 데이터(기간: 2015.01~2018.06)

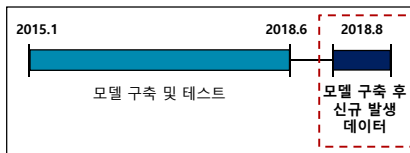
5. 모델의 성능 검증

모델 구축에 활용되지 않은 신규 데이터를 대상으로 검증 결과, 모델 구축 시 테스트한 성능과 유사한 성능을 보이고 있음

신규 데이터 예측 결과(2018.8)

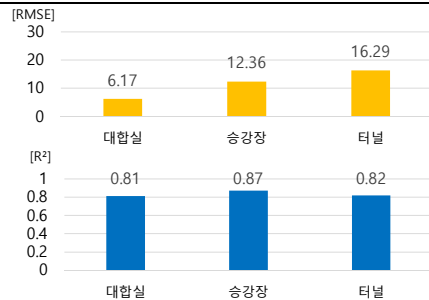


- 모델 구축 시점 이후의 신규 데이터에 대한 예측 성능은 기존 데이터 예측 성능(0.83)과 동일하게 나타남



- 기존 테스트 데이터: 수유역 승강장, 2017.11~2018.06
- 신규 테스트 데이터: 수유역 승강장, 2018.08(학습: 2015.01~2018.06)

신규 데이터 예측 결과(2018.9~2018.10)



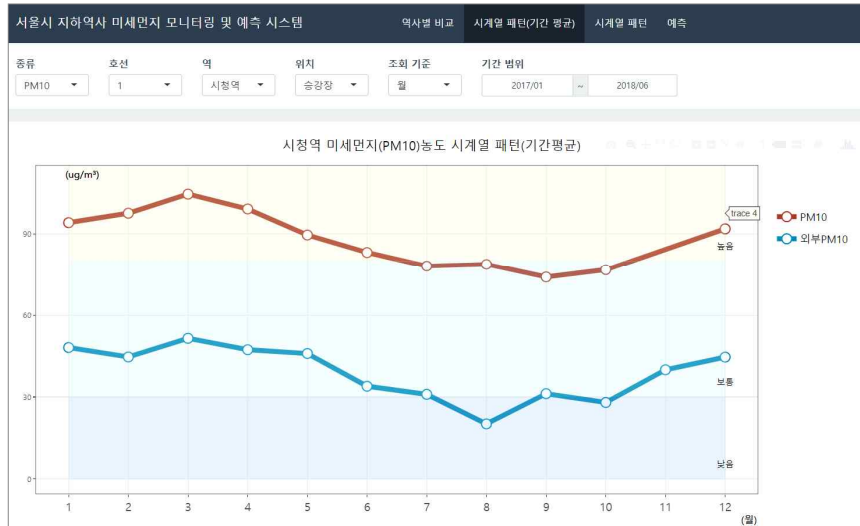
신규 데이터에 대해서도 80% 이상의 예측 성능을 보임

- 테스트 역 선정 기준
 - 승강장, 대합실: 센서의 신뢰도가 높은 베타레이 측정기가 설치된 역사를 선정(시청, 동대문, 서울, 동대문, 화곡, 청담)
 - 터널: 철기원망 중 무작위로 5곳 선정(상왕실리, 선릉, 홍대입구, 삼성, 영등포구청)

- 테스트 데이터 기간: 2018.09~2018.10

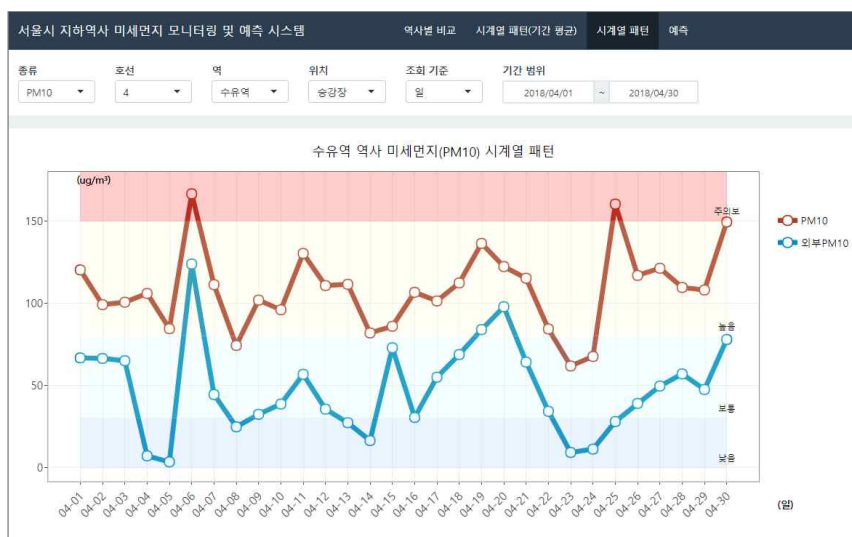
시계열 패턴(기간 평균)

