

논문

노후 석탄발전 가동 중단에 따른 PM_{2.5} 및 성분농도 개선 효과 분석 Estimating the Shutdown Effect of the Old Coal-fired Power Plants on PM_{2.5} and its Composition

배민아, 유 철¹⁾, 김순태*

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾국가미세먼지정보센터

Minah Bae, Cheol Yoo¹⁾, Soontae Kim*

Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University,
Suwon, Republic of Korea

¹⁾Emission Inventory Management Team, National Center for Fine Dust Information,
Cheongju, Republic of Korea

접수일 2019년 11월 28일

수정일 2020년 1월 3일

채택일 2020년 1월 20일

Received 28 November 2019

Revised 3 January 2020

Accepted 20 January 2020

*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-219-2511

E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

Abstract We estimated the shutdown impact of the old coal-fired power plants on PM_{2.5} concentration over Chungnam and South Korea for the period of March~September 2017. The impact was estimated by the brute force approach in which the entire emissions of the target old coal-fired power plants were zero out. Three-dimensional chemistry transport model, Community Multiscale Air Quality (CMAQ), was used for the base and sensitivity simulations. The shutdown of the power plants has decreased PM_{2.5} levels in South Korea and Chungnam by 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively during the period. Note that the NO_x and SO₂ emissions from the old coal-fired power plants take only ~2% of the total domestic emissions, and thus PM_{2.5} concentration can be reduced even further when more stringent NO_x and SO₂ controls become enforced. Relative impacts of sulfate and nitrate show apparent monthly variations, possibly due to changes in meteorological factors affecting the secondary aerosol formation. For example, the impact of nitrate remained high during cold months while that of sulfate increased in summer (July~August). From this result, even if the fuel of a power plant has changed from coal to eco-friendly fuel such as LNG, it is difficult to expect the nitrate decrease without NO_x emission reduction. On the other hand, the impact of the old coal-fired power plants has increased by up to 8 times when ammonia emissions from the Selective Catalytic Reduction/Selective Non-Catalytic Reduction (SCR/SNCR) in the facilities are considered. Therefore, it is essential to provide accurate precursor emissions including ammonia slipped from the emission control device to evaluate their overall impacts on the air quality.

Key words: PM_{2.5}, Coal-fired power plant, Shutdown Impact, Sulfate, Nitrate

1. 서 론

PM_{2.5} (particles with an aerodynamic diameter of 2.5 μm or less)는 발암성을 가지며, 심혈관계 및 호흡기 질환을 비롯하여 건강에 악영향을 끼치는 것으로 알려져 있다 (Leem *et al.*, 2015; Pascal *et al.*, 2013). 남한은 PM_{2.5}에 의한 대기오염이 심각한 것으로 알려져 있으며 (Watts *et al.*, 2017), 정부에서는 이에 대한 대응 방안의 일환으로 2017년 6월 한 달간 일시적으로 노후

석탄발전 8기(이하 '노후 석탄발전')의 가동을 중단하였다. 환경부에서는 노후 석탄발전 가동 중단에 따른 효과를 살펴보기 위하여 충남에서의 실측자료를 검토하였다. 그 결과 PM₁₀ 관측 농도가 전년에 비해 15.4% (4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 감소한 것으로 발표하였다 (KMOE, 2017). 이러한 전년도 대비 농도 감소는 노후 석탄발전의 가동 중단에 의한 배출 저감과 기상 및 주변 여건 변화 등 여러 요소가 복합적으로 작용된 것으로 보인다.

대기오염물질 농도에 대한 특정 오염원의 영향 분

석에 3차원 대기질 모사를 이용한 기법들이 많이 이용되어 왔다(Kim *et al.*, 2017; Lin *et al.*, 2016; Wang *et al.*, 2015; Yoo *et al.*, 2011). 환경부에서는 노후 석탄발전의 가동 중단 효과만을 분리하여 분석하기 위하여 대기질 모사를 수행하였으며, 그 결과에서 노후 석탄발전 가동 중단에 의해 6월 한 달간 PM₁₀ 농도가 1.1% 저감된 것으로 추정하였다(KMOE, 2017). 다만 해당 분석에서는 실제 가동 중단 기간이 아닌, 발표 시점에서의 가용한 입력자료를 이용하여 2013년, 2014년, 그리고 2016년 6월을 대상으로 분석하였다.

한편, 국립환경과학원에서 제공하는 확정자료(<https://www.airkorea.or.kr>)를 통해 살펴보면 2017년 365일 중 2018년 3월에 강화된 일평균 PM_{2.5} 대기환경기준을 기준(50 µg/m³ → 35 µg/m³)을 초과하는 날이 남한 전체에 대해 11일에서 64일로 증가하며, 수도권에서는 27일에서 78일로 약 3배 증가한다. 또한 이러한 대기환경기준의 강화로 인한 고농도 PM_{2.5} 사례일 증가는 봄철과 겨울철에 한정되지 않고, 연중 모든 계절에서 나타난다(Yeo *et al.*, 2019). 따라서 향후 국내 PM_{2.5} 농도 관리는 모든 계절을 대상으로 확대될 가능성이 높다. 더욱이 남한의 PM_{2.5} 농도는 계절에 따라 주 성분이 다르다(Lee and Kang, 2001). 이러한 점을 고려하면, 노후 석탄발전 가동 중단에 따른 SO₂와 NO_x 배출량 감소 효과도 계절별로 달라질 수 있으나, 이에 대한 분석은 부족한 실정이다.

본 연구에서는 노후 석탄발전(영동화력 2기, 보령화력 2기, 삼천포화력 2기, 서천화력 2기)의 가동 중단에 따른 PM_{2.5} 농도 개선 효과를 계절별로 살펴보기 위하여 2017년 3~9월(7개월)을 대상으로 대기질

모사를 수행하였다. 가동 중단에 따른 영향 분석은 PM_{2.5} 중량 농도의 저감 효과 외에 성분별 변화 정도를 지역과 월별로 비교하였다. 이를 통해 PM_{2.5} 농도 개선을 위한 국내 황 함유 연료 규제의 효과와 적응성을 계절별로 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 대기질 모사

본 연구에서는 대기질 모사를 위하여 3차원 광화학 모델인 Community Multiscale Air Quality (CMAQ; Byun and Schere, 2006) v4.7.1를 이용하였다. 기상 입력자료 마련은 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock and Klemp, 2008) v3.9.1 모델을 이용하였으며, 기상초기장 자료는 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final) 1° × 1° 자료를 이용하였다. WRF 기상 결과는 Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP) v3.6을 통해 대기질 모델에서 이용할 수 있는 형태로 변환하였다. 인위적 배출량은 Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE; Benjey *et al.*, 2001) v3.1 모델을 이용하여 처리하였다. 배출목록은 중국을 포함하는 동북아 지역에 대해서는 Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Environment (CREATE; <http://aisl.konkuk.ac.kr/ais/emission/create.do>) 2015, 국내에 대해서는 국립환경과학원에서 제공하는 Clean Air Policy Support System (CAPSS; Lee *et al.*, 2011) 2013을 이용하였다. 자연 배출량은

Table 1. WRF and CMAQ model configurations used in this study.

WRF	Option	CMAQ	Option
Global MET inputs	FNL	Chemical mechanism	SAPRC99
Micro physics	WSM5	Aerosol module	AERO 05
Short wave radiation	Dudhia	Advection scheme	YAMO scheme
Land-Surface model	NOAH	Horizontal diffusion	Eddy scheme
PBL scheme	YSU	Cloud scheme	ACM
		Boundary condition	27-km-profile 9-km and 3-km nest down from mother domain

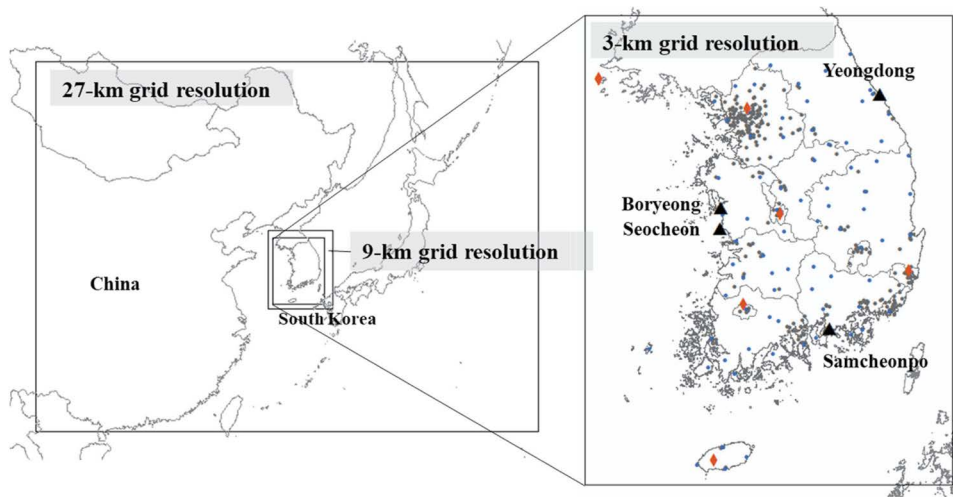


Fig. 1. CMAQ modeling domains at 27-, 9-, and 3-km horizontal grid resolutions. The gray circles and orange diamonds represent air quality measurement sites and super sites, respectively. Black triangles indicate locations of four old coal-fired power plants.

