

논문

2016년 국가배출목록 기반 지자체별 초미세먼지 기여도 분석: (IV) 전라북도

Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (IV) Jeollabuk-do

김은혜, 유승희¹⁾, 배민아¹⁾, 강윤희, 손규원¹⁾, 김순태²⁾.*

아주대학교 환경연구소, ¹⁾아주대학교 환경공학과,

²⁾아주대학교 환경안전공학과

접수일 2021년 2월 25일

수정일 2021년 3월 26일

채택일 2021년 4월 5일

Received 25 February 2021

Revised 26 March 2021

Accepted 5 April 2021

*Corresponding author

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

E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

Eunhye Kim, Seunghee You¹⁾, Minah Bae¹⁾, Yoon-Hee Kang,
Kyuwon Son¹⁾, Soontae Kim²⁾.*

Environmental Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

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

²⁾Department of Environmental and Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

Abstract The observed annual mean PM_{2.5} concentration in Jeonbuk in 2016 was 31 µg/m³, twice higher than the national ambient air quality standard (15 µg/m³). In this study, we analyzed the self- and inter-provincial contributions to the PM_{2.5} concentrations in Jeonbuk by applying the Comprehensive Air quality Model with eXtensions with Particulate Source Apportionment Technology (CAMx-PSAT). The foreign contributions to the annual PM_{2.5} concentrations ranged from 13.1 to 17.3 µg/m³ in the fourteen local authorities in Jeonbuk. The domestic contributions in the local authorities calculated by adding the self-contributions and neighboring provincial contributions ranged from 5.9 to 12.0 µg/m³. It implies that both the foreign and domestic emissions are important to alleviate the PM_{2.5} concentrations in Jeonbuk. On top of the self-contributions of Jeonbuk, the contributions of Chungnam and Jeonnam in the vicinity played significant roles in determining the annual mean PM_{2.5} concentrations in Jeonbuk. Meanwhile, it was estimated that daily PM_{2.5} concentrations in Jeonbuk can be decreased by up to 15 µg/m³ by controlling the nationwide emissions, especially when the daily PM_{2.5} concentration is higher than 50 µg/m³. It is noticed that the portion of inorganic ions in the domestic contributions increased as high as 90% when the daily mean PM_{2.5} concentrations in Jeonbuk increased. Accordingly, reductions of the precursor emissions such as SO₂, NO_x, and NH₃ would be effective to decrease the occurrences of high PM_{2.5} days (> 50 µg/m³) in Jeonbuk. The site-by-site model performance evaluations show that there still exist uncertainties in the emissions used in this study. Therefore, prior to developing a comprehensive air quality improvement plan in Jeonbuk, the preparation of local emissions able to explain the details of local air quality is required.

Key words: PM_{2.5}, Jeonbuk, Foreign contribution, Self-contribution, Neighbor contributions

1. 서 론

전라북도 (이하 '전북')의 연평균 초미세먼지 (PM_{2.5}; Particulate Matters of which diameter is equal to or less than 2.5 µm) 농도는 2015년 34 µg/m³, 2016

년 31 µg/m³, 2017년 28 µg/m³, 2018년 25 µg/m³로 점차 감소하고 있다 (JIHER, 2018). 그러나 여전히 대기환경기준(연평균 15 µg/m³)을 크게 초과하며, 충북과 함께 국내에서 PM_{2.5} 농도가 가장 높은 광역 지자체로 꼽히고 있다. 이에 정부에서는 '대기관리권역의

대기환경개선에 관한 특별법'을 시행하여 전북의 일부 지역을 포함하는 중부권 대기관리권역을 신규 지정해 관리하고 있다(KMOE, 2020).

전북은 지리적으로 북쪽으로는 국내에서 배출밀도가 가장 높은 충남(Kim *et al.*, 2019)과 맞닿아 있으며, 서쪽으로는 서해를 사이에 두고 중국의 산둥반도와 인접해 있다. 이에 전북의 대기질은 주변 지역 및 중국으로부터 대기오염물질의 유입 영향을 받을 것으로 추정된다. 선행 연구에서 Jo *et al.* (2018)은 역궤적 군집 분석을 통해 2017~2018년 전북 전주지역의 PM_{2.5}가 중국 동부 공업단지로부터 장거리 이동 영향을 받았을 것으로 추정하였으며, Kim *et al.* (2017a)은 CMAQ (Community Multi-scale Air Quality) 모델을 이용해 2014년 전북의 연평균 PM₁₀ 농도 중 58%를 국외 유입에 의한 것으로 평가하였다. 또한, Kim *et al.* (2018)은 미세먼지 관리 종합대책을 포함한 국내의 배출량 저감 노력으로 전북 지역의 PM_{2.5} 농도가 2015년 대비 2022년까지 8 µg/m³가량 감소할 것으로 분석하였다. 따라서 전북의 대기질 관리를 위해서는 주변 지역 및 국외 배출에 의한 영향이 함께 고려되어야 할 것으로 보인다.

한편, 전북에는 주거 단지, 산업 단지, 농경지 등 다양한 배출원이 분포하고 있으며, 기초 지자체별로 배출 특성이 상이하여 PM_{2.5}를 포함한 대기오염물질의 농도는 전북 내에서도 공간적인 구배가 크게 나타난다(JIHER, 2018). Son *et al.* (2020)은 측정농도를 공간 내삽하여 전국 250개 기초 지자체에 대해 2015~2017년 평균 PM_{2.5} 농도를 추정하였으며, 전북에서 PM_{2.5} 농도가 기초 지자체별로 최대 6 µg/m³가량 차이를 보이는 것으로 분석하였다. 따라서 전북에 대한 PM_{2.5} 농도 감소를 위해서는 이와 같은 지역적 농도 구배 특성을 고려하여 보다 상세한 수준에서 배출량을 관리해야 할 것으로 판단된다. 그러나 현재까지 전북 대기질에 대한 연구들은 대부분 광역 지자체 수준에서 이루어지거나, 특정 기초 지자체에 대해 제한적으로 이루어져 왔다. 이에 본 연구에서는 대기질 모사를 바탕으로 전북의 기초 지자체별 PM_{2.5} 농도에 대

한 배출 지역별, 물질별 기여도 분석을 수행하고, 전북 PM_{2.5} 농도 감소에 효과적인 배출 관리 지역 및 물질을 제시한다.

2. 연구 방법

2.1 대상 지역 및 배출 특성

전북은 14개 기초 지자체(군산, 익산, 완주, 김제, 전주, 진안, 무주, 장수, 부안, 정읍, 고창, 임실, 순창, 남원)로 이루어져 있다(그림 1). 통계자료에 따르면 전북의 인구는 2020년 기준 약 180만 명으로 남한 전체 인구의 3.5% 수준이며, 이 중 서북부에 위치한 군산, 익산, 완주, 김제, 전주의 인구가 전북 전체 인구의 약 77%를 차지하는 것으로 조사된다(KOSTAT, 2020). 이들 지역은 인구밀도와 비례하여 배출량 또한 많은 것으로 보고된다(JI, 2020).

한편, 전북은 서해와 맞닿아 항만 배출원을 포함하고 있으며, 국내 최대 쌀 생산지 중 한 곳으로서(KOSTAT, 2020) 농업부문의 배출 또한 많은 것으로 알려져 있다. JIHER (2018)은 전북의 주요 배출원으로 농축산 활동, 도로재비산먼지, 농업잔재물 소각, 자동차를 지목하였다. 2016년 국가배출목록인 the Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2016으로부터 연간 국내 배출량 대비 전북의 배출량은 배출물질별로 NO_x 3.3% (40,858 ton), SO₂ 1.9% (6,669 ton), NH₃ 10.8% (32,627 ton), PM_{2.5} 3.5% (3,461 ton)를 차지하여, NH₃를 제외하면 배출량이 비교적 낮은 것으로 평가된다.

CAPSS 2016에서 전북의 대기질에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되는 인접지역의 연간 배출량을 살펴보면, NO_x 배출량은 충남 134,889 ton, 전남 105,776 ton으로 전북의 3배 수준이며, SO₂ 배출량은 충남 81,843 ton, 전남 62,171 ton으로 전북에 비해 각각 12배, 9배가량 높다. PM_{2.5} 배출량은 충남 18,822 ton, 전남 13,613 ton으로 전북에 비해 각각 5배, 4배가량 높으며, 전북에서 비교적 배출량이 높은 것으로 평가되

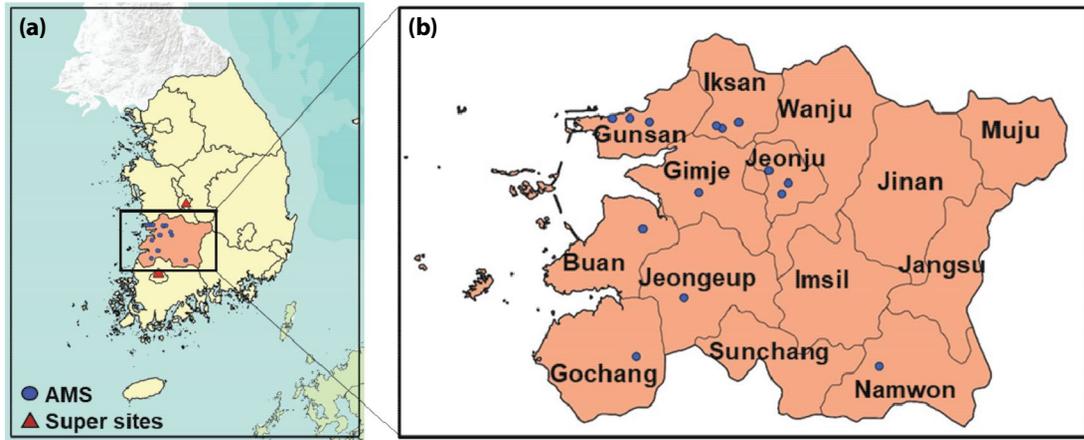


Fig. 1. Coverages of modeling domains at horizontal grid resolutions of (a) 3-km, and (b) fourteen local authorities in Jeonbuk. The blue circles and red triangles indicate the air quality monitoring stations (AMS) and super sites, respectively.

