



논문

2016년 국가배출목록 기반 지자체별 초미세먼지 기여도 분석: (II) 인천

Municipality-Level Source Apportionment of PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016: (II) Incheon

김순태*, 유승희¹⁾, 강윤희²⁾, 김은혜, 배민아¹⁾, 손규원¹⁾, 김윤하²⁾,
김병욱³⁾, 김현철^{4),5)}

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾아주대학교 환경공학과, ²⁾아주대학교 환경연구소,
³⁾미국조지아주환경청, ⁴⁾미국국립해양대기청, ⁵⁾메릴랜드대학 기후·위성 연구소

Soontae Kim*, Seunghee You¹⁾, Yoon-Hee Kang²⁾, Eunhye Kim, Minah Bae¹⁾,
Kyuwon Son¹⁾, Yoonha Kim²⁾, Byeong-Uk Kim³⁾, Hyun Cheol Kim^{4),5)}

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

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

²⁾Environmental Research Institute, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

³⁾Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, 30354, USA

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

⁵⁾Cooperative Institute for Satellite Earth System Studies, University of Maryland, College Park, MD, 20740, USA

접수일 2020년 12월 1일
수정일 2021년 1월 29일
채택일 2021년 2월 6일

Received 1 December 2020
Revised 29 January 2021
Accepted 6 February 2021

*Corresponding author

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

E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

Abstract The Comprehensive Air quality Model with eXtensions with Particulate Source Apportionment Technology (CAMx-PSAT) was applied to quantitatively assess the major source regions and key air pollutants to increase PM_{2.5} concentrations in Incheon for 2016. Emissions of PM_{2.5} precursors, including primary PM_{2.5} (PPM_{2.5}), released from Incheon and its neighboring municipalities in the Clean Air Policy Support System 2016, were tagged and tracked to estimate the domestic contributions on a 3-km horizontally gridded modeling domain. The annual mean PM_{2.5} self-contribution of Incheon was 5.2 µg/m³ while the PM_{2.5} contribution of Seoul, Gyeonggi, and Chungnam to Incheon was 0.5, 2.5, and 2.2 µg/m³, respectively. Emissions from the rest of South Korea account for 1.5 µg/m³ of the annual mean PM_{2.5} in Incheon. When the self-contribution was divided into the individual emission species, PPM_{2.5} (2.3 µg/m³) showed the highest contribution followed by NH₃ (2.2 µg/m³), NO_x (0.64 µg/m³), and SO₂ (0.5 µg/m³). The simulation with the CREATE 2015, the regional emissions inventory for outside South Korea, showed that foreign contributions to annual mean PM_{2.5} concentrations in ten local authorities inside Incheon are consistent, ranging from 19.0~21.1 µg/m³, while the relative foreign contributions varied in the range of 57~76%. The apparent spatial difference (19%) in the relative foreign contributions is mainly driven by large spatial variances of the domestic PM_{2.5} contributions in the ten local authorities. The domestic contribution was as low as 6.7 µg/m³ in Ganghwa-gun, an insular local authority of Incheon, while it was as high as 14.7 µg/m³ in Michuhol-gu, a highly populated inland local authority. The results imply that international and interprovincial cooperation is essential to abate PM_{2.5} concentrations in Incheon.

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

1. 서론

대기환경연보에 따르면 최근 4년간 인천의 연평균

초미세먼지 (PM_{2.5}; Particulate Matters of which diameter is equal to or less than 2.5 µm) 농도는 2016년 26 µg/m³, 2017년 25 µg/m³, 2018년 22 µg/m³, 그리고

2019년 $23 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 점차 낮아지는 추세이나, 여전히 대기환경기준인 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 만족하지 못하고 있다(NIER, 2020, 2019, 2018, 2017). 인천은 인구가 밀집된 지역 외에도 강화군과 옹진군 등 많은 도서 지역을 포함하고 있다. 또한, 국내 다른 시도에 비해 면적이 넓어 미세먼지 등 대기오염물질의 공간적인 차이는 인천 내에서도 크게 나타날 수 있으므로, 대기질 관리 시 이에 대한 고려가 필요하다(Yoo *et al.*, 2017).

국내의 경우 고농도 $\text{PM}_{2.5}$ 가 빈번하게 발생하는 추운 계절 동안 중국으로부터 북서풍에 의한 장거리 이동 영향이 높게 나타난다(Bae *et al.*, 2020a; Kim *et al.*, 2017a). 따라서, 국내 최서북단에 위치한 인천은 국내 지역 중 대기오염물질의 국외 유입 영향을 가장 가까이에서 받을 것으로 추정된다. Kim *et al.* (2017a)은 지역별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 국외 영향은 제주를 제외하면 인천에서 가장 높은 것으로 분석하였으며, 인천에서의 국외 배출 영향은 여름철에 비해 추운 계절에 20~30%가량 더 높은 것으로 보고하였다. 또한, Kim *et al.* (2018a)은 미세먼지 관리 종합대책과 관련된 분석에서 2015년 대비 2022년까지 인천에서 개선될 것으로 기대되는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도($7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 중 절반 이상을 중국의 배출 감소에 의한 것으로 예측하였다. 이러한 연구 결과는 인천 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 중국 등 국외 배출의 영향이 크다는 것을 의미한다. 다만, 도심지역과 도서 지역을 모두 포함하는 인천의 지역적 특성을 고려했을 때 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 국내외 기여도 분석은 강화군이나 옹진군을 비롯한 기초 지자체 수준에서 이뤄져야 하나, 이처럼 세분화된 연구는 드물다.

또한, 기존 기여도 추정 관련 연구에서 수도권 전체 배출량에 의한 계절별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 영향 등은 분석된 바 있으나(Kim *et al.*, 2017c; Kim *et al.*, 2017d), 서울, 경기 등 인접 지역에서 배출된 대기오염물질의 상호 영향 분석에 대한 연구는 많지 않다. Kim *et al.* (2019)은 충남에서 배출된 대기오염물질들이 해당 지역뿐 아니라, 수도권 지역 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 6% 내외

의 영향을 미치는 것으로 보고하였다. 특히, 인천 지역 가운데 옹진군은 충남 및 경기 지역과 인접하여 적지 않은 대기질의 상호 영향을 보일 것으로 예상되나, 아직까지 이와 관련된 상세한 연구는 수행된 바 없다.

본 연구에서는 인천지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 배출 지역별 기여도 분석을 위해 1년간 대기질 모사를 수행하였다. 배출 지역별 기여도 분석은 국외에 대한 인천 지역의 기초 지자체별(예를 들어, 구와 군)로 구분하였으며, 국내 배출 기여도의 경우 수도권에 위치하는 서울과 경기 지역의 배출 기여도 외에 인접한 충남의 배출 기여도를 함께 제시하였다. 특히, 이들 주변 지역과 인천 자체 배출물질별 기여도를 연평균 및 월별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 기여도로 구분하여, 고농도가 주로 발생하는 겨울철과 봄철 동안 효과적인 관리대상 배출물질을 제시하였다.

2. 연구 방법

2.1 대상 지역 및 배출 특성

본 연구의 대상지역인 인천의 인구는 2020년 10월을 기준으로 294만 명이다. 이는 남한 전체 인구의 5.7%이며, 인구밀도는 $2,767.18 \text{명}/\text{km}^2$ 으로 국내 광역 지자체 중 5위권에 해당한다(KOSIS, 2020). 그림 1에 강화군과 옹진군을 포함한 10개 기초 지자체의 위치를 보였다. 대기오염물질 배출 측면에서 보면, 인천에는 산업단지, 항만, 공항 등 많은 오염원이 위치하고 있다. 2016년 국가 대기오염물질 배출목록에서 인천의 NO_x , SO_x , 그리고 NH_3 배출량은 연간 49,389톤(5%), 12,368톤(4%), 6,958톤(2%)으로 17개 시도 중 11위에 해당한다(부록 그림 1 참조).

