

논문

# 전년 동기대비 2020년 12월 국내 초미세먼지 농도 변화 요인 분석 Identifying the Drivers of PM<sub>2.5</sub> Concentration Changes between December 2019 and December 2020 in South Korea

김순태\*, 배민아<sup>1)</sup>, 김은혜<sup>2)</sup>, 손규원<sup>1)</sup>, 강윤희<sup>2)</sup>, 김윤하<sup>2)</sup>,  
유승희<sup>1)</sup>, 김병욱<sup>3)</sup>, 김현철<sup>4),5)</sup>

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

<sup>2)</sup>아주대학교 환경연구소, <sup>3)</sup>미국조지아주환경청, <sup>4)</sup>미국국립해양대기청,

<sup>5)</sup>메릴랜드대학 기후·위성연구소

접수일 2021년 3월 5일  
수정일 2021년 4월 9일  
채택일 2021년 4월 15일

Received 5 March 2021  
Revised 9 April 2021  
Accepted 15 April 2021

\*Corresponding author

Tel : +82-(0)31-219-2511  
E-mail : soontakim@ajou.ac.kr

Soontae Kim\*, Minah Bae<sup>1)</sup>, Eunhye Kim<sup>2)</sup>, Kyuwon Son<sup>1)</sup>, Yoon-Hee Kang<sup>2)</sup>,  
Yunha Kim<sup>2)</sup>, Seunghee You<sup>1)</sup>, Byeong-Uk Kim<sup>3)</sup> and Hyun Cheol Kim<sup>4),5)</sup>

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

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

<sup>2)</sup>Environmental Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

<sup>3)</sup>Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, 30354, USA

<sup>4)</sup>Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD, 20740, USA

<sup>5)</sup>Cooperative Institute for Satellite Earth System Studies, University of Maryland, MD, 20740, USA

**Abstract** The observed monthly mean PM<sub>2.5</sub> concentration in South Korea during December 2020 has decreased by 2.3  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , compared to that during the same month in the previous year, but the drivers of the change have been veiled yet. This study quantitatively examines the roles of the potential drivers of the PM<sub>2.5</sub> decrease during December 2020. Air quality simulations for December 2019 and December 2020 show that the change in meteorology conditions have increased the PM<sub>2.5</sub> concentrations by 1.4  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in South Korea, but the changes in the Northeast Asian emissions have decreased the PM<sub>2.5</sub> concentrations by 3.7  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in the country. In addition, foreign emission impact on the nationwide PM<sub>2.5</sub> concentrations estimated from a set of the sensitivity simulations with the Community Multi-scale Air Quality model and adjusted with the surface observations in China has increased by 1.9  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  in December 2020, compared to that for December 2019. It means that the upwind foreign emission condition was not helpful in the downwind PM<sub>2.5</sub> decrease. On the contrary, the domestic impact has decreased by 4.2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  over the country, which compensated the increase in the foreign impact for the month. The observed monthly mean NO<sub>2</sub> concentrations have decreased by 5% and 8% for South Korea and the Seoul Metropolitan Area, respectively, compared to the same month in 2019. When a simple observation-based emission adjustment was applied, a 5% decrease in the national total NO<sub>x</sub> emissions for the month was estimated. The causality of NO<sub>2</sub> decrease still needs further investigations, but the seasonal PM<sub>2.5</sub> management and social distancing after the COVID-19 re-outbreak at the end of November might have led to the reduction in the anthropogenic emissions (i.e., NO<sub>x</sub>) and thus the PM<sub>2.5</sub> concentrations during the month.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, Meteorology, Emissions, Foreign and domestic impacts, Social distancing

## 1. 서 론

정부에서는 국내 초미세먼지 (Particulate matters of

which diameter is equal to or less than 2.5  $\mu\text{m}$ ; PM<sub>2.5</sub>) 농도가 전년 동기 대비 2020년 12월 동안 2  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 감소한 것으로 보고하였다. 이러한 PM<sub>2.5</sub> 농도의

변화는 자체 배출 및 대기 중 2차 생성, 중국이나 북한 등으로부터의 국외 유입, 기상 조건 변화의 관점에서 이해될 수 있다(Bae *et al.*, 2020d; Bae *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017a). 다만, 최근에는 전 세계적으로 COVID-19 (Coronavirus Disease-19)가 유행하면서 사회적 거리두기, 경제 둔화 등과 같은 요인들이 PM<sub>2.5</sub>를 비롯한 대기오염물질의 농도 변화에 대한 추가적인 동인으로 작용하였을 수 있다(Han and Hong, 2020; Kang *et al.*, 2020; Koo *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2020). Kang *et al.* (2020)은 2020년 2~3월 동안 COVID-19 확산과 더불어 동북아 지역에서의 사회경제적 변화에 따른 배출감소가 이전 3년 기간 대비 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소에 70% 이상 영향을 미친 것으로 분석하였다. 다만, 2020년 12월의 경우 국내에서는 COVID-19 재확산으로 사회적 거리두기가 강화되었지만, 국내 풍상지역인 중국에서는 이에 대한 공식적인 변화가 보고된 바 없다. 이처럼 지역별로 상이한 사회 여건 변화는 대기오염물질의 배출량 및 농도에도 중요한 영향을 미칠 수 있다.

환경부(KMOE, 2021)에서는 대기질 모사를 통해 2020년 12월 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 기상 요인에 의해 0.2 µg/m<sup>3</sup>, 계절관리에 따른 배출관리에 의해 1.1 µg/m<sup>3</sup>, 그리고 국외 배출영향과 사회적 여건 변화에 의해 0.4 µg/m<sup>3</sup>가량 감소한 것으로 설명하였다. 이러한 분석에 많이 이용되는 대기질 모사의 경우 입력 자료와 해석 방법 등에 따라 그 결과가 달라질 수 있다(Bae *et al.*, 2020d; Yamaji *et al.*, 2020; Chen *et al.*, 2019). 더욱이, 2020년 11월 말부터 시행된 사회적 거리두기 등 COVID-19 관련 영향이 2차 계절관리가 시작한 시점과 맞물리는 점 등을 고려할 때, 계절관리제 등 국내 대기질 개선 원인 분석을 위해서는 국내뿐 아니라 최근 동북아 지역에서 급변하는 기상 및 배출 여건 등 다양한 측면에서의 검토가 함께 이루어져야 한다(Bae *et al.*, 2020c; Uno *et al.*, 2020).

본 연구에서는 2020년 12월 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화 요인을 정량적으로 파악하고자 하였다. 이를 위해 1) 대상기간 동안 PM<sub>2.5</sub> 농도와 기상 자료 등 관측자료

의 시간 변화를 분석하고, 2) 대기질 모사를 활용하여 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 기상 및 배출 영향을 분리하여 살펴보았다. 이와는 별개로 3) 국외 유입 영향과, 4) 국내 배출 영향의 변화를 전년 동기 대비 시도별로 구분하여 비교하였다. 또한, 5) 국내에서 배출밀도가 높고, 대기 중에서 체류시간이 짧아 장거리 이동이 어려운 NO<sub>2</sub>의 관측농도를 바탕으로 해당 기간 동안 국내 시도별 NO<sub>x</sub> 실배출량을 추정하고, 전년 동기 대비 변화를 분석하였다.

## 2. 연구 방법

### 2.1 관측자료

전년 동기 대비 2020년 12월의 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 살펴보기 위하여, 해당 기간 동안의 국내 도시 대기측정망 자료를 이용하였다. 각 측정소의 시간별 관측자료가 하루 중 75% 이상 이용 가능할 날에 대하여 일평균 농도를 마련하였으며, 이를 이용하여 월평균 농도를 산정하였다. 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 농도는 각 지자체 내에 위치하는 측정소의 유효 관측자료를 평균하여 이용하였다. 국내 전체 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 산정 시에는 각 시도별 관측소 수와 상관없이 시도별 농도를 산술 평균하였다. 관측자료는 대상 기간인 2020년 12월 외에 2020년 10~11월, 그리고 2019년 10~12월 자료를 별도로 준비하여, 월 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화와 전년 동기 대비 농도 변화를 함께 비교하였다. PM<sub>2.5</sub> 이외에 NO<sub>2</sub> 농도 등 다른 대기오염물질 관측자료도 같은 방법으로 준비하였다. 또한, 동일 기간에 대해 국내 풍상지역의 대기질 조건을 함께 검토하기 위하여 중국의 Chinese National Ambient Air Quality Monitoring Network (CNAAQMN)에서 제공하는 1,854개의 측정소 자료를 이용하였다. 여기에는 1시간 평균 PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, CO, NO<sub>2</sub>, O<sub>3</sub> 및 SO<sub>2</sub> 농도 자료가 포함된다.

