

노후 화력발전소 가동중단에 따른 대기질 개선효과 분석

김 동 혁

충남연구원 기후변화대응연구센터 책임연구원
dhkim@cni.re.kr

2017년 6월, 전국의 30년 이상 노후 석탄화력 발전소가 한 달 동안 일시 가동중단에 들어감. 충남에서는 보령과 서천에 각 2기씩 총 4기가 해당되는바, 그에 따른 주변지역 대기질 변화여부를 살필 필요가 제기되어 연구를 수행함.

CONTENTS

1. 연구개요
2. 대기일반현황
3. 대기질 개선효과
4. 결론 및 제언

요약

- 본 연구에서는 보령과 서천화력발전소의 30년 이상 된 일부 노후 발전기의 가동중단이 주변지역 대기질에 미치는 영향을 검토하여 대기환경정책의 실효성과 지속성에 대해 긴급히 진단하고자 하였음
- 본 연구는 크게 관측자료를 토대로 한 대기(기상 및 대기질) 일반현황 분석과 기상 및 대기질 모델링을 이용한 개선효과 분석 부분으로 구분되며, 사용한 자료에는 기상청과 환경부의 정규자료가 포함됨
- 보령지점에서 2017년 6월 기상을 종합하면, 누적강수량은 21.1mm로 매우 적은 가운데 바람은 남서풍이 탁월하여 기상학적으로 오염물질의 외부유입 가능성은 낮았지만 대기세정효과는 기대하기 어려운 조건이었음
- 실제로 가동중단에 의해 총먼지 15톤/월(41.0%), 황산화물 330톤/월(37.5%), 질소산화물 525톤/월(49.5%), 미세먼지(PM2.5) 126톤/월(40.6%)의 대기배출 저감효과가 있었음
- 이러한 저감량을 토대로 모델링 예측을 수행한 결과, 대기농도에 있어 일평균 최대 PM10 $0.46\mu\text{g}/\text{m}^3$ (37.5%), PM2.5는 최대 $2.46\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO2 3.66ppb(30.8%), NO2 8.79ppb(30.8%) 낮게 모의되었고, 발전소 남동방향 반경 10km 이내 지역에서 대기질 개선효과가 크게 나타났음
- 석탄화력발전소 가동중단은 주변지역 외에도 충남전역 대기질 개선에 효과가 있는 것이 확인된 만큼 기상조건과 외부요인, 특히 전력수급에 큰 차질이 없는 시기를 선택하여 보다 적극적인 발전소의 탄력 운용을 제안함

01

연구개요

1. 연구배경

- 지난 5월 15일 문재인 대통령은 미세먼지 감축 대책의 일환으로 가동 30년 이상 노후 석탄화력발전소에 대해 6월 한달 간 일시 가동 중단을 지시함
 - 당시 전국에 총 59기가 운영 중이었으며, 이중 30년 이상 노후 발전기는 10기로 충남에는 보령과 서천에 각 2기씩 총 4기가 해당함
- 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지는 직접배출 외에 NOx, SOx 등의 전구물질에 의해 대기에서 2차적으로 생성되는 양까지 고려한다면 가동중단에 의한 대기 중 미세먼지 저감 효과는 기대보다 클 것으로 예상됨
- 충남의 석탄화력발전소는 가동량으로 보아 전국 최고 수준이며 특히나 굴뚝이 연안에 밀집되어 있어 고농도 미세먼지 유발 가능성이 높으며, 기상조건에 따라 충남 전역이 영향권에 들어가므로 가동중단이 지역 대기질에 미치는 영향을 반드시 살펴볼 필요가 있음
- 가동중단 전후의 대기질 개선효과를 파악하는 것은 측정자료에 기초하여 정량 파악하는 방법이 우선적으로 고려될 수 있겠지만, 가동중단 당시 보령과 서천지역에는 국가나 지자체에서 운영 중인 대기질 측정지점이 없어 기상과 배출조건이 다른 시기와 비교해야하는 한계가 있어 본 연구에서는 동일한 조건을 반영할 수 있는 대기질 모델링을 통해 개선효과를 살펴는 방법을 택함

2. 연구범위

- 시간적범위 : 최근3년(2015-2017) ※ 모델링기간: 2017년 6월 한달
- 공간적범위 : 충남전역
- 예측모델 : WRF¹⁾, CALPUFF²⁾, CMAQ³⁾, SMOKE⁴⁾, HYSPLIT⁵⁾
- 예측방법 : BFM 기법⁶⁾
- 예측물질 : CALPUFF(PM10, SO₂, NO₂), CMAQ(PM2.5)
- 분석자료 : 기상청 지상관측자료, 일기도 및 기상연보,
환경부 대기질측정자료, CAPSS 배출량 자료, 충남도 TMS굴뚝배출량,
보령 및 서천화력 영향평가보고서

3. 연구내용

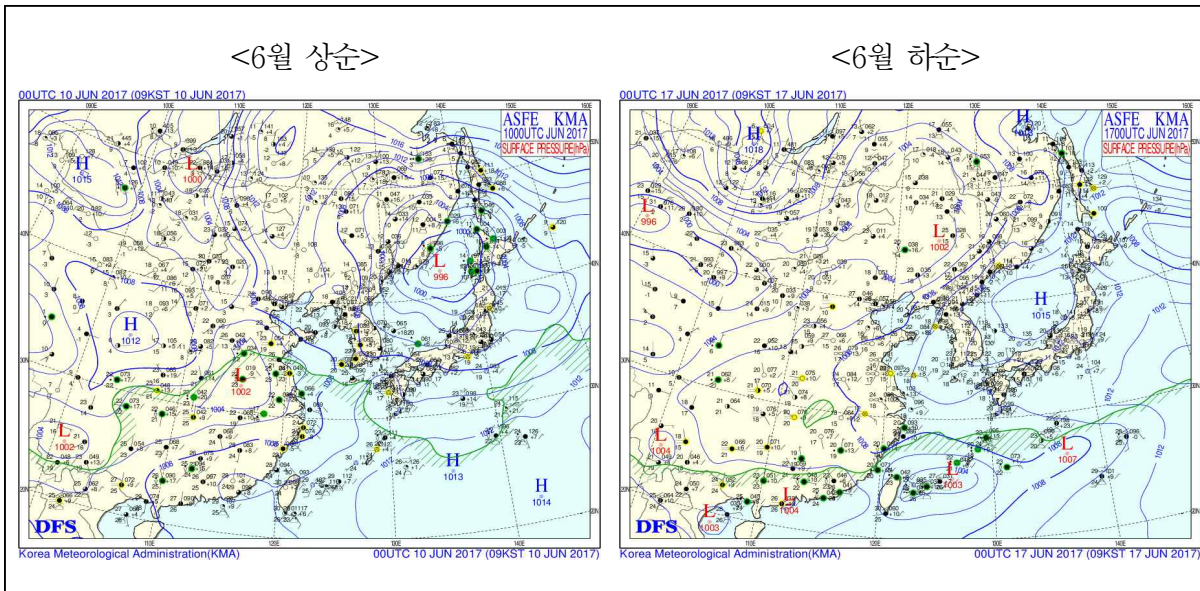
- 도내 노후 화력발전소 주변지역 대기일반현황 분석과 대기배출량 산정
- 가동중단에 의한 대기질 개선효과 분석 모델링
 - 대기질 공간분포 및 확산범위 : 확산모델(CALPUFF)
 - 미세먼지(PM2.5) 기여도 분석 : 광화학모델(CMAQ)
- 전력수급 문제를 고려한 정책의 실효성 및 타당성 분석