한편, 인천 지역 대기질에 영향을 줄 수 있을 것으로 판단되는 인접지역의 배출량을 살펴보면, 경기와 충남의 경우 NO_x 배출 규모가 연간 203,655톤, 134,889톤으로 전국에서 가장 높다. 이는 인천의 NO_x 배출량에 비해 3~4배 정도 높은 수치이다. 또한, 서

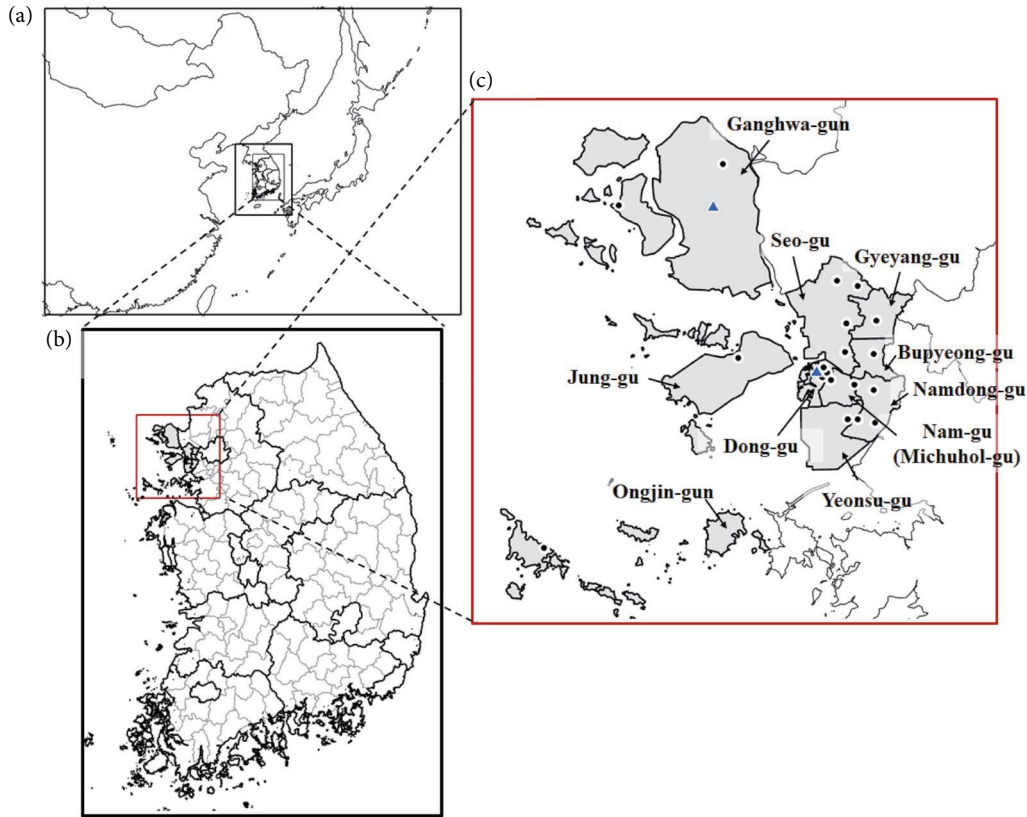


Fig. 1. Coverages of modeling domains at horizontal grid resolutions of (a) 27 km, and 9 km, (b) 3 km, and (c) ten local authorities in Incheon. The black circles and blue triangles indicate the air pollutant monitoring sites and ASOS sites, respectively.

울의 NO_x 배출량은 73,042톤/년으로 인천의 1.5배 규모이며, 배출밀도 면에서 월등히 높다. 충남의 SO_x 배출량은 81,843톤/년으로 인천의 배출규모보다 6배가량 높다. 특히, 충남에서 높은 SO_x 배출을 보이는 지역이 인천과 가까우므로, 인천 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 충남 배출량의 영향은 적지 않을 것으로 예상된다(Bae *et al.*, 2020b; Kim *et al.*, 2020; Kim *et al.*, 2019).

지리적인 특징으로, 인천은 휴전선과 맞닿아 있으며 남한의 최서단에 위치하여 북한, 중국 등 국외 배출의 영향 또한 작지 않을 것으로 예상된다. Bae *et al.* (2020a)는 2010~2017년 인천 전역 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 중국 영향이 인천 측정소 기반 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 중국 영향에 비해 15%가량 높게 나타나는 것으로 보고하였다. 이는 측정소의 배치가 드문 강화군과 서해

5도 등 서북부 도서 지역에서 중국 등 국외 영향이 상대적으로 높게 나타나는 지역 특성을 반영한다.

2.2 대상 기간 선정 및 대기질 모사

‘미세먼지 관리 종합계획’은 2016년을 기준 연도로 정하였다. 또한, 1차 계절 관리제의 계획 수립과 효과 분석 시에는 2016년 국가배출목록이 이용되었다. 최근 발표된 2차 계절 관리제에서도 동일한 국가배출 목록을 활용한다(MOE, 2020). 이를 감안하여 본 연구에서는 대기질 모사 기간을 2016년(1년)으로 설정하였다.

대기질 모사는 동지 격자화를 위해 27 km, 9 km와 3 km의 ‘수평격자 해상도를 가지는 모사 영역’(이하 ‘모사 영역’)으로 구성하였다. 27 km 모사 영역은

174×128의 격자로 구성되며, 중국 등 국외 배출 영향을 포함하기 위하여 설정하였다. 본 연구에서는 3 km 모사 영역(119×173 격자)에서 도출된 결과를 기초 지자체별 PM_{2.5} 기여도 분석에 이용하였으며, 9 km 모사 영역(71×89 격자)은 3 km 모사 영역의 경계조건을 도출하기 위하여 이용되었다(그림 1). 3 km 모사 영역은 백령도 등 일부 인천 지역을 포함하지 못하나, 이는 계산 시간과 모사결과의 저장 용량을 고려하여 결정하였다. 같은 이유로 그림 1(b)에서 제주도 와 울릉도 등도 제외되었다.

대기질 모사를 위한 기상 입력자료의 준비는 Weather Research and Forecasting (WRF; Skamarock *et al.*, 2008) version 3.9.1을 이용하였다. WRF 모사 시, 초기 및 경계 조건은 National Centers for Environmental Prediction (NCEP)의 Final (FNL) 1-degree 자료를 사용하였다(표 1(a)). 자연 배출량은 Model of Emission of Gases and Aerosols from Nature (MEGAN; Guenther *et al.*, 2006) version v2.1을 이용하여 산정하였으며, 인위적 배출량은 Sparse Matrix Operator Kernel Emissions (SMOKE; Benjey *et al.*, 2001) version 3.1로 준비하였다. 국외와 국내 배출목록은 각각 Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment (CREATE) 2015 와 Clean Air Policy Support System (CAPSS) 2016 (NIER, 2019)을 이용하였다. 대기질 모사와 기여도 분석에는 Comprehensive Air Quality Model with eXtensions (CAMx) version 6.1를 이용하였다. 22개의 연직층 중 최하층의 높이는 약 32 m이다. 보다 자세한 CAMx 모사 옵션은 표 1(b)에 보였다.

2.3 PM_{2.5} 및 구성성분별 기여도 분석 방법

본 연구에서는 인천 지역의 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도 분석을 위해 CAMx 모델에서 이용 가능한 Particulate Source Apportionment Technology (PSAT; Yarwood *et al.*, 2007)를 활용하였다. 국내 배출에 의한 PM_{2.5} 기여도 분석을 위해 국내 각 시군별 1차 PM_{2.5} (Primary PM_{2.5}; 이하 PPM_{2.5})를 비롯한 NO_x,

SO_x, NH₃, VOC 등을 표식(tag)하고 추적(track)하였다. 본 연구에 이용된 3 km의 격자 해상도는 인천의 10개 기초 지자체별 배출량 구분이 용이치 않아, 인천 전 지역에 대한 배출량을 기초 지자체 구분없이 표식하였다.

