



논문

# 2016년 국가배출목록 기반 지자체별 초미세먼지 기여도 분석: (I) 경기도

## Municipality-Level Source Apportionment of PM<sub>2.5</sub> Concentrations based on the CAPSS 2016: (I) Gyeonggi Province

유승희, 배창한<sup>1)</sup>, 김형천<sup>1)</sup>, 유철<sup>1)</sup>, 김순태\*

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

Seunghee You, Changhan Bae<sup>1)</sup>, Hyungcheon Kim<sup>1)</sup>, Chul Yoo<sup>1)</sup>, Soontae Kim\*

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

<sup>1)</sup>Emission Inventory Management Team, National Center for Fine Dust Information, Cheongju, Republic of Korea

접수일 2020년 10월 21일  
수정일 2020년 12월 7일  
채택일 2020년 12월 9일

Received 21 October 2020  
Revised 7 December 2020  
Accepted 9 December 2020

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

**Abstract** Emissions of SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub>, volatile organic compounds and primary PM<sub>2.5</sub> released from thirty-one local authorities in Gyeonggi and its adjacent provinces were tagged to estimate the inter- and intra-provincial contributions as well as the self-contributions to the annual mean PM<sub>2.5</sub> concentrations for 2016. The CAMx-PSAT simulation with the Clean Air Policy Support System 2016 at horizontal grid resolutions of 27 km, 9 km, and 3 km was applied. During the two-way nesting simulation, coarser modeling domains were utilized to quantify the contributions of emissions from the upwind foreign countries (foreign contribution) to PM<sub>2.5</sub> concentrations in Gyeonggi's local authorities. Results show that the foreign contributions to PM<sub>2.5</sub> concentrations of local authorities in Gyeonggi during 2016 ranged from 50~76%, exhibiting higher foreign contributions to local authorities in northwestern Gyeonggi due to their geographical locations vulnerable to the long-range transport of air pollutants and relatively low self-contributions (contributions of local authorities' emissions). Self-contributions to PM<sub>2.5</sub> concentrations for the local authorities varied in the range of 2~12% (mean 6%). In comparison, the intra-contribution (contributions of emissions from the rest of Gyeonggi) ranged from 8~20% (mean 13%) during the year-long simulation period. On the other hand, the total inter-provincial contributions (contributions of emissions from neighboring provinces such as Seoul, Incheon, Chungcheong, and Gangwon) amounted to Gyeonggi's PM<sub>2.5</sub> by 17% on average. However, for a specified local authority in Gyeonggi, the inter-provincial contributions to the PM<sub>2.5</sub> concentrations were as high as 27%, possibly due to its proximity to high emission areas outside the province. In the meantime, the modeled contributions of Gyeonggi's emissions to the PM<sub>2.5</sub> concentrations of its surrounding provinces were 4~11%. It implies mitigations on the inter- and intra-provincial contributions are important to improve PM<sub>2.5</sub> concentrations in Gyeonggi's local authorities. It also represents that emission control plans across the provinces are inevitable to improve the local PM<sub>2.5</sub> concentrations in and around Gyeonggi.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>, Local authorities in Gyeonggi, Foreign contribution, Self-contribution, Inter- and intra-provincial contributions

### 1. 서론

최근 많은 관심이 모아지고 있는 고농도 PM<sub>2.5</sub> 발

생은 국민들의 불안감 고조, 국내외 배출 요인 분석과 저감 대책 마련 등 시급히 해결해야 할 사회적 현안이 되고 있다(Jung *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019; Yu

et al., 2019; Kim et al., 2018b; Jang et al., 2014). 이러한 고농도 PM<sub>2.5</sub> 문제를 해결하기 위해 정부에서는 ‘미세먼지 관리 종합대책’ (MOE, 2017), ‘제2차 수도권 대기환경관리 기본계획’ (MOE, 2018) 및 ‘미세먼지 계절관리제’ (MOE, 2019) 등 다양한 대책을 수립 및 시행 중에 있다.

국내에서 고농도 PM<sub>2.5</sub> 발생 시에는 국외로부터 장거리 이동 영향과 함께 주변 지역 및 대상 지역 자체 배출 영향이 더해진다 (Ju et al., 2018a). 이러한 국내 지역별 고농도 PM<sub>2.5</sub> 발생의 원인 규명을 위해 많은 선행 연구가 진행되고 있으나 (Ghim et al., 2019; Kim et al., 2017c; Kim et al., 2017e, f) 주로 전국 및 시도 등 광역 지자체 수준에서의 분석이 이루어졌으며, 기초 지자체 수준에서의 배출 기여도 분석은 거의 수행되지 못하였다 (Bae et al., 2020). 국내의 PM<sub>2.5</sub> 관련 대기오염물질의 배출 밀도가 높으며, 오염원이 다양하고 주요 오염원의 공간적 변화가 심하다. 더욱이 국내의 높은 인구밀도를 고려하면, 광역 지자체 수준의 대기질 관리와는 차별적인 높은 공간 해상도에서의 원인 분석이 필요하다.

일례로 경기도의 경우, 지리적 여건에서 경기도 남쪽에 위치하는 화성시 및 평택시의 경우 산업시설이 발달되어 있으며, 거리적으로 가까운 충남 지역의 대형 점 오염원과 산업단지의 영향에 쉽게 노출될 수 있다. 이와는 다르게 경기도 북부는 주로 농업 지역이 많으며, 다양한 배출원이 혼재되어 있다. 또한, 중국은 물론 북한 등 국외 배출 영향이 민감하게 작용할 수 있다 (Bae et al., 2020, 2018). 수원, 안양 등 경기도 중부에 위치하는 도시들의 경우 인구 수가 높아 자체 배출 영향도 다른 도시에 비해 높고, 인접한 서울시, 인천시 등에서 배출된 오염물질의 영향 또한 작지 않을 것으로 예상된다. 기존 연구에서는 이러한 경기도의 배출과 지역 현황을 반영하여 기초 지자체 수준의 PM<sub>2.5</sub> 관련 배출 조사의 필요성을 언급하였으나 (Kim et al., 2017b), 아직까지 경기도 기초 지자체 간 상호 배출 영향을 해당 지자체와 주변 지역에 대해 분석한 연구는 드물다.

본 연구에서는 광화학 모사를 이용하여 국외, 경기도 타 시군, 그리고 인접한 광역 지자체로부터 배출되는 대기오염물질의 기여도를 경기도 기초 지자체 별로 살펴보았다. 또한, 경기도 배출량에 의한 서울시, 인천시, 충남 (대전시, 세종시 포함), 충북 및 강원도 등 인접 지역에 대한 PM<sub>2.5</sub> 기여도를 함께 분석하였다. 이러한 분석은 기초 및 광역 지자체 수준에서의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 상호 기여도를 제시하여 해당 지자체에 대한 효과적인 대기질 개선 대책 마련에 일조하는 한편, 권역 관리 개념에서 광역 지자체 간 상호 협력의 필요성 등을 제시할 것으로 기대된다.

## 2. 연구 방법

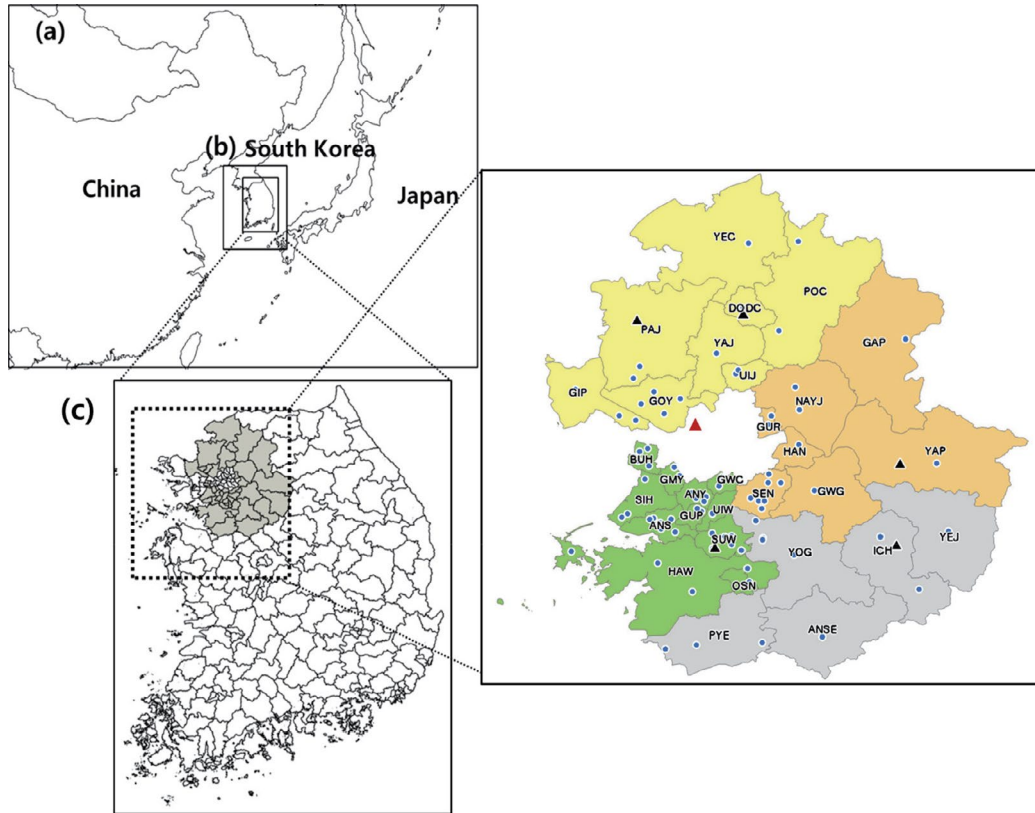
### 2.1 지표관측자료

기상 모사의 재현성을 평가하고자 기상관측자료 (ASOS, Automated Surface Observing System)를 이용하여 2 m 기온과 10 m 풍속에 대해 비교하였다. 이때, 기상 관측소는 경기도 내 위치하는 문산 (Munsan), 동두천 (Dongducheon), 수원 (Suwon), 양평 (Yangpyeong), 이천 (Ichen) 5개 지점을 이용하였다.

대기질 모사 결과 및 질소산화물 (NO<sub>2</sub>), 황산화물 (SO<sub>2</sub>)의 농도 비교 및 배출현황을 파악하기 위해 경기도에 위치한 73개의 도시대기측정망 자료를 이용하였다 (<http://www.airkorea.or.kr>). PM<sub>2.5</sub> 구성성분 농도 (e.g. EC, OC, Sulfate, Nitrate, Ammonium 등) 평가를 위해서는 서울시 불광동 집중측정소 자료를 이용하였다. 기상관측 지점과, 도시대기측정망 및 해당 집중측정소의 위치는 그림 1에 제시하였다.

