

석탄화력발전과 미세먼지 연속세미나

〈 제1차 〉

석탄화력발전과 미세먼지

2016. 6. 22

■ 석탄화력발전과 미세먼지 연속세미나

<제1차> 연속세미나(미세먼지 실태) 개최 계획

🕒 개최 목적

- 최근 미세먼지에 대한 이슈가 대두되면서 그 주요원인 중 하나로 석탄화력발전소가 지목되고 있음
- 이미 선진국에서는 온실가스 및 대기오염물질 배출에 따른 피해 등으로 석탄화력발전소를 더 이상 증설하지 않거나 단계적으로 폐쇄하고 있음
- 그러나 우리나라는 경제성과 안정성의 이유로 석탄화력발전의 유지 및 증대를 고수하고 있으며, 이로 인해 국내 석탄화력발전 설비의 절반 가까이가 운영되고 있는 충청남도는 그 피해가 매우 높을 것으로 예상됨
- 이에 석탄화력발전과 미세먼지에 대한 국내외 이슈 등을 점검하고 석탄화력발전의 전망 및 대응 방안을 연속 세미나를 통해 모색하고자 함

🕒 세미나 개요

- 주 제 : 석탄화력발전과 미세먼지 관련 이슈 파악, 대안 모색
- 일 시 : 2016년 6월 22일(수) 10:00~11:50
- 장 소 : 충남연구원 1층 회의실
- 참석자 : 충청남도, 학·연 전문가, NGO, 충남연구원 등

🕒 세부 프로그램

시 간	세 부 내 용	비 고
10:00 ~ 10:05('05)	인사말 및 소개	오혜정 부장
10:05 ~ 10:35('30)	발표1 : 석탄화력발전과 미세먼지	명형남 책임연구원 (충남연구원)
10:35 ~ 11:05('30)	발표2 : 충남지역 대규모 점오염원의 초미세먼지 기여도 분석	김순태 교수 (아주대학교)
11:05 ~ 11:50('45)	자유토론	참석자 전원

주 제 발 표 - 1

석탄화력발전과 미세먼지



충 남 연 구 원
명형남 책임연구원

석탄화력발전과 미세먼지

2016.06.22. 명형남(충남연구원 책임연구원)

목 차

I. 미세먼지란?

1. 미세먼지 정의
2. 미세먼지 발생 메카니즘

II. 전국과 충남의 미세먼지 현황

1. 미세먼지 배출량
2. 미세먼지 농도
3. 미세먼지 경보(주의보) 발령

III. 석탄화력발전에 의한 환경과 건강에 미치는 영향

1. 환경영향
2. 건강영향

IV. 석탄화력발전과 미세먼지, 건강 관련 국내·외 연구동향

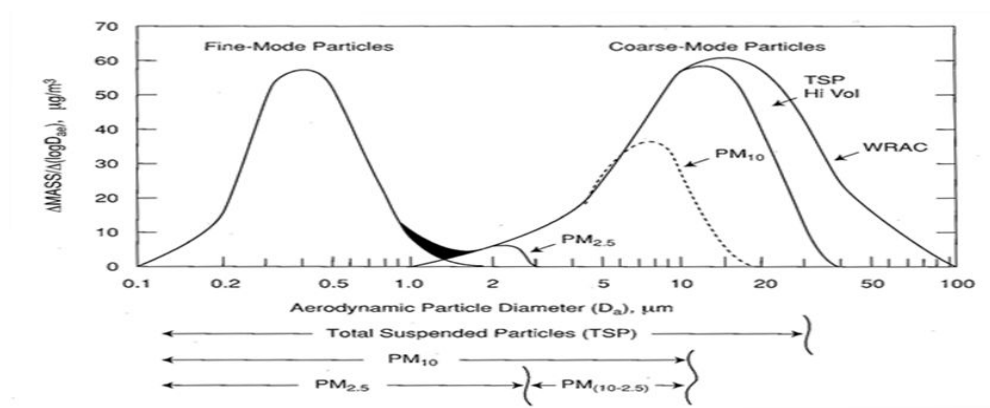
1. 미국 환경청
2. 그린피스
3. 미국항공우주국(NASA)
4. 세계보건기구(WHO)
5. 환경성파지수(EPI)
6. 경제협력개발기구(OECD)
7. 감사원
8. 충청남도

V. 결론 및 제언

I. 미세먼지란?

1. 미세먼지 정의

- 공기 중 고체 상태와 액적 상태 입자의 혼합물을 미세먼지(Particulate Matter)라고 정의하고 있으며, <그림 1>과 같이 그 입자의 직경에 따라 $2.5\text{ }\mu\text{m}$ 까지 $\text{PM}_{2.5}$ 로 구분하고 $10\text{ }\mu\text{m}$ 까지를 PM_{10} 이라 구분함



[그림 1] 대기 중 입자상 물질의 입경분포

자료 : USEPA(미국환경청), 2009

- <그림 2>와 같이 사람의 머리카락과 비교해 보면 머리카락 직경 $50\sim70\text{ }\mu\text{m}$ 의 $1/20\sim1/30$ 의 크기보다 작은 입자임

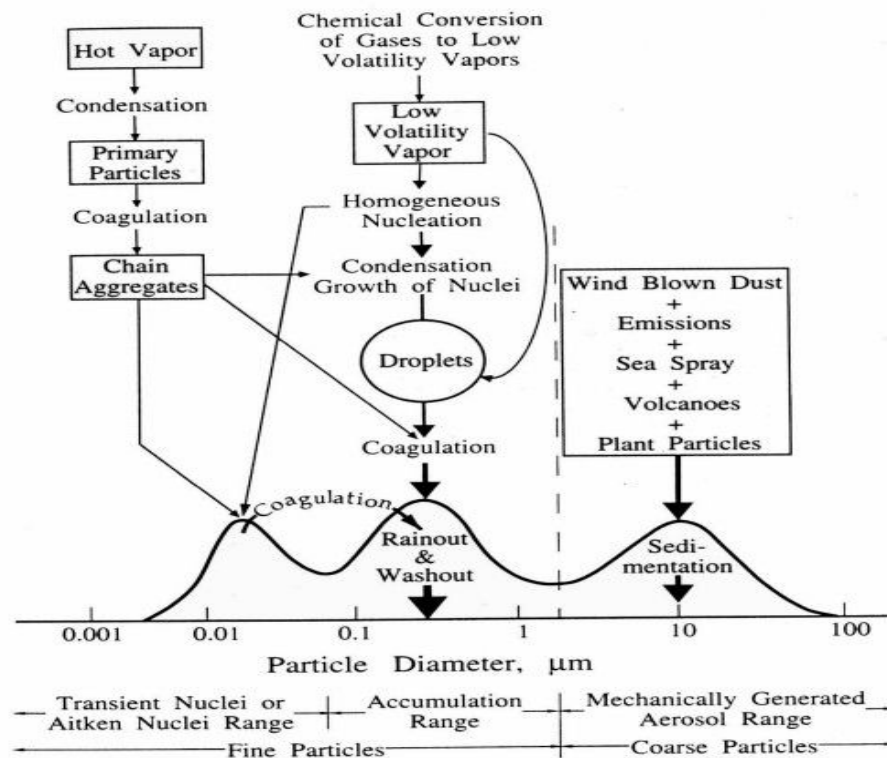


[그림 2] 머리카락보다 작은 미세먼지(PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$) 크기

자료 : USEPA(미국환경청), 2009

2. 미세먼지 발생 메카니즘

- 미세먼지의 발생은 자연적인 발생과 인위적인 발생으로 구분되며 자연적인 발생으로는 바닷물이 증발해서 생성된 소금입자, 흙먼지, 화산폭발 등으로 자연 중에서 만들어짐
- 미세먼지의 발생은 <그림 3>과 같이 산업시설, 자동차 배기가스, 비산먼지 등과 같은 배출원으로 부터 직접 배출되거나 가스상 물질들이 대기 중으로 배출될 때 기온의 영향으로 냉각 응결되면서 생성되기도 함(1차 미세먼지 발생). 또한 미세먼지는 황산화물(SO_x), 질소산화물(NO_x), 휘발성유기화합물(VOCs) 등과 같은 대기오염물질이 대기 중에서 전구물질로 작용하여 물리·화학적 반응을 통해 생성되기도 함(2차 미세먼지 발생)
- 미세입자들은 먼지 핵을 중심으로 탄소(C), 다핵 방향족 탄화수소(PAH), 납(Pb), 카드뮴(Cd), 니켈(Ni), 황산염 (SO₄²⁻), 질산염(NO₃⁻)와 같은 중금속과 이온성분 등 여러 종류의 오염물질이 축적되면서 구성된 것으로 입자의 크기, 표면적, 화학적 조성에 따라 건강영향을 결정하는 것으로 알려짐



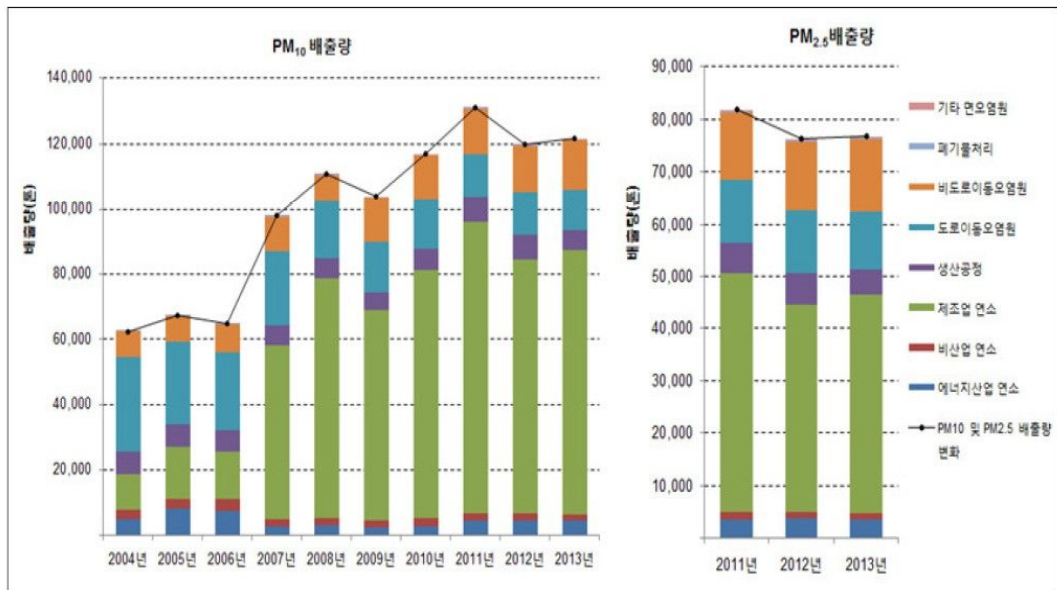
[그림 3] 미세먼지의 발생 메카니즘

자료 : USEPA(미국환경청), 2009

II. 전국과 충남의 미세먼지 현황

1. 미세먼지 배출량

- 국립환경과학원의 「대기오염물질 배출량 연보」에 의하면 전국의 미세먼지(PM₁₀) 배출량은 2004년에 62,491 톤에서 계속 증가하다가 2011년 131,176 톤을 기점으로 하여 약간 감소하는 추세를 보이고 있음
- 전국의 미세먼지(PM₁₀) 배출원 대분류별 배출량은 제조업 연소가 81,014 톤으로 가장 많았고 그다음은 비도로나동오염원이 15,167 톤, 도로이동오염원이 12,103 톤, 생산공정이 6,249 톤, 에너지산업 연소가 4,524 톤의 순서였음. 미세먼지(PM_{2.5})의 경우도 제조업 연소가 41,606 톤으로 가장 많았고 그 다음은 비도로나동오염원이 13,953 톤, 도로이동오염원이 11,135 톤, 생산공정이 4,829 톤, 에너지산업 연소가 3,573 톤의 순서였음

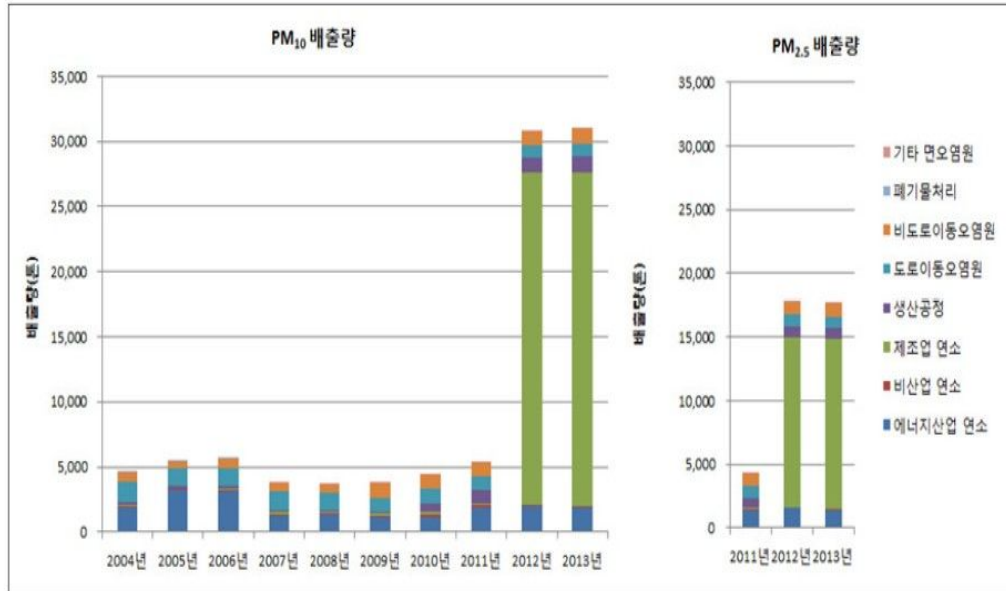


[그림 4] 전국의 배출원 대분류별 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 배출량 추이

자료 : 대기오염물질 배출량 연보(국립환경과학원)

- 충남의 미세먼지(PM₁₀) 배출량은 2010년에 4,446 톤을 기점으로 하여 증가하는 추세를 보이고 있으며, 2013년을 기준으로 하면 충남은 미세먼지(PM₁₀) 배출량이 전국의 약 25%로서 경북 다음으로 두 번째로 높은 것으로 나타남

- 충남의 미세먼지(PM₁₀) 배출원 대분류별 배출량은 제조업 연소가 25,648 톤으로 가장 많았고 그다음은 에너지산업 연소가 1,894톤, 생산공정이 1,189 톤의 순서였음. 미세먼지(PM_{2.5})의 경우도 제조업 연소가 13,369 톤으로 가장 많았고 그 다음은 에너지산업 연소가 1,380 톤, 비도로오염원이 1,079 톤의 순서였음



[그림 5] 충청남도 배출원 대분류별 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 배출량 추이

자료 : 대기오염물질 배출량 연보(국립환경과학원)

- 전국과 충남에서 모두 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})를 가장 많이 배출시키는 배출원은 제조업 연소(연소시설, 공정로 등)로서 2013년도를 기준으로 전국의 경우 총 미세먼지(PM₁₀) 배출량의 약 67%, 충남의 경우 총 미세먼지(PM₁₀) 배출량의 약 83%가 제조업 연소인 것으로 나타남. 반면에 서울은 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})를 가장 많이 배출시키는 배출원은 도로이동오염원(승용차, 택시, 버스 등)으로서 2013년도를 기준으로 서울의 총 미세먼지(PM₁₀) 배출량의 약 42%가 도로이동오염원인 것으로 나타남(표 1)
- 전국의 경우에 제조업 연소 다음으로 비도로 이동오염원(철도, 선박, 항공, 건설장비 등), 도로이동오염원(승용차, 택시, 버스 등), 생산공정(식유제품, 제철제강 등), 에너지산업 연소(발전시설, 난방시설, 정제시설 등) 순으로 배출량이 많은 반면에, 충남의 경우는 제조업 연소 다음으로 가장 많은 배출량이 에너지산업 연소이며 이 비율은 타 시도에 비해 높은 것으로 나타남. 반면에 서울은 도로이동오염원 다음으로 비도로 이동오염원, 비산업연소(상업 및 공공기관 시설 등) 순으로 배출량이 많은 것으로 나타남(표 2)

<표 1> 전국과 충남의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 배출원별 배출량

배출원별	전국(kg)		충남(kg)		서울(kg)	
	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
제조업 연소	81,014,131 (66.64%)	41,606,126 (54.17%)	25,648,025 (82.80%)	13,368,534 (75.54%)	1,174 (0.07%)	704 (0.04%)
비도로 이동오염원	15,166,694 (12.48%)	13,953,294 (18.17%)	1,173,167 (3.79%)	1,079,307 (6.10%)	650,466 (37.48%)	598,428 (34.48%)
도로 이동오염원	12,102,781 (9.96%)	11,134,558 (14.50%)	924,070 (2.98%)	850,145 (4.80%)	735,914 (42.41%)	677,041 (39.01%)
생산공정	6,248,517 (5.14%)	4,829,067 (6.29%)	1,189,478 (3.84%)	918,782 (5.19%)	—	—
에너지산업 연소	4,523,814 (3.72%)	3,572,738 (4.65%)	1,893,560 (6.11%)	1,380,220 (7.80%)	12,733 (0.73%)	12,733 (0.73%)
비산업 연소	1,954,841 (1.61%)	1,225,631 (1.60%)	116,954 (0.38%)	74,457 (0.42%)	287,471 (16.57%)	201,263 (11.60%)
기타 면오염원	309,829 (0.25%)	278,846 (0.36%)	18,008 (0.06%)	16,208 (0.09%)	34,452 (1.99%)	31,006 (1.79%)
폐기물처리	242,611 (0.20%)	201,960 (0.26%)	12,803 (0.04%)	10,757 (0.06%)	13,175 (0.76%)	10,189 (0.59%)
합계	121,563,218 (100%)	76,802,220 (100%)	30,976,065 (100%)	17,698,410 (100%)	1,735,385 (100%)	1,531,364 (100%)

자료 : 2013년 국가대기오염물질 배출량 자료 재정리

<표 2> 시도별 에너지산업 연소 부분의 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})배출량