### 2.2 기상 및 배출 영향 변화 추정

대기오염물질의 농도 변화 요인은 크게 기상 변화

와 배출 변화로 나누어 볼 수 있다(Kang *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017c). 본 연구에서는 Son *et al.* (2020)과 동일한 방법을 이용하여 대상 기간 중 기상 변화와 배출 변화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 분리하여 살펴 보았다. Zhao *et al.* (2020)도 이와 같은 방법을 적용하여 COVID-19 기간 동안 기상 영향을 제외한 중국의 대기오염물질 농도 변화를 추정하는 바 있다. 분석을 위해 2019년 10~12월과 2020년 10~12월에 대해 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock and Klemp, 2008) 모델과 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality; Byun and Schere, 2006) 모델을 이용하여 기상-대기화학수송 모사를 수행하였다. 대기질 모사 시에는 2019년과 2020년 12월에 대해 동일한 배출량을 이용하였다. 따라서, 모사된 대기오염물질의 농도 변화는 기상 조건 변화에 의한 것으로 가정하였다(Bae *et al.*, 2020c; Son *et al.*, 2020). 다만, 모사농도와 관측농도의 차이를 고려하여, 기상 조건 변화에 따른 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화(이하 ‘기상요인’)를 다음 식(1)과 같이 산정하였다.

$$\Delta C_{Meteorology}^{2020-2019,m} = \Delta C_{simulated}^{2020-2019,m} \times [C_{observed}^{2020,m} / C_{simulated}^{2020,m}] \quad (1)$$

여기에서,  $\Delta C_{Meteorology}^{2020-2019,m}$ 는 2019년 m월 (i.e., 10, 11, 12월) 대비 2020년 m월 동안 기상요인을 의미한다.  $\Delta C_{simulated}^{2020-2019,m}$ 는 2019년과 2020년 m월에 대한 월평균 대상 물질 (i.e., PM<sub>2.5</sub>) 모사농도의 차,  $C_{observed}^{2020,m}$ 과  $C_{simulated}^{2020,m}$ 는 각각 2020년 m월에 대한 월평균 관측 농도와 모사농도를 나타낸다.

배출 변화에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화(이하 ‘배출요인’)는 다음 식(2)와 같이 산정하였다.

$$\Delta C_{Emissions}^{2020-2019,m} = C_{observed}^{2020,m} - \Delta C_{Meteorology}^{2020-2019,m} \quad (2)$$

여기에서,  $\Delta C_{Emissions}^{2020-2019,m}$ 는 2019년 대비 2020년 m월 동안 배출량 변화에 따른 대기오염물질의 농도 변화를 나타내며, 배출 조건 변화로 인한 대기 중 1차 및 2차 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 포함한다. 제시된 방법론에서 기상 요인과 배출 요인을 명확히 구분하는 것은

불가능하며, 식(1)에 제시된 관측 기반 보정 역시 다른 불확도를 유발할 수 있다. 이 경우 식(1)에서 유발된 오차 원인은 식(2)에서 산정된 배출 요인에도 영향을 미친다. 이러한 불확도를 개선하기 위해서는 향후 풍상과 풍하, 그리고 이동 중간 지점 등에서의 성분별 관측 농도를 이용한 방법론의 평가와 개선이 필요하다. 대기질 모사 시, 국내 배출량 입력자료는 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 2016을 이용하였으며, 나머지 모사 옵션은 Kang *et al.* (2021)를 참고할 수 있다.

### 2.3 국외 및 국내 배출 영향 추정

국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 국외 배출 영향(이하 ‘국외 영향’)을 크게 받는 것으로 알려져 있다(Bae *et al.*, 2020d; Bae *et al.*, 2019). 본 연구에서는 대상기간 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향 변화를 분석하기 위해 국외 배출량 50% 삭감에 따른 민감도 모사 (Brute Force Method)를 수행하였으며, 식(3)과 같이 국외 영향을 산정하였다(Bae *et al.*, 2020d; Kim *et al.*, 2017b).

$$C_{Foreign\ impact}^{y,m} = 2(C_{Base}^{y,m} - C_{Perturbation}^{y,m}) \times C_{Foreign,Observed}^{y,m} / C_{Foreign,Simulated}^{y,m} \quad (3)$$

여기에서,  $\Delta C_{Foreign\ impact}^{y,m}$ 는 y년 m월의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향으로,  $C_{Base}^{y,m}$ 와  $C_{Perturbation}^{y,m}$ 은 각각 y년 m월에 대한 월평균 기본 모사(Base)와 배출량 변화(Perturbation) 후 모사에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도를 나타낸다. 국외 배출량을 50% 삭감하여 민감도 모사를 수행하였으므로, 국외 배출량 100% 삭감에 따른 국외 영향(Foreign impact)을 추정하기 위해 식(3)과 같이 첫번째 우항에 2를 곱하였다(Kim *et al.*, 2021b; Bae *et al.*, 2020c).  $C_{Foreign,Observed}^{y,m}$ 와  $C_{Foreign,Simulated}^{y,m}$ 는 국외 풍상 지역에서의 월평균 관측과 모사농도를 의미한다. 본 연구에서는 중국 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 모사 불확도를 고려하여, 중국 관측농도와 모사농도의 비율로 보정하였다(Bae and Kim, 2020). 이러한 방법론의 적용은 2020년 초에 발

생한 COVID-19 이후 사회경제적 활동 둔화로 인한 동북아 지역의 급격한 배출 변화를 반영하기 위한 것이나, 많은 불확도 요인을 포함하므로 이에 대한 적용성 평가는 지속적으로 필요하다. 국외 관측자료는 중국 전 지역에 해당하는 관측자료를 이용하여 국외 영향을 보정한 후 이용하였다. 국내 배출에 의한 영향(이하 '국내 영향')은 식(4)와 같이 계산할 수 있다.

$$C_{Domestic\ impact}^{y,m} = C_{Observed}^{y,m} - C_{Foreign\ impact}^{y,m} \quad (4)$$

다만, 식(3)과(4)에서 산정된 국내외 영향은 식(2)에서 산정된 배출요인과는 다른 의미를 가지는데, 그 이유는 국내외 영향 산정 시에는 기상 조건에 따른 영향이 간접적으로 반영되기 때문이다. 따라서, 해당 결과 해석 시에는 주의가 필요하다.

#### 2.4 NO<sub>x</sub> 실배출량 추정

2019년과 2020년 12월에 대한 국내 NO<sub>x</sub> 실배출량 변화를 통해 살펴보기 위하여 식(5)와 같이 NO<sub>2</sub> 관측 농도를 기반으로 배출량을 산정하였다. 이는 기존 연구에서 위성 및 지표 관측자료를 기반으로 중국과 한국에서 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량을 보정할 때 이용한 방법과 유사하다(Bae *et al.*, 2020a; Bae *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2020b).

$$E_{NOx,Adjusted}^{y,m} = E_{NOx,CAPSS}^{y,m} \times [C_{NO2,Observed}^{y,m} / C_{NO2,Simulated}^{y,m}] \quad (5)$$

여기에서  $E_{NOx,Adjusted}^{y,m}$ 는 NO<sub>2</sub> 관측자료를 기반으로 보정한 시도별 NO<sub>x</sub> 배출량이다. 본 연구에서는 이를 실배출량으로 가정하였다.  $E_{NOx,CAPSS}^{y,m}$ 는 상향식 배출목록에서 산정된 시도별 NO<sub>x</sub> 배출량이며,  $C_{NO2,Observed}^{y,m}$ 과  $C_{NO2,Simulated}^{y,m}$ 는 해당 월에 대한 관측 및 모사농도를 의미한다. 이렇게 산출된 NO<sub>x</sub> 배출량을 2019년과 2020년 12월에 대해 비교하여 두 기간 동안의 국내 NO<sub>x</sub> 배출량 변화 정도를 분석하였다. NO<sub>x</sub>는 국내에서 배출량이 많고 국내 대기 중에서 수~수 십 ppb의 농도가 유지되며, 체류시간이 짧아 장거리 이동이 어려우므로(Seinfeld, 2016), 국내

배출 변화를 간단하게 살펴볼 수 있을 것으로 판단되는 바, 대상 물질로 이용하였다.

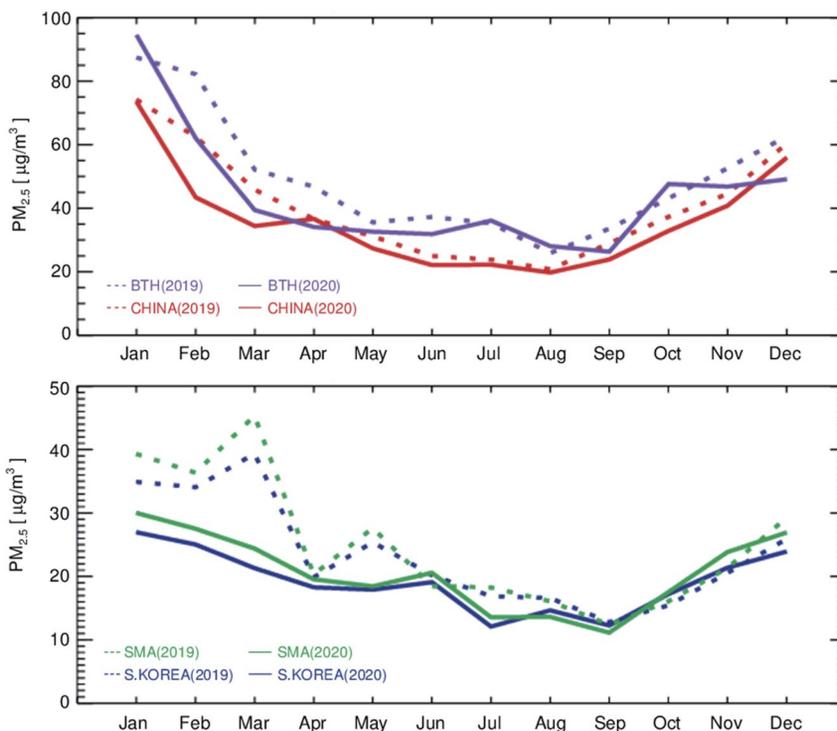
#### 2.5 국내 교통량 변화

2019년과 2020년의 10월부터 12월까지의 기간에 대해 전국, 수도권과 서울을 대상으로 다음과 같이 조사하였다. 전국과 수도권을 대상으로 한 교통량은 한국도로공사의 고속도로 공공데이터 웹사이트에서 제공하는 지역 본부별 입출구 교통량 자료(Korea Expressway Corporation)를 바탕으로 하였다. 서울의 월 교통량은 서울 종합교통관제센터에서 제공하는 교통량 자료(Seoul Metropolitan Government)를 사용하였으며, 실제 서울의 총 교통량이 아니라 매시간 교통량이 수집되는 135개 지점의 교통량 자료를 월 별로 합산하였다.