농도별-호선별-역별-위치별-월/일/시간별 미세먼지 농도 시계열 패턴 비교(조회 기준별 평균)



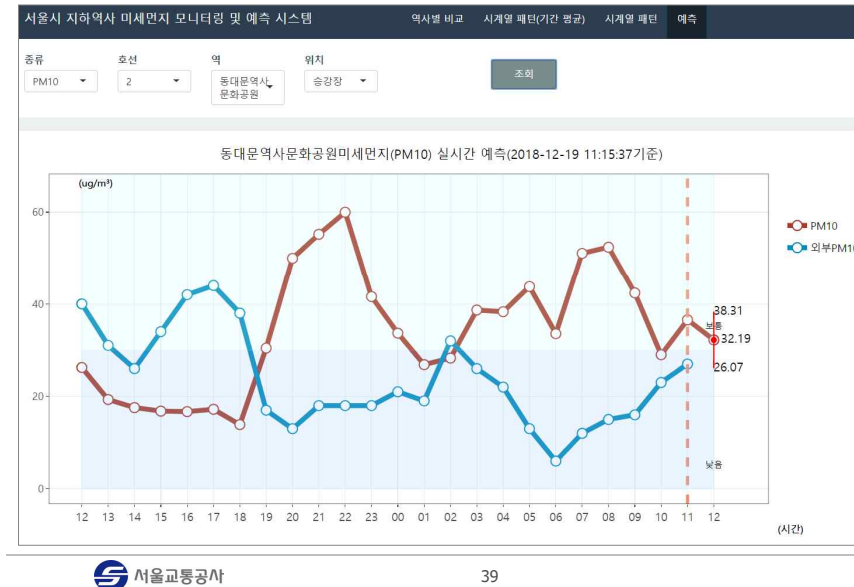
시계열 패턴

농도별-호선별-역별-위치별-월/일/시간별 미세먼지 농도 시계열 패턴(조회 기간 내)



예측값 조회

농도별-호선별-역별-위치별-미세먼지 예측값



39

목차

- I. 프로젝트 개요
- II. 데이터 분석 결과
- III. 미세먼지 예측모델 개발 현황
- IV. 대시보드 개발
- V. 관리체계 개선

개요

스마트 공기질 관리 프로세스의 원활한 운영을 위하여, 각 단계별 미진 내용을 식별하여 개선과제를 도출함

스마트 공기질 관리 프로세스별 개선과제 도출

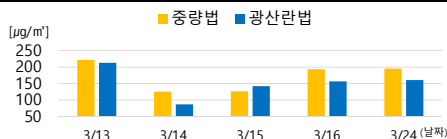
	측정	분석·모니터링	예측	제어
프로세스	지하역사 공기질 및 공기질 영향 요인 측정	공기질 현황을 모니터링하고, 영향 요인 등을 분석	빅데이터 기반의 미세먼지 농도 예측	분석과 예측 기반의 공기질 제어
As-Is	<ul style="list-style-type: none"> • 베타레이식과 광산란식 센서 활용 • 미세먼지 측정 • 센서에 따른 측정 데이터 품질의 이슈 	<ul style="list-style-type: none"> • 공기질 영향요인을 분석하고 예측하는데 필수적인 일부 데이터의 실시간 집계 불가 	<ul style="list-style-type: none"> • 기기점검, 서버다운 등의 문제로 실시간 예측에 필요한 데이터의 결측 발생 	<ul style="list-style-type: none"> • 예측결과를 활용한 스마트 공기질 제어 준비 단계로 다양한 선결요건 해결 필요
To-Be 개선 과제	① 공기질 측정 데이터 품질 보완	② 데이터 실시간 집계 개선	③ 결측 데이터 추정방법론에 의한 예측 연속성 확보	④ 예측모델 현장적용 시뮬레이션 ⑤ 지하역사 공기질 예측값 대민 정보 제공

① 공기질 측정 데이터 품질 보완

측정 → 분석 → 예측 → 제어

동일한 장소와 시간대의 미세먼지의 경우에도 측정방식에 따라 측정값이 달라지며 광산란법의 측정오차가 가장 큰 것으로 알려져 있음

측정방식에 따른 미세먼지 농도 차이 비교

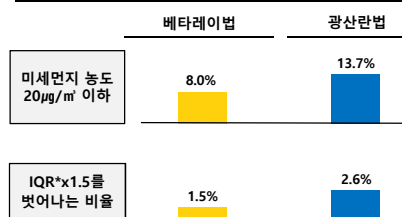


* 서울교통공사(오이도 → 당고개 방향 지하철 4호선 객차 내 PM10 농도, 2018.11)

