

논문

풍상 관측 기반 2019년 국내 시도별 PM_{2.5} 국외 배출 영향 보정 및 국내 배출량의 불확도 추정

Adjustment of Foreign Emission Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations in South Korea based on Upwind Observations and Estimation of Domestic Emission Uncertainty

배민아, 김순태^{1)*}

아주대학교 환경연구소, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과

Minah Bae, Soontae Kim^{1)*}

Environmental Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

¹⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2022년 6월 16일
수정일 2022년 7월 18일
채택일 2022년 8월 2일

Received 16 June 2022
Revised 18 July 2022
Accepted 2 August 2022

*Corresponding author
Tel : +82-(0)31-219-2511
E-mail : soontaeim@ajou.ac.kr

Abstract In this study, we estimated the foreign emission impact on PM_{2.5} concentration in South Korea using Weather Research and Forecasting (WRF)-Community Multiscale Air Quality (CMAQ) modeling with a set of bottom-up emissions inventories over Northeast Asia during 2019. PM_{2.5} foreign impact based on the emissions inventory was estimated to 12.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ for the study period. However, when compared to the PM_{2.5} observations in China, simulated PM_{2.5} concentration for the period was overestimated by about 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24%) during 2019. When adjusted with ratios of monthly mean observed to simulated concentrations over the upwind region, the period mean foreign impact was lowered by 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. The relative foreign impacts in South Korea before and after the adjustment was 54% and 43%, respectively. On the other hand, the bias between observed and simulated PM_{2.5} concentrations in South Korea has increased from 0.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ before foreign contribution adjustment to -2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ after the adjustment. This indicates that additional domestic emissions are necessary to explain the lack of PM_{2.5} self-contribution (2.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). After the adjustment, the biases between the observations and simulated concentrations for seventeen provinces ranged from -10.5 to 24.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$. This result represents that accuracy of provincial level emissions should be guaranteed when future direction on the sub-regional air quality managements in South Korea to lower the ambient concentration of the secondary air pollutant is considered. Overall, this study exhibits that uncertainties in foreign contributions need to be better understood prior to estimation of uncertainties embedded in domestic emissions in South Korea to weigh the importance of PM_{2.5} transboundary impact.

Key words: PM_{2.5}, Foreign emission impacts, Adjustment, CAPSS, Emission uncertainty

1. 서론

국내의 연평균 초미세먼지 (Particulate matter of 2.5 μm or less in diameter; PM_{2.5}) 농도에 대한 대기환경 기준은 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2020년 기준으로 국내 도시대 기측정망 472개소 가운데 83%가 이를 초과하고 있어 사회적 문제가 되고있다 (NIER, 2021). 국내 PM_{2.5} 농

도의 결정에는 자체 배출 영향뿐만 아니라 국외로부터의 장거리 이동 영향이 더해져 나타난다 (Kim, 2006). 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 및 국외 배출 영향을 정량화하기 위해서 대기질 모사를 이용한 분석이 많이 이루어졌으며 (Bae *et al.*, 2022; Kumar *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2021; You *et al.*, 2021; LTP, 2019), 선행 연구에서 2010~2016년 사이의 남한 PM_{2.5} 농도에

대한 국외 배출 영향을 40~70% 수준으로 추정하였다 (Kumar *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2020a; Bae *et al.*, 2020b; Han *et al.*, 2018; Koo *et al.*, 2008).

대기질 모사에는 기상과 배출량 등 다양한 입력자료가 필요하며, 입력자료에 따라 모사 결과는 관측 농도와 차이, 즉 모사 농도의 불확도를 내재한다 (Huang *et al.*, 2021; Emery *et al.*, 2017). Huang *et al.* (2021)은 중국 내 연구를 바탕으로 배출량이 모사 불확도에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 이외에도 격자해상도, 에어로졸 및 가스상 화학 메커니즘, 경계장, 기상자료 등이 대기질 모사의 불확도를 유발하는 것으로 언급하였다 (Huang *et al.*, 2021). 우리나라는 동북아의 풍하지역에 위치하여 풍상에 해당하는 중국 등 국외 배출이 국내 대기질에 미치는 영향이 높다 (Bae *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021a; Yu *et al.*, 2020).

이러한 점을 고려하면, 지역 간 배출-수용지 모사 연구에서 중국 배출량의 정확도는 모사 농도 및 기여도 분석 결과에서 매우 중요한 인자가 된다 (Bae *et al.*, 2020c, 2017; Kim *et al.*, 2017). 상향식 배출 목록을 이용한 PM_{2.5} 농도에 대한 배출원별 기여도 분석의 경우, 복수의 배출자료를 이용하여 모사 불확도를 추정할 수 있다 (Park *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2017). 다만 상향식 배출 목록은 작성되는 기준 연도와 모사 대상 연도의 차이 및 산정된 배출량의 시공간적 오차가 발생한다 (Bae *et al.*, 2020c, d; Kim *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2016). 특히 동북아 지역에서 최근 배출량이 급변하는 상황임을 고려하면 (Zhang *et al.*, 2019; Zheng *et al.*, 2018), 상향식 배출량을 이용한 최근 기간에 대한 PM_{2.5} 등 대기오염물질의 국외 영향 분석은 쉽지 않다.

이러한 제한점을 보완하기 위해 역모델 (inverse model)을 이용하여 배출량을 재산정하는 하향식 배출량 추정 방법이 있으나 (Kim *et al.*, 2021b; Barkley *et al.*, 2013; Mijling and van der A, 2012), 이는 관측 가능한 일부 대기오염물질만을 대상으로 하며, 많은 계산 시간이 소요되는 단점이 존재한다. Bae *et al.*

(2022)은 이러한 제한점을 개선하기 위한 노력의 일환으로 풍상의 관측 농도와 모사 결과를 활용하여 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 유입 영향을 보완하는 방법을 제시한 바 있다. 이 방법에 따르면 2015~2020년 사이 국내 평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 배출 영향은 45~51%로 지속적인 감소 추세를 추정하였다 (Bae *et al.*, 2022). 다만 앞선 연구와 마찬가지로 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 배출 영향을 남한 평균적으로 분석하였으며, 국내 시도별, 월별 변화를 제시하지 못하였다.

이에 본 연구에서는 2019년을 대상으로 상향식 배출 목록에 기반한 대기질 모사를 통해 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 배출 영향을 분석하고, 이를 풍상의 관측자료를 기반으로 보정하였다. 해당 결과를 기반으로 보정 전후의 국외 배출 영향을 국내 시도별로 분석하였다. 또한 국내 관측 농도와 보정된 국외 배출 영향을 활용하여 국내 시도별 PM_{2.5} 관련 배출량의 불확도를 검토하였다.

2. 방법론

2.1 지표 관측자료

본 연구에서는 기상 모사 및 대기질 모사 결과의 재현성 평가와 배출량 기반의 국외 배출 영향을 보정하기 위해 지표 관측자료를 이용하였다. 기상 관측자료는 동북아 지역에 대한 공간적 범위를 포함하는 MADIS 관측자료를 이용하였다 (<https://madis.ncep.noaa.gov>). 중국 및 남한에 대해 제공하는 MADIS의 67개 측정소에서 관측되는 1시간 평균 2 m 기온과 10 m 풍속 자료를 사용하였다. 풍상지역의 지표 관측자료는 확보 가능한 중국 관측자료인 China National Environmental Monitoring Center (<https://www.cnemc.cn/en>)의 889개 측정소에서 관측된 1시간 평균 PM_{2.5} 농도를 이용하였다. 남한의 지표 관측자료는 에어코리아에서 제공하는 도시대기측정망의 1시간 평균 PM_{2.5} 농도를 활용하였다.

