

논문

미세먼지 계절관리제: (I) 어떤 배출물질을 줄여야 하는가? Seasonal PM Management: (I) What Emissions Should be Reduced?

강윤희, 김순태^{1),*}

아주대학교 환경연구소, ¹⁾아주대학교 환경안전공학과

Yoon-Hee Kang, Soontae Kim^{1),*}

Environmental Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

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

접수일 2022년 8월 31일
수정일 2022년 10월 1일
채택일 2022년 10월 5일

Received 31 August 2022
Revised 1 October 2022
Accepted 5 October 2022

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

Abstract In this study, the impacts of 50% and 100% reductions in domestic SO₂, NO_x, NH₃, VOCs, and primary PM_{2.5} (PPM_{2.5}) emissions on PM_{2.5} concentrations in South Korea during the 2nd seasonal PM management period (i.e., from December 2020 to March 2021) were estimated with air quality modeling based on the Clean Air Policy Support System 2018 emissions inventory. For the first half (0 → 50%) emission reduction, PPM_{2.5} is the most effective pollutant to lower the nationwide PM_{2.5} concentration (2.3 μg/m³), followed by NH₃ (1.5 μg/m³), NO_x (1.0 μg/m³), VOC (0.7 μg/m³), and SO₂ (0.2 μg/m³). However, the impacts of NH₃ and NO_x emissions for the second half (50 → 100%) emission reductions on the nationwide PM_{2.5} concentrations significantly increased to 6.3 μg/m³ and 4.5 μg/m³, respectively, which surpassed the impact of PPM_{2.5} reduction (2.3 μg/m³) for the same magnitude of emission reduction. The zero-out contribution of SO₂ emissions remained as low as 0.5 μg/m³. This result exhibits significant nonlinear responses of PM_{2.5} concentrations to its precursor emission changes from domestic emission sources. The estimated nonlinearities (= ΔPM_{2.5} to the second half emissions reduction/ΔPM_{2.5} to the first half emission reduction) for the domestic NO_x, NH₃, SO₂, PPM_{2.5}, and VOCs emissions were 4.6, 4.1, 1.7, 1.0, and 0.8, respectively. Our study results indicate that the sensitivity and nonlinear response of PM_{2.5} concentrations to the precursor emissions should be considered when developing an air quality improvement plan because the effectiveness of PM_{2.5} precursors in lowering PM_{2.5} concentrations vary depending on the magnitudes of the emission reductions to achieve a targeted PM_{2.5} level.

Key words: Seasonal PM management, PM_{2.5}, Precursors, Sensitivity, Nonlinearity index

1. 서 론

최근 정부에서는 초미세먼지 (Particulate Matter of which aerodynamic diameter is equal to or less than 2.5 μm; PM_{2.5}) 농도가 높아지는 매년 12월부터 이듬해 3월까지 전구물질 배출량 저감 등 미세먼지 계절관리제 (이하 ‘계절관리제’)를 수행 중에 있다 (Kim *et al.*, 2021a; Son *et al.*, 2020). 계절관리제 시행에 따라

이전 동 기간 대비 이산화황 (SO₂), 질소산화물 (NO_x) 배출량 감소와 그에 따른 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 발표된 바 있으나 (Bae *et al.*, 2021a; Jang *et al.*, 2020), 어떤 배출물질의 저감이 PM_{2.5} 중량 또는 성분별 농도 개선에 효과적이었는지에 대한 분석은 제시된 바 없다.

특히, 배출물질별 국내 배출규모와 삭감량의 차이, 지역별 주요 배출원의 공간 분포와 배출밀도 등을 고

려하면, 계절관리제 기간 동안 국내 배출량 삭감 효과는 17개 시도 등 국내 지역별로 달라질 수 있다 (Son *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2017a). 예를 들어, 1차 PM_{2.5} (Primary PM_{2.5}; PPM_{2.5})를 포함한 PM_{2.5} 전구물질별 배출량은 국내 지역에 따라 차이를 보인다(Choi *et al.*, 2021; Choi *et al.*, 2020). 서울 등 대도시의 경우 도로이동오염원으로부터 배출되는 NO_x의 배출밀도는 타 지역에 비해 높으며(Bae *et al.*, 2021b; Kang *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020), 농촌 지역의 경우 비료 시비, 축산 활동 등과 관련된 암모니아(NH₃) 배출량이 많다(Kim *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021c). 따라서 동일한 배출물질을 양적으로 동일하게 삭감하여도 지역별 배출 환경의 차이로 인해 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 다르게 나타날 수 있다.

대기 중으로 배출된 NO_x, SO₂ 등 가스상 대기오염 물질은 산화 과정을 통해 입자상 대기오염물질을 포함한 2차 대기오염물질로 전환되며, 이 때 기상 조건은 대기오염물질의 가스상→입자상 전환은 물론 이류, 확산, 침착 과정에도 영향을 미치게 된다(Sun *et al.*, 2022; Zhai *et al.*, 2021; Seinfeld, 2016). 국내에서 계절관리제가 시행 중인 겨울철 동안에는 기온과 상대 습도가 낮아진다(Kang *et al.*, 2021b; Kang *et al.*, 2021c; Son *et al.*, 2021). 또한 타 계절과 비교하여 강한 풍속 등 겨울철 기상특성은 오염원에서 배출된 대기오염물질의 이류, 확산 과정에 영향을 주며, 이로 인해 단위(unitized) 배출량이 대기 중 농도로 발현되는 정도 역시 달라질 수 있다(Kang *et al.*, 2021a; Xu *et al.*, 2019; Byun *et al.*, 2018).

국내와 중국을 포함한 동북아 지역에서 PM_{2.5}의 주요 성분이 질산염, 황산염 등 무기성 이온 성분인 점과(Xie *et al.*, 2022; Bae *et al.*, 2019; Xu *et al.*, 2019), 기온과 습도가 낮은 계절관리제 기간 동안에는 NO_x와 SO₂ 등이 산화 과정에 의해 입자로 전환되는 속도가 낮아질 수 있다는 점(Bae *et al.*, 2021b; Zhai *et al.*, 2021; Bae *et al.*, 2020b), 그리고 국내는 삼면이 바다이고, 국토 면적은 10만 km²로 협소하다는 점에서 가스

상 전구물질의 배출량 저감을 통한 PM_{2.5} 농도 개선 효과는 중국이나 미국 등 넓은 내륙 지역과 차이를 보일 수 있다. 이에 반해, 오염원에서 입자상으로 직접 배출되는 PPM_{2.5}는 기온과 습도 조건에 관계없이 주로 이류와 확산에 의해서만 배출에 의한 농도 전환율(Emission-to-concentration conversion rate)이 결정되며, 주로 배출원 주변에서 높은 농도 영향을 보인다(Son *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2017b).

본 연구에서는 PM_{2.5} 생성과 관련된 NO_x, SO₂, NH₃, VOCs, PPM_{2.5} 중 어떤 물질의 배출량 삭감이 계절관리제 기간 동안 국내 지역별 PM_{2.5} 농도 개선에 효과적인지를 살펴보기 위하여 물질별 배출 삭감 실험(50, 100%)을 설계하고 대기질 모사를 수행하였다. 대기질 모사 결과를 기반으로 모든 배출 물질의 동시 삭감과 개별 배출물질별 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 개선 정도를 17개 시도로 구분하여 정량적으로 분석하였다. 이러한 분석은 2027년까지 연평균 PM_{2.5} 농도 13 µg/m³을 목표로 하고 있는 지금, PM_{2.5}와 같은 2차 대기오염물질의 저감에 있어 배출량 관리가 아닌, 농도 관리의 중요성을 설명할 수 있다.

2. 연구 방법

2.1 대상 기간과 영역

본 연구의 대상 기간은 현재까지 시행된 총 세 번의 미세먼지 계절관리제 중 최신 기간이면서, PM_{2.5} 및 구성성분 등 측정자료의 이용이 가능한 2차 미세먼지 계절관리제 기간(2020년 12월~2021년 3월)으로 설정하였다. 2차 미세먼지 계절관리제 기간 동안 발전, 산업, 수송, 생활부문별 배출저감 조치를 실시하였고, 환경부발표 자료에 의하면 PPM_{2.5}는 6,237톤, SO₂ 42,184톤, NO_x 52,834톤, VOCs 20,705톤을 감축되었다(ME, 2022). 이는 계절관리제 시행 전(2016년 1~3, 12월) 배출량의 PPM_{2.5} 약 19%, SO₂ 35%, NO_x 13%, VOCs 6%에 해당되는 양이다.

대상영역은 국내 전 지역이며(그림 1), 계절관리제

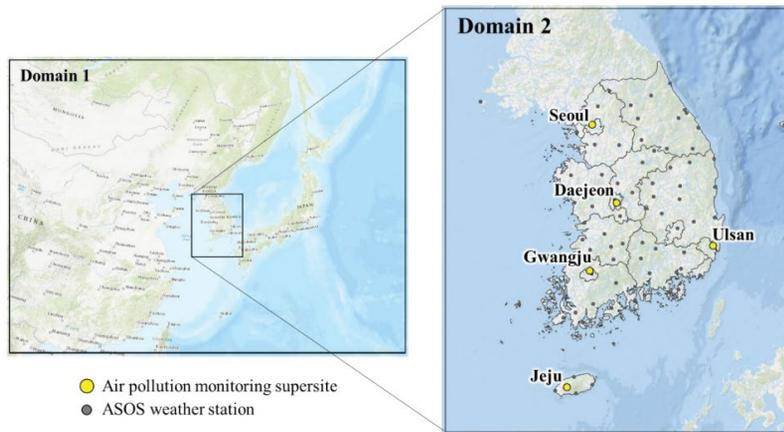


Fig. 1. The modeling domains at horizontal grid resolutions of 27-km (left) and 9-km (right), and the locations of seventeen authorities, five air pollution monitoring supersites (Seoul, Daejeon, Gwangju, Ulsan, and Jeju) and ASOS weather stations in South Korea.