시도	PM ₁₀ (kg)	PM _{2.5} (kg)
충남	1,893,560(41.86%)	1,380,220(38.63%)
경남	1,039,664(22.98%)	838,177(23.46%)
인천	526,859(11.65%)	484,647(13.57%)
전남	285,443(6.31%)	228,405(6.39%)
경기	209,852(4.64%)	199,829(5.59%)
울산	184,966(4.09%)	127,550(3.57%)
강원	93,263(2.06%)	72,947(2.04%)
부산	80,386(1.78%)	78,053(2.18%)
전북	75,073(1.66%)	65,874(1.84%)
제주	42,094(0.93%)	22,866(0.64%)
경북	31,906(0.71%)	25,667(0.72%)
대구	31,180(0.69%)	23,223(0.65%)
서울	12,733(0.28%)	12,733(0.36%)
충북	5,736(0.13%)	2,221(0.06%)
광주	4,003(0.09%)	4,003(0.11%)
세종	3,984(0.09%)	3,984(0.11%)
대전	3,112(0.07%)	2,339(0.07%)
합계	2,630,254(100%)	3,572,738(100%)

자료 : 2013년 국가대기오염물질 배출량 자료 재정리

2. 미세먼지 농도

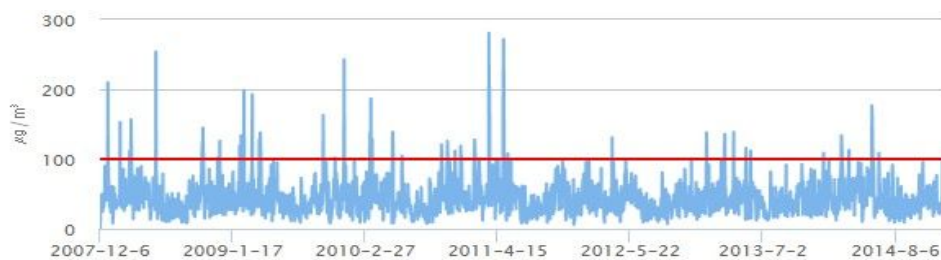
- 국립환경과학원 자료(2013년)에 의하면 <그림 6>과 같이 미세먼지(PM₁₀)의 대기환경기준(연평균치 : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 지자체는 경기 54 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 충북 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 전북 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 것으로 나타났으며, 충남의 미세먼지(PM₁₀)는 연평균 42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대기환경기준을 달성함



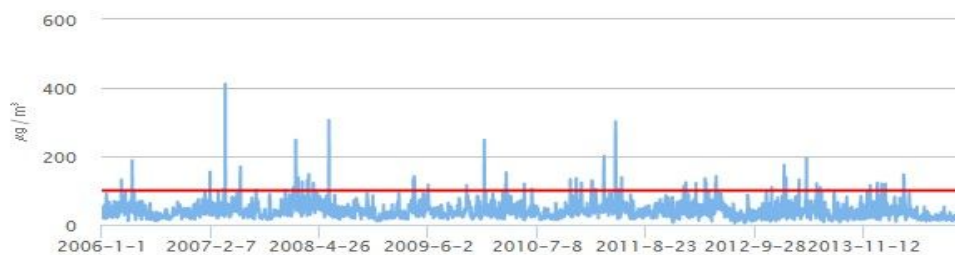
[그림 6] 16개 지자체별 미세먼지(PM₁₀)의 연평균 농도(2014년)

자료 : <http://www.airkorea.or.kr>. 2016년 6월 현재

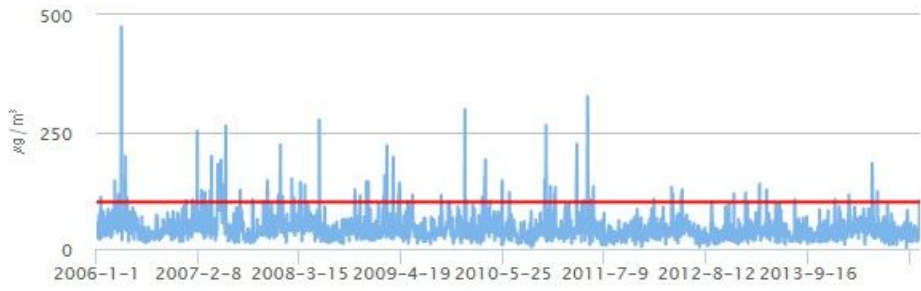
- 충남의 경우 2006년도부터 2014년까지 미세먼지(PM₁₀)의 일평균 농도의 추이를 보면 <그림 7>과 같이 대기환경기준(일평균치 : 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 날의 횟수가 점점 감소하는 경향을 보이고 있음



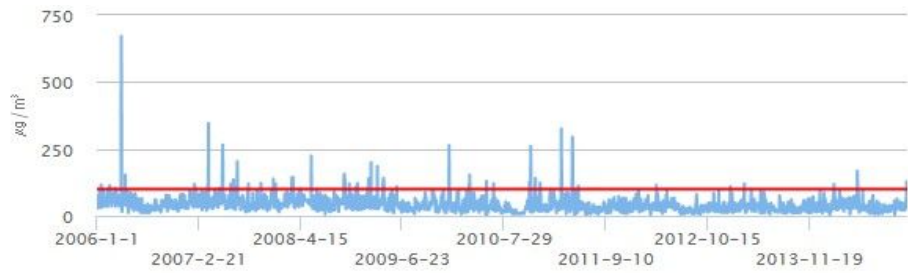
당진시 정곡리(도시대기측정망)



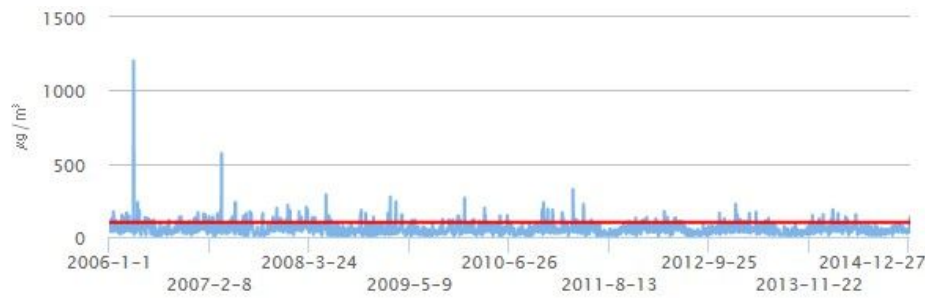
당진시 난지도리(도시대기측정망)



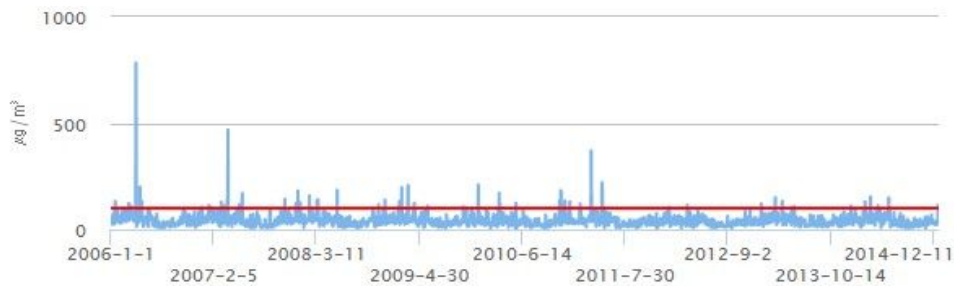
서산시 독곶리(도시대기측정망)



서산시 동문동(도시대기측정망)



천안시 백석동(도시대기측정망)



천안시 성황동(도시대기측정망)

[그림 7] 충남의 미세먼지(PM₁₀)의 일평균 농도 추이(2006-2014)

자료 : <http://www.airkorea.or.kr>. 2016년 6월 현재

- 충남의 경우 미세먼지(PM₁₀) 측정망이 주로 당진시, 서산시, 천안시 등 주로 석탄화력 발전소가 있는 일부 지역에만 설치되어 있어 이 수치만으로 충남 전역의 미세먼지 대기질을 평가하기에는 무리가 있음
- 그러나 <그림 6>, <그림 7>를 근거로 하면 당진시, 서산시, 천안시 등의 충남 일부 지역은 2006년도에 비해 미세먼지 대기질이 개선되었으나 WHO의 권고기준(연평균치 : 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 일평균치 : 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)과 비교해 보면 여전히 미세먼지 대기질의 개선이 필요한 것으로 판단됨
- 석탄화력발전에 의해 배출되는 미세먼지는 수백 에서 수천 km 까지 이동할 수 있는 것으로 알려져 있어 이로 인해 충남 전역에 미치는 대기질의 영향에 대해서는 측정망의 조속한 설치와 함께 향후 연구가 진행되어야 함

[미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 대기환경기준]

- 환경기준이 설정되는 대상물질과 농도 수준은 오염현황, 인체에 미치는 영향 등을 고려하여 정하게 되는데 국가별로 국가의 미세먼지 현황을 고려해서 대부분 세계보건기구(WHO)의 권고기준을 참고하여 설정함
- 우리나라는 WHO 잠정목표 2, 미국·일본은 잠정목표 3에 해당하는 수준임

●국가별 대기환경기준										●WHO 권고기준과 잠정목표			
항목	기준 시간	한국	미국	일본	영국	호주	홍콩	중국	EU	권고기준	잠정목표 3	잠정목표 2	잠정목표 1
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1시간			200									
	24시간	100	150	100	50		180	150	50	50	75	100	150
	년	50			40	50	55	100	40	20	30	50	70
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	24시간	50	35	35		25		75*		25	37.5	50	75
	년	25	15	15	25	8		35*	25	10	15	25	35

* 중화인민공화국 공고(GB3095·2012, 제7호) 일반 2급 목표

3. 미세먼지 경보(주의보) 발령

- 미세먼지 경보(주의보)는 전국 대기오염측정소에서 관측된 미세먼지 농도 및 기상변화 등을 고려하여 미세먼지의 농도가 일정기준 이상 높게 나타났을 때, 시민에게 신속히 경보(주의보)를 발령함으로 대기오염에 대한 시민의 인체 및 생활환경의 피해를 최소화하기 위해 시행하는 제도임
- 미세먼지 경보(주의보)제 단계별 기준농도는 <표 3>과 같음

〈표 3〉 미세먼지 경보제 단계별 기준농도

구분	PM ₁₀		PM _{2.5} (kg)	
	발령기준	해제기준	발령기준	해제기준
주의보	시간평균농도가 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속	시간평균농도가 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만	시간평균농도가 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속	시간평균농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만
경보	시간평균농도가 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속	시간평균농도가 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만	시간평균농도가 180 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 2시간 지속	시간평균농도가 90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 미만

자료 : 에어코리아(국립환경과학원)

- 2015년에 전국적으로 발령되었던 미세먼지(PM₁₀) 주의보 발령횟수를 기준으로 보면 경기도가 48회로 가장 많았고 그다음은 강원 37회, 인천 32회, 충북 29회의 순서였음
- 미세먼지(PM_{2.5}) 주의보 발령횟수는 부산이 28회로 가장 많았고 강원, 인천, 경기, 충북 등의 순서였음
- 서울의 경우 미세먼지(PM₁₀) 주의보 발령횟수는 3회, 미세먼지(PM_{2.5}) 주의보 발령횟수는 6회로서 다른 시도에 비해 비교적 적었음
- 충남의 경우는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5}) 발령횟수가 각 1회로서 다른 시도에 비해 가장 적은 것으로 나타남

〈표 4〉 2015년 시도별 미세먼지 주의보 발령 회수

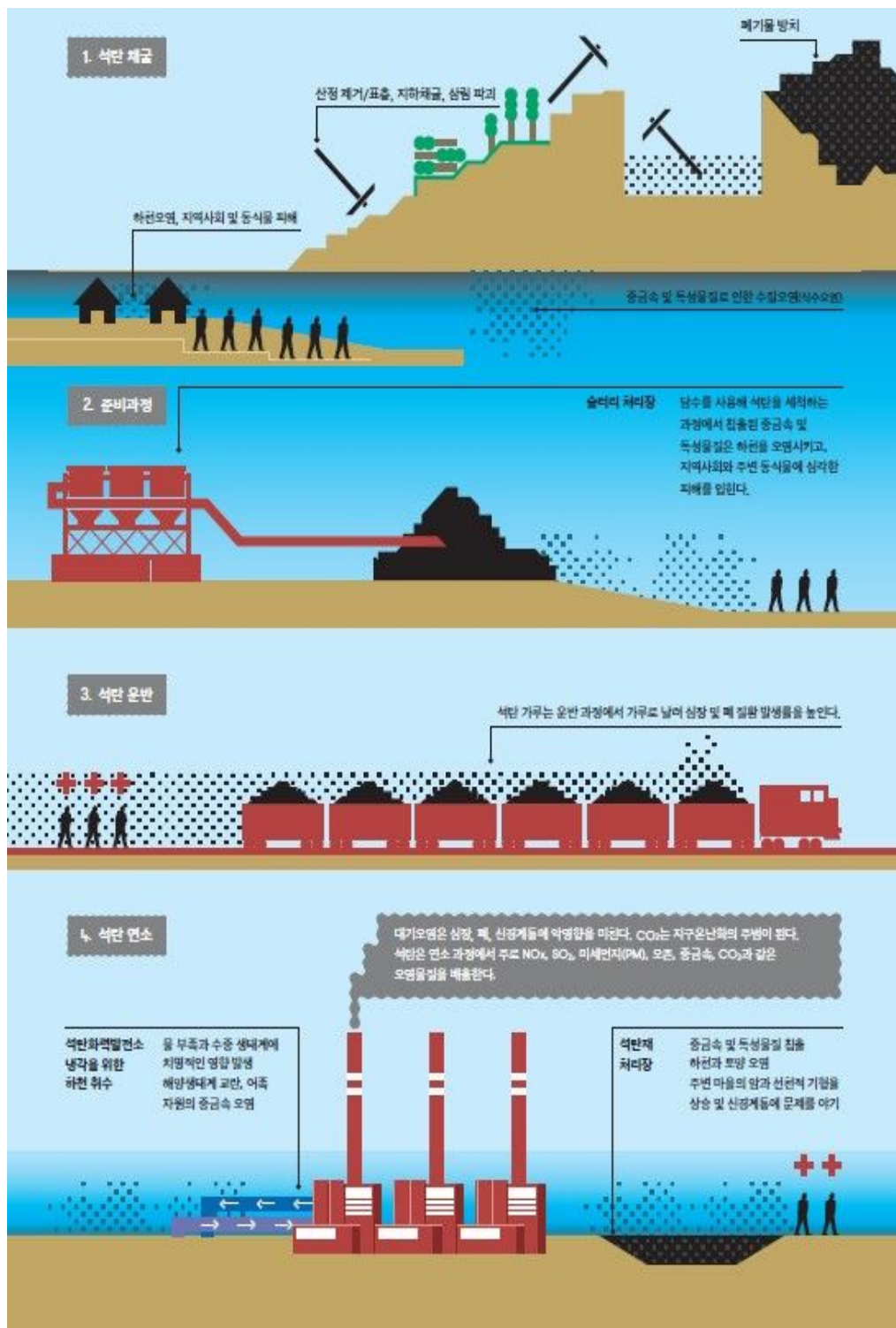
시도	PM ₁₀	PM _{2.5}
경기	48	12
강원	37	28
인천	32	26
충북	29	11
경북	22	7
부산	16	28
대전	12	6
울산	7	8
전북	7	7
대구	6	4
전남	5	5
제주	5	6
서울	3	6
경남	3	8
광주	3	10
충남	1	1

자료 : 에어코리아(국립환경과학원)자료 재정리

Ⅲ. 석탄화력발전이 환경과 건강에 미치는 영향

1. 환경영향 개괄

- 석탄은 중요한 에너지원으로서 우리나라에서 지속적으로 사용되어 왔으나 석탄을 채굴하는 과정과 운반, 연소 및 처리하는 과정에서 각 단계별로 대기, 수질, 토양, 산림 등의 환경에 영향을 미치는 것으로 알려져 있음
- <그림 8>과 같이 석탄의 채굴부터 연소까지의 과정에서 수은, 비소, 크롬, 니켈, 카드뮴 등 중금속 물질과 미세먼지 생성과 관련 있는 질소산화물, 황산화물, 미세먼지($PM_{2.5}$) 등의 대기오염물질을 배출함
- 석탄화력발전은 석탄의 채굴 및 운송, 연소 과정 등의 모든 단계에서 다량의 물이 필요한 수자원 집약적인 발전 방식이므로 석탄화력발전 인근 지역은 물부족의 영향이 있을 뿐만 아니라 중금속이 함유된 물이 방류되는 것으로 알려져 있음
- 석탄이 연소된 후 남은 석탄재(ASH)를 저장하거나 운반하는 과정에서 비산먼지가 발생하고 파이프라인을 통해 물과 함께 수송할 경우 중금속 성분이 인근 지하수를 오염시킬 수 있으며 이로 인해 토양 또한 오염될 수 있음

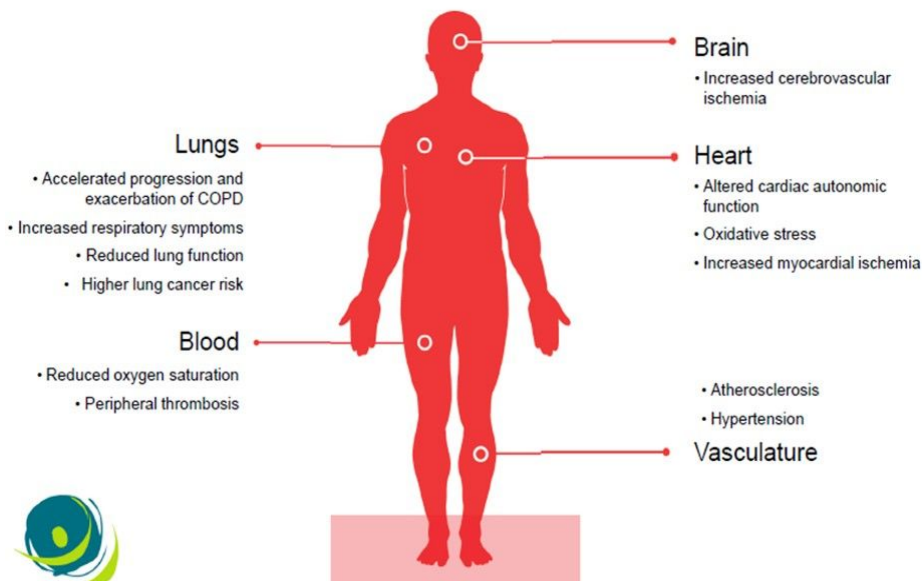


[그림 8] 석탄화력발전이 환경에 미치는 영향 개괄

자료 : EndCoal, Coal Factsheet #1, 2014, <http://endcoal.org>(원문), 그린피스(재인용)