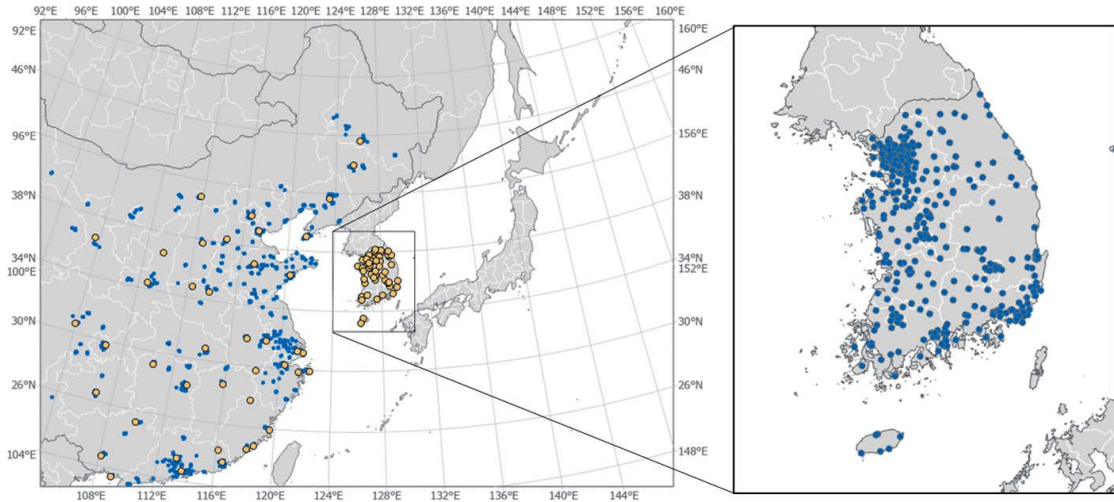


Fig. 1. Modeling domains for 27- and 9-km horizontal resolutions. Yellow and blue dots indicate meteorology and air quality measurement sites in China and South Korea, respectively.

Table 1. WRF and CMAQ model configuration using in this study.

WRF version 3.9.1		CMAQ version 5.3.1	
Micro physics	WSM 6-class	Aerosol module	AERO6
Cumulus scheme	Kain-Fritsch	Chemical mechanism	SAPRC07TC
Long-wave radiation	RRTMG	Advection scheme	WRF_CONS
Short-wave radiation	RRTMG	Horizontal diffusion	Multiscale
PBL scheme	YSU	Vertical diffusion	ACM2
		Cloud scheme	AQCHEM

2.2 대기질 모사

본 연구는 관측자료가 확보된 최근 기간이면서, COVID-19 등과 같은 사회적 이슈가 발생하기 이전인 2019년 1월 1일~12월 31일을 대상으로 하였다. 모사영역은 국내 및 중국을 포함하는 영역에 대해 27 km 수평해상도로 설정하였으며(이하 ‘27 km 모사영역’), 국내와 북한 일부 지역을 포함하는 영역에 대해 9 km (이하 ‘9 km 모사영역’)로 설정하였다(그림 1). 대기질 모사는 CMAQ (Community Multiscale Air Quality; Byun & Schere, 2006) version 5.3.1을 수행하여 마련하였다. 대기질 모사에 필요한 기상 입력자료 준비를 위해 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.9.1을 수행하였으며, 이때 기상초기장으로는 NCEP의 FNL (Final;

NCEP, 2000)을 이용하였다. WRF 결과를 CMAQ의 입력자료 형태로 변환하기 위하여 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) version 3.6을 이용하여 후처리하였다.

배출량 입력자료는 자연 및 인위적 배출량에 대해 각각 MEGAN (Model of Emission of Gases and Aerosols from Nature; Guenther, 2006) version 2.01, SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emissions; Benjey *et al.*, 2001) version 3.1을 통해 처리하였으며, 배출 목록은 국내에 대해 CAPSS 2017, 국외 지역에 대해 KORUSv5를 이용하였다. CMAQ 모사 시, 화학메커니즘은 SAPRC07TC, AERO6를 이용하였다. WRF 및 CMAQ 모사에 이용된 물리화학 옵션은 표 1에 요약하였다.

2.3 국내외 배출 영향 산정 및 보정 방법

2.3.1 국내외 기여도 산정

국외 및 국내 자체 배출량이 국내 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 분석하기 위하여 민감도 분석 방법인 Brute Force Method (BFM)을 이용하였다. BFM은 기본 조건에서의 모사와 특정 조건을 변화시킨 모사의 농도 변화로부터 해당 조건이 대기질 모사 농도에 미치는 영향을 추정하는 방법이다 (Clappier *et al.*, 2017). 본 연구에서는 남한 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 배출 영향(이하 ‘국외 기여도’)을 분석하기 위하여 선행 연구를 참고하여 (Lee *et al.*, 2019; Clappier *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017) 모사영역에서 남한을 제외한 국외 지역의 배출량을 50% 삭감하여 27 km 모사영역의 민감도 모사를 수행하였다. 이어지는 9-km 모사영역에 대한 민감도 모사에서는 27 km 모사영역의 민감도 모사를 경계장으로 이용하여 국외 기여도를 국내 시도 별로 분석할 수 있도록 준비하였다 (Bae *et al.*, 2020b). 본 연구는 관측 농도와 비교를 수행하므로, 지역별 PM_{2.5} 모사 농도 및 기여도 분석은 각 지역 내 관측지점에서 모사 결과를 추출하여 평균값으로 제시하였다. 9 km 모사영역에 대한 기본 모사와 민감도 모사 농도로부터 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여도 ($ZOC_{foreign,base}$)를 식 (1)과 같이 산정하였다. 이후 과정에서 보정하는 국외 기여도와 구별하기 위하여 식 (1)에 의한 산정된 국외 기여도를 ‘보정 전 국외 기여도’라 하였다.

$$ZOC_{foreign,base} = (MOD_{base} - MOD_{sens}) \times \frac{100\%}{\Delta E (\%)} \quad (1)$$

$$ZOC_{domestic,base} = MOD_{base} - ZOC_{foreign,base} \quad (2)$$

$$Relative\ ZOC_{foreign,base} = ZOC_{foreign,base} / MOD_{base} \quad (3)$$

식 (1)에서 MOD_{base} , MOD_{sens} 는 각각 기본 모사와 민감도 모사에서 계산된 남한 PM_{2.5} 농도이며, ΔE 는 배출량 삭감률 (%)이다. $ZOC_{domestic,base}$ 는 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 자체 배출 영향(이하 ‘보정 전 국내 기여도’)이며, 본 연구에서는 국내 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 국내와 국외로 구분하였기 때문에 기본 모사의 국내 PM_{2.5} 농도에서 국외 기여도를 뺀 나머지로 계산하였다. 상대적인 국외 기여도는 식 (3)과 같이 기본 모사 농도 대비 국외 기여도로 산정하였으며, 이를 ‘보정 전 국외 기여율’이라 하였다.