### 3. 연구 결과

#### 3.1 PM<sub>2.5</sub> 농도와 기상 여건 비교

2020년 연평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 2019년 대비 중국에서 4.7 μg/m<sup>3</sup> (39.5 → 34.8 μg/m<sup>3</sup>), 국내에서 4.3 μg/m<sup>3</sup> (23.2 → 18.9 μg/m<sup>3</sup>) 감소하였다. 중국과 BTH(Beijing-Tianjin-Hebei)의 2020년 1월 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년과 유사하나 2020년 2~3월에는 급격하게 감소하여 전년 대비 2월에는 20 μg/m<sup>3</sup>, 3월에는 12 μg/m<sup>3</sup> 차이를 보인다. 해당 기간은 중국에서 COVID-19 확진자 수가 기하급수적으로 증가하였던 기간으로, 대기오염물질의 농도가 이전 기간에 비해 낮았다(Kang *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2020a; Shi and Brasseur, 2020). 그 이후 4월부터는 중국의 농도 수준은 전년 동기 대비 1.0~5.1 μg/m<sup>3</sup>가량 낮았다. 중국 전반의 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화 보다는 BTH 지역에서의 농도 변화가 더 크게 분석되었다. BTH 지역의 경우 PM<sub>2.5</sub> 농도가 2020년 1월에 전년 대비 7.1 μg/m<sup>3</sup> 높게 분석되었으나, 2월부터 급격하게 감소하기 시작하여 2~4월에는 전년 대비 12.7~20.2 μg/m<sup>3</sup>가량 낮게 분석되었다. 그 이후에



**Fig. 1.** Comparisons of the observed monthly mean PM<sub>2.5</sub> concentrations in China (top), and South Korea (bottom) between 2019 and 2020. The Beijing-Tianjin-Hebei (BTH) and the Seoul Metropolitan Area (SMA) are separately presented.

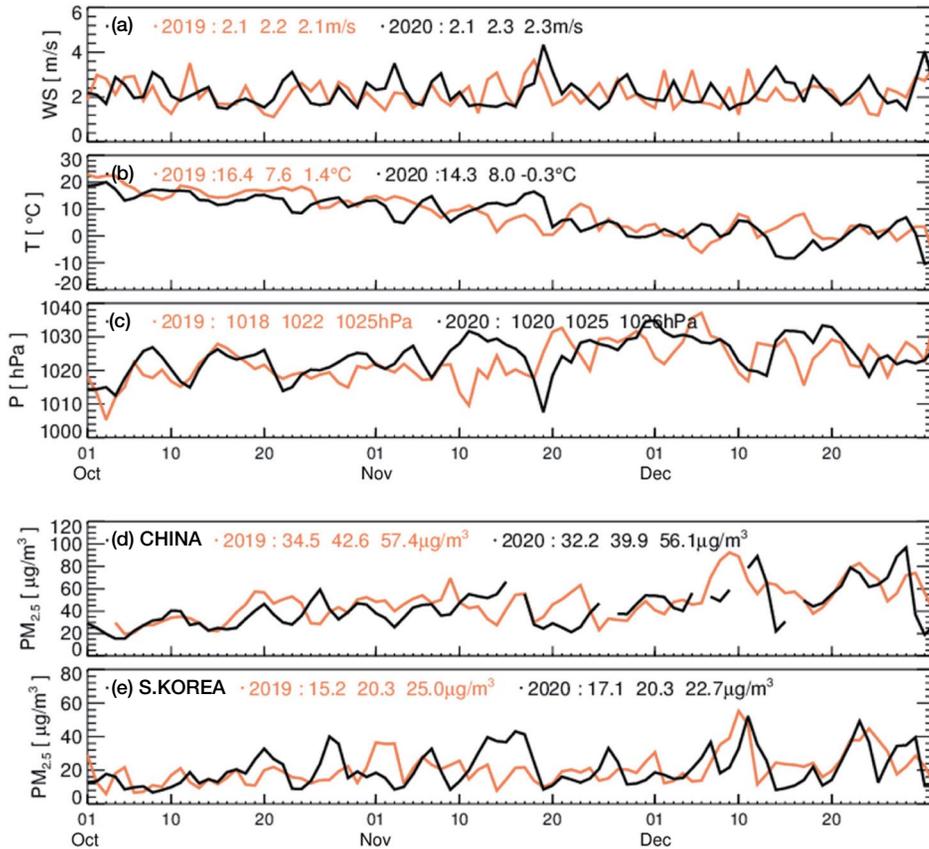
도 BTH의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 7월과 8월을 제외하고 11월 까지 전년 동기 대비 낮은 농도를 보였으며, 특히 12월에는 PM<sub>2.5</sub> 농도의 감소 폭이 13.6 µg/m<sup>3</sup>로 재차 커졌다.

한편, 2020년 1~3월 사이 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기 대비 7.9~18.0 µg/m<sup>3</sup> 낮게 분석되었으며, 전년 대비 낮은 농도 수준은 8월까지 지속되었다. 해당기간 초반부는 중국과 마찬가지로 COVID-19 확진자 수 증가로 인한 사회적 거리두기 시행, 그리고 계절 관리제와 같은 대기질 개선 정책 시행 등으로 농도가 전년 대비 개선된 것으로 보고된 바 있다(Son *et al.*, 2020). 이후 전년 대비 농도는 증감을 보였으며, 2020년 10월에는 전년 동기 대비 증가, 11월에는 유사한 농도를, 그리고 12월에는 낮아진 농도를 보였다.

2019년과 2020년 10~12월에 대한 중국 및 국내의 일평균 기상변수 및 PM<sub>2.5</sub> 농도를 함께 살펴보았다

(그림 2). 서울 측정소를 기준으로 풍속은 2020년 10~12월 평균 2.2 m/s이며, 전년 대비 0.1 m/s 감소하여 유사한 수준이었으나, 기온은 2020년에 전년 대비 1.2°C가량 낮았다. 지표면 평균 기압은 2020년 1,024 hPa로, 전년 대비 큰 차이는 없다. 전년 동기와 비교하여 2020년 12월 동안 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미칠 특별한 기상 차이는 없는 것으로 보인다. 다만, 2020년 12월 중반 기온이 크게 낮아지고 지표 기압이 높아지는 동시에, 풍속이 다소 높아지는 것은 시베리아 고기압 확장에 따른 결과로 분석된다. 이러한 기간에는 ‘삼한사온’과 마찬가지로 중국과 한국에서 PM<sub>2.5</sub> 농도가 낮아지는 것을 볼 수 있다.

그림 2(d)에서 중국의 2020년 10~12월 평균 PM<sub>2.5</sub> 관측농도는 42.7 µg/m<sup>3</sup>으로, 전년 동기 평균 44.8 µg/m<sup>3</sup>에 비하여 2.1 µg/m<sup>3</sup> 낮아졌으며, 해당 기간 동안 월별 PM<sub>2.5</sub> 감소는 2.3 µg/m<sup>3</sup> (10월), 2.7 µg/m<sup>3</sup> (11월),



**Fig. 2.** Time series of (a) the 10-m wind speed, (b) 2-m temperature, (c) surface pressure observed at the Seoul meteorological observatory, and the observed daily mean PM<sub>2.5</sub> concentrations in (d) China and (e) South Korea during October to December in 2019 and 2020. The averages of provincial monthly mean values for 2019 and 2020 are separately presented for the months.

1.3 µg/m<sup>3</sup> (12월)로 2020년 12월 동안 중국의 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기와 차이가 이전 월에 비해 줄어들었다. 한편, 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 관측농도의 평균은 2020년 10~12월 기간 동안에는 20.1 µg/m<sup>3</sup>으로 전년 동기와 유사하나, 이를 월별로 구분해보면, 2020년 10월과 11월의 경우 전년 동기 대비 각각 1.8, 0.1 µg/m<sup>3</sup> 증가하였으나, 12월에는 2.3 µg/m<sup>3</sup> 감소를 보였다.

### 3.2 배출과 기상 요인 변화

본 절에서는 대기질 모사 결과를 바탕으로 대상 기간 중 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 배출 요인과 기상 요인으로 구분하여 분석하였다. 분석에 앞서 우선, 이용된 대기질 모사 결과에 대한 검증을 위해 관측 농도를

바탕으로 표 1과 같이 모사 농도에 대한 통계 분석을 수행하였다. 2019년 및 2020년 10~12월에 대해 PM<sub>2.5</sub>의 경우 NMB (Normalized Mean Bias) -5.1% (2019년), 7.6% (2020년), NME (Normalized Mean Error) 17.4% (2019년), 18.8% (2020년) 등으로 Emery *et al.* (2017)이 제시한 목표 수준과 유사하게 모사됨을 확인하였다. 또한, 대상 기간 중 PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>의 상관계수는 0.71~0.91 사이였다.

