

논문

# 1~3차 미세먼지 계절관리제 기간 중 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화 요인 분석

## Quantitative Evaluation on the Drivers of PM<sub>2.5</sub> Concentration Change in South Korea during the 1<sup>st</sup> - 3<sup>rd</sup> Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management Periods

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

아주대학교 환경연구소, <sup>1)</sup>아주대학교 환경공학과, <sup>2)</sup>아주대학교 환경안전공학과

Minah Bae, Segi Kim<sup>1)</sup>, Soontae Kim<sup>2),\*</sup>

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

<sup>1)</sup>Department of Environmental Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

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

접수일 2022년 6월 30일  
수정일 2022년 7월 29일  
채택일 2022년 8월 1일

Received 30 June 2022  
Revised 29 July 2022  
Accepted 1 August 2022

\*Corresponding author

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

E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

**Abstract** Since 2019, Korean Ministry of Environment has implemented the 1<sup>st</sup> - 3<sup>rd</sup> PM<sub>2.5</sub> Seasonal Management Plans (SMP) to reduce PM<sub>2.5</sub> concentration during high PM<sub>2.5</sub> concentration period. In this study, we quantitatively evaluated the major drivers (meteorology, foreign emissions, and domestic emissions) of which changes led to change of PM<sub>2.5</sub> concentrations in South Korea during the PM<sub>2.5</sub> SMP periods (S1, Dec. 2019 - Mar. 2020; S2, Dec. 2020 - Mar. 2021; S3, Dec. 2021 - Mar. 2022) based on observational data and Community Multiscale Air Quality (CMAQ) simulation results. The nation-wide period mean PM<sub>2.5</sub> concentration in S1, S2, and S3 decreased by 8.7, 9.1, and 10.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  compared to that during Dec. 2018 - Mar. 2019. Results show that anthropogenic emission reductions in Northeast Asia decreased the PM<sub>2.5</sub> concentration by 5.9, 5.5, and 8.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  respectively during S1 - S3. Note that the effect of the regional emission reduction includes not only domestic emission reduction but also reductions in foreign emission impact. The combined impact of meteorology and foreign emission changes explained 65%, 61% of the total PM<sub>2.5</sub> decreases over South Korea and the Seoul Metropolitan Area (SMA) respectively during the S1 - S3. Consequently, domestic emission reductions including governmental air quality management plans (i.e., the PM<sub>2.5</sub> SMP) and socioeconomic changes (i.e., COVID-19 outbreak) led to PM<sub>2.5</sub> concentration decrease in South Korea by 35% during the periods. Among seventeen provinces in South Korea, the impacts of domestic emission reduction on the PM<sub>2.5</sub> concentration decreases were as high as 39% and 56% in the SMA and Chungnam where the major emission sources such as transportation, power generation facilities, and industrial complex locate and where the PM<sub>2.5</sub> SMP measures were probably penetrated. It implies that the effects of domestic emission controls were meaningful to lower PM<sub>2.5</sub> concentrations during the periods.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, Seasonal PM<sub>2.5</sub> management, Domestic emission impact, Emission impact, Meteorology impact

### 1. 서론

국내를 포함한 동북아 지역에서 초미세먼지 (Particulate matter of 2.5  $\mu\text{m}$  or less in diameter; PM<sub>2.5</sub>) 농도는 주로 추운 계절인 겨울철과 봄철에 월평균 농도가 증가하고, 고농도 발생일 또한 증가한다 (Bae *et al.*,

2020a; Bae *et al.*, 2019; Ju *et al.*, 2018; Lim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017a). 환경부에서는 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가하는 기간 동안 국민의 건강 피해를 최소화하기 위해 1차 미세먼지 계절관리제 (2019년 12월~2020년 3월)를 시작으로, 2020년 12월~2021년 3월과 2021년 12월~2022년 3월에 2차와 3차 미세먼지 계절관리제 (이

하 ‘계절관리제’)를 시행한 바 있다(KMOE, 2021a, 2020).

계절관리제 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화 원인에 대해 환경부에서는 관측자료와 대기질 모사를 활용하여 기상, 국내 및 국외 배출 변화 등을 구분하여 배출량 저감 대책 등 정책 효과를 분석하고 공개한 바 있다(KMOE, 2021a). 또한 선행 연구에서는 3차원 대기질 모사와 관측 농도의 변화, 장기간 추세 분석 등을 통해 계절관리제 등 정책, COVID-19 발생에 의한 효과 등을 분석하였다(Kim *et al.*, 2021b; Kang *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2020). 다만 선행 연구에서는 주로 전년 동기 대비 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 살펴보았으며, 이로 인해 1~3차 계절관리제 시행 이전과 이후 전 기간에 걸친 변화를 종합적으로 분석한 연구는 드물다.

계절관리제 정책 효과 분석에서 어려운 점은 산업 부문 배출 규제 경우 배출 삭감량을 추정할 수 있으나 민간 부문의 농촌 불법 소각 방지, 에너지 절약 유도 등과 같은 정성적인 대책의 경우 배출 저감 효과를 정량화하기 쉽지 않다는 것이다. 또한 COVID-19 발생과 그로 인한 사회적 거리두기 등과 같이 사회경제적인 요인에 의해 배출량이 변화하였으며(Cheng *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021a; Wang *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2021; Kang *et al.*, 2020), 이는 계절관리제 등 대기질 관리 대책에 의한 배출량 감소와 구분되어야 한다. 이와 더불어 중국의 경우 최근 몇 년간 지속적인 배출량 감소에 의해 오존을 제외한 PM<sub>2.5</sub> 등 기준성 대기 오염물질의 농도가 감소하고 있다(Zhai *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2021; Uno *et al.*, 2020). 이러한 점에서 동북아의 풍하지역에 위치하는 국내에서는 풍상지역인 중국에서의 배출량 변화와 그에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 유입 영향이 감안될 필요가 있다(Bae *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017a). 그러나 상향식 배출목록은 자료 작성에 소요되는 시간으로 인해 기준연도와 배포 시점이 2년 이상 차이를 보인다(Bae *et al.*, 2020b; Wang *et al.*, 2016). 따라서, 배출목록에 기반한 분석은 풍상지역의 배출조건 변화를 고려하기에는 제한적이다(Bae *et al.*, 2022; Bae *et al.*, 2020b).

본 연구에서는 계절관리제에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도 저감 효과를 분석하기 위한 기초 연구로, 계절관리제 시행 이전 대비 1~3차 계절관리제 기간 동안 국내 배출량 변화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선 효과를 추정하였다. 이를 위해 대상 기간 동안 국내의 주요 지역에 대한 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도의 감소 추세를 살펴보았으며, 대기질 모사를 이용하여 기상 효과를 우선 분리하고, 민감도 모사를 통해 국외 유입 변화를 추정하였다.