기간에 대한 물질별 배출량이 $PM_{2.5}$ 중량 및 성분 농도에 미치는 영향을 전국 평균과 17개 시도로 구분하여 살펴보았다. 미세먼지 정책 수립과 평가에는 도시 대기측정소의 관측 농도가 기준이 되므로 본 연구에서도 각 지자체에 해당되는 측정소를 기준으로 분석하였다. 대기질 모사 평가와 분석에 사용된 $PM_{2.5}$ 성분 농도와 $PM_{2.5}$ 중량 농도는 각각 전국 5지점의 대기환경연구소(서울, 대전, 광주, 울산, 제주)와 462지점의 도시대기측정망에서 관측된 값이다. 기상 관측 자료는 종관기상관측소(ASOS, Automated Synoptic Observing System) 79지점에서 관측된 기상인자(기온, 풍속, 상대습도)를 사용하였다.

2.2 기본 모사

대기질 모사에 사용된 모델은 Community Multi-scale Air Quality (CMAQ) ver.5.3.2 (U.S. EPA, 2020)이다. 모사영역은 국외로부터의 장거리 수송되는 대기오염물질의 영향을 고려하기 위하여 27 km 수평해상도의 동북아영역(174×128 격자)과 9 km 수평해상도의 남한영역(67×82 격자)으로 구성하였다(그림 1참고). CMAQ 모델의 가스상 물질 및 입자상 물질 화학 메커니즘은 각각 the State Air Pollution Research

Center 07TC (SAPRC07TC; Hutzell *et al.*, 2012)와 AERO6 (Simon and Bhawe, 2012)를 선택하였다. 대기질 모사에 필요한 기상 입력자료 생성을 위하여 Weather Research & Forecasting (WRF; Skamarock *et al.*, 2008) ver.3.9.1 모사를 수행하였다. 이때 WRF 모델의 미세물리과정 (Microphysics)은 WSM6 (Hong and Lim, 2010), 장·단파 복사모수화 방안은 RRTMG (Iacono *et al.*, 2008), 대기경계층 방안은 YSU PBL (Hong *et al.*, 2006)을 사용하였다. WRF 모델의 초기/경계조건은 Final (FNL) Operational Global Analysis 1 degree 자료 (NCEP/NWS/NOAA, 2000)를 입력하였고, 모사 기간은 초기적응시간 (Spin-up time)과 2차 계절관리제 기간을 포함한 2020년 11월 30일 00 UTC부터 2021년 4월 1일 00 UTC이다. WRF 모델에서 계산된 1시간 간격의 격자별 기상인자(기온, 풍향·풍속, 상대습도, 기압 등)를 Meteorology-Chemistry Interface Processor (MCIP) ver.4.3 전처리 과정을 거쳐 CMAQ의 입력자료 형식으로 변환하였다.

배출량 입력자료의 경우, 국외에 대해서는 Satellite Integrated Joint monitoring of Air Quality (SIIAQ) ver.1, 국내는 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2018 (NAIR, 2020)을 Sparse Matrix Opera-

tor Kernel Emission (SMOKE; Benjey *et al.*, 2001) ver.3.1 모델에 입력하여 시간, 공간, 종할당을 수행한 뒤 CMAQ-ready 입력자료로 변환하였다. 기본 모사는 CAPSS 2018에서 제공하는 모든 배출물질(NO_x , SO_2 , PM_{10} , $\text{PM}_{2.5}$, CO, VOCs, NH_3 , TSP, BC, 9종)을 입력하여 수행하였다. 모사영역에 대한 식생배출량은 Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN; Guenther, 2006) ver.2.04을 이용하여 산정하였다.

2.3 배출량 삭감 모사

배출물질별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향은 CAPSS 2018 중 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 결정에 중요한 SO_2 , NO_x , NH_3 , VOCs와 $\text{PPM}_{2.5}$ 를 대상으로 분석되었다. 국내 배출에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향과 민감도를 함께 살펴 보기 위해서 CAPSS 2018의 연간 배출량을 기준으로 50%와 100% 삭감을 설정하였으며, 이보다 적은 배출 삭감(35%)에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향과 비선형성 검토는 You (2022)을 참고할 수 있다. 우선, 각각의 개별 물질에 대해 50%의 삭감율을 적용한 대기질 모사(C_{SO_2-50} , C_{NO_x-50} , $C_{\text{VOC}-50}$, C_{NH_3-50} , $C_{\text{PPM}_{2.5-50}}$)를 수행하였다. 이와는 별도로 다섯 물질을 동시에 삭감한 모사(C_{All_50})를 추가로 수행하여 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 변화를 비교하였다. 또한 개별 물질별 배출량을 100% 삭감한 대기질 모사(C_{SO_2-100} , C_{NO_x-100} , $C_{\text{VOC}-100}$, C_{NH_3-100} , $C_{\text{PPM}_{2.5-100}}$)와 5가지 배출물질을 동시 100% 삭감한 모사(C_{All_100})를 수행하여 배출량 저감 정도에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향의 비선형성을 검토하였다.

식(1)은 본 연구에서 이용한 비선형 지수(Nonlinearity Index, NI)에 대한 정의를 나타낸 것이다. 배출량에 대한 0 → 50% 삭감 구간과 50 → 100% 삭감 구간에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 변화 폭이 동일한 경우 비선형 지수는 1이 되고, 배출 변화에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 변화는 선형적 관계로 정의될 수 있다. 이에 비해 한 구간에서의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 변화 폭이 크거나 작을 경우, 비선형 지수는 1보다 작거나 클 수 있다. 비선형 지수가 1에서 멀어질수록 배출과 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 변화의 관계가

비선형적임을 의미한다. 식(1)에 제시된 비선형 지수는 50 → 100% 배출량 삭감 시 0 → 50% 삭감에 비해 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 변화가 클 경우 1보다 큰 값을 보인다.

$$\text{Nonlinearity index (NI)} = \Delta \text{PM}_{2.5}^{E_{50-100\%}} / \Delta \text{PM}_{2.5}^{E_{0-50\%}} \quad (1)$$

$\Delta \text{PM}_{2.5}^{E_{0-50\%}}$: 기본 배출량 대비 50% 배출량 삭감에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향

$\Delta \text{PM}_{2.5}^{E_{50-100\%}}$: 배출량 50% 대비 100% 배출량 삭감 시 (50% 추가 삭감 시) $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향

3. 연구 결과

3.1 모사 수행 평가

기본 모사에서 계산된 $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 농도를 도시대기측정망에서 관측된 국내평균 농도와 비교하여 모사 정확도를 평가하였다(그림 2). 대상기간 동안 $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 일평균 농도에 대한 관측-모사간 상관관계수(Correlation Coefficient)는 각각 0.84, 0.89, 0.80이었다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우, 계절관리제 기간 평균 관측 및 모사 농도는 각각 24.0, 25.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었고, 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 과대 모사하였다. 3월 28~30일에는 관측과 비교하여 모사 농도가 매우 낮았는데, 이는 황사의 영향이 반영되지 못했기 때문이다. NO_2 와 SO_2 의 관측농도는 각각 20.8, 3.4 ppb이었고, NO_2 는 4.2 ppb 과소 모사한 반면, SO_2 는 0.1 ppb 과대 모사하였다. 이러한 관측-모사 농도 간 차이는 기상 및 배출량 입력자료의 오차, 수치모델의 모수화 과정 등에서 비롯될 수 있다.

해당기간 평균 WRF 모델에서 계산된 10-m 풍속의 관측 및 모사값은 2.02 m/s, 3.55 m/s이었고, 평균 편차는 1.53 m/s로 지표 풍속은 과대 모사하였다. 풍속의 Root Mean Square Error (RMSE)는 2.33 m/s, Index of agreement (IOA)는 0.69 수준이었다. 지표 풍속의 관측-모사 차이와 과대모사는 9 km × 9 km로 설정된 수평해상도 및 WRF 모델에서 고려하지 못하는 지면 효과가 원인이 될 수 있다(Ngan *et al.*, 2013;

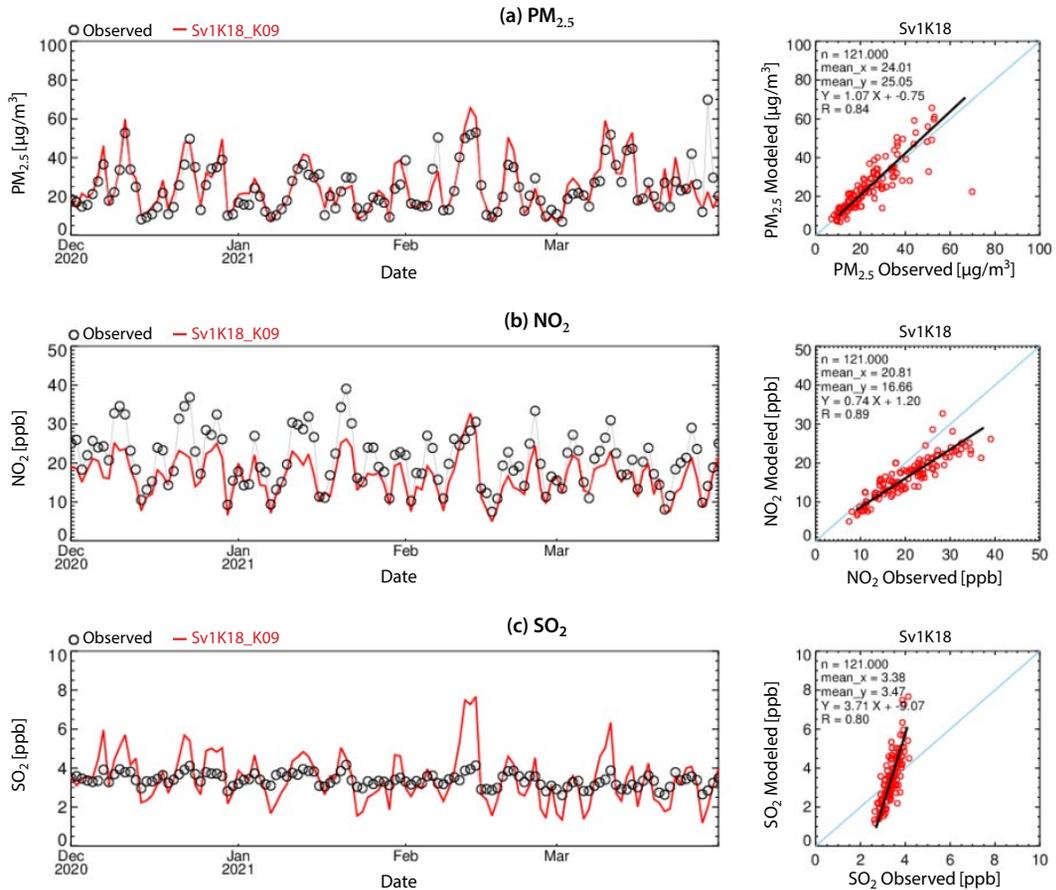


Fig. 2. Time-series and scatter plots of simulated and observed daily mean PM_{2.5}, NO₂, and SO₂ during the 2nd seasonal PM management period.