대기질 모사 결과를 이용하여 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화를 제시하였다(그림 3). 그림 3(a)에서 2020년 10월 동안 국내 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기 대비 1.8 µg/m<sup>3</sup> 증가하였다. 배출요인은 국내 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도를 2.7 µg/m<sup>3</sup> (울산 0.4 µg/m<sup>3</sup>~전북 5.0 µg/m<sup>3</sup>) 감소시킨 반면,

**Table 1.** Model performance evaluations for PM<sub>2.5</sub>, NO<sub>2</sub>, and SO<sub>2</sub> against the urban air quality monitoring stations in South Korea during October to December in 2019 and 2020.

Species	Year	MEAN1	MEAN2	MB	RMSE	NME	NMB	R
PM <sub>2.5</sub>	2019	20.5	19.4	-1.1	4.6	17.4	-5.1	0.88
	2020	20.5	22.1	1.6	5.1	18.8	7.6	0.91
NO <sub>2</sub>	2019	21.1	19.6	-1.5	3.2	12.0	-7.0	0.9
	2020	20.0	19.5	-0.5	3.8	14.9	-2.5	0.86
SO <sub>2</sub>	2019	3.4	2.9	-0.5	1.0	24.1	-13.3	0.71
	2020	3.3	3.4	0.1	1.0	24.9	2.6	0.75

MEAN1, the mean of the observed concentrations; MEAN2, the mean of the simulated concentrations; Mean Bias (MB); Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Mean Bias (NMB); Normalized Mean Error (NME); Pearson Correlation coefficient (R). Unit: MEAN (µg/m<sup>3</sup>), NMB (%), NME (%). Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr PM<sub>2.5</sub>: NMB < ± 30%, NME < 50%, R > 0.40.

기상요인은 4.5 µg/m<sup>3</sup> (인천 1.4 µg/m<sup>3</sup>~충북 6.7 µg/m<sup>3</sup>) 증가시켰다. 다른 시도에 비해 PM<sub>2.5</sub> 농도 상승 폭이 컸던 울산과 대구의 경우 기상 요인에 의해 PM<sub>2.5</sub> 농도가 각각 4.6, 6.3 µg/m<sup>3</sup> 증가하였고, 배출 요인에 각각 0.4, 2.8 µg/m<sup>3</sup> 감소하여 전체적으로는 전년 동기 대비 4.2, 3.5 µg/m<sup>3</sup> 감소를 보였다. 2020년 10월 동안 전년 동기 대비 PM<sub>2.5</sub> 농도가 감소한 시도는 인천이 유일하며, 기상요인에 의한 10월 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 상승 폭이 다른 지역에 비해 낮았다.

2020년 11월에는 전년 동기 대비 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 농도의 증감이 복합적으로 나타났다(그림 3(b)). 기상요인과 배출요인에 의한 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기 대비 2.5 µg/m<sup>3</sup> 증가(제주 -0.4 µg/m<sup>3</sup>~강원 3.9 µg/m<sup>3</sup>)와 2.4 µg/m<sup>3</sup> 감소(전북 -5.6 µg/m<sup>3</sup>~서울 0.8 µg/m<sup>3</sup>)를 보여, 전체적으로는 전년 동기 대비 0.1 µg/m<sup>3</sup> 증가하였다. 배출요인이 크게 작용한 전북, 충북 등에서는 2020년 11월 월평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 전년 동기 대비 감소하였다. 충북의 경우 2020년 11월 동안 전년 동기 대비 PM<sub>2.5</sub> 농도가 기상 요인에 의해 2.7 µg/m<sup>3</sup> 증가하였으나, 배출요인에 의해 5.2 µg/m<sup>3</sup> 감소하였다. 이에 반해, 서울의 2020년 11월 PM<sub>2.5</sub> 농도는 기상과 배출 요인에 의해 전년 대비 3.2, 0.8 µg/m<sup>3</sup> 증가를 보였다.

그림 3(c)를 보면 2020년 12월 동안 전년 동기 대비 전국 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 2.3 µg/m<sup>3</sup> 감소하였으나, 광주에서는 1.2 µg/m<sup>3</sup> 증가하였다. 기상요인에 의해 전

년 동기 대비 PM<sub>2.5</sub> 농도가 경북에서는 0.9 µg/m<sup>3</sup> 감소하였으나, 나머지 시도에서는 0.5 µg/m<sup>3</sup> (인천)~2.6 µg/m<sup>3</sup> (서울) 정도 증가를 보였다. 이는 2020년 12월 동안 기상 조건은 전년 동기와 비교하여 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도 개선에 도움이 되지 못했음을 의미한다. 기상요인에 의해 2019년 12월 대비 2020년 12월 전국 PM<sub>2.5</sub> 농도는 1.4 µg/m<sup>3</sup> 증가하였다. 이와는 대조적으로 배출 요인에 의해 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 2020년 12월 동안 전년 동기 대비 3.7 µg/m<sup>3</sup> (광주 0.5 µg/m<sup>3</sup>~충북 6.2 µg/m<sup>3</sup>) 정도로 크게 감소하였다. 대전, 대구, 충북, 강원, 경기 등에서는 배출요인으로 인해 2020년 12월 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 전년 동기 대비 4.0 µg/m<sup>3</sup> 이상 감소하였다. 특히, 대전, 대구 등지에서는 기상요인에 의해 일부 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가했음에도 배출요인으로 인해 월평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 전년 동기 대비 4.8, 4.9 µg/m<sup>3</sup> 감소하였다.

그림 3에 제시한 분석 결과를 종합하면, 국내 월평균 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기 대비 2020년 10월에는 증가를, 2020년 12월에는 감소를 보였다. 해당기간 동안 배출요인은 전년 동기 대비 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 감소시키는 방향으로, 기상요인은 증가시키는 방향으로 작용하였으며, 이 두 가지 요인의 월별 변화에 따라 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 증감이 결정된 것으로 보인다. 그림 1과 2에서 2020년 10월 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기 대비 높았는데, 이는 배출요인보다는 기상요인에 의한 것으로 분석된다. 그림 3에서 2020년

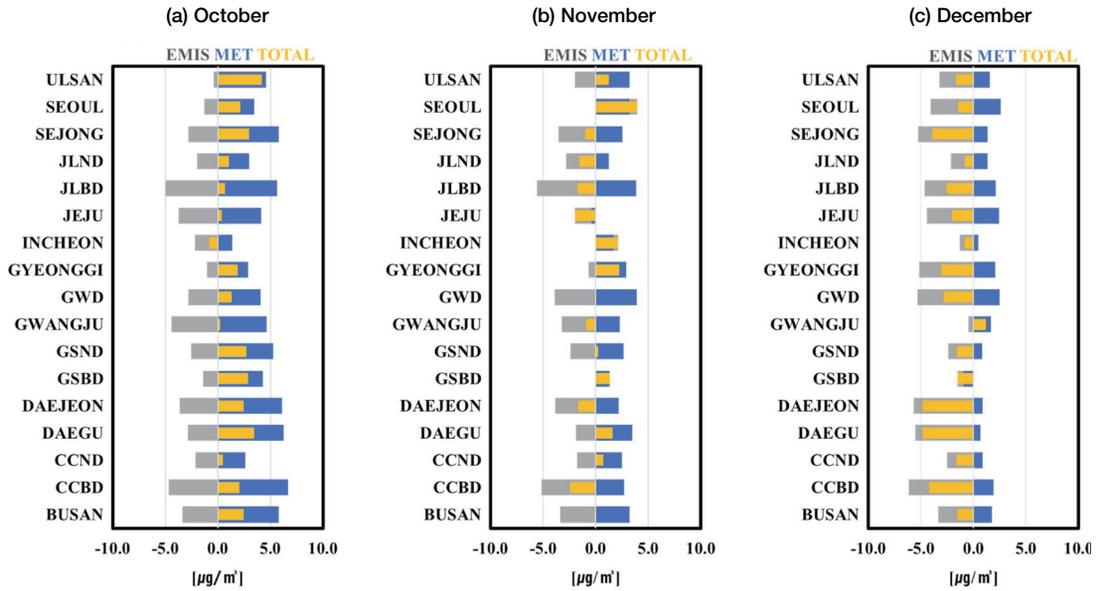


Fig. 3. Changes in impacts of meteorology and emissions on monthly mean  $PM_{2.5}$  concentrations in the seventeen provinces during (a) October, (b) November, and (c) December of 2019 and 2020.

