



논문

효율적인 대기정책 마련을 위한 대기질 모델 활용방안 고찰: 노후 석탄화력발전소 가동중지에 따른 충청남지역 PM_{2.5} 저감효과 분석을 중심으로

A Study on the Utilization of Air Quality Model to Establish Efficient Air Policies: Focusing on the Improvement Effect of PM_{2.5} in Chungcheongnam-do due to Coal-fired Power Plants Shutdown

남기표, 이대균*, 이재범, 최기철¹⁾, 장임석, 최광호²⁾

국립환경과학원 대기질통합예보센터

¹⁾한국환경정책·평가연구원

²⁾남서울대학교 교양과정부

Ki-Pyo Nam, Dae-Gyun Lee*, Jae-Bum Lee, Ki-Cheol Choi¹⁾, Lim-Seok Jang, Kwang-Ho Choi²⁾

Air Quality Forecasting Center, National Institute of Environmental Research

¹⁾Korea Environment Institute

²⁾Department of General Education, Namseoul University

접수일 2018년 9월 18일
 수정일 2018년 10월 4일
 채택일 2018년 10월 11일

Received 18 September 2018
 Revised 4 October 2018
 Accepted 11 October 2018

*Corresponding author
 Tel : +82-(0)32-560-7721
 E-mail : hileedg@korea.kr

Abstract In order to develop effective emission abatement strategies for coal-fired power plants, we analyzed the shutdown effects of coal-fired power plants on PM_{2.5} concentration in June by employing air quality model for the period from 2013 to 2016. WRF (Weather Research and Forecast) and CMAQ (Community Multiscale Air Quality) models were used to quantify the impact of emission reductions on the averaged PM_{2.5} concentrations in June over Chungcheongnam-do area in Korea. The resultant shutdown effects showed that the averaged PM_{2.5} concentration in June decreased by 1.2% in Chungcheongnam-do area and decreased by 2.3% in the area where the surface air pollution measuring stations were located. As a result of this study, it was confirmed that it is possible to analyze policy effects considering the change of meteorology and emission and it is possible to quantitatively estimate the influence at the maximum impact region by utilizing the air quality model. The results of this study are expected to be useful as a basic data for analyzing the effect of PM_{2.5} concentration change according to future emission changes.

Key words: PM_{2.5}, Air quality modeling, Power plant, Shutdown, Contribution

1. 서론

미세먼지 (PM; Particulate Matter)는 대기 중에 부유하고 있는 직경 10 μm 이하의 고체상 또는 액체상 물질로, 이 중 직경 2.5 μm 이하의 입자를 초미세먼지 (PM_{2.5})로 분류한다. 미세먼지는 호흡을 통해 폐를 거쳐 혈관과 혈액에 침투하여 폐, 호흡기, 심혈관계 등

에 염증을 비롯한 다양한 질환을 발생시킴과 동시에 조기사망률에도 영향을 미치는 것으로 알려져 있다 (WHO, 2013; Pope *et al.*, 2009; Pope and Dockery, 2006). 미세먼지의 인체 유해성에 대한 국민들의 인식과 경각심이 높아짐에 따라, 국가 차원에서 국민들의 건강을 보호하기 위해 환경부는 2013년에 수도권 을 대상으로한 PM₁₀ 시범예보를 시작으로 2018년 현

재 전국 19개 권역에 대해 PM_{10} , $PM_{2.5}$, O_3 예보를 수행하고 있으며, 이를 통해 국민들에게 고농도 대기오염물질에 대한 회피 기회를 사전에 제공하고 있다. 그리고 이와 동시에 '1·2차 수도권 대기환경관리 기본계획'과 '미세먼지 관리 특별대책', '미세먼지 관리 종합대책' 등을 통해 다각적으로 우리나라 미세먼지 수준을 개선하기 위한 노력을 하고 있다.

하지만 미세먼지는 배출원에서 직접 배출되는 1차 대기오염과 대기 중에서 전구물질들의 화학반응을 통해 생성 및 소멸되는 2차 대기오염 물질의 특성을 동시에 지녀 미세먼지에 대한 현상 및 원인 분석시 기상 및 배출량, 화학반응 과정 등이 복합적으로 고려되어야 한다. 특히, 인체에 유해한 것으로 알려진 $PM_{2.5}$ 의 농도 변화는 배출원에서의 1차 생성보다는 화학반응을 통한 2차 생성에 지배적인 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Seinfeld and Pandis, 2016; Kim *et al.*, 2016). 따라서 복잡한 미세먼지의 생성 및 소멸 기작을 반영한 대기질 정책수립 및 평가를 위해서는 대기질 모델링이 필수적이며, 미국의 경우 대기청정법(Clean Air Act)에서 지역 대기질 정책 수립시 대기질 모델을 사용하여 인과관계 및 정책효과를 분석할 것을 명시하고 있다. 국내 선행연구의 경우, Lee *et al.* (2013)은 우리나라 대기정책 수립 및 평가를 위한 대기질 모델링 가이드라인을 확립하여 모델링 수행시 발생 가능한 문제를 최소화함과 동시에 투명성을 확보하고자 하였으며, Kim (2017)은 성공적인 대기관리를 위해 배출량 자료의 신뢰성 확보를 비롯하여 대기 중 $PM_{2.5}$ 의 이동, 생성, 소멸 및 변환 기작에 대한 이해와 더불어 인체 위해도 파악 등을 통한 과학적 이해가 필요함을 알렸다.