1) WRF(The Weather Research and Forecasting Model)은 미국 국립대기환경연구소(NCAR, National Center for Atmospheric Research)를 중심으로 개발된 기상예측모델
2) 굴뚝에서 배출된 연기덩어리(PUFF)가 대기에서 확산되어 수용지점에 미치는 영향을 종합하여 농도를 계산하는 모델
3) CMAQ(Community Multiscale Air Quality)은 미국환경청(US EPA, United States Environmental Protection Agency)에 광화학 대기질 예측 모델
4) 배출목록을 기본으로 대기질 모델에 맞는 시간별, 격자별, 종분화된 배출량 입력자료를 생성하기 위한 모델
5) HYSPLIT (HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory) 미국 해양대기청(NOAA, National Oceanic and Atmospheric Administration)에서 개발한 대기입자확산 및 역추적 모델
6) Brute Force Method : 노후 화력발전소 가동 시 배출량을 입력한 결과와 미가동시 배출량을 입력한 결과를 비교·분석하는 기법(환경부 보도자료, 2017.07.26.)

02 대기일반현황

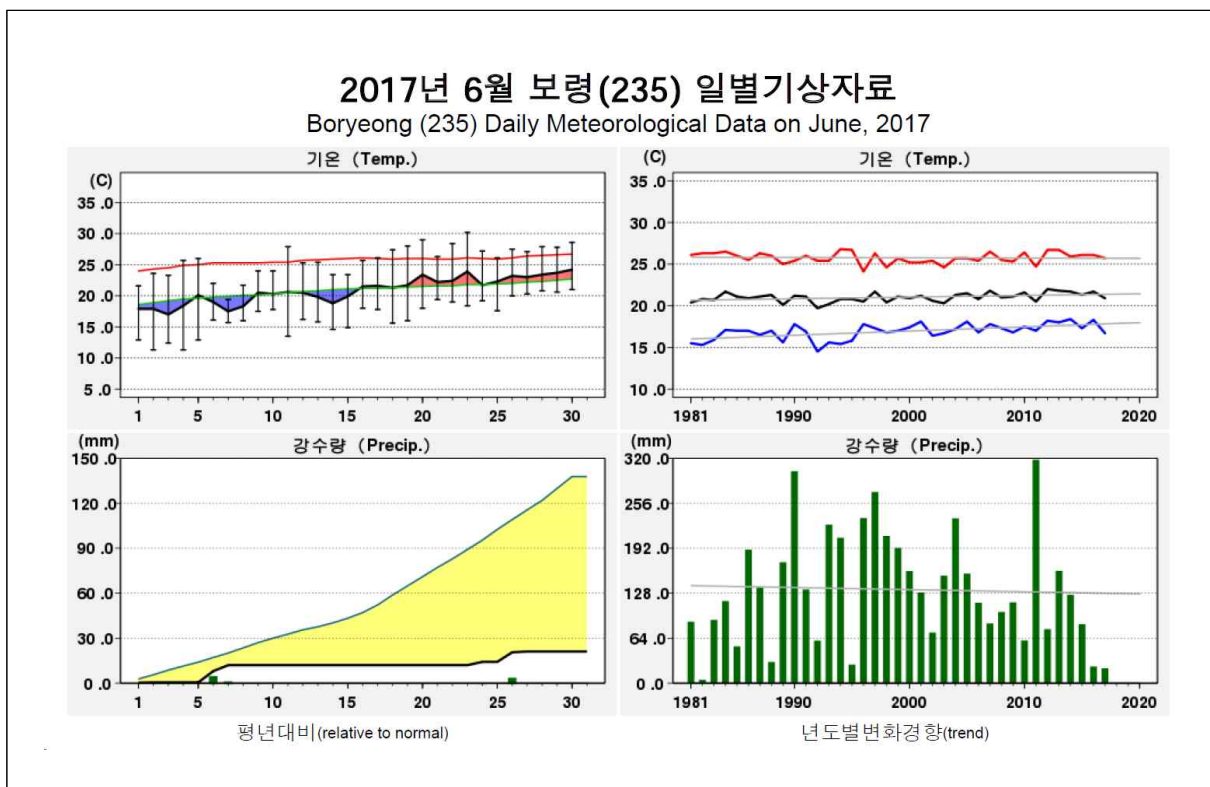
1. 기상현황

- 일반적으로 6월은 여름이 시작되는 시기로 강한 일사로 인해 낮기온이 크게 상승하고 하순에는 장마전선이 형성되면서 강수가 집중되는 시기이지만, 올해 6월은 기압계의 잦은 변동으로 기온의 변동폭이 크고 하순경에는 고기압의 지배하에 기온이 크게 상승하고 강수량은 매우 적은 것이 특징이었음(그림1)

