

논문

# 미세먼지 계절관리제: (II) PM<sub>2.5</sub> 농도 얼마나 낮출 수 있는가? Seasonal PM Management: (II) How Low PM<sub>2.5</sub> Concentration in South Korea can be Achieved?

배민아, 우정현<sup>1)</sup>, 김순태<sup>2)</sup>,\*

아주대학교 환경연구소, <sup>1)</sup>건국대학교 기술융합공학과, <sup>2)</sup>아주대학교 환경안전공학과

Minah Bae, Jung-Hun Woo<sup>1)</sup>, Soontae Kim<sup>2)</sup>,\*

Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

<sup>1)</sup>Department of Technology Fusion Engineering, Konkuk University, Seoul, Republic of Korea

<sup>2)</sup>Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

접수일 2022년 11월 23일  
수정일 2023년 1월 10일  
채택일 2023년 1월 11일

Received 23 November 2022  
Revised 10 January 2023  
Accepted 11 January 2023

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

**Abstract** We quantitatively estimated PM<sub>2.5</sub> (Particulate Matter of 2.5 μm or less in diameter) reduction potential of domestic emissions in South Korea during the 2<sup>nd</sup> Seasonal PM Management (SPM; December 2020–March 2021). A set of three-dimensional air quality model simulations utilizing Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) based on the Clean Air Policy Support System 2018 and Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality version 1 emissions inventories (EIs) were applied. Foreign or domestic emissions were reduced by 50% or 100% in turn to estimate the emission impacts in different simulations and/or adjusting approaches. Depending on choice on the perturbation rate and emission source area, EI-based domestic emission impacts ranged from 10.6 to 13.5 μg/m<sup>3</sup> (42–54%) for the study period. The domestic emission impact estimated from a 100% reduction of national emissions was 2.9 μg/m<sup>3</sup> higher than that from a 50% reduction. It implies that appreciable non-linear relationship exists between domestic emissions and the PM<sub>2.5</sub> concentrations. Meanwhile, the EI-based PM<sub>2.5</sub> simulations were underestimated by 7% in China and overestimated by 4% in South Korea, respectively. Considering the simulation uncertainty, domestic and foreign impacts were adjusted based on the PM<sub>2.5</sub> observations. After the adjustment, the domestic impacts were assessed to 8.6–13.0 μg/m<sup>3</sup> that can be interpreted as the maximum domestic PM<sub>2.5</sub> reduction potential. When a 100% reduction of domestic emissions was assumed, the national PM<sub>2.5</sub> concentration during the SPM barely satisfied the annual average air quality standard level (15 μg/m<sup>3</sup>). On the other hand, it was predicted that simultaneously reductions of domestic and foreign emissions by 50% lowered the PM<sub>2.5</sub> concentration in South Korea during the SPM to 13.0 μg/m<sup>3</sup>. Considering that it is realistically impossible to reduce total domestic emissions (i.e., 100%), international cooperation among neighboring countries is imperative to achieve the target PM<sub>2.5</sub> concentration in South Korea.

**Key words:** Seasonal PM Management, PM<sub>2.5</sub>, Local emission impact, Long-range transport, Emission reduction potential

## 1. 서 론

우리나라의 2020년 연평균 초미세먼지 (PM<sub>2.5</sub>) 관측 농도는 19 μg/m<sup>3</sup>으로 2018년의 23 μg/m<sup>3</sup>에 비해 감소하였으나, 여전히 연평균 대기환경기준 (15 μg/m<sup>3</sup>)을 초과한다. 특히 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높아지는 겨울철 동안에는 일평균 대기환경기준 (35 μg/m<sup>3</sup>)의

초과 횟수가 빈번해진다. 겨울철 고농도 PM<sub>2.5</sub>를 관리하기 위해 환경부에서는 2019년 12년부터 이듬해 3월까지 1차 미세먼지 계절관리제 (이하 ‘계절관리제’)를 시행하였다 (KMOE, 2022a, 2021, 2020). 이후 두 번의 겨울철 동안 2차와 3차 계절관리제가 이어졌으며, 석탄발전 가동 중단과 5등급 차 운행 제한 등 산업과 민간의 다양한 배출 부문에서 배출되는 대기

오염물질을 집중적으로 관리하였다.

이러한 배출관리는 대기오염물질의 배출을 감소시켜 PM<sub>2.5</sub> 등 대기질 개선을 도모한다. 다만 현재의 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도와 2027년까지 정부에서 발표한 목표 농도, 그리고 WHO의 PM<sub>2.5</sub> 농도 권고치 등을 고려하면 배출량 저감 노력은 앞으로도 부단히 필요하다(Kang and Kim, 2022a, b). 이러한 현 시점에서 국내 배출량 저감이 얼마나 PM<sub>2.5</sub> 농도를 줄일 수 있는지 파악하는 것은 중요하다. 예를 들어, Clappier *et al.* (2017a)는 배출 저감에 따라 대기오염물질의 농도 개선이 가능한 최대 폭(potential)과 정책 적용에 따른 현실적인 농도 개선 폭(potency)을 구분하여 제시하였다. 국내 연구에서도 이와 관련하여 대기환경용량을 추정한 연구가 수행되었으며(Park *et al.*, 2008; Moon *et al.*, 2004), 통합환경관리제도 역시 이와 유사한 개념에서 접근하고 있다.

하지만, 국내 대기질은 자체 배출뿐만 아니라 중국 등 국외 유입 영향이 높으며 계절관리제가 시행되는 겨울철에는 국외 유입 영향이 최대 80%까지 높아지는 것으로 보고되고 있다(Bae *et al.*, 2020a; Lee *et al.*, 2019; Koo *et al.*, 2008). 따라서 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국내 및 국외 배출 영향 분석은 국내 배출량 저감이 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선에 얼마나 효과적인지를 판단할 수 있는 중요한 근거가 되나, 계절관리제 기간을 포함하여 최근 연도에 대해 수행된 관련 연구는 부족하다. 특히, 국외로부터 유입되는 PM<sub>2.5</sub> 기여도는 국내 대책의 효과 분석 외에도 배출량 관리 우선 순위 선정, 그리고 국제 협력을 위한 기초 자료가 된다.

본 연구에서는 2차 계절관리제 기간 동안 대기질 모사를 바탕으로 국내외 배출량에 의한 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 영향을 분석하고, 이를 통해 국내 자체적인 배출관리에 의해 개선될 수 있는 우리나라의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 정량적으로 추정하였다. 이렇게 도출된 국내 배출영향은 향후 국내에서 배출량 저감에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선 정도와 목표하는 PM<sub>2.5</sub> 농도를 달성하기 위한 배출량 삭감 시나리오 작성 시 활용될 수 있다.