도’)이며, 본 연구에서는 국내 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 국내와 국외로 구분하였기 때문에 기본 모사의 국내 PM_{2.5} 농도에서 국외 기여도를 뺀 나머지로 계산하였다. 상대적인 국외 기여도는 식 (3)과 같이 기본 모사 농도 대비 국외 기여도로 산정하였으며, 이를 ‘보정 전 국외 기여율’이라 하였다.

2.3.2 국외 기여도 보정 방법

본 연구에서는 국외 기여도 보정을 위해 Bae *et al.* (2022)이 제시한 방법을 적용하였다. 여기에서, 풍상 지역의 모사 불확도는 장거리 이동을 통해 국내 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 국외 기여도에 포함되는 것으로 가정하였다. Bae *et al.* (2022)은 풍상 지역의 관측과 모사 농도를 기반으로 국외 기여도를 식 (4)와 같이 보정하였다. 다만, 식 (4)에서 관측자료의 이용 가능성을 고려하여 본 연구에서는 중국의 관측자료를 기반으로 보정하였다.

$$ZOC_{foreign,adj} = ZOC_{foreign,base} \times \frac{OBS_{China}}{MOD_{Base,China}} \quad (4)$$

$$MOD_{adj} = ZOC_{foreign,adj} + ZOC_{domestic,base} \quad (5)$$

$$Relative\ ZOC_{foreign,adj} = ZOC_{foreign,adj} / MOD_{adj} \quad (6)$$

식 (4)의 OBS_{China} 와 $MOD_{base,China}$ 는 각각 중국의 PM_{2.5} 관측 농도와 기본 모사 농도이다. 식 (5)에서 MOD_{adj} 는 국외 기여도가 보정된 국내 PM_{2.5} 모사 농도를 의미하며, 본 연구에서는 ‘보정 후 남한 PM_{2.5} 모사 농도’라 하였다. 보정 후 국외 기여율은 국외 기여도가 보정된 남한 PM_{2.5} 모사 농도를 기반으로 해야 하므로 MOD_{adj} 대비 보정 후 국외 기여도의 비율로 산정하였으며 (식 (6)), 이를 ‘보정 후 국외 기여율’이라 하였다. 본 연구에서 적용한 풍상 기여농도 보정 방법은 모사 결과를 후처리하여 기여도를 보정하는 것으로, 배출량 등 입력자료 변화를 통한 직접적인 모사와는 차이가 있다.

3. 결 과

3.1 모사 수행평가

3.1.1 기상 모사 수행평가

기상 모사의 재현성 평가를 위해 대상 기간 2019년 1년에 대한 기상 모사 결과를 중국과 남한에 대한 MADIS 관측자료와 비교하였다(그림 2). 대상 기간

평균 2 m 기온의 관측값과 모사값은 각각 15.5, 14.5°C로 1.0°C 과소 모사되었다. 특히 기온의 과소 모사는 여름철 두드러졌으나, 1시간 평균 기온의 관측값과 모사값의 상관관계는 1.00으로 높았다. 한편 대상 기간 평균 10 m 풍속은 관측 2.9 m/s, 모사 3.3 m/s로 10%가량 과대 모사되었으며, 상관계수는 0.76이었다. 과대 모사된 풍속은 대기질 모사의 대기오염물질 이류 등에 영향을 주어 농도를 과소 모사할 가능성이 있

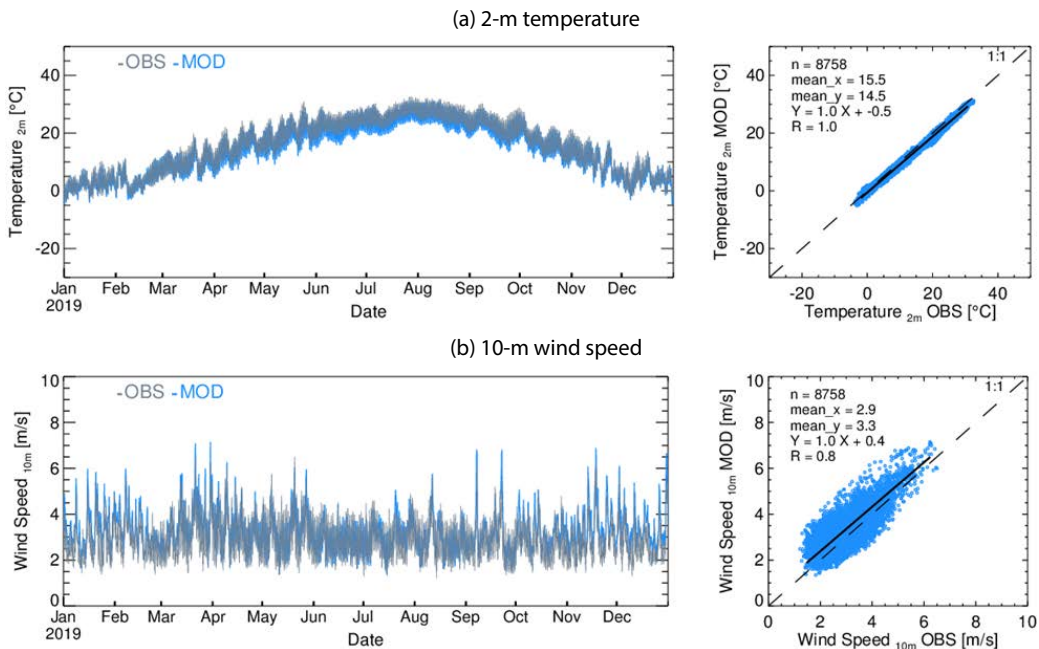


Fig. 2. Comparison of observed and simulated 1-h (a) 2-m temperature and (b) 10-m wind speed during 2019.

Table 2. Statistics of observed and simulated 1-hr meteorological values in China and South Korea during 2019.

		Observed mean	Simulated mean	Mean bias	NMB (%)	NME (%)	RMSE	r
China & South Korea	2-m temperature (°C)	15.5	14.5	-1.0	-6.7	7.2	1.3	1.00
	10-m wind speed (m/s)	2.9	3.3	0.4	12.3	19.3	0.7	0.76
China	PM _{2.5} (μg/m ³)	42.0	51.9	9.9	23.5	25.2	12.4	0.93
	SO ₂ (ppb)	4.2	10.3	6.1	147.3	147.3	6.6	0.92
	NO ₂ (ppb)	15.1	14.0	-1.1	-7.2	14.4	2.6	0.89
South Korea	PM _{2.5} (μg/m ³)	23.2	23.3	0.1	0.1	19.8	6.3	0.91
	SO ₂ (ppb)	3.7	3.5	-0.2	-3.9	20.6	0.9	0.78
	NO ₂ (ppb)	18.4	15.3	-3.1	-16.9	20.3	4.8	0.87

다. 2 m 기온과 10 m 풍속의 관측 및 모사 결과를 비교한 통계분석 결과는 표 2에 요약하였다.