측정방식에 따라 평균 -16~44%의 농도 차이 발생

측정기	비교
	중량법 <ul style="list-style-type: none"> • 장점 : 가장 정확한 수치를 제공 • 단점 : 실시간 측정이 어려움, 장비 고가
	베타레이법 <ul style="list-style-type: none"> • 장점 : 신뢰도가 높으며 실시간 측정이 가능 • 단점 : 측정기 부피가 큼, 장비 고가(약 2500~3000만원)
	광산란법 <ul style="list-style-type: none"> • 장점 : 비교적 저렴한 가격(Nephelometer 방식 기준 약 100~500만원) • 단점 : 습기 등 주변 환경에 따라 오차가 큼

측정방식에 따른 데이터 값 비교



- 미세먼지 농도 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하
 - 지하역사 내 미세먼지 농도가 $20\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하인 경우는 센서의 부정확성이 주요 원인일 수 있음(철기원 환경분야 전문가)
- $\text{IQR} \times 1.5$ 를 벗어나는 값
 - 측정값이 미세먼지 평균으로부터 $\text{IQR} \times 1.5$ 이상 차이나는 값인 경우 이상치로 볼 수 있음

* IQR(Interquartile Range)은 자료를 크기 순으로 정렬하였을 때 가운데 50%의 범위를 나타냄

** 서울역 등 28개역 승강장 데이터(2018.03~2018.06)

①공기질 측정 데이터 품질 보완 > 품질 보완의 필요성

측정 → 분석 → 예측 → 제어

서울교통공사에는 2019년 1사분기까지 840개의 광산란식 측정센서 설치 추진 중
예측을 통한 선제적 공기질 관리를 위해서는 광산란식 측정결과 보정을 통한 데이터 품질의 확보가 필요함

서울교통공사 공기질 측정 센서 설치 현황*

•2018년 현재

구분	총 수량	설치 대수	설치 역	1	2	3	4	5	6	7	8
배타레이	16	16	8	1	1	1	3	1	-	1	-
광산란	94	94	23	-	20	-	-	3	-	-	-

•2019년 1Q 추가 설치 예정(광산란식)

구분	총 수량	설치 대수	설치 역	1	2	3	4	5	6	7	8
지하역사		762	254	10	37	32	21	51	38	48	17
지상역사	840	46	23	-	13	2	5	-	-	3	-
전 동 차		32	16	2	2	2	2	2	2	2	2

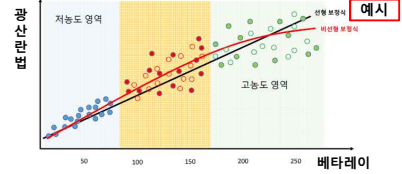
• 공기질 상태 실시간 측정 및 공기질 개선을 위한 기초
자료로 활용하고자 2019년 1Q까지 공기질 측정센서
840개를 추가 예정

• 따라서, 광산란식에 의하여 측정되는 데이터의 활용
실효성 제고를 위한 데이터 품질 보완 필요

*출처: 서울교통공사(2018. 11)



기존 센서 측정결과와 보정을 통한 품질 개선 방법



방법	설 명
단순 계산	배타레이법으로 측정된 수치를 광산란법으로 측정된 수치로 나눠 보정 계수를 구하고, 이 값을 광산란법으로 측정된 수치와 곱해 개선 (출처) 광산란법을 이용한 화력발전소 주변 입자상 물질 측정 및 분석방법 (한국에너지기술평가원, 2018.1)
단순 선형 회귀 비선형 회귀	단순 선형 회귀와 비선형 회귀 기법을 활용하여 광산란법과 배타레이 법으로 측정된 데이터를 비교 분석하면서 보정식을 도출 후 개선 (출처) 지하역사 내 미세먼지 실시간 모니터링을 위한 광산란법 보정(김서진, 2010)
다중 선형 회귀	광산란법 측정 수치의 보정을 위해 광산란법 수치, 혼잡도, 온도, 습 도를 독립변수로, 중량법 측정 수치를 종속변수로 하는 다중회귀식 을 도출 후 개선 (출처) 지하철 객실 내 미세먼지(PM10) 측정 통한 광산란법 장비 보정수식 개발(김호현, 2018.3)
미세먼지 측정값에 영향을 미치는 주요 요인인 혼잡도, 온도, 습도 를 고려하여 역사별 특징을 잘 반영할 수 있는 보정을 위해 “다중 선형 회귀”를 활용	