본 연구에서 언급되는 기여도는 특정 오염원 또는 지역에서 대기 중으로 배출되는 물질에 의한 관심 지역의 대기오염물질(예를 들어 PM_{2.5}) 농도의 증가치를 말하며, 이후 본문에서는 기여도를 ‘기여농도(μg/m³)’와 ‘기여율(%)’ 두 가지로 구분하였다. 기여농도는 변화된 중량 농도를 말하며, 기존 연구(Bae *et al.*, 2020a; Ju *et al.*, 2018)에서 많이 이용된 상대적인 기여도(relative contribution)는 본 연구에서는 기여율(%)로 달리 표기하였다. 통상 기여율은 상대적인 값이기 때문에 어느 한쪽의 기여농도가 클 경우 다른 한쪽의 기여농도가 동일하여도 기여율은 낮아질 수 있다. 일례로 국내 배출량은 고정되어 있어도 어떤 국외 배출량을 이용하는지에 따라 대기질 모사를 통해 산정되는 국내 또는 국외 기여율은 달라질 수 있다. 본 연구는 국가 배출목록을 바탕으로 국내 지자체별로 기여농도를 산정하여 향후 국내 배출 저감에 따른 농도 변화를 유추하는 데 중점을 두었으며, 기여율은 필요에 따라 언급하고 기여농도를 중심으로 논의하였다. 다만, 기여농도와 기여율을 함께 의미하는 경우 본문에 기여도를 병행 이용하였다.

배출물질별로 NO_x, SO_x, NH₃, Volatile Organic Compounds (VOC), PPM_{2.5}은 각각 질산염(NO₃⁻), 황산염(SO₄²⁻), 암모늄(NH₄⁺), 2차 유기탄소(Secondary Organic Carbon; SOC), 그리고 PPM_{2.5} 농도로 전환되는 것으로 분석하였다. PM_{2.5} 기여농도는 이들 전환물질의 합으로 계산하였다. PPM_{2.5} 배출량에는 1차 무기탄소(Elemental Carbon; EC), 유기탄소(Organic Carbon; OC) 등이 일부 포함되나, 기여농도 분석 시에는 배출목록상의 물질에 대한 평가를 위해 이를 구분하지 않고 PPM_{2.5}에 합하여 검토하였다. 기여농도 분석 시에는 인천 전 지역 또는 기초 지자체 별로 구분하여 산정하였고, 기초 지자체의 관할구역

Table 1. Summary of the (a) WRF, and (b) CAMx configurations in this study.

(a) WRF	
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, 2004) for 27- and 9-km domains
Land-surface model	NOAH (Chen and Dudhia, 2001)
Boundary layer	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)
(b) CAMx	
Physics/Chemistry	Selected option
Horizontal Advection	Piece-wise Parabolic Method (Colella and Woodward, 1984)
Gas-phase Chemical Mechanism	SAPRC99 (Carter, 2016), RADM-AQ (Chang <i>et al.</i> , 1987) ISORROPIA (Nenes <i>et al.</i> , 1998)
Aerosol Chemistry	SOAP (Strader <i>et al.</i> , 1999), Static 2-mode (Coarse-Fine Scheme) for size distribution
Dry Deposition Model	Resistance model (Zhang <i>et al.</i> , 2003, 2001)
Wet Deposition	Scavenging model (Seinfeld and Pandis, 2016)
PBL Scheme	YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006)

의 위치와 형상을 고려하여 그 안에 포함되는 격자의 면적 분율과 배출밀도를 감안한 기여농도를 산출하였다 (Kim *et al.*, 2018b).

국내 기여농도는 표식된 각 시군별 기여농도의 합으로 산정하였으며, 국외 기여농도는 모사된 농도에서 국내 기여농도를 빼는 방식으로 계산하였다. 따라서, 경계조건의 기여농도 또한 국외 기여농도로 함께 분류하였다. 국내 기여농도는 세분화하여 1) 인천에서 배출된 대기오염물질이 인천 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여농도를 ‘자체 기여농도’, 2) 서울, 경기, 충남 등 ‘주변 지역 기여농도’, 그리고 3) ‘그 외 국내 기여농도’로 구분하였다. 다만, 자체 기여농도의 경우 강화군과 옹진군을 포함한 인천 10개 기초 지자체의 전체 배출량으로 정의하였으며, 인천의 기초 지자체별 기여농도는 산정하지 않았다. 주변 지역 기여농도에 대해 광역 지자체별로 구분이 필요한 경우, 배출 지역이 되는 지자체의 이름을 붙여 표기하였다. 예를 들어, 본문에서 ‘경기 기여농도’는 경기도의 배출량이 인천 지역의 PM_{2.5} 농도에 대한 기여농도를 의미한다. 현재 국가 배출목록에서 ‘바다’로 구분된 해상 배출량

은 그 외 국내 기여농도로 분류하였다.

2.4 지표 관측자료

기상과 대기질 모사의 수행평가는 지표 관측자료와의 비교를 통해 이뤄졌다. 우선, 인천 지역에 대한 기상 모사의 재현성은 기상관측자료 (ASOS, Automated Synoptic Observing System)와 비교를 통해 평가되었다. 대기질 모사 결과는 인천에 위치한 15개의 도시대기측정망을 중심으로 비교하였다 (<http://www.airkorea.or.kr>).

PM_{2.5} 구성성분 농도 평가 시, 인천의 경우 백령도 대기환경연구소의 관측 자료를 이용할 수 있으나, 백령도의 경우 인천 최북단에 위치하므로 배출과 인구가 밀집된 인천 중심 지역의 농도를 대표하기 어려울 것으로 판단하였다. 따라서, 인천과 거리적으로 가까운 서울에 대한 성분별 모사 재현성을 통해 인천에서의 성분 모사 재현성을 간접적으로 평가하였다. 이를 위해 본 연구에서는 PM_{2.5} 성분 농도의 재현성 평가를 위해 서울 불광동에 위치하는 수도권 대기환경연구소의 관측농도와 모사농도를 비교하였다. 다만, 인

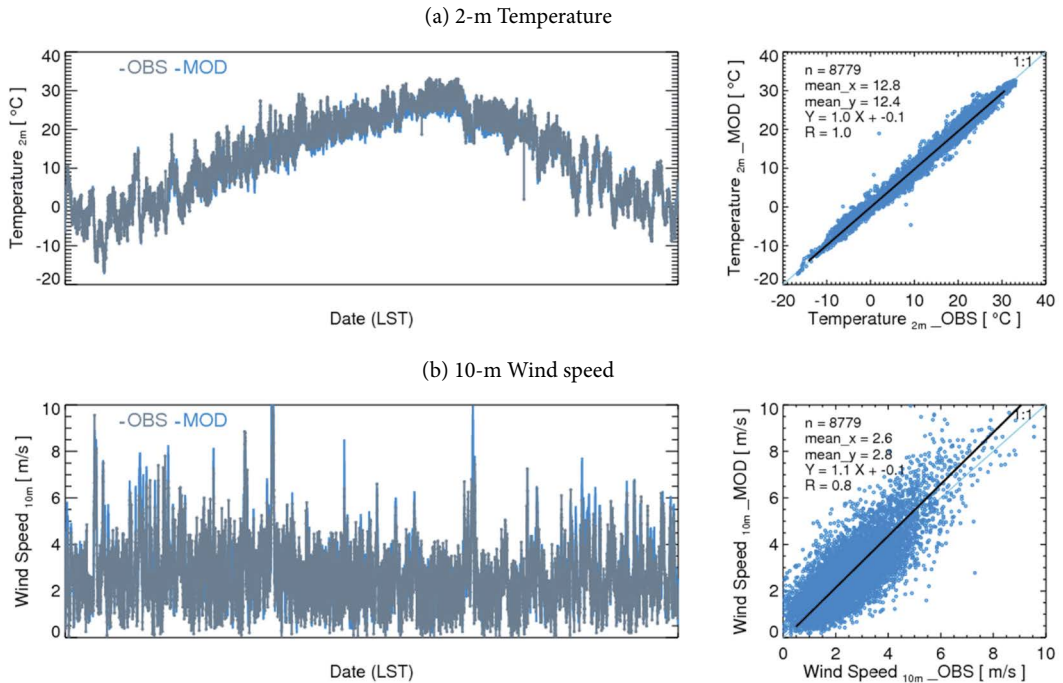


Fig. 2. Comparison between the mean ASOS measurement data and meteorological simulation in Gyeonggi for hourly (a) 2-m temperature and (b) 10-m wind speed.