2. 건강영향 개괄

- 미세먼지의 인체영향에 대한 기전은 기도의 염증반응, 백혈구 수 증가, 폐에서 활성산소와 산화스트레스 증가, 혈관수축, 뇌혈관 허혈의 증가, 산소포화도 감소, 엔도톡신(endotoxin)에 의한 세포 및 조직의 반응 등으로 인해 호흡기계 및 심혈관계 질환 등을 일으킬 수 있음(그림 9)
- 미세먼지로 인한 건강영향의 대표적인 것은 기도의 염증반응인데 미세먼지의 흡입으로 통해 상부와 하부기도에서 염증반응을 일으키며 특히 활성산소와 산화스트레스를 증가시키는 것으로 알려져 있음
- 활성산소와 산화스트레스를 증가시키는 물질로는 논란이 되고 있으나 중금속과 다핵방향족 탄화수소(PAH)과 관련이 있는 것으로 보고 있음. 활성산소는 DNA, 세포의 단백질, 지질, 세포막 등을 손상시키며 정도에 따라서는 전신적인 작용을 일으키는 물질임



[그림 9] 미세먼지(PM_{2.5})의 인체영향에 대한 기전

자료 : PoPe and Dockery, 2006

- 미세먼지 입자의 크기가 작을수록 코점막이나 기관지를 통해 걸러지지 않고 폐포까지 깊숙이 침투하여 호흡기계 질환(폐렴, 천식, 만성 폐쇄성 폐질환 등)을 일으키고 폐포를 직접 통과해서 혈액을 통해 심혈관계 질환(협심증, 심근경색, 뇌졸중 등)의 발생, 조기사망 등과 관련이 있다는 역학연구결과들이 도출되고 있음

- 그러나 이러한 역학연구들이 연구대상, 방법, 결과마다 다양한 수준의 차이가 있어 미국 EPA에서는 종합적인 평가를 통해 미세먼지에 의한 건강영향을 인과관계가 분명(Causal), 인과관계가 분명해 보이나 일부 불일치(Likely to be), 인과관계일 가능성 높음(Suggestive), 인과관계를 논하기에 자료가 부족(Inadequate)으로 구분하여 제시하고 있음(표 5)

<표 5> 미세먼지(PM_{2.5})의 장·단기간 건강영향

구분	건강영향	세부영향	증가율	인과관계
단기간	사망률	<ul style="list-style-type: none"> - 모든 종류의 사망률 - 심혈관계질환 사망률 - 호흡기계질환 사망률 	0.29-1.21% per 10 µg/m ³	Causal
	심혈관계 영향	<ul style="list-style-type: none"> - 심혈관계 질환으로 인한 응급실방문 및 병원입원 	0.5-3.4% per 10 µg/m ³	Causal
	호흡기계 영향	<ul style="list-style-type: none"> - 만성폐쇄성폐질환(COPD), 호흡기염증으로 인한 응급실방문 및 병원입원 - 천식으로 인한 응급실 방문 및 병원입원 	1%-4%	Likely to be Causal
장기간	사망률	<ul style="list-style-type: none"> - 심혈관계질환 사망률 - 폐암 사망률 		Causal
	심혈관계 영향	<ul style="list-style-type: none"> - 심혈관계질환 사망률 		Causal
	호흡기계 영향	<ul style="list-style-type: none"> - 폐기능성장 감소, 폐증상 증가, 천식 등 		Likely to be Causal
	생식과 발생에의 영향	<ul style="list-style-type: none"> - 저체중, 영아사망률 		Suggestive
	암, 돌연변이원성, 유전독성 등	<ul style="list-style-type: none"> - 폐암 사망률 		Suggestive

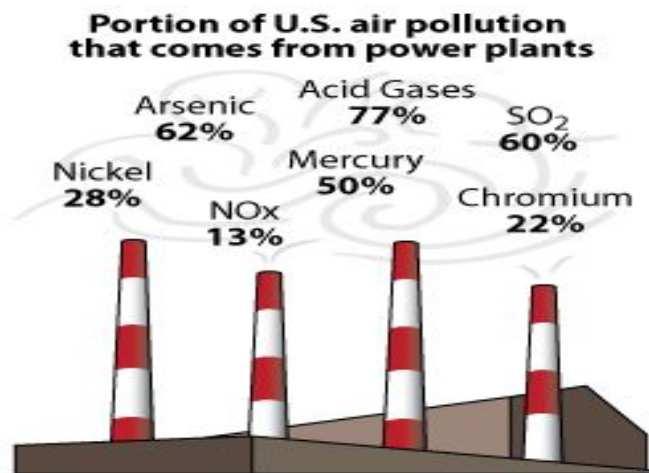
자료 : 아주대 예방의학교실, 2013

- 대기오염(미세먼지) 노출에 민감한 집단으로는 고령자, 어린이, 만성질환을 앓고 있는 환자 등이 대표적인 것으로 알려져 있으며 민감 집단은 대기오염이 기준치 이하로 유지된다고 하더라도 심각한 영향을 미칠 수 있으므로 이들 집단의 노출을 최소화시키는 것은 환경보건학적으로 중요한 문제임

IV. 석탄화력발전과 미세먼지, 건강 관련 국내·외 연구 동향

1. 미국 환경청

- 2011년에 미국 환경보호청(USEPA)은 주요 오염 발생원 가운데 석유 및 석탄 화력발전소를 대상으로 대기오염 위해물질을 관리하기 위한 대표적인 정책으로 화력발전소의 배출기준을 강화하였음



[그림 10] 미국 화력발전소로부터 배출되는 대기오염물질의 비율

자료 : USEPA, 2011

- 미국 환경보호청에서는 대기질 변화에 따른 건강 편익계산을 위해서 “피해함수 (damage-function)” 방법(Levy et al., 2009; Hubbell et al., 2009; Tagaris et al., 2009 연구방법 참조)을 이용하여 건강편익을 추정하였음
- 대기 배출기준 강화로 매년 4,200명-11,000명의 조기사망과 민성기관지염 2,800 명, 급성심장질환 4,700 명, 급성천식발병 130,000 명, 병원 및 응급실 내원자 수 5,700 명 등의 건강피해를 줄일 수 있을 것으로 평가함
- 대기질 향상만으로 인구집단의 건강에 미치는 효과가 매년 370억-900억 달러에 이르는 것으로 조사되었으며 이러한 건강이득은 특히 천식 및 건강약화가 많이 발생하는 저소득층 등 취약계층에게 중요하게 작용하고 있음
- 그리고 대기배출기준 강화 정책 실행을 통해 매년 발생하는 약 540,000 건의 병가 및 조퇴를 예방하여 생산성과 의료비용 감소효과를 줄 것으로 예측함

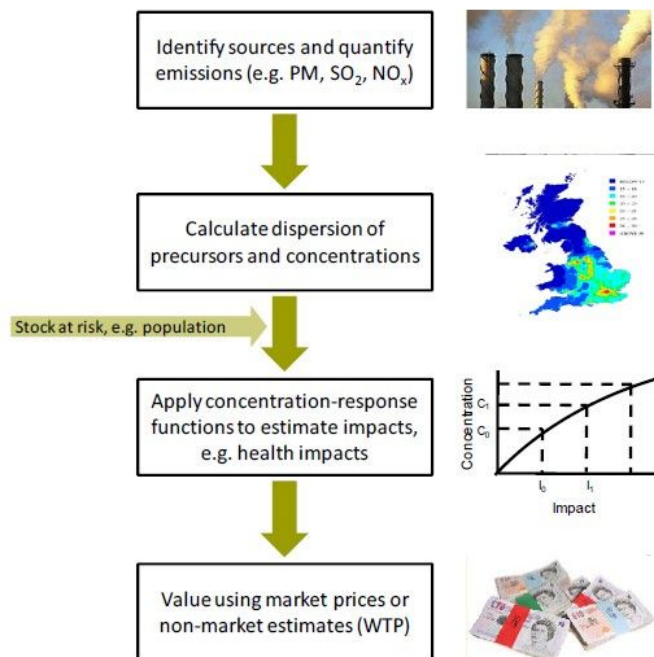
<표 6> 미국의 수은 및 대기오염물질 기준안 강화를 통해 연간 발생하는 건강편익

건강영향	예방 환자 규모(명/년)
조기사망	4,200-11,000
만성기관지염	2,800
급성심장질환	4,700
급성천식발병	130,000
병원 및 응급실 내원자 수	5,700
실외활동제한	3,200,000

자료 : 총남연구원(명형남 등), 2014

2. 그린피스(Korea Greenpeace)

- 2014년에 그린피스는 하버드 대학 다니엘 제이콥 교수 연구진과 함께 국내 석탄화력 발전소에서 배출되는 대기오염물질에 의한 건강영향을 연구하였음
- 석탄화력발전소의 건강영향 연구 방법론으로는 “Impact Pathway”을 사용하였으며 이 방법은 연구 대상 배출원의 배출물질의 확산과 화학적 변환, 이에 따른 지역별 오염 정도, 오염 노출과 건강영향, 전반적으로 인구에 미치는 건강영향을 추적하는 방법으로서 가장 보편적으로 사용하는 연구방법임



[그림 11] The impact pathway approach

자료 : Impact pathway guidance for valuing changes in air quality, 2013

- 그린피스와 하버드 대학 다니엘 제이콥 교수 연구진이 사용한 조기 사망자수 사용방법은 미국 환경보호청의 미세먼지 건강위험성 정량적 평가(Quantitative Health Risk Assessment for Particulate Matter)와 세계질병부담연구(Global Burden of Disease Study)를 토대로 석탄화력발전소의 미세먼지로 인한 조기사망자수를 연구함

$$[\text{기준 사망률}] \times (1 - 1/[\text{위험비(Hazard Ratio)}]^{([\text{PM}_{2.5}\text{증가량}]/10\mu\text{g}/\text{m}^3) \times [\text{인구수}]})$$

[그림 12] 조기사망자수 추정방법

자료 : Greenpeace, 2014

- “Impact Pathway”연구방법을 사용한 결과 매년 국내에서 운영중인 석탄화력발전소에서 나오는 미세먼지로 최대 1,600명이 뇌졸중, 허혈성 심장병, 만성폐쇄성 폐질환, 폐암, 기타 심폐질환 등으로 조기 사망하는 것으로 추정함

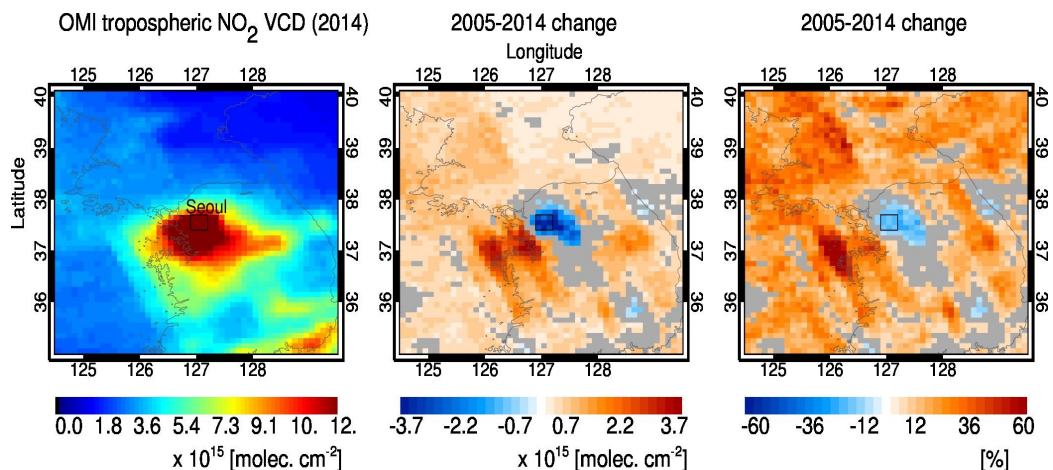
<표 7> 석탄화력발전소의 미세먼지로 기인되는 질환과 조기사망자수(명)

석탄화력발전소로 인한 질환		운영중인 석탄화력발전소	운영+계획중 석탄화력발전소	계획중인 석탄화력발전소
뇌졸중		370	640	270
허혈성 심장병		330	580	250
만성폐쇄성 폐질환		150	260	110
폐암		120	210	90
기타 심폐질환		120	220	100
전체 사망자(평균)		1100	1900	810
95% 신뢰구간	최소	640	1100	470
	최대	1600	2800	1200

자료 : Greenpeace, 2014

3. 미국항공우주국(NASA)

- 미국 항공우주국(NASA)에서 2005년부터 2014년까지 약 10년 동안 전세계 195개 도시의 이산화질소(NO_2)의 위성 관측을 연구한 자료에 의하면, 이산화질소가 가장 급격하게 심해진 도시는 충남 서산 대산과 인도 잠나가르 도시인 것으로 나타남. 서해해상의 이산화질소(NO_2)의 증가율이 높아지는 것은 원유나 석탄 같은 원자재나 생산품을 선박에 싣고 내리는 과정에서 발생하는 것으로 추정함
- 미국 항공우주국(NASA)의 논문(Duncan et al., 2016)에서 분석된 내용은 농도의 절대값 보다는 변화추세에 초점을 두고 있는 자료임. <그림 13>과 같이 대산지역의 이산화질소의 농도는 서울에 비해 상당히 낮은 수준이지만 2005년 이후 증가율이 상당히 높은 것으로 나타났음(왼쪽그림은 서울에서 이산화질소의 농도가 높음을 설명하고 중간과 오른쪽 그림은 서울과 대산지역의 변화율을 설명)



[그림 13] 이산화질소의 증가율

자료 : https://airquality.gsfc.nasa.gov/sites/default/files/airquality/ana_city_trend_Seoul_SouthKorea_map_7.jpeg

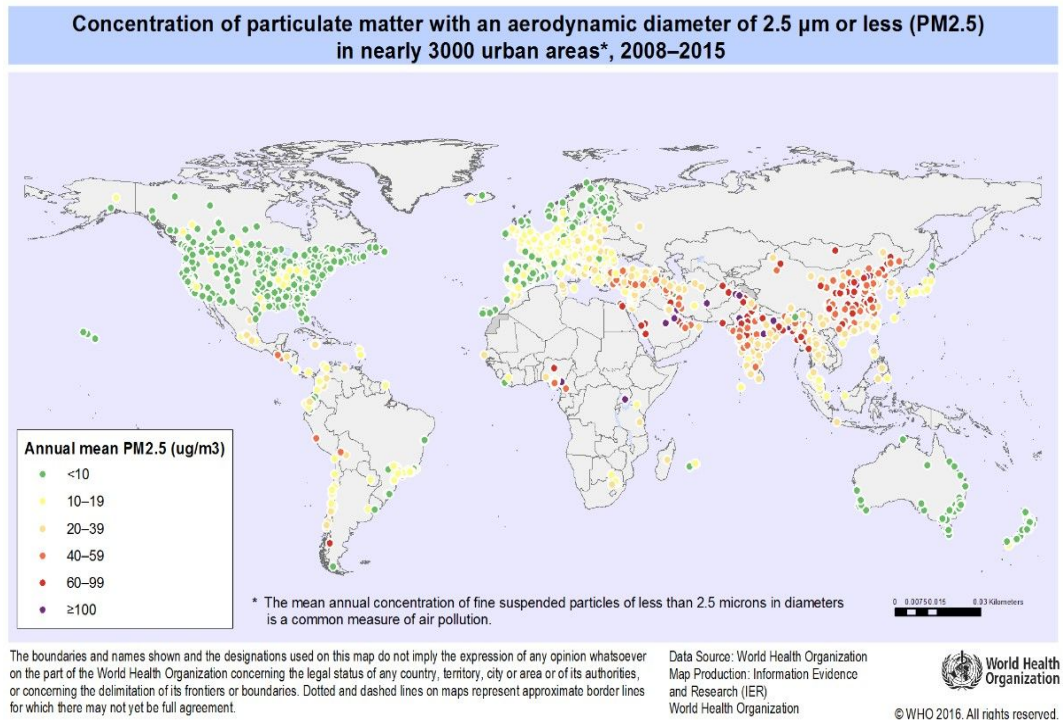
- NASA의 OMI 위성에서 이산화질소의 농도를 측정하는 방법은 자외선과 가시광 분광 스펙트럼을 이용하여 차등분광흡수법(Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS)에 의한 것으로, 지표에서의 정확도는 지상 대기측정망의 값보다 떨어지나, 넓은 영역, 지표 위의 상공의 값까지를 포함하여 나타냄

<표 8> 환경부 대기측정망과 NASA OMI 위성 측정의 차이점

구분	환경부(국립환경과학원)	NASA
측정 방법	화학발광법(Chemiluminescent Method)에 의한 것으로 그 측정값은 지표 근처의 이산화질소 혼합비 농도(공기분자 100만개 중 이산화질소의 개수)를 나타냄	자외선과 가시광 분광스펙트럼을 이용하여 차등분광흡수법(Differential Optical Absorption Spectroscopy, DOAS)에 의한 것으로 측정값은 대류권 내 기둥밀도(molecules cm ⁻² , 밀면적=1 cm ² , 높이=대류권이 되는 사각기둥내의 NO ₂ 총 개수)를 나타냄
측정값 범위	대기측정망 센서 위치 부근의 값만을 나타냄(실측)	넓은 영역, 지표 위의 상공의 값까지 포함하여 나타냄(모델)
정확도	높음	지상 대기측정망보다 떨어짐

4. 세계보건기구(WHO)

- 세계보건기구는 미세먼지(PM₁₀, PM_{2.5})의 노출로 인해 만성 폐쇄성폐질환, 허혈성 심장질환, 뇌졸중, 폐암, 급성 하부 호흡기 감염 등의 위험이 증가됨에 따라 미세먼지를 1급 발암물질로 규정하고 2011년도부터 전 세계 도시들의 미세먼지 오염도 자료를 분석하여 제공하고 있음
- 세계보건기구의 미세먼지의 연평균 농도값은 지상의 대기측정망을 통한 측정치와 위성 데이터 등의 다양한 소스의 데이터를 포함하여 통계 모델을 통해 추정된 값임
- 최근(2016.05.12.) 세계보건기구에서 발표한 미세먼지(PM_{2.5})의 농도는 2008년도부터 2015년도까지의 농도 값으로서 우리나라의 연평균 농도는 27.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 6개 등급으로 구분하였을 때 세 번째 등급의 수치를 보이고 있음(그림 14). 1 등급으로 구분된 도시는 미국, 캐나다, 스웨덴, 노르웨이, 뉴질랜드, 오세아니아 등이며 미세먼지 대기질이 상대적으로 나쁜 6등급으로 구분된 도시는 이집트, 인도, 중국 등인 것으로 나타남