43

①공기질 측정 데이터 품질 보완 > 보정 모델 구축

측정 → 분석 → 예측 → 제어

배타레이 측정기를 주 역사에 설치할 수 없으므로 역사의 습도, 온도, 혼잡도를 활용한 군집분석
알고리즘을 개발하고, 군집별 대표역 데이터를 활용한 보정 모델을 구축함

군집분석 알고리즘 구축

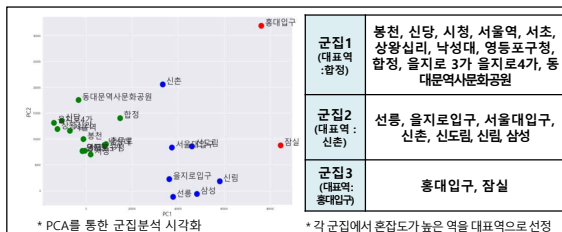
① 데이터 구축 : 각 역사별로 월별, 시간별 온도, 습도, 혼잡도 데이터셋 구축

역사이름	3.0 온도	3.0 습도	3.0 혼잡도	...	10.23 습도	10.23 혼잡도
영등포구청	20.110	32.756	254.412	...	25.616	1779.934
율지로입구	21.708	31.493	317.583	...	26.205	1276.652

* 서울 22개역, 2018년 3월~10월까지 대합실 측정기의 데이터, 1시간 단위로 평균하여 사용
** 월별 수 = 8(월) x 24(시간) x 3(변수) = 576개

② 군집분석 알고리즘 : K-Means Clustering

• 최적의 군집 수 도출 : 군집 내 개체와 중심과의 편차제곱합의 합이 급격한 변화되는 그룹의 개수



* PCA를 통한 군집분석 시각화

* 각 군집에서 혼잡도가 높은 역을 대표역으로 선정

*K-Means Clustering : 주어진 데이터를 k개의 클러스터로 묶는 알고리즘으로, 각 클러스터와 거리
차이의 분산을 최소화하는 방식으로 동작



44

보정 모델 구축 및 보정

① 대표역 데이터 수집 : 배타레이, 광산란 측정 값

역사	시간	온도	습도	혼잡도	PM10 (배타레이)	PM10 (광산란)
홍대	T1	26.55	28.00	1312.8	124	102
홍대	T2	29.88	25.54	692.5	112	98
홍대	T100	34.37	51.12	421.5	132	124

② 다중 회귀 보정 모델 구축

$$(보정값) = \beta_1 * (온도) + \beta_2 * (습도) + \beta_3 * (혼잡도) + \beta_4 * (광산란 측정값)$$

③ 군집 내 나머지 역사의 광산란 값 보정

역사	시간	온도	습도	혼잡도	PM10 (광산란)	모델	PM10 (보정값)
잠실	T101	24.32	32.00	535.8	124		119
잠실	T102	27.34	33.34	325.5	112		107

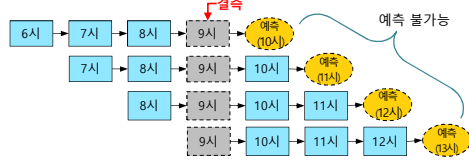
③결측 데이터 추정방법론에 의한 예측 연속성 확보 > As-Is

측정 → 분석 → **예측** → 제어

시계열 예측 모델의 특성상 1개 시점의 데이터 결측 시 일정시간 예측이 불가능한 상황이 발생하며, 현재 다양한 원인으로 데이터 결측이 발생하고 있음

데이터 결측 시 예측모델 활용 문제

• 시계열 모델에서의 데이터 결측



시계열 예측모델의 특성 상 1개 시점의 데이터 결측 시, 향후 일정시간동안 예측이 불가능함

데이터 구분	다양한 결측 원인
내부 미세먼지	기기 점검, 동작 불량, 서버와 측정기 연결 단절 등
외부 미세먼지	과부하로 인한 서버다운, 서버 접속 오류, 데이터 업로드 지연 등
교통속도	
기상	
열차 운행 횟수	(결측 없음)
이용객수	

데이터 결측으로 인한 예측 불능 사례

1. 내부 미세먼지 데이터

- 수유역 내 측정기 점검 : 11월 22일 16시부터 1시간 가량 대합실, 승강장, 터널 내 미세먼지 측정기 점검으로 인한 데이터 누락

2. 외부 미세먼지 데이터

- 서울시 대기환경정보시스템 데이터 업로드 지연 : 3시간 동안 오픈 API 데이터 조회 시 NA 값이었으나, 일정시간 후 정상 값으로 대체되어 활용 가능

