

논문

2016년 국가배출목록 기반 지자체별 초미세먼지 기여도 분석: (IX) 경상북도

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

김세기, 손규원¹⁾, 유승희, 배민아¹⁾, 강윤희¹⁾, 김은혜¹⁾, 김순태^{2)*}

아주대학교 환경공학과, ¹⁾아주대학교 환경연구소, ²⁾아주대학교 환경안전공학과

Segi Kim, Kyuwon Son¹⁾, Seunghee You, Minah Bae¹⁾, Yoon-Hee Kang¹⁾,
Eunhye Kim¹⁾, Soontae Kim^{2)*}

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

¹⁾Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

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

접수일 2022년 2월 8일
수정일 2022년 3월 14일
채택일 2022년 3월 15일

Received 8 February 2022
Revised 14 March 2022
Accepted 15 March 2022

*Corresponding author

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

E-mail : soontae.kim@ajou.ac.kr

Abstract In this study, we estimated contributions of foreign and domestic emissions to the annual mean PM_{2.5} concentration in Gyeongbuk for 2016 using Comprehensive Air Quality Model eXtensions with Particulate Source Apportionment Technology. For the detailed analyses on the domestic contributions, self- and inter-provincial contributions as well as intermural contributions among twenty-two local authorities, excluding Ulleung, in the province were estimated based on the CAPSS 2016 emissions inventory (EI). The simulated annual mean PM_{2.5} concentration in Gyeongbuk was 20.9 µg/m³ for the year. The domestic contributions to the annual mean PM_{2.5} concentrations over the local authorities ranged from 3.6 to 13.7 µg/m³. Provincial self-contribution to the annual mean PM_{2.5} concentration in Gyeongbuk was 3.6 µg/m³, explaining 44% of the domestic contribution. It implies that collaboration with neighboring provinces is essential to improve the air quality over Gyeongbuk. The contributions of Chungnam and Gyeonggi to the annual mean PM_{2.5} concentration in Gyeongbuk were 1.0 µg/m³ and 0.8 µg/m³. Among 22 local authorities, Pohang showed the highest emission rates of PM_{2.5}-related air pollutants, and thus the highest local authority-level self-contribution. However, the annual mean PM_{2.5} concentration in Pohang was over-predicted by 61.8 µg/m³. Compared to the EI-based contribution, adjusted PM_{2.5} self-contribution of Pohang using the ratio between the observed and simulated concentrations was reduced by 55%. Considering the over-prediction, especially over the hot-spot area, the emissions inventory used in air quality simulations for the purpose of air quality management should be more thoroughly evaluated prior to analyzing the source-receptor relationship.

Key words: PM_{2.5}, Source apportionment, Gyeongsangbuk-do, Foreign and domestic contributions, Emissions inventory

1. 서론

초미세먼지 (PM_{2.5}; Particulate Matters of which diameter is equal to or less than 2.5 µm)는 기후와 인간에게 악영향을 끼친다 (Kang *et al.*, 2021a; Kumar *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021a; Yabueng *et al.*, 2020; Pui *et al.*, 2014; Zhuang *et al.*, 2013; Menon *et al.*, 2008; Trenga *et al.*, 2006).

2020년 경상북도 (이하 '경북')의 연평균 PM_{2.5} 농도는 17 µg/m³로 국내 평균에 비하여 2 µg/m³ 낮았다 (NIER, 2020). 국립환경과학원 (2020)에 따르면 경북의 연평균 PM_{2.5} 농도는 2015년 28 µg/m³에서 2020년 17 µg/m³로 최근 6년간 11 µg/m³ 감소하였지만, 여전히 대기환경기준 (연평균 PM_{2.5} 15 µg/m³)을 초과하였다. 따라서 경북은 대기환경기준 이하로

PM_{2.5} 농도를 개선하기 위한 배출감소, 타 지자체와의 협업 등 대기질 관리가 지속적으로 필요하다(Kang *et al.*, 2021b; Kim *et al.*, 2018a).

PM_{2.5} 농도 관리를 위한 효율적인 대기질 개선 정책을 마련하기 위해서는 해당 지역 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 배출 지역에 대한 기여도 분석이 필요하다(Han *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2021b). 남한 광역 지자체별(e.g. 전라북도, 전라남도, 울산, 충청북도, 서울 등) PM_{2.5} 농도에 대한 기여도 분석은 동반논문들(i.e., Bae *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021a; Kim *et al.*, 2021b; Kang *et al.*, 2021c; Son *et al.*, 2021)에서 논의된 바 있다. 경북의 PM_{2.5} 농도에 대한 선행 연구들(Hwang *et al.*, 2021; Hwang and Kim, 2019; Ju *et al.*, 2018)을 살펴보면 경북에 대한 배출량 분석과 도시대기측정소 자료를 이용한 연평균 PM_{2.5} 농도 추세 분석과 경북 일부 지역(포항, 경주)과 함께 인근 광역 지자체의 PM_{2.5} 농도에 대한 주변지역 배출의 기여도 분석이 진행되었다. 다만, 기초 지자체 수준에서 경북의 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 및 국내 기여농도, 국내 광역 지자체별 기여농도, 경북 내 기초 지자체별 상호 기여도를 검토한 연구는 제한적이다.

대기질 모사를 통한 기여도 분석은 많은 경우 상향식으로 산정된 배출목록을 기반으로 수행된다(i.e., Bae *et al.*, 2018; Bae *et al.*, 2017b; Kim *et al.*, 2017c). 다만, 상향식 배출목록은 배출계수, 활동도, 배출형태, 시간변화 등에서 불확도를 내포한다(Bae *et al.*, 2021b; Kang *et al.*, 2021b; Park *et al.*, 2021; Kim and Jang, 2014). 배출목록의 불확도는 모사농도와 기여농도 분석의 불확도로 이어질 수 있다(Kim *et al.*, 2017e; Kim and Lee, 2011). 따라서, 기여도 분석에 이용된 배출량 자료의 검증은 중요하다.

이에 본 연구에서는 경북의 기초 지자체 수준에서 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 및 국내 광역 지자체의 배출 기여도와 함께, 경북의 기초 지자체 간 상호 PM_{2.5} 및 성분별 기여도를 표식 방법을 통해 정량적으로 분석하였다. 또한, 본 연구에서는 관측농도와의 비교를 통해 모사농도의 불확도를 정량적으로 평가하

고, 배출목록 기반으로 산정된 경북의 기여도를 보정하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 지역

본 연구의 대상 지역인 경북의 면적은 19,033 km²로 남한의 광역 지자체 중 가장 넓으며, 23개의 기초 지자체로 구성되어 있다. 도서 지역인 울릉군의 경우 수평 격자 해상도와 배출정보 등 모사 제한점을 고려하여 본 연구에서 제외하였다. 경북의 인구는 2020년 기준 264만 명으로 광역 지자체 중 6번째로 많으며, 인구밀도는 139명/km²이다. 경북 기초 지자체 중 구미, 경산, 포항, 경주 4곳에 경북 인구의 54%가 거주하여, 타 기초 지자체에 비해 인구 밀집도가 높다(KOSIS, 2020). 그림 1(a)에서는 남한 내 경북의 위치와 인접한 광역 지자체를 보였으며, 그림 1(b)에서는 경북의 지형과 경북 내 도시대기측정소, 기상관측소와 영남권 대기환경연구소의 위치를 확인할 수 있다. 경북은 지리적으로 동쪽은 동해를 접하며, 북쪽은 태백산맥, 북서쪽에는 소백산맥, 남쪽에는 가야산, 가지산 등으로 둘러싸인 분지형태이다. 이러한 지리적 특징은 바람의 방향과 세기에 영향을 미치며, 분지 내 대기오염물질의 확산을 빠르게 한다(Lee *et al.*, 2002). 경북은 지리적으로 충남과 경기 남동쪽에 위치해 있기에 북서풍이 강해지는 겨울철에 경기와 충남의 배출에 의한 영향을 받을 수 있다. 또한, 경북은 대구를 둘러싸고 있어 상호 대기질에 대한 배출 영향을 주고 받을 수 있다. 경북의 포항시, 경주시, 구미시, 영천시, 경산시, 칠곡군은 대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법에 의하여 동남권 대기관리권역(이하 ‘동남권역’)에 포함되어 관리되고 있다(KMOE, 2020).

2.2 대기질 모사

2016년 경북의 PM_{2.5} 및 구성성분 농도 분석을 위해 Comprehensive Air Quality Model with eXtensions

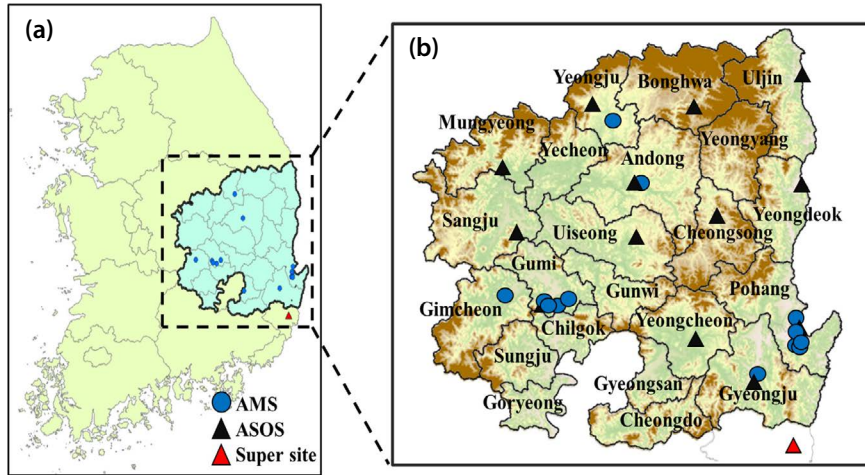


Fig. 1. Geographical locations of (a) Gyeongsangbuk-do, and (b) the targeted 22 local authorities in the province. Ulleung island is excluded in this study. The blue circles are urban Air quality Monitoring Stations (AMS). The black triangles are the Automated Synoptic Observing System (ASOS) stations. The red triangle is the Youngnam supersite.

(CAMx) version 6.2을 사용하여 대기질 모사를 수행하였다(Wagstrom *et al.*, 2008). 본 연구에서는 3 km의 수평격자 해상도로 모사영역을 구성하였다. 3 km 모사영역의 경계조건 마련을 위해 각각 동북아와 한반도 지역을 포함하는 27, 9 km 수평해상도 모사를 수행하였다. 기상자료는 Weather Research and Forecasting (WRF) model version 3.9.1을 수행하여 마련하였으며, 기상 초기장은 National Centers for Environmental Prediction-Final (NCEP-FNL) 자료를 사용하였다. 인위적 배출량은 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) version 3.1을 이용하여 생성하였다. SMOKE 입력자료로 국외 지역은 Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment (CREATE) 2015, 국내는 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2016을 사용하였다. 보다 자세한 내용은 동반논문 Kang *et al.* (2021c), You *et al.* (2020)과 Kim *et al.* (2021c)을 참고할 수 있다.