3.1.2 대기질 모사 수행평가

중국과 남한에 대해 2019년 동안 일평균 PM_{2.5}, SO₂, NO₂ 관측 농도와 모사 농도를 비교하였다(그림 3). 2019년 평균 중국의 PM_{2.5} 농도는 42.0 µg/m³으로 관측되었으며 모사 농도는 51.9 µg/m³으로 나타나, 9.9 µg/m³가량을 과대 모사하였다. 일평균 PM_{2.5} 모사 농도는 관측과 유사한 계절 변화를 보였으나, 봄철 동안에는 과대 모사하였다. 이처럼 중국에서 PM_{2.5} 농도를 24%가량 과대하는 것은 풍하지역인 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 중국 배출의 기여도를 과대 평가하는 결과로 이어질 수 있다. 이에 대해서는 3.2절에서 논의하였다. 일평균 PM_{2.5} 관측 농도와 모사 농도의 상관관계는 0.93으로 분석되었다.

대상 기간 평균 중국의 SO₂ 관측 농도는 4.2 ppb이며, 모사 농도는 약 1.5배 높은 10.3 ppb로 모사되었다. 중국의 NO₂ 관측 농도의 경우 15.1 ppb로 관측되었으나, 모사 농도는 14.0 ppb로, 1.1 ppb 과소 모사되었다.

SO₂의 과대 모사와 NO₂의 과소 모사는 최근 급격하게 감소하고 있는 중국의 가스상 오염물질에 대한 배출량을 반영하기에는 배출 목록의 기준연도가 과거인 점(Zheng *et al.*, 2018; Wang *et al.*, 2016)과 배출 목록의 작성 시, 배출관리 및 활동도 등의 불확도가 영향을 미쳤을 것으로 추정된다.

한편, 2019년 평균 국내 PM_{2.5} 관측 및 모사 농도는 각각 23.2, 23.3 µg/m³으로 0.1 µg/m³가량 차이를 보였다. 앞서 풍상지역의 PM_{2.5} 농도가 과대 모사된 점을 감안하면 국외 기여도가 실제와 유사한 수준으로 낮아질 경우, 국내 PM_{2.5} 모사 농도는 관측 농도에 비해 과소 평가될 수 있다. 그 외에도, 국내의 SO₂ 농도는 3.7 ppb로 관측되었으나, 모사 농도는 3.5 ppb로, 0.2 ppb 과소 평가되었다. 대상 기간 평균 국내 NO₂의 관측과 모사 농도는 각각 18.4, 15.3 ppb로 3.1 ppb 과소 모사하였다. 중국과 남한에 대한 관측 및 모사 농도의 통계분석은 표 2에 요약하였다.

3.2 남한 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여도

본 연구에서는 PM_{2.5} 모사 농도 및 기여도 분석 시

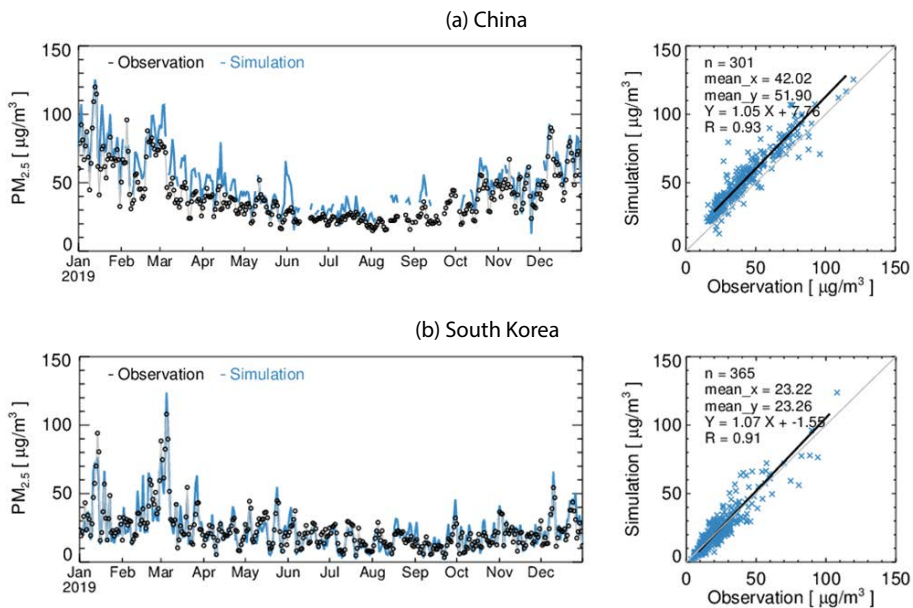


Fig. 3. Comparison of observed and simulated daily average PM_{2.5} concentration in (a) China and (b) South Korea during 2019.

측정소 기반으로 시군구 평균하여 분석하였다. 이에 측정소가 존재하지 않는 경남(합천, 청도 등)과 경북(의성, 봉화 등), 전남(보성, 강진 등), 강원(인제, 화천) 등 지역의 경우 그림 4에 값이 제시되지 않았다. 상향식 배출량을 이용한 기본 모사에서 2019년 연평균 국내 PM_{2.5} 모사 농도는 23.3 µg/m³이었으며, 수도권과 충남 등 남한의 서쪽 지역에서 24.0 µg/m³으로 국내 동부(강원)와 남부(경북 및 전북) 지역에 비해 상대적으로 높았다(그림 4). 기본 모사에서 국내 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 보정 전 국외 기여도는 12.7 µg/m³으로, 17개 시도에서 10.0~15.0 µg/m³으로 추정되었다. 기간 평균적인 국외 기여도의 공간 분포는 국내 북서 지역에서 높고 동남 지역으로 갈수록 낮아졌다. 이러한 결과는 Bae *et al.* (2020b) 연구와 유사하다.

중국과 우리나라는 편서풍의 영향을 받으며, PM_{2.5} 농도가 증가하는 겨울철 동안 북서풍이 지배적이고, 남한의 북서 지역은 풍상지역과 지리적으로 인접한다(Bae *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2017). 보정 전 국외 기여율은 남한 평균 54%였으며, 경기 북부와 강원, 전남 지역에서는 60% 이상으로 높고, 수도권 55% 이하로 낮은 등, 17개 시도에서 41~71%로 분석되었다. 그림 4에서 국외 기여도를 살펴보면, PM_{2.5} 농도 및 국외 기여도와는 공간 분포에서 차이를 보인다. 이는 PM_{2.5} 농도가 높은 수도권 지역의 경우 국외 기여도가 높게 나타나는 동시에, 자체 기여도 또한 높아 상대적인 국외 기여율은 다른 지역에 비해 낮아진다.