우리나라를 대상으로 대기질 모델을 활용한 배출량 영향분석 및 정책평가 선행연구로 Choi *et al.* (2016)은 2008년을 대상으로 동아시아 영역의 황사 배출량 적용에 따른 대기질 모델의 PM_{10} 모사 정확도 개선 효과를 분석했으며, Kim *et al.* (2017a)은 3차원 광화학 모델을 이용하여 충남지역 내 대형 점오염원의 배출량이 배출지역 및 풍하지역의 $PM_{2.5}$ 농도에

미치는 영향을 분석하였다. 그리고 Kim *et al.* (2018)은 모델링을 통해 미세먼지 종합대책에 준하는 배출량 저감대책 시행시의 $PM_{2.5}$ 농도 변화 범위를 추정하였다. 하지만, 최근의 이러한 노력에도 불구하고 우리나라에 대해 대기질 모델을 활용한 배출량 저감 영향분석 및 정책평가 분석은 여전히 부족한 실정이다.

이에 본 연구에서는 기상 및 대기질 모델링을 통해 노후 석탄화력발전소 가동중지에 따른 배출량 저감이 2013년에서 2016년의 6월의 기상조건에서 충남지역 $PM_{2.5}$ 농도에 미치는 영향을 평가하였으며, 배출량 변화에 따른 충남지역 내 최대 $PM_{2.5}$ 농도 변화량을 정량적으로 분석하였다. 그리고 이와 동시에 미세먼지 정책 마련 및 평가를 위한 대기질 모델의 활용방안에 대해 검토하였다.

2. 연구 방법

2.1 연구대상 및 측정자료

본 연구는 최근 노후 석탄화력발전소의 가동이 중단되었던 6월을 분석대상 기간으로 하였으며, 기상조건의 변화가 배출량 감소에 따른 $PM_{2.5}$ 농도저감에 미치는 영향을 고려하기 위해 2013년부터 2016년까지 4년간의 6월 기상자료를 이용하여 모델링을 수행하였다. 분석 대상지역은 2017년 6월에 가동이 중단되었던 석탄화력발전소 8기 중 4기가 위치하고 충청남도 지역으로, 발전소 가동중단에 따른 $PM_{2.5}$ 농도 영향을 충청남도 권역 기준, 충청남도 내 국가·지자체 측정망 위치 기준, 최대영향지점 기준으로 구분하여 정량적인 영향분석을 수행하였다.

본 연구에서 사용된 지상 $PM_{2.5}$ 측정자료는 국립환경과학원의 NAMIS(National Ambient air quality Monitoring Information System)를 통해 수집된 충남지역 내 5개 지점의 국가·지자체 측정망자료를 이용하였으며, 이를 활용하여 모델 모사결과를 검증하였다. 그리고 노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 배출량 저감량을 분석하기 위해 대상 발전소의 국가 배

Table 1. Configuration and measurement data used in this study.

Category	Contents
Analyzed period	June from 2013 to 2016
Analysis area	5 air quality measuring stations in Chungcheongnam-do and Chungcheongnam-do area
Air quality measurement data	NAMIS (National Ambient air quality Monitoring Information System)
Emission data	CAPSS (Clean Air Policy Support System), TMS (TeleMonitoring System)

출량 자료 (CAPSS, Clean Air Policy Support System) 와 실시간 굴뚝원격감시시스템 (TMS, Telemonitoring Systems)의 측정자료를 활용하여, 직접 배출되는 총먼지 (TSP, Total Suspended Particles), PM_{2.5}와 대기 중에서 2차 생성되는 PM_{2.5}의 주요 전구물질인 황산 화물과 질소산화물에 대한 배출량의 저감량을 분석 하였다. 본 연구의 분석 대상기간 및 지역, 사용된 대기질 측정자료, 배출량 자료를 정리하여 표 1에 나타 내었다.

2.2 대기질 모사를 위한 입력자료 및 모델 구성

노후 석탄화력발전소 가동중단 효과를 분석하기 위한 기상 및 대기질 모델의 모사영역은 크게 중국과 일본을 포함한 동북아 영역 (D01)과 우리나라를 중심으로한 한반도 영역 (D02)으로 구성하였다. 두 영역은 동지격자 (nesting) 체계를 활용하였으며, 동북아 영역과 한반도 영역은 각각 27 km와 9 km의 공간격자 해상도를 지닌다. 모델링 수행을 위한 기상입력자료는 NCEP FNL (Final Operational Global Analysis data, NCEP 2000) 1°×1° 자료를 이용하였으며, 대기 질 모델 수행을 위한 자연배출량은 MEGAN 2 (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature version 2; Guenther *et al.*, 1995)를 이용하였다. 인위 적 배출량의 경우 국외 배출량은 MIX 2010 (Li *et al.*, 2015) 배출목록, 국내 배출량은 국립환경과학원의 2013년 CAPSS 자료를 이용하였으며, 노후 화력발전 소의 가동이 중단되었던 6월에 대한 배출량 저감량 을 산정하기 위해, TMS에서 측정된 배출량 자료를 이

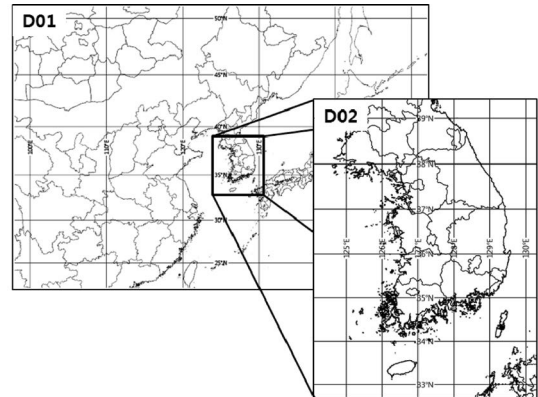


Fig. 1. Domain setting for CMAQ in this study.