### 2.2 대기질 모사 수행 방법

대기질 모사는 배출량-농도에 대한 정량적인 관계를 도출할 수 있어 대기오염에 대한 이해 증진과 대기질 개선 효과 분석에 있어 필수적인 도구이다 (Kim et al., 2018a; Yoo et al., 2011). 모사영역은 27 km (174×128 grids), 9 km (71×89 grids), 그리고 3 km



**Fig. 1.** Modeling domains at (a) 27-km, (b) 9-km and (c) 3-km horizontal grid resolutions. The dotted box indicates the locations of gray-colored thirty-one local authorities in Gyeonggi. The enlarged Gyeonggi region is divided into four sub-regions to northern (yellow region), central (green region), eastern (orange region), and southern (gray region). The blue circles and black triangles indicate the air pollutant monitoring sites and ASOS sites, respectively. The red triangle represents the Bulgwang supersite in Seoul.

(119 × 173 grids) 수평 해상도로 구성하였다(그림 1). 27 km 모사영역에서는 동북아 영역으로 중국 및 일본 등 국외 지역에서 배출되는 대기오염물질의 기여도를 분석할 수 있다. 9 km와 3 km 수평해상도의 모사에서는 양방향(two-way) 등지 격자화를 적용하여 경기도 자체 및 국내 타 지역 배출에 의한 기여도를 산정할 수 있다. 특히, 3 km 모사영역은 국내의 기초 지자체별 배출량에 대한 기여도를 분석하기 위해 설정하였다. 본 연구에서는 집중분석 대상지역을 경기도로 설정하였으며, 경기도 지역의 31개 지역을 시군으로 세분화하여 그림 1 및 부록 표 1에 나타냈다.

기상 입력자료는 Weather Research and Forecast-

**Table 1.** Summary of the WRF configuration in this study.

Input/Physics	Selected option
Microphysics	WSM6 (Hong and Lim, 2006)
Long-wave radiation	RRTM (Mlawer <i>et al.</i> , 1997)
Short-wave radiation	Goddard (Chou and Suarez, 1994)
Cumulus scheme	Kain-Fritsch (Kain, 2014) for 27- and 9-km domains
Land-surface model	NOAH (Chen and Dudhia, 2001)
Boundary layer	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)

ing (WRF) version 3.9.1를 이용하였으며, WRF 모델의 초기/경계조건은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)에서 제공하는 1.0° × 1.0° 격자, 6시간 간격의 FNL Operational model Global

tropospheric analyses 자료를 사용하였다(표 1 참조).

인위적 배출량 처리는 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE) 모델 version 3.1을 이용하였으며, SMOKE 모델에 입력된 아시아지역 배출목록은 Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment 2015 (CREATE; Woo *et al.*, 2020), 국내에 대해서는 Clean Air Policy Support System 2016 (NIER, 2019)을 이용하였다. 자연 배출량은 식생정보를 입력한 Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN; Guenther *et al.*, 2006) 2.04를 이용하여 산정하였다.

본 연구에 사용된 Comprehensive Air Quality Model with eXtension (CAMx) 모델은 version 6.1이며, 연직층은 22개 층으로 구성하였다. CAMx 모델의 gas-phase chemistry는 Statewide Air Pollution Research Center, Version 99 (SAPRC99; Carter, 2000)을 이용, 그 외 CAMx 모사에 설정된 옵션은 표 2에 제시하였다. 대기질 모사는 2015년 12월 16일부터 2016년 12월 31일까지로 16일간의 spin-up 기간을 제외하고, 2016년 전 기간을 분석 대상으로 이용하였다.

### 2.3 기여도 분석 방법

3차원 광화학 모델을 이용한 기여도 분석 방법은 크게 민감도 방법(sensitivity)과 표식자 방법(tagging)으로 구분할 수 있다. 민감도 방법은 배출량 변화 대비 농도 변화(민감도)를 토대로 기여도를 추정하는 방법으로, BFM (Brute Force Method)이 대표적

이다. BFM은 기여도 분석 대상이 되는 배출원 또는 배출 지역의 배출량을 변화시켜 대기질 모사를 수행하고, 기본 모사와 농도 차이를 통해 기여도를 계산한다. 이 방법의 경우 적용이 쉽고, 배출 변화에 따른 농도 변화를 가장 직접적으로 추정할 수 있는 장점이 있어 다양한 연구에 이용되고 있다(Kim *et al.*, 2017a, d; Itahashi *et al.*, 2012). 반면, 배출량과 농도 관계의 비선형성이 큰 경우 배출량 변화 비율에 따라 도출된 기여도에 차이가 발생하며, 분석 대상만큼 반복적인 모사가 필요하다는 단점이 있다.

표식자 방법은 3차원 광화학 수송 모델 내에서 기여도 분석 대상 배출량의 이동 및 변환 과정을 추적한다. 대표적으로 Particulate Source Apportionment Technology (PSAT; Yarwood *et al.*, 2007)이 있으며, 복수의 배출원 또는 배출지역에서 배출되는 PM<sub>2.5</sub>의 다양한 전구물질(NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub>, VOC 등) 기여도를 한 번의 모사로 추정할 수 있다(Koo *et al.*, 2015; Koo *et al.*, 2009).

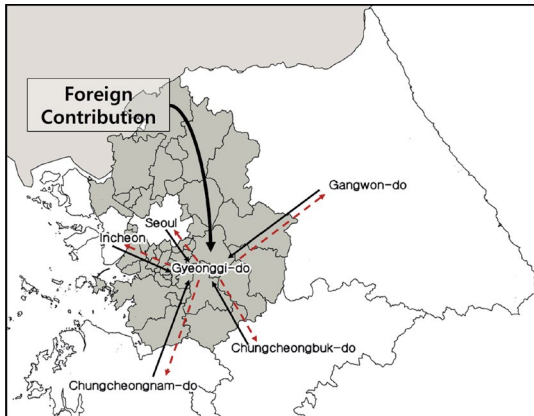
본 연구에서는 PSAT을 적용하여 경기도를 중심으로 국외 및 인접 시도 배출량에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도를 분석하는 동시에, 경기도 기초 지자체별 기여도 분석을 위해 다음과 같이 접근하였다. 우선 1) 중국, 일본 등 국외 지역의 배출량에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도를 '국외 기여도 (foreign contribution)'로 설정하였다. 2) 경기도와 접하고 있는 서울시, 인천시, 충남, 충북, 강원도의 배출 기여도를 '인접시도 기여도 (intra-provincial contribution)'로 나누어 살펴보았다. 3) 경기도 기초 지자체에서 배출한 자체 배출량이 해당 지역의 PM<sub>2.5</sub>

**Table 2.** Summary of the CAMx configuration adopted in this study.

Physics/Chemistry	Selected option
Horizontal advection	Piece-wise Parabolic Method (Colella and Woodward, 1984)
Gas-phase chemical mechanism	SAPRC99
Aerosol chemistry	RADM-AQ (Chang <i>et al.</i> , 2016) ISORROPIA (Nenes <i>et al.</i> , 1998) SOAP (Strader <i>et al.</i> , 1999) Static 2-mode (Coarse-Fine; CF Scheme) for size distribution
Dry deposition model	Resistance model (Zhang <i>et al.</i> , 2001, 2003)
Wet deposition	Scavenging model (Seinfeld and Pandis, 2016)
PBL scheme	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)

농도에 미치는 기여도를 ‘자체 기여도 (self-contribution)’로 정하였다. 4) 마지막으로 경기도에서 배출되는 대기오염물질 중 자체 배출을 제외한 기여도를

‘경기도 타 지역 기여도 (intra-provincial contribution)’로 구분하였다. 그림 2는 앞서 설명된 네 가지 기여도 분석에 대한 공간적 설정을 보인다.



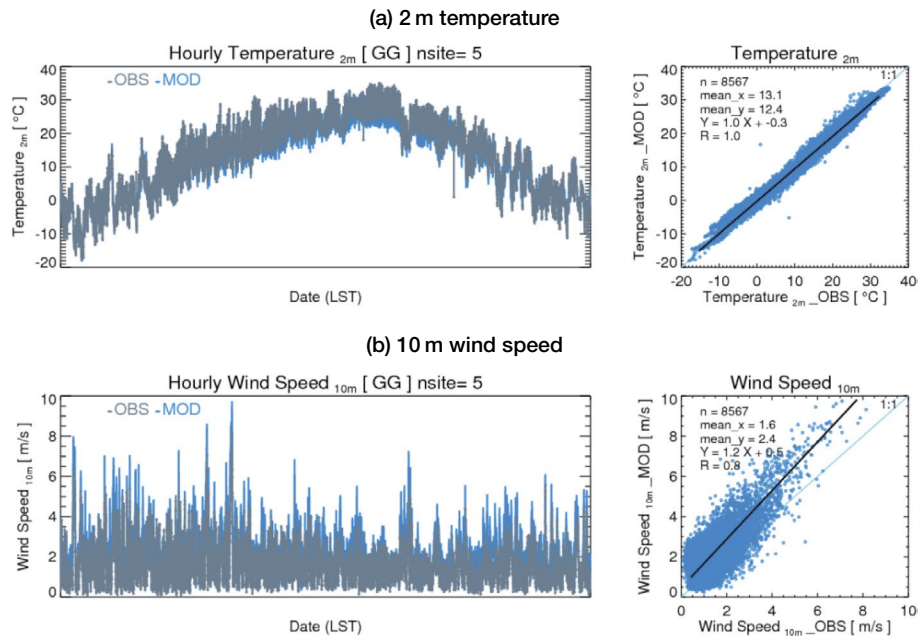
**Fig. 2.** PM<sub>2.5</sub> source apportionment is conducted in this study. Thick and thin solid lines represent the foreign and inter-provincial contributions, respectively. The dotted red line indicates the contributions of Gyeonggi's emissions to neighboring provinces. Gray-colored polygons show 31 local authorities in Gyeonggi.