풍상지역의 PM_{2.5} 모사 불확도를 감안하기 위해 2.3.2절의 방법론에 따라 국외 기여도를 보정하였다. 보정 후 국외 기여도는 남한 평균 10.1 µg/m³으로 보정 전에 비해 2.6 µg/m³ 낮아졌다(그림 4). 2020년 겨울철(2019년 12월~2020년 3월) 시행되었던 미세먼지 계절관리제에 의한 PM_{2.5} 농도 저감효과가 1.9 µg/m³임을 고려하면(KMOE, 2021), 보정에 따른 국외 기여도의 변화가 작지 않다. 국내 17개 시도별 PM_{2.5} 농도에 대한 보정 후 국외 기여도는 보정 전 대비 2.0~2.9 µg/m³ 감소하여 8.0~11.6 µg/m³으로 분석되었다. 또한, 보정 후 국외 기여율은 남한 평균 43%로 보정 전

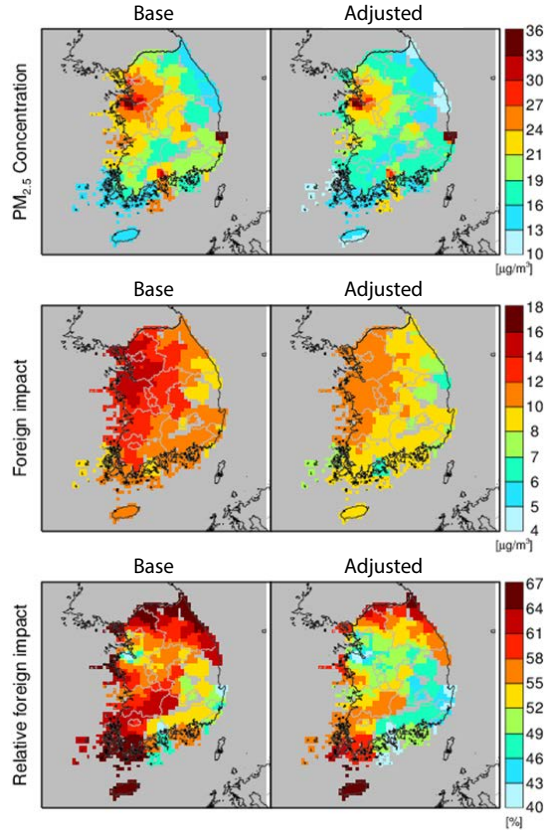


Fig. 4. Spatial plots of period mean PM_{2.5} concentrations, foreign impact, and relative foreign impact before and after adjustment during 2019. The simulation results by region were analyzed based on the locations of measurement sites, and there was no value in some prefectures of Gyeongbuk, Gyeongnam, Jeonnam, and Gangwon.

국외 기여율(54%)에 비해 11% 낮아졌다. 국내 시군구별 PM_{2.5} 농도에 대한 보정 후 국외 기여율은 18~67% 범위였으며, 강원과 전남 등에 위치한 일부 시군구를 제외하면 대부분 58% 이하로 나타났다.

국내에서 PM_{2.5} 농도는 국외 기여와 국내 기여에 의해 결정된다고 가정할 경우, 국내 기여율은 100-국외 기여율(%)로 계산할 수 있다. 이렇게 산정된 PM_{2.5} 국내 기여율은 국외 기여도 보정 전 46%에서 보정 후에는 57%로 증가한다. 이러한 결과는 풍상의 배출량이 현실화되어 모사에 이용되는 배출 목록보다 낮아질 경우, 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여율은 낮아

지고, 국내 기여율은 높아짐을 보여준다. 따라서, 국외 배출량 또는 기여도의 과대 평가는 국내 배출 영향을 과소 평가하는 요인이 될 수 있으며, 국내 대기질 개선 정책 이행 시, 개선이 가능한 PM_{2.5} 농도의 잠재적인 폭은 예상보다 더 클 수 있다.

3.3 시도별 PM_{2.5} 국외 기여도의 월 변화

2019년 국내 월평균 PM_{2.5} 농도에 대한 보정 전 국외 기여도는 3.9 (9월)~30.4 μg/m³ (3월)의 범위로, PM_{2.5} 관측 농도의 월간 변동과 유사하게 추운 계절 동안 높아지고, 더운 계절에는 낮아졌다(그림 5a). 이러한 계절적 변화 요인을 선행 연구를 통해 살펴보면, 겨울철 동안에는 기상과 배출 조건 변화로 인해 풍상 지역인 중국으로부터의 대기오염물질의 장거리 이동이 증가하고, 여름철에는 동남풍의 빈도가 잦아지고 장마를 비롯한 강수의 증가로 인해 국외 기여도가 낮아진다(Kumar *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2020a).

보정 후 국내 평균 국외 기여도는 2.7 (9월)~21.5 μg/m³ (3월) 사이에서 월별 변화를 보였다. 보정 후 국외 기여도를 시도별로 살펴보면, 3월에는 15.2~25.3 μg/m³으로 높았고, 9월에는 1.6~3.7 μg/m³ 범위로 상대적으로 낮게 분석되었다. PM_{2.5} 국외 기여도는 보정 전과 비교하여 보정 후에는 국내 평균 1.2 (11월)~9.0 μg/m³ (3월)의 월별 감소를 보였으며, 국외 기여도가 높은 추운 계절 동안 감소 폭이 증가하였다(그림 5b). 따라서, 국외 배출량의 과대 산정은 미세먼지 계절관리제 등이 시행되는 겨울철과 봄철 동안 국외 기여도를 다른 계절에 비해 더욱 과대 평가할 수 있다.

한편 국내 월평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여율은 보정 전 26~76%에서, 보정 후에는 20~69%로 3~11% 감소하였다. 현재 미세먼지 계절관리제가 시행되는 1~3월과 12월 동안 국외 기여율은 보정 전 66%로 높았으나, 보정 후에는 61%로 낮아졌다. 또한, 상대적으로 국외 기여도가 낮은 여름철 7~10월 동안 국외 기여율 보정 전 36%에서 보정 후 29%로 낮아졌다. 다만, 여기에서 유의할 점은 여름철 동안 보정 전후 국외 기여율 변화는 7%로 높으나, 해당 월 평균 국내 PM_{2.5}

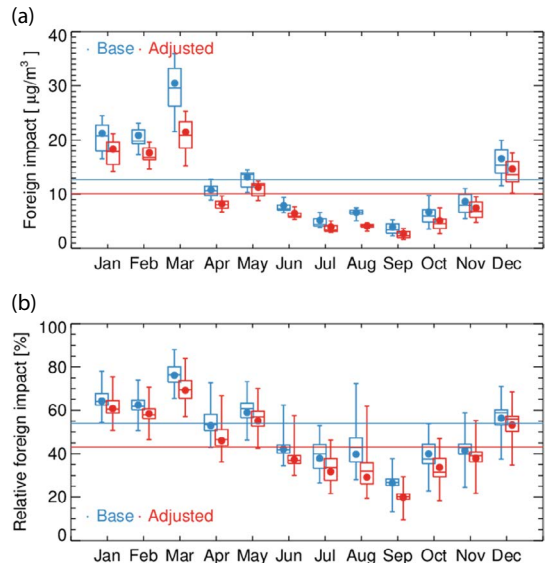


Fig. 5. Monthly relative foreign emissions impact on PM_{2.5} in 17 provinces of South Korea during 2019. The blue and red dots indicate average of foreign emissions impact over South Korea. The blue and red solid lines mean annual average foreign impact and relative impact.

모사 농도는 12.4~15.2 μg/m³으로 낮으며, 보정 전후의 국외 기여도 자체의 변화 폭은 2.5~1.2 μg/m³으로 겨울철 변화 폭이 1.9~9.0 μg/m³보다 작다.