[그림 14] 전세계 도시의 미세먼지(PM_{2.5}) 농도

자료 : WHO, 2016

5. 환경성과지수(Envrnmental Performance Index)

- 환경성과지수(EPI)는 미국 예일대 환경법·정책 센터와 컬럼비아대 국제지구과학정보 센터가 공동으로 분석하여 세계경제포럼(WEF)이 발표하는 지수로서 국가별 환경수준을 계량화하여 평가하는 환경 분야의 국제적인 지표 중에 하나임
- 환경성과지수(EPI) 평가지표의 부문은 환경보건과 생태계 지속성의 두 가지로 구성되어 있음. 환경보건 부문에는 건강영향, 대기질, 식수 및 위생 분야가 포함되어 있고 생태계 지속성 부문에는 수자원, 서식지, 에너지, 농업, 산림, 어업의 분야가 포함되어 있어 모두 9개 분야 19개 지표로 구성되어 있음
- <표 9>과 같이 환경성과지수(EPI)의 점수는 9개 분야 20개 지표에 대한 가중치 부여로 지수(100점 만점)를 산정하며, 대기질의 경우 인공위성자료를 사용하여 미세먼지(PM_{2.5})와 이산화질소(NO₂)의 모델 추정값을 사용함
- 우리나라의 환경성과지수(EPI) 순위는 2008년 51위, 2009년 94위, 2012년 43위, 2014년 43위, 2016년 80위로 환경수준이 점점 떨어지고 있는 것으로 나타남(1위에서 10위는 핀란드, 아이슬란드, 스웨덴, 덴마크, 프랑스 등의 유럽국가가 차지)

〈표 9〉 환경성과지수(EPI)의 평가지표와 가중치

EPI	Objective	Issue Category**	Indicator**
Environmental Performance Index (EPI)	Environmental Health (50%)	Health Impacts (33%)	Environmental Risk Exposure (100%)
		Air Quality (33%)	Household Air Quality (30%)
			Air Pollution – Average Exposure to PM2.5 (30%)
			Air Pollution – PM2.5 Exceedance (30%)
			Air Pollution – Average Exposure to NO2 (10%)
		Water and Sanitation (33%)	Unsafe Sanitation (50%)
			Drinking Water Quality (50%)
	Ecosystem Vitality (50%)	Water Resources (25%)	Wastewater Treatment (100%)
		Agriculture (10%)	Nitrogen Use Efficiency (75%)
			Nitrogen Balance (25%)
		Forests (10%)	Change in Forest Cover (100%)
		Fisheries (5%)	Fish Stocks (100%)
		Biodiversity and Habitat (25%)	Terrestrial Protected Areas (National Biome Weights) (20%)
			Terrestrial Protected Areas (Global Biome Weights) (20%)
			Marine Protected Areas (20%)
			Species Protection (National) (20%)
			Species Protection (Global) (20%)
		Climate and Energy (25%)	Trend in Carbon Intensity (75%)
			Trend in CO2 Emissions per KWH (25%)

자료 : EPI FINAL REPORT, 2016

- 2016년에 한국의 순위가 급락한 원인은 미세먼지(PM_{2.5}) 등 대기오염으로 인한 질병 부담이 높은 것으로 평가되어 환경보건 부문인 건강영향(Environmental Risk Exposure)과 대기질 분야(Air Pollution - Average Exposure to PM_{2.5}, Air Pollution - PM_{2.5} Exceedance, Average Exposure to Nitrogen Dioxide - NO₂, Household Air Quality)의 평가점수 하락에 기인한 것으로 분석됨

〈표 10〉 한국의 부문별 순위 변화

부문		EPI 순위	
		2014	2016
환경보건	건강영향	29	103
	대기질	166	173
	식수 및 위생	37	35
생태계 지속성	수자원	18	19
	서식지	108	126
	에너지	93	83
	농업	152	133
	산업	62	32
	어업	69	33
종합		43	80

자료 : EPI FINAL REPORT, 2014-2016 자료 정리

6. 경제협력개발기구(OECD)

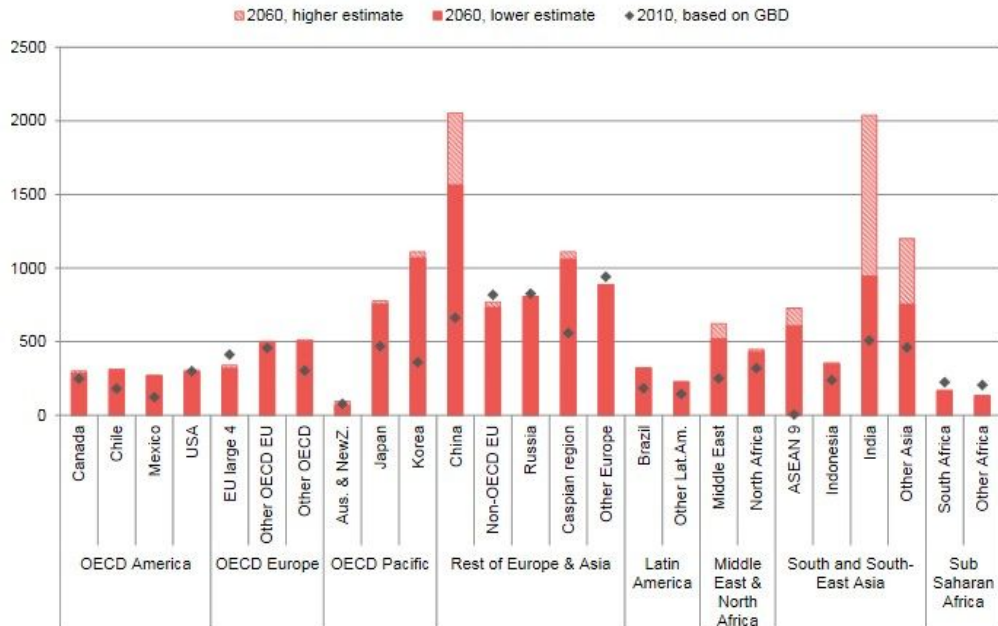
- 경제협력개발기구(OECD)는 최근에 대기오염에 의한 경제적 결과(The economic consequences of outdoor air pollution)를 통해 대기오염에 의한 조기사망자와 질병 부담률 등을 발표함
- 대기오염의 경제적 결과를 도출하기 위한 모델링은 경제활동에 의한 오염 배출, 농축, 노출, 생물물리학적 영향, 경제적비용 평가 등의 여러 단계를 거쳐 추정되었으며 대기 오염은 미세먼지(PM_{2.5})와 지표면 오존 증가로 인한 사회적 비용을 계산한 ENV-Linkages model과 a computable general equilibrium (CGE) model이 사용되었음(그림 15)



[그림 15] 대기오염에 의한 경제적 결과의 연구 단계 개괄

자료 : OECD, 2016

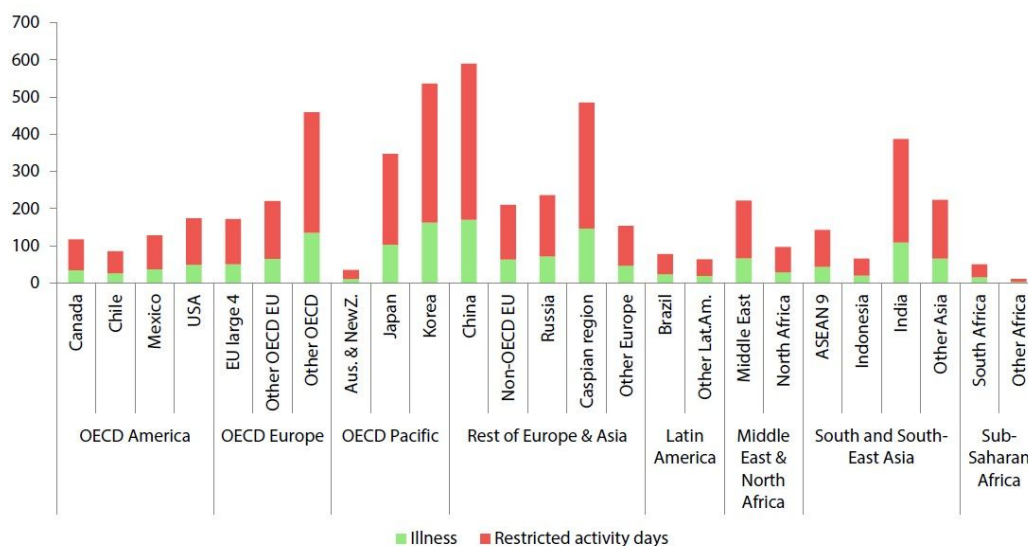
- 경제협력개발기구(OECD)는 대기오염(PM_{2.5}, 오존)에 의한 조기사망자수가 2010년 300만 명 수준에서 2060년에는 600만에서 900만 명으로 급증할 것으로 전망하였고 특히 조기사망자수가 증가할 것으로 예상되는 국가로 인도와 중국을 지적하였음
- 한국의 인구 100만명당 조기 사망자수는 2010년 359명이지만 대기오염에 대응하지 않으면 2060년에는 1,109명으로 3.1배 증가하는 것으로 나타나 OECD 국가 중에서 가장 높은 것으로 나타남(중국, 인도 제외)



[그림 16] 대기오염(미세먼지, 오존) 노출에 의한 조기사망자수

자료 : OECD, 2016

- 대기오염 관련 질병으로 인한 의료비 증가와 노동생산성 감소, 농작물 수확 감소 등으로 2060년에 연간 2조 6,000억 달러(약 3,000조원)의 손실이 발생할 것으로 전망하였는데 이는 전세계 국내총생산(GDP)의 1%에 해당하는 수치임



[그림 17] 대기오염(미세먼지, 오존) 노출에 의한 질병부담비용

자료 : OECD, 2016

7. 감사원

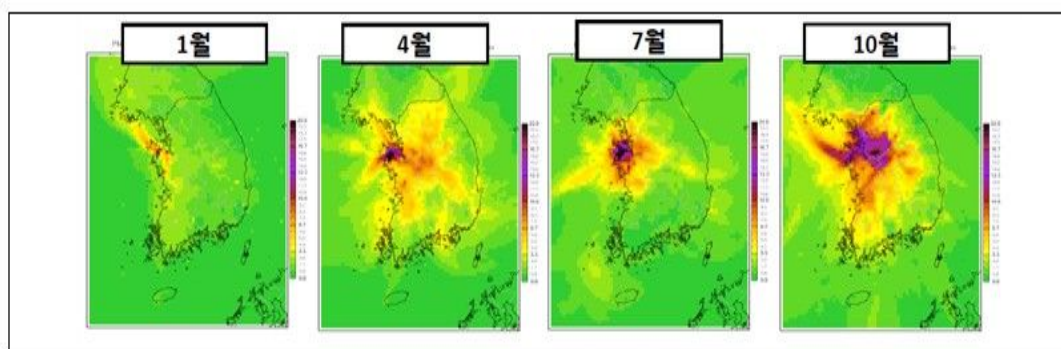
- 최근 수도권 대기환경 개선사업 추진실태에 대한 감사보고서에 의하면, 제2차 수도권 대기환경관리 기본계획 수립의 부적정의 문제점 중 하나로서 수도권 대기 환경에 영향을 미치는 충청남도 소재 화력발전소 등에 대한 관리대책을 마련하지 않은 점을 지적함
- 감사원 자료에 의하면, 주로 충남지역의 대규모 석탄화력발전소와 제철소 등에서 배출된 PM₁₀ 및 PM_{2.5}가 <그림 18>와 같이 주로 남동풍이 부는 7월부터 10월 사이에 수도권에 영향을 미치는 것으로 보임다고 추정함
- 그 영향 정도를 모델링한 자료에 따르면 <표 11>과 같이 수도권 지역 1일 최고 평균농도 대비 충청남도 지역에 소재한 발전소의 수도권 대기오염 기여율이 PM₁₀이 3~21%, PM_{2.5}가 4~28%에 이르는 것으로 추정함

<표 11> 수도권 지역에 대한 충남지역 발전소의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 일평균 최대 기여도

(단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3$, %)

구분	PM ₁₀				PM _{2.5}			
	1월	4월	7월	10월	1월	4월	7월	10월
수도권지역 1일 최고 평균농도	121.7	83.3	83.4	117.8	93.4	63.6	61.9	101.4
1일 최고 평균 농도 중 충남권 발전소의 최대기여농도	3.6	17.1	17.6	21.5	3.5	17.0	17.5	20.9
기여율	3	21	21	18	4	27	28	21

자료: 감사기간(2015. 11. 26. ~ 12. 23.) 중 한국대기환경학회 제출 자료 재구성



자료: 감사기간(2015. 11. 26. ~ 12. 23.) 중 한국대기환경학회 제출 자료 재구성

[그림 18] 충청남도 화력발전소 등 대규모 점오염원에 의한 미세먼지(PM_{2.5}) 확산

8. 충청남도

- 충청남도는 석탄화력발전시설, 석유화학단지, 철강(산업)단지 등이 몰려있는 서북부 환경취약지역에 대한 주민건강영향조사를 2013년도부터 실시하고 있으며 2013년도 주민건강영향조사의 한계점을 보완하여 2014년부터 2015년까지 환자대조군 연구를 실시하였음
- 1차년도부터 3차년도의 연구결과, 환경오염 취약지역과 비교지역의 중금속에서 유의한 차이를 보였음
 - － 취약지역은 내륙 비교지역 보다 혈중 카드뮴과 요중 비소가 유의하게 높았음
 - － 취약지역은 해안 비교 지역보다 혈중 카드뮴이 유의하게 높았음
 - － 성, 연령, 흡연, 생선섭취 빈도를 통계적으로 보정하고도 높게 나타남
- 1차년도 부터 3차년도의 취약지역과 비교지역의 비소 중분석을 비교한 결과, 발전단

지의 취약지역이 내륙 비교지역보다 무기비소 노출지표($iorgAs+MMA+DMA$) 등이 다소 높게 나왔으며 특히 이러한 경향은 성별, 연령, 생선섭취 빈도, 식수 종류에 따라 층화를 하였을 때에도 동일하게 나타남

- 단면연구 조사의 한계로 인해 인과성을 파악하는데 한계를 가지고 있어 추후 면밀한 연구 설계를 통해 주민건강영향조사를 진행할 필요가 있음

V. 결론 및 제언

1. 미세먼지 주범은 경유차? 석탄화력발전?

지역별 미세먼지 배출 특성을 고려한 배출원 관리 전략 수립 필요

충남은 에너지 산업연소 배출원 관리에 우선순위 두어야

- 올해 전국적으로 고농도 미세먼지의 지속 일수가 많아지고 있었고 마침 수도권 대기 특별법 관련 감사원 자료와 NASA 자료가 언급되면서 수도권의 대기질에 영향을 미치는 미세먼지 주범으로서 석탄화력발전소가 주목되기 시작하였음
- 이에 따라 국민들이 체감하는 미세먼지로 인한 불쾌감 등 미세먼지 개선에 대한 국민들의 요구가 급증하자, 환경부는 경유가격 인상과 고깃집 규제를 골자로 하여 미세먼지 대책을 발표함으로써 졸속 대책이라는 비판을 받고 있는 상황임
- 국립환경과학원 대기오염물질 배출량 자료에 의하면, 전국적으로 미세먼지를 가장 많이 배출하는 배출원은 제조업 연소, 비도로 이동오염원, 도로 이동오염원, 생산공정 순서였고 충남의 경우는 제조업 연소, 에너지 산업 연소, 생산 공정의 순서였음. 반면, 서울은 도로 이동오염원, 비도로 이동오염원, 비산업 연소의 순서로서 지역에 따라 미세먼지 주요 발생 배출원에 차이가 있었음
- 따라서 미세먼지 대책을 수립할 때 지역별 미세먼지 배출 특성을 고려한 배출원 관리 전략을 수립하는 것이 필요함
- 전국적으로는 제조업 연소 부분의 배출원 관리가 필요하며 서울은 승용차 등과 같은 도로 이동오염원 관리에 우선순위를 두고 충남의 경우는 타 시도에 비해 에너지 산업 연소 부분에 비중이 높기 때문에 이에 대한 배출원 관리에 우선순위를 두는 것이 필요함

2. 우리나라 대기질(미세먼지 농도) 계속 악화되고 있다?

주요 도시들은 과거에 비해 개선되었으나 국제기준과 비교해보면 더 개선 필요

충남은 대기측정망의 부재로 판단내릴 수 없어

- 최근 세계보건기구(WHO)에서 발표한 전 세계 도시들의 미세먼지 오염도 자료를 보면, 우리나라 주요 도시는 전체 6등급 중에 3등급으로서 1980년대에 비해 미세먼지(PM₁₀) 농도가 많이 개선되었음을 알 수 있으나 국내 환경기준이 세계보건기구

(WHO)에서 권고한 환경기준과 2배가 차이가 나 여전히 대기질 개선이 필요한 것으로 보임

- 충남의 경우 미세먼지 측정망이 설치되어 있는 당진시, 서산시, 천안시 등의 미세먼지 일평균 농도의 연도별 추이를 보면 대기환경기준(일평균치 : $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과한 날의 횟수가 점점 감소하는 경향을 보이고 있어 개선되는 것으로 보이고 있으나 일부 지역에 제한된 수치이므로 충남 전역에 대한 정확한 판단은 내릴 수 없음

3. 연구마다 통계자료와 결과가 달라? 어느 자료가 맞는 거지?

미세먼지 발생원 산정과 연구방법에 따라 달라

- 미세먼지 발생원에 대한 구분은 나라마다 차이를 보이고 있으며 환경부는 국내의 각종 통계자료(사업장 정보, 에너지 사용량, 자동차 주행거리 등 120여개 유관기관 300여개의 자료)를 활용하여 1차로 생성되는 미세먼지 배출량을 산정하였음. 반면에 일부 국외 기관에서 사용하는 자료는 미세먼지 중에 포함되어 있는 구성성분으로 발생원을 추정하여 2차 생성 미세먼지까지 고려하여 산정한 차이가 있음
- 우리나라 대기질(미세먼지)에 있어 세계보건기구(WHO)에서는 전세계와 비교하였을 때 중간 정도인 것으로 분석한 반면 환경성과지수(EPI)에서는 180여개국 중에서 173위로 나쁜 것으로 평가함
- 평가 방법의 차이는 세계보건기구(WHO)의 경우 측정망의 실측값에 초점을 두고 위성데이터 등의 다양한 소스를 통한 모델을 통해 추정한 측정치인 반면 환경성과지수(EPI)는 측정망의 실측값보다는 위성데이터를 사용하여 통계모델을 통해 추정한 값이라는 차이가 있음
- 따라서 연구마다 발생원 산정과 연구방법에 따라 차이를 보이고 있어 어느 부분에 초점을 두고 연구한 방법인지에 대한 이해를 전제로 하여 연구 결과를 판단할 필요가 있음

4. 미세먼지 예·경보 발령, 정확한 거야?