The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN v2.1; Guenther, 2006)을 통해 준비하였다. WRF와 CMAQ의 자세한 물리화학 옵션은 표 1에 정리하였다.

모사영역은 그림 1과 같이 동북아 지역을 포함하는 27 km 수평격자 해상도 (174×128), 남한을 포함하는 9 km 격자 해상도 (67×82), 그리고 남한을 포함하는 3 km 수평격자 해상도 (162×207)로 설정하여 전국에 대한 고해상도 모사를 수행하였다. 분석 기간은 노후 석탄발전 가동 중단 기간인 2017년 6월을 포함하며, spin-up 기간으로 10일을 추가하여 2017년 2월 20일~9월 30일로 설정하였다. 노후 석탄발전의 영향은 남한 3 km 모사영역에서 2017년 3~9월 기간에 대해 분석하였다.

2.2 노후 석탄발전 영향 분석 방법

노후 석탄발전의 대기질 영향은 Brute Force Method (BFM)을 이용하여 추정하였다. BFM은 배출량 변화에 따른 농도 변화를 살펴보는 민감도 방법으로 (Bartnicki, 1999), 대상이 되는 오염원의 배출량에 변화를 주고 대기질 모사를 수행한다. 본 연구에서는

이를 통해 배출량 변화 전후 대기오염물질 농도의 변화를 추정하고, 이를 노후 석탄발전의 영향으로 가정하였다. 노후 석탄발전의 영향 평가를 위한 대상 배출원 확인 및 모사는 다음과 같이 단계적으로 접근하였다. 이때, 이용된 자료는 굴뚝원격감시체계 (CleanSYS; Kim, 2006)에서 측정된 배출량과 본 연구에서 배출목록으로 이용된 CAPSS 2013이다. 1) 대기질 모사에서 배출량 변화를 반영할 수 있도록 CAPSS 점오염원을 대상으로, 지역 분류와 오염원 분류코드(에너지산업연소 및 생산공정)를 이용하여 대상 노후 석탄발전소의 모든 점오염원을 특정하였다. 2) 그중, 각 사업장별 가동 중단 대상 굴뚝과 동일한 점오염원을 찾기 위해 CleanSYS에서 제공되는 각 호기의 물리적 조건(굴뚝 높이, 내경, 배출 속도, 배출 온도 등)과 비교하여 각 사업장별로 점오염원을 2개씩 특정하였다. 3) 노후 석탄발전 가동 중단에 따른 각 호기의 배출량 감소량을 8개 점오염원에 반영하여 배출량을 준비하였다. 4) 기본 배출량과 3)에서 준비된 삭감 배출량을 이용하여 각각 대기질 모사를 수행하고, 두 모사 결과를 비교하였다. 감소가 예정되는 배출량에 대한 추정은 2.3절에서 자세히 설명하였다.

2.3 노후 석탄발전의 배출량 추정

노후 석탄발전 8기의 가동 중단에 따른 배출량 삭감량은 CleanSYS 자료를 이용하여 다음과 같이 추정하였다. 국립환경과학원으로부터 제공받은 실시간 CleanSYS 자료는 2014~2017년에 대한 매해 3~6월 동안의 노후 석탄발전의 배출량이 30분 간격으로 이용 가능하나, 대상 물질은 TSP, NO_x, SO₂로 세 가지 물질만을 포함한다. 따라서 대기질 모사를 위해서 본 연구에서는 해당 자료를 재구성하여 이용하였으며, PM₁₀, PM_{2.5}, NH₃ 등 관측되지 않은 물질에 대한 배출량 추정 방법을 설명하였다. 대상기간 동안 노후 석탄발전 8기의 가동 중지 또는 가동물은 달라질 수 있으며, 이에 따른 대기질 개선 효과 역시 시기별로 차이를 보일 수 있다. 이런 점을 고려하여 본 연구에서는 2014~2017년까지 4년간 각 월별 최대 배출량을 실제 최대 배출량으로 가정하여 가동 중단에 따른 대기질 개선 효과를 추정하였다. PM₁₀과 PM_{2.5} 배출량은 배출구에서 관측된 TSP 배출량으로부터 추정하였다. 국립환경과학원(NIER, 2013) 제공 자료에서 유연탄을 연료로 이용하는 에너지산업연소 관련 1, 2, 3종 보일러의 배출량 중에서 PM₁₀/TSP와 PM_{2.5}/TSP의 배출비는 0.58와 0.20이며, 본 연구에서는 이를 적용하여 PM₁₀과 PM_{2.5}의 배출량을 추정하였다. VOC와 CO는 연료의 사용과 관련이 있는 물질이므로 앞서 2.2절을 통해 추정된 CAPSS 2013의 점오염원 8개의 VOC 및 CO 배출량을 이용하되, 그중 개별 점오염원의 SO₂ 배출량 대비 본 연구에서 추정된 SO₂ 배출의 비율('SO₂ 삭감률')을 적용하여 삭감하였다.

석탄발전에서 배출되는 NH₃는 대부분 NO_x 배출 방지설비인 Selective Catalytic Reduction/Selective Non-Catalytic Reduction (SCR/SNCR)에서의 NH₃ slip(암모니아 누출)에 의해 발생한다. 해당 배출량은 현재 국가 배출목록 상에서 '에너지산업연소-공공발전'으로 구분되지 않고, '생산공정-암모니아 소비'로 분류된다. 따라서 본 연구에서는 NH₃ 누출 배출량을 함께 고려하기 위하여 생산공정으로 구분된 배출량 중, 대상 발전시설 위치와 동일한 위경도 점오염원의

Table 2. The estimated emissions of the old coal-fired power plants in this study. (unit: Tons Per Year)

	PM ₁₀	PM _{2.5}	SO ₂	NO _x	VOC	NH ₃	CO
Yeongdong (2 stacks)	36	13	514	3,028	16	0	140
Boryeong (2 stacks)	119	42	3,131	7,909	94	679	784
Samcheonpo (2 stacks)	76	26	3,328	5,429	115	732	963
Seocheon (2 stacks)	35	12	1,499	3,231	200	285	398
Total (8 stacks)	267	93	8,471	19,598	425	1,696	2,285

NH₃ 배출량을 선별하여 이용하였다. 다만, 이와 같은 위치 정보 이용보다는 향후 배출량 산정 시에는 동일 설비에 대한 배출 여부를 확인할 수 있는 오염원 및 공정 분류 코드가 함께 고려되어야 할 것이다. 이러한 불확도를 추가적으로 검토하기 위하여 NH₃ 배출량 고려 여부에 따른 대기 중 영향을 3.4절에서 추가적으로 논의하였다. 위와 같이 추정된 NH₃ 배출량에서 NO_x 삭감비를 적용하여 삭감 배출량을 결정하였다. 최종적으로 추정된 노후 석탄발전 8기의 NO_x, SO₂, NH₃ 배출량은 각각 19,598 Tons Per Year (TPY), 8,471 TPY, 1,696 TYP이며, 사업장별 모든 물질에 대한 배출량은 표 2에 정리하였다.