는 NH₃ 또한 충남 49,585 ton, 전남 40,967 ton으로 전북에 비해 높다. 따라서 전북 PM_{2.5} 농도에 이러한 주변 지역 배출량의 영향이 적지 않을 것으로 예상된다.

2.2 대기질 모사 및 기여도 분석

본 연구에서는 Comprehensive Air quality Model with eXtensions (CAMx) version 6.1를 이용하여 대기질을 모사하고, CAMx 모델에서 제공하는 Particulate Source Apportionment Technology (PSAT; Yarwood *et al.*, 2007) 분석도구를 이용하여 전북 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도 분석을 수행하였다. 대기질 모사 기간은 동반논문 (Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020)을 참고하여 2016년(1년)을 대상으로 하였으며, 남한을 포함하는 3km 수평해상도 모사 영역을 분석 영역으로 설정하였다(그림 1). 경계조건으로는 동북아 지역을 포함하는 27km 수평해상도 모사 결과 및 남한을 포함하는 9km 수평해상도 모사 결과를 이용하였다. 대기질 모사를 위한 기상 및 배출량 입력자료, 모사 세부 옵션 등은 동반논문 (Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020)을 참고할 수 있으며, 전북에 대한 기상 모사 결과는 그림 S1을 참고할 수 있다.

대기 중 오염물질의 배출량-농도 관계가 비선형적

이므로, 기여도는 배출량 변화(감소)에 따라 변화(감소)되는 농도인 ‘영향(impact)’과는 다르다 (Kang *et al.*, 2021). 다만, 본 연구에서는 전북 PM_{2.5} 농도의 대기환경기준 달성을 위해 필요한 농도 저감 폭을 대략적으로 추정하기 위해 기여도를 이용하였다. 전북 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도는 동반논문 (Kim *et al.*, 2021a)을 바탕으로 1) ‘국의 기여도’, 2) 전북에서 배출된 대기오염물질에 의한 ‘자체 기여도’, 3) 충남, 전남 등에 의한 ‘주변 지역 기여도’로 구분하여 분석하였다. 국외 기여도는 모사된 PM_{2.5} 농도에서 자체 기여도와 주변 지역 기여도의 합(이하 ‘국내 기여도’)을 제외하는 방식으로 계산하였으며, 경계조건의 기여도는 국외 기여도에 포함하였다. 기여도는 상대적 기여율(%) 및 기여농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 제시하였다.

3. 연구 결과

3.1 전북 PM_{2.5} 농도에 대한 국내외 기여도

동반 논문에서 경기와 인천은 대기오염물질의 장거리 이동에 따른 국외 기여도가 국내 기여도에 비해 높은 것으로 분석되었다 (Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020). 전북의 경우에도 국내의 서쪽에 위치하여 중

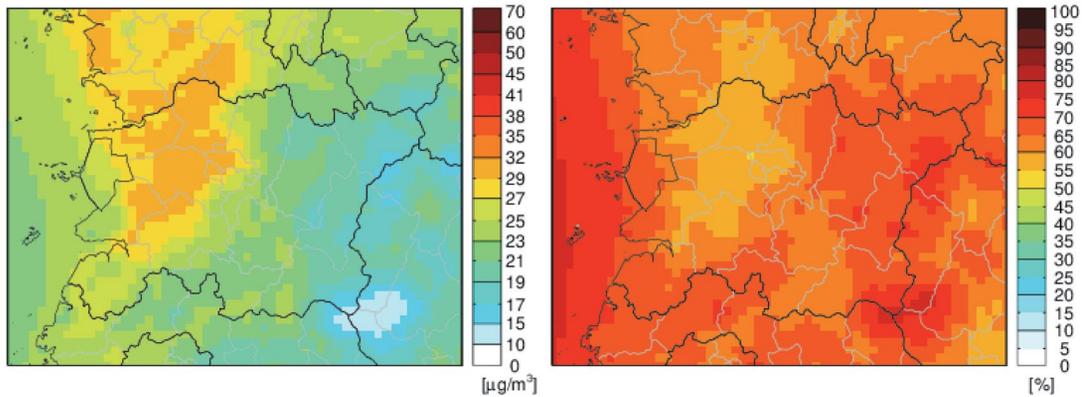


Fig. 2. Simulated annual mean $PM_{2.5}$ concentrations (left) and the relative foreign contributions in and around Jeonbuk during the simulation period of 2016.

국과 가까우므로 국외 기여도가 높을 것으로 추정된다. 이에 본 절에서는 대기질 모사 결과를 이용하여 전북 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내의 기여도를 분석하였다.

2016년 전북의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 14개 기초 지자체 평균 $24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 모사되었으며, 이 중 국외 기여농도는 $15.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 상대적 국외 기여율이 63% 수준이었다. 공간적으로 살펴보면(그림 2), 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 서해상에 비해 전북 내륙에서 높게 모사되었다. 이는 장거리 이동 영향에 국내 배출의 영향이 가중되기 때문인 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2021b). 한편, 서해상에는 배출원이 거의 존재하지 않아 국외로부터의 장거리 이동 영향이 주요하게 나타나므로 상대적 국외 기여율은 내륙에 비해 서해상에서 더 높게 나타났다.

기초 지자체별로 살펴보면, 연평균 $PM_{2.5}$ 모사농도는 19.0(무주)~ $29.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (익산)으로 전북 내 모든 기초 지자체에서 대기환경기준을 초과하여 관리가 필요할 것으로 판단된다. 이에 대한 국외 기여농도는 13.1(무주)~ $17.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (군산)이었으며, 상대적 국외 기여율은 58(익산)~69%(무주)로 국내 기여율에 비해 높았다. 다만, 본 연구에 이용된 국외 배출목록의 경우 최근의 중국 배출량 감소 등이 반영되지 않아 불확도를 내포하고 있다. 한편, 국내 기여농도의 경우

에도 5.9(무주)~ $12.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (익산) 등 대기환경기준의 39~83% 수준으로 높게 나타났으나, 국내 배출량을 모두 저감하는 경우에도 전북 14개 기초 지자체 중 6개 기초 지자체(남원, 무주, 순창, 임실, 장수, 진안)를 제외한 8개 기초 지자체에서는 여전히 연평균 $PM_{2.5}$ 농도를 초과하는 것으로 나타났다. 따라서, 전북 $PM_{2.5}$ 농도를 목표수준(대기환경기준)으로 관리하기 위한 정책 마련 시 국외 배출 변화에 따른 유입 영향 예측이 중요한 변수가 될 것으로 보인다.

한편, 2016년 전북의 연평균 $PM_{2.5}$ 관측농도는 $31.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 측정소가 위치한 격자에 대한 모사농도는 $27.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 관측농도에 비해 $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 낮았다. 따라서 분석에 이용한 전북의 14개 기초 지자체 평균 $PM_{2.5}$ 모사농도($24.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 또한 과소 평가되었을 수 있다. 이에 본 연구에서는 배출량 저감 시 $PM_{2.5}$ 농도가 변화되는 정도를 추정하고자 하였다. 그림 3에서 가로축은 전북 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 대비 각 기초 지자체별 연평균 $PM_{2.5}$ 농도의 차이이며, 세로축은 전북 연평균 $PM_{2.5}$ 기여도 대비 각 기초 지자체별 연평균 $PM_{2.5}$ 기여도의 차이이다. 이로부터 전북에서 국내의 배출 저감을 통해 줄일 수 있는 $PM_{2.5}$ 농도의 폭을 각 기초 지자체에 대해 상대적으로 비교하였다. 국외 기여농도는 군산, 김제, 익산 등 전북 평균에 비해 $PM_{2.5}$ 농도가 높은 기초 지자체에

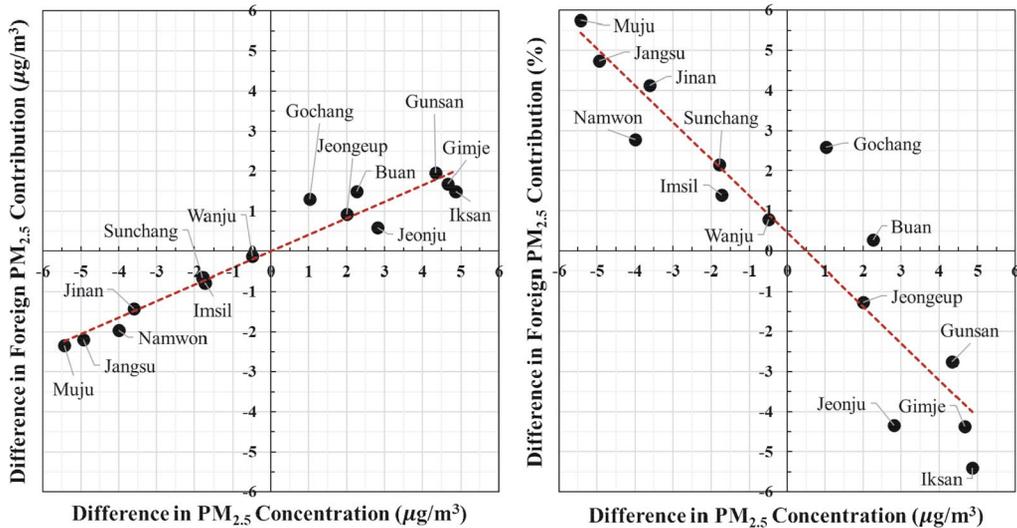


Fig. 3. Scatter plots between the difference in the annual mean $PM_{2.5}$ concentration of fourteen local authorities from Jeonbuk's annual mean $PM_{2.5}$ concentration against (a) the difference in the foreign contribution of the local authorities from the province mean foreign contribution, and (b) the difference in the relative foreign contribution of the local authorities from the province mean relative contribution during the simulation period of 2016.