전국적으로 대기측정망의 성능(정도 관리) 점검 필요

충남은 대기측정망 확대·관리 필요

- 감사원 자료에 의하면, 수도권 미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 측정기의 54 %가 성능 미달이었으며 미세먼지(PM_{10}) 측정기도 16 % 허용 오차율을 넘어선 것으로 지적되었음

- 미세먼지 예·경보가 측정망의 수치를 근거로 하여 발령된다는 것을 감안하면 이러한 감사원의 지적들은 정부에 대한 불신과 막연한 불안감을 일으킬 수 있음
- 전국적으로 대기측정망의 성능(정도 관리) 점검을 통해 보다 정확한 예·경보 발령이 필요하며 충남의 경우 서북부 지역에 몰려있는 대기측정망을 충남 전역에 합리적으로 확대·배치하고 관리해야 함

5. 석탄화력발전소에서 나오는 미세먼지, 우리가족의 건강은?

국내·외 연구결과, 호흡기·폐질환, 조기사망 등에 영향이 있는 것으로 나타나
충남은 명확한 건강피해 규명을 위한 연구와 예방·관리 사업 강화 필요

- 다양한 국내·외 역학연구 결과를 통해 미세먼지가 호흡기 및 폐질환, 심혈관계 질환, 조기사망 등에 영향을 미치는 것으로 그 인과관계가 증명되고 있음
- 충남은 2013년도부터 진행해왔던 환경취약지역 주민건강영향조사를 기반으로 하여 향후 보다 면밀한 연구 설계를 통해 미세먼지 등 대기오염 노출에 의한 건강피해 규모 및 노출 인구 집단 등을 규명하여 건강피해 예방·저감 대책을 강화해야함

6. 충남의 대기관리정책과 환경보건정책의 연계 필요

대기오염(미세먼지) 관련 질환에 민감한 취약계층 우선 관리 필요

- 외국에서는 대기측정망을 통해 수집된 데이터를 대기관리정책뿐만 아니라 도시 및 토지 이용, 교통, 주민건강영향평가 등 도시계획과 환경보건정책과 연계하여 다양하게 활용하고 있음
- 주로 대기오염(미세먼지) 노출에 민감한 집단으로는 고령자, 어린이, 만성질환 환자로서 이들 집단의 노출을 최소화시킬 수 있도록 대기오염관리와 환경보건관리의 연계 추진이 필요함

**7. 석탄화력발전소로 인해 충남은 수도권 보다 더 심각한 영향을 받을 수 있어
수도권 중심의 대기환경관리 정책은 개선되어야 함**

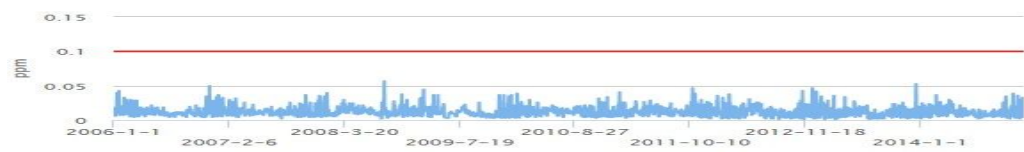
- 대기오염이 심각한 수도권 지역의 대기오염원을 체계적으로 관리하기 위해 2003년에 ‘수도권 대기환경개선에 관한 특별법’이 제정되면서 대기오염 측정망이 수도권에 집중되기 시작하였음(충남의 보령시와 서천군의 경우 석탄화력발전소가 위치해 있음에도 불구하고 대기측정망이 하나도 없음)
- 수도권의 경우 대기오염측정망을 통해 측정된 데이터를 가지고 관련 질환과의 연관성 등을 규명하는 연구와 이를 기초로 한 대책들이 추진되고 있어 수도권 중심의 정책 수립이 반복되고 있는 상황임(환경부의 2103년도 대기개선 사업비를 기준으로 보면, 수도권 대기개선업 추진비는 89,520 백만 원으로 수도권 외 오염심화지역 대기개선사업비 14,917 백만 원에 비해 약 6배가 많았음)
- 최근 석탄화력발전소에 의한 미세먼지가 전국민의 관심사항이 된 배경에는 충남의 석탄화력발전소에서 배출되는 미세먼지가 수도권 대기질에 영향을 미친다는 감사원 자료 보도가 시발점이 되었음
- 감사원 자료에 의하면 수도권 미세먼지의 최대 28%가 충남석탄화력발전에서 기여했다고 하는데 이것을 근거로 석탄화력발전소가 있는 충남지역에는 더 심각한 영향을 미칠 수 있다고 추정할 수 있음
- 따라서 대기환경개선을 위해서 수도권 중심의 정책에서 벗어나 전국적으로 대기측정망의 배치가 합리적으로 이루어져야 하며 대기환경오염 등의 피해 현황을 근거로 한 공정한 대기환경정책이 수립되어야 함

[참고자료]

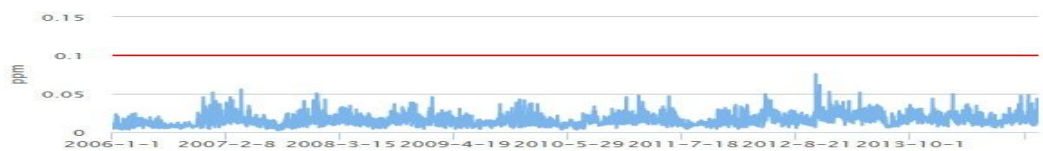
1. 충남의 이산화질소(NO₂) 일평균 농도 추이(2006년-2014년)



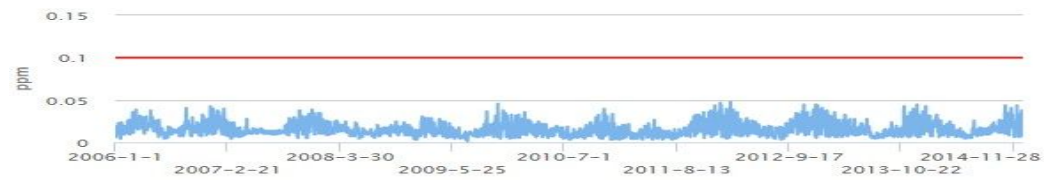
당진시 정곡리(도시대기측정망)



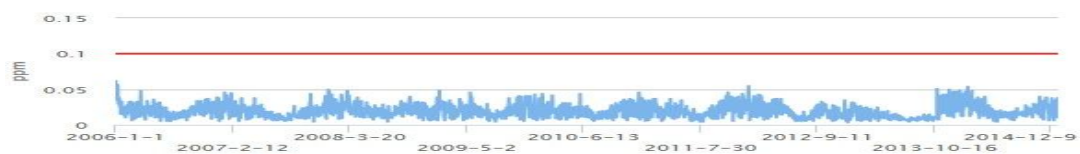
당진시 난지도리(도시대기측정망)



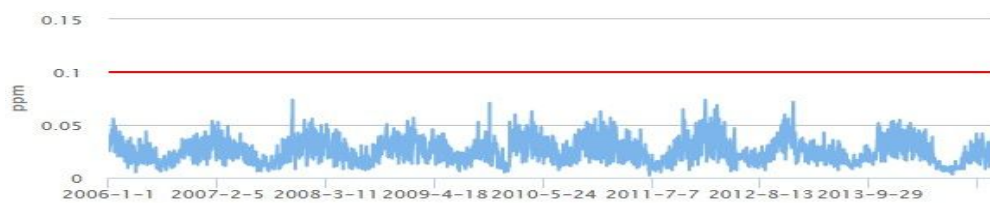
서산시 독곶리(도시대기측정망)



서산시 동문동(도시대기측정망)



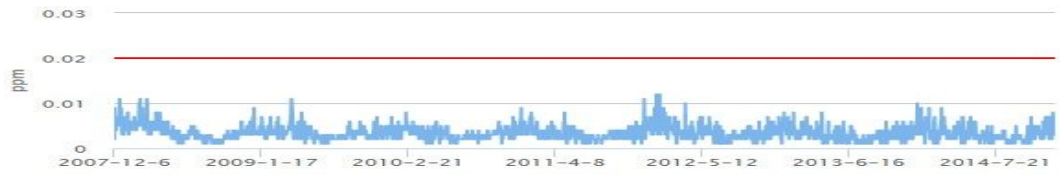
천안시 백석동(도시대기측정망)



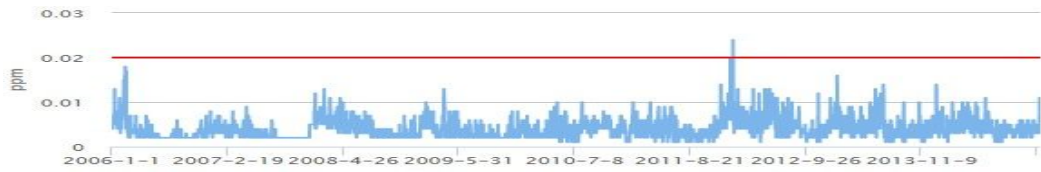
천안시 성황동(도시대기측정망)

* NO₂ 대기환경기준(연 평균: 0.03 ppm, 24 시간 평균: 0.06 ppm, 1시간 평균: 0.10 ppm)

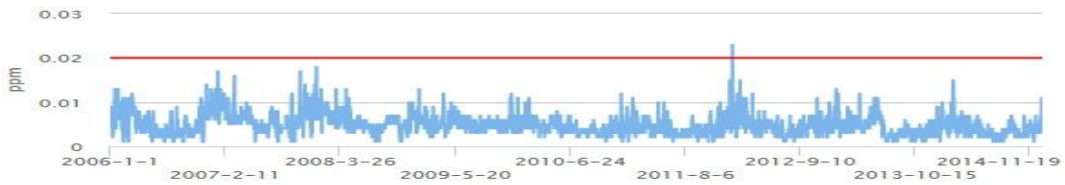
2. 충남의 아황산가스(SO₂)의 일평균 농도 추이(2006-2014)



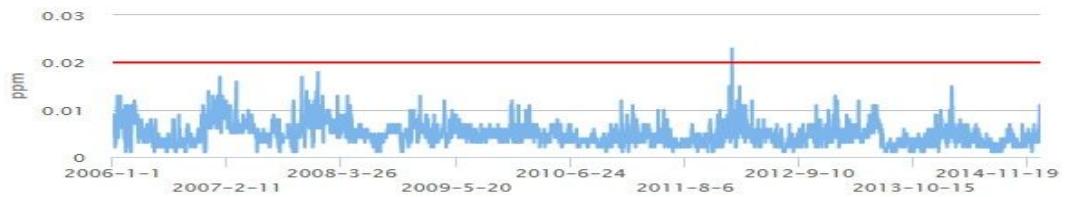
당진시 정곡리(도시대기측정망)



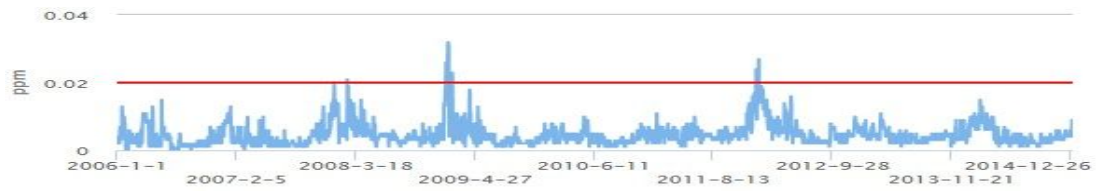
당진시 난지도리(도시대기측정망)



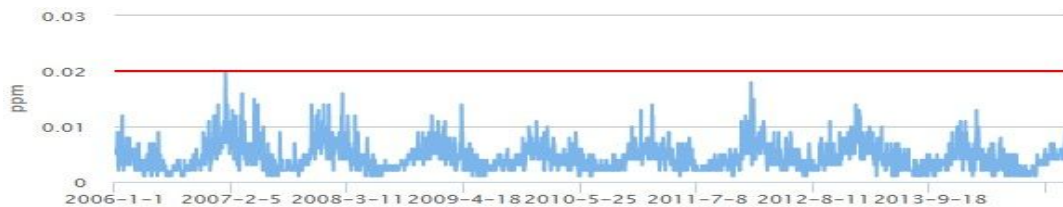
서산시 독곶리(도시대기측정망)



서산시 동문동(도시대기측정망)



천안시 백석동(도시대기측정망)



천안시 성황동(도시대기측정망)

* SO₂ 대기환경기준(연 평균 :0.02 ppm, 24 시간 평균:0.05 ppm, 1시간 평균:0.15 ppm)

주 제 발 표 - 2

충남지역 대규모 점오염원의
초미세먼지 기여도 분석



아 주 대 학 교
김 순 태 교수

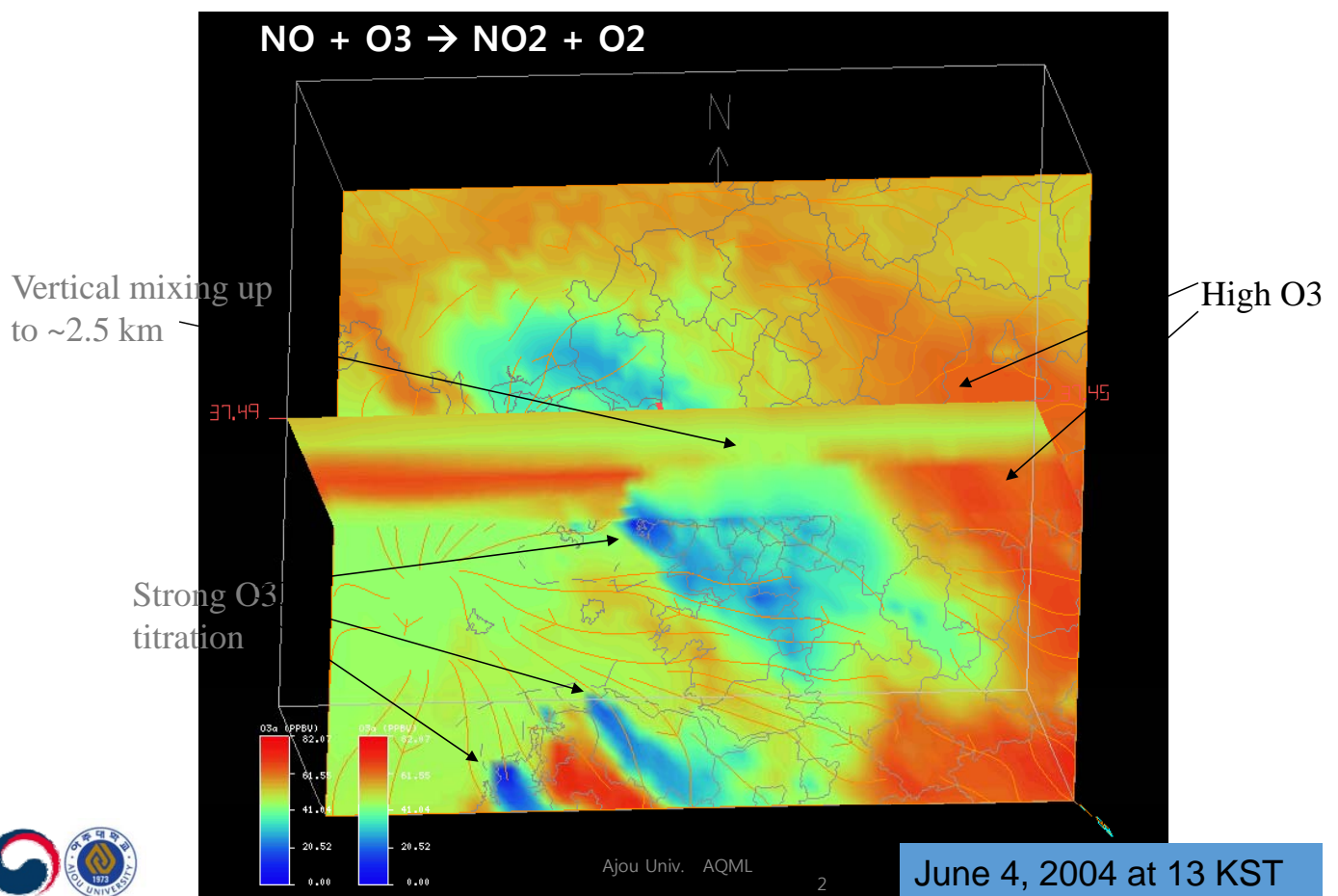
충남지역 대규모 점오염원의 초미세먼지 기여도 분석

김순태

아주대학교 환경안전공학과

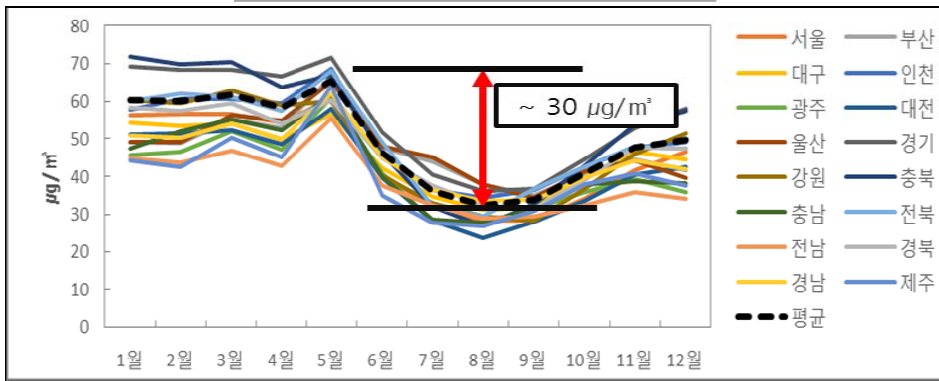
Simulated O3 Concentrations over Seoul & CN