3. 교통 데이터

- 서울시 열린데이터광장 서버 다운 : "[ERROR-500] 서버 오류입니다. 지속적으로 발생시 열린 데이터 광장으로 문의(Q&A) 바랍니다." 내용 출력, 서버 담당자에게 해당 내용을 전달 후 서버 정상 작동

4. 기상 데이터

- 기상청 서버 접속 오류 : 약 1시간 가량 오픈 API 데이터 조회가 불가능했으나, 다음 시간대 부터 정상 조회 가능해짐

③결측 데이터 추정방법론에 의한 예측 연속성 확보 > To-Be

측정 → 분석 → **예측** → 제어

미세먼지 예측모델에서 사용되는 데이터를 대상으로 방법론을 적용·비교한 결과, KALMAN 방법론이 대부분의 변수에서 오차가 적게 나타남. 해당 알고리즘을 구현하여 예측모델에 추가함

결측값 보완 방법론 적용 및 비교

변수 및 방법론별 RMSE* 비교							
데이터 분류	변수명	MA (simple)	MA (linear)	MA (exponential)	KALMAN	LOCF	SS (SeasonSplit)
기상 데이터	습도	6.6	5.1	3.7	1.9	5.3	14.7
	강수량	0.15	0.15	0.15	0.14	0.13	0.25
	기온	1.4	1.1	0.8	0.3	1.2	2.8
	풍속	0.44	0.39	0.34	0.30	0.48	0.96
교통 데이터	평균속도	2.25	1.8	1.4	0.9	1.8	2.3
외부 미세먼지 데이터	미세먼지 농도	6.9	6.1	5.4	4.8	6.9	22.9
내부 미세먼지 데이터	미세먼지 농도	16.7	14.6	12.8	11.6	16.9	20.6

* RMSE(Root Mean Square Error) : 평균 제곱근 오차. 실제값과 추정값의 차이. 0에 가까울 수록 실제값과 유사

* 위 표의 RMSE 수치는 30개 역사 중 데이터의 연속성을 만족하는 24개 역사의 RMSE 수치를 평균한 값

* 기상데이터 내 풍향 변수(0~360도)의 경우, 카테고리화한 후(ex:북서풍, 동남풍), 전 시간의 풍향을 활용하여 결측값을 대체

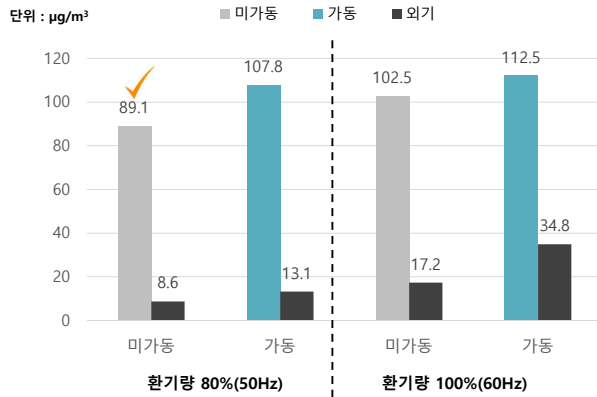
- 현재 데이터 상의 비정상 데이터는 13% 수준. 동일한 비율로 결측값을 임의로 생성한 뒤 실제값과 비교하여 방법론을 적용함
- 각 변수별 가장 좋은 방법론을 구현하여 예측모델에 추가

④예측모델 현장적용 시뮬레이션 > 1) 환기 조건별 효과 분석

측정 → 분석 → 예측 → 제어

내부 미세먼지 농도 자체는 [환기 80%, 공기청정기 미가동]시에 가장 낮았으나, 외부 미세먼지 농도도 가장 낮은 것으로 나타남. 따라서 단순 농도보다는 외기 대비 내부 미세먼지 농도를 분석할 필요가 있음

환기 조건 및 공기청정기 가동여부에 따른 내·외부 미세먼지 농도



• 환기량 100%(60Hz)와 환기량 80% (50Hz) 가동시의 미세먼지 농도 비교

- 환기 0%(OFF)의 경우 지하철 승객 민원 발생가능성으로 불가능
- 환기를 50%(30Hz)로만 줄여도 환기량이 거의 없음

• 미세먼지 농도 자체는 [환기 80%, 공기청정기 미가동]일에 가장 낮은 것으로 나타남

- 하지만, 해당일에 외부 미세먼지 농도도 가장 낮은 것으로 나타남
- 따라서, 단순한 농도 비교보다는 비교 분석이 필요

데이터 : 환기(60/50Hz) 공기청정기(가동/미가동) 옵션별로 4일씩 시뮬레이션 진행. 4일*17시간=총 68개 관측치
*외기 : 서울 강북구 삼양로 139길 49 우이동 주민센터 측정소