Table 2. WRF and CMAQ configurations used in this study.

(a) WRF v3.3	
Micro physics	WRF Single-Moment (WSM) 3-class scheme (Hong <i>et al.</i> , 2004)
Long wave radiation	RRTM scheme (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Short wave radiation	Goddard shortwave (Tao <i>et al.</i> , 1989)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch scheme (Kain <i>et al.</i> , 2004)
PBL scheme	Yonsei University (YSU) scheme (Hong <i>et al.</i> , 2006)
(b) CMAQ v5.0.2	
Aerosol module	AERO5 (Binkowski and Roselle, 2003)
Chemical mechanism	SAPRC99 (Carter, 2010)
Horizontal advection	YAMO scheme (Yamartino, 1993)
Vertical advection	YAMO scheme (Yamartino, 1993)
Horizontal diffusion	Multiscale (Louis, 1979)

용하여 SMOKE (Sparse Matric Operator Kernel Emissions; Benjay *et al.*, 2001)를 통해 화학종 분배 및 시공간 할당을 수행하였다.

본 연구에서 기상 모사를 위해 사용한 모델은 WRF (Weather Research and Forecast; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.3 모델이며, 대기질 모사를 위해 CMAQ (Community Multiscale Air Quality, Byun and Ching, 1999) version 5.0.2 모델을 이용하였다. 그리고 대기질 모사를 위해 에어로졸 모듈은 AERO5 (fifth generation CMAQ aerosol module)를 이용하였으며, 가스상 반응은 SAPRC99 (Statewide Air Pollution Research Center, Version 99), 수평이류는 YAMO

모듈을 이용하였다. 기상 및 대기질 모델은 2013년부터 2016년까지 6월의 대기질을 모사하기 위해 각각 15일의 스피ن 업(spin-up) 기간을 가지도록 구성하였으며, 표 2에 기상 및 대기질 모델에서 사용된 주요 물리·화학 과정을 정리하여 나타내었다.

3. 결 과

3.1 석탄화력발전소 가동중단에 따른 배출량 차이 분석

2017년 6월의 가동중단 대상 화력발전소는 충남 보령 1·2호기, 충남 서천 1·2호기, 경남 삼천포 1·2호기, 강원 영동 1·2호기로 대상 발전소의 위치를 그림 2에 나타내었으며, 해당 발전소별 용량 및 연료를 표 3에 정리하여 나타내었다.

가동중단 대상 석탄화력발전소의 국가 배출량자료와 발전소의 TMS 측정자료를 활용하여 노후 석탄화력발전소의 가동중단에 따른 배출량 저감량을 분석한 결과(표 4), 전국 8기의 노후 석탄화력발전소 가동

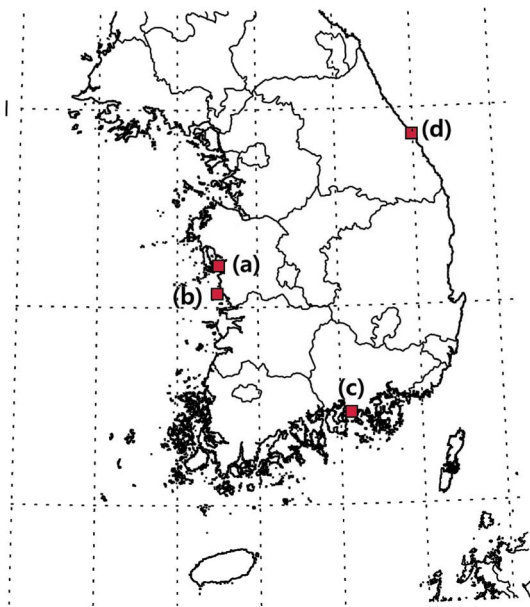


Fig. 2. Location of coal-power plants subject to shutdown.

Table 3. Capacity and fuel type of coal-fired power plant shutdown.

Location	#	Capacity	Fuel type
Boryeong	1	500 MW	Bituminous coal
	2	500 MW	
Seocheon	1	200 MW	Anthracite coal
	2	200 MW	
Samcheonpo	1	560 MW	Bituminous coal
	2	560 MW	
Yeongdong	1	125 MW	Anthracite coal
	2	200 MW	

Table 4. Emission reductions (ton) due to coal-fired power plant shutdown.

Region	TSP	SO _x	NO _x	PM _{2.5}
South Korea	31	684	1697	304
Chungcheongnam-do	14	361	644	141

중단에 따른 6월 한달간 배출량 저감량은 TSP, 황산화물, 질소산화물, PM_{2.5}에 대해 각각 31톤, 684톤, 1697톤, 304톤으로 분석되었으며, 충남지역에서는 4기의 석탄화력발전소 가동중단에 따라 TSP, 황산화물, 질소산화물, PM_{2.5} 배출량이 각각 14톤, 361톤, 644톤, 141톤 감소한 것으로 나타났다.