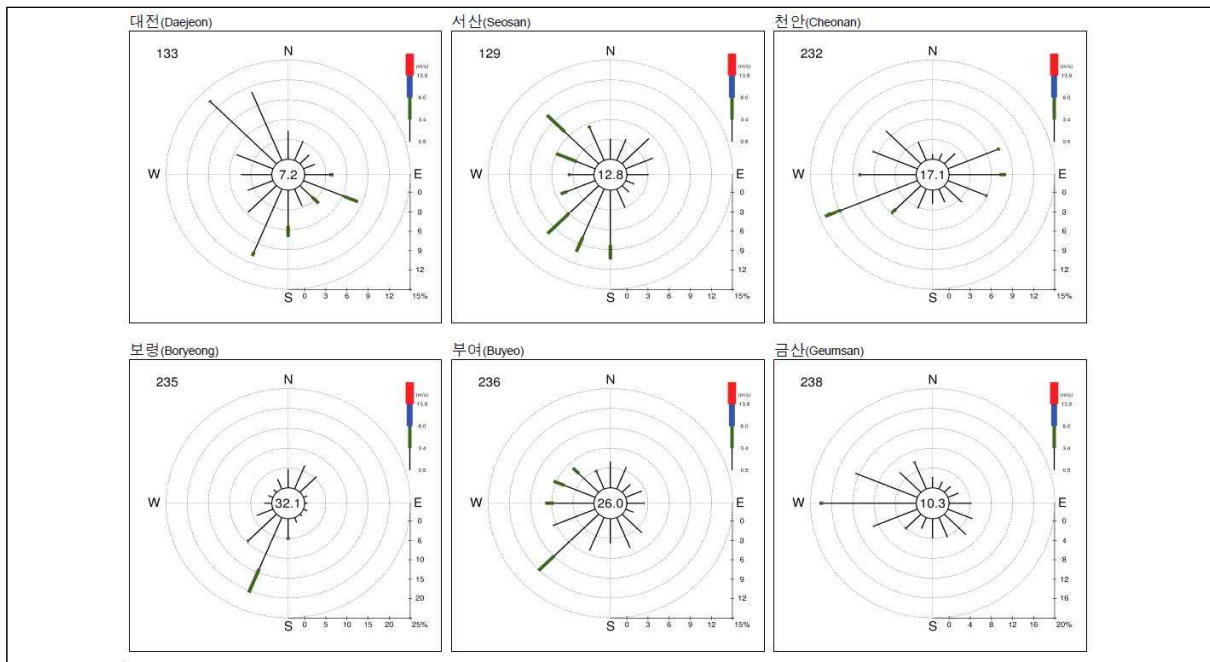


[그림 1] 2017년 6월 상하순 한반도 주변 대표적 기압배치

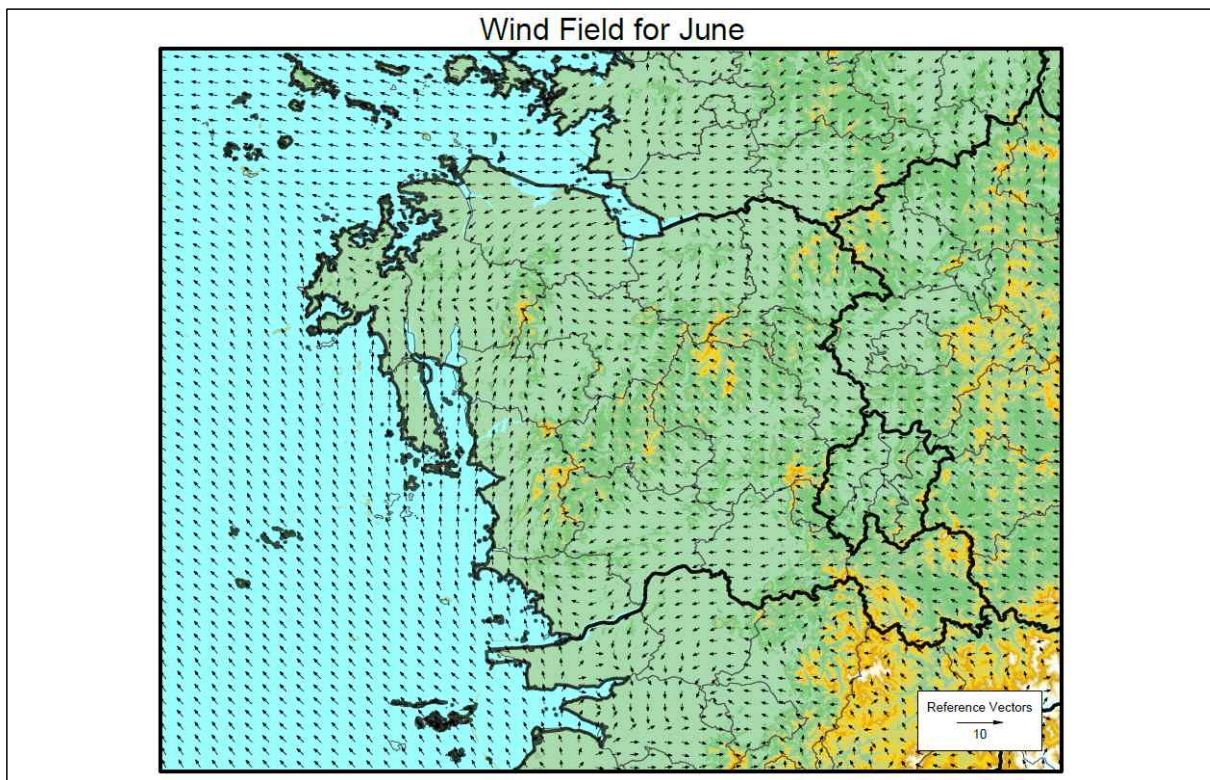
- 실제로 보령의 6월 기온은 지난 30년 평균(평년)대비 상순에는 낮았고 하순에는 오히려 증가하는 경향이었으며, 강수량은 6월 5일과 26일에 단속적인 비가 있었지만 누적강수량은 21.2mm를 나타내어 평년대비 매우 적었음(그림2)
 - 참고로, 지난 30년간 보령에서는 최저기온(파란선)의 증가와 강수량의 감소가 뚜렷하게 나타남
- 충남지역의 6월 바람은 고기압과 저기압의 빠른 이동에 따른 잦은 기압계 변동으로 내륙에서는 풍계가 복잡하게 나타난 반면에 해안지역인 보령에서는 남서풍이 탁월하였고 무풍(0.5m/s 이하)의 빈도가 32.1%로 높은 것이 특징이었음(그림3, 그림4)
- 종합적으로 화력발전소 주변으로 지상바람은 남서풍이 탁월하여 오염물질의 외부유입 가능성은 낮았지만 6월 한달간 강수량이 매우적어 대기세정효과는 기대하기 어려운 조건이었음



[그림 2] 보령지역 6월의 평년대비 기온과 강수량 변화(기상월보, 기상청)