2019년 월평균 시도별 PM_{2.5} 관측 농도는 18.7 (경남)~28.2 μg/m³ (충북) 사이로 나타났다. 시도별 월평균 PM_{2.5} 관측 농도는 12~3월 높고, 7~10월에 낮은 계절 변화를 보였다(그림 6a). 그림 6b의 시도별 월평균 국외 기여도의 경우 동일 월 내에서는 지역들 사이의 국외 기여도의 차이가 작은 반면 PM_{2.5} 관측 농도의 경우 지역 간 차이가 컸다. 예를 들어, 서로 인접해 있는 전남과 광주에서 3월 평균 국외 기여도는 각각 20.1, 20.9 μg/m³으로 분석되었다. 반면 3월 평균 PM_{2.5} 농도의 경우 전남과 광주에서 각각 30.0, 40.7 μg/m³으로 관측되며 10.7 μg/m³의 차이를 보였다. 이는 광주는 대도시 지역인데 반해, 전남은 산간과 도서 지역 등을 포함하여 PM_{2.5} 관련 배출 밀도가 차이를 보이기 때문으로 판단된다. 이처럼 국외 기여도와 달리 PM_{2.5} 관측 농도의 공간적 편차가 크게 나타나는

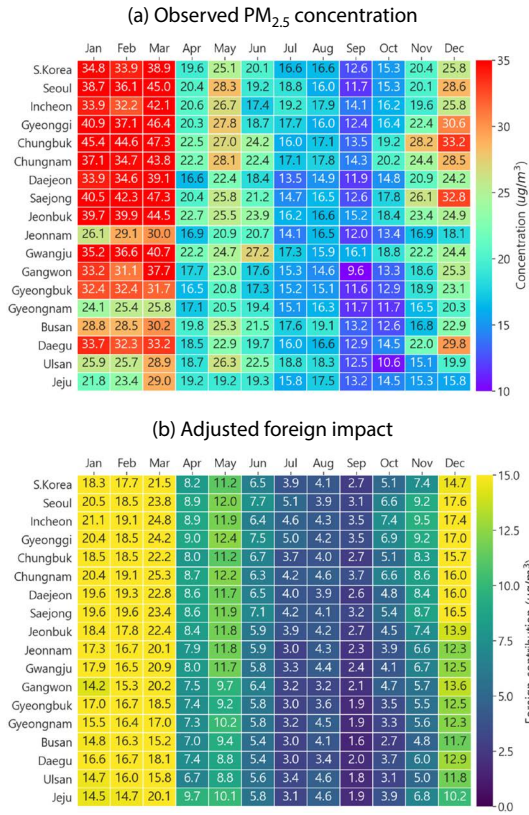


Fig. 6. Annual mean (a) PM_{2.5} concentrations and (b) adjusted foreign impact on PM_{2.5} concentration in 17 provinces of South Korea during study period, 2019.

점은 국내 배출에 의한 기여도의 지역별 차이가 반영된 결과로 보인다. 이로 미루어 보아 향후 지역별로 정확한 국내 배출량을 추정하고 이를 바탕으로 기여도를 평가할 필요가 있다.

3.4 PM_{2.5} 관련 국내 배출량의 불확도 추정

모사된 보정 후 국외 기여도가 실제 국외 기여도를 반영한다고 가정하면, 국내에서 보정 후 PM_{2.5} 모사 농도와 관측 농도의 차이(이하 '모사 편차')는 대기질 모사에 이용된 국내 배출량의 불확도에서 기인한 것으로 볼 수 있다. 본 절에서는 이러한 접근을 통해 기본 모사에 이용된 CAPSS 배출 목록의 불확도를 간접적으로 추정하였다.

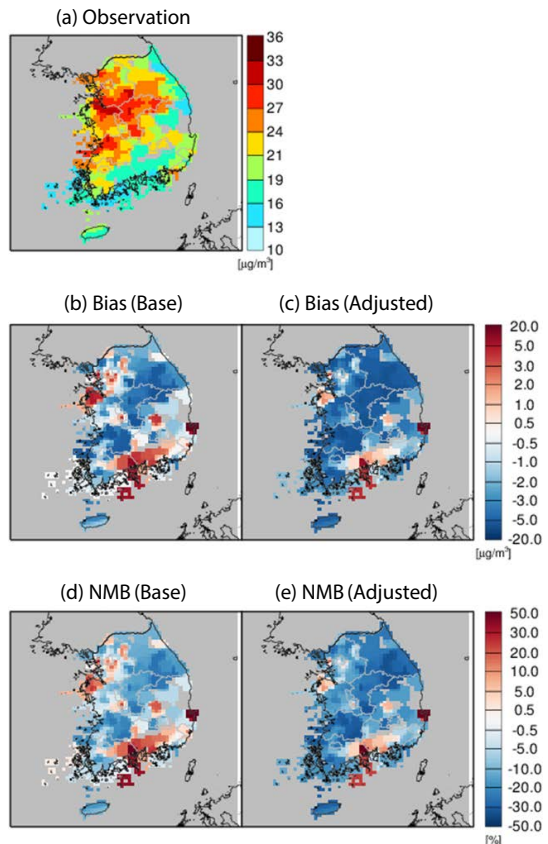


Fig. 7. Spatial plots of observed PM_{2.5} concentration, simulated biases and normalized mean biases (NMB) of before and after adjustment in 2019.

2019년 대상 기간 평균 국외 기여도를 보정하기 전 PM_{2.5} 모사 편차는 시군구에 따라 -27~134% (-7.8~26.6 µg/m³) 수준이며 과대 및 과소 모사가 복합적으로 나타났다(그림 7). 국외 기여도 보정 후 PM_{2.5} 모사 편차는 -36~123% (-10.5~24.5 µg/m³)로 감소하였으며, PM_{2.5} 농도가 그림 4에서 높게 나타났던 당진, 포항, 여수 등 일부지역을 제외하고는 과소 모사되었다. 대상 기간 국내 평균 국외 기여도 보정 후 PM_{2.5} 모사 편차는 -2.5 µg/m³으로 나타났다(그림 8). 이러한 결과는 기본 모사에 이용된 배출 목록에서의 NO_x, SO₂, 1차 PM_{2.5} 등 PM_{2.5} 관련 국내 배출량이 과소 산정된 상황이며, 이를 보완한 경우 국내 PM_{2.5} 기여도는 2.5

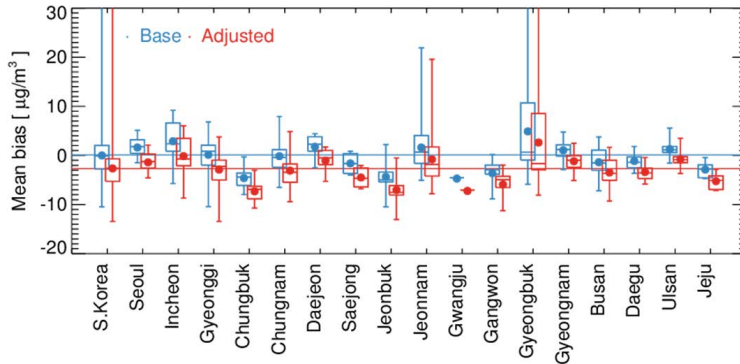


Fig. 8. Whisker plot of mean bias of each air quality measurements site in 17 provinces in South Korea during 2019. The whiskers indicate maximum and minimum values. The blue and red solid lines mean annual average biases of before and after adjustments.