Jiménez and Dudhia, 2012). 2-m 기온의 평균 편차와 RMSE는 각각 -0.93°C , 2.37°C 이고, IOA는 0.97로 1°C 미만의 cold bias가 모사되었다. 상대습도의 경우 평균 편차는 -4.09% 이고 RMSE는 14.93%이었다(보충자료 Fig. S1, Table S1).

PM_{2.5} 성분 농도별 모사 평가는 국외 배출 영향을 크게 받는 백령도를 제외한 서울, 대전, 광주, 울산, 제주에 위치한 5지점 대기환경연구소를 기준으로 수행되었다(그림 3). 비교 대상물질은 질산염(NO₃⁻), 황산염(SO₄²⁻), 암모늄(NH₄⁺), Elemental Carbon (EC)와 Organic Carbon (OC)이다. 성분별로 살펴보면 관측-모사된 질산염 농도의 평균 편차는 -0.5 (대

전) $\sim 2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (울산)이었고, 대전을 제외하고는 4지점 평균 $1.33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과대 모사하였다. 황산염은 대부분의 지점에서 관측-모사 간 편차가 $\pm 0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 작았으나, 서울에서는 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가까이 과대 모사하였다. 암모늄은 대전과 광주의 관측-모사 평균 편차가 각각 -0.78 , $-0.87 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 과소 모사되었고, 나머지 3지점에서는 관측과 유사한 수준의 모사 농도가 계산되었다. 서울에서는 EC 또한 과대 모사되었으며, 기간 평균 관측 및 모사된 EC 농도는 각각 0.9, $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 약 $+0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보였다. 이는 대전과 광주에서 EC 모사 농도가 과소모사(대전, 광주 EC의 관측-모사 평균 편차: -0.1 , $-0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 보

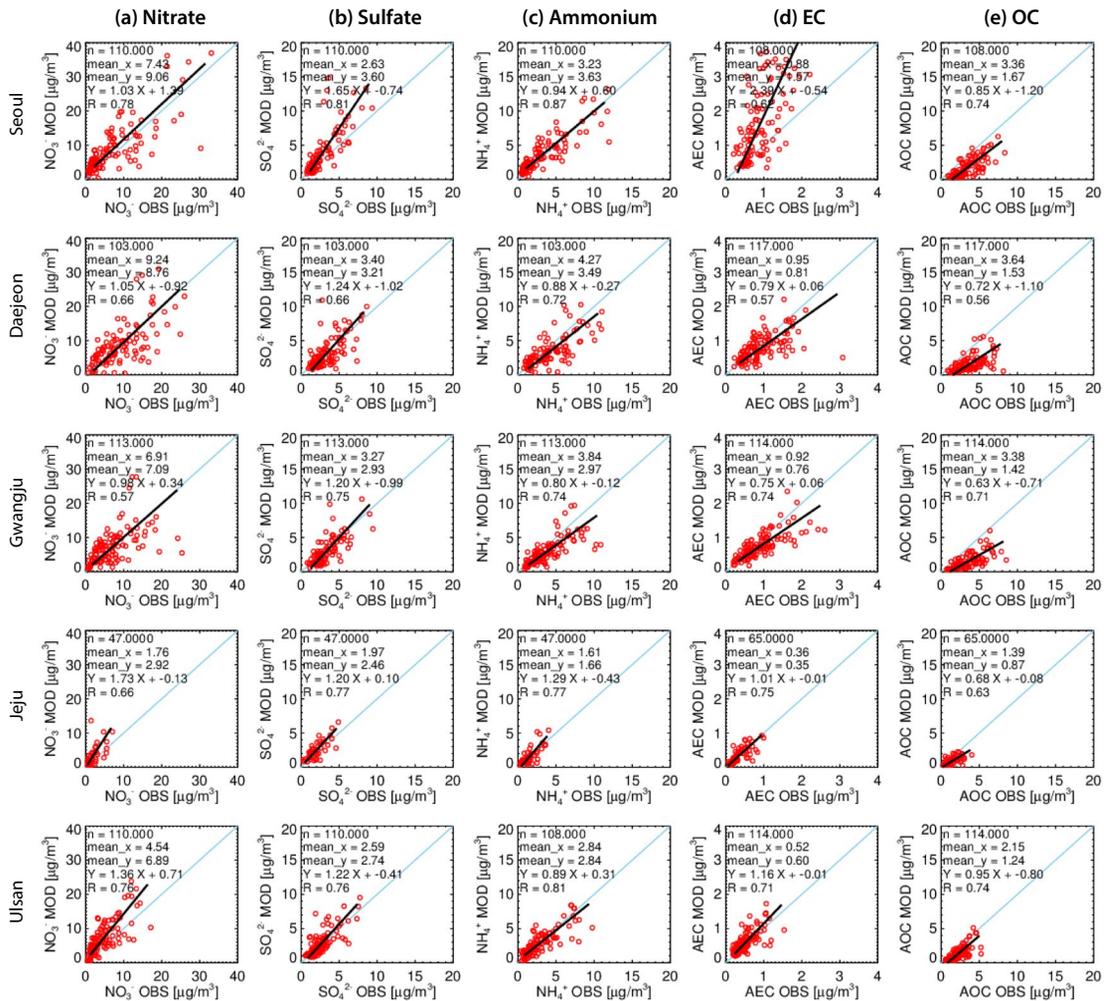


Fig. 3. Scatter plots of simulated and observed daily mean (a) nitrate, (b) sulfate, (c) ammonium, (d) elemental carbon (EC), and (e) organic carbon (OC) at Seoul, Daejeon, Gwangju, Jeju, and Ulsan supersites during the 2nd seasonal PM management period.

인 것과는 차이가 있다. 반면 OC는 5개 지점 모두 과소모사를 보였다(대전 -2.11~제주 -0.52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3.2 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 민감도

그림 4는 국내 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 변화를 공간적으로 보인 것이다. 공간 분포의 쉬운 비교를 위해 배출량 100% 삭감의 경우 50% 배출량 삭감의 범례에 2를 곱하였다. VOC를 제외하면, 배출량을 50% 삭감했을 때의 PM_{2.5} 농도 감소에 비해, 100%

삭감했을 때 PM_{2.5} 농도 감소 폭은 2배 이상 증가한다. 예를 들어, NH₃의 경우 국내 배출량을 50% 삭감할 경우 국내 평균 PM_{2.5} 농도는 1.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하나, 100% 삭감 시에는 7.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소한다. NO_x와 모든 물질의 배출량을 동시에 50% 삭감한 경우에도 국내 PM_{2.5} 농도는 각각 배출량을 50% 삭감 시에는 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하나, 배출량을 100% 삭감한 모사에서는 5.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 13.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소가 예측된다.

이러한 비선형적인 배출량-농도 변화는 그림 5(a)