CAPSS 2013 배출목록에서 국내 NO_x 총 배출량은 약 1131 KTPY (KTons Per Year)이며, 이 가운데 국내 전체 석탄발전과 관련된(에너지 산업연소-공공부문-유무연탄) 배출량은 90 KTPY으로 8.0%에 해당한다. 남한의 총 SO₂ 배출량은 약 407 KTPY이며, 이 중 총 석탄발전의 배출량은 59 KTYP (14.5%)이다. 한편, 국내 전체 NH₃ 배출량은 약 298 KTPY이며, 이 중 에너지산업연소 부문으로 구분된 석탄발전과 관련된 배출량은 0.1% 수준이다. 그러나, 앞서 언급한 바와 같이 생산공정의 암모니아 소비로 구분된 석탄발전과 관련된 배출량은 전체 NH₃ 배출량의 약 3%에 해당한다. 본 연구에서 추정된 노후 석탄발전의 배출량은 국내 전체 NO_x, SO₂, NH₃ 배출량과 비교하여 각각 1.7%, 2.1%, 0.6% 수준이며, 국내 총 석탄발전 배출량

대비해서는 21.8%, 14.3%, 18.5%에 해당한다.

3. 결 과

3.1 기상 및 대기질 모사수행평가

기상 모사수행평가를 위하여 분석 기간 동안 국내 76곳 기상 측정소에 대한 관측값과 모사 결과를 비교하였다(그림 2). 기간평균 2 m 기온은 약 0.1°C 과소 평가되었으며, R 값은 0.99로 분석되었다. 1시간 풍속은 기간 평균 2.0 m/s이며, 모델 결과는 약 0.8 m/s 높게 모사하였다. 이와 같은 10 m 풍속의 과대모사는 대기 중 자체 배출 대기오염물질의 희석에 영향을 주어 농도 및 영향을 과소평가할 수 있다. 한편, 상대습도는 1%가량 낮게 모사하였으며, 대상 기간 중 7~9월의 상

대습도는 60% 이상으로 전체적으로 높다. 그러나 동일 기간에 대해 관측된 강수는 모사가 재현하지 못하는 사례가 많아, 습한 조건은 동일하나 강수 재현은 과소평가하였다. 이는 강우에 의한 rain out과 wash out 등에 의한 오염물질의 제거가 적게 모사되어 관측에 비해 대기질 농도가 높게 분석되는 요인이 될 수 있다(Blanco-Becerra *et al.*, 2015; Queen and Zhang, 2008).

대기질 모사 결과는 국내 집중측정소 6곳에 대해 평균하여 비교하였다. 그림 3에 보인 PM_{2.5} 농도는 3월에 60 µg/m³에 가까운 농도를 보인 후에 점차 감소하며, 강수 영향으로 8월에는 20 µg/m³ 부근의 일평균 농도를 모사하였다. 일평균 PM_{2.5} 모사 농도는 기간 평균 약 0.6 µg/m³ 과대모사하였다. 일평균 PM_{2.5} 성분 농도에 대해 관측과 모사 농도를 비교하여 표 3에 보

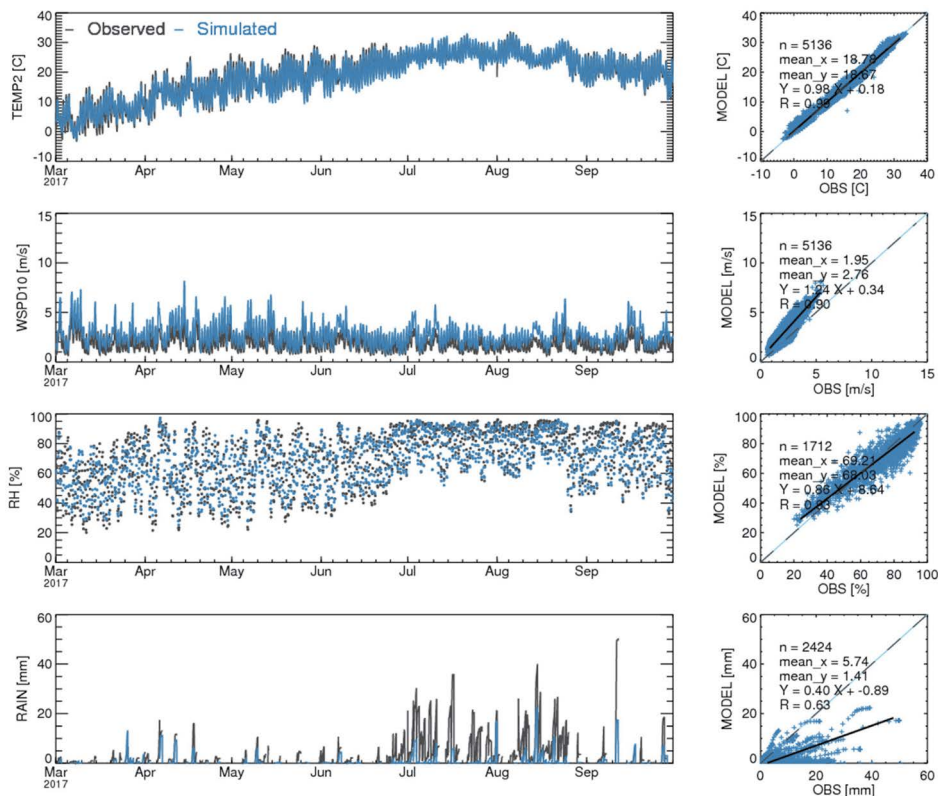


Fig. 2. Time series and scatter of observed and simulated hourly meteorological values in South Korea during the simulation period, from March to September 2017.

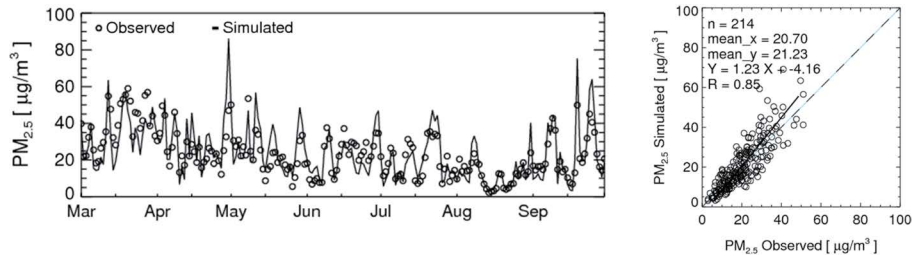


Fig. 3. Time series and scatter plot of daily average observed and simulated PM_{2.5} concentration from March to September 2017.

Table 3. The statistics of PM_{2.5} and its components at six super sites in South Korea.

	Observed mean (μg/m ³)	Simulated mean (μg/m ³)	BIAS (μg/m ³)	NMB (%)	R
PM _{2.5}	23.5	24.1	0.6	2.4	0.8
Sulfate	4.5	6.7	2.1	46.6	0.8
Nitrate	3.9	5.3	1.4	36.1	0.8
Ammonium	3.0	4.1	1.1	36.9	0.8
OC	3.6	1.5	-2.0	-57.0	0.7
EC	1.1	0.9	-0.2	-19.3	0.8

었다. PM_{2.5} 농도의 과대모사는 sulfate, nitrate, ammonium의 과대평가로 인한 것이며, OC와 EC 농도는 과소평가하였다. 모든 성분에 대한 R 값은 0.7 이상이다. 무기성 이온에 대한 과대평가는 국내 배출량의 불확도, 기상 모사의 불확도 및 국외 장거리 이동의 과대평가 등에 의한 영향일 수 있으며, 이에 대해서는 보다 자세한 분석이 이루어질 필요가 있다.

3.2 노후 석탄발전의 PM_{2.5} 영향

기간평균 노후 석탄발전의 가동 중단에 따른 대기 중 농도 저감은 충남에서 가장 효과적인 것으로 조사되었다(그림 4). 이는 대상 발전설비 8기 중, 4기가 충남의 보령과 서천에 위치하며, 해당 굴뚝은 나머지 4기에 비해 비교적 배출 규모가 크다. 또한 서풍 계열의 주 풍향과 국지 순환으로 인해 해안가에 위치한 오염원의 영향이 내륙으로 유입되는 것으로 보인다. PM_{2.5}에 대한 가동 중단 효과는 국내 대부분의 지역에서 기간 평균 0.05 μg/m³ 이상으로 조사되었다.

환경부의 노후 석탄발전 가동 중단 효과는 관측 농

Table 4. The impacts of the old coal-fired power plants to South Korea and Chungnam during the simulation period.