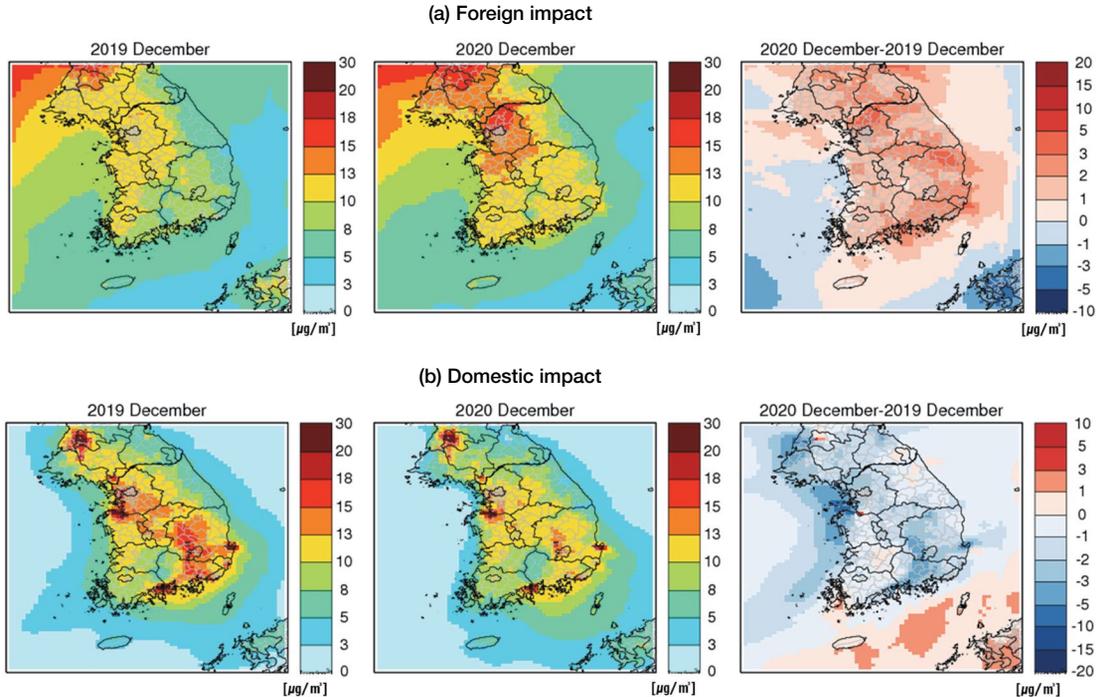
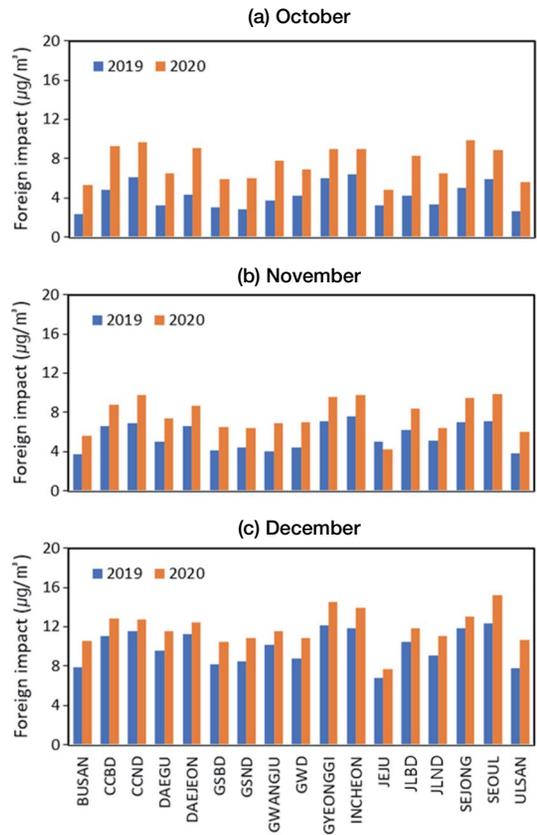


Fig. 4. Spatial plots of the adjusted (a) foreign impacts, and (b) domestic impacts on monthly mean  $PM_{2.5}$  concentrations for December 2019 (left) and December 2020 (center), and their differences (right).

10~12월 동안 배출 요인은 전년 동기 대비 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 2.7, 2.4, 3.7 µg/m<sup>3</sup> 감소시킨 반면, 기상 요인은 같은 기간에 대해 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 4.5, 2.5, 1.4 µg/m<sup>3</sup> 정도 증가시켰다. 특히, 10월 동안 기상요인에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가는 다른 달에 비해 뚜렷이 높고, 배출요인에 비해서도 높게 나타난다. 이에 반해, 그림 1에 보인 바와 같이 2020년 12월 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 전년 동기 대비 감소하는 이유는 기상요인에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도 증가폭은 2020년 10월과 11월에 비해 줄어든다, 배출요인에 의한 감소폭은 2020년 10월과 유사한 수준을 보였기 때문이다. Son *et al.* (2020)은 2019년 12월 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도가 배출량 영향에 의해 2018년 12월 대비 11.7% (2.9 µg/m<sup>3</sup>) 감소한 것으로 추정하였다. 본 연구와는 대상 기간에서 차이가 있으나, 배출량 감소 효과 14.8% (3.7 µg/m<sup>3</sup>)와 비교되며, 1차 및 2차 계절관리제에서의 배출량 삭감 정도와 사회적 거리두기 등의 차이가 포함된다. 본 절에서 언급된 배출요인에는 국내뿐 아니라 중국 등 풍상 지역의 배출량 변화에 따른 영향도 포함되는 바, 다음 절에서는 2020년 10~12월 사이 국내 시도별 국외 유입 영향을 전년 동기에 대해 비교하였다.

### 3.3 국외 및 국내 영향 변화

그림 4는 대기질 모사 결과로부터 식(3)과(4)에 의해 계산된 국외 및 국내 배출 영향을 2019년 12월과 2020년 12월에 비교한 것이다. 2019년 12월 대비 2020년 12월 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향은 서해상에서는 유사하나, 수도권을 비롯한 서쪽 내륙에서는 국외 영향이 높게 나타난다. 이에 반해, 국내 영향은 아산만, 목포 앞바다 등 서해상에서는 일부 증가하는 모습을 보였으나, 전국 대부분 지역에서 감소하였다. 2020년 12월 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도는 전년 동기 대비 감소하였는데(그림 3(c)), 이 기간 동안 국외 유입 영향이 전년 동기 대비 증가한 점을 감안하면, 국내 영향 감소가 국외 유입 영향 증가를 충분히 상쇄할 수 있을 만큼 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도를 크게 감소시킨 것으로 판단된다.



**Fig. 5.** Foreign emission impacts on provincial monthly mean PM<sub>2.5</sub> concentrations for (a) October, (b) November, and (c) December of 2019 and 2020 based on the air quality simulations and the Chinese observations.

이를 월별로 살펴보면, 국외 영향은 2019년에 비해 2020년 세 달 동안 모든 시도에서 높게 나타났다(그림 5). 국내 시도별 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향은 2020년 10월, 11월, 12월 동안 7.5, 7.6, 11.7 µg/m<sup>3</sup>으로 전년 동기(4.1, 5.5, 9.8 µg/m<sup>3</sup>) 대비 3.4, 2.1, 1.9 µg/m<sup>3</sup> 높았다. 대부분의 시도에서 10월 및 11월에 비해 12월에 국외 영향이 높았는데, 이는 겨울철 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향이 증가하는 선행 연구 결과와 일치한다(Bae *et al.*, 2020c; Bae *et al.*, 2020d; Bae *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017b). 국내 시도별 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 2019년 대비 2020년의 국외 영향은 10월, 11월에 비해 12월에 상대적으로 증가폭이

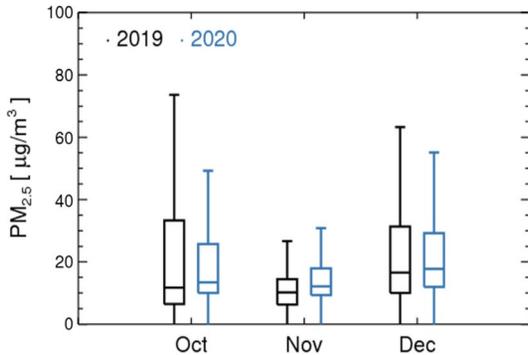


Fig. 6. Monthly mean  $PM_{2.5}$  observed at the Baeknyoung island during October~December of 2019 and 2020.

작으나, 여전히 증가를 보였다. 그림에도 불구하고 2020년 12월 동안 국내  $PM_{2.5}$  농도가 2019년 12월에 비해 낮아진 이유는 국내 영향이 크게 감소하였기 때문으로 해석할 수 있다. 식(3)에 제시된 바와 같이 중국 관측농도를 이용하지 않고 대기질 모사 결과만을 이용할 경우 2020년 12월 국외 영향은  $2.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측 농도기반 보정 대비  $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  높다. 다만, 이 경우에도 국외 배출 영향은 전년 동기와 대비하여 높아 지는 것은 동일하다.