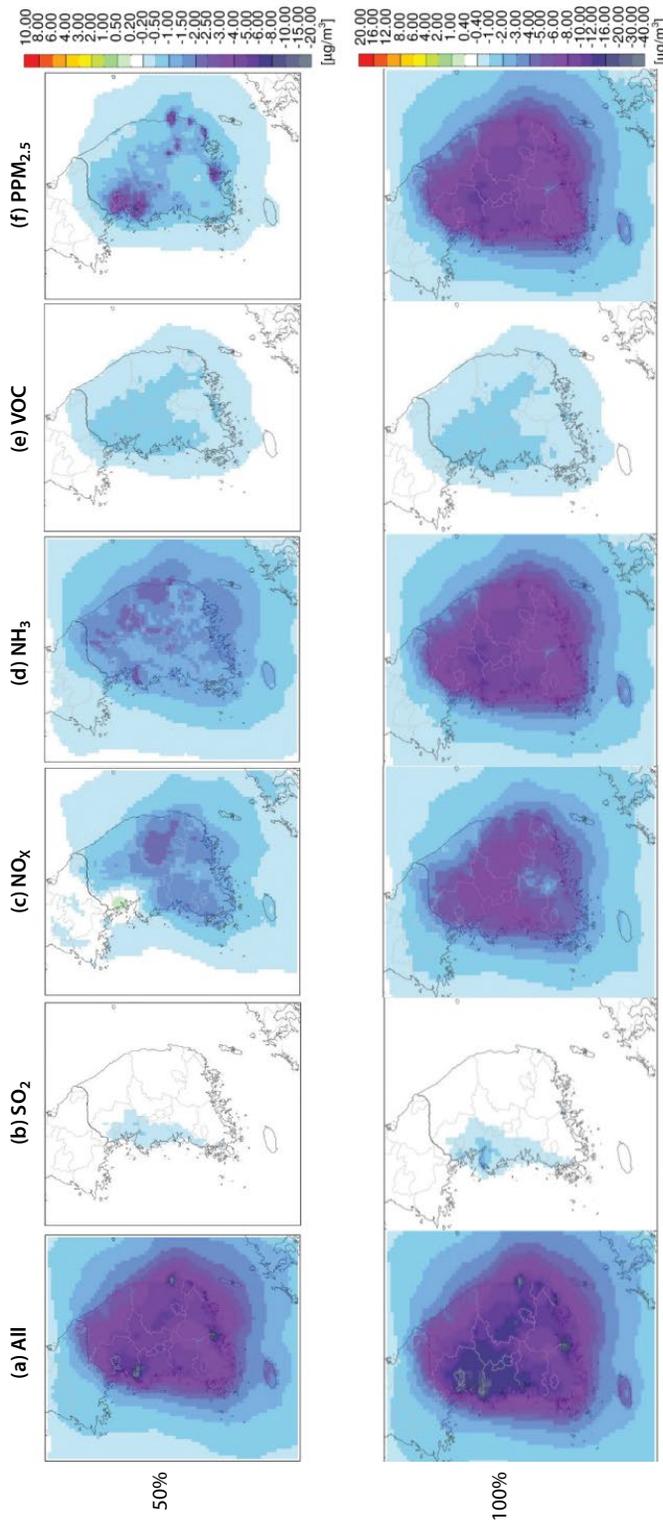


Fig. 4. Spatial distributions of 50% (up) and 100% (bottom) anthropogenic emission reductions in South Korea during the 2nd seasonal PM management period (December 2020~March 2021). Note that the legend ranges in 100% emission reductions are doubled for direct comparison with 50% emission reduction simulations. 'All' represents five precursor emissions of SO₂, NO_x, NH₃, VOC and Primary PM_{2.5} (PPM_{2.5}) are simultaneously reduced.

에서 배출량을 0→50% 삭감 구간(이하 ‘초기 50% 삭감’)에 비해 배출량을 50→100% 삭감한 구간(이하 ‘후기 50% 삭감’)에서 NO_x와 NH₃ 배출량 변화에 따른 PM_{2.5} 농도 변화를 보이는 기울기가 급해지는 결과로 나타난다. 이와 같은 결과에서 국내 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 개선은 삭감되는 배출량의 규모에 따라 달라질 가능성이 높다.

PPM_{2.5}의 경우, 주로 해당 물질의 배출밀도가 높은 대도시와 산업 지역에서 배출량 감소에 따른 PM_{2.5} 농도 개선이 두드러지며, 배출밀도가 낮은 주변 지역으로 갈수록 개선 효과가 뚜렷하게 낮아진다(그림 4(f)). 이는 PPM_{2.5}가 1차 대기오염물질로 주로 배출 지역에서 농도 영향이 높고, 주변지역으로 이동되면서 희석 효과가 증가하기 때문이다(Kim *et al.*, 2017a; Kim *et al.*, 2017b; Kim *et al.*, 2017c). 이에 반해 NO_x 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 개선은 배출량 삭감 지역과 농도 개선 지역이 항상 일치하지는 않는다. 그림 4(c)에서 NO_x 배출량을 50% 삭감 시, PM_{2.5} 농도는 NO_x 배출량이 많은 수도권보다는 그 풍하 지역에서 현저하게 더 감소하며, 초기 50% 삭감 시 일부 수도권의 경우 PM_{2.5} 농도가 오히려 증가한다. 이는 PM_{2.5}의 대기 중 2차 생성 과정의 비선형성을 보이는 대표적인 예로(Clappier *et al.*, 2017; Kim *et al.*, 2017a), 주로 NO_x 배출이 높은 지역에서 나타난다(Kim *et al.*, 2021f; Bae *et al.*, 2020a; Huang *et al.*, 2020). 이러한 결과에서 무기성 이온 성분 등 2차 PM_{2.5} 구성비가 크게 증가하는 시기에 시행되는 계절관리제 기간에는(Bae *et al.*, 2019), 배출량 중심이 아닌, 농도 중심의 대기질 관리에 보다 집중할 필요가 있다.

그림 5(b)는 배출량 삭감에 따라 대상기간 동안 국내 평균 PM_{2.5} 농도 변화를 보이는 것으로 초기 50% 삭감(배출량 삭감 0→50%)에 따른 배출물질별 효과는 PPM_{2.5} (2.3 μg/m³) > NH₃ (1.5 μg/m³) > NO_x (1.0 μg/m³) > VOC (0.7 μg/m³) > SO₂ (0.2 μg/m³) 순이었으며, 후기 50% 삭감(배출량 삭감 50→100%)에 따른 PM_{2.5} 농도 개선 효과는 NH₃ (6.3 μg/m³) > NO_x

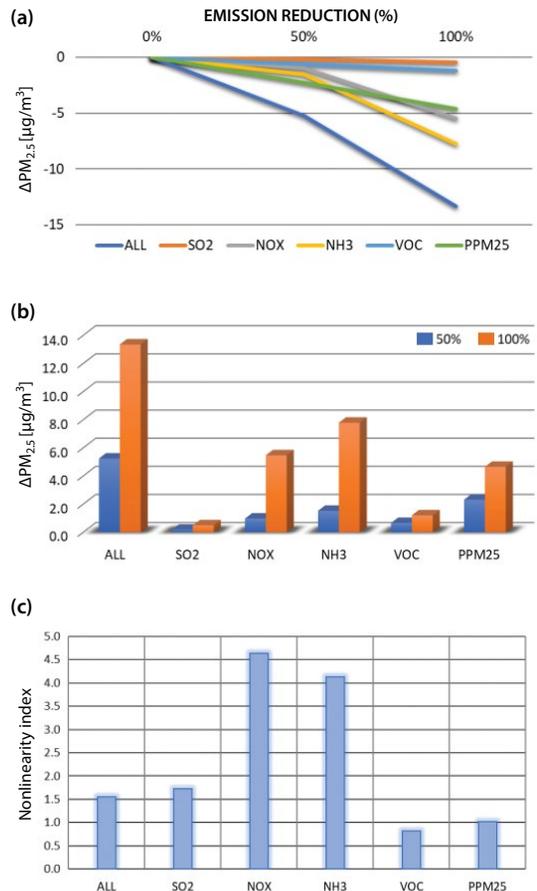


Fig. 5. Comparisons of (a) of PM_{2.5} response to domestic anthropogenic emission reductions, (b) the impacts of the emission reduction, and (c) the non-linearity estimated for the precursor emissions in South Korea during the 2nd seasonal PM management period.

(4.5 μg/m³) > PPM_{2.5} (2.3 μg/m³) > VOC (0.5 μg/m³) > SO₂ (0.3 μg/m³) 순이었다. 1차 대기오염물질인 PPM_{2.5}의 경우 초기 및 후기 50% 삭감에 따른 농도 변화가 동일하다. 반면, 2차 PM_{2.5}를 구성하는 NH₃와 NO_x는 초기 50% 삭감 시에는 각각 1.5, 1.0 μg/m³의 PM_{2.5} 농도를 감소시킨다. 이에 반해 후기 50% 삭감 시에는 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 6.3, 4.5 μg/m³로 크게 증가하며, 이는 개별적으로 NH₃와 NO_x의 전체 배출량을 삭감에 따라 변화되는 PM_{2.5} 농도의 81%, 82%에 해당한다(그림 5(b) 참조). 이러한 결과는 NH₃와

NO_x의 경우 작은 비율의 배출량 삭감 보다는 50% 이상 배출량을 크게 삭감할 시, PM_{2.5} 농도가 상대적으로 크게 개선됨을 의미한다.

그림 5(c)에서 NO_x 배출량에 대한 국내 PM_{2.5} 농도의 비선형 지수가 4.6이라는 점은 NO_x 배출량을 50% 삭감 시와 비교하여, 그 이후 50% 삭감 시 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 4.6배 정도 증가하는 것을 의미한다. 그림 5(c)에서 VOC와 PPM_{2.5}에 대한 비선형 지수는 0.8, 1.0이나, SO₂와 NH₃의 경우 비선형 지수는 1.7, 4.1로 높다. 모든 물질 동시 삭감 시에 대한 비선형 지수는 1.5이다.

동북아 및 국내의 경우 NH₃ 배출량이 많아 adjust-ed gas ratio (adjGR)가 높다(Lim *et al.*, 2022; Kim *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021f; Park and Cho, 2020). 이 때문에 NH₃ 배출량을 충분히 감소시키지 않을 경우 시·공간적으로 NH₃ 과잉 조건이 유지되며, 이로 인해 기간 평균 PM_{2.5} 농도를 낮추기는 쉽지 않다. 이에 반해 NH₃ 배출량을 크게 낮출 경우, NH₃는 제한 물질(limiting reactant)로 전환되어 질산암모늄 등의 생성이 크게 감소하게 된다. NO_x 역시 초기 50% 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 저감 효과가 작는데 이는 국내의 NO_x 배출밀도가 이동오염원이 밀집된 대도시 등에서 매우 높아(Bae *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021e), NO_x 배출량이 감소할 경우 NO 적정효과가 감소하여 HNO₃와 질산염 생성이 오히려 증가하기 때문이다(Bae *et al.*, 2020a; Kim *et al.*, 2017a; Kim *et al.*, 2017b). VOC와 SO₂의 경우 국내 전역에 걸친 PM_{2.5} 농도 영향은 다른 물질에 비해 작으나, 해당 물질의 배출원이 밀집된 지역에서는 그 중요도가 달라질 수 있다.