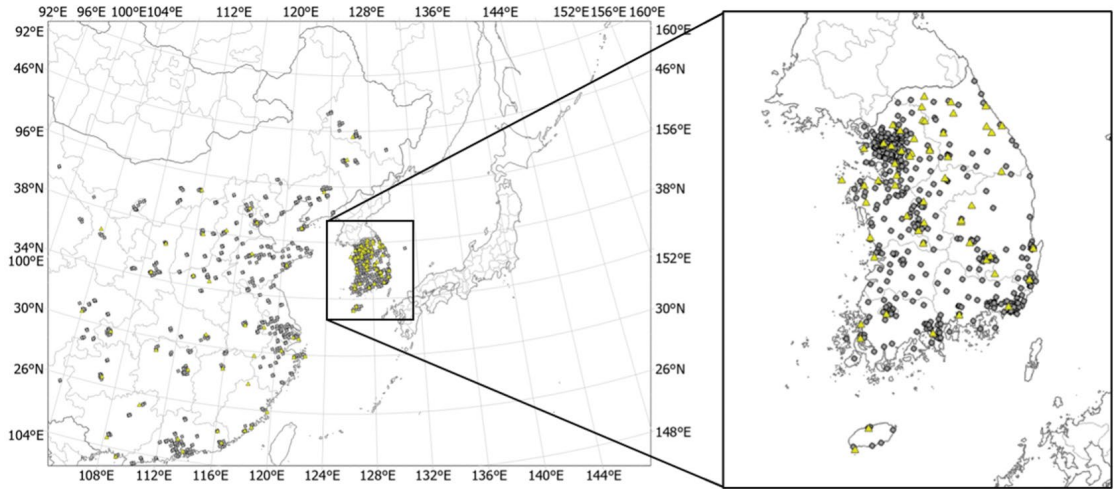
## 2. 연구 방법

### 2.1 대기질 모사

본 연구는 2차 계절관리제 기간인 2020년 12월 1일부터 2021년 3월 31일을 분석기간으로 설정하였다. 대기질 모델의 spin-up을 위해 2020년 11월 16일부터 모사를 수행하였다. 대기질 모사영역은 그림 1의 27 km 수평해상도의 동북아 지역과 9 km 수평해상도의 남한과 북한 일부를 포함한다. 대기질 모델은 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ; Byun and Schere, 2006) version 5.3.1을 이용하였다. 기상 입력 자료는 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.9.1을 수행하여 준비하였으며, WRF 모사 시 초기장과 경계장은 6시간 간격의 1-degree 자료인 NCEP의 Final (FNL; NCEP, 2000) 자료를 이용하였다. WRF 모사 결과는 Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP) version 4.3으로 처리하여 CMAQ의 입력자료 형태로 변환되었다. 인위적 및 자연 배출량은 각각 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE; Benje *et al.*, 2001) v3.1과 Model of Emission of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN; Guenther, 2006) 2.04를 통해 준비하였다. 인위적 배출량목록은 국내 지역에 대해 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2018 (NAIR, 2021)을 사용하고, 국외 지역에 대해 Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality (SIJAQ) v1을 이용하였다. 본 연구에 이용된 배출목록의 배출량 정보를 타 배출목록과 비교하여 표 S1에 제시하였다. WRF와 CMAQ 모사에 이용된 세부 옵션은 동반 논문인 Kang and Kim (2022a)를 참조할 수 있다.

### 2.2 배출목록 기반 국내 및 국외 배출영향 추정

국내 및 국외 배출량이 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향을 분석하기 위해 대기질 모사 결과를 바탕으로 배출량 변화에 따른 농도 변화의 민감도를 우선 계산하였다(Clappier *et al.*, 2017b). 산정된 민감도를 이용하면, 대상 오염원이 존재하지 않는 경우를 가정한



**Fig. 1.** Modeling domains for 27-km and 9-km resolutions used in this study. Black dots and yellow triangles indicate the locations of air quality and meteorology measurement stations.

배출영향 (Zero-out Contribution; ZOC)을 식 (1)과 같이 추정할 수 있다 (Bae *et al.*, 2022a, b; Kim *et al.*, 2017).

$$\text{ZOC} = (C_{\text{Base}} - C_{\Delta E}) \times \frac{100\%}{\Delta E} \quad (1)$$

식 (1)에서  $C_{\text{Base}}$ 와  $C_{\Delta E}$ 는 각각 기본모사 농도와 배출량을  $\Delta E$  (%) 삭감한 민감도 모사 농도이다. 본 연구에서는 국내 및 국외 배출량이 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향 (이하, ‘국내 배출영향’, ‘국외 배출영향’)을 추정하였다. 배출영향 또는 기여도는 표식 방법 (i.e. Source apportionment; SA)을 통해 산정될 수 있으나, 표식 방법의 경우 현재 배출 조건에서 오염원의 배출량 100% 삭감에 따른 대기질 변화만을 고려하고, NO 적정과 같은 배출과 농도의 음의 상관관계를 고려하지 못하므로 본 연구에 적용하지 않았다 (Liu *et al.*, 2021; Thunis *et al.*, 2019).

배출량과 PM<sub>2.5</sub> 농도 관계의 비선형성은 배출량 민감도 분석 시 불확도로 작용할 수 있다 (Kim *et al.*, 2017a; Dennis *et al.*, 2008; Pun *et al.*, 2008; Ansari and Pandis, 1998). Nam *et al.* (2019)은 2017년 1월 수도권

PM<sub>2.5</sub> 고농도 사례 동안 국내 배출량을 20~100% 사이에서 20%씩 차등을 주어 분석한 국내 배출영향이 32~42%로 다를 수 있음을 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 배출영향 분석 시  $\Delta E$ 를 50%와 100%로 설정하고, 국내외 배출 변화와 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화의 비선형성에 의한 배출영향의 차이를 함께 검토하였다. 본 연구에 이용된 기본모사 (Base)와 민감도 모사 (Case 1~4)를 표 1에 정리하였다. Case 1과 2는 각각 국외 모든 물질의 배출량을 50%, 100% 삭감한 모사이며, Case 3과 4는 국내 모든 물질의 배출량을 50%, 100% 삭감하여 수행한 모사이다.

국외 배출량의 삭감한 Case 1~2 모사의 경우 국외 배출영향을 우선 산정하고, 국내 배출영향은 PM<sub>2.5</sub> 기본 모사 (Base) 농도에서 국외 배출영향을 제외하여 계산하였다. 국내 배출량을 삭감한 Case 3~4에 대해서는 우선 국내 배출영향을 산정한 다음, 기본 모사의 PM<sub>2.5</sub> 농도와 국내 배출영향의 차이를 국외 배출영향으로 간주하였다. 이를 위해 한 모사에서 국내 및 국외 배출영향의 합은 PM<sub>2.5</sub> 농도와 같은 것으로 가정하였다. 각 경우의 국내 및 국외 배출영향은 배출-농도 간의 민감도를 감안하기 위하여 국외 (F) 및

**Table 1.** Summaries of (a) base and sensitivity simulations, and (b) foreign and domestic emission impact calculations adopted in this study.

(a) Base and sensitivity simulations		
Case	Emission perturbation area	Emission reduction rate
Base	-	-
Case 1	Foreign	50%
Case 2	Foreign	100%
Case 3	Domestic	50%
Case 4	Domestic	100%
Case 5	Foreign & Domestic	50%
Case 6	Foreign & Domestic	100%

(b) Emission impact calculations		
Name	Foreign	Domestic
F50	(Base-Case 1)×2	Base-(Base-Case 1)×2
F100	Base-Case 2	Case 2 (= Base-(Base-Case 2))
D50	Base-(Base-Case 3)×2	(Base-Case 3)×2
D100	Case 4 (= Base-(Base-Case 4))	Base-Case 4

국내(D) 배출량에 대해 각각 50%, 100% 삭감 모사를 수정하였으며, F50, F100, D50, D100로 명명하였다. 추가적으로 국내외 배출량의 동시 삭감 효과를 살펴 보기 위하여 국내외의 모든 물질 배출량을 동시에 50%, 100% 삭감한 모사(Case 5와 6)를 수행하고, 그 결과를 3.5절에서 논의하였다. 본 연구에서는 각 모사의 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화와 배출영향을 분석할 때 관측지점 기반의 모사격자(monitor location-based)의 농도를 산술 평균하여 이용하였다(Bae *et al.*, 2020b).