## 2. 방법론

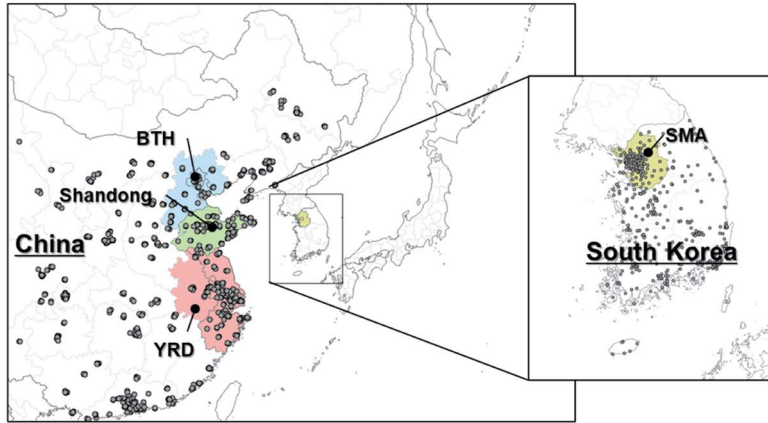
### 2.1 대상기간 및 관측자료

본 연구의 대상기간은 환경부에서 겨울철 고농도 PM<sub>2.5</sub>를 집중 관리하기 위해 배출량저감 정책을 수행하고 있는 계절관리제 기간이다. 계절관리제는 2019년 1차를 시작으로 2021년 3차까지 매년 12월부터 이듬해 3월까지 수행되었다. 본 연구에서는 1~3차 계절관리제 기간을 각각 S1~S3 (1<sup>st</sup> - 3<sup>rd</sup> Seasonal PM<sub>2.5</sub> management period)이라 하였다. 또한, 계절관리제 시행 효과를 분석하기 위하여 이전 기간인 2018년 12월~2019년 3월을 대조군으로 설정하였으며, BS (Before Seasonal PM<sub>2.5</sub> management period)라 하였다. 대상기간을 표 1로 요약하였다.

국내와 풍상지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 현황을 파악하기 위하여 지표 관측자료를 이용하였다. 국내 관측자료의 경우 국립환경과학원에서 제공하는 도시대기측정망

**Table 1.** Summary of target periods in this study.

| Period | Duration                             | Remark                       |
|--------|--------------------------------------|------------------------------|
| BS     | December 1, 2018<br>- March 31, 2019 | Reference period             |
| S1     | December 1, 2019<br>- March 31, 2020 | COVID-19 outbreak            |
| S2     | December 1, 2020<br>- March 31, 2021 | Social distancing maintained |
| S3     | December 1, 2021<br>- March 31, 2022 | Social distancing maintained |



**Fig. 1.** Model simulation domains at 27-km (left) and 9-km (right) horizontal grid resolutions. Gray dots show the locations of air quality monitoring stations.

의 1시간 평균  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  농도를 이용하였다. BS~S2 기간의 경우 확정자료가 에어코리아 웹사이트 ([www.airkorea.or.kr](http://www.airkorea.or.kr))에서 제공되므로 이를 활용하였으나, 2021년 이후 기간에 대해서는 현재 확정자료가 공표되지 않은 관계로 에어코리아 웹사이트의 실시간 관측자료인 비확정자료를 바탕으로 분석하였다.

풍상지역의 관측자료는 중국의 China National Environmental Monitoring Center (CNEMC)에서 제공하는 1시간  $PM_{2.5}$ ,  $NO_2$ ,  $SO_2$  농도를 이용하였다. 국내와 중국의 관측자료는 과거 기간 대비 최근에 대기오염 물질 측정소가 확충되었으며, 이에 본 연구에서는 각 연도별로 가용한 자료를 모두 활용하였다. 이에 연도별로 활용된 측정소 지점에는 차이가 있으며, 그림 1에는 대상기간 총 국내(485개소)와 중국(889개소)의 대기환경관측소 지점을 보였다. 관측 농도를 이용할 때에는 분석 기간 중 유효 시간 자료가 75% 이상인 측정소만을 선별하여 이용하였다. 본 연구에 이용된 연도별 측정소 개수는 표 S1에 요약하였다.

## 2.2 대기질 모사

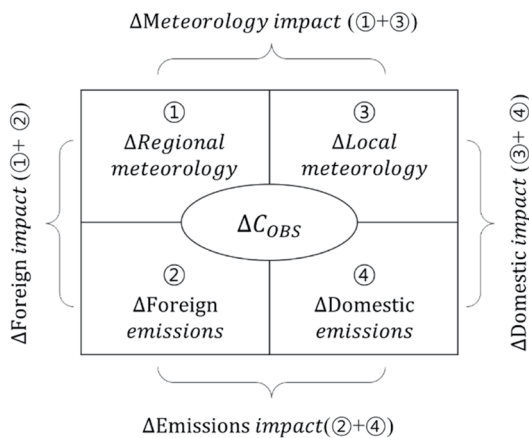
대기질 모사를 위해 3차원 광화학모델인 Community Multiscale Air Quality (CMAQ; Byun and Schere, 2006) version 5.3.1을 이용하였다. CMAQ의 모사영역

은 동북아 지역에 대해 27 km 수평해상도로 설정하였으며, 국내에 대한 자세한 분석을 위해 한반도 지역에 대한 9 km 수평해상도 영역을 추가로 설정하였다(그림 1). 대기질 모사에 필요한 기상 입력자료는 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.9.1을 수행하여 준비하였으며, 기상초기장은  $1^\circ \times 1^\circ$ 의 해상도로 제공되는 6시간 간격의 National Center for Environmental Prediction-Final (NCEP-FNL; NCEP, 2000) 자료를 이용하였다. 배출량 입력자료는 자연 배출량과 인위적 배출량에 대해 각각 Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN; Guenther, 2006) version 2.0.4, Sparse Matrix Operator Kernel Emission (SMOKE; Benjey *et al.*, 2001) version 3.1을 수행하여 준비하였다. 인위적 배출목록으로는 국내에 대해 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2017, 국외의 경우 KORUS v5 (Jang *et al.*, 2020)를 활용하였다. 대기질 모사 시 27 km 모사영역의 경계장으로 profile을 이용하였으며, 9 km 모사영역의 경계장은 27 km 모사영역의 결과를 활용하였다. 본 연구는 9 km 모사영역의 결과를 기반으로 분석하였으나, 국외 영향 산정에 이용된 중국의 모사 농도는 27 km 모사영역의 결과로부터 추출하였다. 화학메커니즘은 SAPRC07TC, 에어로졸 모듈은 AERO6을

이용하였으며, 그 외 기상 및 대기질 모사에 이용된 물리화학 옵션은 Bae *et al.* (2022)과 동일하다. 대기질 모사 수행평가는 Bae *et al.* (2022)을 참고할 수 있다.