(unit: μg/m³)

		PM _{2.5}	Sulfate	Nitrate	Ammonium
South Korea	Period mean	0.10	0.01	0.06	0.02
	Daily mean max	0.61	0.07	0.47	0.14
Chungnam	Period mean	0.23	0.04	0.14	0.05
	Daily mean max	1.04	0.24	0.67	0.24

도에 대비하여 평가되었으며, 본 연구에서도 이와 유사하게 전국과 충남지역의 도시대기측정망 위치를 기준으로 농도 저감 효과를 분석하였다(표 4). 노후 석탄발전 가동 중단에 따른 남한 평균 PM_{2.5} 농도의 저감 효과는 0.1 μg/m³ 이다. 이 중, nitrate, sulfate, ammonium 순으로 0.06 μg/m³, 0.01 μg/m³, 0.02 μg/m³의 영향을 보이며, 그 외 EC와 OC는 저감효과가 미미하였다. 공간적으로 높은 효과가 기대되는 충남에서는 PM_{2.5} 농도가 0.23 μg/m³ 감소하며, 성분별로는 nitrate, sulfate, ammonium에 대해 각각 0.14 μg/m³, 0.04 μg/m³, 0.05 μg/m³가량 저감되었다.

점오염원에서 배출되는 대기오염물질은 풍속과 풍향과 같은 기상요건에 따른 영향지역 및 그 정도에 차이를 보인다(Kim et al., 2017; Levy et al., 2009). 즉, 가동 중단에 따른 단기 저감 효과는 시간별 기상 변화 정도에 따라 기간 평균적인 장기 효과와 다를 수 있다. 분석기간 동안 일평균 저감 농도 중, PM_{2.5}에 대해 가장 효과가 높은 날은 전국에 대해 0.61 μg/m³, 충남에 대해 1.04 μg/m³ 이상의 농도가 감소하는 것으로 예측되었다. 이는 일평균 PM_{2.5} “좋음” 등급 기준인

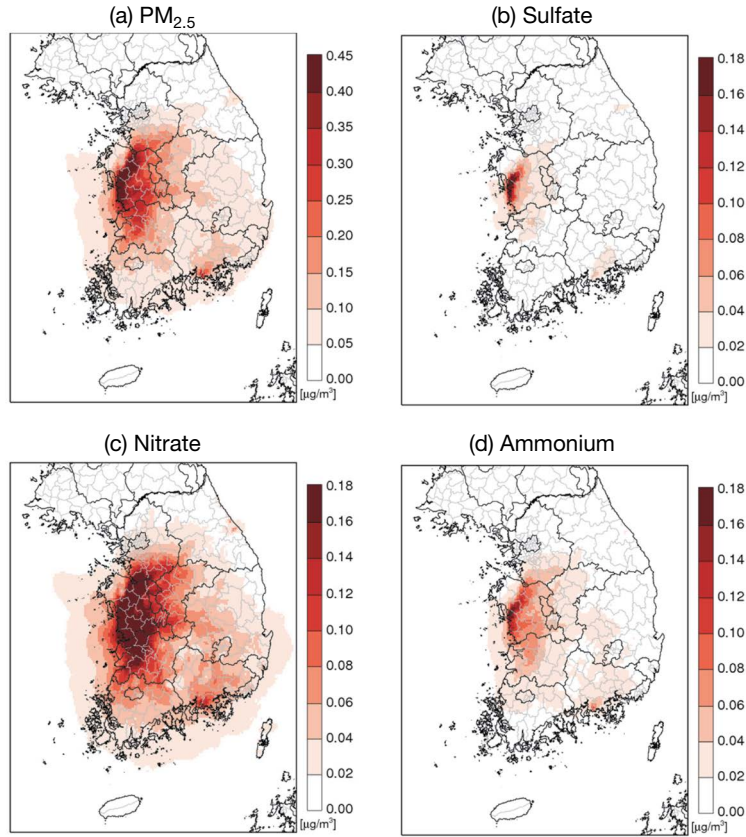


Fig. 4. The shutdown effect of the old coal-fired power plants for (a) $PM_{2.5}$, (b) sulfate, (c) nitrate, and (d) ammonium.

$15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 4%, 7%에 해당하는 농도로 그 효과가 적지 않다.

3.3 2017년 모사 월별 구성 성분 기여도 변화

노후 석탄발전 가동 중단에 따른 $PM_{2.5}$ 및 구성 성분별 일평균 농도 저감 효과는 날짜별로 큰 차이를 보인다(그림 5). 일평균 $PM_{2.5}$ 농도 기준으로 남한 전 지역에 대한 영향은 3월 1일에 $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (1.4%)로 가장 높았다. 충남지역에 대해서는 5월 1일경 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (2.0%)의 효과가 나타나며, 그 외 기간에 대해서는 대체로 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 효과를 보인다. 저감 효과를 월별로 살펴보면, 충남도 전국과 마찬가지로 5월에 저감 효과가 크며, 6월 말과 7월에는 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 효과가 1주일 이상 나타났다. 이는 늦봄과 초여름에 풍속이

느리고 바람이 국내에서 순환하는 경우가 많아, 충남 지역에서 노후 석탄발전의 경우 가동 중단 효과가 다른 달에 비해 높아지는 것으로 판단된다(그림 S1 참조).

$PM_{2.5}$ 농도는 계절별로 성분비가 변화하며, 배출량과 농도가 비선형적으로 변화하므로 전구물질의 배출이 감소하더라도 농도 저감은 뚜렷하게 나타나지 않을 수 있다(Seinfeld and Pandis, 2016; Dennis *et al.*, 2008). 분석기간 동안 남한과 충남에서 $PM_{2.5}$ 저감은 주로 nitrate 감소에 의한 것으로 보인다. 저감된 $PM_{2.5}$ 농도 대비 성분별 변화를 살펴보면 계절에 따라 다음과 같은 차이를 보인다. 전국과 충남 모두 저감된 $PM_{2.5}$ 농도의 성분은 거의 무기성 이온이며, 이 중 ammonium은 계절에 상관없이 20%를 차지한다. 이는 nitrate와 sulfate 성분비는 월별로 상대적 비중이

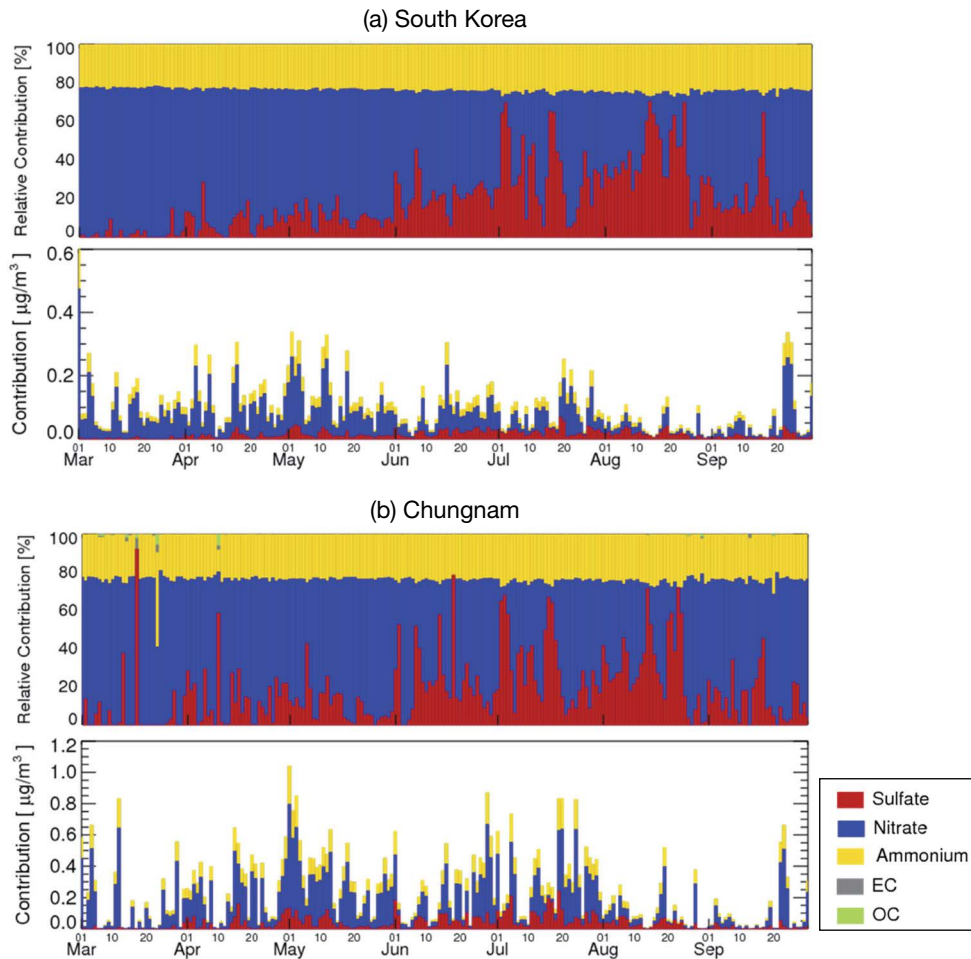


Fig. 5. The daily contribution of old coal-fired powerplants to PM_{2.5} and its components at PM_{2.5} monitoring sites in (a) South Korea and (b) Chungnam.