### 2.3 국내 및 국외 배출영향 보정

대기질 모사 농도는 모델에 입력되는 기상 및 배출량 등 자료의 재현성과 질(quality), 그리고 모수화 과정, 모사영역 등 모델 자체의 불확도에 의해 관측 농도와 차이를 보일 수 있다(Huang *et al.*, 2021; Park *et al.*, 2021; Chatani *et al.*, 2018; Koo *et al.*, 2012). 선행 연구(Bae *et al.*, 2022a, 2017; Itahashi *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2018; US EPA, 2007)에서는 모사 결과를 해석함에 있어서 모사 불확도를 감안하기 위해 다음의 방법들이 적용되었다. 예를 들어 미 환경청의 경우 관측 농도와 모사 농도의 비(Relative Response

Factor; RRF)를 농도 변화 예측에 이용하였으며(US EPA, 2007), Bae *et al.* (2017)과 Bae *et al.* (2022a)은 국외 유입 또는 국내 배출의 PM<sub>2.5</sub> 영향 분석 시 모사 불확도를 감안하기 위해 배출 지역에서의 관측과 모사 농도의 비(Contribution Correction Factor; CCF)를 이용하였다. 본 연구에서는 배출목록 기반으로 산정된 배출영향 외에도 선행연구에서 제안한 RRF와 CCF 두 가지 방법을 적용하여 보정된 배출영향을 추가적으로 산정하였다(그림 2).

RRF 방법에서는 국내 PM<sub>2.5</sub> 관측농도를 이용하여 식(2)와 같이 배출영향을 보정하였다. 배출목록을 기반으로 산정된 국내 혹은 국외 배출영향(Emission impact<sub>El-based</sub><sup>Foreign or domestic</sup>)에 국내 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도(PM<sub>2.5</sub><sup>OBS,KR</sup>)와 모사 농도(PM<sub>2.5</sub><sup>MOD, KR</sup>)의 비를 곱하였다.

$$\begin{aligned} \text{Emission impact}_{\text{Adjusted}}^{\text{Foreign or domestic}} \\ = \text{Emission impact}_{\text{El-based}}^{\text{Foreign or domestic}} \times \frac{\text{PM}_{2.5}^{\text{OBS,KR}}}{\text{PM}_{2.5}^{\text{MOD,KR}}} \end{aligned} \quad (2)$$

이는 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도에 대한 대기질 모사의 과대 또

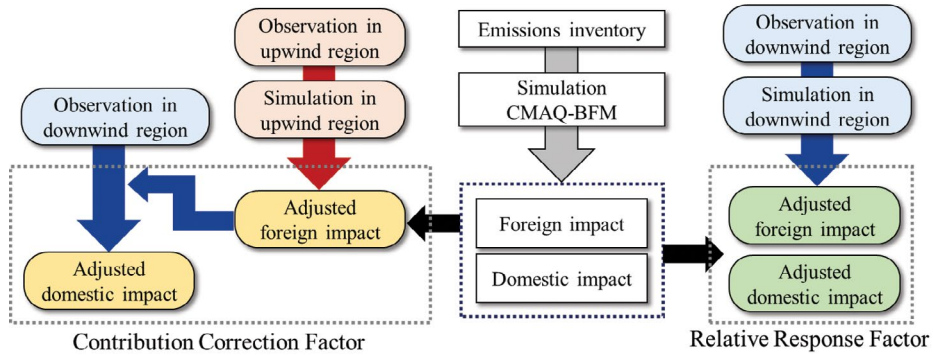


Fig. 2. Schematic diagram of estimation and adjustment of foreign and domestic emission impacts.

는 과소 예측을 보완하기 위한 것으로, 앞서 언급한 바와 같이 US EPA (2007)에서 이용되는 방법이다. 미국과 같이 대기오염물질의 농도가 하나의 대기권역 (airshed)을 중심으로 형성되는 경우 RRF의 적용이 용이하나, 국내와 같이 국가 간, 지역 간 장거리 이동 영향이 중요한 경우 (Son *et al.*, 2022; Kang *et al.*, 2021; Kumar *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2020b), 국내는 물론 국외 배출영향이 같은 비율로 수정된다는 점을 염두에 두어야 한다. 또한, PM<sub>2.5</sub> 성분별 보정이 바람직하나, 본 연구에서는 중량 농도를 우선적으로 이용하였다.

CCF 접근에서는 Bae *et al.* (2022a)의 방법을 참고하여 식 (3)과 같이 풍상지역의 관측과 모사 농도로 국외 배출영향을 보정한 후 순차적으로 국내 배출영향을 식 (4)와 같이 보정하였다. 식 (3)에서 PM<sub>2.5</sub><sup>OBS,CN</sup>와 PM<sub>2.5</sub><sup>MOD,CN</sup>는 중국의 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도와 모사 농도를 의미한다. 국외 배출영향은 중국 이외에도 북한 등 다른 지역으로부터 유입될 수 있으나, 이용 가능한 관측자료와 배출량, 그리고 중위도 편서풍 지역 등을 감안하여 중국으로 한정하였다.

$$\text{Emission impact}_{\text{Adjusted}}^{\text{Foreign}} = \text{Emission impact}_{\text{EI-based}}^{\text{Foreign}} \times \frac{\text{PM}_{2.5}^{\text{OBS,CN}}}{\text{PM}_{2.5}^{\text{MOD,CN}}} \quad (3)$$

$$\text{Emission impact}_{\text{Adjusted}}^{\text{Domestic}} = \text{PM}_{2.5}^{\text{OBS,KR}} - \text{Emission impact}_{\text{Adjusted}}^{\text{Foreign}} \quad (4)$$

### 3. 결 과

#### 3.1 대기질 모사수행평가

대상 기간 평균 중국의 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도는 50.8 µg/m<sup>3</sup>이었고, 모사 농도는 47.1 µg/m<sup>3</sup>로 관측 농도를 3.7 µg/m<sup>3</sup> 과소 모사하였다 (그림 3). 이에 반해, 국내 PM<sub>2.5</sub>의 관측 농도와 모사 농도는 각각 24.2, 25.1 µg/m<sup>3</sup>으로 0.9 µg/m<sup>3</sup> 과대 모사하였다. 그림 3(b)에서 3월 29일 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 69.7 µg/m<sup>3</sup>로 관측되었으나, 모사 농도는 약 22.3 µg/m<sup>3</sup>로 낮았다. 해당 일은 황사의 영향을 받아 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높아졌으나, 대기질 모사는 이를 반영하지 못하였다. 중국과 국내에 대해 일평균 PM<sub>2.5</sub> 관측과 모사 농도의 상관계수는 0.81과 0.85, Normalized mean bias (NMB)는 각각 -7.4%, 3.7%로 Emery *et al.* (2017)의 목표치를 만족하였다. 다만 중국과 남한에서 PM<sub>2.5</sub> 기본 모사 농도가 관측 농도와 차이를 보이는 점에서, 배출목록 기반의 모사 결과를 이용하여 추정된 국내외 배출영향에는 불확도가 포함될 수 있다. 이러한 불확도를 보완한 결과를 3.4절에 논의하였다.