천의 경우 화력발전, 항만, 공항, 석유화학 업체, 매립지 등 서울 지역과 차별적인 배출원이 존재하므로, 서울과 인천의 $PM_{2.5}$ 구성성분은 차이를 보일 수 있다. 이러한 제한점은 향후 인천지역의 성분별 관측자료의 확보 시 검토되어야 한다. 기상 및 대기질 관측 지점 등은 그림 1(c)을 참조할 수 있다.

3. 연구 결과

3.1 기본모사 평가

2016년 모사 기간에 대한 기상모사 수행 평가를 위해 인천과 강화 2곳의 측정소를 대상으로 2 m 기온과 10 m 풍속을 비교하였다(그림 2). 관측된 2 m 기온(2 지점 평균 $12.8^{\circ}C$) 대비 모사값은 $12.4^{\circ}C$ 로 연평균 2 m 기온을 $0.4^{\circ}C$ 낮게 모사하나, 겨울에 낮고 여름에 높아지는 월별 변동성은 잘 나타난다. 모사된 10 m

풍속은 $2.8 m/s$ 으로 관측값($2.6 m/s$)을 10%가량 과대 모사하였다. 2 m 기온과 10 m 풍속에 대한 RMSE는 각각 $1.4^{\circ}C$, $0.9 m/s$ 이다.

그림 3은 대상기간 동안 인천의 15개 도시대기측정망에서 관측된 일평균 $PM_{2.5}$, NO_2 , SO_2 농도를 모사농도와 비교한 것이다. 2016년 평균 $PM_{2.5}$ 관측농도는 $26.4 \mu g/m^3$, 모사농도는 $33.0 \mu g/m^3$ 로, 약 $6.6 \mu g/m^3$ 가량 과대 평가하였다. 특히, 고농도 $PM_{2.5}$ 가 발생하는 3~4월 동안 과대 모사가 확인된다. 일평균 NO_2 관측 및 모사 농도는 각각 24.8 ppb, 30.6 ppb로, 여름철 동안의 과대 평가가 두드러진다. 모사기간 평균 SO_2 농도는 관측 6.1 ppb, 모사 7.3 ppb이며, 때때로 발생하는 고농도의 SO_2 피크(peak) 모사가 과대 평가를 유발한다.

$PM_{2.5}$ 구성성분 평가는 인천에 대해서는 수행하지 못하였고, 서울 대기환경연구소의 관측자료를 중심으로 평가하였다. 다만, 인천과 서울 두 지역 간 $PM_{2.5}$

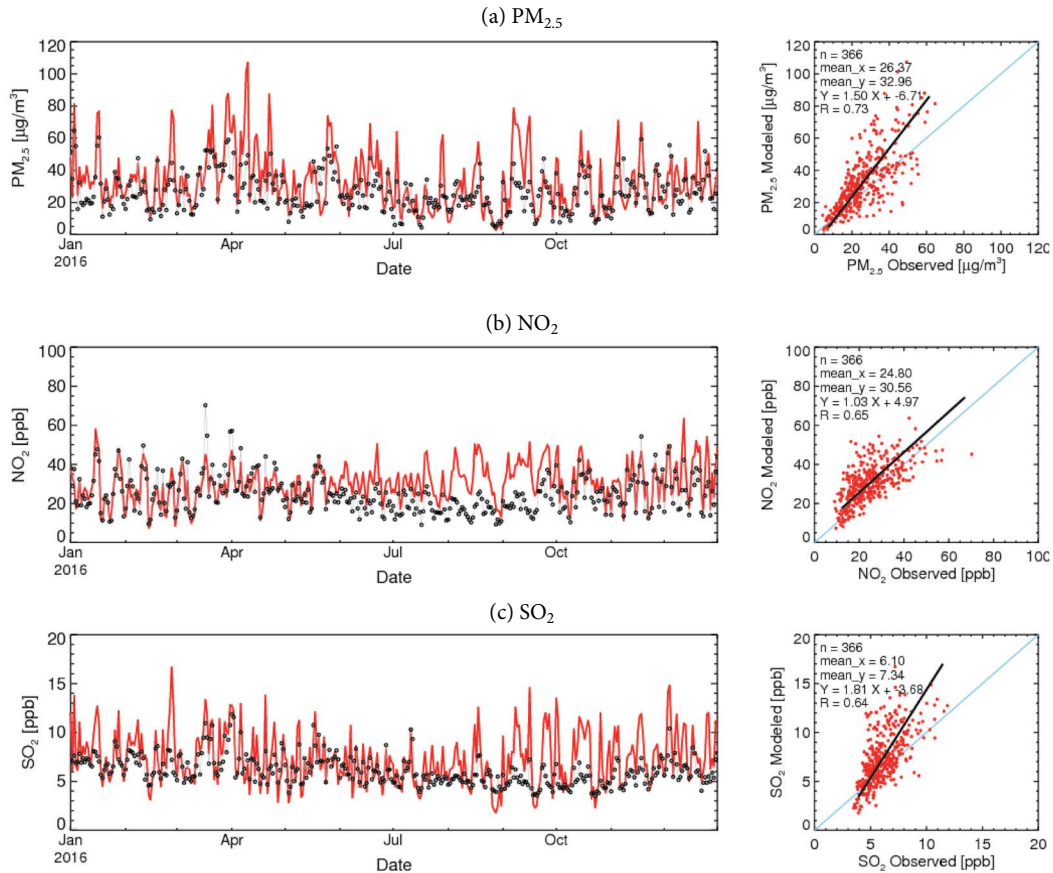


Fig. 3. Comparisons of the observed and simulated daily mean concentrations of (a) $PM_{2.5}$, (b) NO_2 , and (c) SO_2 at 15 urban air quality monitoring stations in Incheon for 2016. The black dots and red lines represent the observed and simulated daily mean concentrations, respectively.

농도의 상관성을 검토하였다(Fig. S2 참고). 모사기간 동안 수도권 대기환경연구소에서 관측된 $PM_{2.5}$ 농도는 $27.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 모사 농도는 $29.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이를 성분별로 보면, 황산염(관측농도 $5.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 모사농도 $6.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 질산염($5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)은 과대 평가하며, 이로 인해 암모늄도 과대 모사를 보인다. 이에 반해 OC는 관측농도 $3.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 모사농도 $2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 과소 모사를 보이며, 이 중 많은 부분이 1차 OC 배출에 의한 것으로 VOC에 의한 SOC 생성은 현재 모사에서는 제한적이다(Ke *et al.*, 2017; Morino *et al.*, 2017; Zhao *et al.*, 2016, 2015; Koo *et al.*, 2014). 국내에서 Volatile Basis Set (VBS) 등을 이용한 SOC 모사 개

선을 위해서는 국내의 VOC 배출량의 고도화와 함께 전반적인 모사 및 전처리 과정에 대한 수정이 우선되어야 한다.