### 3. 연구 결과

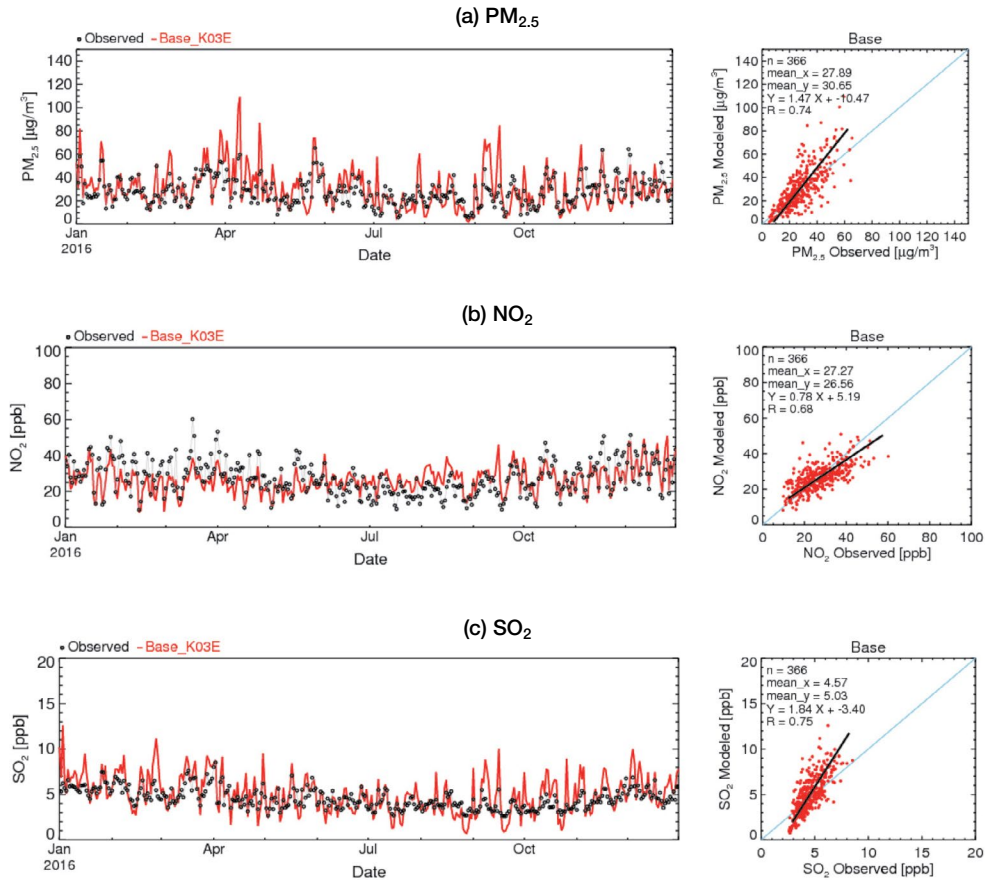
#### 3.1 기본모사 평가

모사 기간 동안 경기도에 위치하는 5개 기상 측정소에서 관측된 2 m 기온은 13.1°C이었으며, 이에 대한 모사 기온은 12.8°C이었다. 5개 지점의 1시간 평균 관측 기온과 모사 기온의 상관관계수(R)은 1.0으로 상관성을 보였다(그림 3(a) 참조). 5개 관측소에서 대상 기간 평균 10 m 풍속은 1.6 m/s이었으며, 해당 모사 풍속은 2.4 m/s로 0.8 m/s 과대 모사하였다(참조 그림 3(b)). 기상 모사 결과에서의 풍속의 과대 모사는 지역별 배출량에 대한 PM<sub>2.5</sub> 기여도를 과대 또는 과소 평가를 유발할 수 있다.

대상기간인 2016년 한 해 동안 경기도 73개 관측소



**Fig. 3.** Comparison between the mean ASOS measurement data and meteorological simulation in Gyeonggi for hourly (a) 2-m temperature and (b) 10-m wind speed.

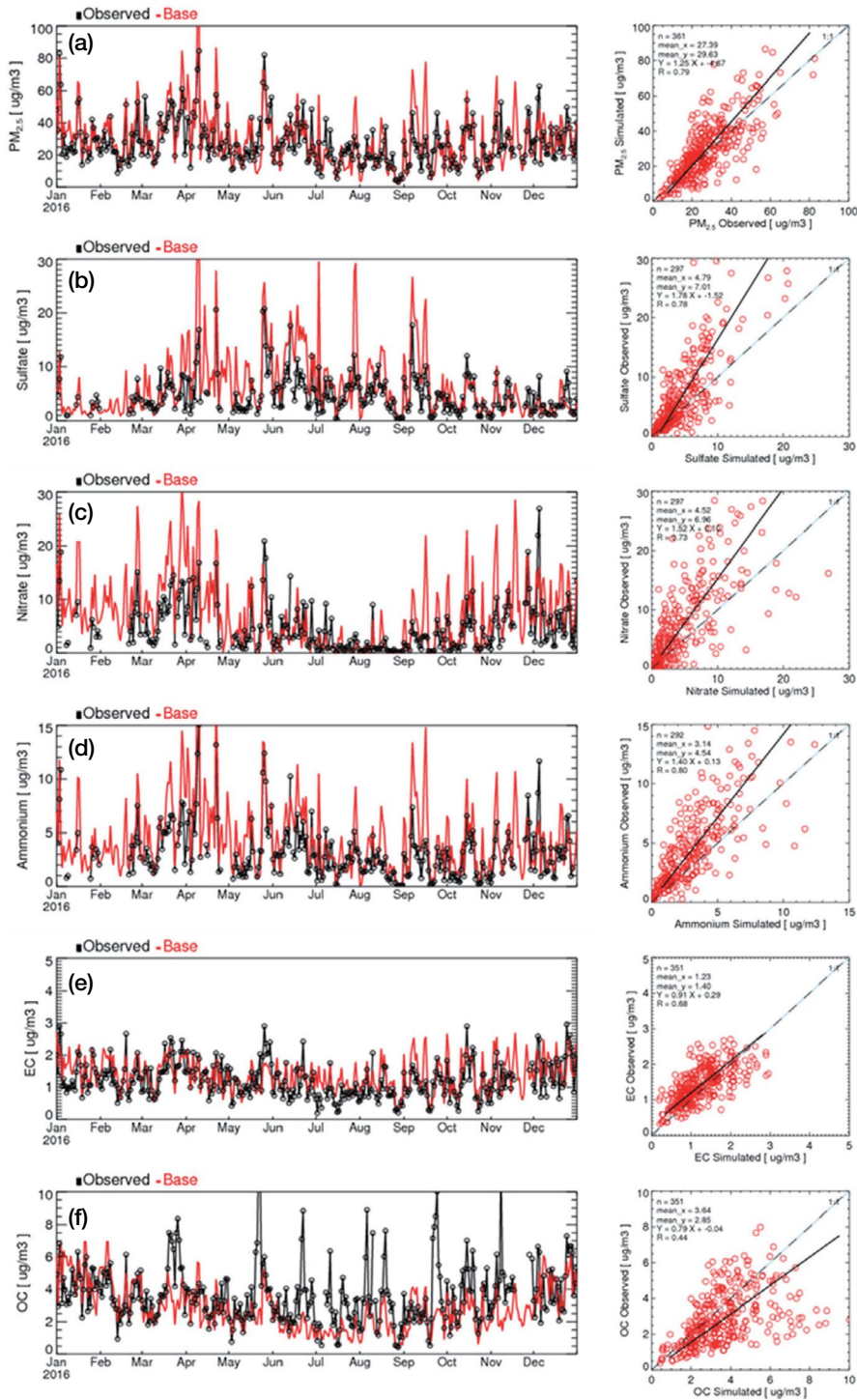


**Fig. 4.** Comparisons of the observed and simulated daily mean concentrations of (a)  $PM_{2.5}$ , (b)  $NO_2$ , and (c)  $SO_2$  at 76 urban air quality monitoring stations in Gyeonggi for 2016. The black dots and red lines represent the observed and simulated daily mean concentrations, respectively.

의 평균  $PM_{2.5}$  농도는  $27.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 모사 농도  $30.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약  $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$  과대 모사하였다. 다만, 본 연구에서 이용된 3 km 모사의 경우 기존 모사 (i.e., Bae *et al.*, 2020; Bae *et al.*, 2017)에 비해 고해상도의 수평 격자를 이용하고 있으나, 산업단지나 대도시 중심 지역 등 배출이 밀집되어 국지적인 고농도가 발생할 수 있는 지역에서는 과소 평가 가능성이 존재한다.  $NO_2$  관측 평균 농도는 27.3 ppb, 모사 농도 26.6 ppb로 경기도에 대한 연평균적인  $NO_2$  모사 농도는 관측 농도와 큰 차이를 보이지 않았다. 이를 계절별로 세분하여 살펴보면,  $NO_2$  농도의 겨울철에는 2.9 ppb 과대 모사하였으며, 여름철에는 3.1 ppb 과소 모

의를 보였다. 평균  $SO_2$  관측 농도는 4.6 ppb, 모사 농도 5.0 ppb로 0.4 ppb가량 차이를 보였다.  $SO_2$ 의 월별 농도 변화를 유추해보면, 관측과 모사 농도가 유사한 계절 변화를 보이는 것으로 판단되나, 일별 농도에서 편차가 상대적으로 커지는 날들이 관찰된다(그림 4 참조).

경기도의 경우  $PM_{2.5}$  구성 성분을 상시 측정하는 관측소가 경기도 내에는 존재하지 않아, 본 연구에서는 서울시 불광동에 위치하는 수도권 집중측정소 관측자료를 이용하여  $PM_{2.5}$  및 구성 성분 농도에 대한 모사 재현성 평가를 수행하였다. 경기도 내에서도 지역별로  $PM_{2.5}$  중량 및 구성 성분은 시공간적인 차이

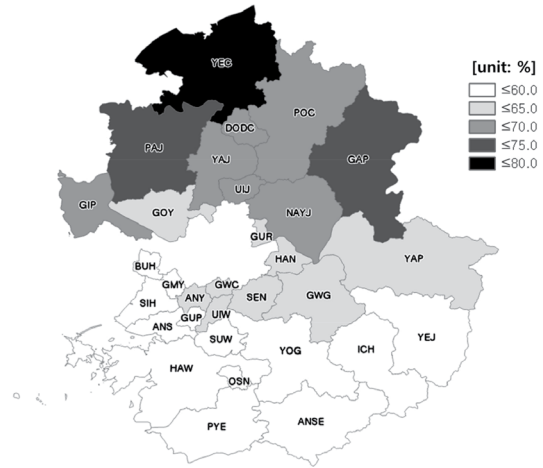


**Fig. 5.** Comparisons of the observed and simulated daily mean concentrations of (a) PM<sub>2.5</sub>, (b) Sulfate, (c) Nitrate, (d) Ammonium, (e) EC, and (f) OC at the Bulgwang super site during the simulation period of 2016.

를 보일 수 있으므로 향후 이에 대한 고려가 필요하다. PM<sub>2.5</sub>의 평균 관측 농도는 모사 농도가 2.4 µg/m<sup>3</sup> 가장 과대 모의하였으며(관측 농도 27.3 µg/m<sup>3</sup>, 모사 농도 29.7 µg/m<sup>3</sup>), 모사 농도의 일변화는 관측 농도와 유사하다(그림 5(a)). 황산염(Sulfate) 농도는 여름철에는 관측 농도에 비해 모사 농도가 약 5 µg/m<sup>3</sup> 과대 모의하며, 겨울철에는 관측과 모사 농도의 유사한 범위를 보인다(그림 5(b)). 그림 5(c)의 질산염(Nitrate) 농도는 여름철에는 과소 모의, 겨울철에는 과대 모의한다. 암모늄(Ammonium)의 평균 관측 농도는 3.6 µg/m<sup>3</sup>, 모사 농도는 4.7 µg/m<sup>3</sup>로 상관계수는 0.8이다(그림 5(d)). 그림 5(e)의 EC 모사 농도는 평균 0.2 µg/m<sup>3</sup> 과소 모의하며(관측 농도 1.4 µg/m<sup>3</sup>, 모사 농도 1.2 µg/m<sup>3</sup>), OC의 관측 농도 평균은 3.6 µg/m<sup>3</sup>, 모사 농도 평균은 2.9 µg/m<sup>3</sup>로 0.7 µg/m<sup>3</sup> 과소 모의하며, 특히 여름철에 과소 모의가 크다(그림 5(f)).