#### 3.2 국외 및 국내 배출영향

2차 계절관리제 기간 동안 배출목록을 기반으로 모사된 국외 배출영향은 중국과 가까운 모사영역의 북서쪽 경계에서부터 높았으며, 풍하 지역인 동남쪽으로 갈수록 낮아졌다 (그림 4). 기간 평균 국내 전역

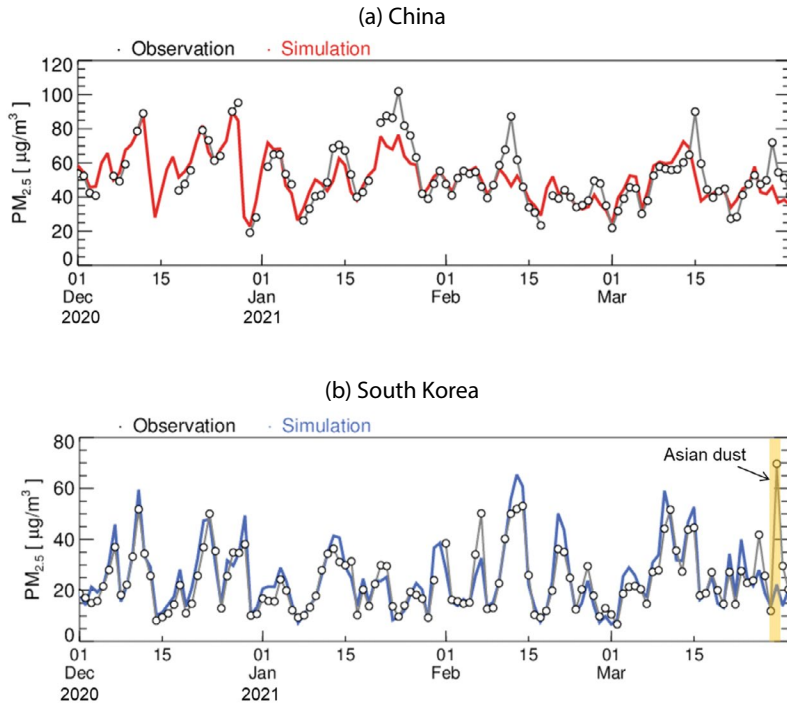


Fig. 3. Daily mean  $PM_{2.5}$  concentrations in (a) China and (b) South Korea from December 2020 to March 2021.

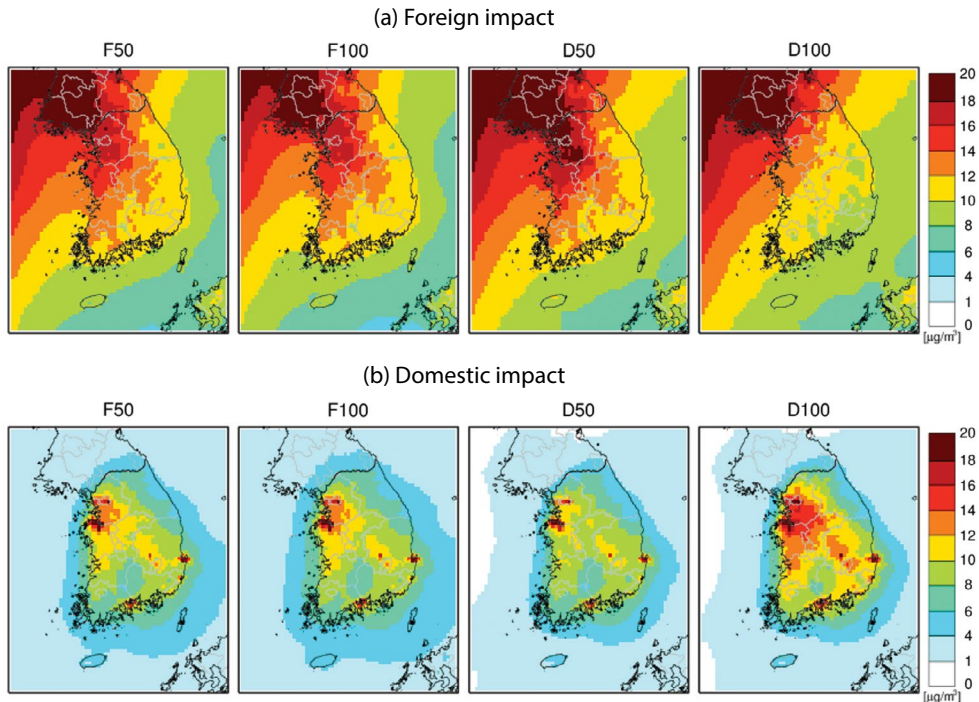
에 대한 국외 배출영향은  $D50 (14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3) > F50 (13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3) = F100 (13.6 \mu\text{g}/\text{m}^3) > D100 (11.6 \mu\text{g}/\text{m}^3)$  순으로 모사되었다. 이는 국내  $PM_{2.5}$  모사 농도의 46~58%에 해당하며, 선형연구에서 제시한 겨울철 평균 국외 기여율과 유사한 수준이다 (Kumar *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2020b).

한편 동기간 국내 배출영향은 내륙을 중심으로 높게 모사되었다. 특히 배출밀도가 높은 수도권과 충남, 그리고 포항 등 지역에서 국내 배출영향이 높으며, 해안 지역에서 상대적으로 낮은 값을 보였다. 분석 기간 동안 우리나라의 평균적인 국내 배출영향은  $D100 (13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3) > F50 (11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3) = F100 (11.5 \mu\text{g}/\text{m}^3) > D50 (10.6 \mu\text{g}/\text{m}^3)$  순으로 모사되었으며, 상대적인 기여율은 42~54%이다.

배출영향 분석 시 배출량 삭감 지역 및 삭감율에 따라 국외 및 국내 배출영향은  $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  차이를 보였다. 해당 차이는 국내 배출량을 50% 삭감한 D50과

100% 삭감한 D100에서 기인하였으며,  $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 는 D50 대비 25%, 27% 수준이다(그림 4). 이는 국내 배출량 변화에 따른 국내  $PM_{2.5}$  농도는 비선형적으로 변화함을 의미한다. 대기오염물질은 배출 지역에서 농도가 높고 수평 공간적인 농도 구배가 크게 변화하는 등 대기화학 측면에서 chemical regime이 달라질 수 있기 때문이다 (Cohan *et al.*, 2005; Hakami *et al.*, 2004). 반면 F50과 F100에서 국내 배출영향이 유사하게 분석되는 점은 국외 배출량 변화에 따른 국내  $PM_{2.5}$  농도는 선형적인 변화를 보임을 의미한다. 이는 국외 배출의 경우 장거리 이동에 의한 대기오염물질의 농도 희석과 상대적으로 긴 반응 시간이 제공되기 때문이다 (Cohan *et al.*, 2005).

국내 배출량과  $PM_{2.5}$  농도의 비선형성이 크다는 것은 국내에서 배출량 저감에 따른  $PM_{2.5}$  농도 개선 효과를 살펴보는 민감도 분석 결과와 현재의 배출 및 대기화학 조건하에서 특정 배출원에 대한 기여도 분



**Fig. 4.** Spatial distributions of (a) foreign and (b) domestic emission impacts during the study period. F50, F100, D50, and D100 indicate the emission impacts estimated from simulations after 50% or 100% reductions of foreign (F) or domestic (D) emissions, respectively.