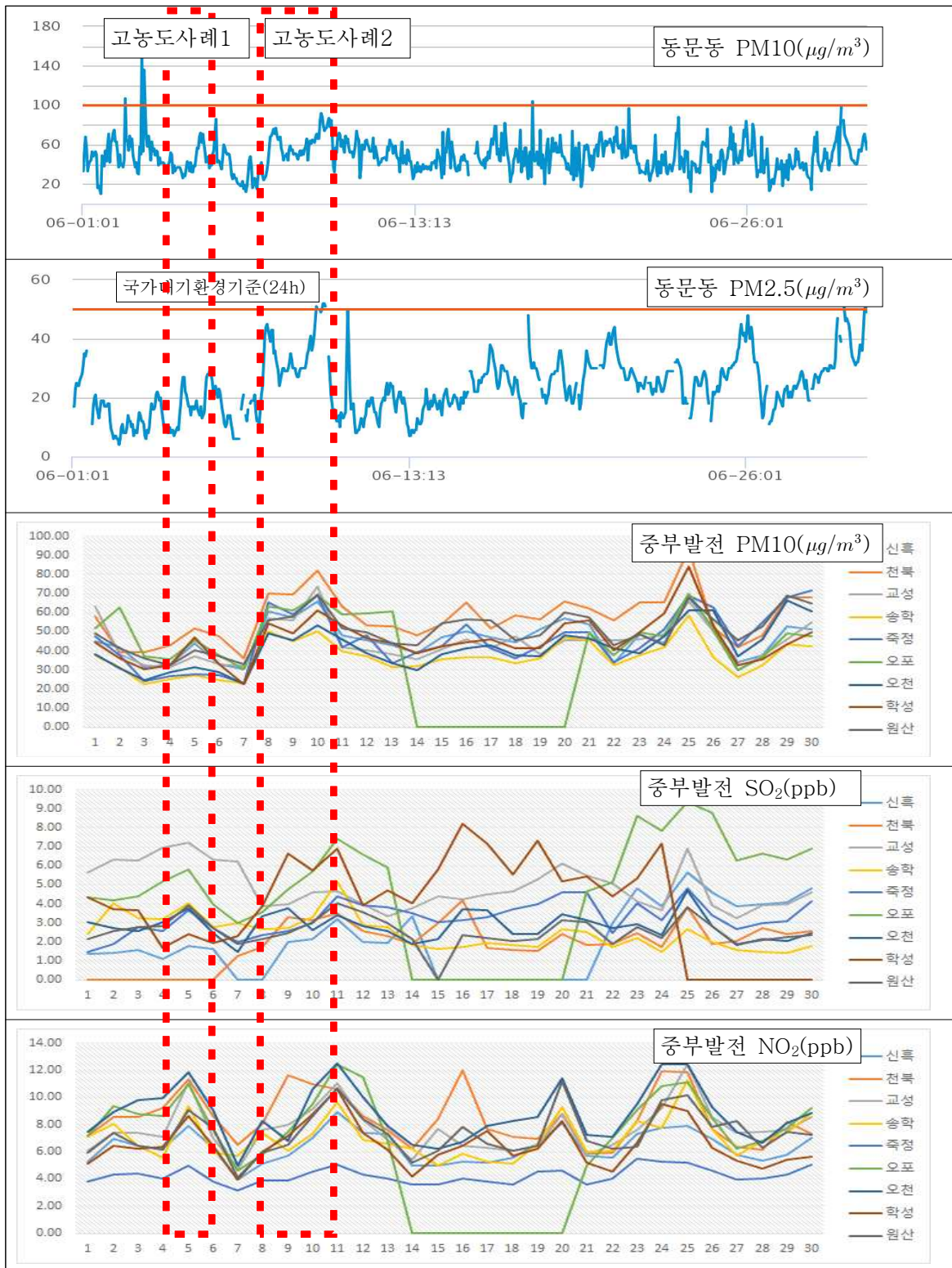
[그림 3] 지상기상관측지점에서의 6월 바람장미



[그림 4] 충남지역 6월 평균 지상바람분포

2. 대기질 현황

- 현시점에 보령과 서천에 대기질 측정소가 운영 중에 있지만 본격적인 가동은 7월이나 이루어져 두 지역에서 6월 기준 측정자료가 없는 상황에서 본 연구에서는 서산시 동문동(측정지점번호: 534442)의 자료와, 중부발전에서 자체 운영 중인 자동측정 9개소 자료를 분석함
 - 참고로, 중부발전 자체 운영자료는 측정방식, 측정위치 선정이나 정도관리/보증(QA/QC) 절차가 대기오염공정시험 기준의 부합여부에 대해서는 판단하기 어려움이 있음(부록 1 참조)
- 그림5를 살펴보면 서산시 동문동 지점과 중부발전 자체운영 9개 측정소에서 모두 대기환경기준을 만족하고 있는데, 이는 화력발전소 가동중단에 의한 개선 효과 보다 앞서 기상현황에서 살펴보았듯이 전반적으로 대기오염물질의 외부유입이 억제되고, 대기환기효과가 원활히 작용한 결과로 판단됨
- 반면에 6월 5일은 중부발전 자체 운영지점에서 일시적으로 농도가 급격히 증가하는 경향이 나타났고(고농도 사례일 I), 6월 11일에는 PM_{2.5}에 한해서 서산시 동문동지점에서 대기환경기준을 초과하였음(고농도 사례일 II)
- 고농도 사례일 I의 경우 고기압 중심이 동해상에 위치하면서(부록2 참조) 구름이 없는 맑은 날씨를 보이고 해륙풍이 잘 발달하는 날로 화력발전소 주변지역에 영향이 클 것으로 판단되어 추가 분석을 수행함
- 참고로 고농도 사례일 II에 해당하는 6월 10일, 11일 양일은 한반도 주변에 고기압과 저기압이 대치한 가운데 북쪽의 고기압 영향이 점차 커지면서(그림1 참조) 다소 맑은 날씨를 보이고 북쪽으로부터 오염물질의 외부유입 가능성도 존재하였음



[그림 5] 서산시 동문동(1개소)과 보령화력 주변 자동측정소(9개소) 대기질 현황

3. 배출현황

- 저감된 배출량은 가동중지된 충남 화력발전(보령서천, 4기)의 실시간 굴뚝원격감시시스템(TMS)의 측정 자료로부터 산정함
 - 미세먼지는 직접배출되는 양보다 2차 생성량의 저감이 크며, 황산화물과 질소산화물의 저감에 의한 효과임

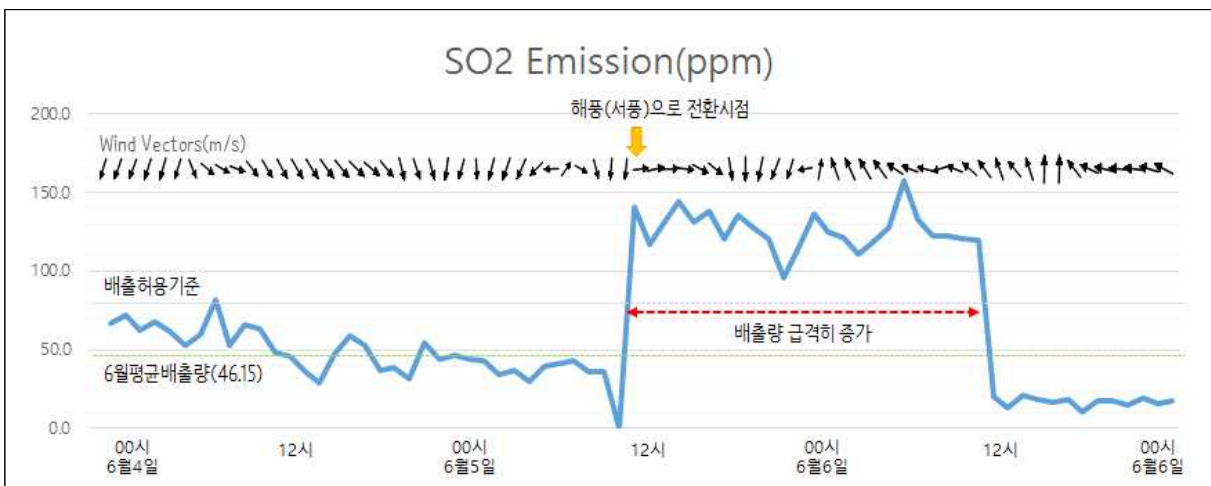
[표 1] 가동중지에 따른 배출량 변화(단위 : 톤/월)