서 높았으나, 상대적 국외 기여율은 $PM_{2.5}$ 농도가 전북 평균에 비해 낮은 무주, 장수, 진안 등 전북 동쪽의 기초 지자체에서 높았다. 이는 동쪽에 위치한 기초 지자체의 경우 대부분 자체 배출이 낮은 지역으로 (그림 S2), 국내 기여농도가 낮게 산정되었기 때문이다. $PM_{2.5}$ 농도가 높으면서 국내 기여율이 높은(국외 기여율이 낮은) 군산, 김제, 익산의 경우 자체적인 노력에 의한 $PM_{2.5}$ 농도 감소 효과가 상대적으로 클 것으로 보인다. 특히 이들 지역의 경우 인구가 밀집되어 있어 $PM_{2.5}$ 농도 관리 시 인구노출에 따른 위해도 또한 효과적으로 감소할 것으로 기대된다.

3.2 전북 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 자체 및 주변 지역 기여도

국내의 배출관리 노력만으로 전북의 $PM_{2.5}$ 농도를 얼마나 줄일 수 있을지 가늠해 보고자, 동반논문과 같이 전북 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내 기여농도를 전북 자체 기여농도와 주변 지역 기여농도로 구분하여 분석하였다. 전북의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내 광역 지자체별 기여농도를 내림차순으로 정렬하면, 전

북(4.0 $\mu g/m^3$), 충남(1.9 $\mu g/m^3$), 전남(0.9 $\mu g/m^3$), 경남(0.4 $\mu g/m^3$), 경기(0.4 $\mu g/m^3$), 경북(0.4 $\mu g/m^3$), 인천(0.2 $\mu g/m^3$) 등에서 높게 나타난다(그림 S3). 특히, 전북, 충남, 전남의 배출량이 전북 연평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내 기여농도의 75%를 차지하여 이후 분석에서는 이들 지역에 의한 기여농도를 집중적으로 살펴해보았다.

그림 4는 전북 내 기초 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내 기여농도를 내림차순으로 정렬한 것이다. 전북 자체 기여농도로부터, 전북의 경우 자체 배출관리를 통해 기초 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도를 최대 1.3(무주)~6.4 $\mu g/m^3$ (김제, 전주)가량 저감할 수 있을 것으로 추정하였다. 한편, 자체 기여농도가 높은 상위 5개 기초 지자체는 김제(6.4 $\mu g/m^3$), 전주(6.4 $\mu g/m^3$), 익산(5.6 $\mu g/m^3$), 정읍(5.3 $\mu g/m^3$), 군산(4.9 $\mu g/m^3$)으로, 모두 전북의 서쪽에 위치하였다(그림 1). 이는 이들 지역의 배출량이 다른 기초 지자체에 비해 높기 때문으로(그림 S2), 전북 평균 $PM_{2.5}$ 농도를 효과적으로 줄이기 위해서는 서쪽 기초 지자체에 대한 배출량을 우선적으로 관리하는 방안이 고려될 수 있다.

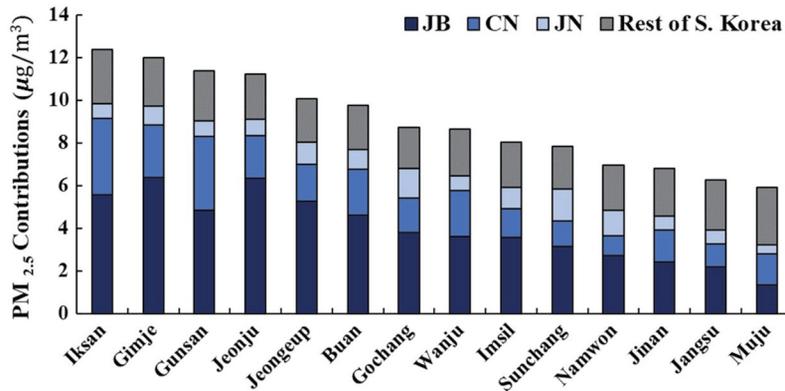


Fig. 4. Self- and inter-provincial contributions to the annual mean PM_{2.5} concentrations in fourteen local authorities in Jeonbuk during the simulation period of 2016. Acronyms named JB, CN, and JN, Rest of S. Korea represent Jeonbuk, Chungnam, Jeonnam, and the remaining other provinces in the country, respectively.

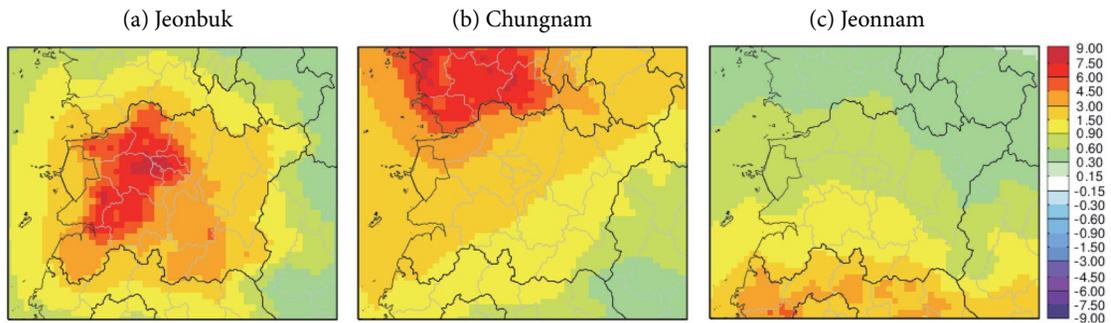


Fig. 5. Contributions of emissions released from (a) Jeonbuk, (b) Chungnam, and (c) Jeonnam to annual mean PM_{2.5} concentrations in fourteen local authorities in Jeonbuk during the simulation period of 2016.

익산, 김제, 군산의 경우 자체 기여농도가 높으면서 국내에서 배출밀도가 가장 높은 충청남도 가까워 국내 기여농도가 높게 나타난 것으로 보인다(Kim *et al.*, 2019)(그림 4 및 그림 5). 전북 대부분의 기초 지자체에서 전북>충남>전남의 순서로 연평균 PM_{2.5} 기여농도가 높게 나타났으나, 순창 및 남원의 경우 전북>전남>충남의 순서였으며, 무주는 충남>전북>전남의 순서로 기여농도가 높게 나타났다. 이를 고려할 때, 전북의 연평균 PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 전북의 자체적인 배출량 저감 노력 이외에도 주변 지역 특히, 충남 및 전남과의 협력이 중요할 것으로 보인다.

3.3 PM_{2.5} 구성 성분별 기여도

대기질 모사 결과에서 전북 14개 기초 지자체의 연평균 PM_{2.5} 농도(24.4 µg/m³)에 대한 구성 성분의 비율은 질산염 30.3%, 1차 PM_{2.5}(Primary PM_{2.5}; PPM_{2.5}) 25.5%, 황산염 25.1%, 암모늄 17.7%, 순으로 높게 나타났다(그림 6). 이는 PPM_{2.5}의 비율이 가장 높게 모사되었던 경기 및 인천 지역과는 다른 결과이다(Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020). 전북의 경우 NO_x 대비 NH₃ 배출량이 80% 수준으로, 경기(23%) 및 인천(14%)에 비해 NH₃의 비율이 높아 NO_x의 질산염으로의 전환이 유리하였기 때문으로 판단된다(Kim *et al.*, 2021c).

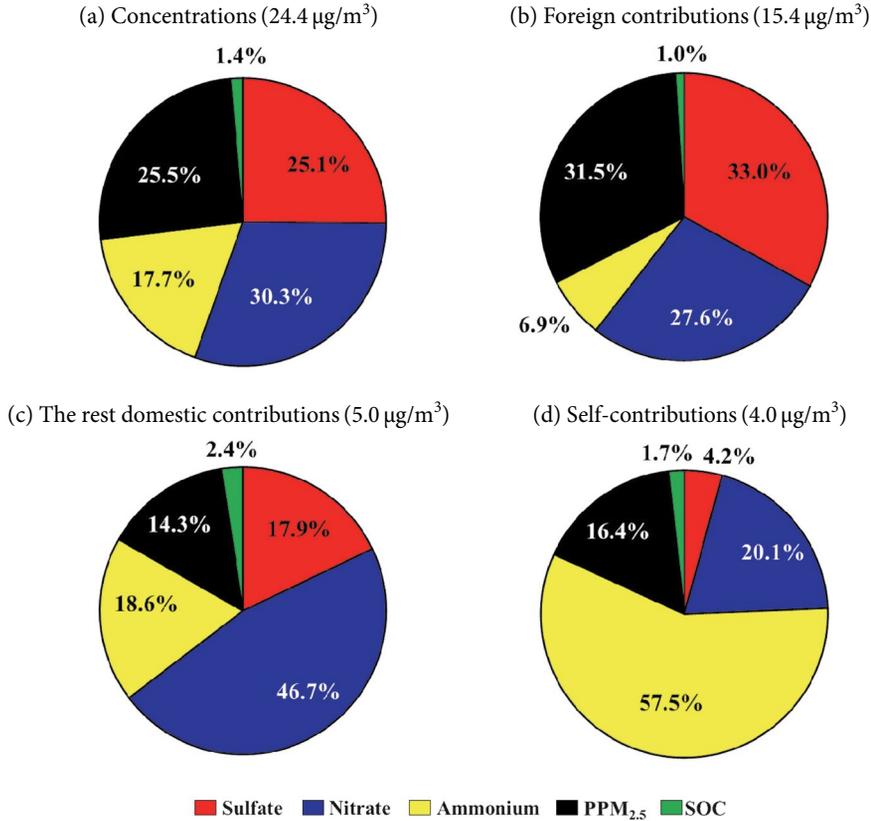


Fig. 6. Annual simulated PM_{2.5} compositions for (a) concentrations, (b) foreign contributions, (c) the rest of domestic contributions, and (d) self-contributions in Jeonbuk in 2016.