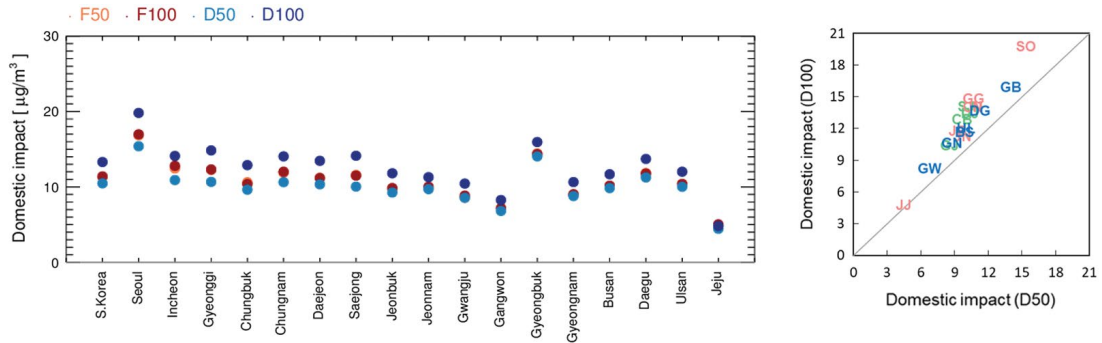
석 결과가 차이를 보일 수 있음을 의미한다. 따라서 대기오염물질 농도 개선을 위한 배출량 저감 대책 수립과 그 효과를 분석할 때에는 배출량과 농도의 비선형성에 대한 고려가 중요해 보인다.

다만, 이러한 분석 결과는 본 연구의 대상기간인 2차 계절관리제에 해당된다. 결과로 제시하지 않았으나, 계절관리제 시행 전 동기간과 1~3차 계절관리제 기간의 국내 배출영향 D50은 10.2, 11.7, 10.6, 9.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정되며 기상조건에 따라 소폭 차이를 보였다. 따라서 본 연구에서 제시한 방법을 다른 기간에 대해서도 적용하는 것은 물론, 변화가 예상되는 국내외 배출 조건 역시 고려가 필요하다.

### 3.3 시도별 국내 배출영향

배출량 삭감 방법(Case 1~4)에 따른 국내 배출영향을 국내 17개 시도에 대해 분석하였다(그림 5). 그

림 4에 보인 바와 같이 국내 배출영향이 D100에서 가장 높게 분석됨에 따라, 지역별 국내 배출영향도 마찬가지로 D100의 추정값이 모든 지역에서 높았다. D100을 기준으로 국내 배출영향은 4.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (제주)~19.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (서울)의 범위를 보였다. 서울은 국내 지역 중 인구 밀도가 가장 높은 대표적인 도심 지역이기 때문에 배출밀도가 높아 국내 배출영향이 높았으며(Bae *et al.*, 2021), 그 다음으로 경북에서 국내 배출영향이 16.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높았다. 이는 그림 4의 공간 분포에서도 확인할 수 있다. 다만 Kim *et al.* (2022)에 따르면 경북 내 포항의 높은 배출밀도는 면오염원 형태의 비민수용무연탄의 불확도로부터 기인하며, 이는 포항 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 4배 과대 모사하는데 영향을 주었다. 향후 개선된 배출량을 이용하는 경우 경북 내 높은 국내 배출영향은 낮아질 가능성이 있다. 그 다음으로는 경기와 인천, 세종의 국내 배출영



**Fig. 5.** Domestic impacts on 17 provincial  $PM_{2.5}$  concentrations during the study period. Scatter plot shows the correlation of domestic impacts of D50 and D100.

향이 각각 14.8, 14.1, 14.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모사되었다. 각 지역의  $PM_{2.5}$  농도 대비 국내 배출영향은 35% (제주)~62% (경북)으로 편차가 크게 나타났다.

국내 전역에 대한 결과와 마찬가지로 17개 시도의 국내 배출영향은 F50과 F100은 유사하였으나, D50과 D100에서는 배출량이 작은 제주 ( $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 제외하면 1.8~4.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보였다. 특히, D50과 D100의 국내 배출영향 차이는 수도권과 충남 등 서쪽에 위치한 배출밀도가 높은 지역에서 3.1~4.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 높았으며, 세종에서도 4.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 세종의 경우 자체 배출밀도가 높지 않으나, 수도권과 충남 등 풍상의 주요 배출 지역과 인접성으로 인해 국내 배출영향이 산정 방법에 따라 차이를 보이는 것으로 판단된다. 그 외 강원, 경북, 경남 등 동해안을 접하는 시도에서는 D50과 D100의 국내 배출영향 차이가 2.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 분석되었다. 이는 D50에서 산정된 국내 배출영향 대비 13~41% 수준으로, 그 차이가 작지 않으므로 향후 국내 배출영향 분석 시 국내 배출량과  $PM_{2.5}$  농도의 비선형성을 감안한 해석이 필요하다. 본 연구에서는 개별 대기오염물질 배출량에 대한  $PM_{2.5}$  농도의 비선형적 변화를 제시하지는 않았으나, 추후 연계된 분석을 수행할 예정이다.

### 3.4 관측농도 기반 국내외 배출영향 보정

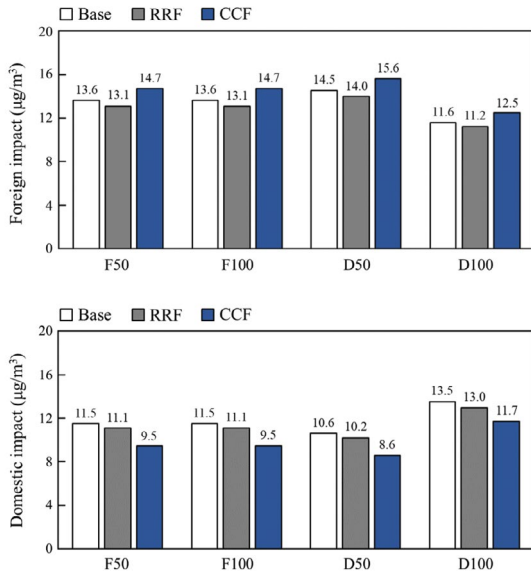
2차 계절관리제 기간 평균  $PM_{2.5}$  농도는 중국과 국

내에서 각각 7% 과소, 8% 과대 모사되었다. 중국이 국내  $PM_{2.5}$  농도에 영향을 미치는 주요한 풍상 배출 지역임을 감안할 때 (Bae *et al.*, 2020a, b; Choi *et al.*, 2019), 중국에서의 과소 모사는 국외 배출영향의 과소 평가로 이어질 가능성이 높다. 반대로 이와 같은 조건에서 국내  $PM_{2.5}$  농도의 과대 모사는 국내 배출영향의 과대 평가로 이어질 수 있다. 이를 감안하기 위해 2.3절에 설명한 RRF와 CCF를 기반으로 국내 및 국외 배출영향을 보정하였다(그림 6).