µg/m³ 증가할 가능성을 보여준다. 본 연구에서는 CAPSS 2017 배출 목록을 이용한 2019년 국내 PM_{2.5} 모사 평가를 수행하였으며, 이는 비교 대상 연도에 따라 차이를 보일 수 있다. 또한, 본 연구에서 제한한 접근 방법 이외에 다양한 연구를 통해 국내 배출량에 대한 추가적인 검토가 필요하다. 다만 최근 국가미세먼지정보센터(www.air.go.kr)를 통해 배포된 CAPSS 2019년 자료는 본 연구에서 이용된 CAPSS 2017에 비해 PM_{2.5}, NO_x, SO₂ 배출량이 각각 4%, 9%, 14% 낮아졌다. 이를 감안하면, CAPSS 2019를 이용한 대기질 모사의 PM_{2.5} 관측 농도와 차이가 본 연구에서 추정된 2.5 µg/m³보다 증대될 것으로 예상된다.

국외 기여도 보정 전후의 PM_{2.5} 모사 편차를 국내 주요 지역에 대해 살펴보면, 서울에서는 모사 편차가 13% (3.3 µg/m³)에서 1% (0.3 µg/m³) 이내로 개선되었으며, PM_{2.5} 농도가 높게 모사되었던 당진의 경우 모사 편차는 보정 전 14% (4.5 µg/m³)에서 보정 후 5% (1.4 µg/m³)로 감소하였다. 다만, 포항과 여수, 광양에서는 보정 후 PM_{2.5} 모사 농도가 여전히 관측 농도에 비해 각각 123%, 61%, 24% 과대 평가하였다. 경북의 경우, 보정 후 PM_{2.5} 모사 편차가 평균 4.0 µg/m³으로 분석되었으나, 지역 내 측정소에 따라 -8.0~38.1 µg/m³으로 나타났다. 이러한 지역 간 혹은 지역 내 측정소 간 모사 편차는 다양한 원인에서 비롯될 수 있으

나, 비민수용무연탄 연소시설과 같은 특정 오염원에 대한 먼 형태 배출량의 과대 산정 등이 원인이 될 수 있다(Ju *et al.*, 2019).

4. 결 론

상향식 배출 목록을 기반으로 수행된 2019년 대기질 모사에서 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 기간 평균 국외 기여도는 12.7 µg/m³ (54%)으로 추정되었다. 다만, 해당 모사에서 풍상의 중국 PM_{2.5} 농도를 24%가량 과대 모사하였다. 이러한 점을 국외 기여도 산정 시 감안해 주기 위한 노력의 일환으로 국외 PM_{2.5} 농도를 기반으로 보정한 결과, 국외 기여도는 10.1 µg/m³ (43%)으로 감소하였다. 또한, 국외 기여율 감소에 따라 국내 PM_{2.5} 기여율은 보정 전 46%에서 보정 후 57%로 증가하였다. 국외 기여도 보정 전에는 국내 PM_{2.5} 관측 및 모사 농도 차이가 0.1 µg/m³이었으나, 국외 기여도 보정 후에 국내 PM_{2.5} 농도를 2.5 µg/m³ 과소 모사하였다.

이러한 결과에서 다음과 같은 시사점을 유추할 수 있다. 첫째, 국내 배출량에 대한 불확도를 검토하기 이전에 국외 기여도 또는 국외 유입 영향의 현실화가 선행되어야 한다. 최근 급변하는 국외 배출량을 반영

하는 노력과 함께, 풍상 및 이동 과정 중에 대한 대기 질 관측과 모사를 통한 이해 과정의 증진이 필요해 보인다. 두 번째, 국외 기여도의 과대 평가는 국내 배출 기여도의 과소 평가로 이어질 수 있다. 대기질 모사 결과는 통상 국내 관측 농도와 비교를 통해 재현성이 평가된다. 국내 기여도가 과소 평가되더라도 국외 기여도가 과대 평가되는 경우, 모사 농도는 관측 농도와 유사한 수준일 수 있으나 국내 대기질 현상에 대한 올바른 이해와는 거리가 있다. 세 번째, 장거리 이동이 적지 않은 국내 상황에서는 배출 - 농도 관계를 해석할 때에 풍상 지역 또는 유입 지점에서의 농도와 연관 지은 분석이 필요하다. 특히, PM_{2.5}가 2차 대기오염물질인 점을 감안하면 국내 한 지역에 대한 농도를 해당 지역의 기상 및 배출 특성과 외부 영향을 함께 고려하는 것이 중요해 보인다. 마지막으로 현재 국가 배출량은 일부 지역을 제외하면, 대기질 모사를 통한 PM_{2.5} 농도 해석 시 과소 산정된 것으로 보인다. 국내 평균적으로 2.5 µg/m³가량 과소 평가되며, 지역별 편차 역시 관찰된다. 향후 국내 대기질 관리가 대기환경권역 중심으로 진행되는 점을 고려하면, 세부 지역별 배출량 산정 시 현재 미산정되는 배출량의 추가 및 배출계수 등의 검토가 요구된다.

본 연구에서는 민감도 모사를 이용하여 국외 배출 영향을 산정하였으나, 이는 기여도 산정 방법(tagging method, 배출 지역 및 삭감률 등)에 따라 상이할 수 있다. 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여도를 중국 전역의 농도를 기반으로 보정하였으나, 중국 내 지역별 모사 불확도와 북한 등 지역에 대한 불확도는 상세히 검토되지 못하였다. 향후 더 많은 풍상지역에 대한 관측 농도가 확보된다면 국외 기여도를 더욱 정밀하게 보정할 수 있을 것이다. 마지막으로, 최근의 국외 배출 현황을 반영할 수 있는 하향식 배출량을 이용한 대기질 모사와 상향식 배출량 작성 시 반응을 통해 현실적인 국외 기여도 추정이 필요하다. 특히, PM_{2.5} 중량 농도뿐 아니라, 성분별 농도 그리고 SO₂, NO₂와 같은 가스상 대기오염물질에 대한 검토 역시 중요해 보인다.

감사의 글

본 연구는 삼성전자 종합 기술원과 환경부 연구용 역사업(미세먼지-건강영향 평가를 위한 모델링 기반 노출특성 평가연구)의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, C., Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.-H., Moon, K.-J., Shin, H.-J., Song, I.H., Kim, S. (2017) Impact of Emission Inventory Choices on PM₁₀ Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33, 497-514. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.497>
- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2020a) Long-range transport influence on key chemical components of PM_{2.5} in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the years 2012-2016, *Atmosphere*, 11, 48. <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020b) A Multiscale Tiered Approach to Quantify Contributions: A Case Study of PM_{2.5} in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11, 141. <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020c) Surface ozone response to satellite-constrained NO_x emission adjustments and its implications, *Environmental Pollution*, 258, 113469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113469>
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, Y., Woo, J.-H., Kim, S. (2020d) Updating Chinese SO₂ emissions with surface observations for regional air-quality modeling over East Asia, *Atmospheric Environment*, 228, 117416. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117416>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.H., Kim, S. (2022) An observation-based adjustment method of regional contribution estimation from upwind emissions to downwind PM_{2.5} concentrations, *Environment International*, 163, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107214>
- Barkley, M.P., Smedt, I.D., Van Roozendaal, M., Kurosu, T.P., Chance, K., Arneeth, A., Hagberg, D., Guenther, A., Paulot, F., Marais, E., Mao, J. (2013) Top-down isoprene emissions over tropical South America inferred from SCIAMACHY and OMI formaldehyde columns: AMA-