### 2.3 계절관리제 기간 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변화 요인

본 연구에서 대기 중 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화는 기상조건에 의한 변화(이하, '기상요인')와 배출량 변화(이하, '배출요인')에 의한 것으로 가정하였다. 배출량 변화는 국내와 국외 배출량 변화로 재구분할 수 있으며, 기상 역시 PM<sub>2.5</sub> 관련 장거리 이동에 영향을 미치는 지역 규모에서의 요인과 국내에서의 배출과 물리화학 과정에 중요한 국지 요인으로 나누어 생각할 수 있다 (그림 2). 다만 이러한 요소를 완벽하게 분리할 수 있는 방법은 아직 제한적이며, 이들 요인 간의 상호 작용의 중요도에 대한 검토 역시 국내를 중심으로 수행된 바 없다. 이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 계절관리제 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화 요인을 한꺼번에 분리하여 분석하는 것이 아니라, 1) 기상요인, 2) 국외 영향, 3) 국내 배출요인 등 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 결정에 중요한 요인을 각기 다른 방식으로 순차적으로 접근하여 분석하였다. 각 부분에 대한 자세한 분석 방법은 아래에 설명하였다.



**Fig. 2.** A conceptual diagram of interactions among the four major drivers of PM<sub>2.5</sub> change.

#### 2.3.1 기상요인

기상요인을 분석하기 위해 선행 연구 (Bae *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2021c; Kang *et al.*, 2020)를 참조하였다. 우선 분석 기간 동안 인위적 배출량을 고정시키고 기상 입력자료만을 변화하여 대기질 모사를 수행하였다. 기상 변동만이 고려된 모사에서 BS 대비  $i$ 번째 계절관리제 ( $S_i$ )의 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화율을 계산하고, 이를 관측 농도의 변화에 곱하여  $\Delta C_{Meteorology}$ 을 식 (1)과 같이 산정하였다.

$$\Delta C_{Meteorology}^{S_i-BS} = \Delta C_{OBS}^{S_i-BS} \times \Delta C_{MOD}^{BS-S_i} / C_{MOD}^{BS} \quad (1)$$

$\Delta C_{Meteorology}^{S_i-BS}$ 는 BS 대비  $S_i$  기간에 대한 기상요인 변화를 의미한다.  $\Delta C_{OBS}^{S_i-BS}$ 는 BS 대비  $S_i$ 의 기간평균 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도 차이이며,  $\Delta C_{MOD}^{BS-S_i}$ 는  $S_i$  대비 BS의 기간평균 PM<sub>2.5</sub> 모사 농도 차이이다.  $C_{MOD}^{BS}$ 는 BS의 기간평균 PM<sub>2.5</sub> 모사 농도이다.

국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 기상요인과 배출요인 변화로 나누면,  $\Delta C_{OBS}^{S_i-BS}$ 에서  $\Delta C_{Meteorology}^{S_i-BS}$ 를 제외한 나머지 부분은 배출요인의 변화 ( $\Delta C_{Emissions}^{S_i-BS}$ )이다 (식 (2)).

$$\Delta C_{OBS}^{S_i-BS} = \Delta C_{Meteorology}^{S_i-BS} + \Delta C_{Emissions}^{S_i-BS} \quad (2)$$

#### 2.3.2 국외 영향

본 연구에서는 국외 영향을 추정하기 위해 Brute Force Method (BFM)를 이용한 민감도 실험을 추가하였다. BFM은 기본 조건에서의 대기질 모사와 특정 오염원에 대한 배출량을 변화시킨 대기질 모사의 비교를 통해 대상 오염원의 대기질에 대한 영향을 추정하는 민감도 분석 방법이다 (Clappier *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017b). 본 연구에서는 국외 배출량을 50% 삭감하여 민감도 모사를 수행하고, 기본모사와 비교하여 국외 영향 (Zero-out Contribution for foreign;  $ZOC_{foreign}$ )를 산정하였다 (식 (3)). 이때 최근 기간에 대한 배출동향을 반영하지 못하는 대기질 모사의 제한점과 함께 대기질 모사의 불확도를 감안하기 위하여 Bae *et al.* (2022)이 제안한 풍상 기여농도 보정방법을 적용하여 보정하였다.

$$ZOC_{foreign} = (MOD_{base} - MOD_{sens}) \times \frac{100\%}{\Delta E (\%)} \times \frac{OBS_{upwind}}{MOD_{base,upwind}} \quad (3)$$

식 (3)에서  $MOD_{base}$ 와  $MOD_{sens}$ 는 각각 기본모사 및 민감도 모사의  $PM_{2.5}$  농도이며,  $\Delta E (\%)$ 는 배출량 변화율(50%)을 의미한다.  $OBS_{upwind}$ 와  $MOD_{base,upwind}$ 는 각각 풍상지역인 중국에 대한 관측 및 기본모사의  $PM_{2.5}$  농도를 이용하였다.

식 (3)을 BS, S1, S2, 그리고 S3에 대해서 각 적용하면 BS 대비  $S_i$  기간 동안 국외 영향 변화를 식 (4)와 같이 계산할 수 있다.

$$\Delta C_{Foreign\ impact}^{S_i-BS} = ZOC_{foreign}^{S_i} - ZOC_{foreign}^{BS} \quad (4)$$

식 (3)과 (4)에서 산정된 국외 영향은 각 기간 동안 달라지는 기상 여건이 반영된 대기질 모사와 풍상지역의 관측 농도를 기반으로 산정된다. 따라서 산정되는 국외 영향에는 국외 배출량 변화와 장거리 이동에 영향을 미치는 지역적인 기상요인이 함께 적용된 것으로 가정할 수 있다.

### 2.3.3 국내 배출량 변화

계절관리제 기간 동안 국내 배출량 변화에는 국내 정책 이행에 따른 배출량 감소와 COVID-19 발생에 따른 사회적 거리두기 등의 효과가 복합적으로 작용될 수 있으며, 이로 인해 대상 기간 동안 정확한 국내 배출량 감소 정도는 파악하기 어렵다. 이에 기상요인과 배출영향을 이용하여 간접적으로 추정하였다. 기상요인은 대기질 모사에서 고려되므로, 국내  $PM_{2.5}$  모사 농도에 포함된 국외 영향을 보정한다면 이는 기상요인과 국외 배출량 변화가 반영된 농도이다. BS 대비

$S_i$  기간에 대한 국외 영향이 보정된 국내  $PM_{2.5}$  모사 농도 차이를  $\Delta C_{MOD}^{S_i-BS}$  라 하면 식 (5)와 같이 표현될 수 있다.

$$\Delta C_{MOD}^{S_i-BS} = \Delta C_{Meteorology\ impact}^{S_i-BS} + \Delta C_{Foreign\ emissions}^{S_i-BS} \quad (5)$$

따라서, 관측 농도의 변화에서  $\Delta C_{MOD}^{S_i-BS}$ 를 제외하면, 국내 배출량 변화를 추정할 수 있다(식(6)). 이에 대한 결과는 3.4절에서 논의하였다.

$$\Delta C_{Domestic\ emissions}^{S_i-BS} = \Delta C_{OBS}^{S_i-BS} - \Delta C_{MOD}^{S_i-BS} \quad (6)$$