### 3.2 국외 및 인접시도 기여도

국내에서 고농도 PM<sub>2.5</sub> 농도 발생 시에는 자체 배출영향 뿐만 아니라 국외에서 배출된 대기오염물질의 장거리 이동에서도 영향을 받는다(Bae *et al.*, 2019; Ju *et al.*, 2018a). 그림 6은 중국과 북한 등 국외에서 장거리 이동된 대기오염물질이 경기도 31개 기초 지자체의 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 국외 기여도를 보인다. 모사 기간에 대한 기초 지자체별 국외 기여도는 50%~76%로 나타났다(31개 지역 평균: 62%). 선행연구에 따르면 국외에서 배출된 대기오염물질이 국내 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 영향은 평균 40%~65%이며, 고농도 PM<sub>2.5</sub>가 발생한 사례기간에는 30%~70% 이상 전국 및 수도권 지역 PM<sub>2.5</sub> 농도에 영향을 미치는 것으로 보고되었다(Choi *et al.*, 2019; Yim *et al.*, 2019; Jeong *et al.*, 2011). 모사 기간과 방법 등에 따라 산정되는 국외 배출 기여도는 달라질 수 있으나(Kim *et al.*, 2017a), 경기도에 대한 국외 배출 기여도는 다른 시도에 비해 높다고 할 수 있다. 이러한 원인으로는 중국이나 북한 등 국외 지역과 경기도가 가장 가까우며, 고농도가 발생하는 겨울철과 봄철 동안 북서풍의 영향을 가장 직접적으로 받는 점 등을 들 수 있다. 또



**Fig. 6.** Contributions of foreign emissions to annual mean PM<sub>2.5</sub> concentrations in local authorities in Gyeonggi during the simulation period of 2016.

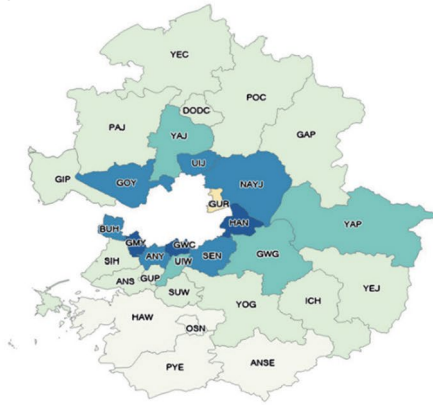
한, 휴전선과 인접한 기초 지자체는 자체 배출이 다른 지자체에 비해 상대적으로 낮은 점도 고려될 수 있다. 경기도 내 다른 기초 지자체에 비해 국외 기여도가 높은 지역은 경기도 북쪽과 서쪽에 위치한 연천군(76%), 가평군(72%), 파주시(70%)로 나타났으며, 경기도의 기초 지자체 간 국외 기여도는 남북 방향으로 최대 26%의 차이를 보였다.

국외 기여도 이외에도 경기도와 인접한 지역에서의 대기오염물질 배출은 경기도 대기질에 영향을 미칠 수 있다. 경기도는 행정구역상 서울시를 감싸고 있으며, 인천시와 강원도, 충남, 충북과 인접한다. 그림 7은 서울시, 인천시, 충남, 그리고 충북 배출량이 경기도 31개 기초 지자체 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 인접 시도 기여도를 보인다.

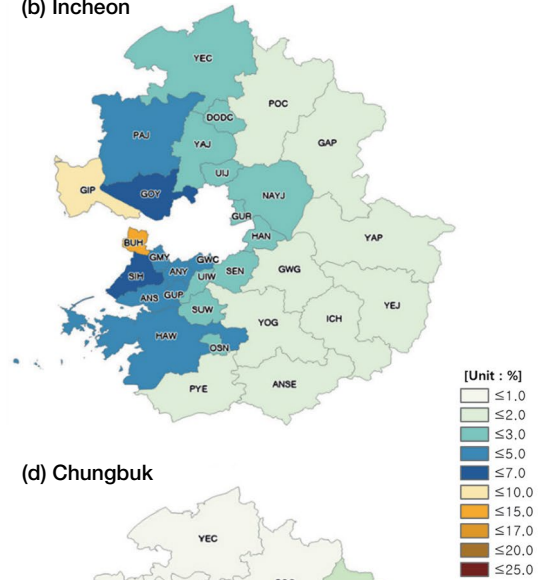
서울시에서 배출된 대기오염물질이 경기도 전역 PM<sub>2.5</sub> 평균 농도에 대한 기여도는 평균 2.8%이었으며(그림 7(a)), 기초 지자체별로는 0.7%~10.0%까지의 기여도를 보인다. 특히, 서울시와 가까운 기초 지자체에서는 5% 이상의 기여도를 보이며, 구리시에서 10.0%의 가장 높은 기여도를 보인다. 인천시 배출량이 경기도 기초 지자체의 PM<sub>2.5</sub>에 미치는 기여도는 1.5%~10.1%의 범위(평균 기여도: 3.2%)로 서울시와



(a) Seoul



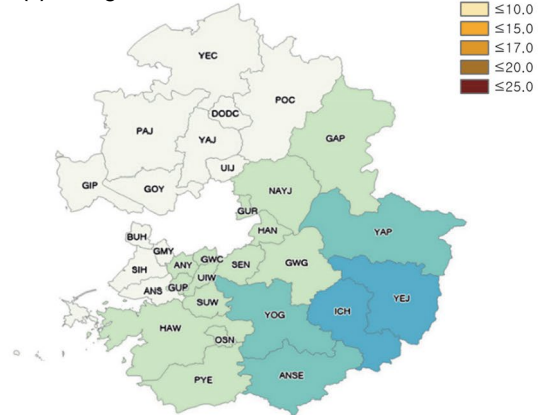
(b) Incheon



(c) Chungnam



(d) Chungbuk



**Fig. 7.** Inter-provincial contributions of (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Chungnam, and (d) Chungbuk emissions to annual mean  $PM_{2.5}$  concentrations in local authorities in Gyeonggi for 2016.

비슷한 기여도 범위를 보인다(그림 7(b)). 인천시 배출량의 영향을 많이 받는 지자체는 부천시(10.1%), 김포시(8.6%), 시흥시(6.6%) 순으로 나타난다.

그림 7(c)에서 경기도 남쪽에 위치한 충남 배출량이 경기도 기초 지자체의  $PM_{2.5}$  농도에 대한 기여도는 4.0%~22.6%로 충남과 인접지역인 평택시에는 22.6%의 높은 기여도를, 화성시에서 17.3%의 기여도를 보인다. 이는 충남과 인접한 이들 기초 지자체의 지리적 위치와, 해륙풍 순환 등의 영향으로 충남에서 배출된 대기오염물질이 이들 지역으로 이동되기 때문으로 판단된다(Ju *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019).

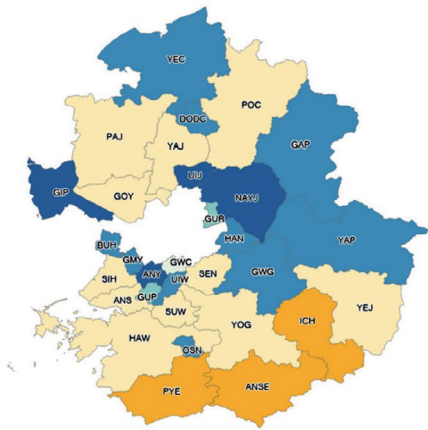
그림 7(d) 충북 배출량이 경기도 기초 지자체에 미

치는 기여도는 0.6%~3.5%로 나타났으며, 평균 기여도는 1.4%이다. 충북과 인접한 이천시와 여주시에서는 3.4%, 3.5%의 기여도를 보이며, 가장 거리가 먼 연천군에서는 0.6%, 고양시 0.7%의 기여도를 보인다. 본문에 포함하지는 않았으나, 경기도 전 지역의  $PM_{2.5}$  농도에 대한 강원도 배출 기여도는 1% 미만으로, 경기도 기초 지자체 중에서는 양평군에서 2.7%로 가장 높았다.

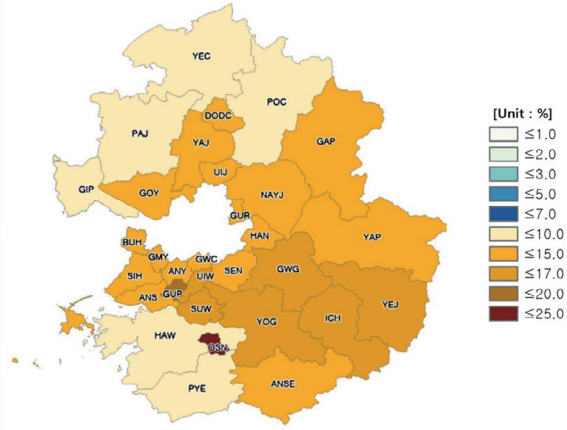
### 3.3 경기도 기초 지자체별 자체 및 타 지역 기여도

$PM_{2.5}$  농도 개선을 위해서는 국외 및 인접시도의

(a) Self-Contribution



(b) Rest of Gyeonggi



**Fig. 8.** Spatial plots of (a) self-contributions and (b) intra-contributions from the rest of Gyeonggi to annual mean  $PM_{2.5}$  concentrations in local authorities in the province during the simulation period of 2016.

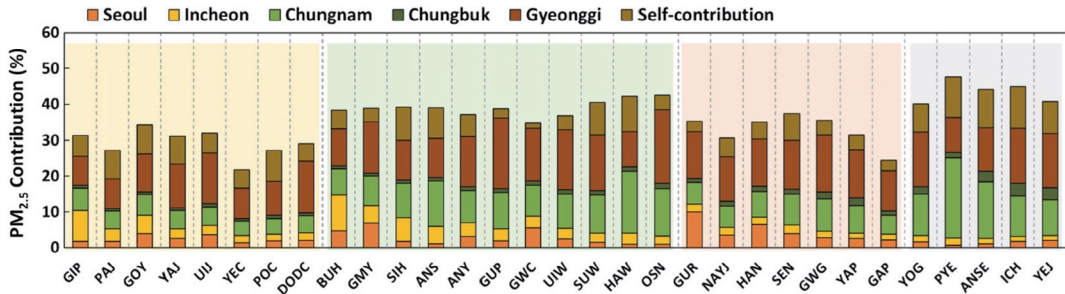
기여도 외에 자체 기여도 분석을 통한  $PM_{2.5}$  감소 폭을 추정하는 것이 필요하다. 그림 8(a)에서는 경기도 31개 기초 지자체별 자체 기여도를 산정한 결과이다. 경기도 내 기초 지자체의 자체 기여도는 과천시에서 1.5%로 가장 낮으며, 이천시에서는 11.6%의 최고 자체 기여도를 보인다(평균 6.4%). 주로 산업단지가 밀집되거나, 항만 시설이 있는 화성시, 평택시, 안성시, 그리고 이천시 등 경기 남부에 위치한 기초 지자체가 10% 이상의 높은 자체 기여도를 보였다. 부록 표 1에서 화성시와 평택시의  $PM_{2.5}$  관련 배출량은 다른 시군에 비해 높다. 이천시와 안성시는 전반적인  $PM_{2.5}$  전구물질 배출량은 낮은 편이나, 암모니아(Ammونيا) 배출량이 다른 지역에 비해 높다.