3.2 국외 및 국내 $PM_{2.5}$ 기여농도와 기여율

인천은 경기도와 마찬가지로 대기오염물질의 장거리 이동에 의한 국외 영향이 국내 다른 지역에 비해 높을 것으로 예상된다(Bae *et al.*, 2020a; Bae *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2017b). 그림 5는 대상기간인 2016년에 대한 연평균 $PM_{2.5}$ 모사농도와 국외 $PM_{2.5}$ 기여율의 공간 분포를 인천을 중심으로 보인다. 모사된 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 서해상에 비해 내륙에서 높아지는

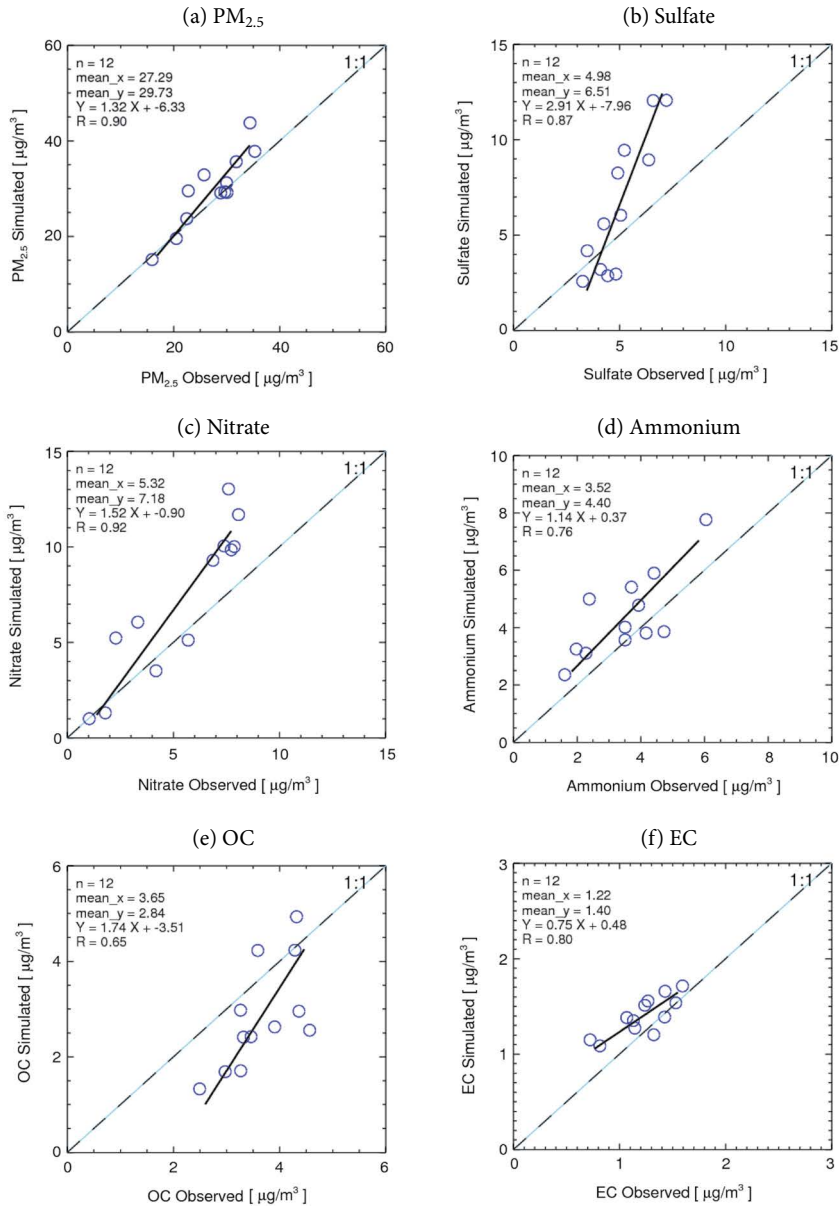


Fig. 4. Scatters between the observed and simulated monthly mean concentrations of (a) $PM_{2.5}$, (b) Sulfate, (c) Nitrate, (d) Ammonium, (e) OC, and (f) EC at the Bulgwang super site during the simulation period of 2016.

데, 이는 인천을 비롯한 내륙 지역에서는 대기오염물질의 장거리 이동 영향 외에 국내 배출의 영향이 더해지기 때문이다(그림 7 참조). 인천 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 기간 평균 국내 기여율은 38% (기여농도 $11.9 \mu g/m^3$), 국외 기여율은 62% (기여농도 $19.7 \mu g/m^3$)로 모

사되었다. 이를 지역별로 살펴보면, 서해상에 위치하는 웅진군(72%), 강화군(76%)과 인천국제공항이 위치하는 중구(68%) 등에서 $PM_{2.5}$ 모사 농도가 낮음에도 불구하고 국외 배출 기여율이 높게 나타난다. 이는 이들 지역에 대한 국내 배출의 $PM_{2.5}$ 기여농도가

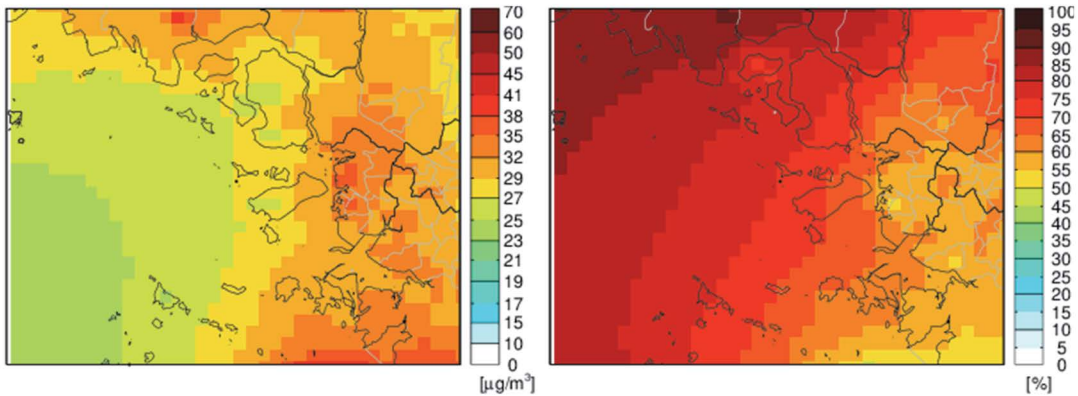


Fig. 5. Simulated annual mean $PM_{2.5}$ concentrations (left) and the relative foreign contributions (right) in and around Incheon during the simulation period of 2016.

상대적으로 낮기 때문이다. 그림 5에서 인천 지역을 도서 지역을 포함한 해안 지역과 내륙 지역으로 구분해 보면, 인구밀도가 높고 산업 교통 등 배출원이 많은 내륙 지역에서 중국 등 국외 기여율이 20% 정도 더 낮음을 확인할 수 있다. 정리하면, 인천 내 기초 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내 배출 기여농도는 기초 지자체의 위치에 따라 큰 차이를 보이며, 국내 배출관리에 의한 대기질 개선 효과 역시 지역별로 차이를 보일 수 있다.

그림 6(a)에서 2016년 인천의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국외 기여농도는 남동구에서 $19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮고 강화군에서 $21.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높아, 기초 지자체 간 최대 편차는 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다. 이에 반해 국내 $PM_{2.5}$ 기여농도는 기초 지자체별로 두 배 이상 ($6.7 \sim 14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 차이를 보이는데, 이에 따라 상대적인 국외 기여율 $\left(= \frac{\text{국외 기여농도}}{\text{국내 기여농도} + \text{국외 기여농도}} \times 100\% \right)$ 은 부평구에서 58%로 가장 낮고, 강화군에서 76%로 가장 높게 나타난다.

국내 배출 관점에서 살펴보면, 인천 지역에 대한 국내 기여농도가 평균 $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이므로, 국내 배출량을 50% 삭감할 경우 인천의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 대략 $6.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 개선될 것으로 추정된다. 각 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국내 기여농도는 강화군

($6.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 옹진군 ($7.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 그리고 중구 ($9.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 제외하면 12.0 (연수구)~ $14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (미추홀구)로 모사되었다.