RRF를 적용한 국외 배출영향은 배출목록 기반의 추정 결과( $11.6\sim 14.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 약  $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소한  $11.2\sim 14.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. 이때 국외 배출영향은 국내  $PM_{2.5}$  관측 농도 대비 46~58%로 분석되며, D100을 제외하고는 국외 기여율이 50% 이상이었다. 한편 RRF를 적용한 국내 배출영향은 보정 전 ( $10.6\sim 13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) 대비  $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 감소한  $10.2\sim 13.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정되며,  $PM_{2.5}$  농도 대비 기여율은 42~54%이었다. RRF 적용 시 국내의 배출영향이 모두 감소한 이유는 해당 방법이 국내 및 국외 배출영향에 국내  $PM_{2.5}$  관측 농도 대비 모사 농도의 비를 동일하게 곱하는 방식으로, 국내  $PM_{2.5}$  농도가 과대 모사되었기 때문이다.

CCF를 기반으로 보정한 국외 배출영향은  $12.5\sim 15.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (52~64%)로 분석되며, 배출목록 기반의 추정 대비 약  $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였다. 국내 배출영향





**Fig. 6.** Bar and whisker plots show the period mean foreign and domestic emission impacts on PM<sub>2.5</sub> concentration in South Korea and 17 provinces. Base represents the emissions inventory-based impacts while RRF and CCF indicate the adjusted emission impacts based on RRF and CCF methods, respectively.

경우 CCF 적용 시 8.6~11.7 µg/m<sup>3</sup> (36~48%)로 추정되며, 보정 전에 비해 약 1.8~2.0 µg/m<sup>3</sup> (13~19%) 감소하였다. CCF 보정은 국외 배출량에 대해 풍상의 불확도를 기반으로 먼저 보정한 후, 이를 국내 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도에서 차감한 나머지를 국내 배출영향으로 산정한다. 따라서, 본 연구와 같이 풍상인 중국의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 과대 예측하고 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 과소 평가하는 경우, 보정된 국내 배출영향은 감소하게 된다.

결과적으로 국내 배출영향은 RRF와 CCF 보정에서 모두 감소하였다. 이는 배출목록 기반의 모사 결과만으로 국내 배출영향을 추정하는 경우 2차 계절관리제 기간 동안 국외 배출영향을 과소 평가하며, 자체 노력에 의해 저감시킬 수 있는 PM<sub>2.5</sub> 농도의 잠재력을 과대 평가하는 결과로 이어질 수 있다. 반대로 국내에서 PM<sub>2.5</sub> 농도를 과소 모사하는 경우 국내 및 국외 배출 영향이 과대 평가될 수 있으므로, 풍상

과 풍하 지역에 대한 PM<sub>2.5</sub> 중량 및 성분 농도를 정확하게 모사할 수 있는 대기질 모사 시스템이 마련되어야 한다.

D100을 기준으로, 국내 배출영향은 배출목록 기반의 결과에서는 13.5 µg/m<sup>3</sup>이며, 국내외 지역의 모사 불확도를 감안한 RRF와 CCF 보정 시 각각 13.0 µg/m<sup>3</sup>, 11.7 µg/m<sup>3</sup>로 감소하였다. 해당 수치는 현재의 다양한 모사 불확도를 감안할 때, 2차 계절관리제 기간 동안 국내 배출량 저감 노력으로 줄일 수 있는 PM<sub>2.5</sub> 농도의 최대 개선 폭이라 할 수 있다.

### 3.5 국내외 배출 저감 시나리오별 PM<sub>2.5</sub> 농도 예측

2차 계절관리제 기간 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 관측농도는 24.2 µg/m<sup>3</sup>로 연평균 대기환경기준에 도달하기 위해서는 9.2 µg/m<sup>3</sup>의 추가적인 배출 관리가 필요하다. 3.4절에서 국내 배출영향이 10.6 µg/m<sup>3</sup>인 점을 감안하면 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 15 µg/m<sup>3</sup> 이하로 감소시키기 위해 국내 배출량을 100% 가깝게 저감시켜야 하나, 이는 현실적으로 불가능에 가깝다. 국내외 배출량 저감에 따른 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선의 효과를 추정하기 위해 국내외 배출량을 개별적으로 또는 함께 50%, 100% 감소시킨 시나리오에 대한 Case 1~6 모사의 PM<sub>2.5</sub> 예측농도를 표 2에 정리하였다. 이때 관측과 모사 농도의 차이를 감안하여 배출량 저감 시나리오별 PM<sub>2.5</sub> 농도를 예측하기 위해 국내 지역별로 Case 1~6 모사의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 RRF를 적용하였다. 그 결과는 국내 연평균 대기환경기준 15 µg/m<sup>3</sup>와 2022년 환경부 국정과제에서 2027년 달성 목표로 제시한 13 µg/m<sup>3</sup> (KMOE, 2022b)의 충족여부 관점에서 살펴보았다.

2차 계절관리제 동안 국내 또는 국외 배출량을 50% 감소시켰을 때 지역별 PM<sub>2.5</sub> 농도는 대전, 전남, 경남 등 일부 시도에서 15 µg/m<sup>3</sup> 이하로 분석되었다. 그러나 국내 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 국내와 국외 배출량을 50% 삭감 시, 각각 19.3, 17.7 µg/m<sup>3</sup>로 추정되어 연평균 대기환경기준을 상회하였다. 반면 국내 또는 국

**Table 2.** Period mean 17 provincial PM<sub>2.5</sub> concentrations predicted after foreign or domestic emission reductions during the study period. Simulation results were adjusted by RRF. Boxes filled with yellow and red colors indicate that the PM<sub>2.5</sub> concentrations exceed 13 or 15 µg/m<sup>3</sup>, respectively.

Region	Observation	Emission reduction scenario					
		Foreign		Domestic		Foreign & Domestic	
		50%	100%	50%	100%	50%	100%
South Korea	24.2	17.7	11.2	19.3	11.4	13.0	2.1
Seoul	27.1	20.3	13.6	20.9	11.2	14.5	1.7
Incheon	27.3	19.5	12.0	22.1	14.0	14.7	1.9
Gyeonggi	28.6	20.4	12.3	23.3	13.9	15.5	2.1
Chungbuk	28.1	20.1	12.0	22.4	13.2	15.3	2.4
Chungnam	29.8	21.5	13.3	23.8	14.1	16.0	2.3
Daejeon	20.5	14.8	9.1	16.3	9.5	10.9	1.7
Saejong	27.8	20.1	12.3	22.5	12.7	15.3	2.2
Jeonbuk	25.3	18.1	11.0	20.2	12.1	13.4	2.2
Jeonnam	19.0	13.9	8.9	14.6	9.0	9.9	1.9
Gwangju	24.8	17.8	10.9	19.6	12.0	13.0	2.3
Gangwon	20.5	14.0	7.4	17.0	11.9	10.9	2.1
Gyeongbuk	21.9	17.1	12.2	15.9	8.4	11.5	1.8
Gyeongnam	18.8	13.6	8.5	14.7	8.8	10.0	2.0
Busan	20.7	15.5	10.2	15.8	8.9	11.0	2.1
Daegu	23.6	17.9	12.2	17.7	9.5	12.6	2.0
Ulsan	19.0	14.1	9.2	14.6	8.3	10.0	1.9
Jeju	16.7	11.3	6.1	14.0	10.9	9.0	2.5

외 배출량이 100% 감소하는 경우에는 수도권과 충남을 제외한 대부분의 지역에서 기간평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 13 µg/m<sup>3</sup> 이하로 예측되었으며, 남한 평균 농도는 약 11 µg/m<sup>3</sup>로 추정되었다. 즉, 국내 또는 국외 배출량을 50% 삭감하는 경우에는 대기환경기준이나 2027년 달성 목표를 만족시킬 수 없으며, 국내 또는 국외 배출량이 100%에 가깝게 저감되어야 목표 달성이 가능하다.