2.3 기여농도 분석 방법

본 연구에서는 기여농도 분석을 위해 CAMx의 Particulate Matter Source Apportionment Technology

(PSAT)을 이용하였다. PSAT은 $PM_{2.5}$ 성분 중 2차 생성물질인 질산염, 황산염, 암모늄, 2차 유기탄소 (Secondary Organic Carbon; SOC)를 각각 NO_x , SO_2 , NH_3 , VOC로부터 기인하는 것으로 가정하고, 연구목적에 따라 구분한 배출원 (배출지역)의 배출물질들을 추적하여 기여도를 분석하는 방법이다 (Ramboll Environ, 2015; Yarwood *et al.*, 2007). 이 방법은 선행 연구들 (i.e., Lv *et al.*, 2021; Kim *et al.*, 2017a; Burr and Zhang, 2011)에서 지역 간 배출원-수용지 관계 분석을 위해 이용된 바 있다. 본 연구에서 기여도 분석은 기여농도 (Contribution)로 계산하였으며, 단위는 $\mu g/m^3$ 를 사용하였다. 경북에 대한 지역별 기여농도는 국내외 기여농도, 광역 지자체별 기여농도, 경북의 기초 지자체 간 상호 기여농도 순으로 분석하여 제시하였다. 먼저 표식된 국내 기초 지자체 배출에 의한 기여농도는 ‘국내 기여농도 (Domestic contribution)’로, 그 외 기여농도는 ‘국외 기여농도 (Foreign contribution)’로 구분하였다. 국외 배출은 별도로 표식하지 않아 기본 모사농도와 국내 기여농도의 차이를 국외 기여농도로 정의하였다. 국내 기여농도 중, 경북의 자체 배출에 의한 기여농도는 ‘자체 기여농도 (Self-contribution)’로, 국내

에서 경북을 제외한 광역 지자체의 배출에 의한 기여농도는 ‘타 광역 지자체 기여농도(Neighboring-provincial contribution)’로 세분화하였다. 경북의 기초 지자체의 배출에 의한 상호 기여농도는 ‘기초 지자체 기여농도(Intermural contribution)’로 구분하였다. 경북에 대한 국내외 및 타 광역 지자체 기여농도는 울릉군을 제외한 경북의 22개 기초 지자체에 대한 평균 기여농도로 정의하였다. 또한, 이후 특별한 언급이 없는 경우 ‘기여농도’는 ‘PM_{2.5} 기여농도’를 뜻한다. 본 연구에서 PM_{2.5} 성분별 기여농도 분석은 황산염(Sulfate), 질산염(Nitrate), 암모늄(Ammonium), 1차 PM_{2.5}(Primary PM_{2.5}; PPM_{2.5})에 대해 분석하였다. PPM_{2.5}는 1차 유기탄소(Primary Organic Carbon), 1차 무기탄소(Primary Elemental Carbon), 지각 구성 물질(Fine Crustal PM), 그리고 기타 입자상 물질(Other Fine Particulate)을 더하여 계산하였다(Ramboll Environ, 2015). 대기질 모사에서 SOC에 대한 과소 평가는 지속적인 문제로 Aging process 등이 지적되고 있다(Meroni *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2016; Tesche *et al.*, 2006). 또한, VOC 배출량의 과소 산정 등이 SOC 모사의 제한점이 될 수 있다. 이처럼 SOC에 대한 모사의 재현성이 제한적인 관계로 본 연구에서는 SOC에 대한 논의를 제외하였다

2.4 모사수행평가 및 배출량 불확도

본 연구에서는 모사수행평가를 위해 도시대기측정소에서 관측된 PM_{2.5}, NO₂, SO₂ 농도를 기준으로 모사농도와 비교하였다. 경북의 관측농도는 경북 내 모든 도시대기측정소별 관측농도의 평균으로, 모사농도는 도시대기측정소가 위치한 모사 격자들의 평균으로 분석하였다. 그림 7에서 주요 대기오염물질별 모사농도가 지역에 따라 과대 혹은 과소 모사 경향이 다르게 나타나는 점(3.7절 참조)은 본 연구의 대기질 모사에 이용된 기상 또는 배출 입력자료의 불확도로부터 기인할 수 있다는 것을 의미한다(Park *et al.*, 2021; Ju *et al.*, 2019; Peterson *et al.*, 2019). 이때 배출 입력자료의 불확도는 배출목록은 물론(예를 들어, 배출량과 배출

형태 등) 뿐만 아니라 대기질 모사를 위해 배출량을 준비하는 과정에서도 발생할 수 있다.

본 연구에서는 대기질 모사에서의 과대 또는 과소 모사를 반영한 PM_{2.5} 및 PM_{2.5} 구성성분의 기여농도를 별도로 추정하기 위해 관측농도와 모사농도의 비를 이용하여 기여농도를 보정하였다. 모사농도의 과대 및 과소 모사는 해당 지역뿐 아니라, 다른 인접 지역과 국외 배출량과 기상 등 다른 요인에 의해 발생할 수 있다. 다만, 본 연구에서 특정 지역(*i.e.*, 포항)을 제외한 경북 평균 관측-모사농도 간의 편차가 크지 않은 점을 고려하여 국지적인 모사 편차는 해당 기초 지자체의 배출 불확도로부터 기인하는 것으로 가정하였다(3.7절 참조). 아래 식 (1)과 (2)에서 관측농도는 시군 내 모든 도시대기측정소 평균으로, 모사농도는 시군 모든 격자 평균으로 분석하였다.

PSAT 분석을 통해 산출된 기여농도는 배출목록(Emissions Inventory; EI)을 기반으로 산정된 기여농도(이하 ‘배출목록 기반기여농도; EI-based contribution’)이다. 대기질 모사 결과에는 배출정보를 비롯한 다양한 불확도가 포함되며, 이로 인해 관측농도와 모사농도는 차이를 보일 수 있다. 이를 고려하여 미 환경청의 경우 모사농도를 직접 이용하지 않고, 관측과 모사농도의 상대적인 변화인 Relative Response Factor를 이용하여 모사 결과를 보정한다(U. S. EPA, 2015). Bae *et al.* (2017b)은 RRF와 유사하게 기여농도에 선형적인 보정 계수인 Contribution Correction Factor(CCF)를 적용한 바 있다. 본 연구에서는 배출목록 기반 기여농도 외에 CCF를 적용하여 보정된 기여농도(보정 기여농도; Adjusted contribution)를 추가적으로 산정하였다. 본 연구에서는 PM_{2.5} 성분을 황산염, 질산염, 암모늄, PPM_{2.5}, SOC로 구분하고, 각 성분별로 다음과 같이 보정하였다. 식 (1)에서 보정된 질산염 기여농도는 배출목록 기반 질산염 기여농도에 관측된 NO₂ 농도(NO₂^{OBS})와 모사된 NO₂ 농도(NO₂^{MOD}) 비를 곱하여 추정하였다. 식 (2)는 식 (1)과 유사하나, SO₂ 농도를 이용하여 황산염 기여농도를 보정하였다.

Adjusted NO_3^- contribution

$$= \text{EI-based } \text{NO}_3^- \text{ contribution} \times (\text{NO}_2^{\text{OBS}}/\text{NO}_2^{\text{MOD}}) \quad (1)$$

Adjusted SO_4^{2-} contribution

$$= \text{EI-based } \text{SO}_4^{2-} \text{ contribution} \times (\text{SO}_2^{\text{OBS}}/\text{SO}_2^{\text{MOD}}) \quad (2)$$

암모늄 기여농도의 보정은 식 (1)과 (2)에서 보정된 질산염과 황산염 기여농도를 이용하였다(식 (3)). 식 (4)~(6)에서 질산염(ΔNO_3^-), 황산염(ΔSO_4^{2-}), 암모늄(ΔNH_4^+)의 변화량은 배출목록 기반 기여농도와 보정된 기여농도의 차이로 정의하였다.

Adjusted NH_4^+ contribution

$$= \text{adjusted } \text{SO}_4^{2-} \text{ contribution} \times \frac{2 \times 18 \text{ g/mol}}{96 \text{ g/mol}} + \text{adjusted } \text{NO}_3^- \text{ contribution} \times \frac{18 \text{ g/mol}}{62 \text{ g/mol}} \quad (3)$$

$\Delta\text{NO}_3^- = \text{EI-based } \text{NO}_3^- \text{ contribution}$

$$- \text{adjusted } \text{NO}_3^- \text{ contribution} \quad (4)$$

$\Delta\text{SO}_4^{2-} = \text{EI-based } \text{SO}_4^{2-} \text{ contribution}$

$$- \text{adjusted } \text{SO}_4^{2-} \text{ contribution} \quad (5)$$

$\Delta\text{NH}_4^+ = \text{EI-based } \text{NH}_4^+ \text{ contribution}$

$$- \text{adjusted } \text{NH}_4^+ \text{ contribution} \quad (6)$$

$\text{PM}_{2.5}$ 농도 편차($\text{PM}_{2.5}^{\text{MOD}} - \text{PM}_{2.5}^{\text{OBS}}$)에는 황산염, 질산염, 암모늄, $\text{PPM}_{2.5}$ 와 SOC 변화량이 존재한다. 단, 본 연구에서 SOC의 모사 재현성이 제한적이라는 점을 고려하여 SOC의 변화량은 포함하지 않았다. 이에 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 편차에서 황산염, 질산염, 암모늄의 변화량을 제외한 나머지는 $\text{PPM}_{2.5}$ 의 변화량으로 가정하였다(식 7). 보정된 $\text{PPM}_{2.5}$ 기여농도는 식 (8)과 같이 배출목록 기반 $\text{PPM}_{2.5}$ 기여농도에서 $\text{PPM}_{2.5}$ 변화량을 이용하여 계산하였다.

$$\Delta\text{PPM}_{2.5} = (\text{PM}_{2.5}^{\text{MOD}} - \text{PM}_{2.5}^{\text{OBS}}) - (\Delta\text{SO}_4^{2-} + \Delta\text{NO}_3^- + \Delta\text{NH}_4^+) \quad (7)$$

Adjusted $\text{PPM}_{2.5}$ contribution

$$= \text{EI-based } \text{PPM}_{2.5} \text{ contribution} - \Delta\text{PPM}_{2.5} \quad (8)$$

대상기간인 2016년을 기준 경북에 위치한 도시대 기측정소는 안동, 김천, 경주, 경산, 영주에 각각 1개씩, 그리고 구미에 4개, 포항에 5개 위치한다. 이에 따라, 경북 내 7개 기초 지자체에만 측정소가 존재하며 포항과 구미에 집중되어 있다는 한계점이 있다. 특히, $\text{PM}_{2.5}$ 는 포항에 3개, 경주에 1개, 구미에 3개의 도시대기측정소에서 측정되었다. 기여농도 보정은 이러한 한계점과 평균 관측-모사농도 간의 편차가 큰 점을 고려하여 포항에 한하여 실시하였다.