## 3. 결 과

### 3.1 계절관리제 기간 동안 국내 $PM_{2.5}$ 농도의 변화

BS 기간 평균  $PM_{2.5}$  농도는 남한의 서쪽 지역에서  $38.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이상으로 높게 관측되었으나, S1~S3 기간 동안 농도가 점차 감소하는 경향을 보였다(그림 3). 국내 평균  $PM_{2.5}$  관측 농도는 BS 기간  $33.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 S3 기간에는  $23.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 30% 감소하였다(표 2).  $PM_{2.5}$  관측 농도가 크게 낮아진 이유는 BS 기간 중 2019년 3월 초에  $PM_{2.5}$  고농도가 1주일 이상 지속되어 기록적으로 높은 농도를 보였기 때문이다. 또한 S1 기간 중, 2020년 초에 발생한 COVID-19에 의한 경제 활동 둔화 및 사회적 거리두기 등 배출량 감소로 인해  $PM_{2.5}$  농도가 감소하였을 것으로 판단된다(Song et al., 2021; Wang et al., 2021; Han and Hong, 2020; Koo et al., 2020). S1과 S2 기간 동안, 국내  $PM_{2.5}$  관측 농도는 각각  $24.5, 24.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 BS 기간에 비해 26%, 27% 감소하였다. 수도권 평균  $PM_{2.5}$  관측 농도 역시

**Table 2.** Observed period mean  $PM_{2.5}$  concentrations over the selected sub-regions during BS – S3.

| unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$ | China | BTH  | YRD  | Shandong | South Korea | SMA  |
|--------------------------------|-------|------|------|----------|-------------|------|
| BS                             | 59.0  | 72.0 | 54.9 | 70.8     | 33.2        | 37.0 |
| S1                             | 52.9  | 64.7 | 43.5 | 62.0     | 24.5        | 28.1 |
| S2                             | 51.7  | 58.9 | 45.0 | 60.6     | 24.1        | 28.0 |
| S3                             | 45.2  | 46.5 | 43.6 | 51.5     | 23.1        | 25.8 |

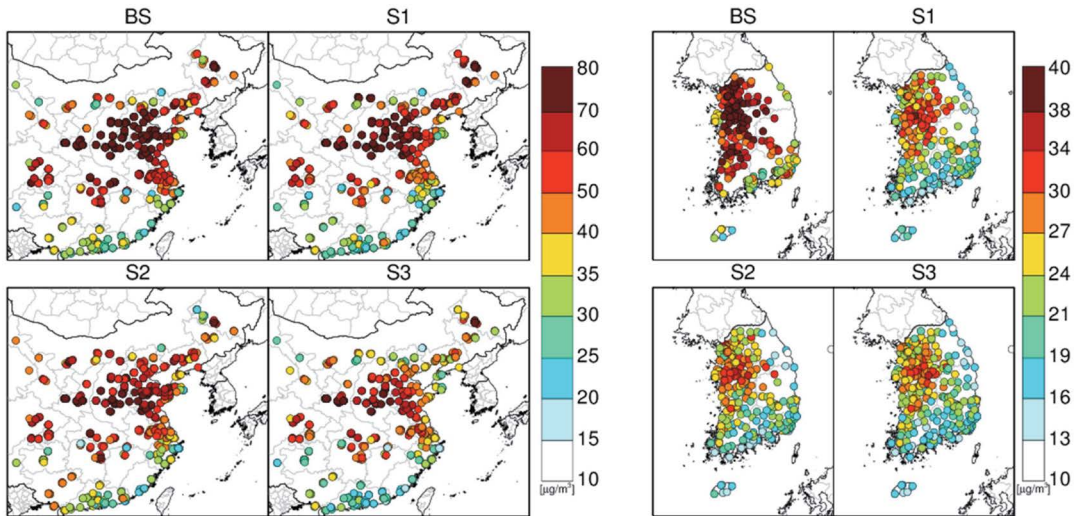


Fig. 3. Spatial distributions of observed period mean PM<sub>2.5</sub> concentrations during BS – S3 in China (left) and South Korea (right).

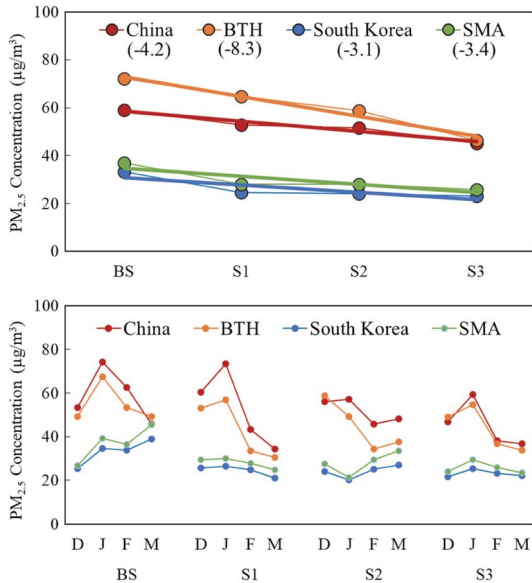
BS에 비해 S1~S3 기간 동안 24~30%의 유사한 감소를 보였다.

분석 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화는 풍상지역인 중국에서도 유사하게 나타났다. BS 기간 동안 중국의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 남부에서 40.0 µg/m<sup>3</sup> 이하, 중북부에서 50.0 µg/m<sup>3</sup> 이상으로 분석되었으며 S1~S3 기간 동안 점차 감소하였다(그림 3). 중국 전역과 Beijing-Tenjin-Hebei (BTH) 지역에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 BS 기간에 각각 59.0, 72.0 µg/m<sup>3</sup>으로 높았으나, S1과 S2 기간에는 10~18% 감소하였으며, S3 기간에는 23%, 35% 감소를 보였다. 이러한 풍상지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화는 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에도 영향을 주었을 것으로 예상되며, 이에 대한 보다 자세한 논의는 3.3절에서 다루었다. 또한, S1과 S2 기간과 비교하여 S3 기간 동안 중국과 국내 모두에서 PM<sub>2.5</sub> 농도가 감소 폭이 증가하였다. 이러한 연차별 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에는 배출량뿐 아니라 기상요인이 함께 작용할 수 있다. PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에 대한 기상요인은 다음 절에서 논의하였다.

그림 4는 지역별 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변화를 보인 것으로, 분석 기간 동안 제시된 네 지역 모두에서 감소세를 보였다. 특히, BTH 지역에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소가 중국 전역에 비해 빠르며, 국내 역시 수도권 지역에서의 농

도 감소가 국내 전체 평균에 비해 크다. 선형 회귀식에서 대상 기간 평균 PM<sub>2.5</sub> 감소율을 보이는 기울기는 BTH와 수도권에서 각각 -8.3, -3.4 µg/m<sup>3</sup>/year로 중국과 국내 전역의 -4.2, -3.1 µg/m<sup>3</sup>/year에 비해 급한 감소를 보인다. 그림에 보이지는 않았으나 산동지역에서는 대상 기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 감소세는 -6.0 µg/m<sup>3</sup>/year로 보여 겨울철 국내 풍상에 해당하는 지역에서 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소가 높았다.