달라지지만, ammonium은 NH_4NO_3 또는 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 로 존재하기 때문에 두 성분 중 한 성분의 농도가 낮아져도, 높아지는 다른 성분에 의해 농도 변화는 크지 않다. 3~5월까지의 nitrate가 저감된 PM_{2.5} 농도의 과반 이상의 비를 차지하지만, 6월부터 sulfate의 비율이 점차 늘어나 7월과 8월에는 40% 이상의 성분비를 보인다.

이를 통해 유추하면 석탄 등 황을 포함하는 연료 규제로 인한 sulfate 감소 효과는 6~8월까지 기온과 상대습도가 높아지는 여름철에 증가한다 (Byun *et al.*,

2018). 더불어 2.3절에서 확인하였듯이 대상 노후 석탄발전의 NO_x 배출량은 국내 전체 NO_x 배출량의 1.9%를 차지하며, nitrate 성분에 대한 영향은 전 계절에 대해 지속적으로 크게 분석되는 바, 석탄 발전을 LNG와 같은 친환경 연료로 변경하더라도 배출되는 NO_x에 의한 nitrate 영향은 이전과 유사한 수준이 될 것으로 예상된다.

3.4 NH₃ 배출량 고려 여부에 따른 기여도 변화

대형 점오염원들은 대기 중으로의 NO_x 배출 저감

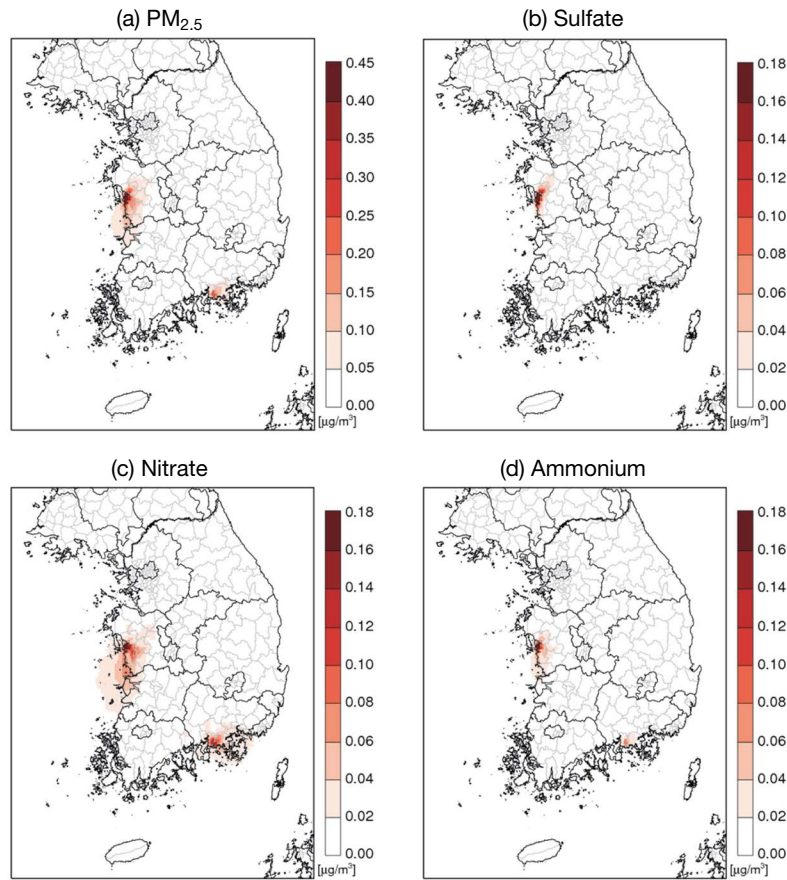


Fig. 6. The spatial distribution of shutdown effect of the old coal-fired power plants except NH_3 emissions for (a) $\text{PM}_{2.5}$, (b) sulfate, (c) nitrate, and (d) ammonium.

을 위하여 SCR/SNCR을 이용한다. SCR/SNCR은 (비) 선택적촉매환원법으로, NO_x 를 N_2 로 환원시키는 과정에서 NH_3 을 필요로 하며, 운전 중 암모니아 누출로 인해 NH_3 가 대기 중으로 배출될 수 있다(Sorrels *et al.*, 2015; Klovsky *et al.*, 1980). 그러나 현재 국가 배출 목록에서는 앞서 설명한 바와 같이 석탄발전 관련 암모니아 누출은 에너지산업연소가 아닌 생산공정으로 구분하고 있다. 따라서 실제 배출은 동일 사업장에서 발생하나, 배출목록 상의 배출원 분류체계를 따라 노후 석탄발전의 배출영향을 분석할 경우 방지설비에서 배출되는 NH_3 영향은 배제될 수 있다. 일반적으로 노후 화력발전의 가동 중단은 배출량 저감 설비와 연동

되므로 본 연구에서는 석탄발전 가동 중단 시 NH_3 배출도 감소하는 것으로 가정하여 실험을 설계하였다. 다만, NH_3 배출은 실제 운전 조건, 투입량 등에 따라 달라지므로 많은 불확도를 내포한다. 노후 석탄발전 8기의 NH_3 배출량은 총 1,696 TPY이며, 이는 해당 시설에서 배출되는 NO_x 와 SO_2 가 모두 nitrate 및 sulfate로 전환된다고 가정할 때, 배출되는 NO_x 23% (4,581 TPY)와 SO_2 38% (3,187 TPY)와 결합하여 NH_4NO_3 , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 을 생성할 수 있는 양이다. 실제 조건에서 가스에서 입자로의 전환율이 상대적으로 낮은 것을 고려하면(Seinfeld and Pandis, 2016), 국가 배출목록에서 노후 석탄발전의 NH_3 배출량은 풍하 지역의 무

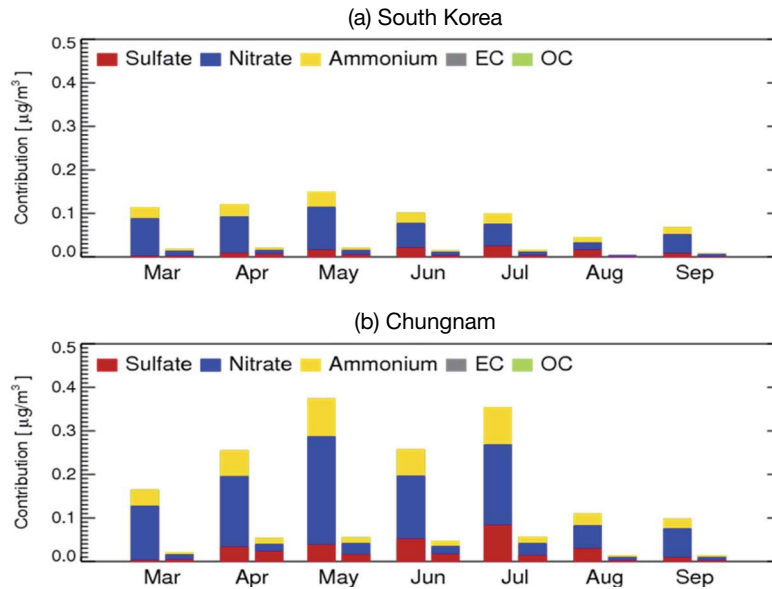


Fig. 7. Effect of old coal-fired power plants on monthly average PM_{2.5} components, depending on whether NH₃ emission considered in (a) South Korea and (b) Chungnam. The left-hand side bar of each month is an impact that includes NH₃ emissions, and the right-hand side is an effect that does not include NH₃ emissions.