3. 연구 결과

3.1 배출량 분석

CAPSS 2016를 기준으로 경북의 SO_2 , NO_x , NH_3 , $\text{PPM}_{2.5}$ 배출량은 39,361 TPY (tons per year), 109,746 TPY, 34,252 TPY, 22,670 TPY로 각각 국내 전체 배출량의 11%, 8%, 11%, 23%를 차지하였다. 경북 내 기초 지자체별 배출량에서는 NH_3 를 제외한 SO_2 , NO_x , $\text{PPM}_{2.5}$ 에 대해 포항의 배출량이 경북 전체 배출량의 79% (31,255 TPY), 40% (43,952 TPY), 69% (15,553 TPY)를 차지하며, 일부 지역에 집중된 공간 분포를 보인다(그림 2). 이를 단위 면적당 배출량인 배출밀도로 살펴보면 포항의 SO_2 , NO_x , $\text{PPM}_{2.5}$ 배출밀도는 경북 평균 배출밀도보다 각각 13배 (28 TPY/ km^2), 7배 (39 TPY/ km^2), 12배 (14 TPY/ km^2) 높다.

배출물질별로 주요한 배출원은 기초 지자체별로 다르게 나타났다. SO_2 의 경우, 포항과 구미는 제조업 연소, 포항과 구미를 제외한 대부분 지역은 비산업 연소가 주요한 배출원(최대 99%)이다. NO_x 는 포항은 제조업 연소의 배출 비중이, 포항을 제외한 나머지 지역은 도로이동오염원의 배출 비중이 높다. NH_3 는 경북 모든 지역에서 농업의 배출 비중이 높다. $\text{PPM}_{2.5}$ 의 경우, 포항과 구미에서는 제조업 연소, 칠곡에서는 도로이동오염원, 경주, 고령, 성주와 울진에서는 비산업연기, 그 외 지역에서는 생물성연소가 가장 중요한 배출원이다.

경북 인근 지역의 배출규모를 살펴보면, SO_2 배출

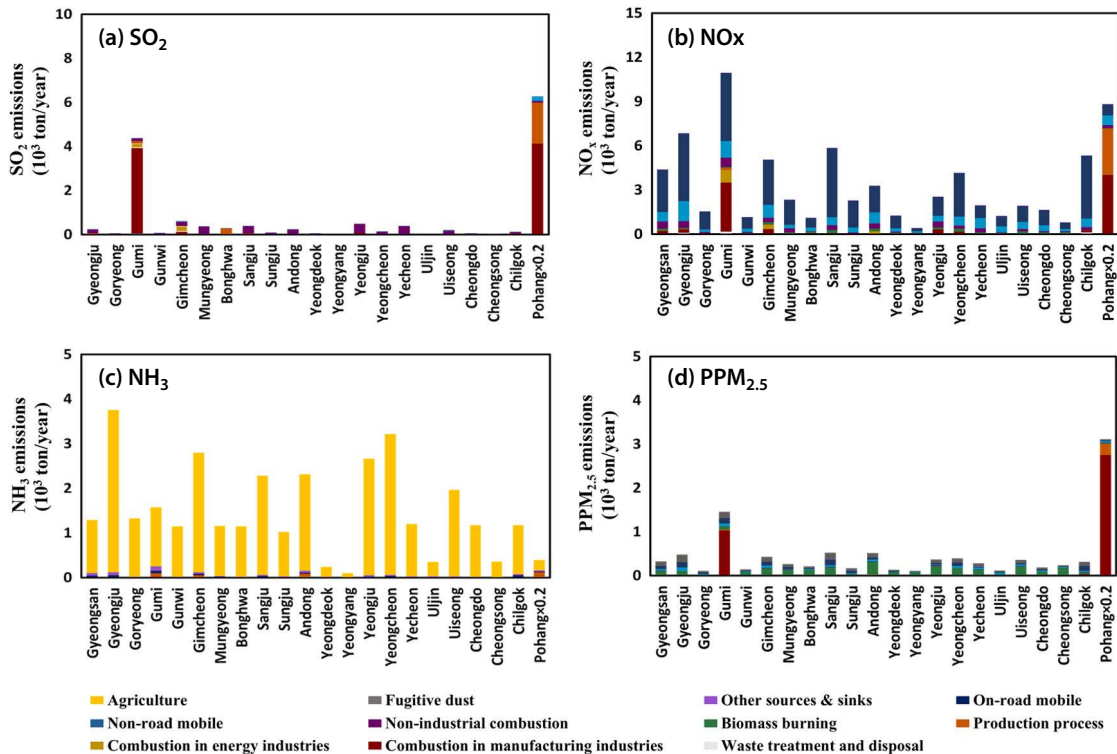


Fig. 2. Annual emissions of (a) SO₂, (b) NO_x, (c) NH₃, and (d) PPM_{2.5} are released from 22 local authorities in Gyeongsangbuk-do based on the CAPSS 2016 emissions inventory. Emissions of pohang are multiplied by 0.2.

량은 충남과 울산이 경북에 비해 각각 2.1배, 1.2배 높으며, 경기의 SO₂ 배출량은 경북 대비 40%로 낮았다. 경기와 충남의 NO_x 배출량은 경북 대비 1.9배, 1.2배 높았으며, NH₃는 두 지역 모두 경북에 비해 1.4배 높았다. 특히, 충남과 경기는 경북의 풍상지역에 위치하기 때문에 충남과 경기의 배출이 경북의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 작지 않을 것으로 사료된다. 이는 3.3절에서 자세히 논의하였다.

3.2 국외 및 국내 PM_{2.5} 기여농도

경북이 포함되는 모든 격자에 대한 2016년 연평균 PM_{2.5} 농도는 20.9 µg/m³로 조사되었다. 기초 지자체별로는 포항과 구미에서 25.5 µg/m³, 24.6 µg/m³로 가장 높게 되었으며, 포항의 일부 측정소에서는 PM_{2.5} 관측농도를 3~4배 초과 조사하였다. 이에 대한 논의

는 3.7절에서 자세히 언급하였다.

경북의 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여농도는 12.9 µg/m³ (62%)로 조사되었다. 국외 기여농도를 기초 지자체별로 살펴보면, 문경에서는 14.4 µg/m³로 경북 평균에 비해 12% 높았으며, 지리적으로 경북의 동쪽에 위치한 울진에서는 11.3 µg/m³로 경북 평균 대비 13% 낮았다. 풍상인 중국의 높은 배출량과 편서풍의 영향으로 인하여 비교적 중국과 가까운 경북 서쪽에 위치한 기초 지자체에서 국외 기여농도가 상대적으로 높았다(그림 S1) (Bae *et al.*, 2020). 다만, 국외 기여농도는 이용된 배출목록에 따라 달라질 수 있다(Bae *et al.*, 2018; Bae *et al.*, 2017a; Kim *et al.*, 2017b).

경북 전 지역의 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 기여농도는 8.1 µg/m³로 나타났다. 또한 경북 기초 지자체별 국내 기여농도는 3.6 µg/m³ (울진)~13.7 µg/m³

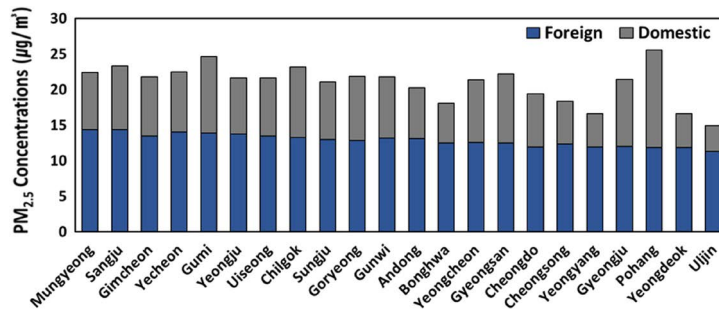


Fig. 3. Domestic and foreign contributions to the annual mean $PM_{2.5}$ concentrations in 22 local authorities of Gyeongsangbuk-do during the simulation period of 2016.

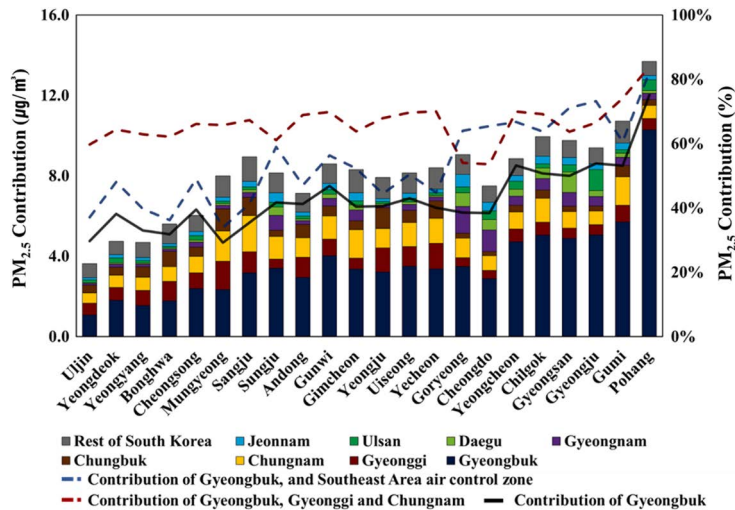


Fig. 4. Self- and inter-provincial contribution to the annual mean $PM_{2.5}$ concentrations over 22 local authorities in Gyeongsangbuk-do during the simulation period of 2016. The bars and lines represent contribution and contribution rate.