구 분	총먼지(TSP)	황산화물	질소산화물	미세먼지(PM _{2.5}) ^{a)}
보령	11	202	324	79
서천	4	128	201	47
합계	15	330	525	126
저감율(%) ^{b)}	41.0	37.5	49.5	40.6

a) 배출된 성분 중 총먼지(TSP) 66%, 황산화물 24%, 질소산화물 7%가 미세먼지(PM_{2.5})로 전환(2차생성)

b) 월평균 배출량 대비 저감율

- 실시간 배출량을 살펴본 결과, 보령에서 고농도 사례일 I에 서풍(해풍)으로 전환되는 시점에 급격히 증가하였으며 풍하측에 고농도를 유발할 가능성이 있을 것으로 판단됨



[그림 6] 보령화력 실시간 SOx 배출량 및 배출지점에서의 바람벡터

03 대기질 개선효과

1. 확산모델 결과(PM10, SO₂, NO₂)

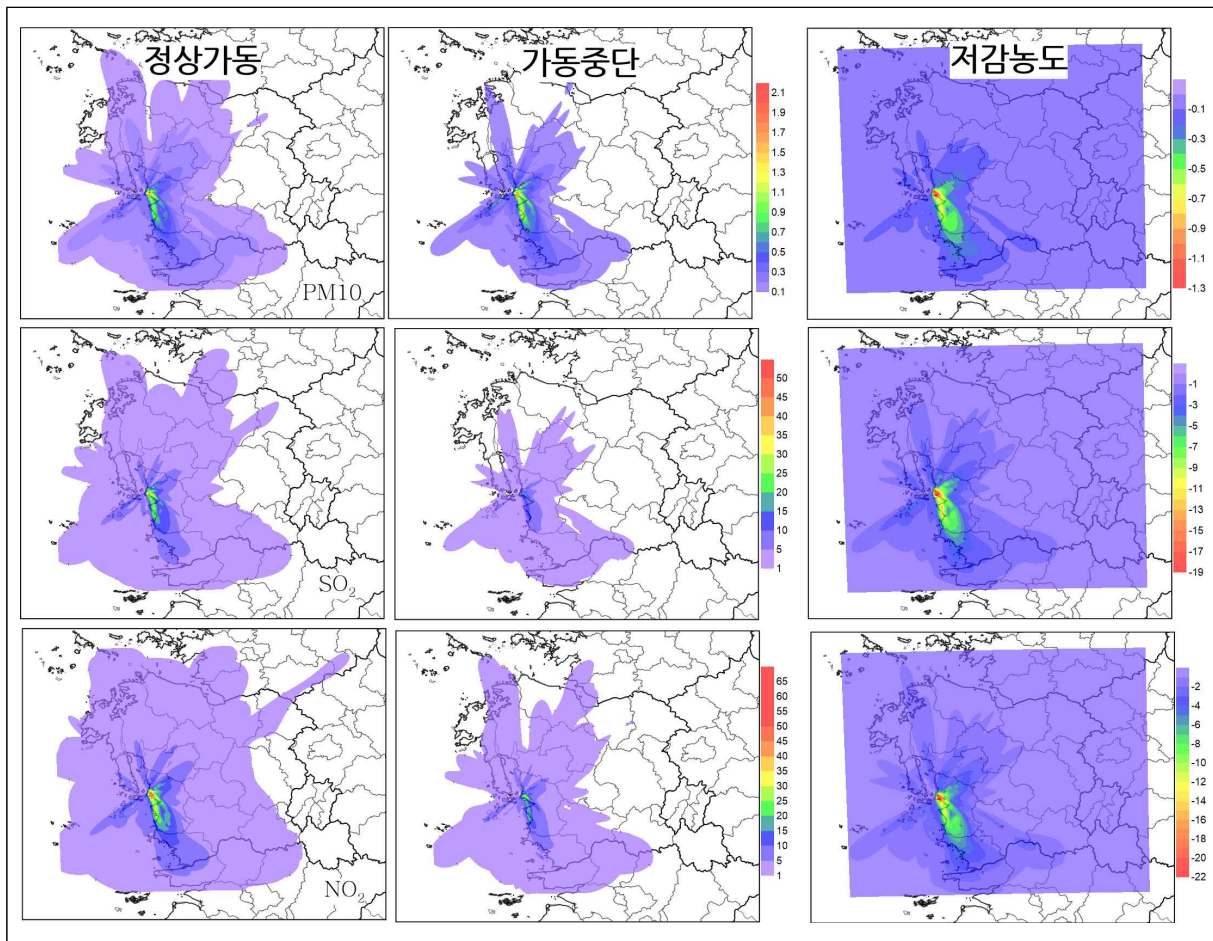
- 현황농도는 전년대비 PM10 17%, PM2.5 15%, SO₂ 45.7% 증가하였고, NO₂는 26.1% 감소하였으며, 예측농도는 미세먼지 37.5%, SO₂가 30.8%, NO₂가 30.8% 감소함
- 가동중단에 의한 대기개선효과는 화력발전소 인근 동 및 남동방향

[표 2] 대기오염물질 최대예측농도와 가동중단에 따른 증감율

PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24h)	방 향	거리 (km)	현황농도(평균)				예측농도(최대)		
			2015	2016	2017	증감 (%)	정상 가동	가동 중단	증감 (%)
오포	E	3.0	45.06	44.31	49.65	12.1	2.1	1.0	-52.4
송학	SE	4.5	34.76	34.38	36.68	6.7	2.9	1.6	-44.8
죽정	SE	11.9	40.09	37.36	46.03	23.2	0.5	0.3	-40.0
신흥	SSW	10.0	44.10	47.03	46.32	-1.5	2.0	1.1	-45.0
학성	N	5.5	38.28	38.08	45.55	19.6	0.4	0.3	-25.0
오천	ENE	4.8	39.94	35.80	41.71	16.5	0.4	0.2	-50.0
교성	NE	5.1	33.10	38.80	44.60	14.9	0.7	0.4	-42.9
천북	NNE	10.1	40.00	42.26	57.55	36.2	0.8	0.5	-37.5
원산	WSW	5.6	35.76	40.02	50.32	25.7	0.1	0.1	0.0
평균			39.0	39.8	46.5	17.0	1.1	0.6	-37.5