기여도 측면에서 살펴보면, 전북의 연평균 PM_{2.5} 농도(24.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 대한 국외 기여농도(15.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 구성 성분은 황산염 33.0%, 1차 PPM_{2.5} 31.5%, 질산염 27.6%, 암모늄 6.9% 등으로 황산염의 비율이 가장 높게 나타났다(그림 6). 단, 최근 중국에서 배출량 관리 정책 시행에 따라 SO₂ 배출량이 크게 저감된 것으로 보고되는 등(Sun *et al.*, 2018), 국외 기여농도에 대한 구성 성분의 비율은 중국 배출량 변화에 따라 달라질 수 있을 것으로 보인다.

한편, 전북의 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 기여농도(9.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 중 전북 자체 기여농도(4.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 대한 구성 성분의 비율은 암모늄 57.5%, 질산염 20.1%, PPM_{2.5} 16.4%, 황산염 4.2% 등으로 암모늄의 비율이 압도적으로 높았다(그림 6 및 그림 7). 이는

전북의 NH₃ 배출량이 타 지역에 비해 높기 때문으로 보인다(그림 S2). 모사된 국내 기여농도에서 황산염, 질산염, 암모늄의 당량비를 고려할 때, 전북의 암모늄은 대부분 전북의 NH₃로부터 기원되었을 가능성이 높다. NH₃는 암모늄뿐만 아니라 황산염 및 질산염의 생성에도 관여하므로(Kim *et al.*, 2021b; Seinfeld and Pandis, 2006), PM_{2.5} 농도 감소를 위해서는 NH₃의 배출 또는 농도를 관리해야 한다. 다만, 현재 국가배출 목록에서 NH₃ 배출량의 불확도가 높은 것으로 평가되므로(Choi *et al.*, 2018), 실제적인 관리 대책 마련에 앞서 NH₃ 배출량이 정확하게 파악되어야 하며, 국내 암모늄 농도에 대한 국외 유입 영향도 함께 분석되어야 한다. 국내 기여농도 중 전북의 기여농도를 제외한 국내 타 지역 기여농도(5.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)의 구성 성분비

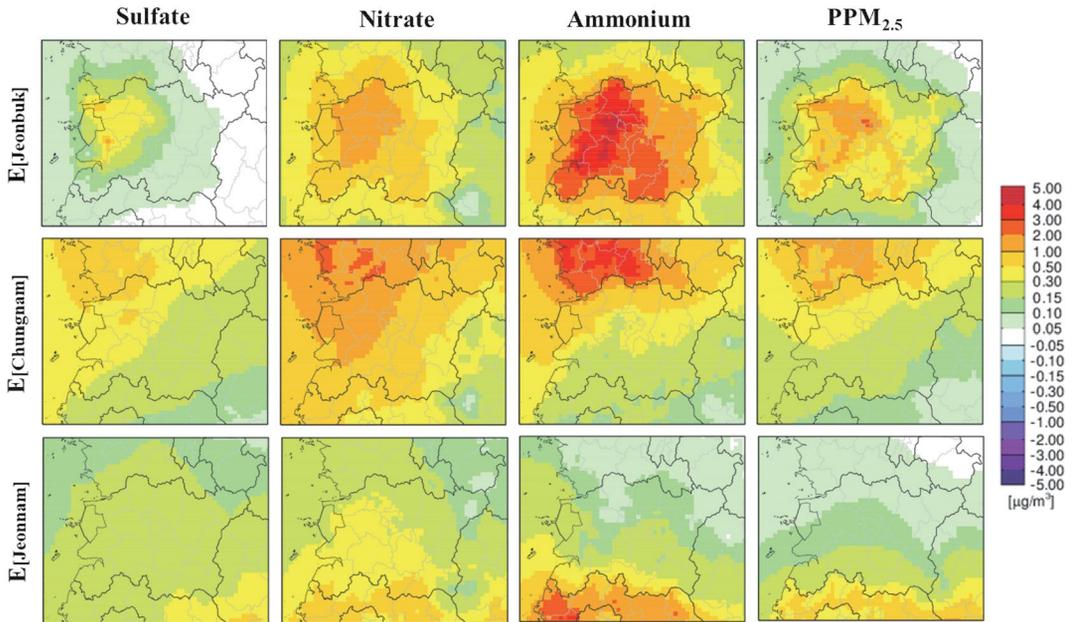


Fig. 7. Annual mean contributions of emissions released from Jeonbuk (top), Chungnam (middle), and Jeonnam (bottom) to sulfate, nitrate, ammonium, and primary $PM_{2.5}$ during the simulation period of 2016.

는 질산염 46.7%, 암모늄 18.6%, 황산염 17.9%, $PPM_{2.5}$ 14.3%로 질산염이 주요하였다(그림 6). 특히, 그림 7로부터 황산염 및 질산염의 경우 전북 일부 기초 지자체에 대해 충남 및 전남의 기여농도가 자체 기여농도보다 높게 나타났다.

월별로 살펴보면(그림 8), 전북 기초 지자체 평균 $PM_{2.5}$ 농도는 4월에 $38.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높으며, 7월에 $12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮게 모사되었다. 이와 같은 $PM_{2.5}$ 농도의 월 변동성은 국내 기여농도보다는 국외 기여농도의 월 변동성과 유사하였다. 예를 들어, 봄철 및 겨울철(1~5월 및 11~12월)의 경우 편서풍에 의한 국외 유입 영향이 크게 나타나는 시기로(Kim *et al.*, 2017a), $PM_{2.5}$ 의 주요 구성 성분인 황산염, 질산염, 암모늄, $PPM_{2.5}$ 모두 국외 기여농도가 증가하였다. 한편, 상대적으로 국내 영향이 높아지는 여름 및 가을철(6~10월)에는 $PM_{2.5}$ 농도가 낮게 나타났다. 단, 암모늄의 경우에는 모든 월에 대해 국외 기여농도에 비해 국내 기여농도가 높은 것으로 나타나, 전북 $PM_{2.5}$ 농도 감소에 대한 국내 NH_3 배출량 저감의

중요성을 다시 한번 확인하였다.

3.4 $PM_{2.5}$ 농도 구간별 기여도

국내 $PM_{2.5}$ 구성 성분의 비율은 저농도와 고농도 등 농도 구간에 따라 달라지는 것으로 알려져 있다(Bae *et al.*, 2020). 이에 본 절에서는 전북의 일평균 $PM_{2.5}$ 모사농도에 대한 국내외 기여도 및 구성 성분의 비율을 $PM_{2.5}$ 농도 구간별로 살펴보았다(그림 S4 및 그림 9). $PM_{2.5}$ 농도가 증가할수록 국외 기여농도($3.3\sim 62.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 함께 상대적 국외 기여율(46~83%) 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이는 전북의 고농도 $PM_{2.5}$ 관리를 위해서는 중국의 배출량 저감이 동반되어야 함을 의미한다. 성분별로는 0~10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 저농도 $PM_{2.5}$ 구간을 제외하면, $PM_{2.5}$ 농도 구간에 관계없이 국외 기여농도 중 황산염(28~35%), $PPM_{2.5}$ (27~36%), 질산염(25~30%)의 비율이 유사하였다(그림 9).

전북 $PM_{2.5}$ 모사농도 증가에 따라 국내 기여농도 또한 증가하였으나, $PM_{2.5}$ 농도가 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로

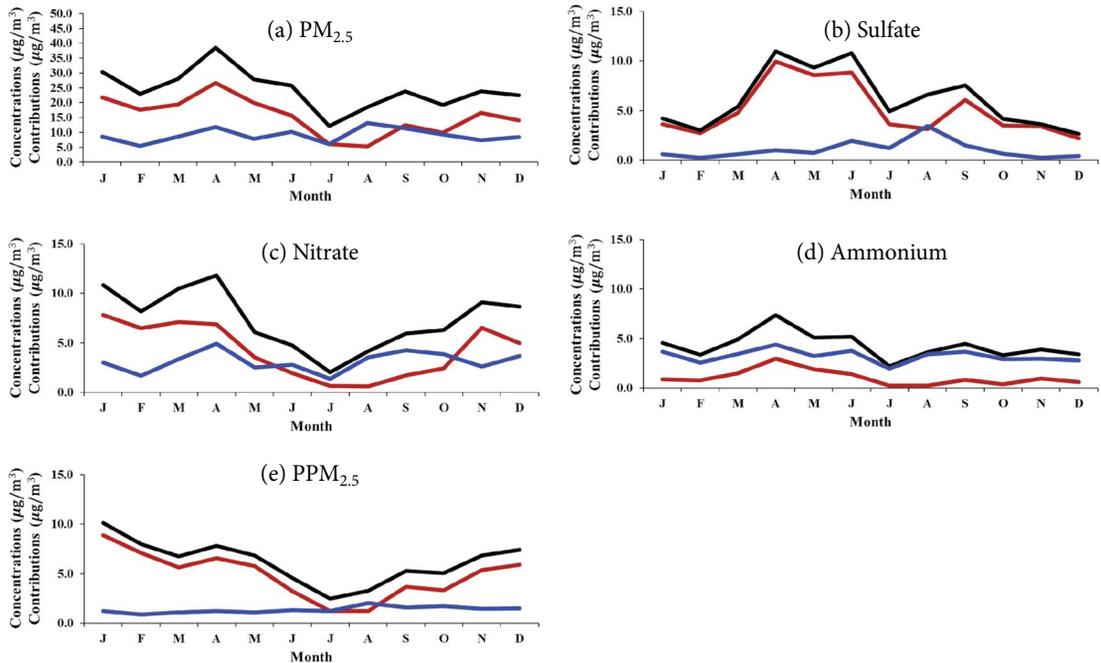


Fig. 8. Monthly variations of concentrations (black), foreign contributions (red), and domestic contributions (blue) for (a) PM_{2.5}, (b) sulfate, (c) nitrate, (d) ammonium, and (e) PPM_{2.5} in Jeonbuk during the simulation period of 2016.