1~3차 계절관리제 동안 배출량 감축이 집중되었던 SO₂의 경우 PM_{2.5} 농도에 대한 민감도가 다른 배출물질에 비해 상대적으로 작게 모사되었다. 국내 배출에 의한 황산염 농도 영향을 평가하기 위해서는 백령 등 국외 기원 대기오염물질의 유입 지점에 위치하는 풍상 지역에서의 농도와 국내 내륙에서의 농도 변화에 대한 종합적인 분석이 향후 필요하다. 이상의

결과를 정리하면, PM_{2.5} 농도 개선은 PPM_{2.5}를 비롯한 전구물질의 배출량을 어느정도 저감할지에 따라 그 효과가 달라지므로, 정책 수립에 앞서 배출-농도의 비선형적인 관계가 우선적으로 이해되어야 한다.

3.3 배출량 삭감에 따른 시도별 PM_{2.5} 농도 변화

3.2절에서 살펴본 배출물질별 50%, 100% 배출량 저감에 따른 PM_{2.5} 농도 변화를 17개 시도별로 살펴 보았다(그림 6). 먼저, 모든 물질에 대해 국내 배출량을 50% 삭감 시 PM_{2.5} 농도 감소 효과가 큰 지자체는 경북(7.7 µg/m³)과 서울(7.4 µg/m³)이었고, 가장 작은 지역은 강원(3.4 µg/m³)과 제주(2.2 µg/m³)였다. 100% 배출량 삭감시에는 경북(17.3 µg/m³)보다는 서울(19.4 µg/m³)에서 PM_{2.5} 농도 감소가 더 컸고, 그 외에도 경기(14.8 µg/m³), 인천(14.5 µg/m³), 세종과 충남(14.0 µg/m³) 등 PM_{2.5}의 전구물질 배출이 많은 지역을 중심으로 PM_{2.5} 농도 감소가 컸다.

SO₂ 배출량 삭감은 타 배출물질과 비교하여 낮은 PM_{2.5} 농도 감소효과를 보였다(그림 6(b)). 국내 SO₂ 배출을 50% 삭감할 경우, 충남, 인천, 경기, 서울에서 PM_{2.5} 농도는 0.3 µg/m³가량 감소하며, 100% 삭감에서는 인천과 충남에서 PM_{2.5} 농도가 각각 1.0, 0.9 µg/m³으로 감소하여 다른 시도에 비해 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 높았다. 그림 4에서 보이듯이 SO₂ 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 감소효과는 서울과 인천, 경기, 충남과 같이 서해 연안을 포함한 SO₂ 배출량이 집중된 서부 지역을 중심으로 높게 모사되었다.

반면 국내 NO_x 배출량을 50% 삭감 시(그림 6(c)), PM_{2.5} 농도가 오히려 증가하는 지역이 존재하였는데, 서울(+0.1 µg/m³)과 인천(+0.3 µg/m³)이 해당되며, 경기에서도 PM_{2.5} 농도의 감소 폭(0.1 µg/m³)이 타 지자체와 비교하여 작았다. 이는 NO_x 배출 감소에 따른 NO 적정효과가 줄어들었기 때문이며(Bae *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2021g), 이후 3.4절에서 제시될 서울 등에서 OC의 농도 증가가 눈에 띈다(그림 6(c) 참조). NO_x 배출량을 100% 삭감 시에는 해당 지역에서도 PM_{2.5} 농도 감소(서울: 5.6 µg/m³, 인천: 4.5 µg/m³)

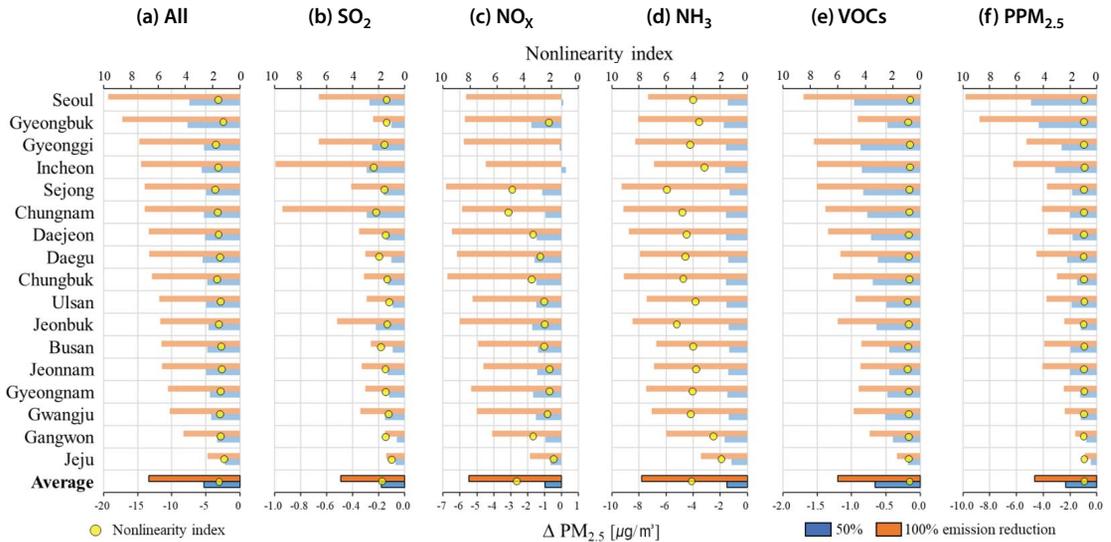


Fig. 6. Impacts and nonlinearity index of (a) All, (b) SO₂, (c) NO_x, (d) NH₃, (e) VOCs, and (f) PPM_{2.5} emission reductions on PM_{2.5} concentrations for the seventeen authorities in South Korea during the 2nd seasonal PM management period.

하였다. NO_x 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 감소가 가장 크게 나타난 지역은 50% 삭감 시 경북(1.8 μg/m³)이었으나, 100% 삭감 시에는 세종(6.8 μg/m³)과 충북(6.7 μg/m³)에서 PM_{2.5} 감소 영향이 가장 크게 나타났다. NH₃ 50% 삭감에는 동부지역인 경북(1.8 μg/m³)과 강원(1.7 μg/m³)에서 PM_{2.5} 농도 감소가 높았는데, 100% 삭감에서는 경북(8.1 μg/m³)과 강원(6.0 μg/m³) 보다는 세종, 충남, 충북에서 각각 9.3, 9.2, 9.1 μg/m³으로 PM_{2.5} 농도 감소 효과가 컸다.

국내 VOC 배출량의 50% 삭감은 1.0(서울)~0.2 μg/m³(제주), 100% 삭감에서도 1.7(서울)~0.3 μg/m³(제주)의 PM_{2.5} 농도 감소를 보였고, 제주의 경우 국내 VOC 배출 영향을 거의 받지 않는 것으로 모사되었다. PPM_{2.5}는 50%와 100% 삭감 각각에 대해서 서울(4.9, 9.8 μg/m³)과 경북(4.4, 8.8 μg/m³)에서 PM_{2.5} 농도 영향이 크게 나타났는데, 이들 지역에서 1차 대기 오염물질인 PPM_{2.5}의 배출밀도가 높기 때문이다. 한 가지 주목할 점은 PPM_{2.5} 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 감소가 다른 배출물질에 비해 상대적으로 크고, 지역 간 편차도 크다는 점에서 정확한 시도별 배출량

산정이 중요해 보인다.

각 지자체별 배출물질별 삭감 구간(0→50%, 50→100%)에 따른 비선형지수를 검토하면, 모든 물질을 동시에 줄였을 때에는 1.18(제주)~1.82(세종), SO₂는 1.00(제주)~2.41(인천)로 지역 간 차이가 상대적으로 작았다. 반면 NO_x는 배출 감소에도 불구하고 농도가 증가하였던 서울, 인천, 경기 지역을 제외하고 1.82(제주)~5.19(충남)의 범위를 보여 지역 간 차이가 컸다. 특히, 중부권역에 해당하는 충남과 세종에서는 비선형지수가 각각 5.2와 4.9로, NO_x 배출량의 초기 50% 삭감보다는 후기 50% 삭감에서 약 5배나 더 큰 PM_{2.5} 농도 감소를 보였다. NH₃도 NO_x와 마찬가지로 1.93(제주)~6.03(세종)로 지역 간 비선형지수의 차이가 컸다. 반면, VOC는 0.77(서울)~0.93(전남)로 모든 지자체에서 1 미만의 비선형 지수를 보여 다른 물질들과는 다르게 후기 50% 삭감에 비해 초기 50% 삭감 시 PM_{2.5} 농도 감소 효과가 더 크게 나타났다. 마지막으로 PPM_{2.5}의 경우, 17개 지자체 모두 1에 가까운 비선형지수(1.01~1.03)로 PPM_{2.5} 배출 삭감량에 따른 PM_{2.5} 농도 감소가 선형적임을 유추할 수

있다.

배출물질별 PM_{2.5} 농도 영향을 지자체별로 정리하면, CAPSS 2018 배출목록 기반 50% 삭감 시에는 대부분의 지자체에서 PPM_{2.5} 배출 삭감에 대한 PM_{2.5} 농도 감소 효과가 가장 크게 나타났으나, 충북, 강원, 제주는 NH₃, 전북, 경남, 광주에 NO_x 배출 감소에 따른 PM_{2.5} 농도 감소 효과가 가장 컸다. 반면 100% 삭감 시에는 경북과 서울은 PPM_{2.5}의 효과가 가장 컸으나, 나머지 15개 지자체에서는 NH₃ 배출량 감소에 따른 PM_{2.5} 농도 감소효과가 가장 크게 나타나, 지자체별, 배출 삭감율에 따라 PM_{2.5} 농도 감소에 효과적인 배출물질이 다르게 제시되었다.