Bae *et al.* (2020b)은 2010~2017년 동안 국내 17개 시도에 대한 중국 배출영향을 40~65%로 추정한 바 있다. 따라서, 최근 중국의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 크게 감소하였다고 하더라도 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향은 지속될 수 있다. 동시에, 이러한 중국과 BTH 지역에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소는 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소에도 영향을 미칠 수 있다. 다만, 그림 4에서 볼 수 있듯이 중국과 국내 월평균 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변동은 항상 일치하지 않는다. 예를 들어, S1 기간의 경우 1월 동안 중국과 BTH에서는 PM<sub>2.5</sub> 농도가 다른 해 동기에 비해 높게 관측되었으나, 국내 및 수도권에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 S2와 S3 기간 동 기간과 유사한 수준이다. 또한 BS 기간 중 2019년 3월의 경우, 국내의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 다른 월평균 농도에 비교하여 가장 높았으나, 중국과 BTH

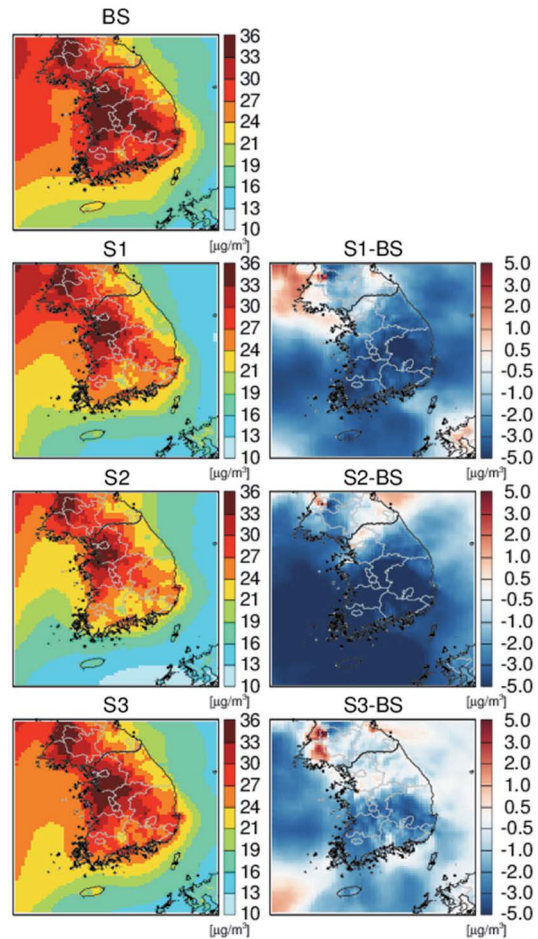


**Fig. 4.** Observed period (top) and monthly mean (bottom) PM<sub>2.5</sub> concentrations in China, Beijing-Tenjin-Hebei (BTH), South Korea, and SMA. Thick solid lines indicate linear regressions. The linearized period mean concentration change rates in μg/m<sup>3</sup>/year over the selected sub-regions are presented in parentheses.

에서는 주변 월에 비해 PM<sub>2.5</sub> 농도가 높지 않았다. 이러한 결과는 대기오염물질의 장거리 이동 과정에서 중요한 역할을 담당하는 기상 조건에 의해 풍하지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 풍상과 항상 연계되어 변화하지 않으며, 풍상지역에서 PM<sub>2.5</sub> 농도가 증가하더라도 풍하지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 상대적으로 낮게 유지될 수 있다는 점을 보여준다(예를 들어 동풍 유입 등).

### 3.2 기상 및 배출요인

BS 대비 S1~S3 기간 동안의 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소는 대기질 모사에서 그림 5와 같이 나타난다. 대기질 모사 시 인위적 배출량을 고정하였으므로 모사된 PM<sub>2.5</sub> 농도의 변화는 기상 조건 변화로부터 기인하며, 이를 2.3.1절에서 기상요인으로 정의하였다. PM<sub>2.5</sub> 관측 농도는 다른 기간과 비교하여 S3 기간 동안 가장 낮으나, 모사 결과에서는 S2 기간에 가장 낮았다. 따라서, 다른 조건이 동일하다고 가정할 경우 S3 동안의



**Fig. 5.** Spatial distributions of simulated period mean PM<sub>2.5</sub> concentration and their differences during BS-S3.

뚜렷한 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도 감소는 국외 또는 국내의 배출량 변화에 의한 것으로 볼 수 있다.

그림 5에서 PM<sub>2.5</sub> 농도는 기상요인에 의해 국내뿐 아니라 서해상에서도 함께 낮아졌다. 계절관리제가 시행되는 겨울철 동안 주풍향이 북서풍인 점을 감안하면, 서해상에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도가 감소하는 이유는 기상요인에 의해 중국 등 풍상지역으로부터 유입되는 배출 영향이 감소하였기 때문이다. 본문에 보이지는 않았으나, S1~S3 동안 중국 톈진, 산둥, 상해 등 중부 지역에서의 PM<sub>2.5</sub> 모사 농도는 BS 기간에 비해 감소하였다.

그림 6은 대상 기간별 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화와 함께 기상 요인 및 배출요인의 변화를 구분하여 제시한 것이다. 배출요인은 2.3.1절의 방법론에 따라 구분하였다. BS 기간 대비 S1과 S2 기간 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 배출 요인 변화에 의해 각각 5.9, 5.5  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였고, S3 기간 동안에는 8.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다. 이에 반해 기상 요인 변화에 의한 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 BS 대비 S1, S2, S3 기간에 대해 각각 2.8, 3.6, 1.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다. 기상요인에 의한 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 감소는 S1~S3 기간 동안 꾸준히 지속되었지만, 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소가 가장 두드러졌던 S3 기간 동안 주된 원인은 기상요인보다는 배출요인에 의한 것으로 분석되었다.

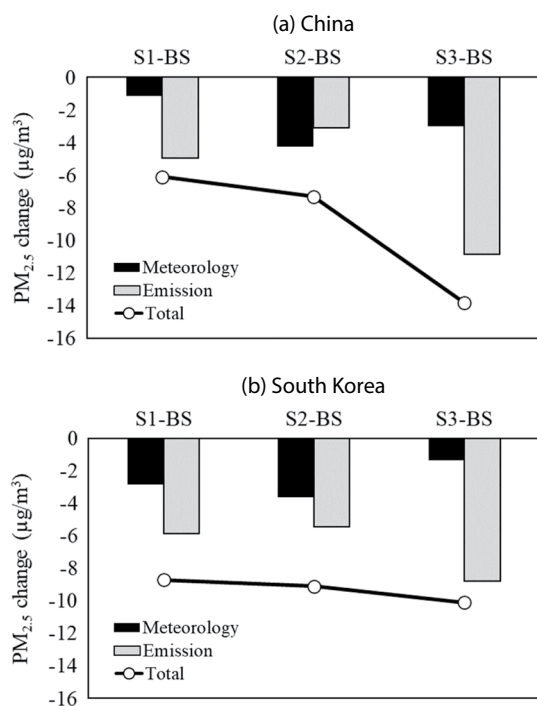
PM<sub>2.5</sub> 농도 감소에서 기상과 배출의 역할은 중국에서도 유사하게 나타났다. S1~S3 기간 동안 중국의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 기상요인에 의해 1.2, 4.2, 3.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였으며, 배출요인 변화에 의해 4.9, 3.1, 10.8  $\mu\text{g}/\text{m}^3$

$\text{m}^3$  감소하였다. 이때, 중국과 국내에서 배출요인 변화에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소가 연차별로 증가하였다. 이는 연차별로 효과가 누적되지 않는 기상요인과 달리, 배출요인의 경우 추가적인 배출 관리 시행에 따라 이전 기간의 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소 효과에 더해연도의 배출 감소 효과가 부가되었기 때문이다.