3.2 대기질 모델을 통한 석탄화력발전소 가동중단 효과 분석

3.2.1 기상 및 대기질 모델 모사결과 검증

모델 모사결과를 검증하기 위해 분석 가동중단 대상 석탄화력발전소를 중심으로 반경 70 km 이내에 위치한 도시대기 측정망 중 분석 대상 기간 동안 PM_{2.5}를 측정된 지점의 자료를 이용하여 통계검증을 수행하였다. 검증에 사용된 측정소는 충남지역 내 성황동, 정곡리, 동문동의 3개 지점과 2015년 12월에 설치된 세종시의 신흥동, 아름동 2개 지점의 자료를 활용하였으며 해당 측정소 지점의 위치를 그림 3에, 2016년 6월을 대상으로한 PM_{2.5} 모사값의 측정소별 통계검증 수행결과를 표 5와 그림 4에 나타내었다.

그리고 본 연구에서 사용된 기상 모델의 모사결과

를 검증하기 위해 기상청의 종관기상관측장비(ASOS, Automated Synoptic Observing System)에서 수집된 보령지역의 기온 및 풍속자료를 이용하여 통계검증을 수행하였다(표 6). 보령지역의 기온 및 풍속에 대

한 통계검증 결과, 모델은 기온과 0.75의 R값과 0.71의 IOA값을 나타냄과 동시에 -1.1의 MB(Mean Bias)값을 나타내 측정값과 유의한 모사결과를 나타냈다. 하지만 풍속의 경우 0.65의 R값을 나타내며 측정값과 양호한 상관관계를 나타내었지만, 모델은 실제 풍속보다 1.7m/s 과대 모사하는 것으로 나타났다.

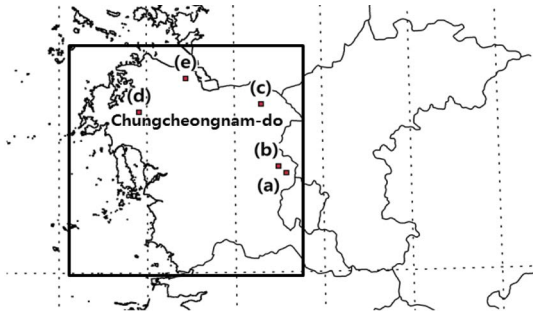


Fig. 3. Location of PM_{2.5} measuring stations in Chungcheongnam-do(a: Sinheung-dong, b: Areum-dong, c: Seonghwang-dong, d: Dongmun-dong, e: Jeonggok-ri, Box: Area).

Table 5. Verification of simulated PM_{2.5} concentrations for the air quality measuring stations in Chungcheongnam-do (a: Shinheung, b: Areum, c: Seonghwang, d: Dongmun, e: Jeonggok).

	a	b	c	d	e
Obs. PM _{2.5}	24.7	24.7	25.0	23.8	29.9
Mod. PM _{2.5}	26.3	25.3	28.1	23.5	53.7
MB	1.6	0.6	3.2	-0.2	23.8
R	0.78	0.77	0.71	0.74	0.55
RMSE	6.4	6.3	7.8	11.1	34.1
IOA	0.85	0.83	0.77	0.69	0.39