높게 나타나는 경우에도 국내 기여농도는 15 µg/m³을 초과하지 않았다. 이로부터 전북에서 고농도 PM_{2.5} 발생 시 국내 배출량에 의한 최대 기여농도가 15 µg/m³ 정도인 것으로 추정된다. 따라서, 전북에서 50 µg/m³ 이상의 고농도 PM_{2.5} 발생 시, 계절관리제와 같은 국내의 노력만으로는 일평균 대기환경 기준(35 µg/m³)을 달성하기 어려울 것으로 판단된다. 다만, 대기환경기준을 달성하지 못하더라도 PM_{2.5} 농도 감소에 따라 인체 위해도가 크게 감소하므로 (Pope *et al.*, 2006), PM_{2.5} 농도 감소를 위한 국내의 노력은 여전히 중요하다.

전북에서 50 µg/m³ 이상의 고농도 PM_{2.5} 발생 시 국내 PM_{2.5} 기여농도 중 2차 무기성 이온인 황산염, 질산염, 암모늄의 비율이 약 90%를 차지하였다. 따라서, 국내에서는 전북의 고농도 PM_{2.5} 관리를 위해 2차 무기성 이온의 전구물질인 SO₂, NO_x, NH₃ 배출량 감소에 집중해야 할 것으로 판단된다. 단, PM_{2.5} 농도가 증가함에 따라 국내 질산염 및 암모늄의 기여농도는

높아지는 반면, 황산염의 기여농도는 크게 변화하지 않았다. 이는 전북을 포함하여 국내의 경우 SO₂ 배출량에 비해 NH₃ 배출량이 풍부해(그림 S2), 질산염 생성에 우선하여 SO₂가 모두 황산염으로 전환되었기 때문으로 보인다 (Kim *et al.*, 2021c). 따라서, NH₃보다는 SO₂를 관리하는 것이 단위 배출량당 황산염의 생성 기여를 더 효과적으로 줄일 수 있다. 단, 전북의 경우 다른 지역에 비해 황산염의 기여농도가 낮으므로, PM_{2.5} 농도 감소를 위해서는 질산염 및 암모늄의 농도 감소가 필수적일 것으로 보인다. 이는 NO_x 및 NH₃ 배출의 관리가 중요함을 의미한다.

무기성 이온의 경우 배출량-농도 간 비선형성이 크게 나타나므로, 배출량 저감 효과를 예측하는 것은 쉽지 않다. Kim *et al.* (2017b)은 NO_x 배출량이 풍부한 지역에서의 NO_x 배출량 감소는 NO_x disbenefit을 유발하여 질산염 농도를 증가시킬 수 있다고 보고하였으며, Park *et al.* (2020)은 국내의 경우 NH₃가 풍부하여 NH₃ 배출량 저감 효과가 미미할 것으로 분석하였

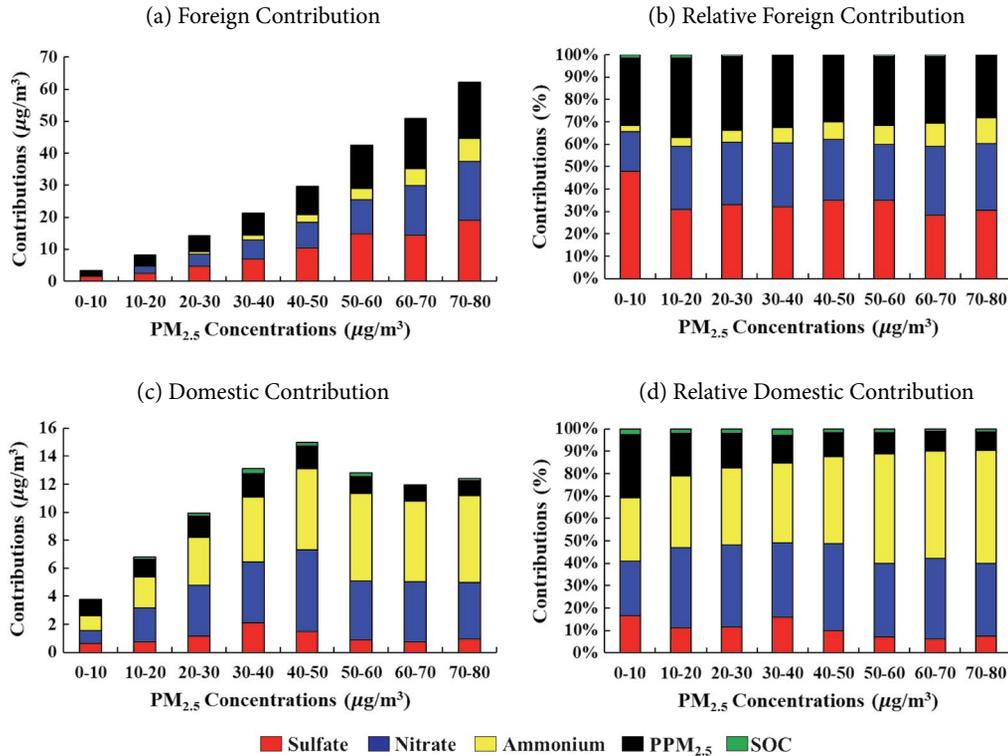


Fig. 9. Bar plots of (a) the foreign, and (c) domestic contributions on the PM_{2.5} compositions, and the relative (b) foreign, and (d) domestic contributions in Jeonbuk for the each PM_{2.5} mass concentration bin during the simulation period of 2016.

다. 다만, 전북을 포함해 국내의 경우 고농도 PM_{2.5} 발생 시 무기성 음이온 성분농도가 증가하면서 이용 가능한 NH₃ 농도가 감소할 수 있으므로, NH₃를 포함한 전구물질의 배출량 저감이 고농도 PM_{2.5} 감소에 효과적인 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2021c; Bae *et al.*, 2020). Kim *et al.* (2021c)은 대기질 모사를 통해 국내에서 일평균 PM_{2.5} 농도가 높을수록 NH₃ 배출량 저감에 따른 질산염 및 암모늄의 농도 감소 효과가 커지는 것으로 분석하였으며, 50 µg/m³ 이상의 고농도 PM_{2.5} 발생 시 국내외 NH₃ 배출량 50% 저감으로 PM_{2.5} 농도를 최대 15 µg/m³가량 감소시킬 수 있을 것으로 추정하였다. 따라서, 전북에서 고농도 PM_{2.5} 발생 시 전구물질의 배출량 저감을 통해 PM_{2.5} 농도를 감소시킬 수 있을 것으로 판단된다.

3.5 전북 배출에 의한 주변 지역 PM_{2.5} 기여도

앞 절에서는 주로 전북의 PM_{2.5} 농도에 대한 전북 자체 및 주변 지역 배출량의 기여도를 분석하였으나, 전북의 배출량 또한 충남, 전남 등 인접 지역의 PM_{2.5} 농도에 기여할 수 있다. 그림 10은 국내 기초 지자체를 160개로 구분하여 국내 기초 지자체별 전북의 PM_{2.5} 기여농도를 보인 것이다. 전북의 배출량은 강원 및 경기 북부를 제외한 국내 대부분의 기초 지자체에 대해 연평균 대기환경기준의 10% 수준인 0.15 µg/m³ 이상의 PM_{2.5} 기여농도를 보였다. 전반적으로 자체 배출지역인 전북의 기초 지자체에서 기여농도가 높게 모사되었으며, 전북과 인접해 있는 충남, 전남, 경남의 기초 지자체에서도 전북의 PM_{2.5} 기여농도가 높게 나타났다. 충남 15개 기초 지자체 중 5곳(33.3%), 전남 22개 기초 지자체 중 5곳(22.7%)에서

연평균 전북 PM_{2.5} 기여농도가 1.0 µg/m³ 이상으로 나타났다으며, 경남 함양에서도 전북의 기여농도가 1.0 µg/m³으로 분석되었다. 특히, 충남의 서천(2.0 µg/m³), 논산(1.7 µg/m³) 및 전남의 장성(1.8 µg/m³), 담양(1.6 µg/m³), 곡성(1.5 µg/m³)의 경우 전북 무주(1.3 µg/m³)보다도 전북의 기여농도가 더 높았다.

이와 같이 전북은 주변 지역과 상호 영향을 주고받으므로, PM_{2.5} 농도 관리를 위해 주변 지역과 함께 배출량 감소를 도모해야 할 것으로 보인다. Ju *et al.* (2018) 연구에서도 기초 지자체 및 광역 지자체 간 상

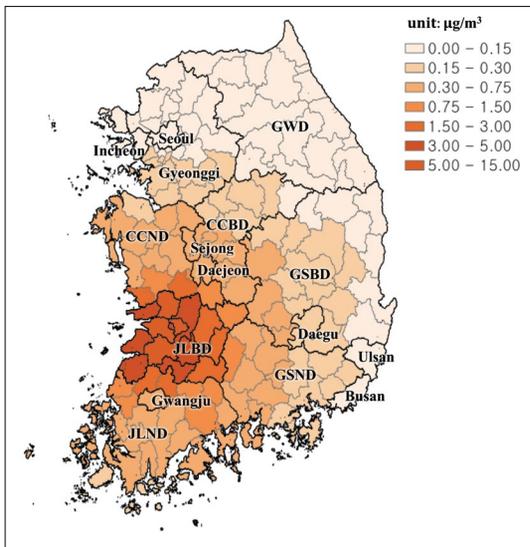


Fig. 10. Contributions of emissions released from Jeonbuk to annual mean PM_{2.5} concentrations in individual local authorities of South Korea during the simulation period of 2016. 0.15, 0.30, 0.75, 1.50, 3.0, 7.0, and 15.0 µg/m³ in the legend are equivalent to 1, 2, 5, 10, 20, 50, and 100% of the national ambient air quality standard.

호 협력적인 배출량 감소를 통해 PM_{2.5} 농도를 더 효과적으로 관리할 수 있음을 제안한 바 있다.