기성 이온 생성에도 많은 영향을 미칠 가능성이 높다.

NH₃ 배출량 포함 여부(그림 4와 그림 6)에 따라 노후 석탄발전 배출량이 주변 지역 PM_{2.5} 및 성분농도에 주는 영향 범위는 차이를 보인다. NH₃ 배출 포함 조건에서 전국 대부분 지역이 기간 평균 0.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 농도 저감을 보였던 것에 반해 NH₃ 배출량 미포함 조건에서는 배출원 인근의 충남과 광양 지역에 대해서만 농도 저감이 모사된다. 전국 평균 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도는 NH₃ 배출량 포함 여부에 따라 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 0.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 10배가량 감소하며, 충남의 경우 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 0.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 87% 감소한다. 이는 생산공정 NH₃ 배출량 고려 여부에 따른 영향 범위 및 정도의 민감도가 매우 상이함을 의미한다.

노후 석탄발전 가동 중단에 의한 월평균 전국 PM_{2.5} 저감 농도는 5월에 0.15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 효과적이며, NH₃ 배출영향 미고려 시에는 0.02 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 작아진다(그림 7). 충남을 대상으로 할 경우 NH₃ 배출량 고려 여부에 따라 기간평균 PM_{2.5} 농도 영향은 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 0.04 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 6배 차이를 보이며, 월평균 최

대 영향은 0.38 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 0.06 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 감소한다. NH₃ 배출 고려에 따라 3~5월의 경우 nitrate 성분에 대한 증가가 높은 반면, 여름철에는 sulfate 성분의 증가가 높아지는 계절특성이 모사되었다. 즉, SCR 관련 NH₃ 배출의 고려 여부는 노후 석탄발전의 영향범위에 시공간적인 차이를 준다.

이러한 점을 종합하면, 대형 사업장 배출량의 대기 영향 평가 시에는 저감 시설을 포함한 모든 설비의 배출이 고려되어야 할 것으로 판단된다. 다만, 본 연구에서는 NH₃ 배출 저감량은 NO_x 배출량 삭감비와 동일한 것으로 가정한 바, 이에 따른 불확도가 존재할 것으로 판단되며, 보다 정확한 평가를 위해서는 NH₃ 배출에 대한 관측 및 배출목록이 검토되어야 한다. 또한, 국내와 같이 NH₃ 농도가 높은 조건에서는 점오염원에서 배출된 NO_x 및 SO₂가 풍하 지역으로 이동하는 과정에서 타오염원에서 배출된 NH₃와의 반응을 통해 2차 PM_{2.5} 생성이 가능하므로 대형 배출 시설 주변의 NH₃ 조건을 파악하는 것이 중요하다. 따라서 향후 통합환경관리에서의 주요 점오염원의 배출 허가나 입지

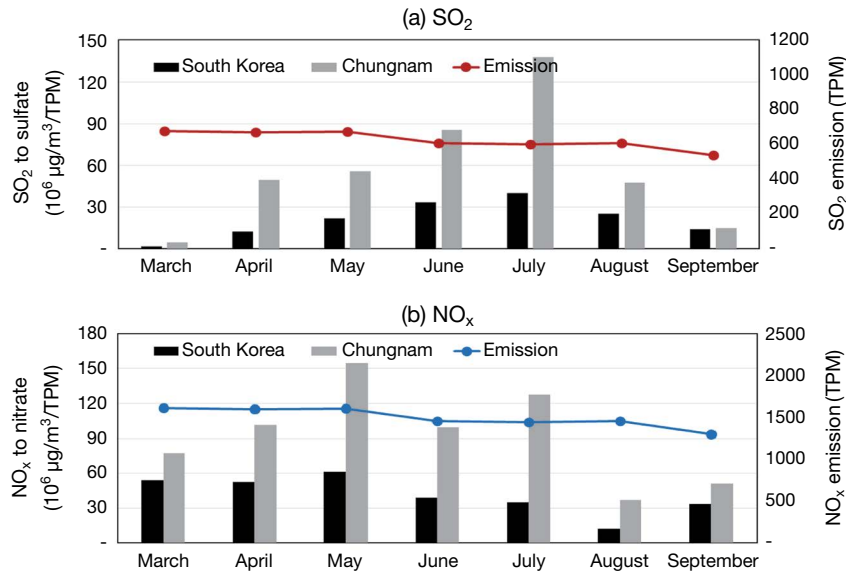


Fig. 8. Monthly conversion rates of (a) SO₂-to-sulfate, and (b) NO_x-to-nitrate over South Korea and Chungnam for the emissions from the old coal-fired power plants during the simulation period. The solid line indicates (a) SO₂ and (b) NO_x emissions by month (Tons Per Month; TPM).

선택 시, 주변 배출원과의 상호 작용을 평가하는 것이 필요해 보인다.

3.5 전환율과 발전부문 배출 삭감 효과

전환율이란 SO₂ 혹은 NO_x의 단위 배출량이 대기 중 sulfate 또는 nitrate로 전환되는 정도를 의미하며 (Ju *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017), 본 연구에서는 가동 중단에 따른 삭감 배출량 대비 농도 변화로부터 전환율을 산정하였다(그림 8과 표 5). 노후 석탄발전의 SO₂와 NO_x 배출량은 월별로 차이가 크지는 않지만 3월에 가장 높으며, 6월을 기점으로 점차 낮아진다(그림 8 참조). 배출량의 월간 변화와 달리 SO₂-to-sulfate 전환율(이하 'SO₂ 전환율')은 3월에 가장 낮고, 7월에 높다. 이는 SO₂ 배출량이 대기 중 sulfate 농도로의 전환이 배출 외에 기상 등의 영향에 따라 달라짐을 의미하며, 그림 5에서 보인 바와 같이 여름철 sulfate 농도 영향이 높아지는 이유이기도 하다. 한편, NO_x-to-nitrate 전환율(이하 'NO_x 전환율')은 SO₂ 전환율과 달리 전국에 대해서는 3~5월 높고,

여름철에 낮아진다. 한편 충남에 대한 NO_x 전환율은 5월과 7월에 높고, 8월과 9월에 낮아진다.

본 연구의 노후 석탄발전 배출에서 SO₂ 전환율은 전국과 충남에 대해 각각 1.77 μg/m³/MTPY, 4.74 μg/m³/MTPY로 추정되며, 충남에서의 전환율이 전국 전환율에 비해 약 2.7배 높다(표 5). 한편, NO_x 전환율은 전국 3.48 μg/m³/MTPY, 충남 7.86 μg/m³/MTPY으로, 충남에서의 전환율이 전국에 비해 약 2.3배 높다. 이는 앞서 공간분포에서 확인하였듯이 충남에서 배출 규모가 큰 보령화력과 서천화력이 위치하며 오염원 배출 지역에서 2차 PM_{2.5}의 빠른 생성에 의한 농도 증가로 인해 영향이 높고, 전국 규모에서는 오염물질의 이동에 따른 희석에 의해 농도 저감 효과가 나타나기 때문으로 보인다.

전국과 충남에 대한 NO_x 전환율은 NH₃ 포함 시에 비해 NH₃ 미포함 시 약 13%로 작아진다. 이러한 결과는 전국과 충남 등 지역 구분 없이 모두 동일하다. 따라서 NH₃ 배출을 포함하지 않는 경우, NO_x 배출 저감에 의한 노후 석탄발전 가동 중단의 효과는 확연히 낮

Table 5. Conversion rates of emissions from the old power plants to South Korea and Chungnam during the simulation period.