2



PM₁₀ 농도 변화

2011~2014 평균

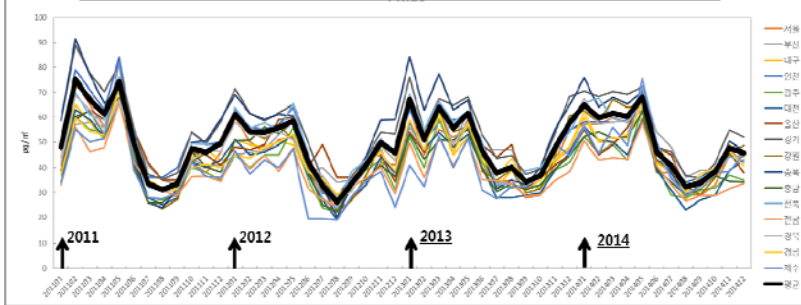


4년 평균 농도(μg/m³)

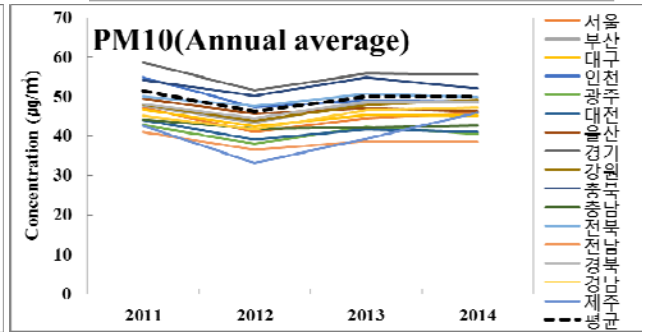
지역	4년 평균 농도(μg/m³)
경기	55.4
충북	52.9
인천	50.0
전북	49.5
경북	47.5
강원	47.2
울산	47.1
부산	47.0
경남	45.1
대구	44.9
서울	44.6
충남	42.7
대전	41.5
광주	40.9
제주	40.3
전남	38.7
평균	46.0

~ 10 μg/m³ (상위 지역)
~ 8 μg/m³ (하위 지역)

PM₁₀ 월평균 농도 변화 (2011 ~ 2014)



최근 4년 연평균 PM₁₀ 농도 변화

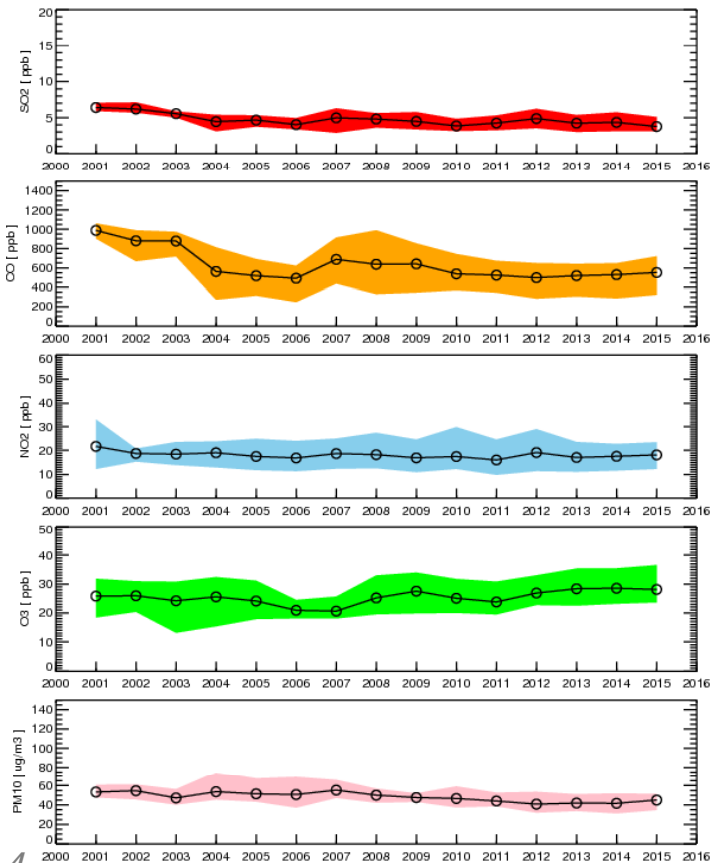


ref : 대기환경연보

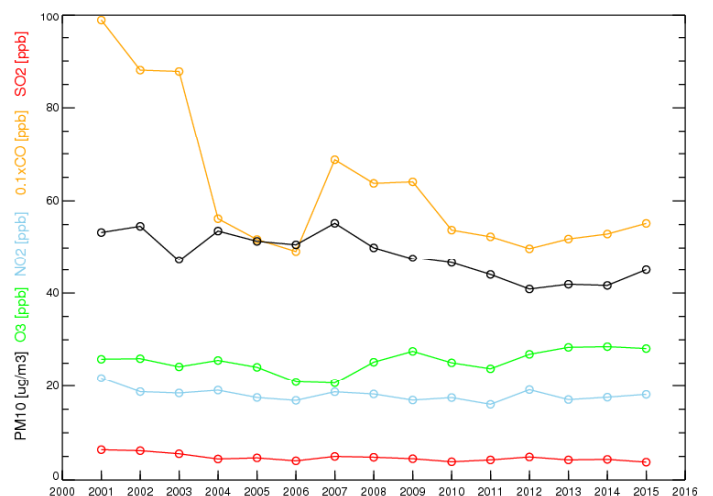
2001년~2015년 충남 기준성 대기오염물질 변화



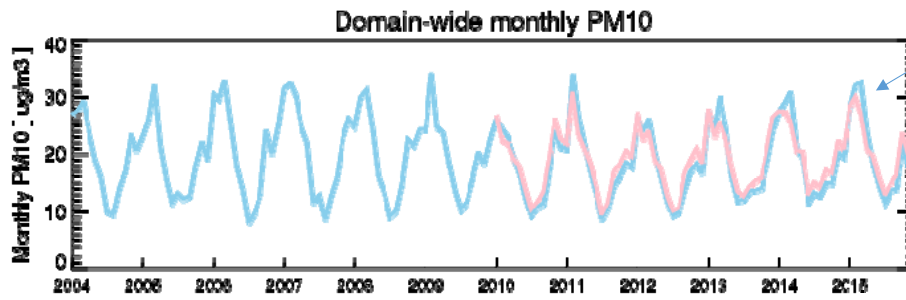
Observed Annual Mean Concentrations over Choongnam



Observed Annual Mean Concentrations over Choongnam

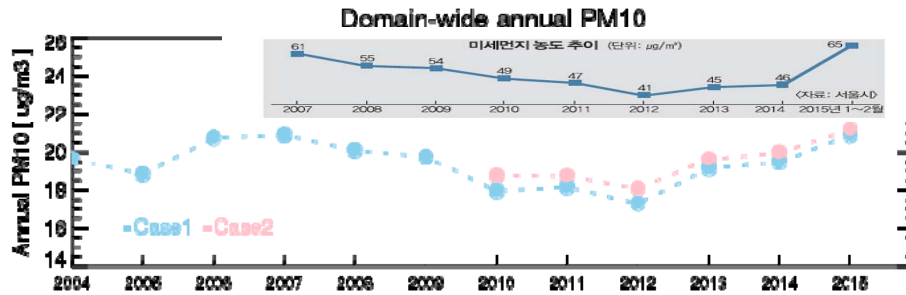


2004-2015년 남한지역 PM10 모사농도 변화



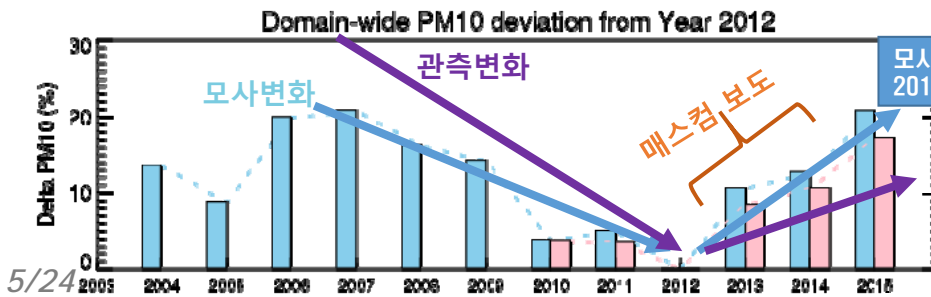
2개의 배출 시나리오
농도는 차이를 보이나, 변화패턴은 유사

컴퓨터 시뮬레이션 시 배출량 고정
기상 요소만 변화



서울시 2007년 대비 2012년 -50% 감소

하강세, 증가세 차이 정도에 대한 원인 및
영향 분석 필요:
기상, 저감대책, 국외영향, 배출량 민감도



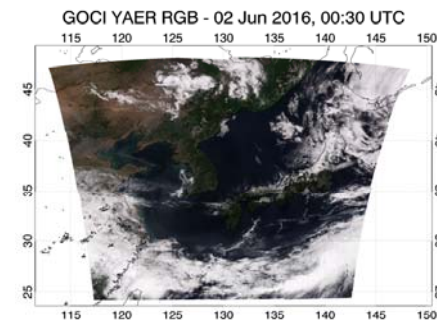
모사: 남한지역 2007년 대비 2012년 -20% 감소
2012년 이후 서울시에 비해 가파른 증가세

대기오염물질의 장거리 수송

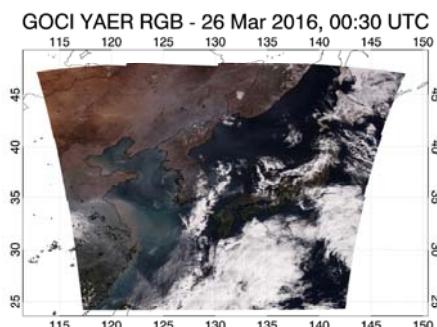


MAIDS (True color)

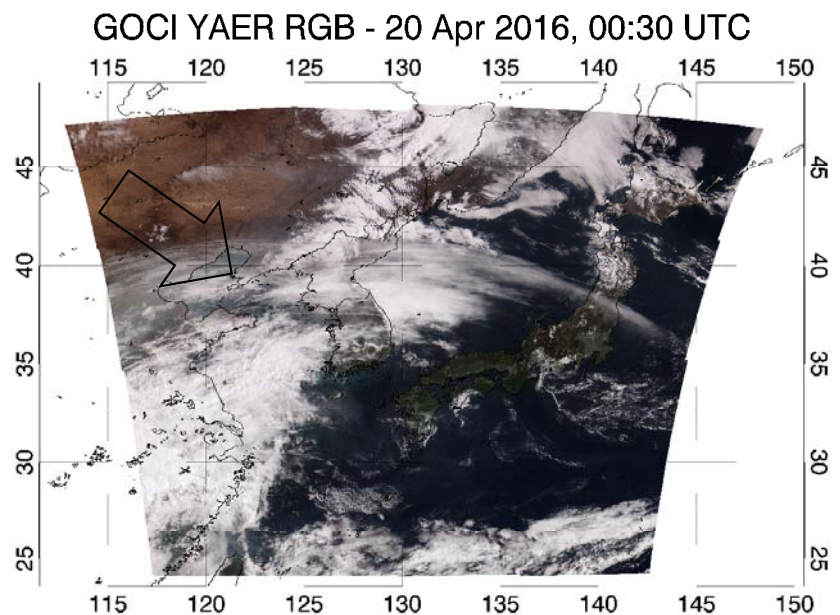
비 이동 사례(맑은 날)



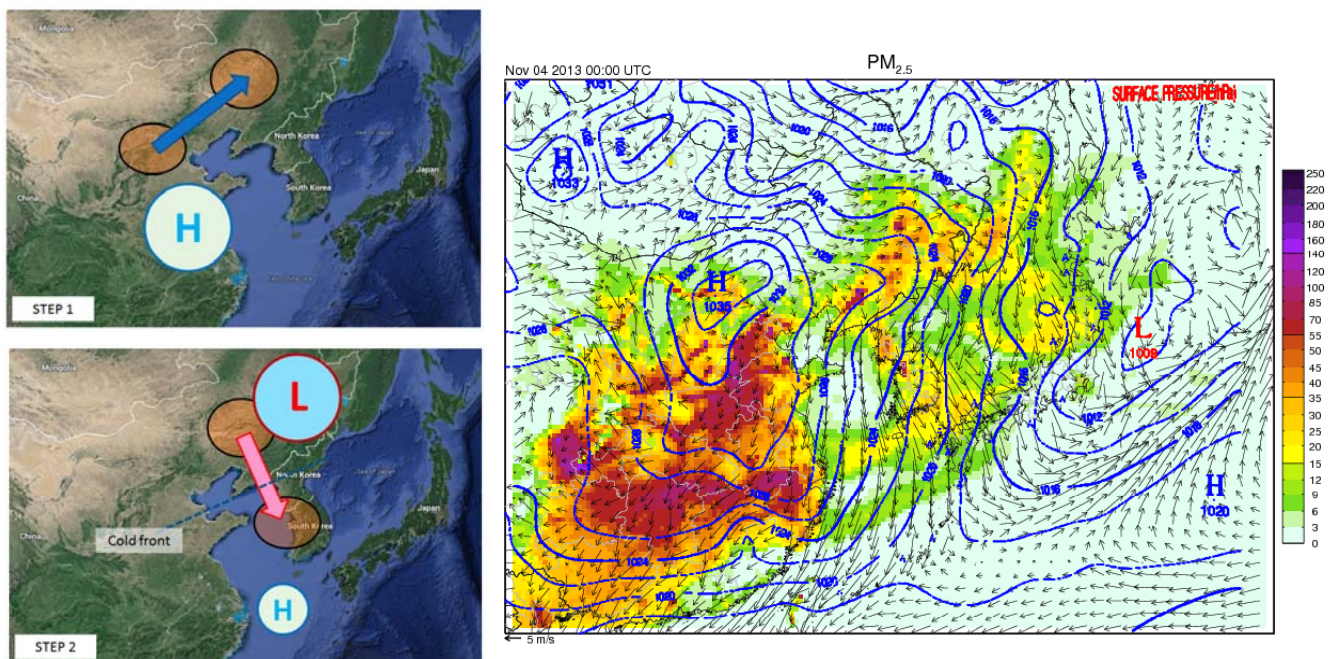
이동 사례



이동 사례(애니메이션)



대기오염물질 장거리 이동



Synoptic perspectives of pollutant transport patterns observed from satellites over East Asia, Kim et al., 2014, CMAS conference

Air Resources Laboratory

7

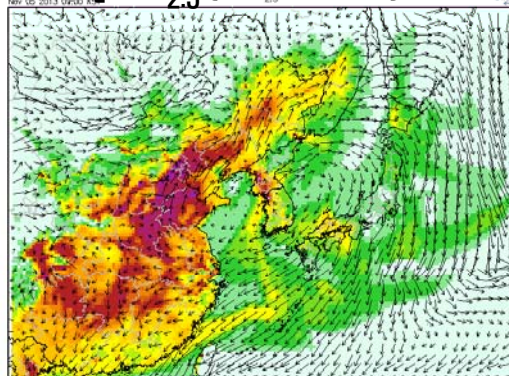
CMAQ: 시뮬레이션
MODIS, COME-2: 위성

CMAQ 및 AOD 비교

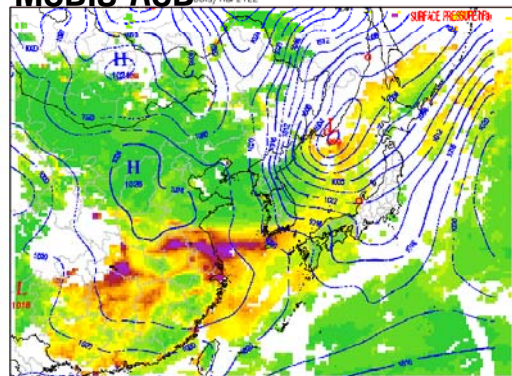


AOD: Aerosol Optical Depth

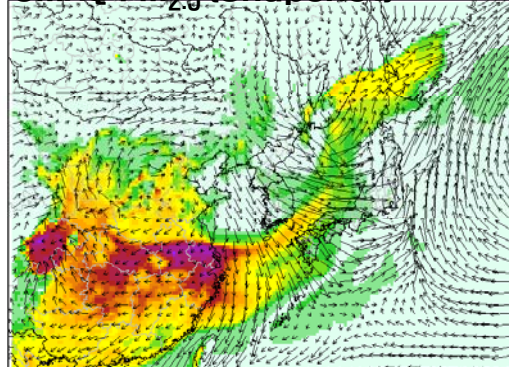
CMAQ PM_{2.5} (Animation)



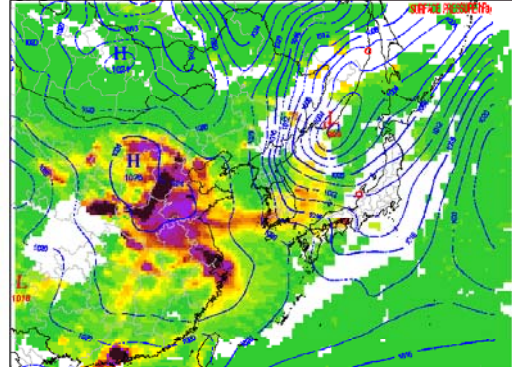
MODIS AOD



CMAQ PM_{2.5} (Snapshot)



GOME-2 NO₂



2차 생성 미세먼지

홈 > 뉴스 > In-Depth > Point of View

[심층분석] "미세먼지 2차 생성물질 규명 어렵다"

방향 잃은 미세먼지 대책

*출처: <http://www.thescoop.co.kr/news/articleView.html?idxno=20364>

[194호] 2016년 06월 06일 (월) 09:52:39

고준영 기자 shamandn2@thescoop.co.kr



환경부가 미세먼지 저감 대책으로 '경유 값 인상안'을 내놓자 여론의 질타가 쏟아지고 있다. 특히 전문가들의 비판이 날카롭다. 미세먼지를 줄이는 게 쉬운 일이 아니라는 이유에서다. 박기홍 광주 과학기술원 교수는 "2차 생성물질을 규명하는 것도 쉽지 않다."고 꼬집었다. 정부는 지금 무엇을 하고 있는 걸까.

▲ 미세먼지 불안감은 커져가는데 정부는 대책은커녕 발생원인조차 규명하지 못하고 있다.[사진=뉴스시스]

미세먼지, 제대로 된 통계가 없다

f t 8+ 7

환경부서 발간한 책자엔
전체 미세먼지양에 육박하는
비산 미세먼지는 집계 안해
3일 대책 근거로 내세운 통계는
초미세먼지 제조업 비중 낮아지고
발전소·경유차 비중은 높아져
해외 연구기관 조사와도 상이
미세먼지 2차 생성물 집계도
정확성 논란... 추가 연구 필요

*출처: <http://www.hankookilbo.com/v/59c44539a4094d47958a5c2241a8a8dc>

'배기가스가 미세먼지로...' 2차 생성도 문제

입력 2016.05.31 (06:40) | 수정 2016.05.31 (08:29) | 712

뉴스광장 1부

[탐사플러스] "2차 오염물질 상당" 결과 나오기 전 대책 내놓은 정부

[JTBC] 입력 2016-06-06 21:51 | 수정 2016-06-08 00:13

공저: 뉴스를 보는 새로운 방식, JTBC 카드뉴스를 선보입니다!