3.6 대기질 모사 불확도

본 연구는 대기질 모사를 기반으로 이루어진 바, 연구 결과에 대한 검증은 위해 대기질 모사 결과에 대한 평가를 수행하였다. 이를 위해 전북의 14개(군산: 3개, 익산: 3개, 전주: 3개, 김제: 1개, 부안: 1개, 정읍: 1개, 고창: 1개, 남원: 1개) Air quality Monitoring Stations (AMS) 관측자료를 이용하였다(그림 1). 대상 기간 동안 전북에 측정소가 위치한 격자에 대해 모사된 PM_{2.5} 농도는 27.9 µg/m³로 관측농도(31.3 µg/m³)에 비해 과소 모사되었으며, SO₂ 및 NO₂의 경우에도 관측농도에 비해 각각 0.4, 3.4 ppb가량 과소 모사되었다(표 1). 그림 S1 및 동반논문으로부터 기상 입력 자료는 관측과 유사하게 모사된 것으로 평가되는 바(Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020), 이러한 농도 모사의 불확도는 주로 배출량의 불확도에서 기인하였을 것으로 판단된다. 다만, 평가한 물질 모두 Emery *et al.* (2017)이 제시한 통계기준에 부합하였다.

측정소별로 살펴보았을 때(그림 11), 김제, 정읍, 고창의 경우 PM_{2.5}, SO₂, NO₂가 모두 과소 모사된 것으로 나타났다. 특히, SO₂, NO₂의 경우 1차 대기오염 물질로서, 배출량-농도의 관계가 비교적 선형적이므로 해당 물질에 대한 농도의 과소 모사는 배출목록에 배출량이 일부 누락되어 있음을 시사한다. 남원의 경우 PM_{2.5} 농도가 크게 과소 모사되었는데, 정읍과 비교했을 때 이는 NO₂ 과소 모사 이외에 남원에 기여도가 높았던 전남 등 주변지역 PM_{2.5} 농도의 과소 모

Table 1. Model performance evaluation in the air quality monitoring stations (AMS) of Jeonbuk.

Species	Number of sites	MEAN (OBS)	MEAN (MOD)	MB	RMSE	NMB	NME	R
PM _{2.5}	14	31.3	27.9	-3.4	13.7	-11.0	33.1	0.7
SO ₂	14	4.3	3.9	-0.4	1.4	-10.0	27.2	0.6
NO ₂	14	15.8	12.4	-3.4	5.4	-21.4	27.1	0.7

MEAN (OBS), the mean of the observed values; MEAN (MOD), the mean of the simulated values; Mean Bias (MB); Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Mean Bias (NMB); Normalized Mean Error (NME); Pearson Correlation coefficient (R). Unit: MEAN (µg/m³), NMB (%), NME (%). Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 10%, NME < 35%, R > 0.70. Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 30%, NME < 50%, R > 0.40.

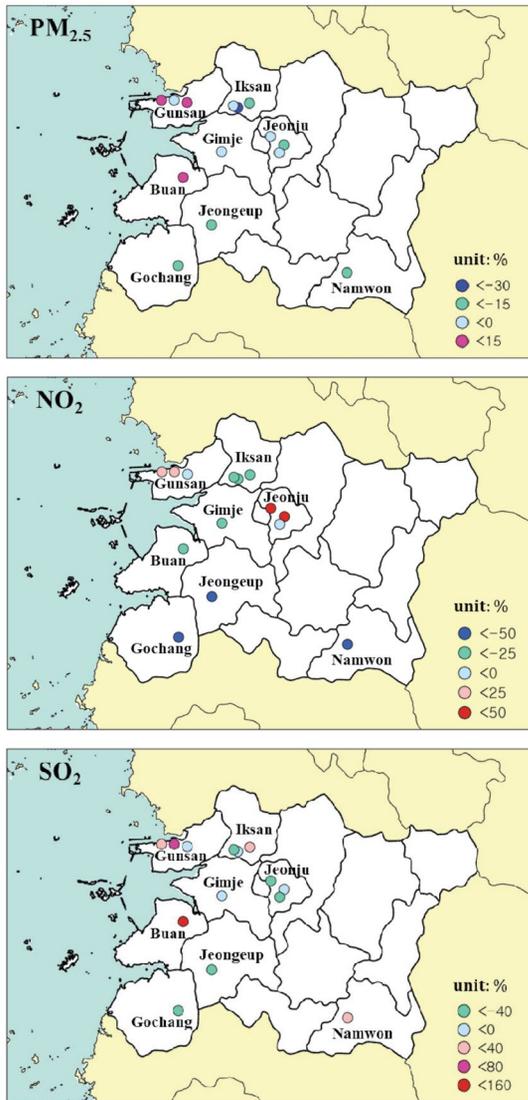


Fig. 11. The Normalized Mean Bias (NMB) for PM_{2.5} (top), NO₂ (middle), and SO₂ (bottom) concentrations at the air quality monitoring stations in Jeonbuk in 2016.

사도 원인이 될 수 있을 것으로 보인다. 부안의 경우에는 PM_{2.5} 농도가 과대 모사되었다. SO₂가 대부분 황산염으로 전환됨을 고려할 때, 부안 SO₂의 과대 모사가 PM_{2.5} 농도의 과대 모사로 이어졌을 것으로 사료된다. 한편, 군산, 익산, 전주로부터 한 기초 지자체 내에서도 각 물질의 과대/과소 모사가 복합적으로 나

타나는 등 공간적 구배가 큰 것을 확인하였다. 이는 대기질 모사 정확도 개선을 위해 지역 규모에서의 고해상도 배출량 자료 확보가 중요함을 의미한다.

성분농도의 경우 전북에 대해 자료 확보가 어려운 인근에 위치한 광주 및 대전 대기환경연구소의 관측 자료와 해당 지역에 대한 모사농도를 비교하였다(표 2 및 그림 S5). 광주 및 대전에서 모두 황산염, 질산염, 암모늄에 대하여는 과대 모사되었으며, Elemental Carbon (EC) 및 Organic Carbon (OC)에 대해서는 과소 모사된 것으로 확인된다. 특히, OC의 과소 모사가 두드러졌는데, 이러한 특성은 국내 다른 지역에 대한 선행연구에서도 보고된 것으로 (Kim *et al.*, 2021a; You *et al.*, 2020), 현재 모델에서 Organic Aerosol (OA)에 대한 재현성이 낮기 때문으로 사료된다 (Tsimpidi *et al.*, 2010; de Gouw and Jimenez, 2005). 전북이 지리적으로 광주와 대전의 사이에 위치해 있다는 점을 고려할 때, 전북에 대한 성분 모사 결과 또한 광주 및 대전과 유사하게 황산염, 질산염, 암모늄에 대하여는 과대 모사, EC 및 OC에 대해서는 과소 모사되었을 것으로 추정된다(표 2).

대전에서는 황산염, 질산염, OC의 순서로 농도가 높게 관측되었으며, 광주에서는 황산염, OC, 질산염의 순서로 높게 관측되었다. Jo *et al.* (2018) 연구에서도, 2017~2018년 전북 전주 지역에서 PM_{2.5} 중 OC, 황산염, 질산염의 순서로 농도가 높게 관측된 것으로 보고한 바 있다. 한편, 전북에서는 PM_{2.5} 중 구성 성분이 질산염, PPM_{2.5}, 황산염, 암모늄의 순서로 높게 모사되었다. 본 연구에서 PPM_{2.5} 모사농도는 EC 및 Primary Organic Carbon (POC)를 포함하고 있으며 대상 지역 및 기간이 완전히 일치하지 않으므로, 관측 농도와 직접적인 비교는 어렵다. 다만, 선행연구로부터 OC의 모사 불확도가 높을 것으로 추정되는 바 (Yang *et al.*, 2020), 모사 재현성이 개선되어야 할 것으로 판단된다. 향후 OC 농도에 대한 모사 재현성 개선을 위해 VOC 배출량 고도화 및 Volatile Basis Set (VBS) 모듈 적용 등이 검토될 수 있다. 또한, 전북은 NH₃ 배출의 비율이 높은 등 주변 지역과 배출 특성

Table 2. Model performance evaluation in supersites of Daejeon and Gwangju.

Site	Species	MEAN (OBS)	MEAN (MOD)	MB	RMSE	NMB	NME	R
Daejeon	PM _{2.5}	30.1	25.1	-5.0	12.1	-16.7	30.9	0.7
	Sulfate	4.4	6.1	1.7	4.0	37.5	58.6	0.7
	Nitrate	4.1	7.2	3.1	5.5	74.8	91.8	0.7
	Ammonium	3.3	4.3	1.0	2.3	30.6	49.8	0.7
	EC	1.3	0.8	-0.5	0.7	-36.7	39.2	0.6
	OC	4.1	2.1	-2.0	2.7	-48.8	51.0	0.5
Gwangju	PM _{2.5}	25.4	23.5	-1.9	11.1	-7.5	33.2	0.7
	Sulfate	5.5	5.6	0.2	3.8	3.0	48.3	0.7
	Nitrate	3.7	6.3	2.5	4.7	67.9	89.3	0.7
	Ammonium	3.4	3.8	0.5	2.1	13.3	43.5	0.7
	EC	1.2	0.9	-0.3	0.5	-28.1	34.5	0.6
	OC	4.1	1.7	-2.4	3.0	-59.2	60.6	0.5

MEAN (OBS), the mean of the observed values; MEAN (MOD), the mean of the simulated values; Mean Bias (MB); Root Mean Square Error (RMSE); Normalized Mean Bias (NMB); Normalized Mean Error (NME); Pearson Correlation coefficient (R). Unit: MEAN ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), NMB (%), NME (%). Emery *et al.* (2017) goals for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 10%, NME < 35%, R > 0.70. Emery *et al.* (2017) criteria for 24-hr total and speciated PM_{2.5}: NMB < 30%, NME < 50%, R > 0.40.

이 다르므로, 전북의 지역적 특성을 반영할 수 있도록 성분농도 측정망이 확충되어야 할 것으로 보인다.