- ZON ISOPRENE EMISSIONS, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 118, 6849-6868. <https://doi.org/10.1002/jgrd.50552>
- 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.
- 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, 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Clappier, A., Belis, C.A., Pernigotti, D., Thunis, P. (2017) Source apportionment and sensitivity analysis: two methodologies with two different purposes, *Geoscientific Model Development*, 10, 4245-4256.
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of Air & Waste Management Association*, 67, 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- 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. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4327-2007>
- Han, S., Lee, J.Y., Lee, J., Heo, J., Jung, C.H., Kim, E.-S., Kim, Y.P. (2018) Estimation of the Source Contributions for Carbonaceous Aerosols at a Background Site in Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 12, 15.
- Huang, L., Zhu, Y., Zhai, H., Xue, S., Zhu, T., Shao, Y., Liu, Z., Emery, C., Yarwood, G., Wang, Y., Fu, J., Zhang, K., Li, L. (2021) Recommendations on benchmarks for numerical air quality model applications in China - Part 1: PM_{2.5} and chemical species, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 2725-2743. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2725-2021>
- 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, 593-608. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.593>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021a) Direct and cross impacts of upwind emission control on downwind PM_{2.5} under various NH₃ conditions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 268, 115794. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115794>
- Kim, H.C., Kim, S., Cohen, M., Bae, C., Lee, D., Saylor, R., Bae, M., Kim, E., Kim, B.-U., Yoon, J.-H., Stein, A. (2021b) Quantitative assessment of changes in surface particulate matter concentrations and precursor emissions over China during the COVID-19 pandemic and their implications for Chinese economic activity, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21, 10065-10080. <https://doi.org/10.5194/acp-21-10065-2021>
- Kim, H.C., Bae, C., Bae, M., Kim, O., Kim, B.-U., Yoo, C., Park, J., Choi, J., Lee, J., Lefer, B., Stein, A., Kim, S. (2020) Space-Borne Monitoring of NO_x Emissions from Cement Kilns in South Korea, *Atmosphere*, 11, 881. <https://doi.org/10.3390/atmos11080881>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10315-10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22, 535-553.
- Koo, Y.-S., Kim, S.-T., Yun, H.-Y., Han, J.-S., Lee, J.-Y., Kim, K.-H., Jeon, E.-C. (2008) The simulation of aerosol transport over East Asia region, *Atmospheric Research*, 90, 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.03.014>
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2021) <http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=title&searchValue=%EA%B3%84%EC%A0%88%EA%B4%80%EB%A6%AC&menuId=10525&orgCd=&boardId=1454600&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=> (accessed 4.5.22).
- Kumar, N., Park, R.J., Jeong, J.I., Woo, J.-H., Kim, Y., Johnson, J., Yarwood, G., Kang, S., Chun, S., Knipping, E. (2021) Contributions of International Sources to PM_{2.5} in South Korea, *Atmospheric Environment*, 261, 118542. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118542>
- Lee, D., Choi, J.Y., Myoung, J., Kim, O., Park, J., Shin, H.J., Ban, S.-J., Park, H.-J., Nam, K.P. (2019) Analysis of a Severe PM_{2.5} Episode in the Seoul Metropolitan Area in South Korea from 27 February to 7 March 2019: Focused on Estimation of Domestic and Foreign Contribution, *Atmosphere*, 10, 756. <https://doi.org/10.3390/atmos10120756>
- LTP (2019) Summary report of the 4th stage (2013-2017) LTP project (Joint Research Project for Long-range Transboundary Air Pollutants in Northeast Asia, Issue.

- Mijling, B., van der A, R.J. (2012) Using daily satellite observations to estimate emissions of short-lived air pollutants on a mesoscopic scale, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 117. <https://doi.org/10.1029/2012JD017817>
- NCEP (2000) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>
- NIER (National Institute of Environmental Research), (National Air Emission Inventory and Research Center) (2021) ANNUAL REPORT OF AIR QUALITY IN KOREA 2020.
- Park, R.J., Oak, Y.J., Emmons, L.K., Kim, C.-H., Pfister, G.G., Carmichael, G.R., Saide, P.E., Cho, S.-Y., Kim, S., Woo, J.-H., Crawford, J.H., Gaubert, B., Lee, H.-J., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Gao, M., Tang, B., Stanier, C.O., Shin, S.S., Park, H.Y., Bae, C., Kim, E. (2021) Multi-model intercomparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9, 00139. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00139>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A description of the Advanced Research WRF Version 3.
- Wang, Y., Wang, J., Xu, X., Henze, D.K., Wang, Y., Qu, Z. (2016) A new approach for monthly updates of anthropogenic sulfur dioxide emissions from space: Application to China and implications for air quality forecasts: Top-Down Monthly SO₂ Emission Estimate, *Geophysical Research Letters*, 43, 9931-9938. <https://doi.org/10.1002/2016GL070204>
- You, S., Kang, Y.-H., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021) The role of a distant typhoon in extending a high PM_{2.5} episode over Northeast Asia, *Atmospheric Environment*, 257, 118480. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118480>
- Yu, Z., Jang, M., Kim, S., Bae, C., Koo, B., Beardsley, R., Park, J., Chang, L.S., Lee, H.C., Lim, Y.-K., Cho, J.H. (2020) Simulating the Impact of Long-Range-Transported Asian Mineral Dust on the Formation of Sulfate and Nitrate during the KORUS-AQ Campaign, *ACS Earth and Space Chemistry*, 4, 1039-1049. <https://doi.org/10.1021/acsearthspacechem.0c00074>
- Zhang, Q., Zheng, Y., Tong, D., Shao, M., Wang, S., Zhang, Y., Xu, X., Wang, J., He, H., Liu, W., Ding, Y., Lei, Y., Li, J., Wang, Z., Zhang, X., Wang, Y., Cheng, J., Liu, Y., Shi, Q., Yan, L., Geng, G., Hong, C., Li, M., Liu, F., Zheng, B., Cao, J., Ding, A., Gao, J., Fu, Q., Huo, J., Liu, B., Liu, Z., Yang, F., He, K., Hao, J. (2019) Drivers of improved PM_{2.5} air quality in China from 2013 to 2017, *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, 116, 24463-24469. <https://doi.org/10.1073/pnas.1907956116>
- Zheng, B., Tong, D., Li, M., Liu, F., Hong, C., Geng, G., Li, H., Li, X., Peng, L., Qi, J., Yan, L., Zhang, Y., Zhao, H., Zheng, Y., He, K., Zhang, Q. (2018) Trends in China's anthropogenic emissions since 2010 as the consequence of clean air actions, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18, 14095.

Authors Information

배민아(아주대학교 환경연구소 연구원) (bma829@ajou.ac.kr)
 김순태(아주대학교 환경안전공학과 교수)
 (soontaekim@ajou.ac.kr)