URL 열리기

*출처: http://news.jtbc.joins.com/article/article.aspx?news_id=N811247744

*출처: <http://news.kbs.co.kr/news/view.do?ncd=3287714&ref=A>

9/26

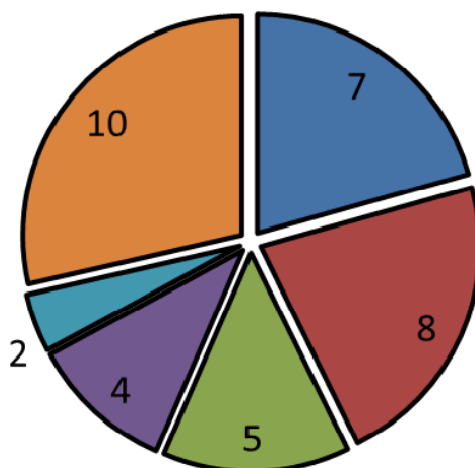
Ajou University
Environmental Engineering

PM2.5 관측농도



PM2.5 연평균 성분 농도(2014, 불광동), unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

연평균 : $36 \mu\text{g}/\text{m}^3$



SO42-
NO3-
NH4+
OC
EC
Unknown

가스상 오염물질

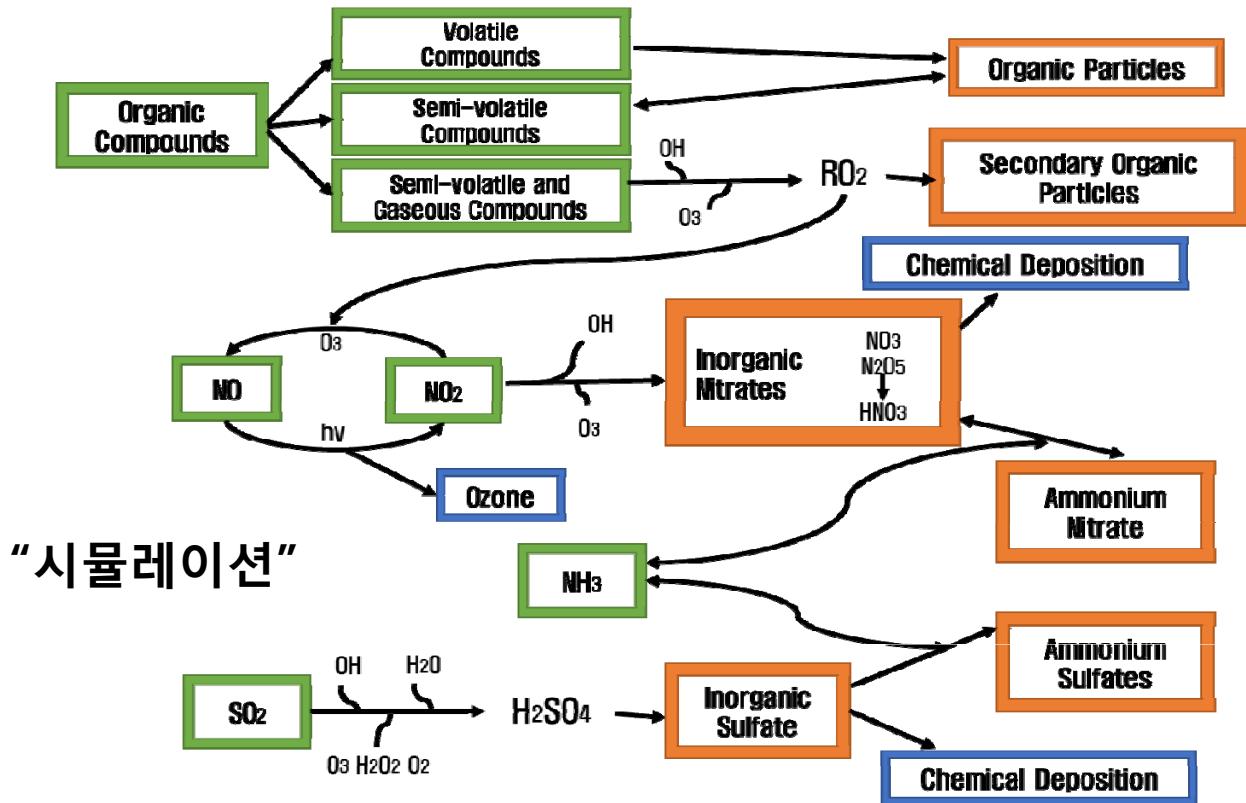
SO2

NOx

NH3

10/24

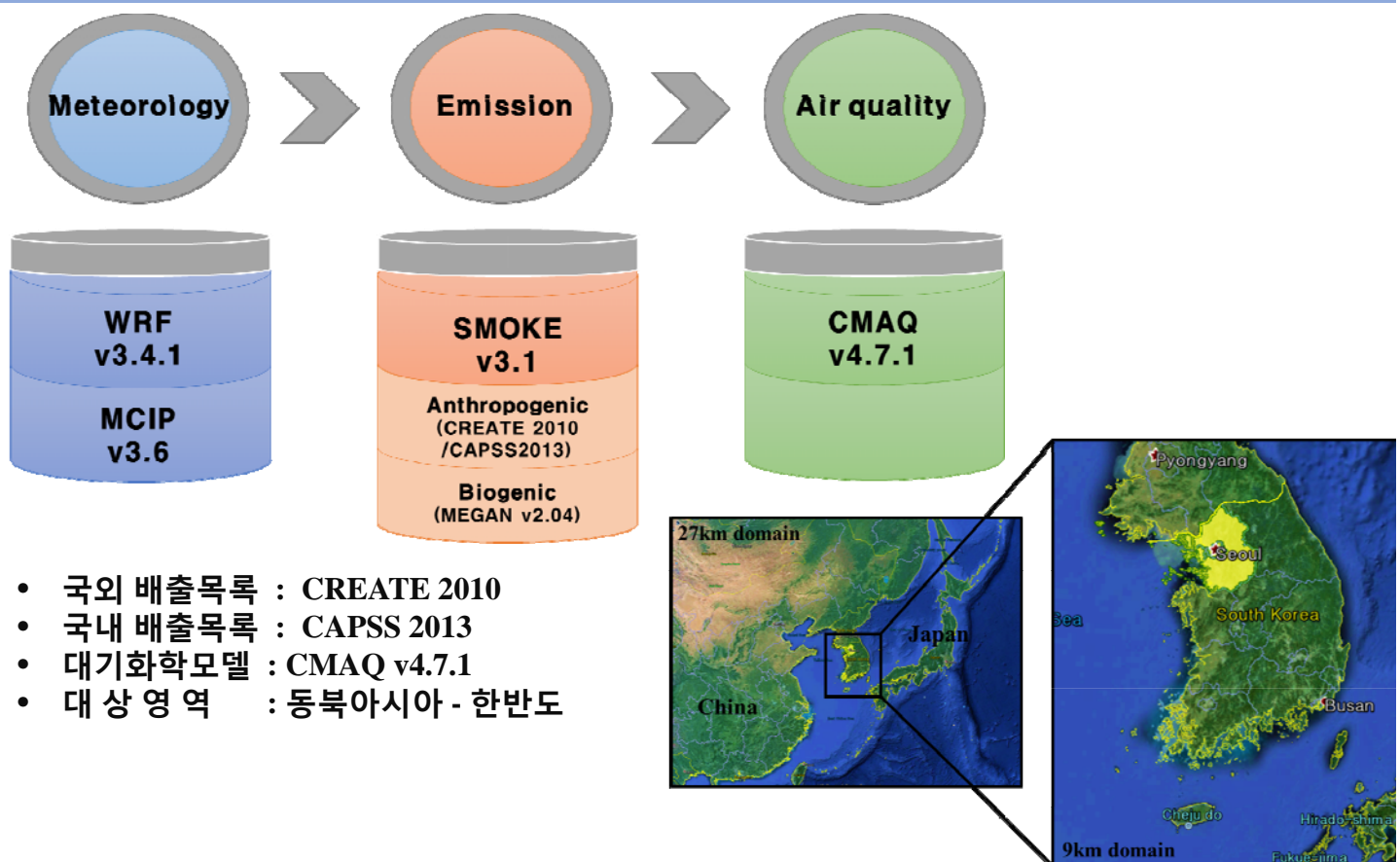
Ajou University
Environmental Engineering



11/24

Ajou University
Environmental Engineering

대기질 모델링: 배출량 중심 기여도 분석 방법



◆충남지역 화력발전



◆ 모사영역

한반도를 포함한 9km 격자 domain

◆ 모사기간

2010년 1, 4, 7, 10월(각 계절의 대표 월)

◆ 모사대상

수도권과 인접한 충남지역에 위치한 화력발전 및 대형점오염원

◆ 모사수행

WRF(기상)-SMOKE(배출량)-CMAQ(대기질 모사)

Model Configuration

- WRF (Weather Research and Forecast)
- SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions)
- CMAQ (Community Multi-scale Air Quality)

CMAQ

Version	Version 4.7.1
Chemical Mechanism	SAPRC 99
Aerosol Module	AERO5
Boundary Condition	Default profile for the 27km domain
Advection Scheme	YAMO
Horizontal Diffusion	Multiscale
Vertical Diffusion	Eddy
Cloud Scheme	RADM

WRF

Version	Version 3.4.1
Micro Physics	WSM6(Hong and Lim, 2006)
Cumulus Scheme	Kaio-Fritsch(Kain 2004)
Long wave radiation	RRTM(Mlawer et al, 1997)
Short wave	Dudhia Scheme
PBL Scheme	YSU(Hong et al, 2006)
LSM Scheme	NOAH(Chen and Dudhia 2001)

< CMAQ and WRF configurations used in this study >

- 본 연구에서는 WRF – SMOKE – CMAQ framework를 이용하여 모사를 진행함

◆기여도 분석 방법 : BFM(Brute Force Method)

* BFM : 분석하고자 하는 하나의 변수를 선택하고 그것을 제외한 나머지 변수 및 조건은 동일하여 선택한 변수를 수정하거나 반대로 나머지 변수 및 조건을 수정하여 그 영향을 알아보는 방법

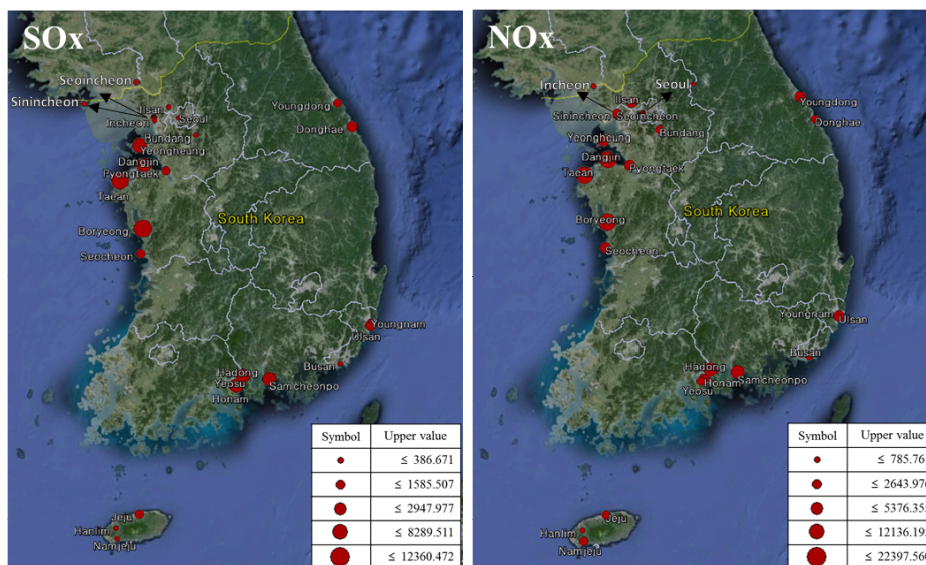


- I. 기본모사 수행
- II. 20% 삭감모사 수행
→ 대상이 되는 화력발전 배출량을 20% 삭감하여 수행
- III. (기본모사 - 20%삭감모사) X 5 = 화력발전소의 영향

기여도분석 - 기존화력

◆배출량

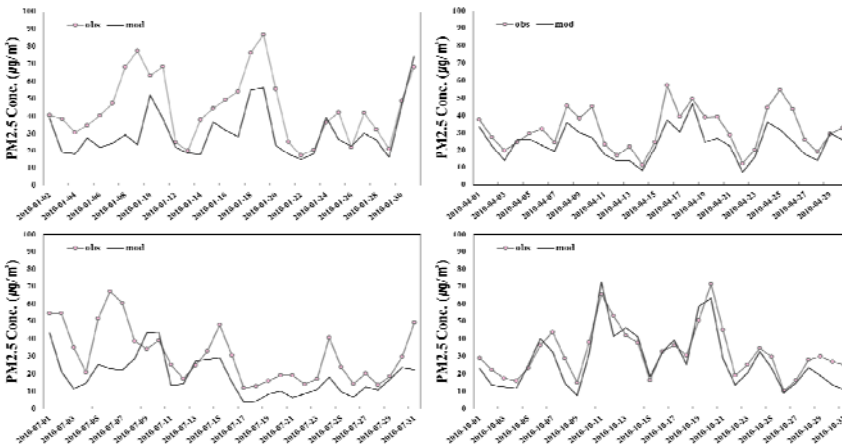
- 배출량은 CAPSS 2010 배출목록을 기반으로 산정하였기 때문에 2010년 이후에 설립된 발전시설의 경우 대상에서 제외됨
- 주로 해안가에 위치하였으며 충남 및 경남지역에 주로 규모가 큰 발전시설이 있음



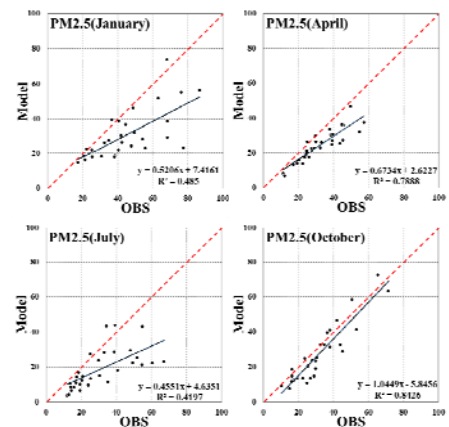
◆ Model Performance Evaluation



- 수도권 지역에 위치한 8개 측정소의 관측값을 사용하여 비교함
- 상관계수는 10월에 0.8426으로 가장 크게 나타났으며 7월에 0.4197으로 가장 낮게 나타남
- 전반적으로 과소모사하는 경향을 보임



Ajou University, AQRL

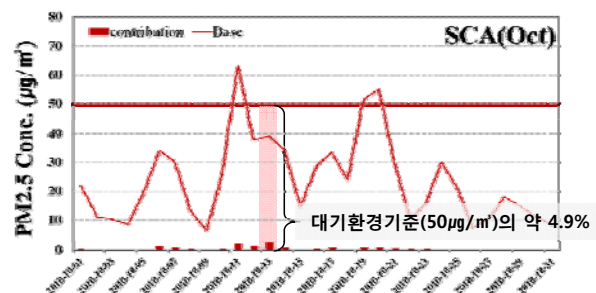
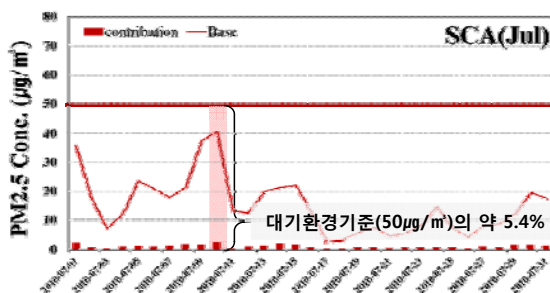
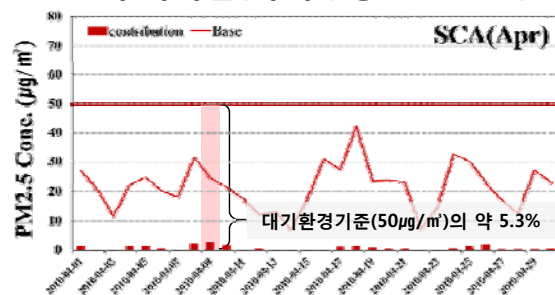
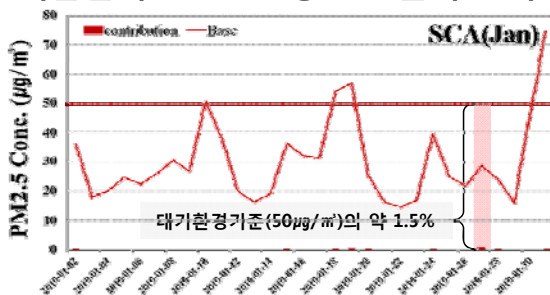


17

기여도분석 - 기존화력

◆ 일평균 기여농도

- 화력발전이 수도권지역의 일평균 PM2.5농도에 미치는 영향을 나타냄
- 여름철인 7월에 일평균 대기환경기준인 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 최대 5.4%까지 차지함
- 겨울철에는 PM2.5농도는 높지만 기여도는 낮게 나타남(국외영향으로 판단)