인천 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국외 기여율과 국내 기여농도의 월별 변화를 그림 6(b)에서 살펴보면, 국내에서 고농도 $PM_{2.5}$ 가 발생하는 겨울철(1~2월, 12월) 동안에는 국외 기여율이 높아지며, 국내 기여농도는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 내외로 다른 월에 비해 다소 낮게 유지된다. 특히, 겨울철 동안 강화군과 옹진군의 국내 기여농도는 각각 5.3 , $6.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 낮은 수준이다. 기존 연구에서 겨울철 동안 수도권 지역에서 국내 기여농도가 북서풍의 주 풍향과 기온 등 기상 조건에 따라 다른 계절에 비해 낮아지는 것으로 보고된 바 있다(Oh *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2016; Kim *et al.*, 2009). 이처럼 추운 계절 동안 국내 기여농도가 낮아지는 동시에 국외 기여농도가 증가하므로, 상대적인 비율을 나타내는 국외 기여율은 높아진다. 국내 $PM_{2.5}$ 기여농도만을 고려하면, 인천 지역에서 겨울철 동안 국내 배출량이 50% 감소할 경우 $PM_{2.5}$ 농도는 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 감소한다. 이는 앞서 예시한 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 감소치 ($\sim 6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 낮다. 다만, 인천 지역 $PM_{2.5}$ 농도에 대한 국외 기여농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$) 또는 기여율(%)은 대기질 모사에 이용되는 국내외 배출목록에 따라 달라질 수 있다(Choi *et al.*, 2018; Kim *et al.*,

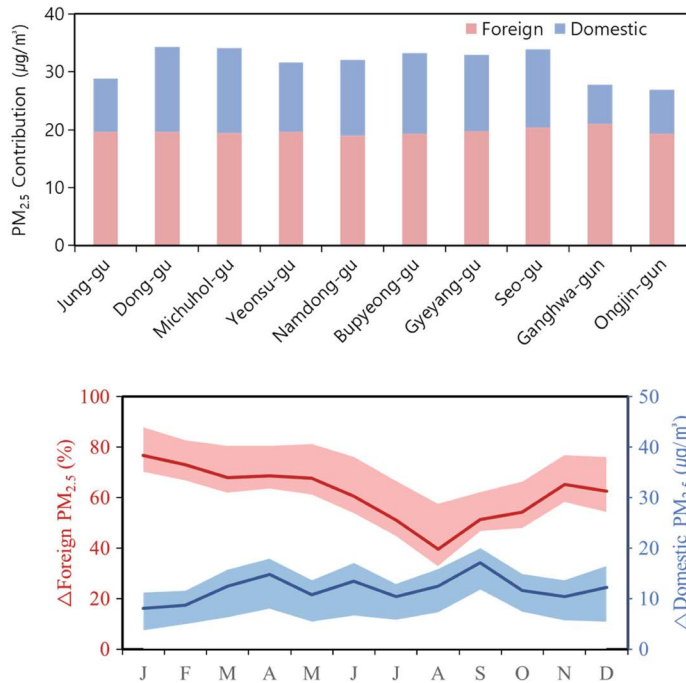


Fig. 6. Annual mean foreign and domestic PM_{2.5} contributions (top), and monthly variations of the relative PM_{2.5} contributions and the domestic contribution in Incheon (bottom) during the simulation period of 2016.

2017a). 따라서, 향후 인천에서 미산정 배출량 등이 보완되거나 수정된다면, 기초 지자체별 국내 기여농도 역시 달라질 수 있다.

3.3 자체 및 주변 지역 PM_{2.5} 기여농도

인천 PM_{2.5} 농도에 대한 서울, 경기, 충남 등 인접 지역의 배출 기여농도는 풍향 등 기상 조건에 따라 크게 달라질 수 있다. 특히, 고기압 등에 의한 바람 정체 시 발달할 수 있는 해륙풍 순환은 이들 인근 지역에 대한 배출 기여를 가중할 수 있는 요인이 된다. 따라서 본 절에서는 인천에서 배출된 대기오염물질에 의해 가중되는 자체 기여농도와 주변 지역 기여농도를 구분하여 살펴보았다.

그림 7에서 볼 수 있듯이 인천 자체 기여농도와 기여율 $\left(= \frac{\text{인천 자체 기여농도}}{\text{국내 기여농도} + \text{국외 기여농도}} \times 100\% \right)$ 은 동구구 (8.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 25%), 미추홀구 (8.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24%)가 가장

높으며, 그 다음으로는 부평구 (6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 21%)와 서구 (6.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 20%) 순이다. 주로 인구가 많이 밀집되어 있고 배출이 높은 지역에서 자체 기여도가 높다. 이와는 반대로 옹진군 (1.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 5%)과 강화군 (2.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 7%)에서는 자체 기여농도와 기여율이 가장 낮았는데, 인천 내의 다른 기초 지자체에 비해 20% 수준이다. 따라서, 향후 대기질 관리대책 마련 시 이에 대한 고려가 필요하다.

서울 배출량에 의한 인천의 연평균 PM_{2.5} 기여농도는 경기와 충남에 비해서는 낮는데, 이는 서울이 인천의 동쪽에 위치하는 지리적 조건과 서풍이 우세한 지역 기상 여건에 의한 것으로 판단된다(그림 7(b)). 서울 배출량이 인천 전 지역에 미치는 연평균 PM_{2.5} 기여농도는 0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도이나, 계양구와 부평구에서는 1.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 0.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기여농도를 각각 나타낸다.

그림 7(c)에서 경기 지역의 배출에 의한 인천 PM_{2.5}

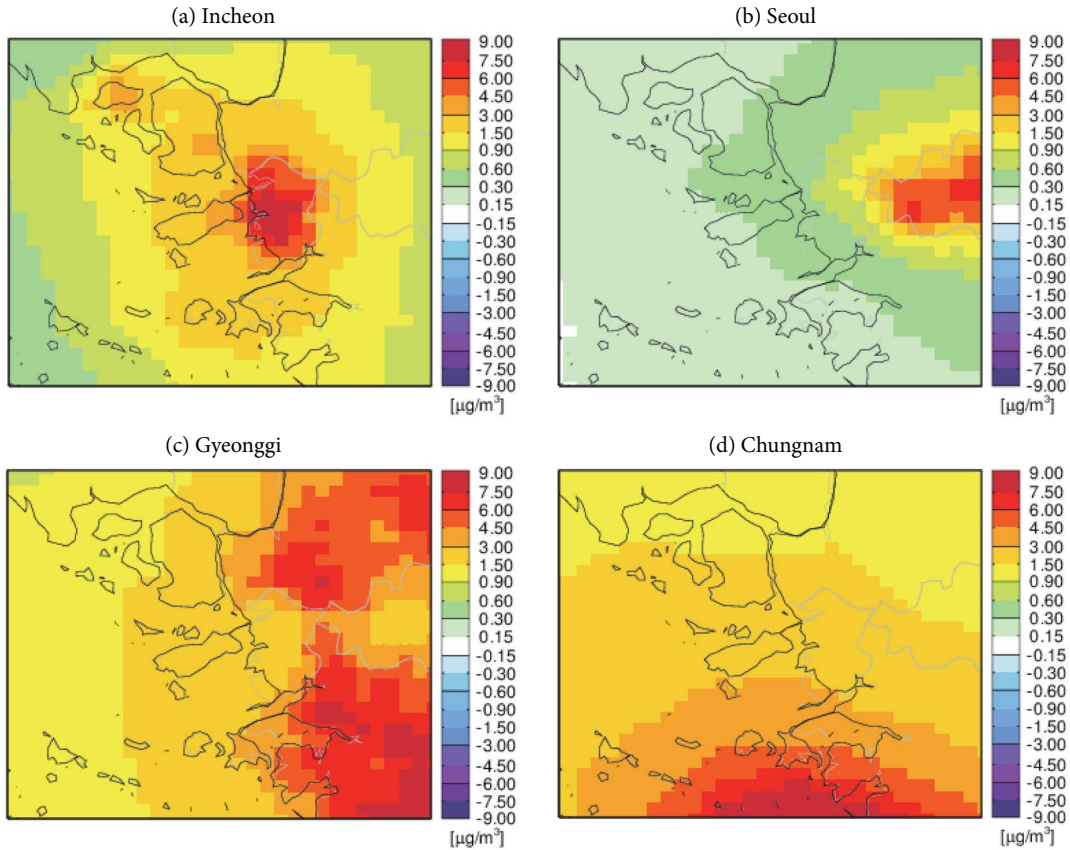


Fig. 7. Contributions of emissions released from (a) Incheon, (b) Seoul, (c) Gyeonggi, and (d) Chungnam to annual mean PM_{2.5} concentrations in ten local authorities in Incheon during the simulation period of 2016.