[표 2] 계 속

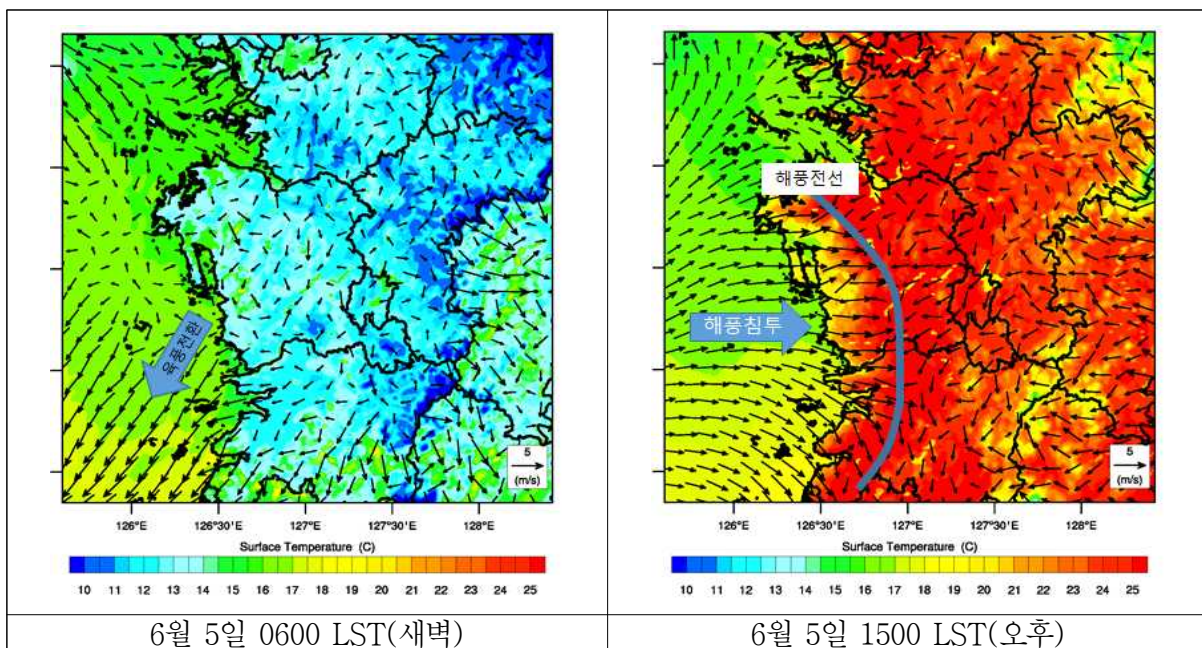
SO ₂ (ppb, 24h)	방 향	거리 (km)	현황농도(평균)				예측농도(최대)		
			2015	2016	2017	증감 (%)	정상 가동	가동 중단	증감 (%)
오포	E	3.0	7.78	2.32	5.88	153.4	19.5	10.8	-44.6
송학	SE	4.5	2.90	1.57	2.48	58.0	26.8	16.7	-37.7
죽정	SE	11.9	6.80	8.85	3.25	-63.3	4.8	2.9	-39.6
신흥	SSW	10.0	5.72	1.48	2.96	100.0	18.6	12.5	-32.8
학성	N	5.5	4.04	4.65	4.89	5.2	3.4	2.7	-20.6
오천	ENE	4.8	3.06	2.34	2.81	20.1	2.4	1.8	-25.0
교성	NE	5.1	2.88	2.19	4.91	124.2	6.2	3.9	-37.1
천북	NNE	10.1	2.64	1.56	2.39	53.2	7.4	5.0	-32.4
원산	WSW	5.6	2.44	4.31	2.62	-39.2	1.4	1.3	-7.1
평균			4.3	3.3	3.6	45.7	10.1	6.4	-30.8
NO ₂ (ppb, 24h)	방 향	거리 (km)	현황농도(평균)				예측농도(최대)		
			2015	2016	2017	증감 (%)	정상 가동	가동 중단	증감 (%)
오포	E	3.0	4.67	8.42	8.36	-0.7	35.8	16.3	-44.6
송학	SE	4.5	8.02	7.55	7.04	-6.8	47.9	24.6	-37.7
죽정	SE	11.9	10.02	4.34	4.26	-1.8	8.9	4.5	-39.6
신흥	SSW	10.0	8.85	2.98	2.96	-0.7	32.4	18.1	-32.8
학성	N	5.5	8.94	5.92	4.89	-17.4	6.5	4.0	-20.6
오천	ENE	4.8	8.52	8.00	2.81	-64.9	6.6	2.7	-25.0
교성	NE	5.1	7.49	5.30	4.91	-7.4	11.1	5.8	-37.1
천북	NNE	10.1	9.83	9.57	2.39	-75.0	12.8	7.3	-32.4
원산	WSW	5.6	7.18	6.56	2.62	-60.1	2.3	1.9	-7.1
평균			8.2	6.5	4.5	-26.1	18.3	9.5	-30.8