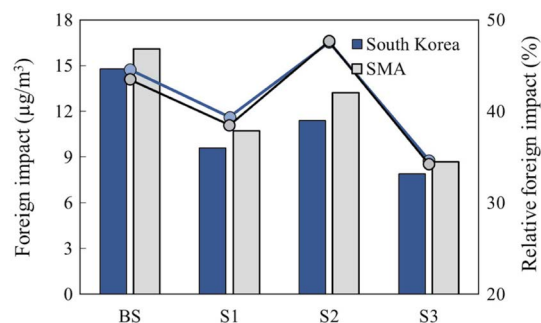
### 3.3 국외 영향

BS~S3의 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향을 분석하였다. 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향은 수도권 등 서북 지역에서 높고, 울산, 부산 등 동남 지역으로 갈수록 낮아진다 (Bae *et al.*, 2020a, 2018; Kim *et al.*, 2017a). 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향은 BS 기간에 비해 S1~S3 동안 낮아졌다(그림 7). 지역별로는 수도권과 충남 등에서 15.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이상의 국외 영향이 나타나며, 부산, 경남 등에서는 10.0  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  이하로 낮은 공간 분포를 보인다(그림 S1).

국외 영향은 BS 기간 동안 전국과 수도권에 대해 14.8, 16.1  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, S1과 S2 기간에는 전국에 대해 9.6, 11.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮아지고, 수도권에 대해서는 10.7, 13.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소하였다. 특히, S3 기간 동안 국외 영향은 전국과 수도권에 대해 각각 7.9, 8.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, BS 기간과 비교하여 각각 47%, 46% 낮아졌다. 이러한 BS 대비 S3 기간의 국외 영향 감소는 동기간에 걸친 국내 및 수도권의 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도 감소 중 44% (6.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 43% (7.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 해당한다. 한편



**Fig. 6.** Impacts of meteorology and regional emissions on changes in PM<sub>2.5</sub> concentrations during S1-S3 in (a) China and (b) South Korea.



**Fig. 7.** Period mean foreign impact on PM<sub>2.5</sub> concentration in South Korea and SMA from BS to S3.



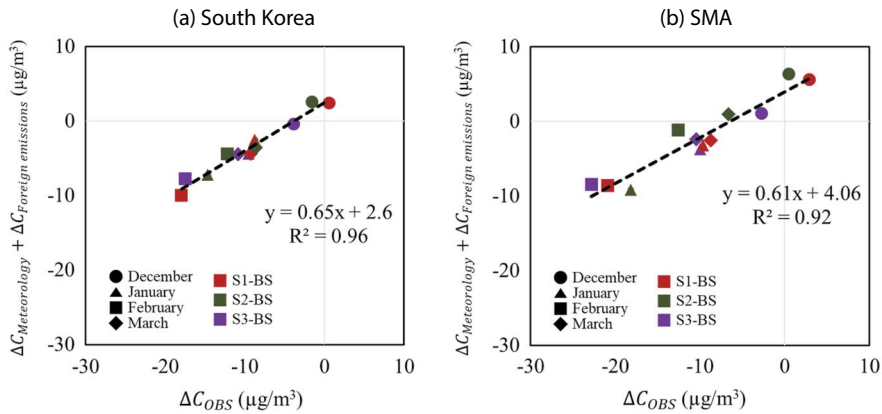


Fig. 8. Scatter plots between change in  $PM_{2.5}$  observation and  $PM_{2.5}$  change due to meteorology and foreign emission changes during S1 – S3 in (a) South Korea and (b) SMA.

국내  $PM_{2.5}$  관측 농도 대비 국외 영향은 S3에 34%로 가장 낮고, S2에 48%로 가장 높게 분석되었다.

### 3.4 국내 배출량 변화

그림 8은 BS 대비 S1~S3 기간의 개별 월평균  $PM_{2.5}$ 의 관측 농도 변화와 국외 영향이 보정된 국내  $PM_{2.5}$  모사 농도 변화 간의 산포도를 보인 것이다. BS 대비 S1~S3 기간의 월평균  $PM_{2.5}$  관측 농도 변화는 전국 전 지역에서는  $-18.0 \sim 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 수도권에서는  $-22.8 \sim 2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 변화를 보였다. 이에 반해, 국외 영향이 보정된 국내  $PM_{2.5}$  모사 농도는 동 기간 동안 전국에서  $-9.9 \sim 2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 수도권에서는  $-9.1 \sim 6.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  사이에서 변화하였다.

식 (7)에 따라, 그림 8의 선형 회귀식에서 기울기는  $PM_{2.5}$  관측 농도의 변화에서 국내 배출량 변화를 제외한 기상요인과 국외 배출량 변화에 의한 비율이 된다. 따라서 국내 배출량 변화에 따른 국내  $PM_{2.5}$  농도 변화율은 1과 회귀식의 기울기의 차이에서 산정할 수 있다. 이렇게 산정된 BS~S3 기간 동안 국내 배출량 변화에 의한  $PM_{2.5}$  농도 감소는 전국과 수도권에서 각각 35%, 39%로 추정된다. 17개 시도에 대해 이를 분석해보면,  $-11.5 \sim 56.4\%$ 의 범위를 보였다(그림 9). 국내 배출량 변화에 의한 국내  $PM_{2.5}$  농도 변화율은 충남에서 56.4%로 가장 높게 분석되었다. 충남의 경우

수도권 지역에 비해 인구가 밀집도가 낮으며, 산업 및 발전 부문의 배출량이 높다. 따라서 COVID-19와 같은 사회적 거리두기의 효과는 수도권에 비해 낮을 것으로 예상된다. 또한, 계절관리제에서 배출량 저감이 산업, 발전 및 수송 부문에 집중되었음을 감안하면 (KMOE, 2021b) 계절관리제 기간 동안의 충남  $PM_{2.5}$  농도 감소는 자체 배출 감소에 의한 영향이 지배적일 것으로 사료된다. 이어서 세종과 전북에서 50% 이상의 국내 배출 변화에 의한 기여율이 분석되었으나, 해당 지역의 경우 자체 배출 변화에 의한 영향과 수도권과 충남 등의 지역에서 배출 저감 효과가 풍부히 이동되어 나타나는 것으로 추정된다.