(포항)의 범위로 모사되었다(그림 3). 이러한 국내 기여농도 범위는 국내 배출저감 노력으로 최대한 저감할 수 있는 $PM_{2.5}$ 농도로 해석이 가능하다. 경북 기초 지자체별 국내 기여농도의 차이는 $10.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 국외 기여농도의 차이보다 $7.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 크게 모사되었다(그림 3). 국내 기여농도의 지역별 차이가 큰 것은 경북 기초 지자체별로 자체 배출에 의한 영향 또는 타 광역 지자체로부터의 유입 영향의 차이가 크다는 점을 의미한다. 기초 지자체별 연평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 자체 배출에 의한 영향과 타 지역으로부터의 유입 영향

을 구분하기 위해 3.3절에서는 국내 광역 지자체별 기여농도를 정량적으로 살펴보았다.

3.3 광역 지자체별 $PM_{2.5}$ 기여농도

그림 4는 경북의 22개 기초 지자체별 연평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 경북 자체 및 타 광역 지자체의 기여농도를 나타낸다. 경북 전 지역 평균 자체 기여농도는 $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 국내 기여농도 $8.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 45% 수준이다. 경북 자체 기여농도는 기초 지자체별로는 포항 $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 구미 $5.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 경주 $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 칠곡 $5.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$

m^3 , 경산 $4.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 영천 $4.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 순으로 높았다.

경북 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 충남 배출에 의한 기여농도는 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 타 광역 지자체 중에서 가장 높았다. 특히, 경북 내 기초 지자체 중 서쪽에 위치한 상주($1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 충남 배출에 의한 기여농도가 가장 높았다. 경북 전역에 대한 경기 배출에 의한 기여농도는 평균 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 문경($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 영주($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 높았다. 이는 경기와 충남의 경우 경북과 직접 맞닿아 있지 않지만 경북의 풍상에 위치해 있고, 배출량이 다른 광역 지자체들에 비해 많기 때문으로 판단된다. 충남 배출에 의한 기여농도는 경북 평균 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 특히, 충북의 기여농도는 문경($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 영주($1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 높았다. 경남 배출에 의한 기여농도는 평균 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 남쪽에 위치한 고령($1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 청도($1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 높았다. 경북 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 울산 배출에 의한 기여농도는 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 울산과 지리적으로 인접한 경주에서 $1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았다(그림 S2). 대구와 전남의 배출은 평균적으로 각각 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기여농도를 보였다.

이러한 결과를 종합해 보면, 경북 도내 배출량 저감 등 자체 노력만으로 경북 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 개선할 수 있으며, 대기환경권역관리에서 동남권으로 함께 분리되어 있는 부산, 대구, 울산, 경남과의 협력을 통해서 $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 까지 개선이 가능하다. 이에 반해 충남 및 경기와의 협력을 통해 최대 $5.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 개선이 가능한 것으로 분석되었다. 특히, 미세먼지 계절관리기간인 12~3월 기간을 살펴보면, 충남, 경기와의 협력을 통해 저감할 수 있는 경북 $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 최대 $5.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 자체 기여농도에 비해 1.6배 높았다. 광역 지자체별 기여농도의 계절 변화는 3.4절에서 논의하였다.

3.4 광역 지자체 기여농도의 계절 변화

2016년 경북의 $\text{PM}_{2.5}$ 관측농도는 겨울철(12~2월)에는 $35.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 여름철(6~8월)에는 $16.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 경북 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 계절별 변화를 감안하여 광역 지자체별 기여농도를 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 가 빈번하게 발생하

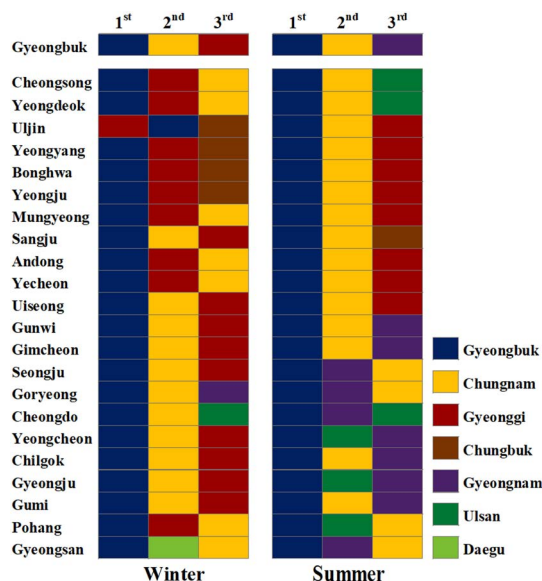


Fig. 5. The top three provinces exhibit the highest seasonal mean $\text{PM}_{2.5}$ contributions over Gyeongsangbuk-do and its 22 local authorities during the winter and summer of 2016.

는 겨울철과 여름철로 구분하여 살펴보았다(그림 5). $\text{PM}_{2.5}$ 농도가 높은 겨울철 동안 울진을 제외한 경북의 모든 기초 지자체에서 경북 자체 기여농도($3.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 타 광역 지자체별 기여농도보다 높았다. 울진 경우 경기의 기여농도 $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 경북 자체 기여농도가 $0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 두 번째로 높게 조사되었다. 이는 경북 내 울진의 지리적 위치와 겨울철 계절풍인 북서풍의 영향에 의한 것으로 사료된다. 대부분의 기초 지자체에서 2순위와 3순위로 충남($1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 경기($1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 기여농도가 혼재되어 나타났다. 대구의 동쪽에 위치한 경산에서는 대구의 기여농도($1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 두 번째로 나타났으며, 경북의 북쪽에 위치한 울진, 영양, 봉화, 영주에서는 충북의 기여농도가 3순위로 나타났다. 이는 경북의 겨울철 주풍향인 북서풍의 영향인 것으로 판단된다(그림 S3(a)).

여름철에는 겨울철에 비해 북서풍의 빈도가 감소하고, 남풍의 빈도가 늘어난다(그림 S3; Son et al., 2021). 이에 따라, 남쪽에 위치한 포항과 구미가 경북

PM_{2.5} 농도에 미치는 영향이 증가하여 여름철 자체 기여농도(평균 3.6 µg/m³)는 겨울철에 비해 0.4 µg/m³ 높게 나타났다. 비교적 북쪽에 위치한 울진, 영양, 봉화, 영주, 문경, 안동, 예천, 의성, 청송, 영덕의 경우, 여름철에도 충남(평균 1.0 µg/m³)과 경기(평균 0.5 µg/m³)의 기여농도가 높으나, 남쪽에 위치한 나머지 기초 지자체들의 경우 상대적으로 경남(평균 0.6 µg/m³)과 울산(평균 0.5 µg/m³)의 영향이 크게 나타났다.

동남권역에 포함된 경북 내 기초 지자체의 PM_{2.5} 농도에 대한 동남권역에 포함된 광역 지자체별 평균 기여농도를 살펴보면, 대구를 제외한 나머지 광역 지자체의 기여농도는 여름철보다 겨울철에 평균 0.5 µg/m³ 낮았다. 이는 겨울철에는 타 권역으로부터의 유입이 중요하다는 것을 의미한다. 이에 북서풍이 주요한 겨울철에는 풍상에 위치한 충남, 경기와의 협력이 더욱 중요해 보인다.

3.5 경북 기초 지자체 간 PM_{2.5} 기여농도

대상기간 동안 연평균 PM_{2.5} 농도에 대해 대부분의 기초 지자체에서 자체 기여농도가 가장 높았으나, 일부 기초 지자체에서는 이웃한 타 기초 지자체의 기여농도가 오히려 높게 나타났다(표 1). 특히, 포항의 자체 기여농도는 9.0 µg/m³로 경북 기초 지자체 중 가장 높았다. 경북 내 모든 기초 지자체들에 대한 포항의 기여농도는 평균 1.0 µg/m³로 모사되었다. 포항을 제외한 다른 기초 지자체들이 경북 기여농도에 미치는 영향은 0.02(울진)~0.39(구미) µg/m³ 범위로 나타났다. 일부 기초 지자체들에서는 포항 배출에 의한 기여농도가 자체 기여농도보다 높았으며 특히, 경주에서는 자체 기여농도보다 포항의 기여농도가 1.6배가량 높았다. 이처럼 포항의 기여농도가 높은 것은 대기질 모사에 이용된 CAPSS 2016에서 일부 이웃한 시군에 비해 포항의 배출량(2.1절 참조)이 크게 높기 때문이다. 이와 유사하게 구미의 자체 기여농도는 3.2 µg/m³였으며, 주변지역인 칠곡(1.4 µg/m³), 군위(0.7 µg/m³)에도 영향을 끼쳤다. 경주, 경산, 영천의 자체 기여농도는 1.5~1.7 µg/m³였으나, 경북 도내 기여농도는

4.7~5.1 µg/m³로 높았는데, 이는 포항과 구미 등의 배출 기여농도가 각각 2.6, 1.7, 1.7 µg/m³로 높았기 때문이다. 한 가지 주목할 점은 포항의 배출이 경북의 PM_{2.5} 농도에 미치는 영향은 경북 자체 기여농도의 28%에 해당된다. 다만 포항 배출량의 불확도를 가정하면(Kim *et al.*, 2020), 포항 배출이 경북 연평균 PM_{2.5} 농도에 미치는 실제 영향은 본 연구의 대기질 모사 결과와 차이를 보일 수 있다. 이는 3.7절에서 자세히 논의하였다.

3.6 경북 PM_{2.5}의 성분별 기여농도

경북 연평균 PM_{2.5} 성분 농도에 대한 국내 기여농도를 살펴보면 질산염 2.7 µg/m³, 암모늄 2.4 µg/m³, PPM_{2.5} 2.1 µg/m³, 황산염 0.9 µg/m³ 순으로 나타났다. 경북 연평균 질산염 농도 중 경북 자체 기여농도는 0.6 µg/m³로 국내 기여농도의 22%를 차지하였으며, 경기 0.5 µg/m³, 충남 0.4 µg/m³ 순으로 높게 나타났다. 경북의 연평균 황산염 농도에 대한 자체 기여농도는 0.2 µg/m³이었으며, 그 다음으로 충남 0.2 µg/m³, 울산 0.1 µg/m³, 전남 0.1 µg/m³ 순이었다. 기초 지자체별로 살펴보면 포항에서 경북 자체 황산염 기여농도가 1.0 µg/m³로 가장 높게 모사되었다(그림 6(a)). 2차 생성 물질인 황산염과 질산염의 경우, 타 광역 지자체 기여농도의 합이 자체 기여농도에 비해 2.7배, 3.6배 높게 나타났다.