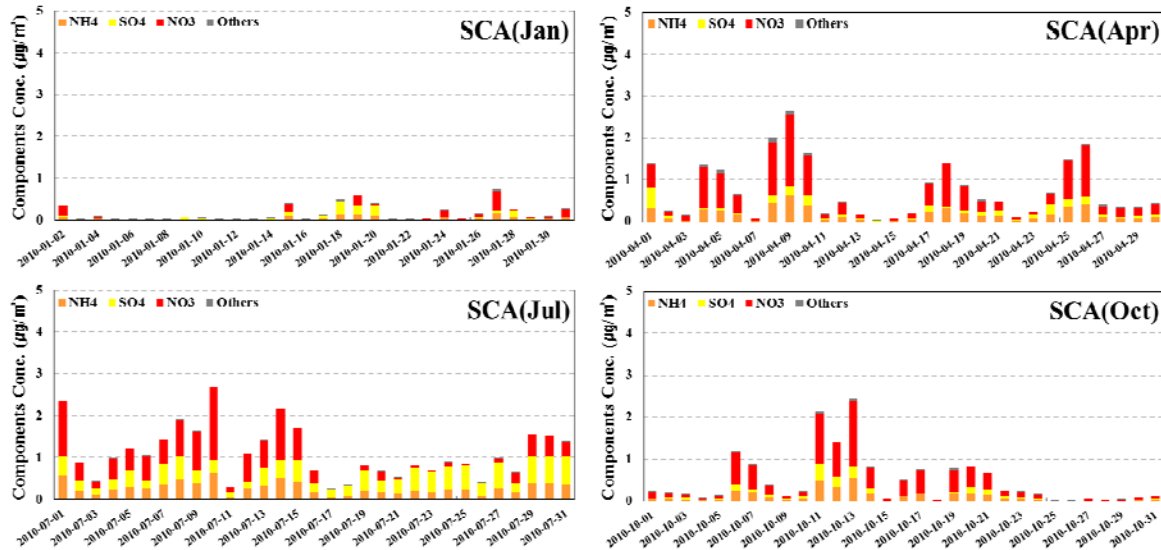


Ajou University, AQRL

18

◆PM2.5 성분 기여도 분석

- PM2.5 의 주요 성분인 Nitrate, Sulfate 및 Ammonium을 나타냄
- 전반적으로 Nitrate가 상대적으로 큰 비율을 차지하는 것으로 나타났으며 Sulfate의 경우에는 여름철에 비율이 크게 증가하는 것으로 나타남



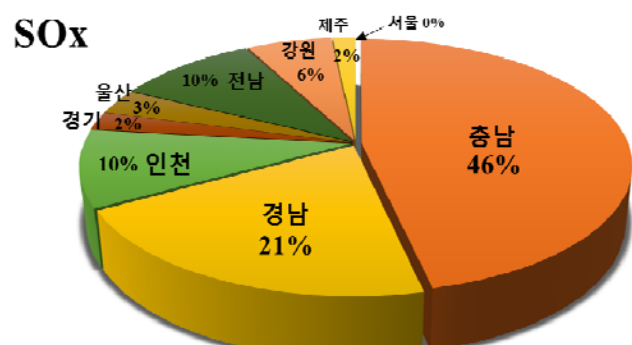
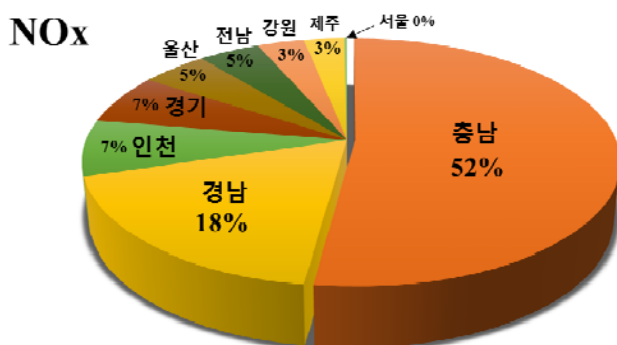
Ajou University, AQRL

19

기여도분석

◆충남영향 분석 이유

- 기존화력에서 충남지역은 NOx 52%, SOx 46%로 절반 정도를 차지함
- 우리나라는 편서풍의 영향을 받기 때문에 충남 해안에 위치한 발전시설이 인구밀도가 높은 수도권지역에까지 영향을 미칠 수 있기 때문에 모사대상으로 설정함
- 충남지역에 위치한 대형 점 오염원의 배출량을 수정하여 그 영향을 분석함



기여도 분석 - 충남지역



◆ 격자별 월평균 기여농도



PM _{2.5}	1월	4월	7월	10월
기본모사	33.4	23.7	17.5	27.2
기여농도	0.4	1.2	1.7	1.5

unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

◆ 격자별 월평균 최대기여농도

PM _{2.5}	1월	4월	7월	10월
기본모사	42.4	30.4	26.2	35.5
최대기여농도	1	3.9	6.8	2.7
기여도	2%	13%	26%	8%

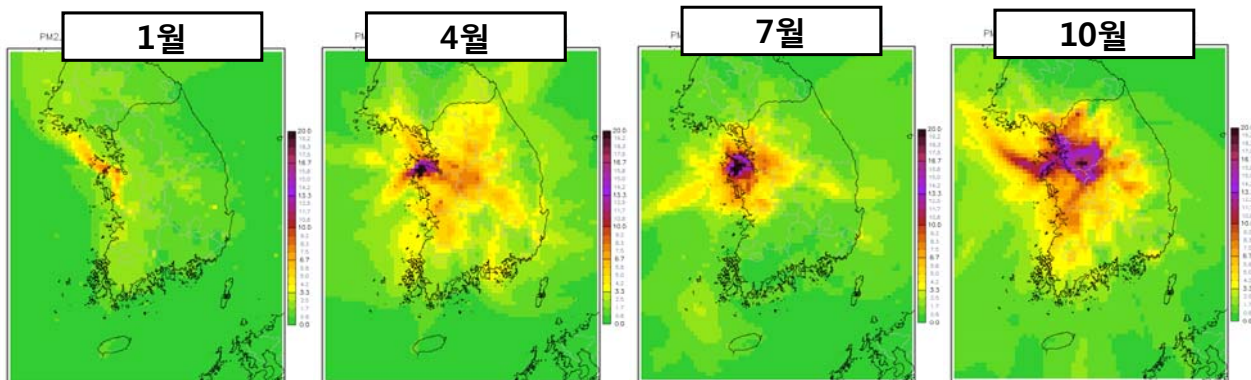
unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- 대상지역의 격자별 월평균 기여농도는 최대 $1.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 나타났으며 4개월의 평균을 연평균으로 보았을 때, $1.18\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 연평균 대기환경기준인 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 4.7% 값으로 나타남

기여도 분석 - 충남지역



◆ 격자별 일평균 최대기여농도

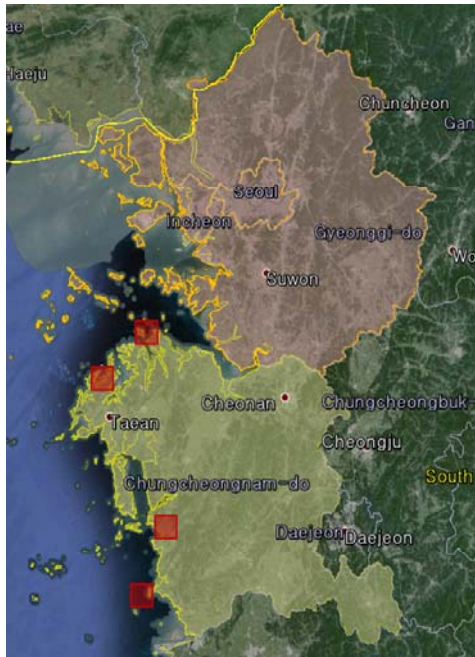


PM _{2.5}	1월	4월	7월	10월
기본모사	93.4	63.6	61.9	101.4
최대기여농도	3.5	17.0	17.5	20.9
기여도	4%	27%	28%	21%

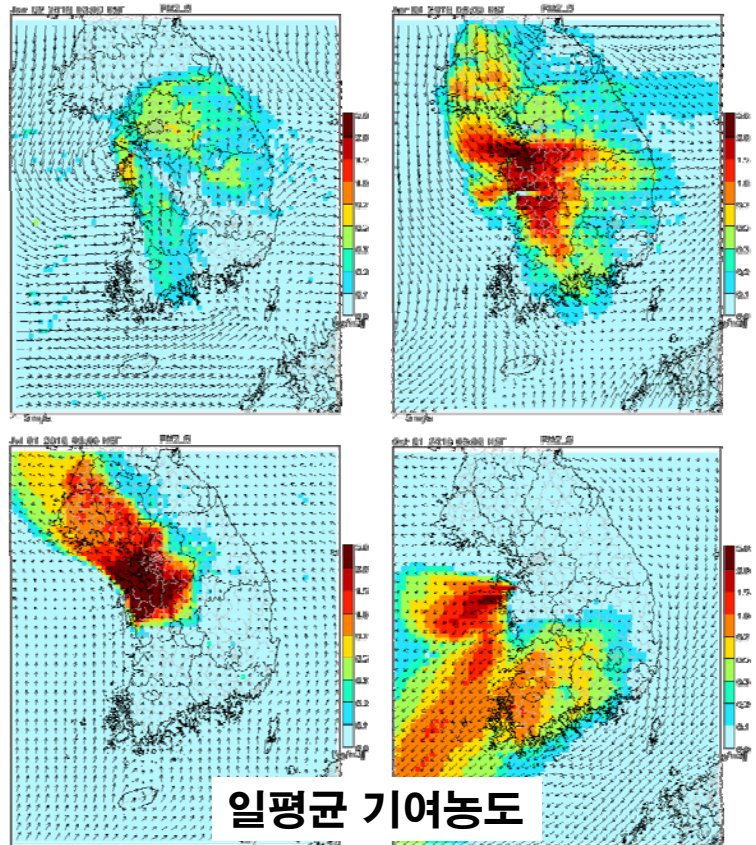
unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

- 최대 기여농도는 여름철에 $17.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 PM_{2.5} 일평균 대기환경기준인 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 35%의 값을 보임

충남지역 화력발전 및 대형 점오염원

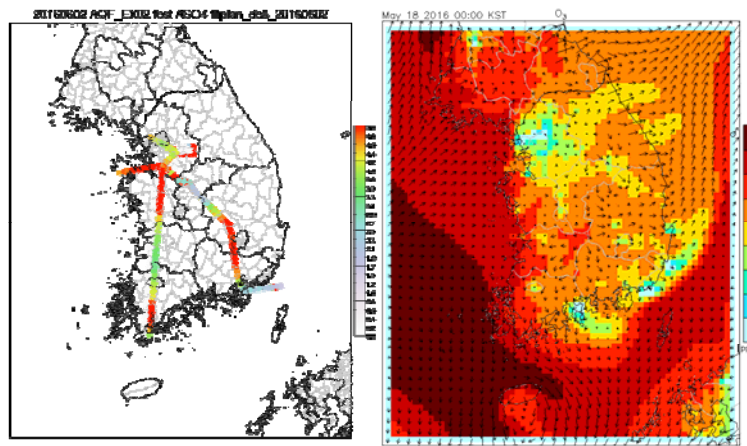
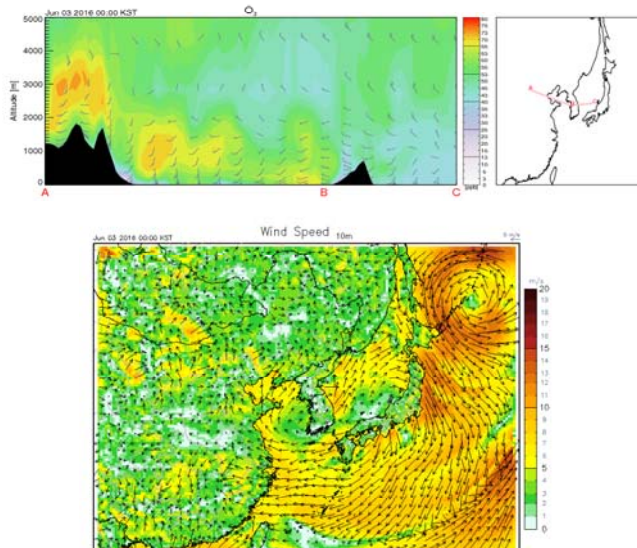


■ 화력발전시설



일평균 기여농도

한미 공동 대기질 측정 실험



"모르는 배출량, 고농도 원인 규명 필요"



[단독] 미세먼지 농도 '고농도구역' 첫 확인

본문듣기 | 설정

기사입력 2016-06-14 21:38 기사월문 144> 112

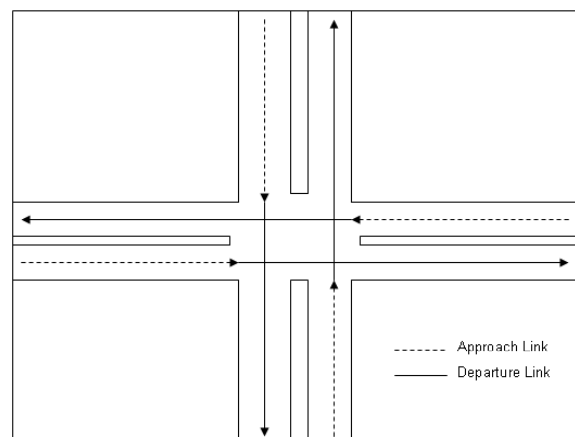


미세먼지 농도가 위험수준이 아닌 '보통'으로 예보되더라도, 도심에서는 안심해서는 안 되겠습니다.

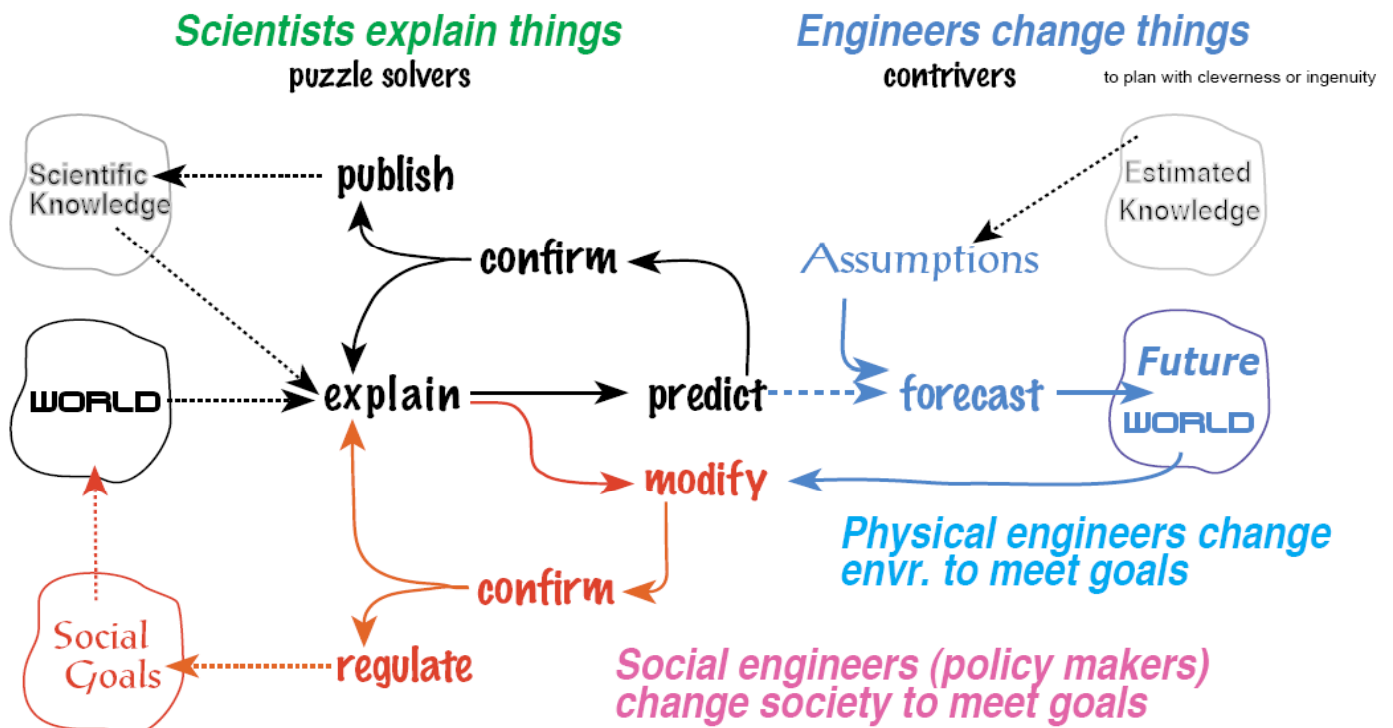
대도시 일부 지역에선 측정소의 공식 수치보다 오염도가 훨씬 높은 '고농도 구역'이 존재하고, 여기서 카드뮴 같은 치명적인 중금속도 검출되는 걸로 KBS 취재 결과 확인했습니다.

Transportation Conformity Guidance

Transportation Conformity Guidance for Quantitative Hot-spot Analyses in PM_{2.5} and PM₁₀ Nonattainment and Maintenance Areas



<Example of Approach and Departure Links for a Simple Intersection>



Geophysical Research Letters

AN AGU JOURNAL

[Explore this journal >](#)

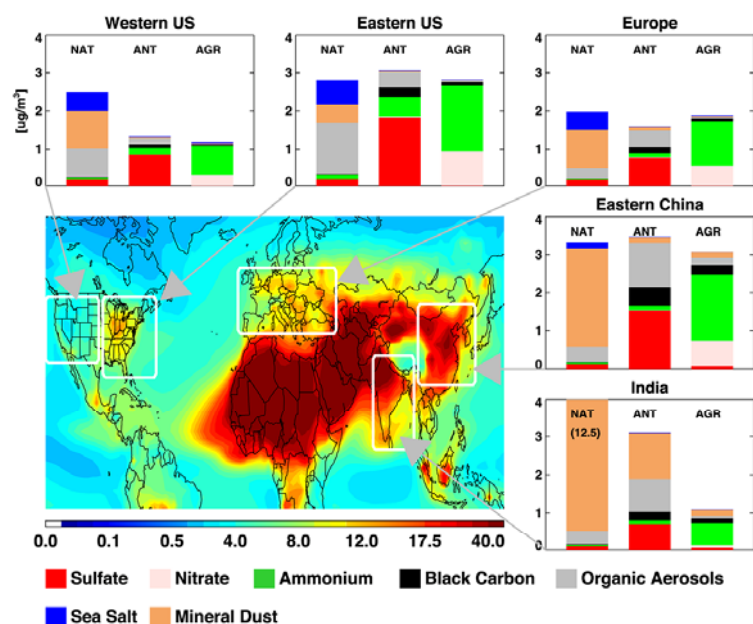
Research Letter

Significant atmospheric aerosol pollution caused by world food cultivation

Susanne E Bauer , Kostas Tsigaridis, Ron Miller

First published: 16 May 2016 [Full publication history](#)

DOI: 10.1002/2016GL068354 [View/save citation](#)



Annual mean total $PM_{2.5}$ concentrations in $\mu g/m^3$. The individual bar charts show the chemical composition (colors), for the various sources (NAT = natural, ANT = anthropogenic without agricultural, AGR = agricultural sources) over the five populous regions marked in the map.

감사합니다.