표 2에서 BS 대비 S3 기간 동안 국내  $PM_{2.5}$  관측 농도가  $10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다면, 이 가운데  $3.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $=10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 0.35$ )은 국내 배출량 감소에 의한 것이 된다. 다만 앞서 언급한 바와 같이 국내 배출량의 감소에는 계절관리제와 같은 정책 효과뿐 아니라, COVID-19 등과 같은 사회적 요인에 의한 감소가 포함된다. 같은 방법으로 BS 대비 S3 기간 동안 수도권  $PM_{2.5}$  농도 감소 중 국내 배출량 감소 효과는  $4.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  ( $=11.2 \mu\text{g}/\text{m}^3 \times 0.39$ )으로 추정된다. 17개 시도에 대해 국내 배출량 감소 효과는  $-0.7 \sim 7.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 분석되었다(그림 9).

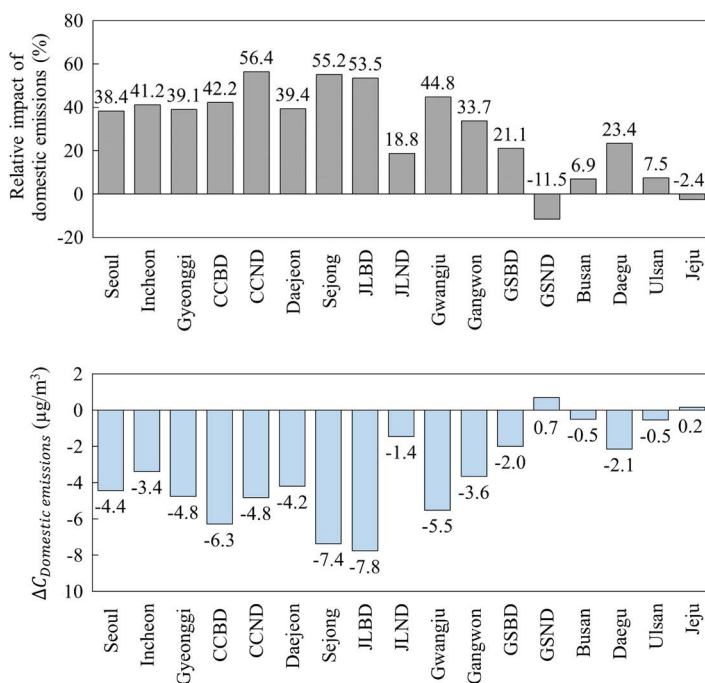


Fig. 9. Relative (top) and absolute (bottom) changes in the domestic emission impacts on provincial PM<sub>2.5</sub> concentrations during BS-S3.

#### 4. 결 론

국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 1, 2, 3차 계절관리제 기간 동안 시행 전 동기 대비 8.7, 9.1, 10.1 μg/m<sup>3</sup> (26~30%) 감소하였다. 1~3차 계절관리제 기간 동안 배출 관리 효과는 누적되어 시행 전 대비 감소한 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도가운데 87%가 배출 감소에 의한 것으로 분석되었다. 다만 이 배출 감소 영향에는 국내 자체 배출량 저감뿐만 아니라 국외 배출 변화도 포함된다.

국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에서 기상요인과 국외 배출량 변화의 영향을 제외하고 국내 배출량 변화의 영향만을 추정하였다. 계절관리제 시행 기간 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소 중 35%인 3.5 μg/m<sup>3</sup>이 국내 배출량 변화에 의한 것으로 분석되었다. 국내 배출량 변화에는 계절관리제 시행과 같은 배출량 저감 정책의 효과 이외에도 COVID-19 등에 의한 사회경제적 요인이 포함된다. 동일한 분석에서 계절관리제 동안 국내 배

출량 감소는 수도권 지역의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 39%가량 낮춘 것으로 분석되었다. 국내 17개 시도 가운데 충남에서 계절관리제 동안 배출 변화 요인에 의해 PM<sub>2.5</sub> 농도가 가장 크게 56% 감소하였다. 해당 지역의 경우 COVID-19에 의한 사회적 거리두기 효과가 서울 등 대도시에 비해 상대적으로 작은 것으로 가정하면, 대기질 개선 대책에 따른 배출 저감 영향이 상당부분을 차지한 것으로 보인다.

국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 자체 배출에 의한 영향과 장거리 이동을 통한 국외 배출 영향을 동시에 받는다. 계절관리제에 의한 정량·정성적인 대책별 배출 저감량이 산정된다면, 향후 연구에서는 PM<sub>2.5</sub> 감소에 대한 계절관리제 효과만을 구분할 수 있을 것으로 예상된다. 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화 요인을 보다 상세히 설명하기 위해서는 기상과 국외 배출량 변화 영향을 구분하는 것은 물론, 국내 배출량 관리 대책과 COVID-19와 같은 사회경제적 요인 등을 구분한 평가가 요구된다.

다만, PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 요인을 세분할 경우, 현재 적용되는 방법으로는 이들 영향 요인 사이에 존재하는 상호 영향(cross-sensitivity)을 설명하기 어려우므로 향후 연구에서는 이를 구분할 수 있는 방법론 마련도 함께 필요해 보인다.

## 감사의 글

본 연구는 삼성전자 종합 기술원의 지원을 받아 수행하였습니다.