경북 암모늄 농도에 대한 국내 기여농도는 2.4 µg/m³로 모사되었으며, 경북 자체 기여농도는 1.5 µg/m³로 국내 암모늄 기여농도의 60% 수준이었다. 기초 지자체별로 경북의 자체 암모늄 기여농도는 0.5 µg/m³(울진)~2.1 µg/m³(경주)의 범위로 모사되었다(그림 6(c)). 경북 PPM_{2.5} 농도에 대한 국내 기여농도는 2.1 µg/m³였으며, 이 중 경북 자체 PPM_{2.5} 기여농도는 1.3 µg/m³로 국내 PPM_{2.5} 기여농도의 62%를 차지하였다(그림 6(d)). 암모늄과 1차 PM_{2.5}의 경우 황산염과 질산염과는 다르게 자체 기여농도가 60% 이상으로 상대적으로 높았다.

경북의 기초 지자체별로 기여농도에서 포항 연평균

Table 1. Source-receptor relationships of the annual mean PM_{2.5} concentrations among 22 local authorities in Gyeongsangbuk-do during the simulation period of 2016.

	Source																					
	Andong	Mungyeong	Sangju	Gimcheon	Gumi	Chilgok	Gunwi	Goryeong	Sungju	Gyeongsan	Yeongcheon	Pohang	Gyeongju	Cheongdo	Cheongsong	Yeongdeok	Yeongju	Yecheon	Uiseong	Bonghwa	Yeongyang	Uljin
Receptor	Andong	1.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.2	0.2	0.1	0.0	0.0
	Mungyeong	0.1	0.9	0.3	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0
	Sangju	0.1	0.2	1.5	0.2	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
	Gimcheon	0.0	0.0	0.1	1.7	0.4	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gumi	0.1	0.0	0.4	0.4	3.2	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0
	Chilgok	0.0	0.0	0.2	0.4	1.4	1.6	0.1	0.1	0.2	0.1	0.7	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Gunwi	0.1	0.1	0.3	0.1	0.7	0.2	1.1	0.0	0.0	0.2	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.0	0.0	0.0
	Goryeong	0.0	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.0	1.3	0.4	0.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Sungju	0.0	0.0	0.1	0.5	0.3	0.2	0.0	0.2	1.1	0.1	0.6	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gyeongsan	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.2	0.1	0.0	0.1	1.7	0.5	1.4	0.2	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Yeongcheon	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.2	1.7	1.4	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Pohang	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.2	9.0	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Gyeongju	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.4	2.4	1.5	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Cheongdo	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.1	0.3	0.1	0.8	0.2	0.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cheongsong	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.5	0.1	0.0	0.5	0.0	0.1	0.1	0.2	0.0	0.0	0.0
	Yeongdeok	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.5	0.1	0.0	0.1	0.3	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0
	Yeongju	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.2	0.0	0.2	0.0	0.0
	Yecheon	0.4	0.4	0.3	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.3	1.3	0.1	0.1	0.0	0.0
	Uiseong	0.3	0.1	0.4	0.1	0.3	0.1	0.2	0.0	0.0	0.1	0.4	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	1.3	0.0	0.0	0.0
	Bonghwa	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.4	0.1	0.0	0.8	0.0	0.0
	Yeongyang	0.3	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.0	0.1	0.2	0.0
	Uljin	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.3

Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

10.0~4.0	4.0~2.0	2.0~1.0	1.0~0.5
----------	---------	---------	---------

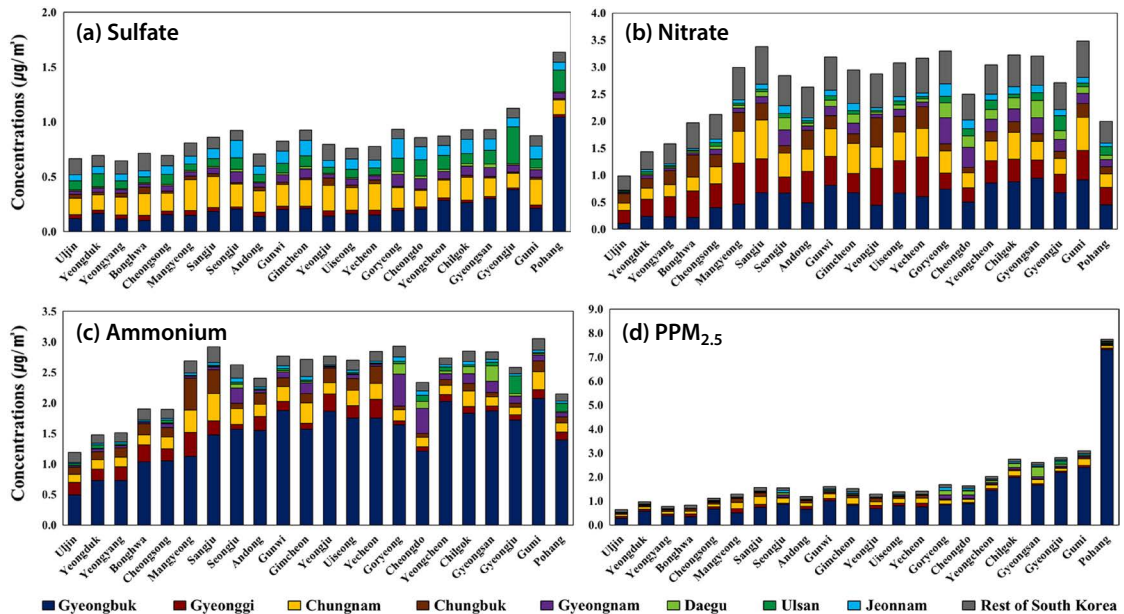


Fig. 6. Self- and inter-provincial contributions to the annual mean concentrations of (a) sulfate, (b) nitrate, (c) ammonium, and (d) $PPM_{2.5}$ in 22 local authorities of Gyeongsangbuk-do during the simulation period of 2016.

$PM_{2.5}$ 농도에 대한 포항의 자체 기여농도는 $PPM_{2.5}$ ($7.1 \mu g/m^3$), 황산염 ($1.0 \mu g/m^3$), 암모늄 ($0.7 \mu g/m^3$), 질산염 ($0.2 \mu g/m^3$) 순으로 높게 나타났다. 표 2는 경북 내 기초 지자체별 질산염 농도에 대한 기초 지자체 기여농도를 보인 것으로, 포항의 NO_x 배출량은 43,952 TPY로 경북 기초 지자체 중 가장 높다. 이에 반해 포항의 NO_x 배출에 의한 자체 질산염 기여농도는 $0.2 \mu g/m^3$ 였으며, 오히려 포항 주변에 위치한 영천과 경산에선 $0.3 \mu g/m^3$ 로 높게 나타났다. 이는 NO_x 가 2차 생성되는 질산염으로 전환되기까지 시간이 필요하기 때문에 사료된다 (Kim *et al.*, 2017c; Kim *et al.*, 2017d). Bae *et al.* (2021a)에서는 서울 NO_x 배출의 질산염에 대한 기여농도가 서울 자체보다 풍하지역에서 크게 나타나며, 포항과 같은 현상을 보였다.

위의 결과를 종합해 보면, 경북에 대한 $PM_{2.5}$ 저감 정책 수립 시 주 대상물질은 질산염이 된다. 다만, 포항과 같이 일부 기초 지자체에서는 질산염에 대한 기여농도가 다른 $PM_{2.5}$ 구성성분에 비해 낮은 점을 고려하면, 지역별 $PM_{2.5}$ 구성성분과 기여농도에 대한 이

해가 관리정책 수립에 앞서 요구된다. 또한 질산염과 황산염의 경우 타 광역 지자체로부터의 유입 영향이 경북 자체 영향에 비해 3.6배, 2.7배 중요하게 모사되었다. 이에 질산염과 황산염의 저감을 위해서는 타 광역 지자체와의 협업이 필수적이다. 반면, 암모늄과 $PPM_{2.5}$ 는 경북 자체적인 배출량 삭감을 통해 국내 기여농도의 60%, 67% 정도 개선할 수 있을 것으로 사료된다.

3.7 경북 $PM_{2.5}$ 기여농도의 불확도

본 연구에서는 모사수행평가 및 배출정보의 불확도 검토를 위해 도시대기측정소에서 관측된 $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 농도와 모사농도를 비교하였다. 경북의 2016년 연평균 $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 관측농도는 $27.2 \mu g/m^3$, 16.6 ppb, 4.7 ppb이었다. 한편 $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 모사농도는 관측농도에 비해 $13.7 \mu g/m^3$, 4.3 ppb, 13.9 ppb 과대 모사하였다(그림 S5). 다만 2.4절에 언급된 바와 같이, 경북의 $PM_{2.5}$ 측정소 7곳 중 6곳이 구미와 포항에 편중되어 있어 제시된 경북 평균 농도는 전체 경북 지역

Table 2. Source-receptor relationships of the annual mean nitrate concentrations among 22 local authorities of Gyeongsangbuk-do during the simulation period of 2016.

		Source																					
		Andong	Mungyeong	Sangju	Gimcheon	Gumi	Chilgok	Gunwi	Goryeong	Sungju	Gyeongsan	Yeongcheon	Pohang	Gyeongju	Cheongdo	Cheongsong	Yeongdeok	Yeongju	Yecheon	Uiseong	Bonghwa	Yeongyang	Uljin
Receptor	Andong	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Mungyeong	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Sangju	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gimcheon	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gumi	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Chilgok	0.0	0.0	0.1	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gunwi	0.0	0.0	0.1	0.0	0.2	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Goryeong	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Sungju	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gyeongsan	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Yeongcheon	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Pohang	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Gyeongju	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cheongdo	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.2	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Cheongsong	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Yeongdeok	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Yeongju	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Yecheon	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0
	Uiseong	0.1	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0
	Bonghwa	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Yeongyang	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
	Uljin	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0

Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

0.4~0.3	0.3~0.2	0.2~0.1
---------	---------	---------

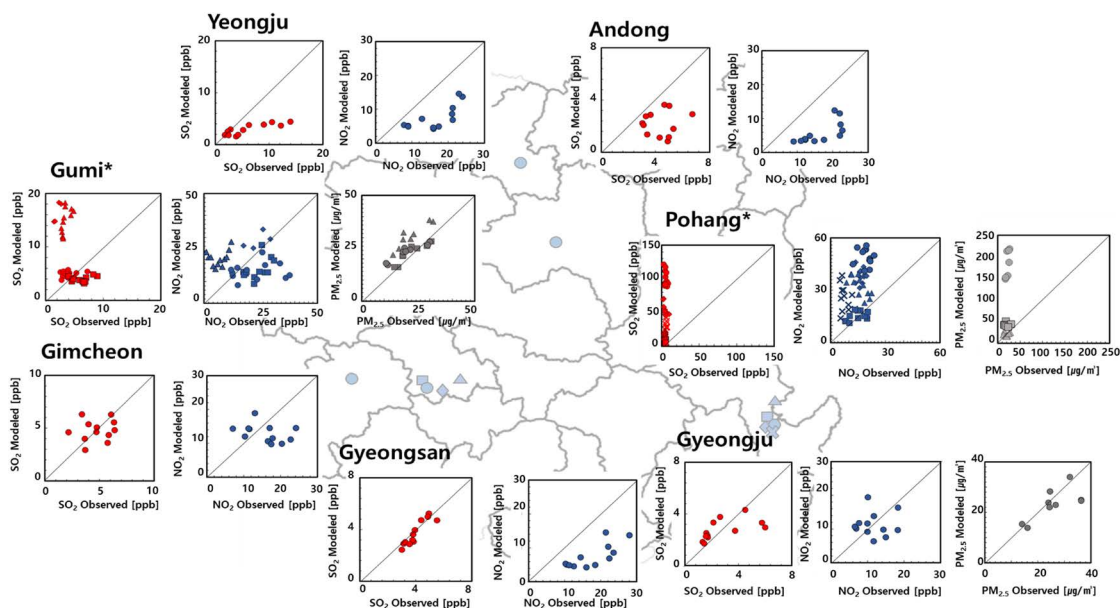


Fig. 7. Scatter plots of observed and modeled monthly mean SO_2 (red), NO_2 (blue), and $\text{PM}_{2.5}$ (gray) concentrations in local authorities of Gyeongsangbuk-do during the simulation period of 2016. Local authorities marked with '*' have more than one urban air quality monitor. Each urban air quality monitor in the same local authority has a different shape.

을 대표하기에 한계가 있다. 포항 내 측정소를 중심으로 살펴보면, $\text{PM}_{2.5}$ 와 SO_2 관측농도는 각각 $20.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 5.2 ppb인 반면, 모사농도는 $82.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 41.4 ppb로 각각 4배, 8배 과대 모사한다(그림 7). 포항을 제외할 경우 대상 기간에 대한 경북 연평균 $\text{PM}_{2.5}$, NO_2 , SO_2 관측 및 모사농도의 편차는 $-1.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 3.1 ppb, 1.6 ppb로 대폭 개선된다. 이는 대기질 모사에 이용된 대기오염물질 배출정보가 포항 지역의 실제 배출상황을 제대로 반영하지 못하는 것으로 간주할 수 있다.

2016년 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 모사농도는 특히 포항에서 과대 모사하며, 기본 모사농도의 불확도는 앞서 논의된 기여농도의 불확도로 이어질 수 있다. 포항이 3.1점에서 설명한 바와 같이 경북 배출량의 많은 부분을 차지하는 점을 고려하면, 배출목록을 기반으로 산정된 기여농도의 보정이 필요하다. 이에 식 (1)~(8)을 통해 포항 배출에 의한 기여농도를 보정한 결과를 그림 8에 제시하였다. 포항 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 자체 기여농도는 $4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보정 전에 비해 $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$

(55%) 낮아졌으며, 성분별로는 $\text{PPM}_{2.5}$ $3.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 황산염 $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 암모늄 $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 질산염 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기여농도 감소 폭이 분석되었다(그림 8(a)). 경북 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 포항의 보정 전후 기여농도는 각각 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 보정 후 기여농도는 보정 전 대비 $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (60%) 낮아졌다(그림 8(b)).

Ghim *et al.* (1993)과 Ju *et al.* (2019)에 따르면 배출 형태(면오염원과 점오염원)와 배출 높이에 따라 배출원 주변에서 오염물질 농도가 10배 이상 높을 수 있다. 2016년 포항의 비인수용무연탄 관련 SO_2 , NO_2 , $\text{PPM}_{2.5}$ 배출량은 각각 13,610 TPY, 20,570 TPY, 13,726 TPY이며, 이 중 99%, 97%, 100%가 면오염원으로 구분되어 있다. 따라서, 포항지역의 과대 모사는 포항 지역의 면오염원 형태의 배출에서 기인하였을 가능성이 높다. 이를 고려하여 추후 국가 배출목록 작성 시에는 배출량뿐만 아니라 배출형태에 대한 검토가 중요해 보인다.

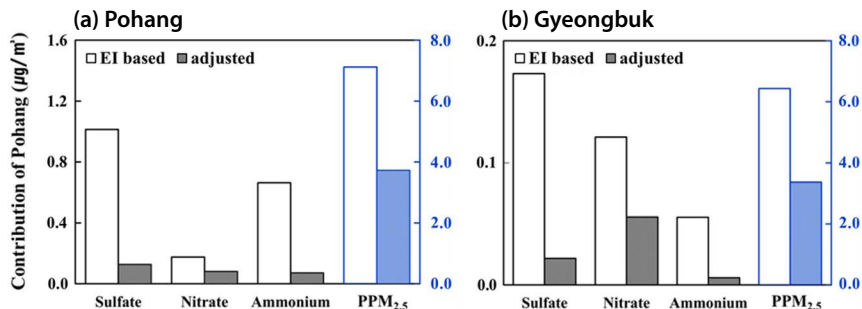


Fig. 8. Base and adjusted contribution of Pohang to the annual mean concentration of sulfate, nitrate, ammonium, and PPM_{2.5} in (a) Pohang and (b) Gyeongbuk.

4. 결 론

본 연구에서는 2016년 경북의 PM_{2.5}와 구성성분에 대하여 국내외 및 주변 광역 지자체와 도내 기초 지자체 간 기여농도를 분석하였다. 2016년 경북 PM_{2.5} 농도에 대한 국외 기여농도는 경북의 서쪽과 동쪽 지자체에서 최대 25% (2.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 차이를 보였다. 이에 반해 CAPSS 2016 기반 모사에서 국내 PM_{2.5} 기여농도는 경북 평균 8.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였으며, 3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (울진)~13.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (포항)의 범위로 기초 지자체별 차이가 최대 4배로 나타났다.

경북 전 지역 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 경북의 자체 기여농도는 3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 충남, 경기, 충북, 경남의 기여농도는 각각 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 특히, 울릉군을 제외한 경북 22개 기초 지자체 중 16개 기초 지자체에서 경북 기여농도가 국내 타 지역 기여농도보다 낮았다. 이는 경북 PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 타 광역 지자체와의 협력이 필요하다는 것을 의미한다. 동남권역 내 광역 지자체들과의 협력을 통해서는 최대 4.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 개선 가능하며, 충남과 경기 시에는 최대 5.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 개선이 가능한 것으로 분석되었다. 또한 경북의 북서쪽에 위치한 충남, 경기, 충북의 기여농도는 여름철에 비해 미세먼지 계절관리제가 시행되는 겨울철에 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높았으며, 남쪽에 위치한 경남, 울산의 기여농도는 겨울철에 비해 여름철에 0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 높게 모사되었다.

더불어 PM_{2.5}의 성분물질인 질산염, 암모늄, PPM_{2.5}, 황산염 국내 기여농도는 각 2.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 1.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. 다만, 성분별 기여농도는 기초 지자체별로 차이를 보였다. 질산염과 황산염의 경우 타 광역 지자체로부터의 유입 영향이 경북 자체 영향에 비해 3.6배, 2.7배 중요하게 모사되었기에 질산염과 황산염과 같은 2차 생성 PM_{2.5} 농도 저감을 위해서는 타 광역 지자체와의 협력이 필수적이다.

한편 경북의 PM_{2.5}, SO₂, NO₂에 대한 모사농도는 14.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 14.3 ppb, 4.3 ppb 정도 과대 모사하였으며 특히, 포항에서 PM_{2.5}, SO₂는 4배, 8배 정도 과대 모사하였다. 이는 대기질 모사에 이용된 CAPSS의 포항 지역 비민수용무연탄이 면오염원으로 산정되어 있기 때문으로 사료된다. 관측농도를 기반으로 기여농도를 보정한 결과, 포항의 PM_{2.5} 자체 기여농도는 9.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 4.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 55% 감소하였다. 배출관련 불확도는 예시와 같이 기여농도 분석에 대한 영향이 크므로, 이러한 점에서 대기질 개선 정책 수립에 앞서 배출량뿐 아니라 배출정보에 대한 불확도 개선이 중요해 보인다. 또한, 본 연구의 분석 기간인 2016년에는 경북의 대기환경측정소 수는 14개였으나, 2022년에는 45개로 3배 이상 증가하였다. 향후 더 많은 수의 측정소 자료와 PM_{2.5} 성분 관측농도 등을 활용할 경우 기초 지자체 수준에서 배출과 2차 생성, 그리고 농도 영향을 세분화하여 분석할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

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

References

- Bae, C., Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.-H., Moon, K.-J., Shin, H.-J., Song, I.H., Kim, S. (2017a) Impact of Emission Inventory Choices on PM₁₀ Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 497-514. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.497>
- Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2017b) PM_{2.5} Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (III) Application of the Modeled and Observed PM_{2.5} Ratio on the Contribution Estimation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 445-457. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.445>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020) A Multiscale Tiered Approach to Quantify Contributions: A Case Study of PM_{2.5} in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11(2), 141. <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Bae, M., Kim, E., You, S., Son, K., Kang, Y.-H., Kim, S. (2021a) 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, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2018) 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., Yoo, C., Kim, H.-C., Kim, S. (2021b) Developing Temporal Allocation Profiles for Electric Generating Utilities based on the CleanSYS Real-time Emissions, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(2), 338-354. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.338>
- Burr, M.J., Zhang, Y. (2011) Source apportionment of fine particulate matter over the Eastern U.S. Part II: source apportionment simulations using CAMx/PSAT and comparisons with CMAQ source sensitivity simulations, *Atmospheric Pollution Research*, 2(3), 318-336. <https://doi.org/10.5094/APR.2011.037>
- Ghim, Y.-S., Son, J.-H. (1993) Air Quality Impact Analysis of Point and Area Sources, *Korean Society for Atmospheric Environment*, 9(2), 168-173.
- Han, X., Cai, J., Zhang, M., Wang, X. (2021) Numerical simulation of interannual variation in transboundary contributions from Chinese emissions to PM_{2.5} mass burden in South Korea, *Atmospheric Environment*, 256, 118440. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118440>
- Hwang, I., Kim, T. (2019) Chemical Characteristics of Ambient PM_{2.5} at Industrial Complex in Gyeongbuk Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(3), 336-345. <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.3.336>
- Hwang, I., Lee, T.-J., Kim, T., Bae, G.-N. (2021) Characteristics of Air Pollutant Emissions and Distribution for Particulate Matter Concentration of Air Pollution Networks in Gyeongsangbuk-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(3), 536-551. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.536>
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) PM_{2.5} Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the Southeastern 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>
- Ju, H., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2019) Impact of Stack Parameters on Modeled PM_{2.5} Conversion Rates: A Case Study of Chungnam during the KORUS-AQ 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 593-608. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.593>
- Kang, S.M., Xie, S.-P., Deser, C., Xiang, B. (2021a) Zonal mean and shift modes of historical climate response to evolving aerosol distribution, *Science Bulletin*, 66(23), 2405-2411. <https://doi.org/10.1016/j.scib.2021.07.013>
- Kang, Y.-H., Kim, E., You, S., Bae, M., Son, K., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021b) 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., 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, 487-511. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.3.487>