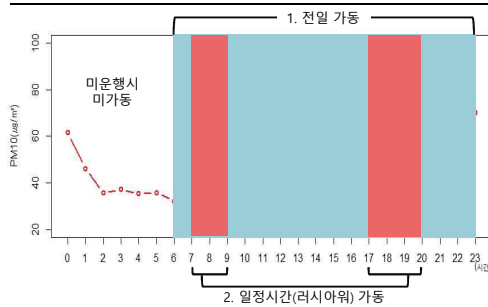
47

④예측모델 현장적용 시뮬레이션 > 2) 경제적 가동시간 분석

측정 → 분석 → 예측 → 제어

전일가동과 일정시간(러시아워) 가동 Simulation 결과, [전일가동] 시 공기청정기 가동 효과가 더 높은 것으로 나타남

가동시간 Simulation 옵션



- 적은 비용으로 최대 효과를 낼 수 있는 운영안 필요
- 러시아워만 가동 시: 약 년 간 9억 9천만원* 전기세 절감 가능
- 통계적으로 유의미한 차이가 없을 경우, 러시아워만 가동
- 전일 가동 vs. 일정시간(러시아워) 가동 Simulation
- 1. 전일 가동: 06~23시
- 2. 일정시간 가동: 07~09시, 17~20시

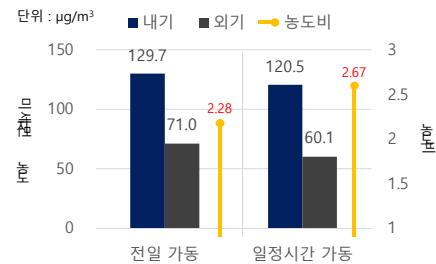
*공기청정기 소비 전력량(kW)×2018년 1월~11월 서울교통공사kW당 평균전기요금×일별가동시간×공기청정기대수(16대 가정)×역수(254개 역)×가동일 수



48

일별 내·외부 미세먼지 농도의 평균과 농도비*

* 전일 가동/일정시간 가동, 각각 5일 총 10일



• 미세먼지 농도 자체는 [일정시간 가동]시 더 낮은 것으로 나타남

- 농도 대비 내부 미세먼지 농도 분석 필요
- [일정시간 가동]시 120.5μg/m³, [전일 가동]시 129.7μg/m³
- [전일 가동]시 효과가 더 높은 것으로 판단됨
- [일정시간 가동]의 내외부 미세먼지 농도 비는 2.67, [전일 가동]은 2.28로 전일가동 시 약 15% 낮음

④예측모델 현장적용 시뮬레이션 > 3) 예측 및 공기청정기 연계

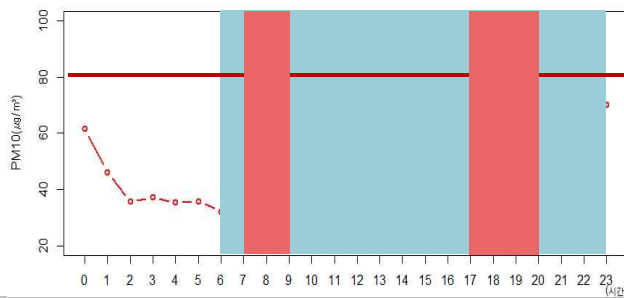
측정 → 분석 → 예측 → 제어

공기청정기 [전일가동] 시 효과가 높으나, 미세먼지 총음수준에서는 공기청정기 가동이 불필요한 것으로 판단하여, 미세먼지 농도 나쁨수준 예측을 통한 공기청정기 가동 Simulation을 추가 진행함

예측 모델 활용 Simulation 필요

- [전일 가동] 시 공기청정기 효과가 더 우수하나 미세먼지 농도 '보통'(80 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 이하인 경우, 공기청정기 가동 불필요
- 수유역 승강장 미세먼지(PM10) 일평균 농도 (2018년 기준, 12월은 11일까지 평균)

월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	평균
$\mu\text{g}/\text{m}^3$	166.33	160.25	129.28	108.52	93.49	97.51	77.93	62.44	66.45	90.64	102.89	102.32	104.84



- Simulation 대상 시간대
 - 미세먼지 농도 '나쁨' 수준 구간
 - 러시아워 이외 시간 대상, 미세먼지 '나쁨' 수준 예측 시점에 공기청정기 가동하여 효과 Simulation 수행