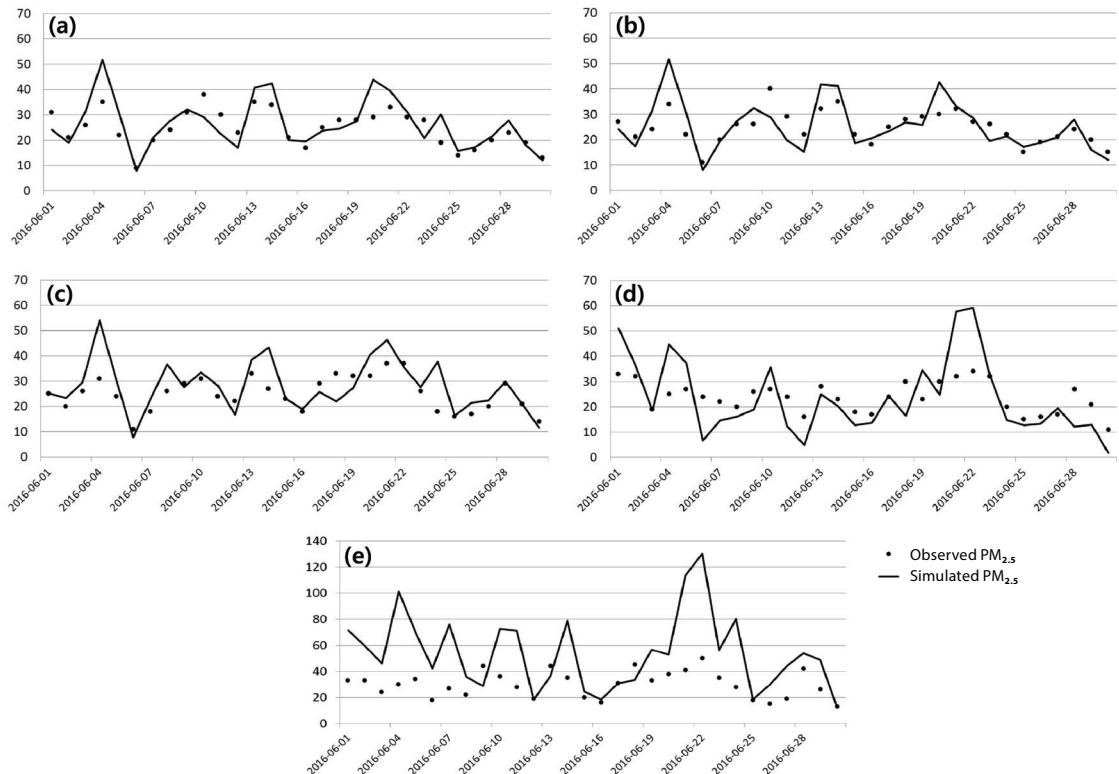


Fig. 4. Time series of daily mean PM_{2.5} at 5 stations in Chungcheongnam-do (a: Sinheung-dong, b: Areum-dong, c: Seonghwang-dong, d: Dongmun-dong, e: Jeonggok-ri).

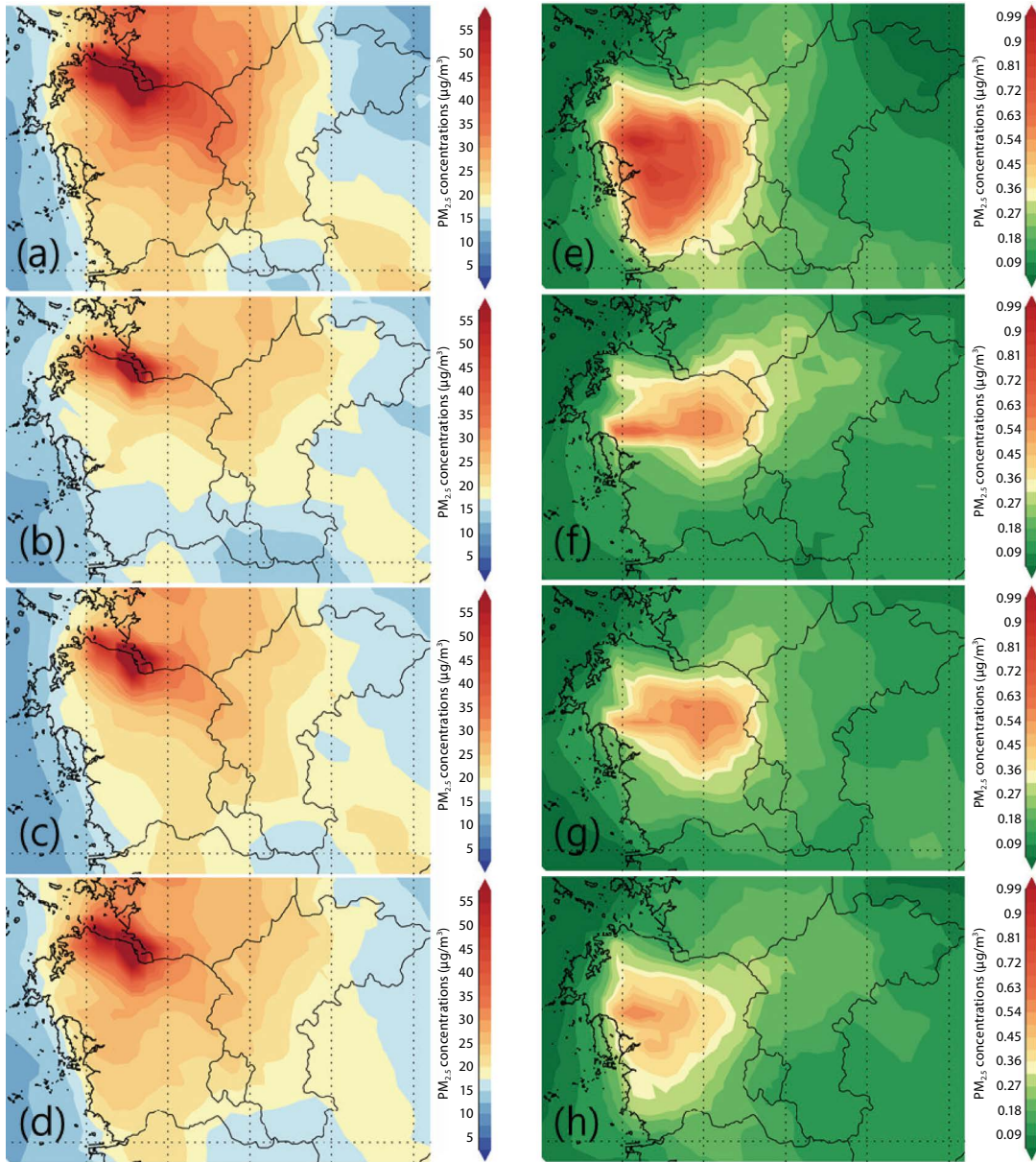


Fig. 5. Spatial distributions (a~d) and their differences (e~h).