487

- 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, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018a) Review of Particulate Matter Management in United States, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 588-609. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.4.588>
- Kim, E., You, S., Bae, M., Kang, Y.H., Son, K., Kim, S. (2021a) 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, 292-309. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.292>
- 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, J., Jang, Y.-K. (2014) Uncertainty Assessment for CAPSS Emission Inventory by DARS, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 30(1), 26-36. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2014.30.1.026>
- Kim, O., Bae, M., Kim, S. (2020) Evaluation on Provincial NOX 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., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017c) 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., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Moon, N. (2017d) 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., Kim, E., You, S., 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, 206-230. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2021.37.2.206>
- Kim, S., Kim, O., Kim, B.-U., Kim, H.C. (2017e) 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, S., Lee, C.-B. (2011) Estimating Influence of Local and Neighborhood Emissions on Ozone Concentrations over the Kwang-Yang Bay based on Air Quality Simulations for a 2010 June Episode, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 27(5), 504-522. <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2011.27.5.504>
- Kim, S., You, S., Kang, Y.-H., Kim, E., Bae, M., Son, K., Kim, Y., Kim, B., Kim, H. (2021c) 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>
- Korea Ministry of Environment (KMOE) (2020) Master Plan for Southeast Area Air Quality Control (in Korean).
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2020) Statistics of Residence Registration Population (in Korean).
- Kumar, P., Hama, S., Abbass, R.A., Nogueira, T., Brand, V.S., Abhijith, K.V., Andrade, M.F., Asfaw, A., Aziz, K.H., Cao, S.-J., El-Gendy, A., Khare, M., Muula, A.S., Shiva Nagendra, S.M., Ngowi, A.V., Omer, K., Olaya, Y., Salam, A. (2021) Potential health risks due to in-car aerosol exposure across ten global cities, *Environment International*, 155, 106688. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2021.106688>
- Lee, S.-H., Lee, H.W., Kim, Y.-K. (2002) Random Walk Simulation of Atmospheric Dispersion on Surface Urbanization over Complex Terrain, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 18(2), 67-83.
- Li, F., Yan, J., Wei, Y., Zeng, J., Wang, X., Chen, X., Zhang, C., Li, W., Chen, M., Lü, G. (2021a) PM_{2.5}-bound heavy metals from the major cities in China: Spatiotemporal distribution, fuzzy exposure assessment and health risk management, *Journal of Cleaner Production*, 286, 124967. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.124967>
- Li, Z., Zhu, Y., Wang, S., Xing, J., Zhao, B., Long, S., Li, M., Yang, W., Huang, R., Chen, Y. (2021b) Source contribution analysis of PM_{2.5} using Response Surface Model and Particulate Source Apportionment Technology over the PRD region, China, *Science of the Total Environment*, 818, 151757. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151757>

- Lv, L., Chen, Y., Han, Y., Cui, M., Wei, P., Zheng, M., Hu, J. (2021) High-time-resolution PM_{2.5} source apportionment based on multi-model with organic tracers in Beijing during haze episodes, *Science of the Total Environment*, 772, 144766. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144766>
- Menon, S., Unger, N., Koch, D., Francis, J., Garrett, T., Sednev, I., Shindell, D., Streets, D. (2008) Aerosol climate effects and air quality impacts from 1980 to 2030, *Environmental Research Letters*, 3, 024004. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/3/2/024004>
- Meroni, A., Pirovano, G., Gilardoni, S., Lonati, G., Colombi, C., Gianelle, V., Paglione, M., Poluzzi, V., Riva, G.M., Toppetti, A. (2017) Investigating the role of chemical and physical processes on organic aerosol modelling with CAMx in the Po Valley during a winter episode, *Atmospheric Environment*, 171, 126-142. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.10.004>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) https://airemiss.nier.go.kr/module/statistics/pollutantsStatistics.do?siteId=airemiss&id=airemiss_030400000000 (Accessed on 11, December, 2021).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea (in Korean).
- Park, R.J., Oak, Y.J., Emmons, L.K., Kim, C.-H., Pfister, G.G., Carmichael, G.R., Saide, P.E., Cho, S.-Y., Kim, S., Woo, J.-H., Crawford, J.H., Gaubert, B., Lee, H.-J., Park, S.-Y., Jo, Y.-J., Gao, M., Tang, B., Stanier, C.O., Shin, S.S., Park, H.Y., Bae, C., Kim, E. (2021) Multi-model intercomparisons of air quality simulations for the KORUS-AQ campaign, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 9(1), 00139. <https://doi.org/10.1525/elementa.2021.00139>
- Peterson, D.A., Hyer, E.J., Han, S.-O., Crawford, J.H., Park, R.J., Holz, R., Kuehn, R.E., Eloranta, E., Knote, C., Jordan, C.E., Lefer, B.L., Helmig, D., Khan, Md F. (2019) Meteorology influencing springtime air quality, pollution transport, and visibility in Korea, *Elementa: Science of the Anthropocene*, 7, 57. <https://doi.org/10.1525/elementa.395>
- Pui, D.Y.H., Chen, S.-C., Zuo, Z. (2014) PM_{2.5} in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation, *Particuology*, 13, 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2013.11.001>
- Ramboll Environ (2015) User's Guide Comprehensive Air Quality Model eXtensions Version 6.2. https://camx-wp.azurewebsites.net/Files/CAMxUsersGuide_v6.20.pdf (accessed on Mar 11, 2022).
- Son, K., Kang, Y.-H., Yoo, 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>
- Tesche, T.W., Morris, R., Tonnesen, G., McNally, D., Boylan, J., Brewer, P. (2006) CMAQ/CAMx annual 2002 performance evaluation over the eastern US, *Atmospheric Environment*, 40(26), 4906-4919. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2005.08.046>
- Trenga, C.A., Sullivan, J.H., Schildcrout, J.S., Shepherd, K.P., Shapiro, G.G., Liu, L.-J.S., Kaufman, J.D., Koenig, J.Q. (2006) Effect of Particulate Air Pollution on Lung Function in Adult and Pediatric Subjects in a Seattle Panel Study, *Chest*, 129(6), 1614-1622. <https://doi.org/10.1378/chest.129.6.1614>
- U.S. Environmental Protection Agency (U.S. EPA) (2015) Dynamic Evaluation of CMAQ Part II: Evaluation of relative response factor metrics for ozone attainment demonstrations. https://cfpub.epa.gov/si/si_public_record_report.cfm?Lab=NERL&dirEntryId=306790 (accessed on Mar 11, 2022).
- Wagstrom, K.M., Pandis, S.N., Yarwood, G., Yarwood, G., Wilson, G.M., Morris, R.E. (2008) Development and application of a computationally efficient particulate matter apportionment algorithm in a three-dimensional chemical transport model, *Atmospheric Environment*, 42(22), 5650-5659. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.03.012>
- Yabueng, N., Wiriya, W., Chantara, S. (2020) Astragaloside IV pretreatment attenuates PM_{2.5}-induced lung injury in rats: Impact on autophagy, apoptosis and inflammation, *Atmospheric Environment*, 232, 117485. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117485>
- Yarwood, G., Morris, R., Wilson, G. (2007) Particulate Matter Source Apportionment Technology (PSAT) in the CAMx Photochemical Grid Model. in *Air Pollution Modeling and Its Application*. pp. 478-492.
- 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>
- Zhao, B., Wang, S., Donahue, N.M., Jathar, S.H., Huang, X., Wu, W., Hao, J., Robinson, A.L. (2016) Quantifying the effect of organic aerosol aging and intermediate-volatility emissions on regional-scale aerosol pollution in China, *Scientific Reports*, 80(1), 28815. <https://doi.org/10.1038/srep28815>

Zhuang, B.L., Li, S., Wang, T.J., Deng, J.J., Xie, M., Yin, C.Q., Zhu, J.L.
(2013) Direct radiative forcing and climate effects of
anthropogenic aerosols with different mixing states
over China, *Atmospheric Environment*, 79, 349-361.
<https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.07.004>

Authors Information

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

손규원 (아주대학교 환경연구소 연구원)
(kyuwon0916@ajou.ac.kr)

유승희 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
(annabelle58@ajou.ac.kr)

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

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

김은혜 (아주대학교 환경연구소 연구원)
(kiesloveeh@ajou.ac.kr)

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

Supplementary Materials

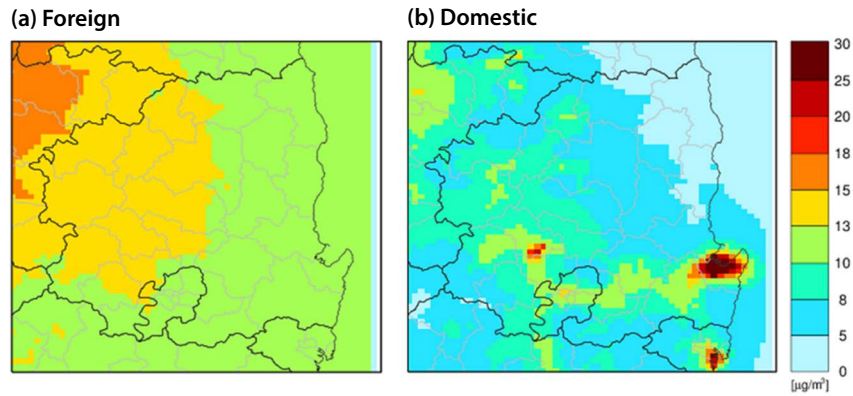


Fig. S1. Contribution of (a) foreign and (b) domestic emissions to the annual mean $PM_{2.5}$ concentration over Gyeongbuk in 2016.