$PM_{2.5}$  농도에 대한 국외 영향의 월별 변화는 그림 6의 백령도 관측자료에서도 나타난다. 백령도는 국내 배출 영향이 낮은 지역으로 (Kim *et al.*, 2021a), 2019년과 2020년 10월 동안 관측된 월평균  $PM_{2.5}$  농도는 각각  $11.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $13.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 2020년 10월 동안  $PM_{2.5}$  관측농도는 전년 동기 대비  $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 높았다. 이는 그림 5(a)에서 인천에 대한 국외 영향이 2019년 10월 대비 2020년 10월에  $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 높아진 결과와 유사하다. 11월에 대해서도 2020년 백령도  $PM_{2.5}$  관측농도는 2019년에 비해  $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  높으며, 대기질 모사에서 인천에 대한 국외 영향은  $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가한다. 2019년과 2020년 12월에 백령도에서 관측된  $PM_{2.5}$  농도는  $16.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와  $17.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로  $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가를 보인다. 같은 기간 인천에 대한 모사된 국외 영향은 전년 동기 대비  $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였다. 대기질 모사에서 추정된 국내  $PM_{2.5}$  농도에 대한 국외

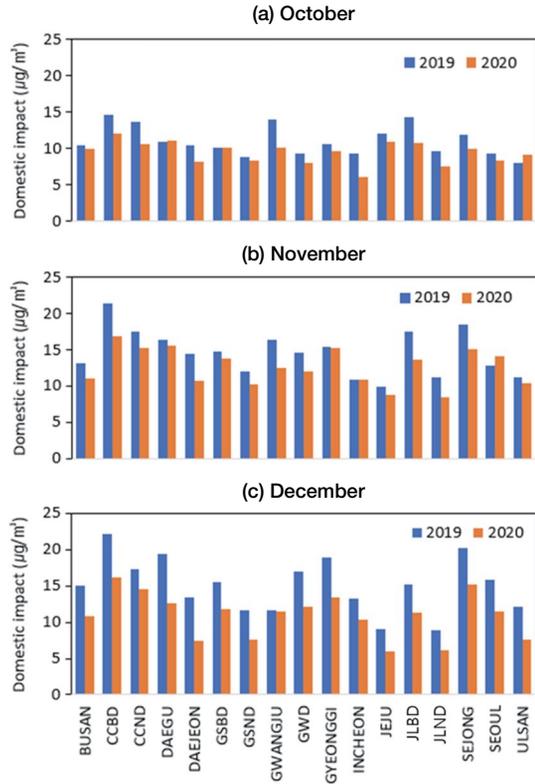
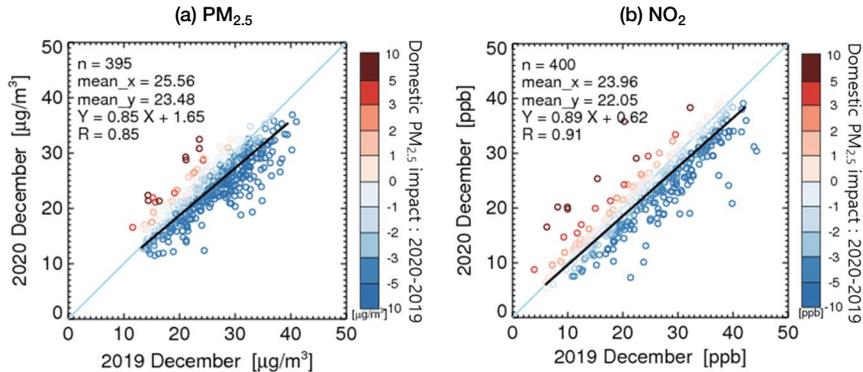


Fig. 7. Domestic emission impacts on provincial monthly mean  $PM_{2.5}$  concentrations for (a) October, (b) November, and (c) December in 2019 and 2020. The domestic emission impact was calculated by subtracting the estimated foreign impacts from the observed concentrations.

영향은 이전 월 대비 12월에 증가하였으며, 전년 동기와 비교하여도 높았다. 이는 2020년 12월 동안 국내에서 관측된  $PM_{2.5}$  농도 감소가 국외 영향 이외의 다른 원인에 의한 것일 수 있음을 시사한다.

그림 7에서 2020년 10월과 11월 동안 충북, 충남, 광주, 세종, 전북 및 전남 등에서는  $PM_{2.5}$  농도에 대한 국내 영향이 전년 동기 대비 감소한 것으로 분석되나, 다른 시도에서는 큰 차이를 보이지 않는다. 대기질 모사 결과에서 국내 배출에 의한 전국 평균  $PM_{2.5}$  농도는 2020년 10월과 11월 동안 전년 동기 대비  $1.5$ ,  $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다. 이에 반해 2019년 12월과 2020년 12월 동안 국내 영향은  $15.2$ ,  $11.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로  $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하여, 이전 월들에 비해 감소 폭이 2배 이



**Fig. 8.** Scatters of the observed monthly mean (a) PM<sub>2.5</sub>, and (b) NO<sub>2</sub> concentrations at the individual urban air quality monitoring stations in South Korea during December 2019 and December 2020. Colors of circles represent the difference in the domestic PM<sub>2.5</sub> impacts between 2019 and 2020 at the monitoring stations.

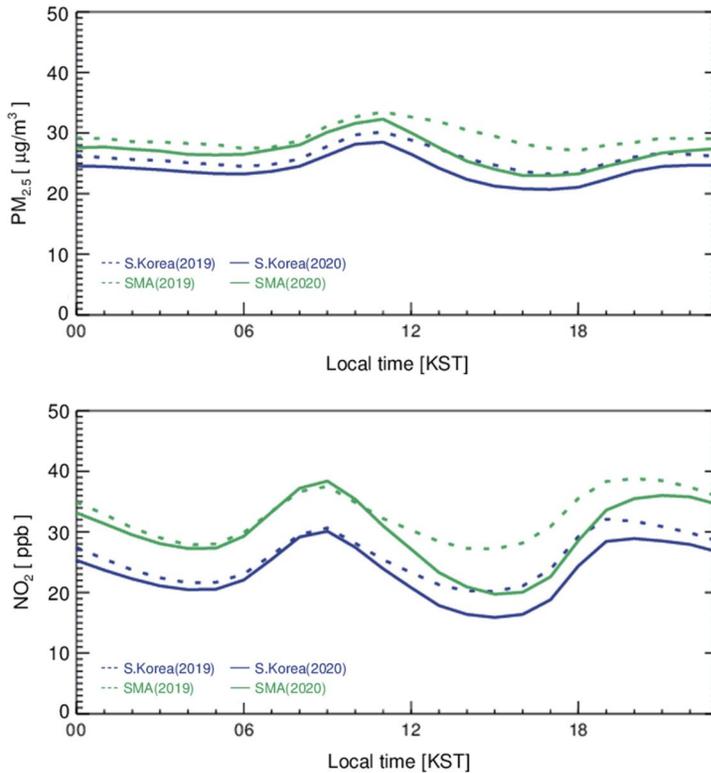
상 높다. Kim *et al.* (2018)은 미세먼지 관리종합대책의 시행으로 2015년 대비 2022년에 전국 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 5 µg/m<sup>3</sup>가량 감소될 것으로 추정하였는데, 이러한 감소 폭과 비교하면 2020년 12월 동안 감소된 국내 영향이 작지 않음을 알 수 있다.

국내 시도별로는 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국내 영향이 2020년 12월 동안 전년 동기 대비 0.1~6.8 µg/m<sup>3</sup> 정도 감소한 것으로 분석된다. 이는 그림 6에서 2020년 12월 동안 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 영향이 전년 동기 대비 1.9 µg/m<sup>3</sup> 증가하였음에도 불구하고, 국내 시도 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도를 2.3 µg/m<sup>3</sup> 감소시킨 것으로 분석된다.

그림 8(a)는 도시대기측정망의 개별 측정소를 대상으로 2019년 12월과 2020년 12월에 대한 월평균 PM<sub>2.5</sub> 관측농도 변화를 비교한 것이다. 2020년 12월의 경우 전년 동기 대비 2.1 µg/m<sup>3</sup> 감소하여, 같은 기간에 대한 시도별 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소(2.3 µg/m<sup>3</sup>)와는 약간의 차이를 보인다. 그림 8(a)에서 선형 회귀선의 기울기는 1보다 작으며, 특히 월평균 PM<sub>2.5</sub> 농도가 30 µg/m<sup>3</sup> 이상인 측정소에서 전년 12월 대비 2020년 12월 PM<sub>2.5</sub> 농도 감소가 더욱 두드러진다. 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도의 경우, 12월을 포함한 겨울철에는 국외 유입 영향이 높아질 뿐만 아니라(Bae *et al.*, 2020c; Bae *et al.*, 2018; Kim *et al.*, 2017b), 대기 정체에 의해 국내

배출 영향이 높은 지역에서도 PM<sub>2.5</sub> 관측농도가 높아질 수 있다(Bae *et al.*, 2020d; Kim, 2006). 그림 8(a)에서 1:1선을 기준으로 2020년 12월 동안 PM<sub>2.5</sub> 농도가 전년 동기 대비 낮아진 관측된 측정소의 경우, 국내 영향이 2~5 µg/m<sup>3</sup>가량 감소한데 비해, 전년 동기 대비 증가한 측정소에서는 국내 영향이 증가하였으며, 5 µg/m<sup>3</sup> 이상 증가한 측정소도 나타난다. 따라서, 이러한 측정소별 2019년 12월 대비 2020년 12월에 대한 PM<sub>2.5</sub> 농도 변화에서 국내 배출 영향이 중요한 역할을 담당하였음을 다시 한번 확인할 수 있다.

그림 8(b)의 경우 NO<sub>2</sub>에 대해 그림 8(a)와 동일한 비교를 보인 것으로, 월평균 NO<sub>2</sub> 관측농도 역시 2019년 12월 대비 2020년 12월 동안 전국 평균 1.7 ppb의 감소를 보인다. 특히, NO<sub>2</sub> 농도가 높은 지역에서 월평균 NO<sub>2</sub> 관측농도 감소가 뚜렷하다. NO<sub>2</sub>의 경우 장거리 이동 가능성이 낮아 국내 배출에 의해 고농도와 저농도 지역이 구분되며, 높은 NO<sub>2</sub> 농도가 관측되는 지점에서 월평균 농도 변화가 크게 나타난다. 따라서, NO<sub>2</sub> 농도 감소는 국내 주요 NO<sub>x</sub> 배출 지역에서의 배출량 감소에 의한 것으로 추정할 수 있다. 많은 측정소에서 NO<sub>2</sub> 농도가 전년 대비 2020년 12월 동안 감소하였으나, 일부 측정소에서는 NO<sub>2</sub> 농도 증가가 확인된다. 특히, NO<sub>2</sub> 농도가 증가한 측정소에서 PM<sub>2.5</sub> 국내 영향 또한 전년 동기 대비 증가하였음을



**Fig. 9.** Diurnal variations of  $PM_{2.5}$  (top), and  $NO_2$  (bottom) observed in South Korea and the SMA during December in 2019 and 2020.