그림 8(b)에 제시된 경기도 기초 지자체별  $PM_{2.5}$  농도에 대한 경기도 타 지역 기여도는 9.9%~20.4%로 산정되었다(평균 13.1%). 이를 기초 지자체별로 살펴보면, 내륙 지역인 수원시, 의왕시, 이천시, 여주시에서 경기도 내 타 지역 기여도는 15%가량이며, 화성시 및 평택시, 경기도 가장 북쪽에 위치한 파주시, 김포시에서는 10% 이하로 다른 기초 지자체에 비해 낮은 기여도를 보인다. 결과적으로 경기도 내 기초 지자체별 자체 기여도와 타 지역 기여도는 지역마다

차이는 있으나, 평균적으로는 경기도 타 지역 배출량이 기초 지자체별 자체 배출량에 의한 기여도에 비해 2배가량 높은 것을 알 수 있다. 또한 경기도 전체 배출량에 의한 평균 기여도는 19.5%(= 자체 기여도 6.4% + 도내 타 지역 기여도 13.1%)로 분석된다.

그림 9는 기초 지자체별 인접 지역 및 경기도 타 지역 기여도, 그리고 자체 기여도를 종합한 것으로, 경기도 31개 기초 지자체를 지리적 구분과 현재 경기도에서 수행 중인 4개의 미세먼지 예보 권역을 중심으로 구분하여 기여도를 살펴보았다. 경기도 4개 권역 중 경기 남부(회색 영역)에서 가장 높은 19.9%의 인접지역 기여도를 보이며, 중부 18.8%(초록색 영역) > 동부 15.0%(주황색 영역) > 북부 11.8%(노란색 영역) 순으로 나타났다. 경기도 타 지역 기여도는 중부(14.4%) > 남부(13.6%) > 동부(13.3%) > 북부(10.7%)로, 기초 지자체별 자체 기여도는 남부(10.0%) > 북부(6.8%) > 중부(5.7%) > 동부(4.5%) 순으로 나타났다.

이를 정리하면, 경기 중부 권역은 인접 지역 배출에 의한  $PM_{2.5}$  농도 기여도가 주요했으며, 경기 북부 권역에서는 자체 배출에 의한 기여도가, 그리고 경기 남부 권역에서는 인접 지역 배출과 자체 배출에 의한



**Fig. 9.** Summary of the inter- and intra-provincial contributions, and self-contributions to annual mean  $PM_{2.5}$  concentrations in local authorities in the province during the simulation period of 2016. Local authorities in Gyeonggi are divided into four sub-regions: northern (yellow area), central (green area), eastern (orange area), and southern (gray area).

$PM_{2.5}$  기여도가 복합적으로 나타났다. 특히, 경기 남부 권역은 인접 지역 및 자체 배출에 의한  $PM_{2.5}$  기여도에 높은 기여를 보인 바, 본 지역의 경우 대기권역 관리 수행 시 자체 배출에 의한 영향뿐 아니라 인접 지역의 배출 영향까지 고려해야 할 것으로 판단된다.

### 3.4 경기도 배출에 의한 주변 지역 $PM_{2.5}$ 기여도

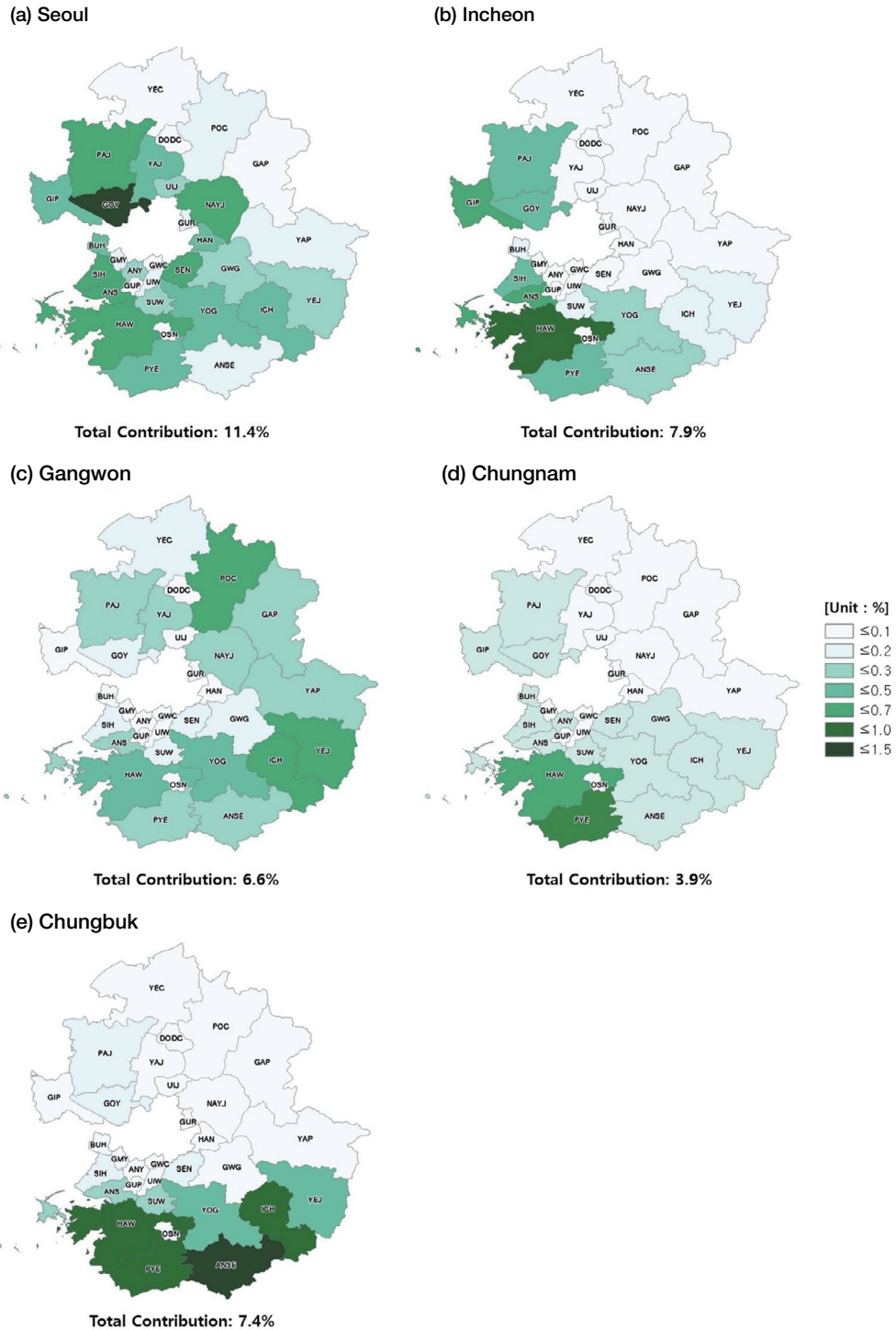
앞 절에서는 경기도 인접시도에서 배출된 대기오염물질 배출량이 경기도 31개 기초 지자체별  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 기여도를 확인하였다. 본 절에서는 이와는 반대로 경기도 배출량이 서울시, 인천시, 충남과 충북 및 강원도 등 인접 시도의  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 기여도를 살펴보았다.

대기질 모사 결과에서 경기도에서 배출되는 모든 대기오염물질이 서울시의  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 기여도는 2016년 평균 11.4%이었으며, 이를 기초 지자체별로 구분해보면, 경기도 각 기초 지자체는 서울시  $PM_{2.5}$  농도를 0.1%~1.4% 정도 가중시켰다(그림 10(a)). 동일하게 경기도 배출량이 인천시  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 기여도는 모사기간 동안 7.9%가량으로, 경기도 각 지자체별로는 0.1%~0.9% 사이였다. 특히, 인천시와 인접한 김포시(0.9%), 시흥시(0.8%), 화성시(0.8%)의 배출량은 상대적으로 높은 인천시  $PM_{2.5}$  기여도를 보였다. 다만, 도서 지역인 강화군과 옹진군 등에서는 경기도 배출에 의한  $PM_{2.5}$  기여도가 다른 인천시 지역에 비해 낮다.

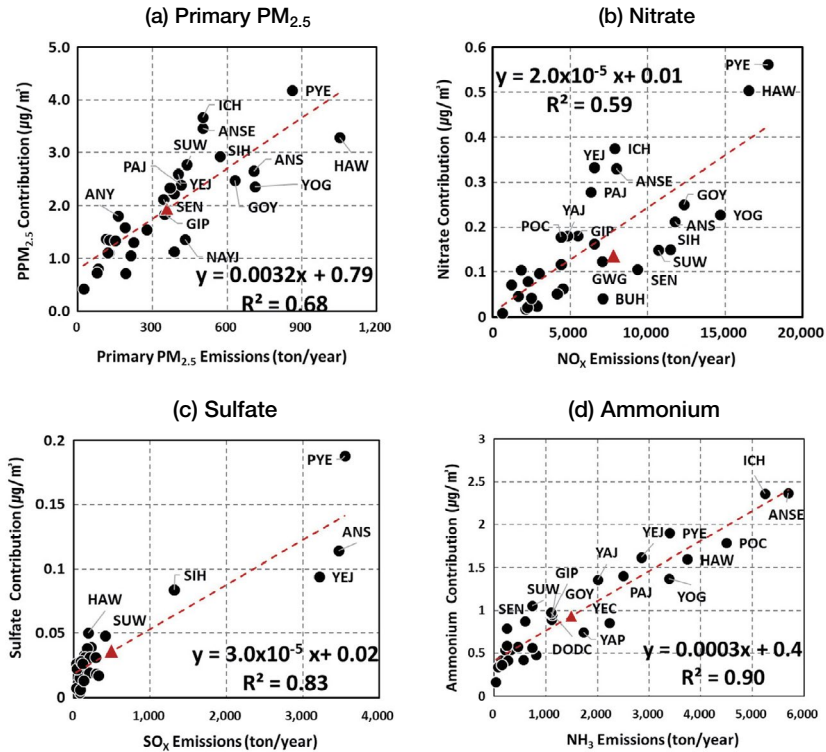
충남의  $PM_{2.5}$  농도에 대한 경기도 배출 기여도는 작게는 0.1%에서 크게는 0.9% 사이로 모사되었다(경기도 전체 기여도 3.9%). 이 가운데 지자체 내에 산업단지 등 오염원이 많이 위치해 있으며, 지리적으로 인접한 평택시와 화성시에서 충남에 미치는  $PM_{2.5}$  기여도는 0.9%, 0.7%로 높게 산정되었다. 강원도의 경우 경기도의 풍하 지역에 위치하고 있어(Jeong *et al.*, 2012), 경기도 전체 배출이 강원도  $PM_{2.5}$  농도에 대한 기여도는 2016년 모사기간에 대해 6.6% 정도를 나타냈다. 기초 지자체별로는 포천시(0.7%), 여주시(0.3%), 이천시(0.6%)가 강원도에 높은 기여도를 보였다. 또한, 경기도 배출에 의한 충북  $PM_{2.5}$  2016년 모사기간에 대해 0.1%~1.1%까지 나타났으며, 경기도 전체 기여도는 7.4%로 나타났다. 경기도 기초 지자체별 높은 기여도를 보인 지역은 충북과 인접한 안성시(1.1%)로 나타났다. 앞서 논의된 국외 및 타 지역 배출량이 경기도  $PM_{2.5}$  농도에 미치는 기여도와 본 절의 결과를 종합해 보면 해당 기초 지자체는 물론 경기도 타 지역, 그리고 인접 지역 배출량에 대한 정량적인 영향 분석과 배출 관리를 위한 협조 체계 마련이 중요해 보인다.