4. 결 론

본 연구에서는 국내 지자체별 PM_{2.5} 기여도 분석의 일환으로 전북에 대해 분석을 수행하였다. 2016년 전북의 연평균 PM_{2.5} 관측농도는 측정소 평균 31.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 대기환경기준 달성을 위해서는 PM_{2.5} 농도가 16 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 감소되어야 한다. 국가배출목록 기반의 대기질 모사를 통해 기초지자체 수준에서 살펴보면, 전북의 기초지자체별 연평균 PM_{2.5} 농도는 19.0~29.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 모든 기초지자체에서 PM_{2.5} 농도 기준을 초과하였다. 또한, 기초지자체 간 농도 차이가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상으로 농도 구배가 크게 나타나, 각 기초지자체에 대한 맞춤형 관리가 필요할 것으로 사료된다.

이를 위해 기초지자체별로 기여농도를 분석하여 최대로 줄일 수 있는 PM_{2.5} 농도 범위를 추정하였다. 전북의 기초지자체별 국외 기여농도는 13.1~17.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 전북 PM_{2.5} 농도의 절반 이상을 차지하였다. 다만, 본 연구에서는 CAPSS 2016 배출목록을 기

반으로 기여농도를 산정하였으나, 최근 중국에서 배출량이 급변하는 것으로 보고되므로, 향후 전북 PM_{2.5} 목표농도 달성을 위해서는 중국 배출량 변화를 반영할 수 있는 탄력적인 배출 관리가 필요할 것으로 보인다.

전북 PM_{2.5} 농도에 대한 전북 자체 기여농도는 1.3~6.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 기초지자체별로 차이가 크게 나타났다. 특히, 김제, 전주, 익산 등 전북의 동쪽에 비해 서쪽에 위치한 기초지자체에서 자체 기여농도가 높았는데, 서쪽 기초지자체에 인구가 밀집되어 배출량이 더 많기 때문이다. 그럼에도 불구하고, 전북의 배출량만 저감하는 경우 어떠한 기초지자체에서도 연평균 PM_{2.5} 목표농도를 달성하지 못하였다. 전북 및 국내 타 지역을 포함하는 국내 전체 기여농도는 5.9~12.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 국내 배출량 저감 시 전북의 14개 기초지자체 중 최대 6개 기초지자체에 대한 목표농도 달성이 가능할 것으로 나타났다. 단, 이는 국내 배출량 100% 저감을 가정한 것으로, 실제 배출량 저감 정책을 통해 목표 달성이 가능한 기초지자체는 더 적을 것으로 보인다. 한편, 전북 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 기여농도는 전북을 제외하면 지리적으로 가까운 전남 및 충남에서 높았는데, 전북 또한 충남 및 전남 PM_{2.5} 농도에 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상 기여하는 것으로 나타

났다. 따라서, PM_{2.5} 농도 관리를 위해 전북, 전남, 충남이 긴밀히 협력해야 할 것으로 사료된다.

성분별로 살펴보면, 국외 기여농도에는 황산염, PPM_{2.5}, 질산염이 주요하였다. 전북 자체 기여농도에는 암모늄의 비율(57.5%)이 압도적으로 높았는데, 배출량 목록으로부터 전북에 NH₃ 배출량이 많기 때문이다. 한편, 전북에서 50 µg/m³ 이상의 고농도 PM_{2.5} 발생 시, 국내 배출 관리를 통해 전북의 PM_{2.5} 농도를 최대 15 µg/m³ 감소시킬 수 있을 것으로 분석되었다. 특히, PM_{2.5} 중 2차 무기성 이온의 비율이 높아지므로, 이에 대한 전구물질 배출의 관리가 중요할 것으로 보인다.

본 연구에서는 국가배출목록을 기반으로 대기질 모사를 통해 기여도를 도출하였으나, 관측농도와 비교로부터 황산염, 질산염, 암모늄, EC에 대한 과대모사 및 OC에 대한 과소모사가 관찰되었다. 이는 기여도 분석 결과에 대한 불확도를 유발할 수 있으므로, 향후 배출량 보정 및 모델 개선 등을 토대로 연구 결과가 보완되어야 한다.

감사의 글

본 연구는 환경부 기후변화특성화대학원 사업 및 국가미세먼지정보센터의 지원으로 수행되었습니다.

References

- Bae, C., Kim, B.U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2020) 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), 48. <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Choi, K.-C., Lim, Y., Lee, J.-B., Nam, K., Lee, H., Lee, Y., Myoung, J., Kim, T., Jang, L., Kim, J.S., Woo, J.-H., Kim, S., Choi, K.-H. (2018) Evaluation of the Simulated PM_{2.5} Concentrations using Air Quality Forecasting System according to Emission Inventories - Focused on China and South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 306-320. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.2.306>
- de Gouw, J.A. (2005) Budget of organic carbon in a polluted atmosphere: Results from the New England Air Quality Study in 2002, *Journal of Geophysical Research*, 110(D16), D16305. <https://doi.org/10.1029/2004JD005623>
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1265027>
- Jeollabukdo Institute of Health & Environment Research (JIHER) (2018) Annual Report of Air Quality in Jeonbuk, 2018, http://air.jeonbuk.go.kr/file/download.do?atchFileId=FILE_00000000001706&fileSn=0 (accessed on Nov. 30, 2020).
- Jeonbuk Institute (JI) (2020) Strategies for Balanced Development in Jeollabuk-do <http://repository.jthink.kr/handle/2016.oak/592> (accessed on Dec. 9, 2020).
- Jo, G., Kim, D., Song, M. (2018) PM_{2.5} Concentrations and Chemical Compositions in Jeonju from 2017 to 2018, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(6), 876-888. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.876>
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the South-eastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533. <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.517>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{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.2021.37.1.17>
- 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_{2.5} 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, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2019) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnamdo, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 226-248.

- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017a) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17(17), 10315-10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017b) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (1) 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., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2021a) 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. (2021b) Direct and cross impacts of upwind emission control on downwind PM_{2.5} under various NH₃ conditions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 268, 115794. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115794>
- Kim, 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>
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2020) Air Quality Management plan in Central Area, http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?pagerOffset=0&maxPageItems=10&maxIndexPages=10&searchKey=&searchValue=&menuId=10259&orgCd=&condition.deleteYn=N&seq=7533 (accessed on Jan. 10, 2021).
- Park, H.Y., Cho, S.Y. (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>
- Pope III, C.A., Dockery, D.W. (2006) Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(6), 709-742. <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464485>
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2006) *Atmospheric Chemistry and Physics - From Air Pollution to Climate Change*, 2nd Edn., John Wiley and Sons, New York, USA.
- Son, K., Kim, E., Bae, M., You, S., Kang, Y.-H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Evaluations on PM_{2.5} Concentrations and the Population Exposure Levels for Local Authorities in South Korea during 2015~2017, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 806-819. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.806>
- Statistics Korea (KOSTAT) (2020) Korean Statistical Information Service, <http://kosis.kr> (accessed on Feb. 10, 2021).
- Sun, W., Shao, M., Granier, C., Liu, Y., Ye, C.S., Zheng, J.Y. (2018) Long-term trends of Anthropogenic SO₂, NO_x, CO, and NMVOCs emissions in China, *Earth's Future*, 6(8), 1112-1133. <https://doi.org/10.1029/2018EF000822>
- Tsimpidi, A.P., Karydis, V.A., Zavala, M., Lei, W., Molina, L., Ulbrich, I.M., Jimenez, J.L., Pandis, S.N. (2010) Evaluation of the volatility basis-set approach for the simulation of organic aerosol formation in the Mexico City metropolitan area, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 10(2), 525-546. <https://doi.org/10.5194/acp-10-525-2010>
- Yang, G.-H., Jo, Y.-J., Lee, H.-J., Song, C.-K., Kim, C.-H. (2020) Numerical Sensitivity Tests of Volatile Organic Compounds Emission to PM_{2.5} Formation during Heat Wave Period in 2018 in Two Southeast Korean Cities, *Atmosphere*, 11(4), 331. <https://doi.org/10.3390/atmos11040331>
- Yarwood, G., Morris, R.E., Wilson, G.M. (2007) Particulate matter source apportionment technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model. In *Air Pollution Modeling and Its Application XVII* (pp. 478-492). Springer, Boston, MA. https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_52
- 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: (1) Gyeonggi Province, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 785-805. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.6.785>

Authors Information

김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구원)
 유승희 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
 배민아 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구조교수)
 손규원 (아주대학교 환경공학과 석사과정)
 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