알 수 있다.

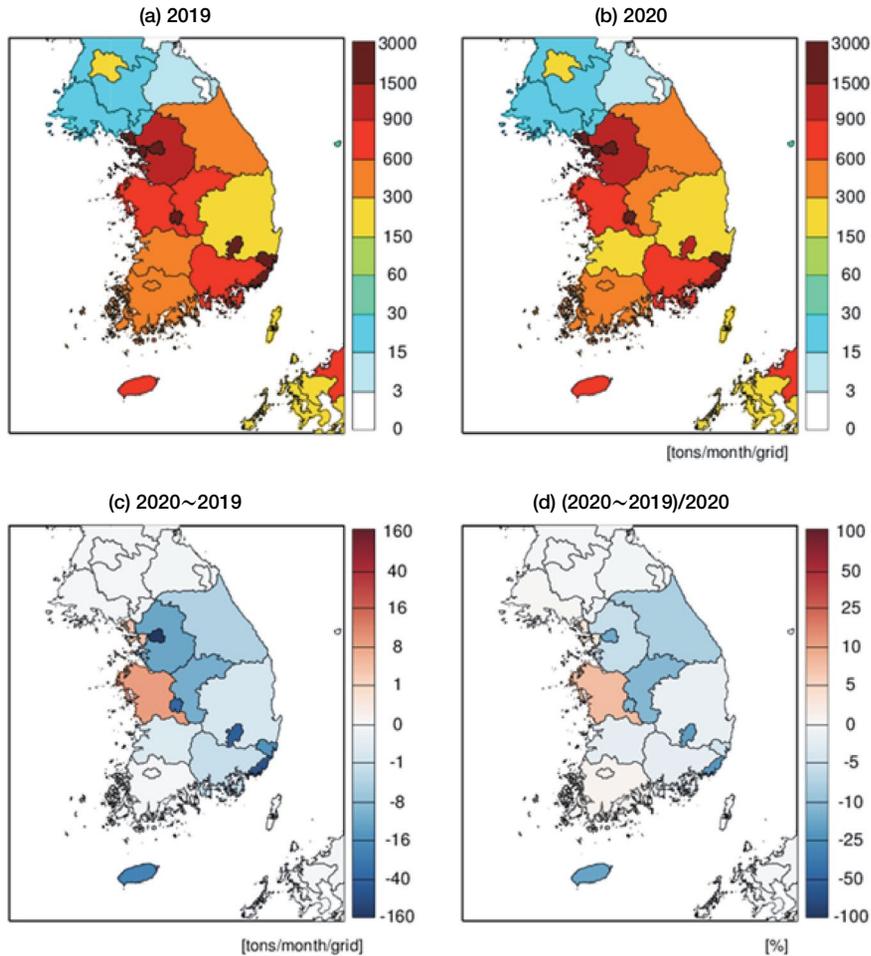
그림 9는 2019년 12월과 2020년 12월 동안 전국과 수도권에서  $PM_{2.5}$ 와  $NO_2$ 의 관측농도의 일간 변화를 비교한 것이다. 2020년 12월의 일간 변화는 전국과 수도권에서  $PM_{2.5}$ 와  $NO_2$  모두 오전 9시 부근까지는 전년대비 농도 변화가 크지 않았으나, 10~18시 동안의 농도가 감소하였다. 이러한 시간대별  $NO_2$  농도 변화는 낮 시간 동안 높은 활동도를 보이는 오염원의 배출 감소가 원인일 것으로 예상된다. 특히, 남한 평균에 비해 교통 관련  $NO_x$  배출밀도가 높은 수도권에서의 낮 시간  $NO_2$  감소 폭이 큰 점을 고려하면, 출근 시간의 교통량은 전년대비 유사하였으나, COVID-19에 따른 사회적 거리두기로 인한 낮 시간 동안의 일상생활 관련 통행량 감소에 의한 결과로 사료된다.  $PM_{2.5}$  농도의 일간 변화 역시, 야간에 비해 낮 시간

동안 크게 감소하며,  $NO_2$  농도 감소 폭이 뚜렷했던 수도권에서  $PM_{2.5}$  감소 폭도 크다.

### 3.4 $NO_x$ 배출량 변화

그림 9에서 2019년 12월과 2020년 12월 동안 국내의  $NO_2$  관측농도 감소는 해당 기간 동안  $NO_x$  배출량 감소와 이로 인한 국내  $PM_{2.5}$  농도의 개선 가능성을 고려해볼 수 있다.  $NO_2$  농도는 기상과 배출량 변화 두 가지 요인으로 인해 변화할 수 있는 점을 감안하여, 본 연구에서는 해당 기간 국내  $NO_x$  실배출량을 식(5)를 이용하여 산정하고, 전년 동기 대비 2020년 12월 동안 국내  $NO_x$  배출량 변화를 정량적으로 추정하였다.

$NO_2$  관측농도와 모사농도의 비율을 이용하여 실배출량을 추정하면, 2019년 12월 대비 2020년 12월



**Fig. 10.** The monthly  $\text{NO}_x$  emissions adjusted with the surface  $\text{NO}_2$  observations for (a) December in 2019, and (b) December in 2020, respectively in South Korea, (c) their absolute difference, and (d) their relative difference.

동안 국내  $\text{NO}_x$  배출량이 6,841 ton/month (5.4%) 감소된 것으로 나타난다. 그림 10 및 그림 11은 2019년 12월 및 2020년 12월의  $\text{NO}_x$  배출량을 국내 시도별로 비교한 것이다. 2019년 대비 2020년에  $\text{NO}_x$  배출량은 경기 1,650 ton/month (7%), 강원 1,049 ton/month (8%), 부산 1,037 ton/month (23%), 서울 1,019 ton/month (18%), 충북 923 ton/month (13%) 등 대부분의 시도에서 감소하였다. 인천 및 충남의 경우 각각 220 ton/month (4.3%) 및 1,231 ton/month (9.2%) 증가하였으며, 일부 기초 지자체에서의  $\text{NO}_2$  관측 농도 증가

가 전반적인  $\text{NO}_x$  배출량 증가로 이어졌다. 그림 10에서 추정된  $\text{NO}_x$  배출량 변화는  $\text{NO}_2$  농도 변화를 기반으로 산정된 것으로, 주로 서울, 대전, 대구, 부산 등 인구가 밀집된 대도시 지역에서 높았다. 대도시의  $\text{NO}_x$  배출 변화는 주로 교통 관련 오염원의 배출 변화와 관련성이 높다.

표 2에서 전년 동기 대비 2020년 10~12월 교통량 변화를 보면, 남한과 수도권 고속도로에 대해 10월에는 각각 0.8% 증가 및 2.1% 감소하였으며, 11월에는 각각 1.7%, 1.1% 감소하였다. 12월에는 남한과 수도

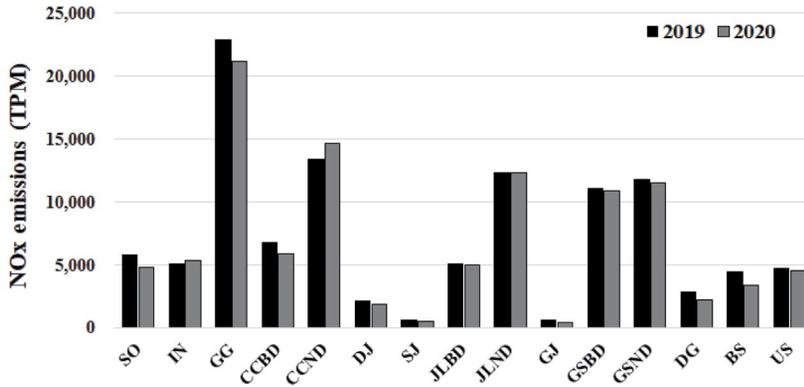


Fig. 11. Comparisons of the provincial monthly  $\text{NO}_x$  emissions for December 2019 and December 2020 adjusted with the  $\text{NO}_2$  observations in the urban air quality monitoring network in South Korea.

Table 2. Estimated monthly traffic change in South Korea from October to December in 2019 and 2020 (unit: 1,000 vehicles/month).