### 3.5 기초 지자체별 배출량의 자체 $PM_{2.5}$ 농도 전환율

$PM_{2.5}$ 는 1차 배출에 의한 영향 외에 대기 중으로 배출된 전구물질에 의한 2차 생성의 영향을 받는다.



**Fig. 10.** Individual and total contributions of emissions released from local authorities in Gyeonggi to  $PM_{2.5}$  concentrations in (a) Seoul, (b) Incheon, (c) Chungnam, (d) Chungbuk, and (e) Gangwon during the simulation period of 2016.



**Fig. 11.** Scatters between emission rates and self-contributions of (a) Primary PM<sub>2.5</sub>, (b) SO<sub>x</sub>, (c) NO<sub>x</sub>, and (d) Ammonia for local authorities in Gyeonggi. The red triangle represents the arithmetic mean of emission rates and the self-contributions.

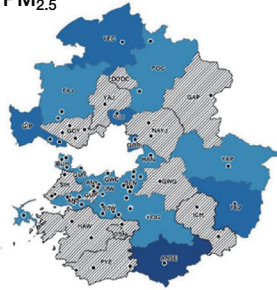
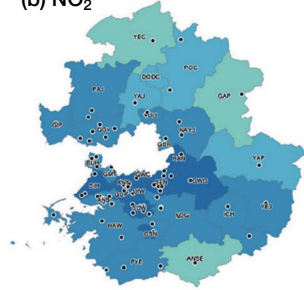
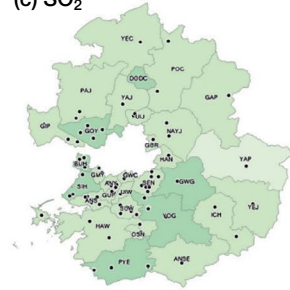
본 절에서는 1차 PM<sub>2.5</sub> (Primary PM<sub>2.5</sub>) 외에 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량에 의한 황산염과 질산염 기여도를 바탕으로 기초 지자체별 주요 성분의 전환율을 산정하였다(그림 11). 경기도 내 1차 PM<sub>2.5</sub> 배출에 의한 PM<sub>2.5</sub> 농도에 대한 경기도 평균 기여도는 1.94 µg/m<sup>3</sup>로 다른 물질에 비해 높다. 평택시와 화성시에서는 1차 PM<sub>2.5</sub> 배출량이 각각 862 ton/year, 1,051 ton/year으로 다른 경기도 내 기초 지자체에 비해 높으며, 해당 배출에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도는 4.2 µg/m<sup>3</sup>와 3.3 µg/m<sup>3</sup>이다(그림 11(a)). 각 기초 지자체의 1차 PM<sub>2.5</sub> 배출량과 PM<sub>2.5</sub> 기여도 간의 R<sup>2</sup>은 0.68로, 그림 11(a)에서 선형 회귀선의 기울기를 전환율(=기여도/배출량)로 가정하면, 경기도에서 배출되는 1차 PM<sub>2.5</sub>가 경기도의 PM<sub>2.5</sub> 농도로의 평균적인 전환율은 0.032 µg/m<sup>3</sup>/tpy이다.

같은 방법으로 경기도 기초 지자체에서 배출되는

NO<sub>x</sub>와 SO<sub>2</sub>가 해당 기초 지자체에서 질산염과 황산염 농도로의 전환율을 경기도 평균적으로 살펴보면, 2.0 × 10<sup>-5</sup> µg/m<sup>3</sup>/tpy와 3.0 × 10<sup>-5</sup> µg/m<sup>3</sup>/tpy이다(그림 11(b)와 (c)). 경기도 기초 지자체 전환율은 NO<sub>x</sub> 배출량이 다른 지역에 비해 상대적으로 높은 평택시(17,757 ton/year)와 화성시(16,530 ton/year)에서 자체 NO<sub>x</sub> 배출에 의한 질산염 기여도는 각각 0.6 µg/m<sup>3</sup>와 0.5 µg/m<sup>3</sup>이었으며, 이때 NO<sub>2</sub> 배출에 의한 질산염 농도 전환율은 두 도시에서 각각 3.4 × 10<sup>-5</sup>, 3.0 × 10<sup>-5</sup> µg/m<sup>3</sup>/tpy이다.

각 지자체별 SO<sub>x</sub> 배출량에 의한 황산염 자체 기여도는 대부분의 지자체에서 0.1 µg/m<sup>3</sup> 이하로 낮은 기여도를 보이나, 향만 배출량으로 인하여 평택시의 황산염 자체 기여도는 0.2 µg/m<sup>3</sup>이며, 안산시와 여주시에서의 황산염 자체 기여도는 0.1 µg/m<sup>3</sup> 정도이다. 이 세 지역에서 SO<sub>2</sub> 배출에 의한 황산염 농도 전환율은

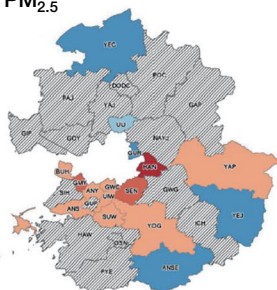
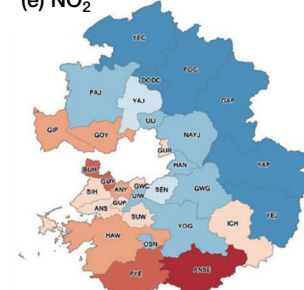
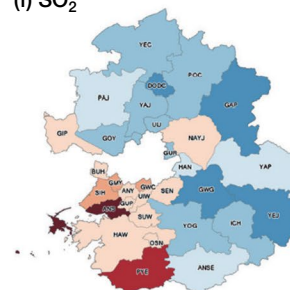
## Observation

(a) PM<sub>2.5</sub>(b) NO<sub>2</sub>(c) SO<sub>2</sub>

[PM<sub>2.5</sub>: μg/m<sup>3</sup>,  
NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>: ppb]

- ≤0.5
- ≤1.0
- ≤3.0
- ≤5.0
- ≤10.0
- ≤15.0
- ≤20.0
- ≤30.0
- ≤40.0
- ≤50.0

## Relative bias

(d) PM<sub>2.5</sub>(e) NO<sub>2</sub>(f) SO<sub>2</sub>

[Unit : %]

- ≤100.0
- ≤70.0
- ≤50.0
- ≤30.0
- ≤20.0
- ≤10.0
- ≤5.0
- ≤-5.0
- ≤-10.0
- ≤-20.0
- ≤-30.0
- ≤-50.0
- ≤-70.0
- ≤-100.0

**Fig. 12.** Observed annual mean (a) PM<sub>2.5</sub>, (b) NO<sub>2</sub>, (c) SO<sub>2</sub> concentrations in local authorities in Gyeonggi for 2016. Relative biases ( $= \frac{OBS - MOD}{OBS} \times 100\%$ ) for the modeled (d) PM<sub>2.5</sub>, (e) NO<sub>2</sub>, and (f) SO<sub>2</sub> concentrations for the local authorities are also presented.

평택시  $5.3 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{tpy}$ , 안성시  $3.3 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{tpy}$ , 여주시  $2.9 \times 10^{-5} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{tpy}$ 로 나타났다.

그림 11(d)는 경기도 기초 지자체별 암모니아 배출량 대비 해당 지자체의 암모늄 기여도를 보인 것으로 배출량과 기여도 간에 선형적인 관계가 뚜렷하게 나타난다 ( $R^2=0.90$ ). 경기도의 암모니아 배출에 의한 자체 암모늄 농도로의 전환율은 대상기간 동안 평균  $3.0 \times 10^{-3} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{tpy}$ 이며, 농업 관련 암모니아 배출이 많은 이천시와 안성시에서 암모늄 자체 기여도는  $2.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로, 당량비를 고려해보면 SO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>에 비해 2~3배 정도 큰 수치이다. 이러한 배출물질 간의 전환율의 차이는 질산암모늄 (Ammonium Nitrate)과 황산암모늄 (Ammonium Sulfate) 생성 시, 질산염과 황산염의 전구물질은 해당 지역에서 배출되는 것이 아니고, 인접 지역이나 국외로부터 유입됨을 의미한다

(Kim *et al.*, 2017c). 암모니아의 경우 배출량 등에 불확도가 아직 높고, 암모늄의 전환 역시 더 많은 연구가 필요하다. 특히, 경기도에서의 암모니아 배출에 대한 기여도가 1차 PM<sub>2.5</sub> 다음으로 높게 나타나는 점을 고려하면 주의 깊은 관찰이 요구된다.

## 3.6 기초 지자체별 모사 편차

본 연구에서 제시된 경기도의 기초 지자체별 PM<sub>2.5</sub> 기여도는 2016년 국가 배출목록을 기반으로 산정되었다. 3차원 광화학 모사에서 배출량 등 입력자료는 많은 불확도를 가지며, 이에 따라 산정되는 기여도 (contribution) 불확도를 내재한다. 본 절에서는 PM<sub>2.5</sub> 외에 전구물질인 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>2</sub>의 관측 농도와 모사 농도비를 경기도 기초 지자체별로 검토하여 앞서 산정한 기여도와 전환율에 대한 불확도를 평가하였다.

PM<sub>2.5</sub>의 경우(그림 12(a)와 (d)), 안성시와 여주시, 구리시에 관측과 모사 농도의 상대적 편차가 높다. 안성시의 PM<sub>2.5</sub> 관측 농도는 40.8 µg/m<sup>3</sup>, 모사 농도는 28.6 µg/m<sup>3</sup>로 29%의 과소모의가 나타난다. 마찬가지로 여주시에서는 24.5%의 과소 모사(관측 34.2 µg/m<sup>3</sup>, 모사 25.8 µg/m<sup>3</sup>)가 나타난다. 반면 하남시 등에서는 약 30.2%의(관측 농도 21.6 µg/m<sup>3</sup>, 모사 농도 28.1 µg/m<sup>3</sup>) 과대 모사를 보인다. 이러한 PM<sub>2.5</sub>의 과대 또는 과소 모사는 1차 PM<sub>2.5</sub> 배출량은 물론 SO<sub>2</sub>와 NO<sub>x</sub> 배출량의 과대, 과소 산정으로부터 기인될 수 있다. 따라서 이러한 문제점은 지자체별 주요 오염원 파악과 대기질 개선 대책 수립에 앞서 선제적으로 해결되어야 한다. 그림 12(a)와 (d)에서 빗금 친 지역의 경우 2016년 관측 농도 부재로 인해 분석에서 제외하였다.