- Simulation 목적
 - 개발된 예측 모델의 현장 적용 가능성 테스트
 - 실시간 데이터 집계 및 예측, 공기청정기 가동
 - 예측에 의한 공기청정기 가동 시 실제 미세먼지 농도 저감

서울교통공사

49

④예측모델 현장적용 시뮬레이션 > 4) 자동제어의 효과성 제고방안(1/2)

측정 → 분석 → 예측 → 제어

예측 결과를 활용한 스마트 공기질 제어의 효과성 제고를 위해서는 다양한 선결 요건의 해결이 필요함

구분	AS-IS	TO-BE
타이머	<ul style="list-style-type: none"> • 수동 조작 방식 - 공기청정기 On/Off 원격 제어 불가능(통신 미 연결) - 각 공기청정기 개별 수동 조작 필요 - 정확한 시간 설정이 어려움 	<p>[디지털 타이머]</p> <ul style="list-style-type: none"> • 원격 자동 제어 방식으로 변경 - 디지털 타이머로 교체 - 공기청정기 타이머와 제어실 통신연결 - 수유역 타이머 교체 비용 : 160여 만원(16개 기준)
필터 교환 주기	<ul style="list-style-type: none"> • 미세먼지 농도와 무관하게 정해진 주기에 따라 필터 교체 <p>승강장 기준 PM10 150$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 시간</p> <p>필터 종류 및 교체 주기</p> <ul style="list-style-type: none"> - 프리 필터 : 2주 1번 - 이디올 필터 : 1달 1번 - 헤파 필터 : 2달 1번 - 카본필터 : 6달 1번 	<ul style="list-style-type: none"> • 집진효율을 최적화할 수 있는 필터 교체 - 공기청정기 가동시간 및 미세먼지 농도를 고려하여 교체 시기 결정 - 집진효율을 고려한 필터 교체 시점 계산 및 적용 (2019년)
외부 미세먼지 차단	<ul style="list-style-type: none"> • 상위 부서로부터 공문 수신 후 급기 차단(외기 150$\mu\text{g}/\text{m}^3$) - 외기 농도 증가에 즉각적 대응이 어려움 - Simulation 기간 중 미세먼지 농도 150$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상시 급기 차단이 없었음 (10/16 15~16시, 10/17 10~11시, 11/27 19~24시) 	<ul style="list-style-type: none"> • 급기 차단 실시간 화 - 외부 역사 미세먼지 측정 기준, 150$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상인 경우 급기 차단 자동화(기계적)

서울교통공사

50

④예측모델 현장적용 시뮬레이션 > 4) 자동제어의 효과성 제고방안(2/2)

측정 → 분석 → 예측 → 제어

예측 결과를 활용한 스마트 공기질 제어의 효과성 제고를 위해서는 공기청정기 외의 방안 강구, 향후 추가 Simulation을 진행할 필요가 있음

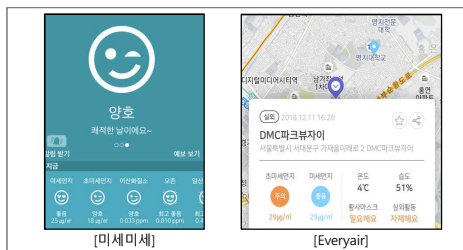
구분	AS-IS	TO-BE
공기 청정기 만의 한계	<ul style="list-style-type: none"> 공기청정기만으로 미세먼지를 저감하는데는 한계가 존재 -예측 후 공기청정기 2시간 가동시 $112\mu\text{g}/\text{m}^3$에서 $114.5\mu\text{g}/\text{m}^3$로 13.8% 저감되나 여전히 나쁨 수준 -전일 가동시에도 미세먼지 농도 나쁨 수준($112.5\mu\text{g}/\text{m}^3$)유지 	<ul style="list-style-type: none"> 유동해석을 통한 공기청정기 설치 위치 결정 -예시 2019년 서울교통공사 계획 <ul style="list-style-type: none"> -공조시스템 급 배기량 균형 제어를 위한 바닥집진배기 장치 개발 -공조시스템 제어장치 개발
시뮬레이션 결과 일반화 한계	<ul style="list-style-type: none"> 대상의 한계 <ul style="list-style-type: none"> -수유역 1개 역사만을 대상으로 한 Simulation 기간의 한계 <ul style="list-style-type: none"> -미세먼지 농도가 지속적으로 증가하는 가을(9~11월)에만 진행 	<ul style="list-style-type: none"> 추가 Simulation <ul style="list-style-type: none"> -환경변수(외기, 온도, 습도, 승객수 등)가 각각 다른 다양한 역사 별 추가 Simulation 진행 -미세먼지 농도 수준(미세먼지 좋음, 보통, 나쁨, 매우 나쁨) 별 미세먼지 저감 효과 분석