Case	Source type	Receptor	SO ₂ to sulfate ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$)	NO _x to nitrate ($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{MTPY}$)
This study	Point	South Korea	1.77	3.48
		Chungnam	4.74	7.86
		South Korea	0.32	0.45
		Chungnam	1.43	0.95
Kim <i>et al.</i> (2017)	Area + Point	Chungnam	3.73~4.43	3.94~11.3
Kim <i>et al.</i> (2019)**	Area + Point	Chungnam	1.67~13.33	5.83~28.33
Ju <i>et al.</i> (2019)	Point (Short)	Chungnam	1.6	10.7
	Point (Tall)		4.6	6.2

*Including NH₃ slip from the SCR NO_x emission control device

**($\mu\text{g}/\text{m}^3/\text{KTons Per Month}$)

게 분석된다. 마찬가지로 SO₂ 전환율은 대상 오염원의 NH₃ 배출을 고려하지 않을 경우 고려 시에 비해 전국과 충남에 대해 각각 20%, 30% 수준으로 낮아진다. 노후 석탄발전에서 NH₃ 배출량 미고려 시, SO₂에 비하여 NO₂ 전환율이 크게 감소하며, 이는 NH₃에 대한 NO₂의 상대적 민감도가 SO₂보다 높음을 의미한다. 따라서 NH₃ 배출 여부 판단과 NH₃ 배출 규모 파악, 그리고 이를 바탕으로 한 점오염원의 영향 분석은 대기질 개선 효과 추정 등 향후 대기질 개선 정책 마련 시에 매우 중요할 것으로 판단된다. 더불어 본 연구에서는 배출시설에서 NH₃ 동시 배출 고려 여부에 따른 영향을 검토하였지만, SO₂ 및 NO_x의 2차 PM_{2.5} 생성량은 인근 지역의 NH₃ 조건에 따라 변화할 수 있음을 의미하기도 한다. 표 5에 정리한 선행연구 (Ju *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017)에서 검토된 충남 지역에서의 SO₂ 및 NO_x 전환율에 비해, 본 연구에서 제시한 전환율은 다소 낮은 값을 보인다. 선행 연구들의 경우 충남지역에 위치한 배출량에 대한 전환율을 검토하였으나, 본 연구에서는 대상 배출원이 충남을 비롯한 경남 및 강원 일부 지역에 분포하여 배출 저감 효과의 공간적인 집중도는 상대적으로 낮으며, 발전 설비 특성상 굴뚝이 상대적으로 높기 때문에 판단된다. 본 연구에서 검토된 노후 석탄발전 배출량이 전국 SO₂와 NO_x 배출량의 약 2%인 것을 고려한다면, 배출 저감 대비 농도 개선 효과는 적지 않다.

4. 결 론

본 연구에서는 2017년에 수행한 노후 석탄발전의 가동 중단 효과를 대기질 모사를 통해 분석하였다. 2017년 3~9월 사이 대상기간 평균 노후 석탄발전 가동 중단은 전국 PM_{2.5} 농도를 0.10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 낮추었으며, 충남에 대해서는 0.23 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감 효과를 보였다. 이는 2017년 전국 연평균 PM_{2.5} 농도 (25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 0.4%에 해당한다. 이는 가동 중단 대상 배출량이 전국 SO₂ 및 NO_x 배출의 2.3%, 1.8%인 점을 감안하였을 때 향후 SO₂ 배출 저감 강도를 높이면, PM_{2.5} 농도 개선 효과가 더 커질 수 있을 것으로 예상된다.

노후 석탄발전 가동 중단에 따른 충남 지역에서의 일평균 PM_{2.5} 농도 감소 효과는 기상조건의 영향을 받아 일간 변화가 큰 것으로 분석되었다. 월별로는 5월과 7월에 0.35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 영향을 보여 실제 정책이 시행된 6월 (0.25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)보다 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 효과가 높을 것으로 추정하였다. PM_{2.5} 농도 중 저감 성분을 구분해 보면, nitrate 저감 농도는 전 기간에 걸쳐 주요하게 나타난다. 이로부터 발전소의 연료를 친환경적인 LNG 등으로 변경하더라도 NO_x 배출량이 크게 감소하지 않는다면 NO_x → Nitrate 전환에 따른 영향은 지속적으로 나타날 것으로 예상된다. 한편 sulfate의 경우 6~8월에 상대적으로 영향이 높아, 석탄 연료 사용 제어를 통한 농도 개선 효과는 여름철에 보다 효과적

일 것으로 보인다. 반대로 제한적인 SO_2 배출 저감과 봄철(3~5월)의 낮은 SO_2 -to-sulfate 전환율을 고려하면, 고농도가 많이 발생하는 봄철 동안 대상 노후 석탄발전의 가동 중단으로 인한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 저감 효과는 기대에 못 미칠 수 있다. 또한, nitrate 성분은 지속적인 배출 영향을 보이므로, 발전 설비에 대한 가동 중단 및 연료 변경이 목표로 하는 농도 개선 및 노출 저감, 비용 효과 등을 검토할 필요가 있다. 따라서 계절별 sulfate, nitrate 생성 변화에 대한 과학적 이해를 기반으로 한 대책 수립과, 전구물질인 SO_2 , NO_x 배출 저감량 증대가 향후 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 관리에서 중요할 것으로 예상된다.

노후 석탄발전 영향 분석 시, 저감시설에서 배출되는 NH_3 배출량 고려여부에 따라 배출원 인근뿐만 아닌 풍하 지역에 대한 nitrate와 sulfate 영향 정도에 차이를 보였다. 이러한 결과는 배출원 영향 분석 시 SO_2 및 NO_x 와 동시에 배출되는 NH_3 에 대한 영향이 함께 고려되어야 함을 시사한다. 또한, 정확한 분석을 위해서는 SCR 등 NH_3 배출 가능성이 있는 방지 시설에 대한 자세한 정보가 제공되어야 한다. 더불어 SO_2 및 NO_x 배출이 sulfate, nitrate 농도로 전환되는 과정에서 인근 및 풍하 지역의 NH_3 농도 조건에 따른 영향 차이가 예상되므로, 대형 점오염원의 배출에 따른 대기환경 부하를 최소화하기 위해 주변 지역 NH_3 배출량 등 주변 여건이 함께 고려되어야 할 것이다. 본 연구에서는 대상 노후 석탄발전의 배출 자료를 이용하여 가동 중지 때 따른 배출량 변화를 추정하였다. 해당 배출량의 영향 분석 시에는 대기질 모사에 이용되는 배출량과 기상 등 입력자료와 대기질 모델이 가지고 있는 불확도에 따라 달라질 수 있다. 또한, 노후 석탄발전의 가동이 실제 중단된 2017년에 해당하는 국가 배출목록이 아닌, 이전 연도에 대한 배출량을 이용한 바, 추정된 결과에는 오차가 존재할 수 있다. 향후 보다 정확한 영향 추정을 위해서는 추가적으로 다양한 자료의 확보를 통해 검증될 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략 프로젝트사업(2017M3D8A1092020) 및 국립환경과학원(NIER-2019-01-02-034)의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

- Bartnicki, J. (1999) Computing source-receptor matrices with the EMEP Eulerian Acid Deposition Model. Norwegian Met. Inst. https://www.emep.int/publ/reports/1999/note5_99.pdf.
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in models-3. US EPA.
- Blanco-Becerra, L.C., Gáfarro-Rojas, A.I., Universidad Industrial de Santander, Rojas-Roa, N.Y. (2015) Influence of precipitation scavenging on the $\text{PM}_{2.5}$ PM_{10} ratio at the Kennedy locality of Bogotá, Colombia, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, (76), <https://doi.org/10.17533/udea.redin.n76a07>.
- Byun, D., Schere, K.L. (2006) Review of the Governing Equations, Computational Algorithms, and Other Components of the Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) Modeling System, Applied Mechanics Reviews, 59(2), 51-77, <https://doi.org/10.1115/1.2128636>.
- Byun, J., Kim, E., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) A Quantitative Analysis on Seasonal and Regional Variations of Sulfate Concentrations in South Korea using CMAQ Sulfate Tracking Tool during 2015~2016, KOSAE 61st Annual Conference 2018 Proceedings, 201 (in Korean).
- Dennis, R.L., Pinder, R.W., Bhawe, P.V. (2008) Observable indicators of the sensitivity of $\text{PM}_{2.5}$ nitrate to emission reductions - Part I: Derivation of the adjusted gas ratio and applicability at regulatory-relevant time scales, Atmospheric Environment, 42(6), 1275-1286, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.039>.
- Guenther, C.C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), Atmospheric Chemistry and Physics, 6, 3181-3210.
- Ju, H., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2019) Impact of Stack