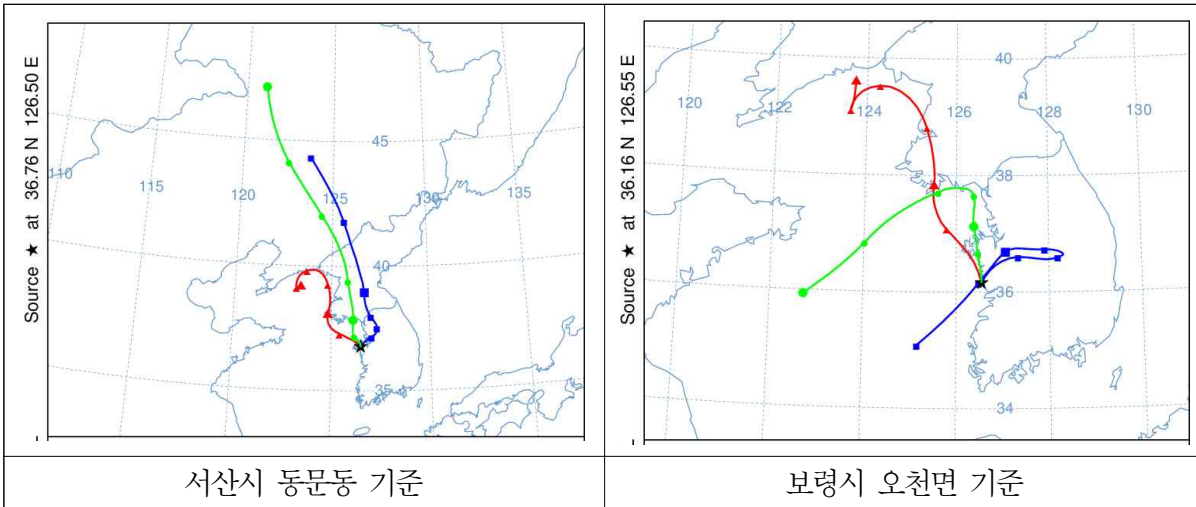
[그림 6] 가동유무에 따른 대기오염물질 영향예측 결과

2. 고농도 사례일 분석

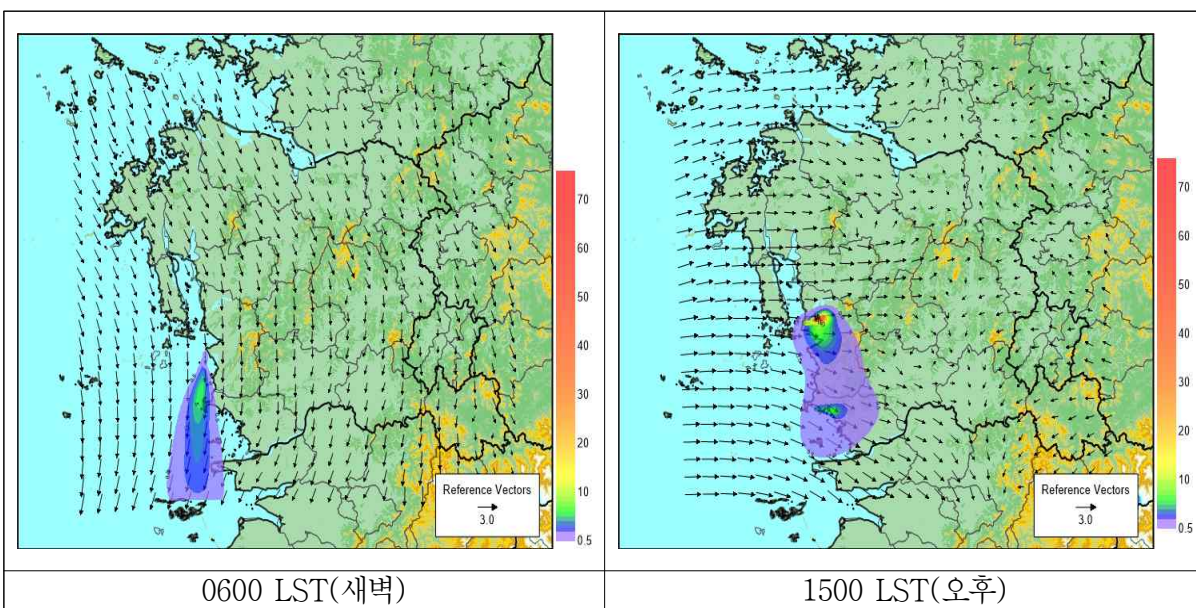
- 고기압의 영향 아래 해륙풍의 순환이 잘 나타나며, 대기오염물질의 수송에 큰 영향을 미칠것으로 판단됨
- 야간의 보령과 서천지역에서 냉각에 의한 풍속감소(풍향전환)가 두드러지며, 주간에는 해풍이 침투하면서 해풍전선 일대에 오염물질이 축적되어 고농도를 보일 것으로 예상됨[그림7]
- [그림8]에는 공기와 역추적을 통한 오염물질의 기원을 살펴본 결과, 서산시 동문동에서는 북쪽지역으로부터 이동한 반면 보령시 오천면에서는 서쪽에서 기원하고 있어 화력발전소의 영향을 직접 받고 있음
- 실제로 야간의 해풍침투시에 배출량이 급격히 증가하였고 확산방향이 내륙으로 형성되면서 풍하지역에 고농도를 초래하였고 특히 지형의 영향에 의해 확산범위가 좁게 나타났음[그림9]



[그림 7] 해륙풍 순환 대표 사례일의 지표면 기온과 바람



[그림 8] 고농도 사례일에 대한 대기오염물질 역추적 모델링 결과(좌:동문동, 우:보령 기준)



[그림 9] 해륙풍 순환 대표 사례일의 바람과 SO₂ 등농도 곡선

04 결론 및 제언

1. 결론

1) 전력수급문제(전력예비율)

○ 전국 노후 발전소 8기의 설비용량은 2.5%(22845MW/113705MW)

○ 가동중단 이후에도 전력공급율은 원활함(전력통계시스템, 2017)

※ 6월 첫주 설비예비력 62%, 공급예비율 19%를 기록함

2) 환경부결과 비교

○ 지난 3년(2013, 2014, 2016년) 6월 기상조건과 BFM을 적용한 모델링 연구임

○ 충남지역 미세먼지(PM_{2.5})는 $0.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.1%↓), 일 최대 $3.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ (8.6%↓) 감소한 것으로 분석함(환경부 보도자료, 2017)

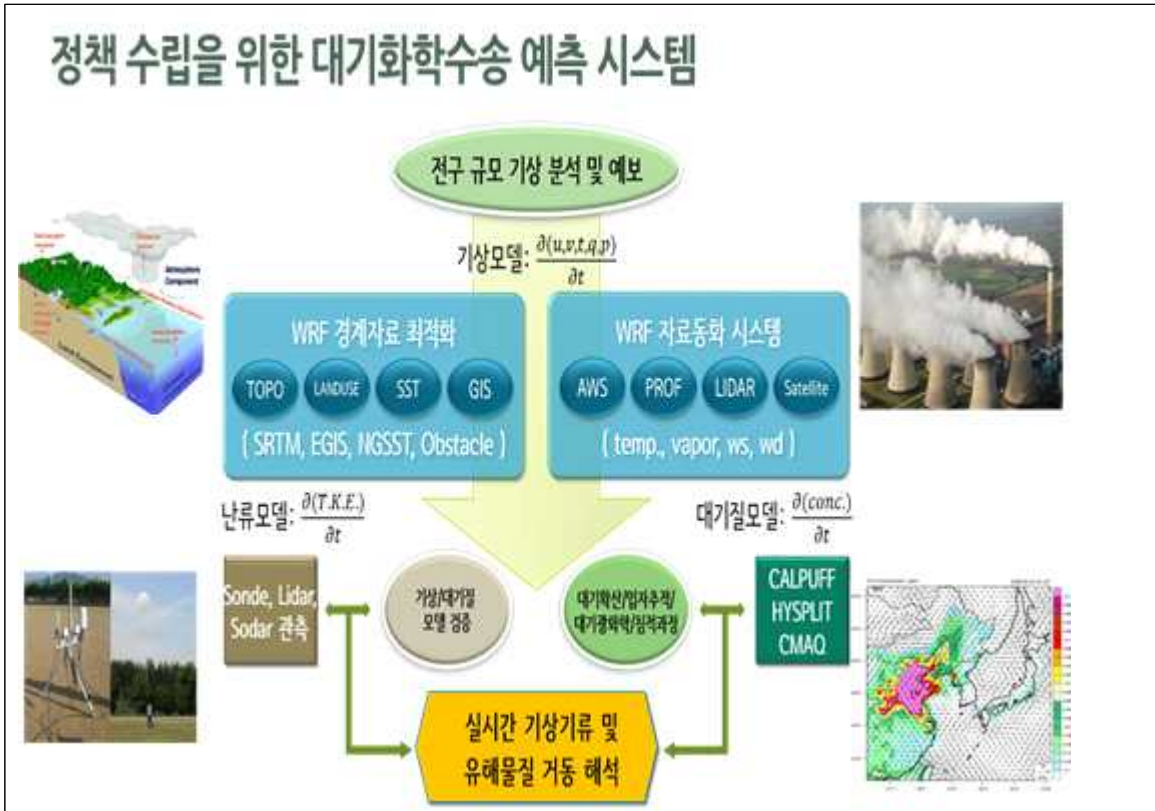
○ 본 연구에서는 현황대비 미세먼지(PM₁₀) 일 최대 $1.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.2%↓) 감소함