⑤지하역사 공기질 예측값 대민 정보 제공

측정 → 분석 → 예측 → 제어

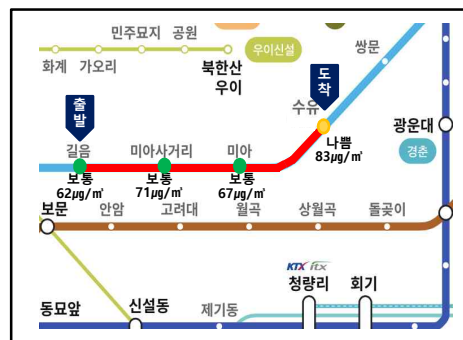
기존 미세먼지 예보 앱을 통해 지하역사의 미세먼지 정보를 파악하기 어려움
각 지하역사 미세먼지 예측 정보를 제공하여 지하철 이용자의 미세먼지 노출을 최소화 노력 유도

기존 미세먼지 정보 제공 앱 사용 실태



제공 현황	<ul style="list-style-type: none"> 현재, 정부 기관에서 운영 중인 국민 생활 편의 앱은 1,235개, 건강/날씨와 관련된 앱은 약 10% 가량 공사는 미세먼지 실시간 데이터 공개 계획(2019년)
효과	<ul style="list-style-type: none"> 미세먼지 앱 사용이 미세먼지로부터 노출을 최소화 하려는 노력과 미세먼지 관련 정보를 찾아보도록 하는 실질적인 효과가 검증되었으며 장기적으로 미세먼지로 인한 질병 발생률을 낮출 것으로 기대-“미세먼지 앱 이용 효과에 대한 연구”(한국 PR학회, 2016)
한계	<ul style="list-style-type: none"> 지하철 이용을 위한 미세먼지 예방에 대한 정보 제공 앱은 부재

지하역사 미세먼지 앱 제공(예시)



- 지하철 경로 안내 앱과 함께 제공되며 지하역사별 실시간 미세먼지 농도와 1시간 후 미세먼지 농도를 함께 안내하여 고객들의 쾌적한 대중교통 이용을 위한 정보 제공
- 지하철 이용시 고객들의 미세먼지로부터의 노출을 최소화 하기 위한 노력 효과 기대

관리체계 개선 로드맵

서울교통공사와의 협의를 통해 공사에서 현재 진행중인 미세먼지 저감 과제와 연계하여 본 과제 관련 개선 로드맵 수립

지하역사 과제 7개(기존 과제*)	추진 년도	As-Is	To-Be (본 과제 연계)	2019			
				Q1	Q2	Q3	Q4
승강장 내 공기청정기 설치	'19~'23	• 254개 지하역사 - 1개역 16대 - 4단계 필터시스템, 풍향 15m³/m 이상	원격제어 방식의 디지털 타이머 장착 미세먼지 농도를 고려, 집진 효율에 따른 필터 교체 주기 설정 유동해석을 통한 공기청정기 위치 결정 추가 Simulation(역사별, 미세먼지 수준별)				
베타선흡수법 자동측정망 설치	'19~'20	• 미세먼지 측정 및 데이터 실시간 공개	지하역사 공기질 예측값 대민 정보제공 앱 개발 추가				
광산란식 미세먼지 측정기 임차 설치	'19~'22	• 지하역사 762대 포함 총 840대 설치('19.2월 설치)	역사 군집분석 알고리즘 적용 광산란 측정 값 보정 모델 적용				
지하역사 공조시스템 지능화 사업	'19~'22	• 스마트 공기질 측정기 개발(5개지점 동시측정) • 스마트 미세먼지 저감장치 개발(벽면형) • 스마트 공기질 제어 운영 SW 및 HW 개발 • 바닥집진 배기 장치 개발	본 과제 개발 미세먼지 예측 모델 활용 예측 연속성 확보를 위한 결측 데이터 추정 알고리즘 적용 실시간 데이터 전송체계 구축(이용객수 실시간 집계) 공조시스템 제어 장치 개발 시 외부 미세먼지 차단 실시간 화 적용				
역사 공조설비 필터 개량	'19~'22	• 노후 설비 교체	(N/A)				
기계식 물청소 전역사 확대	'19	• 습식 청소기 전역사 보급	(N/A)				

*지하역사, 전동차, 지하철널 3개분야 20개 과제 진행 중, 본 과제 관련 과제는 지하역사 과제