대기질 모델에서 모사된 측정소별 $PM_{2.5}$ 검증결과, $PM_{2.5}$ 모사값은 정곡리 측정소를 제외한 모든 측정소에서 관측된 $PM_{2.5}$ 농도와 약 0.7 이상의 R값(0.71~0.78)과 IOA (Index of agreement) 값(0.69~0.85)을 나타내며 관측값과 유의한 상관관계를 나타내었

며, MB값 또한 $-0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 $3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이로 나타나 전반적으로 모델은 실제 $PM_{2.5}$ 농도수준과 변화 경향을 잘 모사하고 있는 것으로 나타났다. 하지만 정곡리의 측정망에 대한 $PM_{2.5}$ 모사값의 경우 관측값과 0.55 수준의 낮은 상관성을 보임과 동시에, 모델은

측정된 PM_{2.5} 농도와 23.8 µg/m³의 MB값을 보이며 크게 과대모의 하는 것으로 나타났다. 이는 기상 및 대기질 모델 내 물리·화학 과정에서 사용되는 다양한 가정에서 비롯되는 불확실성과 더불어, 해안 지역에 위치한 정곡리 지역의 인근에서 형성되는 해륙풍에 대한 영향과 국외로부터의 유입효과 등 다양한 영향을 복합적으로 받은 것에 기인한 것으로 판단되며, 향후 추가분석을 통해 모델 모사능력의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

Table 6. Statistical verification results for simulated temperature and wind speed.

	Obs.	Model	MB	R	RMSE	IOA
Temperature	21.7	20.6	-1.1	0.75	1.4	0.71
Wind speed	1.4	3.1	1.7	0.65	1.9	0.49

3.2.2 배출량 저감에 따른 PM_{2.5} 공간분포 변화

앞 절에서 나타난 노후 석탄화력발전소 가동중단 전·후의 배출량을 반영하여 모델링을 통해 모사된 2013년에서 2016년까지 각 해 6월의 충남지역 PM_{2.5} 농도 공간분포를 그림 5에 나타내었다. 모델에서 모사된 PM_{2.5}의 공간분포는 노후 석탄화력발전소를 비롯한 고배출원 지역에서 상대적으로 높은 수준의 PM_{2.5} 농도를 나타내었으며, 대기질 모델링 수행시 동

일한 자연 배출량과 인위적 배출량을 사용하였음에도 불구하고 PM_{2.5} 농도는 기간별로 상이한 공간 분포를 나타내었다. 이는 선행연구에서 보인 바와 같이 동일 배출량 조건에서도 기상조건의 차이에 따라 배출량이 미세먼지 농도에 미치는 영향은 상이할 수 있음을 나타내 (Nam et al., 2018; Kim et al., 2017b), 미세먼지에 대한 정책수립 및 이에 따른 평가시 기상조건 변화에 따른 영향을 함께 고려해야 함을 나타낸다.

3.2.3 배출량 저감에 따른 충남지역 PM_{2.5} 농도 변화

노후 석탄화력발전소 가동중지가 충남지역 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 충남권역 (Area), 국가·지자체 측정망 지점 (Obs. sites), 최대영향지역 (Max. impact region)으로 구분하여 영향분석을 수행한 결과를 그림 6과 표 7에 나타내었다. 측정망 지점에 대한 영향분석의 경우, 모사값과 측정값의 상관관계가 0.7 이상으로 유의한 값이 나타난 4개 지점 (신흥동, 아름동, 성황동, 동문동)을 대상으로 분석을 수행하였다.

대기질 모델을 활용한 배출량 저감효과 분석결과, 2013년에서 2016년 6월의 기상조건에서 노후 석탄화력발전소 가동중지로 인해 6월 평균 PM_{2.5} 농도는 충남권역을 대상으로 평균 1.2% 감소한 것으로 나타났

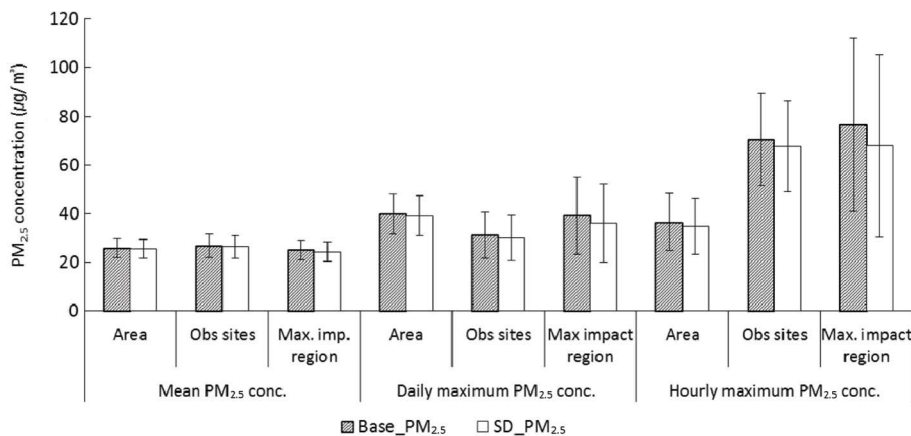


Fig. 6. Change of PM_{2.5} concentration and standard deviation due to shutdown of coal-fired power plant in June from 2013 to 2016.