그림 12(b)와 (e)에서 경기도 기초 지자체별 NO<sub>2</sub> 관측과 모사 농도의 상대적 편차는 0.91(표준편차 0.22)로 큰 차이를 보이지 않는다. 다만, 평택시와 안산시 등 일부 기초 지자체에서는 NO<sub>2</sub> 농도는 관측 대비 25%, 30%가량 과대 모사한다. 이들 지자체는 산업과 이동오염원의 배출이 많은 지역으로 해당 오염원에 대한 NO<sub>x</sub> 배출량과 함께, 인접시도인 충남 배출 영향 또한 함께 검토되어야 한다. 반대로 경기도의 북동쪽에 위치한 가평군, 양평군에서는 NO<sub>2</sub> 농도가 각각 45%, 37%가량 과소 모의되었다.

SO<sub>2</sub> 역시 경기도 전체 기초 지자체별 상대적 편차는 0.97(표준편차 0.28)이다. NO<sub>x</sub>와 마찬가지로 SO<sub>2</sub>의 모사/관측 비를 기초 지자체별로 살펴보면, 안산시와 평택시에서는 각각 86%의 66% 과대 평가, 동두천시와 여주시에서는 각각 41%와 33%의 과소 평가를 보인다. SO<sub>2</sub> 농도의 관측과 모사 농도의 차이는 과대 모사 지역에서는 항만 및 산업 관련 배출량의 영향으로, 과소 모사 지역에서는 발굴 또는 기존 오염원의 배출량이 과소 평가된 것으로 사료된다.

이러한 결과를 종합해 보면, 대기질 모사에 이용된 배출량이 일부 지역에서 과대 혹은 과소 평가되는 것으로 보인다. 이러한 지역별 배출량의 과대 또는 과

소 산정은 권역 대기질 개선 정책 수립 전에 반드시 우선적으로 검토되어야 하며, 현실적인 대책 마련을 위해 중요한 평가가 된다. 또한, 대기질 모사의 평가는 모사 방법과 측정 자료와의 비교 방법에 따라 달라질 수 있으므로, 이를 평가할 수 있는 배출-모사-관측의 평가 시스템 마련이 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 경기도 31개 기초 지자체를 대상으로 국외, 인접 광역 지자체, 경기도 타 시군, 그리고 자체 대기오염물질 배출에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도를 분석하였다. 이를 CAMx-PSAT 모사를 2016년 국가배출목록을 이용하여 배출목록 기준연도(2016년)를 대상으로 수행하였다. 모사 결과, 국외에서 배출된 대기오염물질이 경기도 기초 지자체별 PM<sub>2.5</sub> 농도에 미치는 기여도는 경기 남부에 비해 경기 북부에서 26%가량 높았으며, 주로 대기오염물질의 장거리 이동 경로상 국외와 가장 근접하고 자체 배출 기여도가 낮은 기초 지자체에서 높았다.

경기도와 인접한 시도의 배출량은 경기도 기초 지자체별 PM<sub>2.5</sub> 농도에 9%~27%의 기여도(평균 17%)를 보였으며, 일부 기초 지자체에서 근접한 시도의 배출에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도가 높게 나타났다. 특히, 국외 배출 기여도와는 달리 인접 시도의 배출 기여도는 경기 남부의 기초 지자체(평택시 27.0% > 부천시 23.2% > 화성시 23.0%)에서 경기 북부에 비해 높았다(연천군 9.2% < 포천시 10.6% < 동두천시 11.0%). 경기도 기초 지자체별 자체 배출에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도는 2%~12%(평균 6%)이었다. 또한, 경기도 타 지역 배출에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도는 8%~20%(평균 13%)로, 대부분의 경기도의 기초 지자체는 도내 타 지역 배출 기여가 자체 기여보다 2배 정도 높았다. 한편, 경기도 전체 배출량에 의한 PM<sub>2.5</sub> 기여도(= 자체 + 타 지역 배출 기여도)는 기초 지자체에 따라 14%~27%(평균 20%)로 산정되었으며, 일부 기초 지자체에 따라서는

경기도 전체 배출량에 의한  $PM_{2.5}$  기여도보다 인접 시도 배출량의 의한 기여도가 높은 지역도 있었다.

이러한 결과는 인접한 시도의 배출 기여도가 경기도 배출 관리만큼 경기도의  $PM_{2.5}$  농도 개선에 있어 중요함을 의미한다. 이와 함께 경기도 배출이 인접 시도의  $PM_{2.5}$  농도에 대한 기여도는 4%~11%로 나타나, 주변 지역에 작지 않은 배출 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 향후 경기도 기초 지자체별  $PM_{2.5}$  농도의 효과적인 개선을 위해서는 도내 대기오염물질 배출량에 대한 종합적인 관리가 필요함은 물론, 인접 시도의 배출 영향을 최소화할 수 있는 대기 오염관리권역 설정이 필요하다.

경기도 배출에 의한  $PM_{2.5}$  구성 성분별 기여도에서는 1차  $PM_{2.5}$ 가  $1.49 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 자체 기여도를 보였다. 그 다음은 암모늄  $0.94 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$  질산염  $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3 >$  황산염  $0.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$  순으로, 경기도의  $PM_{2.5}$  농도 관리를 위해서는 1차  $PM_{2.5}$ 와 암모니아 배출에 대한 관리가 상대적으로 중요한 것으로 제시되었다. 다만, 일부 경기도 기초 지자체에서  $PM_{2.5}$ 와 전구물질인  $\text{NO}_2$ 와  $\text{SO}_2$  농도가 과대 또는 과소 모사되었으며, 제시된 기여도는 대기질 모사에 이용되는 배출량에 따라 달라질 수 있는 점을 고려하면, 향후 해당 기초 지자체와 인접한 북한 등 국외 배출량에 대한 검토와 개선이 필요하다.

## 감사의 글

본 논문은 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

## References

- Bae, C., Kim, B., Kim, H., 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, 48. <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, M., Kim, H., Kim, B., 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, 294-305, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.2.294>
- Bae, M., Yoo, C., Kim, S. (2020) 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, 48-63, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.1.048>
- Carter, W.P.L. (2010) Development and evaluation of the SAPRC-99 chemical mechanism. 24. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.024>
- Chang, L.-S., Cho, A., Park, H., Nam, K., Kim, D., Hong, J.-H., Song, C.-K. (2016) Human-model hybrid Korean air quality forecasting system, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 66, 896-911. Taylor & Francis. <https://doi.org/10.1080/10962247.2016.1206995>
- Chen, F., Dudhia, J. (2001) Coupling an Advanced Land Surface-Hydrology Model with the Penn State-NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity, *Monthly Weather Review*, 129, 569-585. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(2001\)129<0587:caalsh>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(2001)129<0587:caalsh>2.0.co;2)
- Choi, J., Park, R.J., Lee, H.-M., Lee, S., Jo, D.S., Jeong, J.I., Henze, D.K., Woo, J.-H., Ban, S.-J., Lee, M.-D., Lim, C.-S., Park, M.-K., Shin, H.J., Cho, S., Peterson, D., Song, C.-K. (2019) Impacts of local vs. trans-boundary emissions from different sectors on  $PM_{2.5}$  exposure in South Korea during the KORUS-AQ campaign, *Atmospheric Environment*, 203, 196-205. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2019.02.008>
- Chou, M.-D., Suarez, M.J. (1994) An efficient thermal infrared radiation parameterization for use in general circulation models.
- Colella, P., Woodward, P.R. (1984) The Piecewise Parabolic Method (PPM) for gas-dynamical simulations, *Journal of Computational Physics*, 54, 174-201. [https://doi.org/10.1016/0021-9991\(84\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0021-9991(84)90143-8)
- Ghim, Y., Choi, Y., Park, J., Kim, S., Bae, C., Seo, J., Shin, H., Lim, Y., Lyu, Y., Lee, Y. (2019) Overall Characteristics of Nationwide High  $PM_{2.5}$  Episodes during 2013-2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 609-624, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35>



- 5.609
- 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), *Journal of the Korean Meteorological Society*, 42(2), 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(9), 2318-2341. <https://doi.org/10.1175/mwr3199.1>
- Jang, A.S. (2014). Impact of particulate matter on health. *Journal of the Korean Medical Association/Taehan Uisa Hyophoe Chi*, 57(9).
- Itahashi, S., Uno, I., Kim, S. (2012) Source Contributions of Sulfate Aerosol over East Asia Estimated by CMAQ-DDM, *Environmental Science & Technology*, 46, 6733-6741. <https://doi.org/10.1021/es300887w>
- Jeong, U., Kim, J., Lee, H., Jung, J., Kim, Y.J., Song, C.H., Koo, J.-H. (2011) Estimation of the contributions of long range transported aerosol in East Asia to carbonaceous aerosol and PM concentrations in Seoul, Korea using highly time resolved measurements: a PSCF model approach, *Journal of Environmental Monitoring*, 13, 1905-1918. <https://doi.org/10.1039/c0em00659a>
- Jeong, Y.-M., Lee, S.-H., Lee, H.-W., Jeon, W.-B. (2012) Numerical Study on the Process Analysis of Ozone Production due to Emissions Reduction over the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Environmental Science International*, 21, 339-349. <https://doi.org/10.5322/jes.2012.21.3.339>
- Ju, H., Bae, C., Kim, B., Kim, H., Yoo, C., Kim, S. (2018b) PM<sub>2.5</sub> 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.517>
- Ju, H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Kim, S. (2018a) Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 101-119, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.1.101>
- Ju, H., Yoo, C., Kim, B., Kim, H., Kim, S. (2019) Impact of Stack Parameters on Modeled PM<sub>2.5</sub> Conversion Rates: A Case Study of Chungnam during the KORUS-AQ 2016, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(5), 593-608, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.5.593>
- Jung, E.M., Kim, K.-N., Park, H., Shin, H.H., Kim, H.S., Cho, S.J., Kim, S.T., Ha, E.H. (2020) Association between prenatal exposure to PM<sub>2.5</sub> and the increased risk of specified infant mortality in South Korea, *Environment International*, 144, 105997. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2020.105997>
- Kain, J.S. (2014) The Kain-Fritsch Convective Parameterization: An Update, *Journal of Applied Meteorology*, 43, 170-181. [https://doi.org/10.1175/1520-0450\(2004\)043<0170:tkcpau>2.0.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0450(2004)043<0170:tkcpau>2.0.co;2)
- Kim, B.-U., Bae, C., Kim, H.C., Kim, E., Kim, S. (2017a) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, *Atmospheric Environment*, 162, 55-70. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.05.006>
- Kim, 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.588>
- Kim, D.-R., Choi, W.-J., Choi, M., Kim, J., Cho, A., Kim, S.-K., Kim, J., Moon, K.-J. (2017b) Analysis of Aerosol Optical Properties for High Particulate Matters and Light Asian Dust in Seoul Using GOCI, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(3), 233-240, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.3.233>
- Kim, E., Kim, H., Kim, B., Kim, S. (2019) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from Chungcheongnam-do, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 226-248, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.2.226>
- Kim, H.C., Kim, S., Kim, B.-U., Jin, C.-S., Hong, S., Park, R., Son, S.-W., Bae, C., Bae, M., Song, C.-K., Stein, A. (2017c) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea. *Scientific Reports*, 7, 4710. Nature Publishing Group. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017d) Regional contributions to particulate matter con-