한편 국내와 국외 배출량을 동시에 50% 줄인 Case 5 모사에서는 경기와 중부 지역 일부를 제외하고 대부분의 시도에서 PM<sub>2.5</sub> 농도가 15 µg/m<sup>3</sup> 혹은 13 µg/m<sup>3</sup> 이하로 감소하였다. 따라서, 계절관리제 기간 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 15 µg/m<sup>3</sup> 이하로 낮추기 위해서는 국내뿐만 아니라 국외 배출량 감소가 동반되어야 한다. 이러한 결과는 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선을 통한 국민 건강 보호를 위해서는 지속적인 국제 협력이 중요하다는 것을 설명한다. 국내의 배출량을 동시에

100% 삭감한 Case 6에서는 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 농도가 대상 기간 동안 1.7~2.5 µg/m<sup>3</sup>로 추정되었으며, 이는 동북아 PM<sub>2.5</sub> 농도의 지역 (regional) 배경농도에 해당한다.

#### 4. 결 론

본 연구는 2차 계절관리제 기간 동안 대기질 모사를 기반으로 국내 및 국외 배출영향이 국내 PM<sub>2.5</sub> 대기질 모사 농도에 미치는 영향을 분석하고, 이를 바탕으로 국내 자체적인 노력에 의해 저감 가능한 PM<sub>2.5</sub> 농도 폭을 추정하였다. 민감도 분석을 이용한 배출영향 추정에서 배출량 삭감 지역(국내 혹은 국외) 및 삭감률(50% 혹은 100%)에 따른 차이를 비교하여 불확도 범위를 함께 살펴보았다.

2차 계절관리제 기간 동안 국외 배출영향은 분석

방법에 따라 11.6~14.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (46~58%)의 범위를 보이며, 국내 배출영향은 10.6~13.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (42~54%)로 모사되었다. 배출영향 추정 방법에 따라 국내외 배출영향은 최대 2.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보였다. 이는 국내 배출과 PM<sub>2.5</sub> 농도가 비선형적인 관계를 보이기 때문이다. 특히, 국내 배출영향이 지역별 내 분석 방법에 따라 13~41%의 차이를 보였으며, 배출밀도가 높은 수도권과 충청 등 서쪽 지역에서 높고, 강원, 경북, 경남 등에서 상대적으로 낮았다.

다만 분석 기간 동안 중국과 국내 PM<sub>2.5</sub> 모사 농도는 관측에 비해 각각 7% 과소, 4% 과대 모사하였다. 이와 같은 모사 불확도는 추정된 배출영향의 불확도로 이어질 수 있으므로, 이를 감안하여 국내외 배출영향을 보정하였다. 국외 배출영향은 보정 방식에 따라 증감하여 11.2~15.6  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  (46~64%) 수준으로 평가되었으며, 국내 배출영향의 경우 보정 방식에 관계없이 모두 감소하여 8.6~13.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위에서 분석되었다. 계절관리제 기간 동안 국내 배출량 저감에 의해 개선시킬 수 있는 PM<sub>2.5</sub> 농도의 최대 폭은 국내 배출영향이 높은 D100을 기준으로 불확도 보정 방법에 따라 13.0 또는 11.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정되었다.

향후 계절관리제 기간 동안 국내 또는 국외 배출량의 50% 감소를 가정할 경우 국내 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 연평균 대기환경기준인 15  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 상회하였다. 그러나 국내와 국외 배출량을 동시에 50% 삭감할 경우, 예측되는 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 13.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮아졌다. 단기간 내 국내 배출량을 50% 이상 저감시키기가 현실적으로 쉽지 않음을 고려하면, 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 효과적으로 관리하기 위해서는 국내외 배출의 동반 감축을 위한 국제적인 협력이 필요하다.

본 연구에서는 모사 불확도를 감안한 국내 및 국외 배출영향 추정을 위해 중국과 우리나라의 PM<sub>2.5</sub> 질량 농도를 기반으로 보정하였으나, 이는 PM<sub>2.5</sub> 성분별 보정과 차이를 보일 수 있다. 또한 풍상에서의 불확도가 우리나라의 장거리 이동에 영향을 줄 것으로 가정하였으나, 대기오염물질이 장거리 이동되는 과정에서 생성 및 침착 등의 복잡한 물리화학적 과정이

반영된다. 따라서 향후 불확도 인자들을 복합적으로 고려할 수 있는 고도화된 대기질 모사 및 보정 방법이 모색되어야 한다.

## 감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## References

- Ansari, A.S., Pandis, S.N. (1998) Response of Inorganic PM to Precursor Concentrations, *Environmental Science & Technology*, 32(18), 2706-2714. <https://doi.org/10.1021/es971130j>
- Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2017) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (III) Application of the Modeled and Observed PM<sub>2.5</sub> Ratio on the Contribution Estimation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 445-457. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.445>
- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2020a) Long-range transport influence on key chemical components of PM<sub>2.5</sub> in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the years 2012-2016, *Atmosphere*, 11(1), 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<sub>2.5</sub> in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11(2), 141. <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021) Local Authority Level Source Apportionments of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (VII) Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 466-486. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.466>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.H., Kim, S. (2022a) An observation-based adjustment method of regional contribution estimation from upwind emissions to downwind PM<sub>2.5</sub> concentrations, *Environment International*, 163, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107214>