Table 7. Results of reduced mean, daily maximum, and hourly maximum PM_{2.5} concentrations (μg/m³)

		Base_PM _{2.5} (a)	SD_PM _{2.5} (b)	Differences (b) - (a)
Area	Mean PM _{2.5} conc.	25.8	25.5	-0.3 (-1.2%)
	Daily max. PM _{2.5} conc.	39.9	39.0	-0.9 (-2.3%)
	Hourly max. PM _{2.5} conc.	36.5	34.7	-1.8 (-4.9%)
Obs. sites	Mean PM _{2.5} conc.	26.8	26.4	-0.4 (-1.5%)
	Daily max. PM _{2.5} conc.	31.1	30.1	-1.0 (-3.2%)
	Hourly max. PM _{2.5} conc.	70.5	67.5	-3.0 (-4.3%)
Max. impact region	Mean PM _{2.5} conc.	25.0	24.3	-0.7 (-2.8%)
	Daily max. PM _{2.5} conc.	39.1	36.1	-3.0 (-7.7%)
	Hourly max. PM _{2.5} conc.	76.5	67.9	-8.6 (-11.2%)

으며 (25.8 → 25.5 μg/m³), 국가·지자체 측정망 지점에서 평균 1.5% 감소한 것으로 나타났다 (26.8 → 26.4 μg/m³). 그리고 발전소 가동중지로 인한 6월 최대 일 평균 PM_{2.5} 농도 차이는 충남권역을 대상으로 평균 2.3% 감소한 것으로 나타났으며 (39.9 → 39.0 μg/m³), 국가·지자체 측정망 지점에서 평균 3.2% 감소한 것으로 나타나 (31.1 → 30.1 μg/m³) 노후 석탄화력발전소 가동중단이 충남지역의 PM_{2.5} 농도 개선에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 특히, 국가·지자체 측정망이 위치한 지역에서 상대적으로 충남권역의 PM_{2.5} 농도 변화보다 배출량변화에 따른 PM_{2.5} 농도 감소효과가 더 큰 것으로 나타났으며, 이는 도심(거주) 지역의 평균 대기질 농도 측정을 목적으로 하는 국가·지자체 측정망이 위치한 지역이 비도심 지역에 비해 높은 배출량 수준을 가짐에 따라 PM_{2.5}의 2차 생성량에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다.

대기질 모델 모사결과에 따른 충남지역 내 노후 석탄화력발전소 가동중단 효과가 가장 크게 나타난 지역에서의 6월 평균 PM_{2.5} 농도는 2.8% (25.0 → 24.3 μg/m³), 최대 일 평균 PM_{2.5} 농도는 평균 7.7% 감소하는 것으로 모사하였으며 (39.1 → 36.1 μg/m³), 시간별 PM_{2.5} 농도는 최대 8.6 μg/m³ 수준이 감소하는 것으로 나타났다 (76.5 → 67.9 μg/m³).

4. 결 론

본 연구에서는 대기질 모델을 활용하여 배출량 저

감효과를 분석함과 동시에 미세먼지 정책마련 및 평가를 위한 대기질 모델 활용방안에 대해 알아보기 위해 충남지역의 국가·지자체 측정망 자료, CAPSS 자료, TMS 측정자료와 WRF 및 CMAQ 모델을 이용하여 노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 충남지역의 PM_{2.5} 개선 효과를 분석하였다.

국가 배출량 자료와 발전소의 TMS 측정자료를 활용한 노후 석탄화력발전소의 가동중단에 따른 배출량 저감량 분석 결과, 전국 8기의 노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 2017년 6월 한달간 배출량 저감량은 TSP, 황산화물, 질소산화물, PM_{2.5}에 대해 각각 31톤, 684톤, 1697톤, 304톤 감소한 것으로 나타났으며, 충남지역 배출량의 경우 4기의 노후 석탄화력발전소 가동중단에 의해 TSP, 황산화물, 질소산화물, PM_{2.5} 배출량이 각각 14톤, 361톤, 644톤, 141톤 감소한 것으로 나타났다.

WRF 및 CMAQ 모델링을 활용하여 2013년에서 2016년까지 각 해의 6월 기상조건에서 노후 석탄화력발전소 가동중단이 충남지역의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 분석한 결과, 6월 평균 PM_{2.5} 농도는 충남권역을 대상으로 1.2% 감소, 국가·지자체 측정망이 위치한 곳에서 평균적으로 1.5% 감소한 것으로 나타나 노후 석탄화력발전소 가동중단이 충남지역 PM_{2.5} 농도 개선에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그리고 일 평균 PM_{2.5} 농도 차이가 가장 크게 나타난 날의 경우 충남권역 평균 PM_{2.5} 농도는 2.3% 감소, 국가·지자체 측정망이 위치한 지점에서는 PM_{2.5}가 평균 3.2%

감소한 것으로 나타났으며, 이는 도심지역이 상대적으로 비도심 지역에 비해 높은 배출량 수준을 가짐에 따라 노후 석탄화력발전소의 가동중단에 따른 PM_{2.5}의 2차 생성량에 더 큰 영향을 미친 것으로 판단된다. 모델에서 모사된 충남지역 내 노후 석탄화력발전소 가동중단에 따른 영향이 가장 크게 나타난 지점의 경우, 6월 평균 PM_{2.5} 농도는 2.8%, 최대 일 평균 PM_{2.5} 농도는 7.7% 감소하는 것으로 모사하였으며, 시간별로는 PM_{2.5} 농도가 최대 11.2%까지 감소하는 것으로 나타내었다.

본 연구 수행을 통해, 대기질 모델을 이용하여 기상 및 배출량 변화를 고려한 미세먼지 정책 효과분석과 최대영향지역 선정 및 정량적인 평가가 가능함을 확인할 수 있었으며, 향후 유사한 상황 및 특정 배출원에 대한 미세먼지 대책 마련시 근거 자료로 이용될 수 있을 것으로 기대된다. 다만, 기상 및 대기질 모사결과는 모델에서 사용되는 물리·화학 과정에서의 다양한 가정과 기상 및 배출량 입력자료에서 발생하는 불확도를 내포하고 있으므로 향후 모사 정확도 향상을 위한 지속적인 개선노력이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원을 받아 수행하였습니다 (NIER-RP-2017-149).