- centration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 17, 10315-10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Kim, H.C., Kwon, S., Kim, B.-U., Kim, S. (2018b) Review of Shandong Peninsular Emissions Change and South Korean Air Quality, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 356-365, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.2.356>
- Kim, S., Bae, C., Kim, B., Kim, H. (2017e) PM<sub>2.5</sub> 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.2.139>
- Kim, S., Bae, C., Yoo, C., Kim, B., Kim, H., Moon, N.-K. (2017f) PM<sub>2.5</sub> Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (II) Estimation of Self-Contributions and Emission-to-PM<sub>2.5</sub> Conversion Rates for Each Source Category, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(4), 377-392, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.4.377>
- Koo, B., Wilson, G.M., Morris, R.E., Dunker, A.M., Yarwood, G. (2009) Comparison of Source Apportionment and Sensitivity Analysis in a Particulate Matter Air Quality Model, *Environmental Science & Technology*, 43(17), 6669-6675. <https://doi.org/10.1021/es9008129>
- Koo, Y.-S., Choi, D.-R., Kwon, H.-Y., Jang, Y.-K., Han, J.-S. (2015) Improvement of PM<sub>10</sub> prediction in East Asia using inverse modeling, *Atmospheric Environment*, 106, 318-328. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.02.004>
- Ministry of Environment (MOE) (2017) Comprehensive Plan Report, <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=152146&fileSeq=1> (accessed on Dec 22, 2017).
- Ministry of Environment (MOE) (2018) Enforcement Rule of Atmospheric Environment Conservation Act, <http://www.law.go.kr/LSW/lsEfInfoP.do?lsiSeq=202475#> (accessed on Mar 2, 2018).
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Seasonal PM<sub>2.5</sub> Management System, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=10392&boardMasterId=713&boardCategoryId=&boardId=1094960> (accessed on Dec 15, 2020).
- Mlawer, E.J., Taubman, S.J., Brown, P.D., Iacono, M.J., Clough, S.A. (1997) Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 102(D14), 16663-16682. <https://doi.org/10.1029/97jd00237>
- Nenes, A., Pandis, S.N., Pilinis, C. (1998) ISORROPIA: A New Thermodynamic Equilibrium Model for Multiphase Multicomponent Inorganic Aerosols, *Aquatic Geochemistry*, 4, 123-152.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate Change*. P. in: John Wiley & Sons, 1146 pp.
- Strader, R., Lurmann, F., Pandis, S.N. (1999) Evaluation of secondary organic aerosol formation in winter, *Atmospheric Environment*, 33(29), 4849-4863. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(99\)00310-6](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(99)00310-6)
- Woo, J.-H., Kim, Y., Kim, H.-K., Choi, K.-C., Eum, J.-H., Lee, J.-B., Lim, J.-H., Kim, J., Seong, M. (2020) Development of the CREATE Inventory in Support of Integrated Climate and Air Quality Modeling for Asia. *Sustainability*, 12(19), 7930. <https://doi.org/10.3390/su12197930>
- Yarwood, G., Morris, R., Wilson, G. (2007) Particulate Matter Source Apportionment Technology (PSAT) in the CAMx Photochemical Grid Model. pp. 478-492. in: *Air Pollution Modeling and Its Application*. [https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1\\_52](https://doi.org/10.1007/978-0-387-68854-1_52)
- Yim, S.H.L., Gu, Y., Shapiro, M.A., Stephens, B. (2019) Air quality and acid deposition impacts of local emissions and transboundary air pollution in Japan and South Korea, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 19, 13309-13323. <https://doi.org/10.5194/acp-19-13309-2019>
- Yoo, C., Lee, D.-G., Lee, Y.-M., Lee, M.-H., Hong, J.-H., Lee, S.-J. (2011) Methodology of Application to Air Quality Model to Evaluate the Results of the Enforcement Plan in Seoul Metropolitan Area, *Journal of Environmental Science International*, 20, 1647-1661. <https://doi.org/10.5322/jes.2011.20.12.1647>
- Yu, G., Lee, B., Park, S.-S., Jung, S.A., Jo, M., Lim, Y.J., Kim, S. (2019) A Case Study of Severe PM<sub>2.5</sub> Event in the Gwangju Urban Area during February 2014, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 195-213, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.2.195>
- Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R. (2003) A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models,

Atmospheric Chemistry and Physics, 3, 2067-2082.  
<https://doi.org/10.5194/acp-3-2067-2003>

Zhang, L., Gong, S., Padro, J., Barrie, L. (2001) A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment*, 35, 549-560. [https://doi.org/10.1016/s1352-2310\(00\)00326-5](https://doi.org/10.1016/s1352-2310(00)00326-5)

### Authors Information

유승희 (아주대학교 환경공학과 박사과정)  
배창한 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 전문연구원)  
김형천 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 환경연구사)  
유 철 (국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)  
김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

## SUPPLEMENTARY MATERIALS

**Table S1.** The names of 31 local governments in Gyeonggi Province are expressed in abbreviations.

Municipal authority	Abbreviation	Municipal authority	Abbreviation
Gapyeong-gun	GAP	Anyang-si	ANY
Goyang-si	GOY	Yangju-si	YAJ
Gwacheon-si	GWC	Yangpyeong-gun	YAP
Gwangmyeong-si	GMY	Yeoju-si	YEJ
Gwangju-si	GWG	Yeoncheon-gun	YEC
Guri-si	GUR	Osan-si	OSN
Gunpo-si	GUP	Yongin-si	YOG
Gimpo-si	GIP	Uiwang-si	UIW
Namyangju-si	NAYJ	Uijeongbu-si	UIJ
Dongducheon-si	DODC	Icheon-si	ICH
Bucheon-si	BUH	Paju-si	PAJ
Seongnam-si	SEN	Pyeongtaek-si	PYE
Suwon-si	SUW	Pocheon-si	POC
Siheung-si	SIH	Hanam-si	HAN
Ansan-si	ANS	Hawaseong-si	HAW
Anseong-si	ANSE		

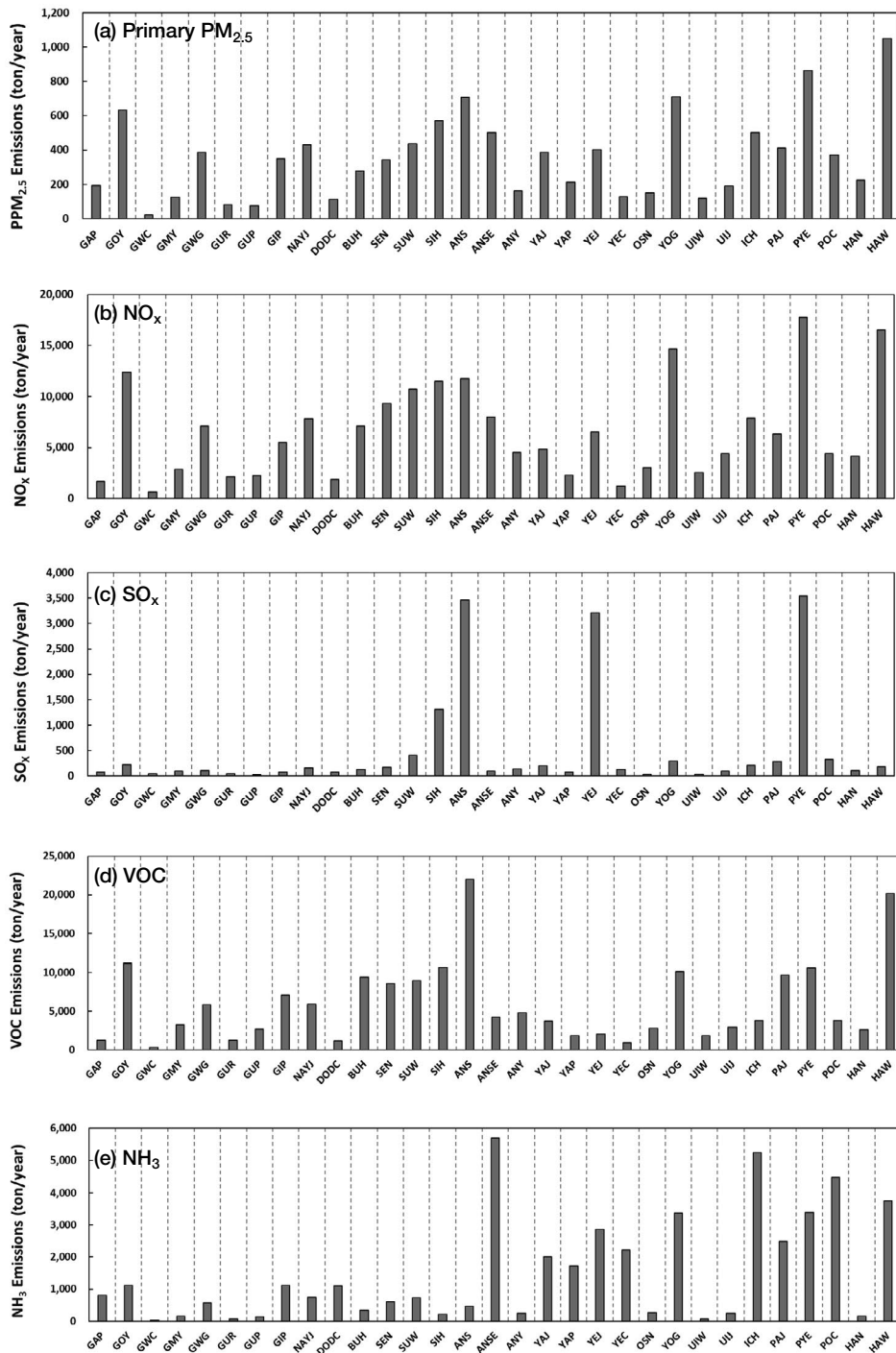


Fig. S1. Annual (a) Primary PM<sub>2.5</sub>, (b) NO<sub>2</sub>, (c) SO<sub>2</sub>, (d) VOC and (e) NH<sub>3</sub> emissions of local governments in Gyeonggi-do in 2016 CAPSS.