- Parameters on Modeled PM_{2.5} Conversion Rates: A Case Study of Chungnam during the KORUS-AQ 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 593-608, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.593>.
- Kim, E., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2019) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 226-248, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.226>.
- Kim, H.-Y. (2006) Study of Incinerator Management Plan through CleanSYS, *Journal of the Korean Society for Environmental Technology*, 7(2), 161-164 (in Korean with English abstract).
- Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.159>.
- Klovsky, J.R., Koradia, P.B., Lim, C.T. (1980) Evaluation of a New Zeolitic Catalyst for NO_x Reduction with NH₃, *Industrial & Engineering Chemistry Product Research and Development*, 19(2), 218-225, <https://doi.org/10.1021/i360074a018>.
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2017, July 26). <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EB%85%B8%ED%9B%84+%EC%84%9D%ED%83%84%EB%B0%9C%EC%A0%84%EC%86%8C&menuId=286&orgCd=&boardId=804830&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=>. Accessed 23 January 2020 (in Korean).
- Lee, D., Lee, Y.-M., Jang, K.-W., Yoo, C., Kang, K.-H., Lee, J.-H., Jung, S.-W., Park, J.-M., Lee, S.-B., Han, J.-S., Hong, J.-H., Lee, S.-J. (2011) Korean National Emissions Inventory System and 2007 Air Pollutant Emissions, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 5(4), 278-291, <https://doi.org/10.5572/ajae.2011.5.4.278>.
- Lee, H.S., Kang, B.-W. (2001) Chemical characteristics of principal PM_{2.5} species in Chongju, South Korea, *Atmospheric Environment*, 35(4), 739-746, [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00267-3](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00267-3).
- Leem, J.H., Kim, S.T., Kim, H.C. (2015) Public-health impact of outdoor air pollution for 2nd air pollution management policy in Seoul metropolitan area, Korea, *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 27(1), 7, <https://doi.org/10.1186/s40557-015-0058-z>.
- Levy, I., Mahrer, Y., Dayan, U. (2009) Coastal and synoptic recirculation affecting air pollutants dispersion: A numerical study, *Atmospheric Environment*, 43(12), 1991-1999, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.01.017>.
- Lin, J., An, J., Qu, Y., Chen, Y., Li, Y., Tang, Y., Wang, F., Xiang, W. (2016) Local and distant source contributions to secondary organic aerosol in the Beijing urban area in summer, *Atmospheric Environment*, 124, 176-185, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.08.098>.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2013) Manual on the Calculation Method of Air Pollutants Emissions (III), http://airemiss.nier.go.kr/user/boardList.do?command=view&page=1&boardId=85&boardSeq=146&id=airemiss_040200000000. Accessed 23 January 2020 (in Korean).
- Pascal, M., Corso, M., Chanel, O., Declercq, C., Badaloni, C., Cesaroni, G., Henschel, S., Meister, K., Haluza, D., Martin-Olmedo, P., Medina, S. (2013) Assessing the public health impacts of urban air pollution in 25 European cities: Results of the Aphekom project, *Science of the Total Environment*, 449, 390-400, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.01.077>.
- Queen, A., Zhang, Y. (2008) Examining the sensitivity of MM5 - CMAQ predictions to explicit microphysics schemes and horizontal grid resolutions, Part III - The impact of horizontal grid resolution, *Atmospheric Environment*, 42(16), 3869-3881, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.02.035>.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. John Wiley & Sons.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485, <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>.
- Sorrels, J.L., Randall, D.D., Schaffner, K.S., Fry, C.R. (2016) Chapter 2 Selective Catalytic Reduction. US, Environmental Protection Agency.
- Wang, J., Wang, S., Voorhees, A.S., Zhao, B., Jang, C., Jiang, J., Fu, J.S., Ding, D., Zhu, Y., Hao, J. (2015) Assessment of short-term PM_{2.5}-related mortality due to different emission sources in the Yangtze River Delta, China, *Atmospheric Environment*, 123, 440-448, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.05.060>.
- Watts, N., Amann, M., Ayeb-Karlsson, S., Belesova, K., Bouley, T., Boykoff, M., Byass, P., Cai, W., Campbell-Lendrum, D.,

- Chambers, J., Cox, P.M., Daly, M., Dasandi, N., Davies, M., Depledge, M., Depoux, A., Dominguez-Salas, P., Drummond, P., Ekins, P., Flahault, A., Frumkin, H., Georgeson, L., Ghanei, M., Grace, D., Graham, H., Grojsman, R., Haines, A., Hamilton, I., Hartinger, S., Johnson, A., Kelman, I., Kiesewetter, G., Kniveton, D., Liang, L., Lott, M., Lowe, R., Mace, G., Odhiambo Sewe, M., Maslin, M., Mikhaylov, S., Milner, J., Latifi, A.M., Moradi-Lakeh, M., Morrissey, K., Murray, K., Neville, T., Nilsson, M., Oreszczyn, T., Owfi, F., Pencheon, D., Pye, S., Rabbaniha, M., Robinson, E., Rocklöv, J., Schütte, S., Shumake-Guillemot, J., Steinbach, R., Tabatabaei, M., Wheeler, N., Wilkinson, P., Gong, P., Montgomery, H., Costello, A. (2017) The Lancet Count-down on health and climate change: from 25 years of inaction to a global transformation for public health, *Lancet*, [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)32464-9](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)32464-9).
- Yeo, M.J., Im, Y.S., Yoo, S.S., Jeon, E.M., Kim, Y.P. (2019) Long-term Trend of PM_{2.5} Concentration in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 438-450, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.438>.
- Yoo, C., Lee, D.-G., Lee, Y.-M., Lee, M.-H., Hong, J.-H., Lee, S.-J. (2011) Methodology of Application to Air Quality Model to Evaluate the Results of the Enforcement Plan in Seoul Metropolitan Area, *Journal of the Environmental Sciences*, 20(12), 1647-1661, <https://doi.org/10.5322/JES.2011.20.12.1647>.

Authors Information

배민아(아주대학교 환경공학과 박사과정)
 유 철(국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
 김순태(아주대학교 환경안전공학과 교수)

SUPPLEMENTARY MATERIALS

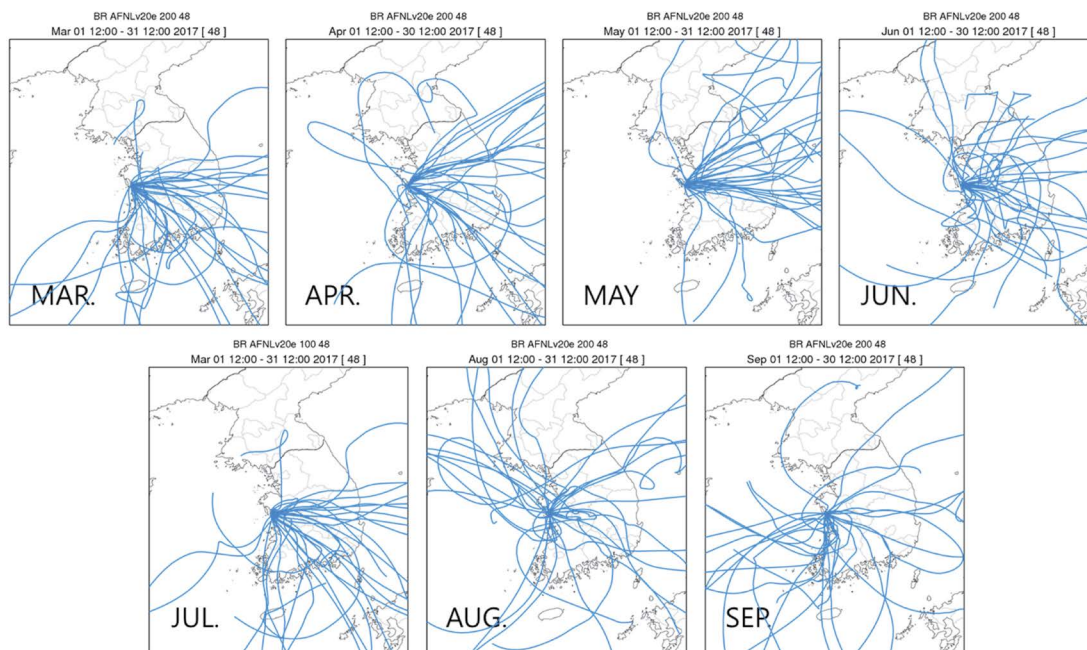


Fig. S1. Forward trajectory path from Boryeong power plant during every day of each months for 48 hours.