기여농도는 평균 2.5 µg/m³ 정도로 서울의 배출 기여농도보다 높다. 이를 인천 기초 지자체별로 살펴보면, 경기 배출량에 의한 PM_{2.5} 기여농도는 남동구에서 3.6 µg/m³ (PM_{2.5} 모사농도의 11%)로 가장 높으며, 그 다음으로는 계양구와 부평구에서 각각 3.3 µg/m³과 3.0 µg/m³의 기여농도를 보인다. 경기 배출량이 상대적으로 낮은 강화군과 용진군에서도 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 경기 배출 기여농도는 1.7 µg/m³과 1.4 µg/m³가량으로, 이는 인천 자체 기여농도와 비슷한 수준이다.

충남은 지리적으로 인천의 남쪽에 위치하므로, 그림 7(d)에서 보이듯 충남의 기여농도는 주로 인천의 남부 지역에서 높다. 인천 전 지역의 PM_{2.5} 농도에 대

한 충남의 기여농도는 평균 2.2 µg/m³가량으로 모사되며, 연수구에서 2.8 µg/m³로 가장 높은 충남 기여농도가 산정되었다. 참고로, 용진군의 PM_{2.5} 농도에 대한 충남의 기여농도는 1.6 µg/m³로 강화군과 유사하나, 다른 지역에 비해서는 낮은 편이다. 용진군의 경우 도서 지역으로 넓은 범위에 걸쳐 위치하는 지리 특성이 반영된 결과로 보이나, 그림 7(d)에서처럼 충남과 인접한 용진군과 덕적군도 등 일부지역에서는 상대적으로 높은 기여농도를 보인다.

그림 8은 그림 6(a)에 보인 국내 기여농도를 세분한 것으로, 인천 내의 기초 지자체에 대한 자체 및 주변 지역, 그리고 그 외의 국내 배출량에 의한 PM_{2.5} 기여율을 2016년 모사기간에 대해 제시하였다. 인천

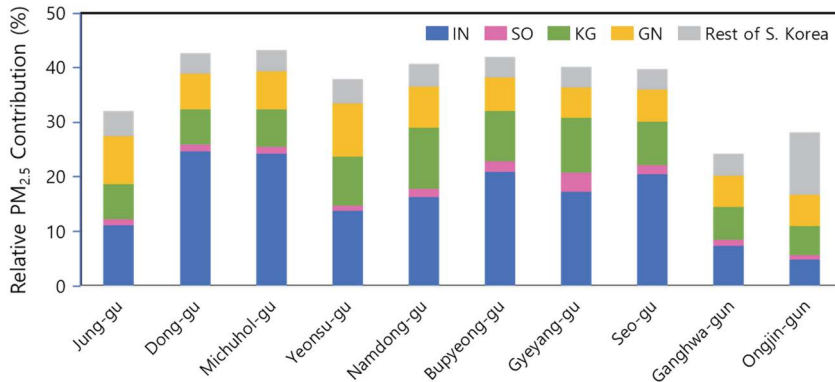


Fig. 8. Self- and inter-provincial relative contributions to annual mean PM_{2.5} concentrations in ten local authorities in Incheon during the simulation period of 2016. Acronyms named IN, SO, KG, and GN, Rest of South Korea represents Incheon, Seoul, Gyeonggi, Chungnam, and the remaining other provinces in the country, respectively.

에서 2016년 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 배출 기여율은 강화군에서 24%로 가장 낮으며, 미추홀구에서는 43%로 가장 높게 조사되었다. 동구, 미추홀구, 서구, 부평구에서는 주변 지역(서울, 경기, 충남) 기여율에 비해 인천 자체 기여율이 1.2~1.7배가량 높게 분석되었다. 인천의 그 외 다른 기초 지자체에서는 자체 기여율보다 주변 지역 기여율이 1.1~1.7배가량 높으며, 국내 타 지역 전체 기여율은 인천 자체 기여율에 비해 1.3~2.3배 높다. 특히, 옹진군에서는 주변 지역과 국내 타 지역 기여율이 인천 자체 기여율에 비해 각각 2.5배, 4.9배 높게 조사되었다. 이러한 결과는 인천의 PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 자체적인 배출량 저감 노력 이외에도 주변지역 배출관리를 위한 지자체 간 협력이 중요함을 시사한다.

3.4 PM_{2.5} 구성성분별 자체 및 주변 지역 기여도

그림 9는 인천의 PM_{2.5} 구성성분에 대한 자체 및 주변 지역의 연평균 기여농도를 보인다. 산정된 기여농도는 인천의 기초 지자체에 따라 공간적인 차이는 있으나, 전반적으로 1차 미세먼지 배출에 의한 기여농도가 가장 높다. 이는 1차 미세먼지는 대기 중으로 배출되면 화학적인 전환과정 없이 즉시 PM_{2.5} 농도에 반영되기 때문으로, 2차적으로 생성되는 PM_{2.5} 성분

들에 비해 배출 지역을 중심으로 높은 기여농도를 보인다. 인천에서 배출되는 1차 미세먼지는 평균 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 자체 기여농도를 보이며, 경기, 충남, 서울에서 배출되는 1차 미세먼지는 각각 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 기여농도를 보인다. 또한, 인천 자체 배출에 의한 1차 미세먼지 기여농도를 기초 지자체별로 구분하여 살펴보면, 옹진군에서는 0.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮고, 동구와 미추홀구에서는 각각 4.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 4.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 수치를 보인다.

1차 미세먼지와 유사하게 인천 중심부에서 높은 기여농도를 보이는 암모늄의 경우 모사기간 동안 인천 지역 평균 1.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 자체 기여농도를 보인다. 기초 지자체별로는 0.5~2.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 범위에서 연평균 암모늄 기여농도를 나타낸다. 특히, 암모니아 배출량이 많은 서구에서 암모늄 자체 기여농도가 가장 높게 조사되었다. 인천 암모늄 농도에 대한 주변 지역의 기여농도는 경기(0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 충남(0.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 가장 높다. 한편, 질산염 농도에 대한 인천의 자체 기여농도는 0.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 분석되었다. 경기와 충남의 NO_x 배출에 의한 인천의 질산염 기여농도가 각각 0.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 0.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 점을 감안하면, 인천의 질산염 농도 저감을 위해서 인접 지역의 NO_x 배출 관리가 중요한 것으로 보인다. 다만, 인천의 기초 지자체 중 NO_x 배출량이 중구 다음으로 높은 서구에서는 질산염 농도