3.4 PM_{2.5} 구성 성분 변화

본 절에서는 배출물질별 50, 100% 삭감에 따른 PM_{2.5} 구성 성분(질산염, 황산염, 암모늄, EC, OC)의 변화를 5개 대기환경연구소를 중심으로 살펴보았다(그림 7). 먼저 모든 물질에 대해 50%와 100%의 배출량을 삭감했을 경우, 성분을 특정할 수 없는 나머지 PM_{2.5} 성분들을 의미하는 Others를 제외하면 5지점 모두 질산염이 가장 큰 농도 변화를 보였다. 배출량 50% 삭감 시 질산염 농도는 5지점 평균 1.8 µg/m³, 측정소별로는 2.5(대전)~0.9(제주) µg/m³ 범위에서 감소하였다. 5지점 평균에서 질산염 다음으로는 암모늄(0.60 µg/m³) > 황산염(0.23 µg/m³) > EC(0.24 µg/m³) > OC(0.19 µg/m³) 순으로 농도 감소가 낮아졌다. 다만 수도권 대기환경연구소(서울)의 경우, 황산염, 암모늄보다는 EC, OC 및 Others에 대한 농도 감소가 상대적으로 컸는데, 서울에서 SO₂와 NH₃보다 VOCs나 PPM_{2.5} 배출밀도가 상대적으로 높기 때문으로 판단된다. 서울의 VOCs와 Primary PM_{2.5} 배출밀도(각각 119.6, 6.6 ton/yr/km²)는 서울을 제외한 16개 지자체 평균(각각 23.4, 1.3 ton/yr/km²)보다 5배 이상 높으나, SO₂와 NH₃의 배출밀도는 각각 0.3배, 1.4배 수준이었다.

SO₂ 배출량 삭감(그림 7(b))에서는 황산염의 농도 감소가 뚜렷하였는데, 배출량 삭감 비율 50%와 100%

각각에 대하여 5지점 평균 0.12, 0.28 µg/m³의 황산염 농도가 감소하였다. 지역별로는 50%와 100% 모두 서울에서 0.22, 0.52 µg/m³로 황산염 농도 감소가 가장 컸고, 제주에서 가장 작았다. 황산염 농도 감소에 따라 암모늄의 농도 감소도 확인되나, 황산염 농도 감소에 따라 질산염과 OC 농도의 약한 증가도 보인다(50%와 100% 삭감 각각에 대해 0.01, 0.02 µg/m³ 증가). 이는 국내는 많은 지역에서 NH₃-rich 조건으로 알려져 있으나(Kim *et al.*, 2021a; Park and Cho, 2020), 시·공간적으로 일부 상황에서는 황산염 농도 감소로 인해 잉여된 NH₃가 질산염과 반응한 결과로 해석된다(Kim *et al.*, 2021b).

반대로 NO_x 배출량 삭감 시에는(그림 7(c)) 5지점 평균 질산염 농도가 뚜렷하게 감소하나(50% 삭감: -1.10 µg/m³, 100% 삭감: -3.47 µg/m³), OC와 황산염의 농도는 증가도 발생하였다. OC의 경우, NO_x 50% 삭감 모사에서 오히려 농도가 0.12 µg/m³(5지점 평균) 증가하였고 지점별로는 0.01(제주)~0.25 µg/m³(서울)의 범위를 보였다. 황산염 또한, NO_x 50% 삭감에서 서울과 대전 0.07 µg/m³, 광주와 울산 0.06 µg/m³, 제주 0.02 µg/m³가량 농도가 증가하였고, NO_x 100% 삭감에서는 대전, 광주, 울산, 제주는 황산염 농도가 감소하였으나, 서울에서는 여전히 0.09 µg/m³ 증가하였다. 이러한 OC와 황산염의 농도 증가는 배출량 삭감 노력에도 불구하고 PM_{2.5} 농도 개선 효과를 상쇄시키는 원인이 될 수 있다. 특히, 서울의 경우 NO_x 배출량 50% 삭감 시에 질산염의 농도 감소(0.38 µg/m³)에 비해 황산염, OC와 Others의 농도 증가(0.67 µg/m³)가 오히려 높아 PM_{2.5} 중량 농도는 0.20 µg/m³ 만큼 증가하는 것으로 모사되었다. NO_x 배출밀도가 높은 대도시에서는 NO_x 배출량 감소에 따른 NO-titration(NO + O₃ → NO₂ + O₂)은 감소하고 O₃-VOCs-NO_x 반응을 변화시켜 오존, OH와 같은 radical은 오히려 증가할 수 있다(Bae *et al.*, 2021b; Huang *et al.*, 2020). 이러한 대기중 Oxidizing capacity의 증가는 SO₂ → H₂SO₄ → 황산염의 산화와 Secondary OC의 증가로 이어질 수 있다. 따라서 배출저감 정책 수

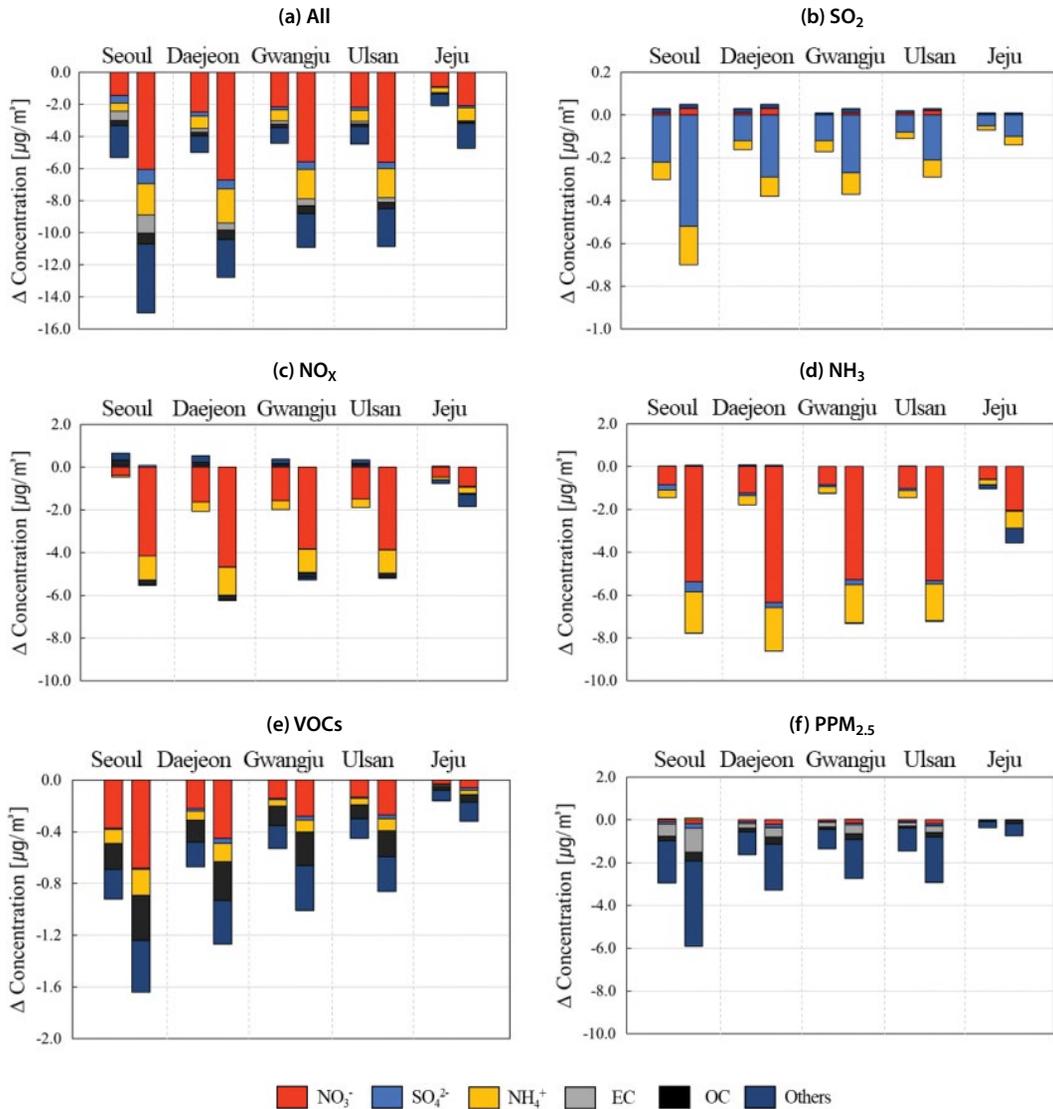


Fig. 7. Paired bars of the impacts of (a) All, (b) SO₂, (c) NO_x, (d) NH₃, (e) VOCs, and (f) PPM_{2.5} emission reductions (50% and 100%) on nitrate, sulfate, ammonium, EC, OC and Others concentrations at Seoul, Daejeon, Gwangju, Jeju, and Ulsan super-sites during the 2nd seasonal PM management period.

립 과정에서 이러한 물질별 특성에 대한 고려가 필요해 보인다.

NH₃ 배출량의 감소는 질산염과 황산염 농도 감소에 효과적인 것으로 모사되었다(그림 7(d)). NH₃ 배출량 50% 삭감과 100% 삭감 각각에 대한 질산염의 농도는 0.90, 4.87 μg/m³ 감소하였고, 황산염은 0.12,

0.23 μg/m³ 감소하였다. NH₃의 배출량 감소에서 암모늄보다 질산염의 농도 감소 효과가 더욱 크게 나타났고, 특히 NH₃ 배출량을 100% 삭감하였을 때 질산염의 농도 감소는 대전 6.34, 서울 5.37, 광주 5.27, 울산 5.32 μg/m³로 크게 나타났다. 이러한 점을 미루어 볼 때, NH₃ 배출 관리는 PM_{2.5} 성분 중 높은 비중을 차지

하는 질산염 농도 감소에 중요한 역할을 할 수 있을 것으로 예상된다. 다만 앞에서 언급한 바와 같이 전반적으로 국내는 NH₃ 풍부 조건이므로 NH₃ 배출량 삭감에 따른 PM_{2.5} 농도 개선은 지역별로 차이를 보일 수 있다.