○ 화력발전소 기준 남동방향, 반경 10km 이내 대기질 개선효과 큼

2. 정책제언

1) 대기질 예측 정확도 향상

○ 대기질 예측 결과는 기상조건과 배출조건에 따라 크게 달라지므로 예측 정확도 향상을 위해서는 가용한 자료(기상관측, 환경위성, 측정결과 등) 활용을 통해 지속적 노력 필요함



[그림 10] 대기질 예측 정확도 향상 방안

2) 미세먼지(PM2.5) 관리

- PM2.5는 직접배출보다 황산화물과 질소산화물, 휘발서유기화합물 등의 2차 생성량이 절대적으로 커, PM2.5를 관리하기 위해서는 성분분석과 함께 과학적인 방법에 기반하여 관리 필요함

3) 지자체 차원의 탄력적 운영 정책 수립

- 석탄화력발전소 가동중단은 단기간의 미세먼지 고농도 사례 관리에 효과적이므로 기상조건과 외부요인을 감안하여 탄력적 운용 제안함

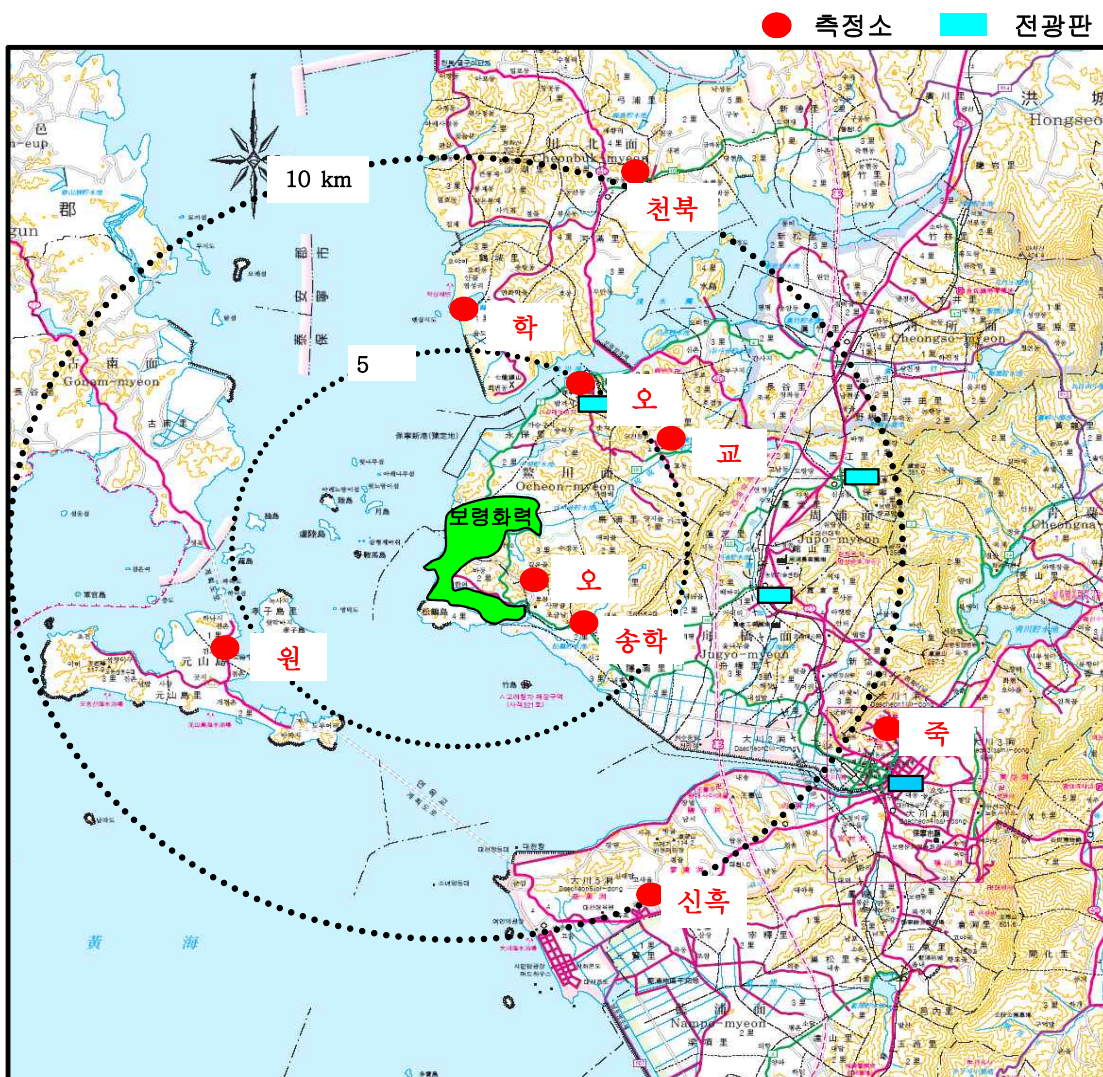
참 고 자 료

전력통계시스템. 2017. <http://epsis.kpx.or.kr/epsisnew/>

환경부. 2017. 노후 석탄발전소 가동중단에 따른 미세먼지 저감효과 보도자료

부록

1. 보령화력발전소 주변 대기환경농도 측정소 정보



측정소	위 치	위도	경도	utm _x (km)	utm _y (km)	고도(m)	방 향	거리 (km)
오포	보령시 오천면 오포3리 마을회관	36.397389	126.504333	276.18424	4030.91982	19	동	3.0
송학	보령시 주교면 송학리 110 송학초교	36.379964	126.527203	278.18611	4028.93366	36	남동	4.5
죽정	보령시 죽정동 658 한전사택 내	36.359125	126.600725	284.72487	4026.45512	21	남동	11.9
신흥	보령시 신흥동 흑포1길 33-22 마을회관 옆	36.318739	126.535231	278.73305	4022.12221	12	남남서	10.0
학성	보령시 천북면 학성리 255 바다횃집	36.450744	126.490728	275.11793	4036.87143	4	북	5.5
오천	보령시 오천면 소성리 665-1 오천초교 뒤	36.438419	126.523131	277.9873	4035.42879	11	동북동	4.8
교성	보령시 오천면 교성리 184-2 교성초교	36.416667	126.504333	281.22375	4033.84254	17	북동	5.1
천북	보령시 천북면 하만리 246-5 천북초교	36.481894	126.531475	278.85892	4040.23331	32	북북동	10.1
원산	보령시 오천면 원산도리 433-1 마을회관	36.381517	126.433461	269.78023	4029.3255	8	서남서	5.6

2. 고농도사례일 I 일기도