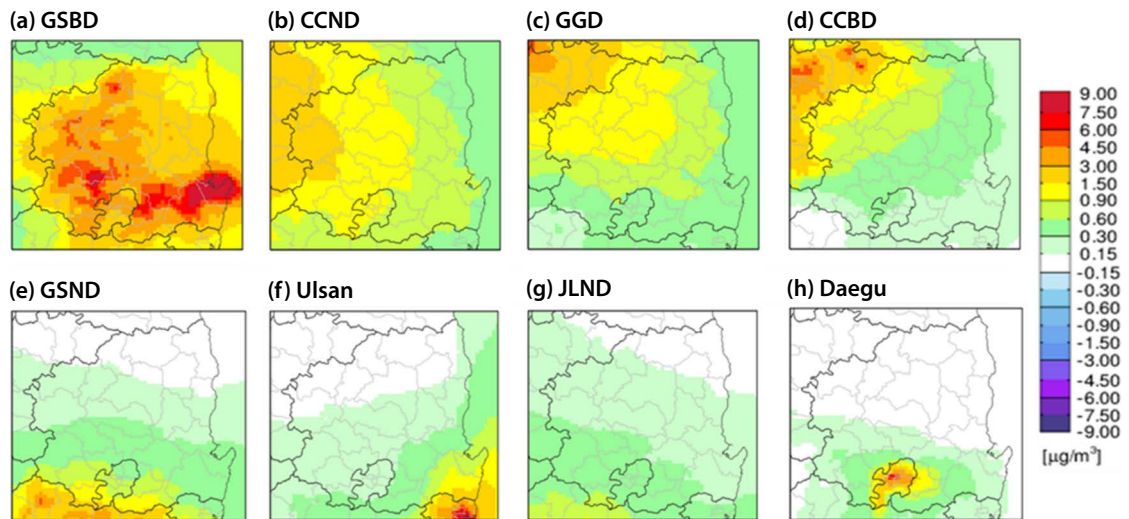


Fig. S2. Contributions of (a) Gyeongsangbuk-do (GSBD), (b) Chungcheongnam-do (CCND), (c) Gyeonggi-do (GGD), (d) Chungcheongbuk-do (CCBD), (e) Gyeongsangnam-do (GSND), (f) Ulsan, (g) Jeollanam-do (JLND), and (h) Daegu to $PM_{2.5}$ concentration over Gyeongbuk in 2016.

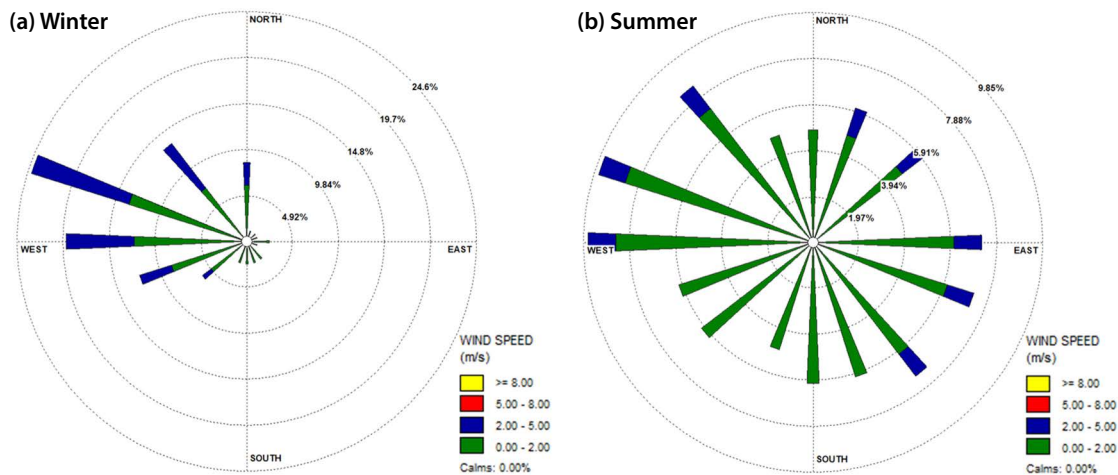


Fig. S3. The wind roses in (a) Winter, and (b) Summer at meteorological station over Gyeongbuk in 2016.

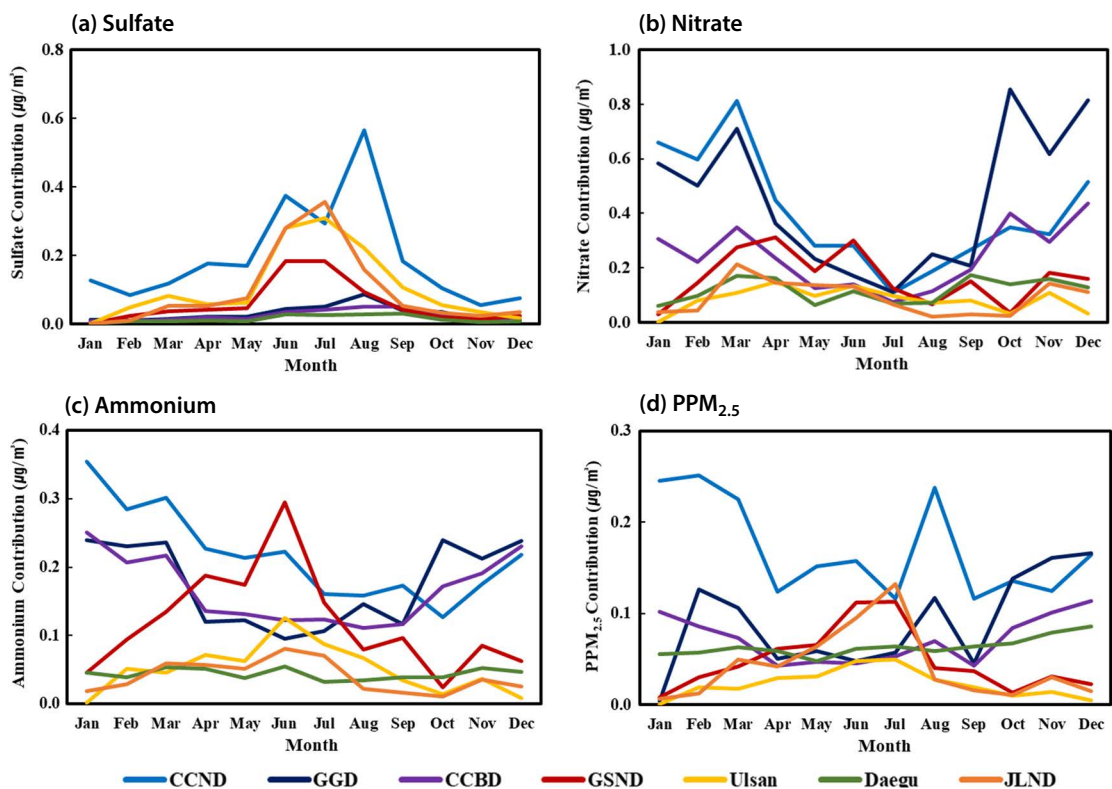


Fig. S4. Contributions of GGD, CCND, CCBD, Ulsan, GSND, Daegu, and JLND to the monthly mean concentration of (a) sulfate, (b) nitrate, (c) ammonium, and (d) PPM_{2.5} over Gyeongbuk in 2016.

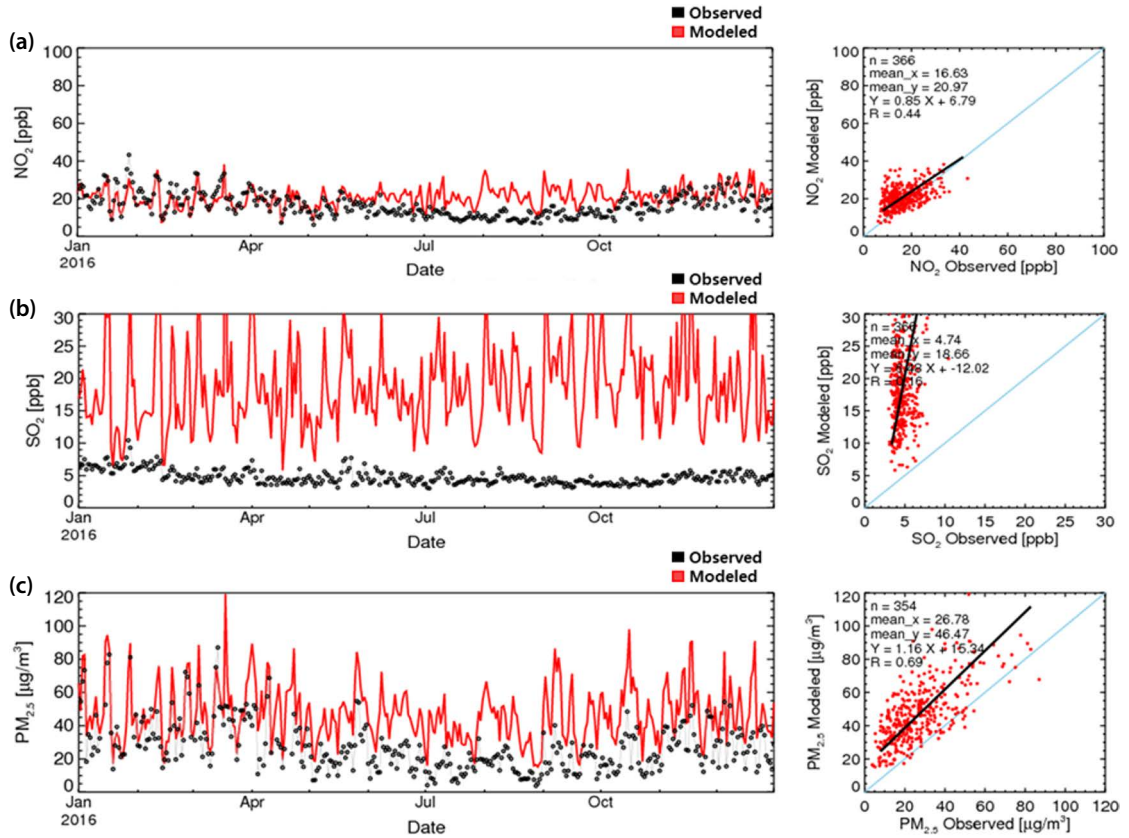


Fig. S5. Time series and scatters of the simulated and the observed daily mean concentration of (a) NO_2 , (b) SO_2 , and (c) $\text{PM}_{2.5}$ at urban air quality monitoring sites in Gyeongbuk during the simulation period of 2016. Red line and black dots represent the simulated and observed values in the time series, respectively.