VOCs 배출량 삭감(그림 7(e))은 질산염과 OC에 대한 농도 감소 효과가 상대적으로 컸고 지역별로는 서울에서 컸는데, 50% 삭감 시에는 서울에서 질산염 0.37 µg/m³, OC 0.20 µg/m³로 최대로 감소하였고, 100% 삭감 시에는 질산염 0.68 µg/m³, OC 0.35 µg/m³가 감소하였다. 서울 이외에도 대부분의 대도시에서 VOCs 배출량 감소에 따라 낮아지는 OC 성분에 비해 질산염의 농도 감소가 컸으며, 이러 이유에서 이들 지역은 대기화학적으로 VOC 제한 조건일 가능성이 높다. 또한, VOCs 배출량 감소에 따른 Others 성분 감소도 확인되는데, 자세한 과정에 대한 설명은 향후 과정 분석(Process Analysis) 등을 통해 진행될 예정이다. PPM_{2.5} 배출량의 삭감은 PM_{2.5} 구성성분 중 EC를 비롯한 Others 농도 감소 효과가 크게 나타났다. EC의 경우, 5지점 평균 0.24 (50% 삭감), 0.47 µg/m³ (100% 삭감)의 농도 감소 효과가 확인되었고, 지점별로는 서울에서 0.57, 1.13 µg/m³로 크게 감소하였다(그림 7(f)).

4. 결 론

본 연구에서는 CAPSS 2018 배출목록을 기반으로 SO₂, NO_x, NH₃, VOCs, PPM_{2.5} 배출량이 국내 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향을 대기질 모사를 통해 제시하였다. 다섯 가지 배출물질 가운데 국내 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 큰 배출물질은 초기 50% 삭감(배출량 삭감 0 → 50%)에 대해서는 PPM_{2.5} (2.3 µg/m³), NH₃ (1.5 µg/m³), NO_x (1.0 µg/m³) 순이었고, 후기 50% 삭감(배출량 삭감 50 → 100%)에서는 NH₃ (6.3 µg/m³), NO_x (4.5 µg/m³), PPM_{2.5} (2.3 µg/m³)이었다. 특히, 1차 배출물질인 PPM_{2.5}와는 달리 2차 PM_{2.5} 생성과 관련된 배출

물질의 경우 PM_{2.5} 구성 성분에 미치는 농도 영향에서 차이를 보였다. 그 예로 SO₂ 배출량 삭감은 주로 황산염 농도 감소로 이어졌으나, NH₃의 경우 암모늄 농도 감소 이외에 질산염 농도 감소에서 보다 효과적이었다. NO_x 배출량 감소 역시 질산염 외에 암모늄 농도 감소를 유도하였으며, VOCs 배출량 감소는 OC 성분 외에 질산염 등 다른 물질의 농도를 보다 효과적으로 감소시켰다. 이러한 결과에서 대상 배출물질과 배출량 삭감 규모 선택에 따라 PM_{2.5} 중량 농도 및 구성 성분의 농도 감소 효과가 달라질 수 있다. 따라서, 배출량 저감 정책 수립 단계에서 각 물질별 배출-농도 반응에 대한 비선형적 변화와 민감도가 함께 고려되어야 한다.

지역적으로도 물질별 배출량 삭감에 대한 PM_{2.5} 농도 영향에 차이를 보였으며, 특히 서울과 같이 NO_x 배출이 밀집된 지역에서는 NO_x 배출을 50% 삭감 시 질산염의 감소에도 불구하고, 황산염, OC의 농도 증가로 인해 PM_{2.5} 중량 농도는 오히려 증가하였다. 이처럼 물질별 비선형성과 지역의 배출환경의 차이로 배출 저감 지역과 PM_{2.5} 농도 영향 지역이 일치하지 않으므로, 향후 PM_{2.5}를 비롯한 2차 대기오염물질의 관리 대책 수립 시에는 배출량 중심의 접근보다는 농도 개선에 집중하는 것이 중요해 보인다.

환경부에서 발표한 2차 미세먼지 계절관리제 시행으로 인한 배출 감축량은 PM_{2.5}, SO₂, NO_x, VOCs에 대해 6,237톤, 42,184톤, 52,834톤, 20,705톤이었고, 이는 본 연구에서 사용된 CAPSS 2018 연간 배출량의 각각 6.3%, 14.0%, 4.8%, 2.0%에 해당한다. 해당기간 동안 전국에서 관측된 PM_{2.5} 평균 농도가 24.3 µg/m³이었음을 감안하면 SO₂와 NO_x, NH₃, VOCs, PPM_{2.5}를 동시에 연 배출량의 절반 수준으로 줄인다 하더라도 예상되는 PM_{2.5} 농도는 19.1 µg/m³이므로, 현재의 수준보다 적극적인 배출 저감 노력이 수반되어야 함을 확인하였다. 다만, Bae *et al.* (2022)에 따르면 국내 배출목록에서 PM_{2.5} 관련 배출량이 과소평가 되었을 가능성이 높으므로, 국내 배출량 삭감에 따른 잠재적 PM_{2.5} 개선 폭은 배출목록을 현실화한 이후 평가가

바람직하다.

본 연구는 대기질 모사를 기반으로 50%와 100%라는 가상의 배출량 삭감에 대한 PM_{2.5} 농도 영향을 추정하였다. 연구결과에서 제시되었듯이 배출량의 삭감이 달라지면 배출-농도 간의 비선형성으로 인하여 PM_{2.5} 개선 효과는 달라질 수 있다. 이 때문에 PM_{2.5} 개선 정책 수립시에는 다양하고 보다 정교한 배출환경 및 조건에서의 대기질 모사 실험이 필요하다. 또한 대기질 모사의 경우, 대기 중 화학·물리 과정 모수화에서 발생하는 모델 자체의 오차와 입력되는 배출 불확도 등으로 인해 관측-모사간 차이가 존재하며, 본 연구의 PM_{2.5} 성분별 농도 재현성 역시 개선이 필요한 상황이다. 따라서 대기질 모사를 기반으로 대기질 정책효과 수립과 평가를 위해서는 PM_{2.5} 중량 농도뿐 아니라 성분별 모사 재현성 확보를 위한 연구가 향후 지속적으로 필요해 보인다.

감사의 글

본 연구는 삼성전자 종합 기술원과 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략프로젝트사업(2017M3D8A1092020)의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2019) Long-Range Transport Influence on Key Chemical Components of PM_{2.5} in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the Years 2012-2016, *Atmosphere*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, C., Kim, H.C., Kim, B.U., Kim, S. (2020b) Surface ozone response to satellite-constrained NO_x emission adjustments and its implications, *Environmental Pollution*, 258, 113469. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.113469>
- Bae, C., Park, S., Park, Y., Jang, J., Kim, H., Yoo, C., Kim, J. (2021a) Evaluation of Effectiveness of Seasonal PM-2.5 Management Plan on PM-2.5 Concentration over South Korea, *KOSAE Annual Conference Proceedings*, 193-193.
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021b) Local Authority Level Source Apportionments of PM_{2.5} 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, S. (2022) Adjustment of Foreign Emission Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations in South Korea based on Upwind Observations and Estimation of Domestic Emission Uncertainty, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 38(4), 624-636. <https://doi.org/10.5572/kosae.2022.38.4.624>
- Bae, M., Yoo, C., Kim, S. (2020a) Estimating the Shutdown Effect of the Old Coal-fired Power Plants on PM_{2.5} and its Composition, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 48-63. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.1.048>
- 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, J.-Y., Kim, E., Bae, C.H., Kim, B.-U., Kim, H. C., Kim, S. (2018) A Quantitative Analysis on Seasonal and Regional Variations of Sulfate Concentrations in South Korea using CMAQ Sulfate Tracking Tool during 2015~2016, *KOSAE Annual Conference Proceedings*, 201-201.
- Choi, S.-w., Bae, C.-h., Kim, H.-c., Kim, T., Lee, H.-k., Song, S.-j., Jang, J.-p., Lee, K.-b., Choi, S.-a., Lee, H.-j., Park, Y., Park, S.-y., Kim, Y.-m., Yoo, C. (2021) Analysis of the National Air Pollutant Emissions Inventory (CAPSS 2017) Data and Assessment of Emissions based on Air Quality Modeling in the Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 15(4), 114-141. <https://doi.org/10.5572/ajae.2021.064>
- Choi, S.-w., Kim, T., Lee, H.-k., Kim, H.-c., Han, J., Lee, K.-b., Lim, E.-h., Shin, S.-h., Jin, H.-a., Cho, E., Kim, Y.-m., Yoo, C. (2020) Analysis of the National Air Pollutant Emission Inventory (CAPSS 2016) and the Major Cause of Change in Republic of Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 14(4), 422-445. <https://doi.org/10.5572/ajae.2020.14.4.422>
- 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>