Region	Month	2019	2020	Change compared to 2019(%)
South Korea, highway	October	213,924	215,631	+ 0.8%
	November	202,047	198,695	-1.7%
	December	200,817	191,287	-4.7%
Seoul Metropolitan Area (SMA), highway	October	90,270	88,347	-2.1%
	November	83,770	82,881	-1.1%
	December	85,083	80,989	-4.8%
Seoul	October	294,623	269,168	-8.6%
	November	293,037	265,591	-9.4%
	December	300,393	250,759	-16.5%

권 고속도로 교통량이 각각 4.7%, 4.8% 감소하였다. 이 감소 수치는 전국에 대해 추정된  $\text{NO}_x$  실배출량 변화와도 유사한 수준이다. 도심 지역인 서울의 교통량은 전년 동기 대비 2020년 10월부터 12월까지 순차적으로 8.6%, 9.4%, 16.5% 감소하였다. 이로부터 12월 동안 급격한  $\text{NO}_x$  배출량 감소는 COVID-19 확산에 따라 2020년 11월 말부터 실시되었던 사회적 거리두기가 12월 8일부터 한 단계 더 강화된 시점과 유사하게 연동한 점과, 12월부터 2차 계절관리제 시행에 따른 효과에 의한 것으로 볼 수 있다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 2차 계절관리제가 시작된 2020년 12월 동안 국내  $\text{PM}_{2.5}$  농도의 변화 요인을 확인하기 위하여 관측자료와 대기질 모사 등을 이용하여 분석하였다. 전년 동기 대비 국내  $\text{PM}_{2.5}$  농도는 기상 요인에 의해 평균  $1.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으나, 배출 요인에 의해  $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하였다. 특히, 2020년 12월 동안 국내  $\text{PM}_{2.5}$  농도 감소는 국내를 비롯한 동북아 지역의 배출량 변화를 그 원인으로 꼽을 수 있다. 앞선 분석과는 별도의 대기질 모사를 통해 해당 기간 동안

국내외 배출 영향을 분석한 결과에서, 국외 영향은  $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전년 동기에 비해  $1.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$  증가하였으나, 국내 영향은  $4.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소하여 국내외 배출 요인에 의해 전체적으로는  $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$  감소한 것으로 분석되었다.

현재 대상기간  $\text{PM}_{2.5}$  성분 관측자료의 미확보로 인해  $\text{PM}_{2.5}$  중량농도 감소를 주도한 배출물질의 파악은 어려우나,  $\text{NO}_2$  관측농도의 일간 변화에서 야간보다는 주간 동안 뚜렷한 감소폭 (10~20%)을 보이며, 해당 기간 동안  $\text{NO}_x$  배출량이 자동차 등 관련 오염원에서 전국적으로는 5%, 수도권 등에서는 8%가량 감소한 것으로 추정되었다. 정부에서 2020년 12월 동안 2차 계절관리제 효과를  $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 추정하는 점을 고려하면, 본 연구에서 예측된 국내 배출 영향의 감소에는 제도적인 배출량 삭감 외에 다른 요인이 작용하였을 수 있다. 그 중 하나로 COVID-19 재확산에 따른 정부의 영업 시간 제한, 5인 이상 집합금지 등 사회적 거리두기가 2020년 11월말부터 시행되어 유지되고 있는 점을 고려할 수 있다. 이에 대한 정량적 효과 분석은 본 연구에 포함하지 않았으나, 2020년 초반과는 달리 중국에서의 COVID-19 확진자 증가가 보고되지 않았다는 점에서 풍상에 위치하는 국외 배출 영향이 감소하지 않은 이유를 찾을 수 있다. 국내를 포함한 동북아 지역에서 월평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도는 고농도 사례일의 빈도와 강도, 지속시간 등에 따라 달라질 수 있다는 점에서 2차 계절관리제의 전체적인 평가는 보다 장시간에 걸친 분석이 필요해 보인다. 다만, 2020년 12월 동안 일평균  $\text{PM}_{2.5}$  농도가  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 고농도일 발생 사례가 3~4번으로 빈도수는 전년 동기와 유사했으므로, 대기 정체 등 기상 요인의 변화에 따른 국내 배출 영향 변화 등은 추후 상세한 분석이 필요하다. 더불어, 본 논문에서는 확보된  $\text{NO}_2$  관측농도를 이용하여  $\text{NO}_x$  배출량의 변화를 추정하였으나, 향후 성분농도 자료의 확보가 가능해지는 경우 역모델링 등을 통해 계절관리제 시행 및 COVID-19에 따른 배출 물질별 변화 정도를 정량적으로 추정할 수 있을 것으로 기대된다.

## 감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터 및 환경부 「기후 변화특성화대학원사업」의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2019) Long-Range Transport Influence on Key Chemical Components of  $\text{PM}_{2.5}$  in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the Years 2012-2016, *Atmosphere*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, Y., Woo, J.-H., Kim, S. (2020a) Updating Chinese  $\text{SO}_2$  emissions with surface observations for regional air-quality modeling over East Asia, *Atmospheric Environment*, 228. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117416>
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.U., Kim, S. (2020b) Surface ozone response to satellite-constrained  $\text{NO}_x$  emission adjustments and its implications, *Environ Pollut*, 258, 113469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113469>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, J., Kim, S. (2020c) Role of Emissions and Meteorology in the Recent  $\text{PM}_{2.5}$  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. (2020d) A Multiscale Tiered Approach to Quantify Contributions: A Case Study of  $\text{PM}_{2.5}$  in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11(2), 141. <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Bae, M., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2018)  $\text{PM}_{2.5}$  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>
- Bae, M., Kim, S. (2020) The Uncertainty of Foreign Contribution to  $\text{PM}_{2.5}$  in South Korea according to the Foreign Emissions Inventories during 2015 and 2019, *Proceeding of the Proceedings of 63rd Meeting of Korean Society for Atmospheric Environment*, Suwon, South Korea.
- Chen, L., Gao, Y., Zhang, M., Fu, J.S., Zhu, J., Liao, H., Li, J., Huang, K., Ge, B., Wang, X., Lam, Y.F., Lin, C.-Y.,

- Itahashi, S., Nagashima, T., Kajino, M., Yamaji, K., Wang, Z., Kurokawa, J.-i. (2019) MICS-Asia III: multi-model comparison and evaluation of aerosol over East Asia, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19(18), 11911-11937. <https://doi.org/10.5194/acp-19-11911-2019>
- 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). <https://doi.org/10.3390/ijerph17155279>
- 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). <https://doi.org/10.1038/s41598-020-79088-2>
- Kim, B.-U., Bae, C., Kim, H.C., Kim, E., Kim, S. (2017a) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, *Atmospheric Environment*, 162, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.006>
- Kim, E., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) Evaluation of the Effectiveness of Emission Control Measures to Improve PM<sub>2.5</sub> Concentration in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 469-485. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.3.469>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021a) Sensitivity of fine particulate matter concentrations in South Korea to regional ammonia emissions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 273, 116428. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116428>
- Kim, E., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, S. (2021b) Direct and cross impacts of upwind emission control on downwind PM<sub>2.5</sub> under various NH<sub>3</sub> conditions in Northeast Asia, *Environ Pollut*, 268(Pt A), 115794. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115794>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017b) 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, H.C., Kim, S., Cohen, M., Bae, C., Lee, D., Saylor, R., Bae, M., Kim, E., Kim, B.U., Yoon, J.H., Stein, A. (2020a) Quantitative assessment of changes in surface particulate matter concentrations over China during the COVID-19 pandemic and their implications for Chinese economic activity. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 2020, 1-21. <https://doi.org/10.5194/acp-2020-821>
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.U., Jin, C.S., Hong, S., Park, R., Son, S. W., Bae, C., Bae, M., Song, C.K., Stein, A. (2017c) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. *Scientific Reports*, 7(1), 4710. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, H.C., Kim, S., Lee, S.-H., Kim, B.-U., Lee, P. (2020b) Fine-Scale Columnar and Surface NO<sub>x</sub> Concentrations over South Korea: Comparison of Surface Monitors, TROPOMI, CMAQ and CAPSS Inventory, *Atmosphere*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/atmos11010101>
- Kim, Y.P. (2006) Air Pollution in Seoul Caused by Aerosols. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 22(5), 535-553.
- 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>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016). *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*: John Wiley & Sons.
- Shi, X., Brasseur, G.P. (2020) The Response in Air Quality to the Reduction of Chinese Economic Activities during the COVID-19 Outbreak. *Geophysical Research Letters*, e2020GL088070. <https://doi.org/10.1029/2020GL088070>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split non-hydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227, 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- 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>
- 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>
- Yamaji, K., Chatani, S., Itahashi, S., Saito, M., Takigawa, M., Morikawa, T., Kanda, I., Miya, Y., Komatsu, H., Sakurai, T., Morino, Y., Kitayama, K., Nagashima, T., Shimadera,

- H., Uranishi, K., Fujiwara, Y., Hashimoto, T., Sudo, K., Misaki, T., Hayami, H. (2020) Model Inter-Comparison for PM<sub>2.5</sub> Components over urban Areas in Japan in the J-STREAM Framework, *Atmosphere*, 11(3), 222. <https://doi.org/10.3390/atmos11030222>
- Zhao, Y., Zhang, K., Xu, X., Shen, H., Zhu, X., Zhang, Y., Hu, Y., Shen, G. (2020) Substantial Changes in Nitrogen Dioxide and Ozone after Excluding Meteorological Impacts during the COVID-19 Outbreak in Mainland China, *Environmental Science & Technology Letters*, 7(6), 402-408. <https://doi.org/10.1021/acs.estlett.0c00304>

## Authors Information

- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)  
 배민아 (아주대학교 환경공학과 박사과정)  
 김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구원)  
 손규원 (아주대학교 환경공학과 석사과정)  
 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)  
 김윤하 (아주대학교 환경연구소 연구원)  
 유승희 (아주대학교 환경공학과 박사과정)  
 김병욱 (미국조지아주환경청, Program Manager 1)  
 김현철 (미국국립해양대기청, 메릴랜드대학 기후·위성연구소, Research Scientist)