## References

- 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<sub>2.5</sub> concentrations, *Environment International*, 163, 107214. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107214>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, J., Kim, S. (2021) Role of Emissions and Meteorology in the Recent PM<sub>2.5</sub> Changes in China and South Korea from 2015 to 2018, *Environmental Pollution*, 270, 116233. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.116233>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020a) 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, C., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, Y., Woo, J.-H., Kim, S. (2020b) Updating Chinese SO<sub>2</sub> 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, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2019) 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, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2018) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (V) Estimation of North Korean Emission Contribution, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 294-305. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.2.294>
- 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>
- Cheng, Y., Cao, X.B., Liu, J.M., Yu, Q.Q., Zhong, Y.J., Zhang, Q., He, K.B. (2022) Exploring chemical changes of the haze pollution during a recent round of COVID-19 lockdown in a megacity in Northeast China, *Chemosphere*, 292, 133500. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.133500>
- 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(11), 4245-4256. <https://doi.org/10.5194/gmd-10-4245-2017>
- Guenther, C.C. (2006) Estimates of global terrestrial isoprene emissions using MEGAN (Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature), *Atmospheric Chemistry Physics*, 6, 3181-3210. <https://doi.org/10.5194/acp-7-4327-2007>
- Han, C., Hong, Y.C. (2020) Decrease in Ambient Fine Particulate Matter during COVID-19 Crisis and Corresponding Health Benefits in Seoul, Korea, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 17(15), 5279. <https://doi.org/10.3390/ijerph17155279>
- Jang, Y., Lee, Y., Kim, J., Kim, Y., Woo, J.-H. (2020) Improvement China Point Source for Improving Bottom-Up Emission Inventory, *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 107-118. <https://doi.org/10.1007/s13143-019-00115-y>
- Ju, H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Kim, S. (2018) Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 101-119. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.1.101>
- Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Bae, C., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) The impacts of COVID-19, meteorology, and emission control policies on PM<sub>2.5</sub> drops in Northeast Asia, *Scientific Reports*, 10(1), 22112. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79088-2>
- 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, E., You, S., Bae, M., Lee, J., Seo, I., Lim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.-H. (2017b) Domestic Ozone Sensitivity to Chinese Emissions Inventories: A Comparison between MICS-Asia 2010 and INTEX-B 2006, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33, 480-496. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.480>
- 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. (2021a) 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(13), 10065-10080. <https://doi.org/10.5194/acp-21-10065-2021>
- Kim, Y., Kim, E., Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, S. (2021b) Impact of Diesel Vehicle Emissions on PM<sub>2.5</sub> Concentrations in Seoul Metropolitan Area during the Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 169-190. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.1.169>
- Kim, S., Bae, M., Kim, E., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, Y., You, S., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2021c) Identifying the Drivers of PM<sub>2.5</sub> Concentration Changes between December 2019 and December 2020 in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37, 371-387. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.371>
- 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=286&orgCd=&boardId=1370620&boardMasterId=1&boardCategoryId=39&decorator=> (accessed 4.5.22).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2021a) <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).
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2021b) <https://www.blueskyday.kr/down/plan2.pdf>
- Koo, J.H., Kim, J., Lee, Y.G., Park, S.S., Lee, S., Chong, H., Cho, Y., Kim, J., Choi, K., Lee, T. (2020) The implication of the air quality pattern in South Korea after the COVID-19 outbreak, *Scientific Reports*, 10(1), 22462. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-80429-4>
- Lim, B., Lee, M., Choi, J., Park, S.M., Lee, S.B., Song, M. (2018) New Particle Formation and Growth at Baengnyeong Island in 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 831-840. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.6.831>
- NCEP (2000) NCEP FNL Operational Model Global Tropospheric Analyses, continuing from July 1999. <https://doi.org/10.5065/D6M043C6>
- 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., Bae, M., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, C., Kim, Y., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Meteorological and Emission Influences on PM<sub>2.5</sub> Concentration in South Korea during the Seasonal Management: A Case of December 2019 to March 2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 442-463. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.4.442>
- Song, Y., Lin, C., Li, Y., Lau, A.K.H., Fung, J.C.H., Lu, X., Guo, C., Ma, J., Lao, X.Q. (2021) An improved decomposition method to differentiate meteorological and anthropogenic effects on air pollution: A national study in China during the COVID-19 lockdown period, *Atmospheric Environment*, 250, 118270. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118270>
- Uno, I., Wang, Z., Itahashi, S., Yumimoto, K., Yamamura, Y., Yoshino, A., Takami, A., Hayasaki, M., Kim, B.G. (2020) Paradigm shift in aerosol chemical composition over regions downwind of China, *Scientific Reports*, 10(1), 6450. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-63592-6>
- Wang, N., Xu, J., Pei, C., Tang, R., Zhou, D., Chen, Y., Li, M., Deng, X., Deng, T., Huang, X., Ding, A. (2021) Air Quality During COVID-19 Lockdown in the Yangtze River Delta and the Pearl River Delta: Two Different Responsive Mechanisms to Emission Reductions in China, *Environmental Science & Technology*, 555721-5730. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c08383>
- 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 SO<sub>2</sub> Emission Estimate, *Geophysical Research Letters*, 43, 9931-9938. <https://doi.org/10.1002/2016GL070204>
- Zhai, S., Jacob, D.J., Wang, X., Liu, Z., Wen, T., Shah, V., Li, K., Moch, J.M., Bates, K.H., Song, S., Shen, L., Zhang, Y., Luo, G., Yu, F., Sun, Y., Wang, L., Qi, M., Tao, J., Gui, K., Xu, H.,

Zhang, Q., Zhao, T., Wang, Y., Lee, H.C., Choi, H., Liao, H. (2021) Control of particulate nitrate air pollution in China, *Nature Geoscience*, 14(6), 389-395. <https://doi.org/10.1038/s41561-021-00726-z>

Zheng, B., Zhang, Q., Geng, G., Chen, C., Shi, Q., Cui, M., Lei, Y., He, K. (2021) Changes in China's anthropogenic emissions and air quality during the COVID-19 pandemic in 2020, *Earth System Science Data*, 13(6), 2895-2907. <https://doi.org/10.5194/essd-13-2895-2021>

## Authors Information

배민아(아주대학교 환경연구소 연구원) (bma829@ajou.ac.kr)

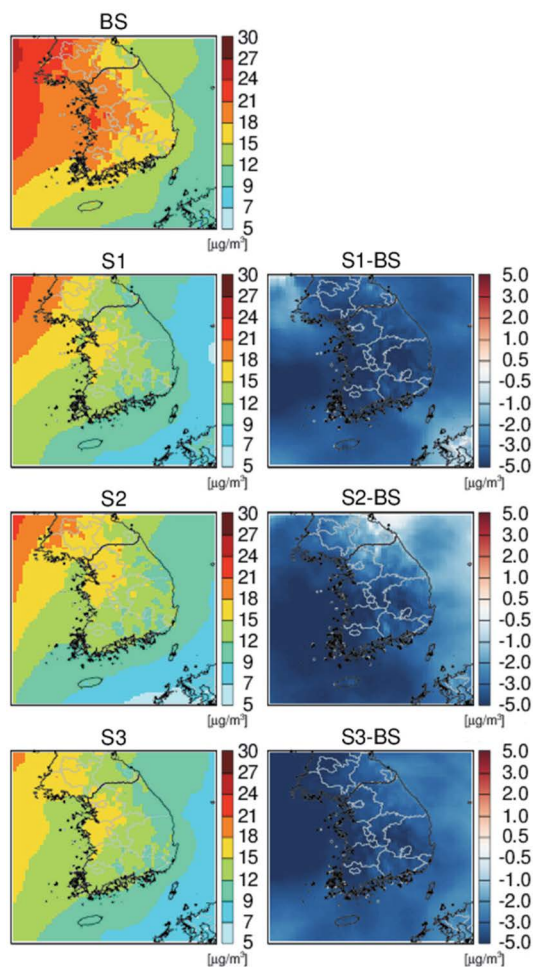
김세기(아주대학교 환경공학과 석사과정) (tprlska@ajou.ac.kr)

김순태(아주대학교 환경안전공학과 교수)  
(soontaekim@ajou.ac.kr)

## Supplementary Materials

**Table S1.** The number of valid air quality measurement sites during BS – S3.

|             | BS  | S1  | S2  | S3  |
|-------------|-----|-----|-----|-----|
| China       | 776 | 775 | 742 | 694 |
| South Korea | 321 | 382 | 390 | 448 |

**Fig. S1.** Spatial distributions of simulated period mean foreign emission impacts on PM<sub>2.5</sub> concentration and their differences during BS – S3.