- doi.org/10.5194/gmd-10-4245-2017
- Guenther, A., Karl, T., Harley, P., Wiedinmyer, C., Palmer, P.I., Geron, 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-6-3181-2006>
- Hong, S.-Y., Lim J.-O. J. (2006) The WRF single-moment 6-class microphysics scheme (WSM6), *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, 42, 129-151.
- Hong, S.-Y., Noh, Y., Dudhia, J. (2006) A new vertical diffusion package with an explicit treatment of entrainment processes, *Monthly Weather Review*, 134, 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/MWR3199.1>
- Huang, X., Ding, A., Gao, J., Zheng, B., Zhou, D., Qi, X., Tang, R., Wang, J., Ren, C., Nie, W., Chi, X., Xu, Z., Chen, L., Li, Y., Che, F., Pang, N., Wang, H., Tong, D., Qin, W., Cheng, W., Liu, W., Fu, Q., Liu, B., Chai, F., Davis, S.J., Zhang, Q., He, K. (2020) Enhanced secondary pollution offset reduction of primary emissions during COVID-19 lockdown in China, *National Science Review*. <https://doi.org/10.1093/nsr/nwaa137>
- Hutzell, W.T., Luecken, D.J., Appel, K.W., Carter, W.P.L. (2012) Interpreting predictions from the SAPRC07 mechanism based on regional and continental simulations, *Atmospheric Environment*, 46, 417-429. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.09.030>
- Iacono, M.J., Delamere, J.S., Mlawer, E.J., Shephard, M.W., Clough, S.A., Collins, W.D. (2008) Radiative forcing by long-lived greenhouse gases: Calculations with the AER radiative transfer models, *Journal of Geophysical Research*, 113, D13103. <https://doi.org/10.1029/2008JD009944>
- Jang, H., Kim, S., Ko, J., Kim, J., Jang, Y. (2020) Estimation of PM_{2.5} Emission Reduction by Implementation of the Particulate Seasonal Management System, *KOSAE Annual Conference Proceedings*, 200-200.
- Jiménez, P.A., Dudhia, J. (2012) Improving the Representation of Resolved and Unresolved Topographic Effects on Surface Wind in the WRF Model, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 51(2), 300-316. <https://doi.org/10.1175/jamc-d-11-084.1>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021a) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} 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>
- Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, S. (2021b) Local Authority-Level Source Apportionments of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VIII) Busan and Gyeongnam, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(6), 871-890. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.6.871>
- Kang, Y.-H., You, S., Son, K., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021c) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (V) Ulsan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 487-511. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.487>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021c) Sensitivity of fine particulate matter concentrations in South Korea to regional ammonia emissions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 273, 116428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116428>
- Kim, E., You, S., Bae, M., Kang, Y.-H., Son, K., Kim, S. (2021d) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 292-309. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.2.292>
- Kim, O., Bae, M., Kim, S. (2020) Evaluation on Provincial NO_x and SO₂ Emissions in CAPSS 2016 Based on Photochemical Model Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 64-83. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.1.064>
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Moon, N. (2017a) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM_{2.5} Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392. <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.4.377>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017b) PM_{2.5} 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., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017c) Impact of Emissions from Major Point Sources in Chungcheongnam-do on Surface Fine Particulate Matter Concentration in the Surrounding Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(2), 159-173. <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.2.159>
- Kim, Y., Kim, E., Kang, Y.-H., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, S. (2021a) Impact of Diesel Vehicle Emissions on PM_{2.5} Concentrations in Seoul Metropolitan Area during

- the Seasonal PM_{2.5} Management, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 169-190. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.1.169>
- Kim, S., You, S., Kim, E., Kang, Y.-H., Bae, M., Son, K. (2021b) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (III) Jeollanamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 206-230.
- Kim, S., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2021e) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (II) Incheon, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 144-168. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.1.144>
- Kim, E., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, S. (2021f) Direct and cross impacts of upwind emission control on downwind PM_{2.5} under various NH₃ conditions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 268 (Pt A), 115794. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115794>
- Lim, J., Park, H., Cho, S. (2022) Evaluation of the ammonia emission sensitivity of secondary inorganic aerosol concentrations measured by the national reference method, *Atmospheric Environment*, 270. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118903>
- Ministry of Environment (2022) https://www.blueskyday.kr/intro/intro_2.php
- Ngan, F., Kim, H., Lee, P., Al-Wali, K., Dornblaser, B. (2013) A Study of Nocturnal Surface Wind Speed Overprediction by the WRF-ARW Model in Southeastern Texas, *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 52(12), 2638-2653. <https://doi.org/10.1175/jamcd-13-060.1>
- Park, H., Cho, S. (2020) The Effects of NH₃ Emission Reduction on Secondary Inorganic Aerosols Evaluated by CMAQ, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 375-387. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.3.375>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*: John Wiley & Sons.
- Simon, H., Bhave, P.V. (2012) Simulating the degree of oxidation in atmospheric organic particles, *Environmental Science & Technology*, 46, 331-339. <https://doi.org/10.1021/es202361w>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X.-Y., Wang, W., Powers, J.G. (2008) A Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Tech. Note NCAR/TN-475+STR, 113 pp.
- 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_{2.5} 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>
- Son, K., Kang, Y.-H., You, S., Kim, E., Bae, M., Kim, S. (2021) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (VI) Chungcheongbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 429-455. <https://doi.org/10.5572/kosae.2021.37.3.429>
- 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, 1729-1744. <https://doi.org/10.1007/s11869-022-01213-z>
- Sun, W., Huo, J., Fu, Q., Zhang, Y., Lin, X. (2022) Influence of Meteorological Factors and Chemical Processes on the Explosive Growth of PM_{2.5} in Shanghai, China, *Atmosphere*, 13(7). <https://doi.org/10.3390/atmos13071068>
- United States Environmental Protection Agency (2020) CMAQ (Version 5.3.2) [Software]. <https://doi.org/10.5281/zenodo.4081737>
- Xie, X., Hu, J., Qin, M., Guo, S., Hu, M., Wang, H., Lou, S., Li, J., Sun, J., Li, X., Sheng, L., Zhu, J., Chen, G., Yin, J., Fu, W., Huang, C., Zhang, Y. (2022) Modeling particulate nitrate in China: Current findings and future directions. *Environment International*, 166, 107369. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2022.107369>
- Xu, Q., Wang, S., Jiang, J., Bhattarai, N., Li, X., Chang, X., Qiu, X., Zheng, M., Hua, Y., Hao, J. (2019) Nitrate dominates the chemical composition of PM_{2.5} during haze event in Beijing, China, *Science of the Total Environment*, 689, 1293-1303. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.294>
- You, S., Bae, C., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2020) Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805. <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.6.785>
- You, S. (2022) Sensitivity and Non-linear response of PM_{2.5} in South Korea to Foreign and Domestic Emission Changes (Doctoral dissertation), Ajou University, Gyeonggi-do.

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>

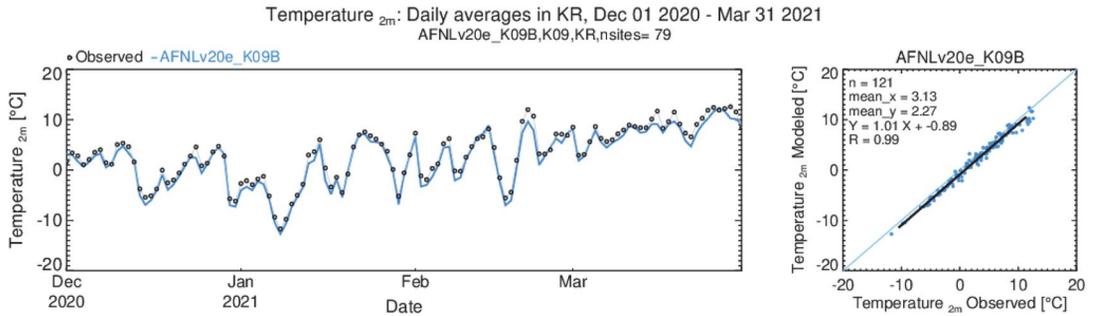
Authors Information

강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
(ykang@ajou.ac.kr)

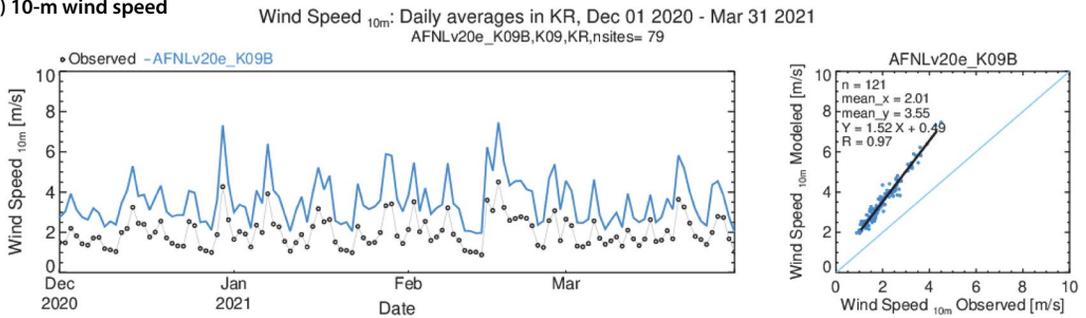
김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
(soontaekim@ajou.ac.kr)

Supplementary Materials

(a) 2-m temperature



(b) 10-m wind speed



(c) 2-m relative humidity

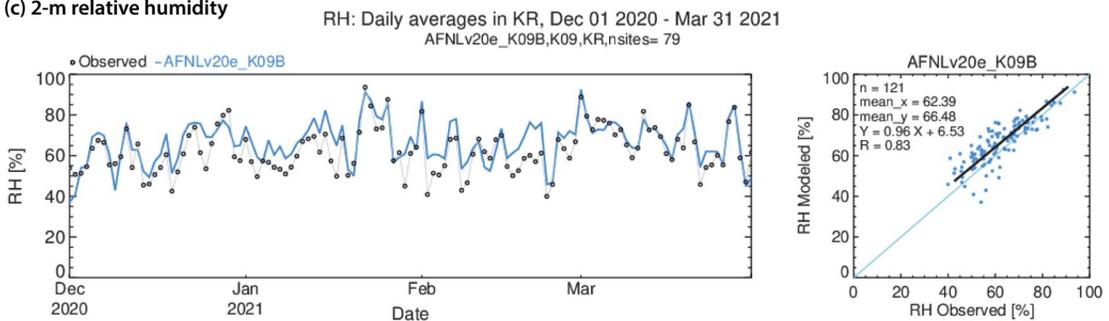


Fig. S1. Comparison of observed and simulated daily mean (a) 2-m temperature, (b) 10-m wind speed, and (c) 2-m relative humidity in South Korea during the 2nd Seasonal PM management period (from December 2020 to March 2021).

Table S1. Statistics of observed and simulated meteorological variables across 79 weather stations in South Korea during the 2nd seasonal PM management period.

Meteorological variables	Mean _{obs}	Mean _{sim}	Bias	RMSE	IOA
2-m temperature (°C)	3.18	2.24	-0.93	2.37	0.97
10-m wind speed (m/s)	2.02	3.55	1.53	2.33	0.69
2-m relative humidity (%)	62.31	66.39	4.08	14.93	0.86