Supplementary Materials

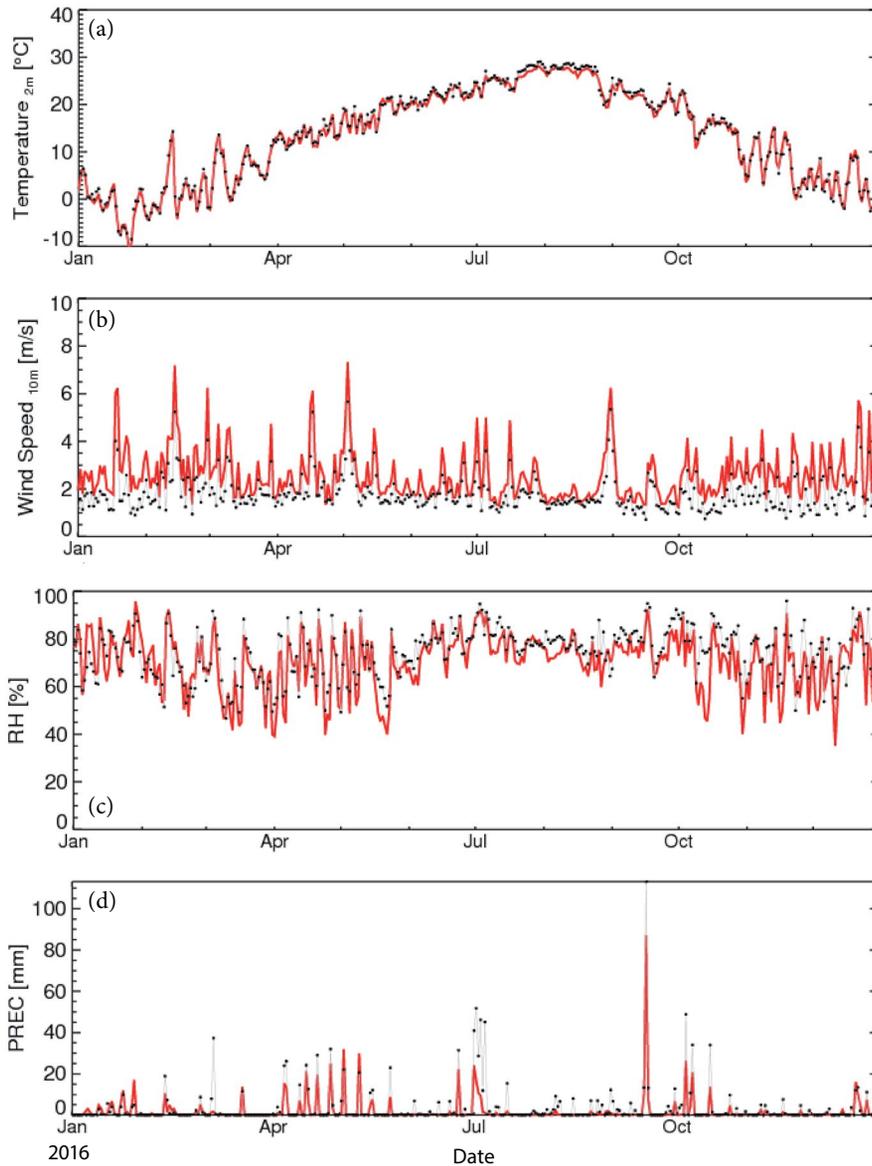


Fig. S1. Comparisons of observed and simulated daily mean (a) 2-m temperature, (b) 10-m wind speed, (c) relative humidity, and (d) precipitation in the Jeonbuk weather stations during 2016.

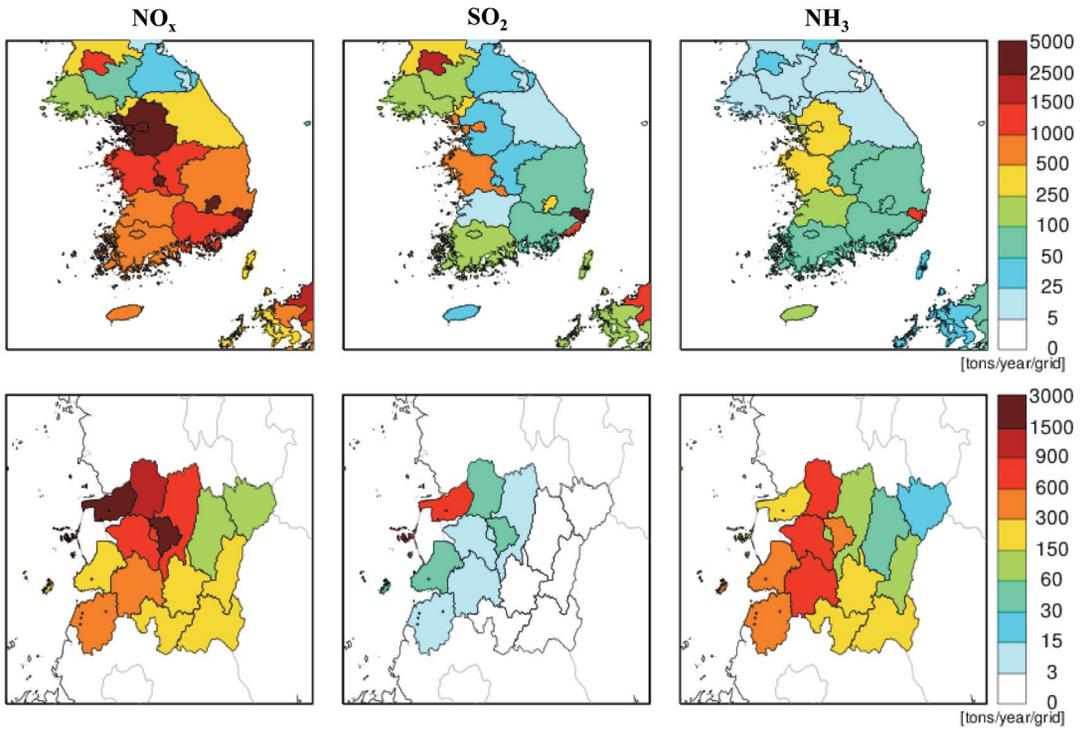


Fig. S2. Annual NO_x (left), SO_2 (middle), and NH_3 (right) emissions based on CAPSS 2016 in South Korea (top) and Jeonbuk (bottom).

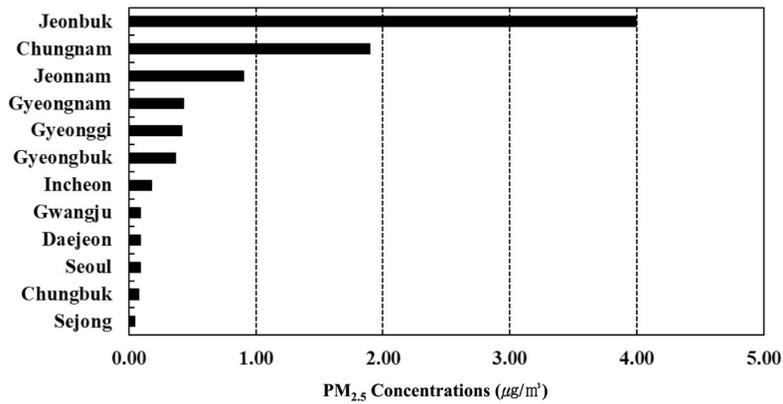


Fig. S3. Annual inter-provincial $\text{PM}_{2.5}$ contributions in Jeonbuk during 2016.

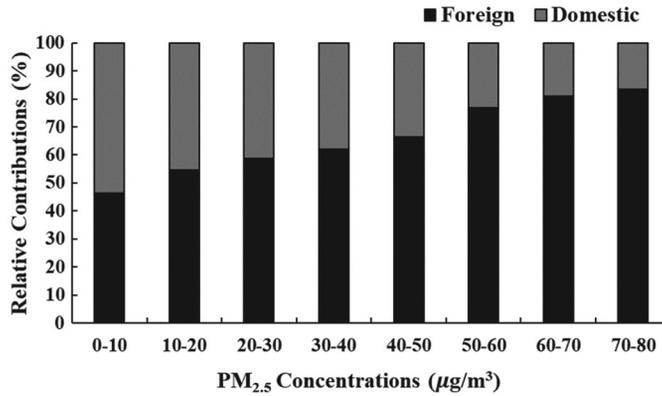


Fig. S4. Relative foreign (black) and domestic (gray) contributions to the annual mean PM_{2.5} concentration bins in Jeonbuk during 2016.

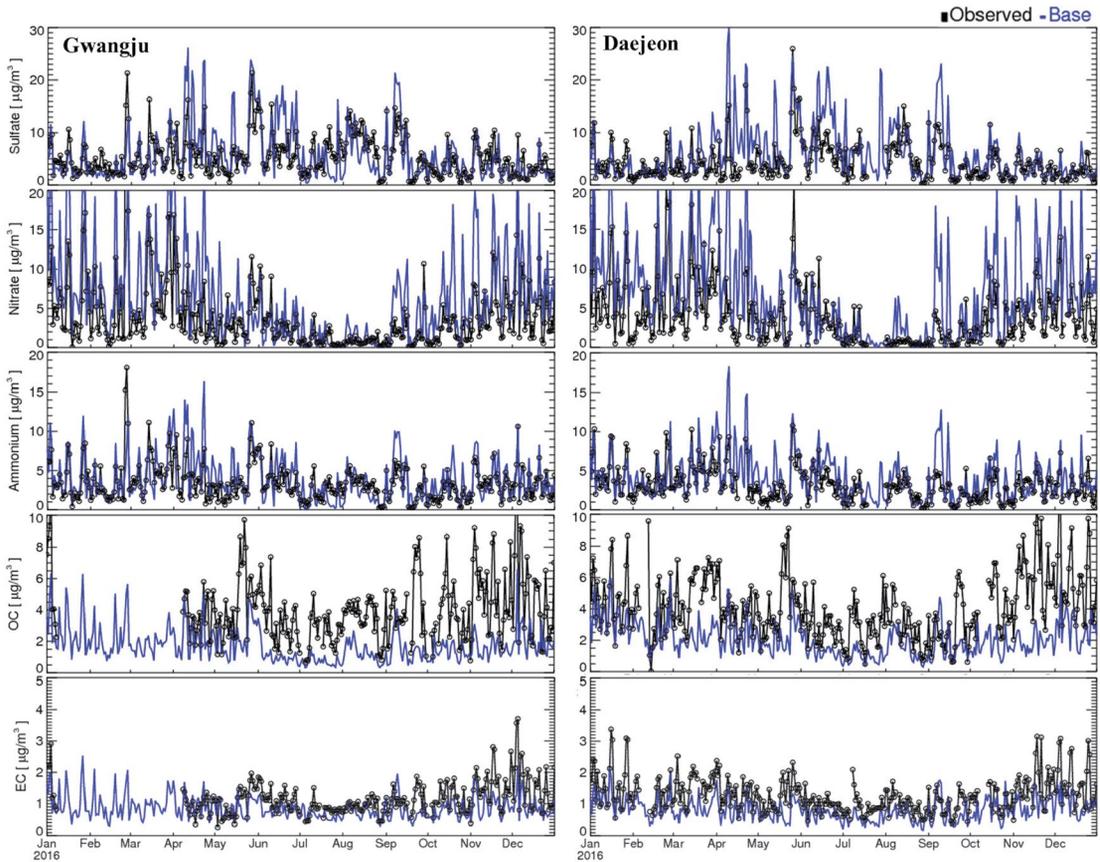


Fig. S5. Daily averaged concentrations of sulfate, nitrate, ammonium, OC, and EC in Gwangju (left) and Daejeon (right) during 2016. Circles represent the observed concentrations, while blue lines represent simulated ones.