- Bae, M., Kim, S., Kim, S. (2022b) Quantitative Evaluation on the Drivers of PM<sub>2.5</sub> Concentration Change in South Korea during the 1st-3rd Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management Periods, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 610-623. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.4.610>
- 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(2), 51-77. <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Chatani, S., Yamaji, K., Sakurai, T., Itahashi, S., Shimadera, H., Kitayama, K., Hayami, H. (2018) Overview of Model Inter-Comparison in Japan's Study for Reference Air Quality Modeling (J-STREAM), *Atmosphere*, 9(1), 19. <https://doi.org/10.3390/atmos9010019>
- Choi, J., Park, R.J., Lee, H.-M., Lee, S., Jo, D.S., Jeong, J.I., Henze, D.K., Woo, J.-H., Ban, S.-J., Lee, M.-D., Lim, C.-S., Park, M.-K., Shin, H.J., Cho, S., Peterson, D., Song, C.-K. (2019) Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on PM<sub>2.5</sub> exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 203, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.008>
- Clappier, A., Fagerli, H., Thunis, P. (2017a) Screening of the EMEP source receptor relationships: application to five European countries, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 10(4), 497-507. <https://doi.org/10.1007/s11869-016-0443-y>
- Clappier, A., Belis, C.A., Pernigotti, D., Thunis, P. (2017b) Source apportionment and sensitivity analysis: two methodologies with two different purposes, *Geoscientific Model Development*, 10(11), 4245-4256. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4245-2017>
- Cohan, D.S., Hakami, A., Hu, Y., Russell, A.G. (2005) Nonlinear Response of Ozone to Emissions: Source Apportionment and Sensitivity Analysis, *Environmental Science & Technology*, 39(17), 6739-6748. <https://doi.org/10.1021/es048664m>
- Dennis, R.L., Pinder, R.W., Bhavsar, P.V. (2008) Observable indicators of the sensitivity of PM<sub>2.5</sub> 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>
- 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 the Air & Waste Management Association*, 67(5), 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>
- Hakami, A., Odman, M.T., Russell, A.G. (2004) Nonlinearity in atmospheric response: A direct sensitivity analysis approach, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 109(D15). <https://doi.org/10.1029/2003JD004502>
- 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<sub>2.5</sub> and chemical species, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(4), 2725-2743. Copernicus GmbH. <https://doi.org/10.5194/acp-21-2725-2021>
- Itahashi, S., Ge, B., Sato, K., Wang, Z., Kurokawa, J., Tan, J., Huang, K., Fu, J.S., Wang, X., Yamaji, K., Nagashima, T., Li, J., Kajino, M., Carmichael, G.R., Wang, Z. (2021) Insights into seasonal variation of wet deposition over south-east Asia via precipitation adjustment from the findings of MICS-Asia III, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 21(11), 8709-8734. <https://doi.org/10.5194/acp-21-8709-2021>
- Kang, Y.-H., Kim, S. (2022a) Seasonal PM Management: (1) What Emissions Should be Reduced?, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 746-763. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.746>
- Kang, Y.-H., Kim, S. (2022b) Estimating Oxidation Rates of NO<sub>x</sub> and SO<sub>2</sub> Released from Domestic Emission Sources in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(5), 716-733. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.5.716>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.1.017>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017a) 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(17), 10315-10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017b) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (I) Contributions of Precursor Emissions in the 2013 CAPSS Emissions Inventory, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 139-158. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.2.139>
- Kim, S., Son, K., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Kim, E., Kim, S. (2022) Municipality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (IX) Gyeongsangbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(2), 237-257. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2022.38.2.237>
- Koo, B., Jung, J., Pollack, A.K., Lindhjem, C., Jimenez, M., Yarwood, G. (2012) Impact of meteorology and anthropogenic emissions on the local and regional ozone weekend effect in Midwestern US, *Atmospheric Environment*, 57, 13-21. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.04.043>
- 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(2-4), 264-271. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2008.03.014>
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2020) <<http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=&orgCd=&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&boardId=1338390&decorator=>> (6 November 2022).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2021) <<https://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?boardMasterId=1&boardId=1189340&menuId=286>> (8 February 2021).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2022a) <[http://www.me.go.kr/home/web/policy\\_data/read.do?&menuId=10260&&condition.orderSeqId=7911&condition.rnSeq=4&seq=7914](http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?&menuId=10260&&condition.orderSeqId=7911&condition.rnSeq=4&seq=7914)> (2 November 2022).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2022b) <<http://me.go.kr/home/web/board/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=titleOrContent&searchValue=%EB%AF%B8%EC%84%B8&menuId=286&orgCd=&boardId=1528700&boardMasterId=1&boardCategoryId=&decorator=>> (6 November 2022).
- 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<sub>2.5</sub> in South Korea, *Atmospheric Environment*, 261, 118542. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118542>
- Lee, D., Choi, J., Myoung, J., Kim, O., Park, J., Shin, H.-J., Ban, S.-J., Park, H.-J., Nam, K.-P. (2019) Analysis of a Severe PM<sub>2.5</sub> 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(12), 756. <https://doi.org/10.3390/atmos10120756>
- Liu, J., Li, J., Yao, F. (2021) Source-receptor relationship of transboundary particulate matter pollution between China, South Korea and Japan: Approaches, current understanding and limitations, *Critical Reviews in Environmental Science and Technology* 1-25. <https://doi.org/10.1080/10643389.2021.1964308>
- Moon, Y.S., Koo, Y.-S., Kim, Y.-K., Lim, Y.-K., Lee, S.-Y. (2004) Calculation of Atmospheric Environmental Critical Loads and Contribution Assessment of Air-Quality Modeling, *Proceeding of the 38th Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*.
- Nam, K., Lee, H., Lee, J., Park, H., Choi, J., Lee, D. (2019) A Study on the Method of Calculation of Domestic and Foreign Contribution on PM<sub>2.5</sub> using Brute-Force Method, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(1), 86-96. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.1.086>
- National Air Emission Inventory and Research Center (NAIR). (2021) National Air Pollutants Emission 2018.
- NCEP (2000) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>
- 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(1), 00139. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00139>
- Park, S.-C., Yeon, I.-J., Cho, B.-R., Cho, J.-S., Kang, B.-W. (2008) A Study on the Atmospheric Environmental Capacity in Chungju Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 24(1), 122-127. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2008.24.1.122>
- Pun, B.K., Seigneur, C., Bailey, E.M., Gautney, L.L., Douglas, S.G.,

- Haney, J.L., Kumar, N. (2008) Response of Atmospheric Particulate Matter to Changes in Precursor Emissions: A Comparison of Three Air Quality Models, *Environmental Science & Technology*, 42(3), 831-837. <https://doi.org/10.1021/es702333d>
- Skamarock, W., Klemp, J., Dudhia, J., Gill, D., Barker, D., Wang, W., Huang, X.-Y., Duda, M. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. UCAR/NCAR. <https://doi.org/10.5065/D68S4MVH>
- Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2022) Source apportionment of ambient concentration and population exposure to elemental carbon in South Korea using a three-dimensional air quality model, *Air Quality, Atmosphere & Health*, 15(10), 1729-1744. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01213-z>
- Thunis, P., Clappier, A., Tarrason, L., Cuvelier, C., Monteiro, A., Pisoni, E., Wesseling, J., Belis, C.A., Pirovano, G., Janssen, S., Guerreiro, C., Peduzzi, E. (2019) Source apportionment to support air quality planning: Strengths and weaknesses of existing approaches, *Environment International*, 130, 104825. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.05.019>
- U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2007) Guidance on the Use of Models and Other Analyses for Demonstrating Attainment of Air Quality Goals for Ozone, PM<sub>2.5</sub> and Regional Haze.
- Zhang, Y., Mathur, R., Bash, J.O., Hogrefe, C., Xing, J., Roselle, S.J. (2018) Long-term trends in total inorganic nitrogen and sulfur deposition in the US from 1990 to 2010, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 18(12), 9091-9106. <https://doi.org/10.5194/acp-18-9091-2018>

## Authors Information

배민아(아주대학교 환경연구소 연구원)

(bma829@ajou.ac.kr)

우정현(건국대학교 기술융합공학과 교수)

(jwoo@konkuk.ac.kr)

김순태(아주대학교 환경안전공학과 교수)

(soontaekim@ajou.ac.kr)

## Supplementary Materials

**Table S1.** Comparison of emissions inventories for (a) China and (b) South Korea.

(unit: ktons/yr)

	CO	SO <sub>2</sub>	NO <sub>x</sub>	NH <sub>3</sub>	NMVOC	PM <sub>10</sub>	PM <sub>2.5</sub>
<b>(a) China</b>							
MEIC 2015	153,579	16,921	23,696	10,486	28,498	12,303	9,142
MEIC 2017	136,200	10,500	22,000	10,300	28,617	10,200	7,600
SIJQA v1	141,937	13,374	22,514	10,327	28,400	10,798	8,115
<b>(b) South Korea</b>							
CAPSS 2015	793	352	1,158	297	1,011	233	99
CAPSS 2017	817	316	1,190	308	1,048	218	92
CAPSS 2018	809	301	1,153	316	1,036	233	98