References

- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emissions data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3, U.S. EPA.
- Binkowski, F.S., Roselle, S.J. (2003) Models-3 Community Multiscale Air Quality (CMAQ) model aerosol component 1. Model description, *Journal of Geophysical Research*, 108(D6), AAC 3-1-AAC 3-18.
- Byun, D.W., Ching, J.K.S. (1999) Science algorithms of the EPA Models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, Washington, DC, USA: US Environmental Protection Agency, Office of Research and Development.
- Carter, W.P.L. (2010) Implementation of the SAPRC-99 chemical mechanism in the models-3 framework.
- Choi, D.R., Koo, Y.S., Jo, J.S., Jang, Y.K., Lee, J.B., Park, H.J. (2016) The effects of dust emissions on PM₁₀ concentration in East Asia, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 32-45.
- Guenther, A., Hewitt, C.N., Erickson, D., Fall, R., Geron, C., Graedel, T., Harley, P., Klinger, L., Lerdau, M., McKay, W.A., Pierce, T., Scholes, B., Steinbrecher, R., Tallamraju, R., Taylor, J., Zimmerman, P. (1995) A global model of natural volatile organic compound emissions, *Journal of Geophysical Research*, 100, 8873-8892.
- Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120.
- Hong, S.Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A new vertical diffusion package with and explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134(9), 2318-2341.
- Kain, J.S. (2004) The Kain-Fritsch convective parameterization: An update, *Journal of Applied Meteorology*, 43(1), 170-181.
- Kim, B.U., Kim, O.G., Kim, H.C., Kim, S.T. (2016) Influence of fossil-fuel power plant emissions on the surface fine particulate matter in the Seoul Capital Area, *South Korea, Journal of the Air and Waste Management Association*, 66(9), 863-873.
- Kim, E.H., Bae, C.H., Yoo, C., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, S.T. (2018) Evaluation of the effectiveness of emission control measures to improve PM_{2.5} concentration in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 469-485.
- Kim, S.T., Kim, O.K., Kim, B.U., Kim, H.C. (2017a) 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.
- Kim, H.C., Kim, E.H., Bae, C.H., Cho, J.H., Kim, B.H., Kim, S.T. (2017b) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emission inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10315-10332.
- Kim, Y.P. (2017) Research and policy directions against ambient fine particles, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173.

- spheric Environment, 33(3), 191-204.
- Lee, D.G., Lee, Y.M., Lee, M.H., Hong, S.C., Hong, J.H. (2013) Air Quality modeling guideline for national air policy development and evaluation: Part I General information, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 22(5), 537-546.
- Li, M., Zhang, Q., Kurokawa, J., Woo, J.H., He, K.B., Lu, Z., Ohara, T., Song, Y., Streets, D.G., Carmichael, G.R., Cheng, Y.F., Hong, C.P., Huo, H., Jiang, X.J., Kang, S.C., Liu, F., Su, H., Zheng, B. (2015) MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects, *Atmospheric Chemistry and Physics*, Discuss, 15(23), 34-813.
- Louis, J.-F. (1979) A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere, *Boundary-Layer Meteorology*, 17(2), 187-202.
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682.
- Nam, K.P., Lim, Y.J., Park, J.H., Kim, D.R., Lee, J.B., Kim, S.M., Jung, D.H., Choi, K.C., Park, H.J., Lee, H.S., Jang, L.S., Kim, J.S. (2018) Analysis of the changes in PM_{2.5} concentrations using WRF-CMAQ modeling system: Focusing on the fall in 2016 and 2017, *Journal of Environmental Impact Assessment*, 27(2), 215-231.
- National Centers for Environmental Prediction (NCEP) (2000) NCEP FNL operational model global tropospheric analysis, continuing from July, 1999, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information System Laboratory, <https://doi.org/10.5065/D6M043C6> (accessed on Sep. 04, 2018).
- Pope III, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: Lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742.
- Pope III, C.A., Ezzati, M., Dockery, D.W. (2009) Fine-particulate air pollution and life expectancy in the United States, *New England Journal of Medicine*, 360(4), 376-386.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: From Air Pollution to Climate Change*, third edition, John Wiley & Sons Inc, Hoboken, New Jersey, USA.
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A description of the advanced research WRF version 3, NCAR Tech, Note NCAR/TN-475+STR, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, 125 pp.
- Tao, W.K., Simpson, J., McCumber, M. (1989) An ice-water saturation adjustment, *Monthly Weather Review*, 117(1), 231-235.
- World Health Organization (WHO) (2013) Health effects of particulate matter: policy implications for countries in eastern Europe, Caucasus and central Asia, p. 6-7.
- Yamartino, R.J. (1993) Nonnegative, conserved scalar transport using grid-cell-centered, spectrally constrained blackman cubics for applications on a variable-thickness mesh, *Monthly Weather Review*, 121(3), 753-763.

Authors Information

남기표(국립환경과학원 대기질통합예보센터 전문위원)
 이대균(국립환경과학원 대기질통합예보센터 환경연구관)
 이재범(국립환경과학원 대기질통합예보센터 환경연구관)
 최기철(한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
 장임석(국립환경과학원 대기질통합예보센터 센터장)
 최광호(남서울대학교 교양과정부 교수)