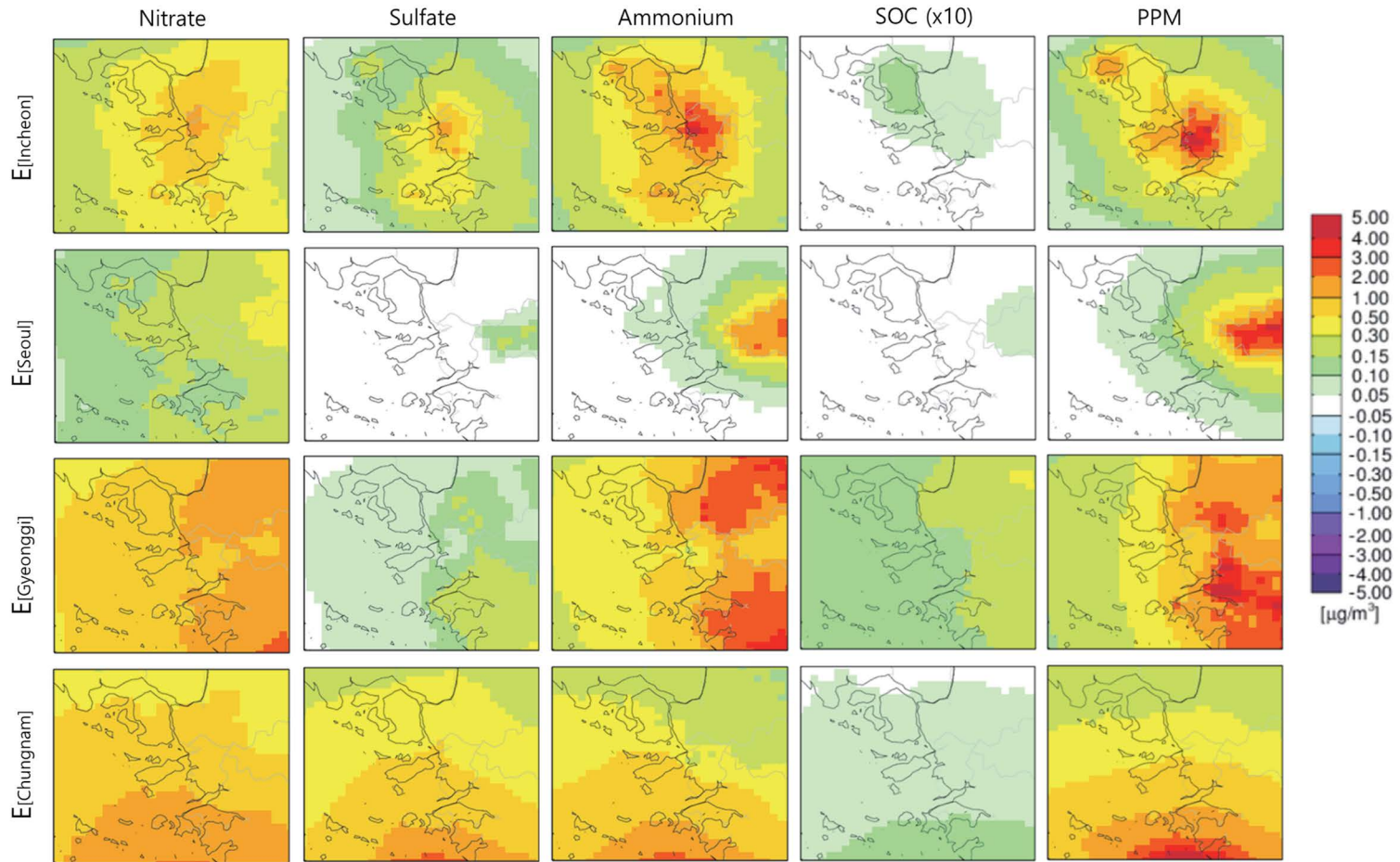


Fig. 9. Annual mean contributions of emissions released from Incheon (top), Seoul (upper middle), Gyeonggi (lower middle), and Chungnam (bottom) to nitrate, sulfate, ammonium, secondary organic carbon, and primary $\text{PM}_{2.5}$ during the simulation period of 2016.

에 대한 자체 기여농도가 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도까지 높아진다.

2016년 모사기간 중 인천의 황산염 농도에 대한 자체 기여농도는 평균 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 각 지자체별로는 $0.1\sim 0.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 자체 기여농도를 보인다. 한편, 충남의 SO_x 배출에 의한 인천 전 지역에 대한 황산염 기여농도는 평균 $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 이는 인천 자체 기여농도와 유사한 값이다. 다만, 연수구와 옹진군에서의 충남 배출량의 황산염 기여농도는 $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 높으며, 이는 두 기초 지자체가 충남과 인접해 있기 때문으로 이해된다.

SOC에 대한 기여농도는 그림 9에 제시하였으나, 앞서 언급한 바와 같이 본 연구에 이용된 광화학 격자 모델 버전과 현재 VOC 배출량만으로는 대기 중 SOC 농도 재현이 어려운 점을 고려하여 해당 기여농도에 대한 상세한 논의는 제외하였다(그림 4 참조). 이에 대한 정량적 기여농도 분석은 해당 배출량과 VBS 등을 활용한 에어로졸 모듈 개선 후 수행할 예정이다.

본 연구에서 산정된 인천 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 구성 성분별 기여농도 결과를 종합하면, $\text{PPM}_{2.5}$ 은 배출량 규모에 있어서는 NO_x 나 SO_x 등에 비해 작으나, 인천 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 기여농도는 다른 물질에 비해 높다. 또한, 인천의 기초 지자체 간에도 $\text{PPM}_{2.5}$ 에 대한 자체 기여농도가 10배 이상 차이를 보이므로 향후 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선에 있어 정확한 기초 지자체별 배출 자료 확보는 매우 중요해 보인다. 또한, 인천 지역 질산염 농도에 대한 국내 기여농도의 경우 자체 기여농도보다 주변 지역의 기여농도가 높았으며, 이로부터 대기질 개선을 위해서는 대기관리권역 등 인접 지자체 간의 상호 협력이 필수적임을 다시 한번 확인할 수 있다.

3.5 자체 및 주변 지역 기여농도의 월변화

그림 10에서 보이듯이 인천 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 자체 및 주변 지역의 기여율은 겨울철에 비해 여름철에 높다. 2016년 9월의 경우 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 자체 기여농도

는 동구에서 $10.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (자체 기여율 39%)로 가장 높았다. 이는 같은 월에 가장 낮은 값을 보인 옹진군 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (6%)에 비해 5배가량 높은 수치이다. 인천 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 서울과 경기도의 배출 기여농도는 상반기에는 $0.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 8~10월을 포함한 하반기에는 $0.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 50% 증가하였다. 충남의 기여농도는 상반기 $2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 하반기 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 3~9월 사이에는 평균 $2.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기여농도와 11%의 기여율을 보였다.

무기성 이온 성분 중 질산염의 기여도는 봄철과 가을철에 높아진다. 이는 봄철과 가을철의 경우 겨울철에 비해 기온이 상승하여 광화학 반응이 활발해지며 질산염 등 2차 미세먼지 생성이 증가하기 때문이다. 한편, 여름철의 경우에는 기온이 크게 높아지면서 총 질산염(total nitrate = $\text{NO}_3^- + \text{HNO}_3$) 중 질산염보다는 질산가스(HNO_3)으로 존재할 가능성이 높으며, 봄철과 가을철에 비해 질산염의 기여도가 낮다(Kim *et al.*, 2021a; Bae *et al.*, 2019). 국내 성분별 관측 자료에서도 이러한 질산염 농도의 계절 변화가 보고된 바 있다(Bae *et al.*, 2019).

인천 질산염의 자체 기여농도는 4월과 9월에 각각 $1.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 분석되었으며, 경기와 충남에 의한 인천의 질산염 기여농도는 각각 $1.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (9월)과 $1.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (4월)으로 파악되었다. 충남은 주로 상반기에, 경기는 주로 하반기에 인천 질산염에 대한 기여농도가 증가하였다. 겨울철(12~2월) 동안 인천 지역에서 질산염의 자체 기여농도는 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 낮았으며, 서울, 경기, 충남의 기여농도 또한 $0.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $0.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 낮았다. Kim *et al.* (2021b)은 겨울철 장거리 이동에 의한 HNO_3 의 국내 유입 가능성과 지역별 암모니아 조건에 따른 생성 과정이 달라짐을 보고하였다. 또한, 동북아의 다양한 암모니아 조건 변화에 따라 질산염 영향의 계절별, $\text{PM}_{2.5}$ 농도 구간별 변화 정도를 보고한 바 있다(Kim *et al.*, 2021a). 향후 국내의 겨울철 질산염 농도 증가는 많은 연구가 필요해 보인다.

인천 황산염 농도에 대한 국내 기여농도는 덩고 습

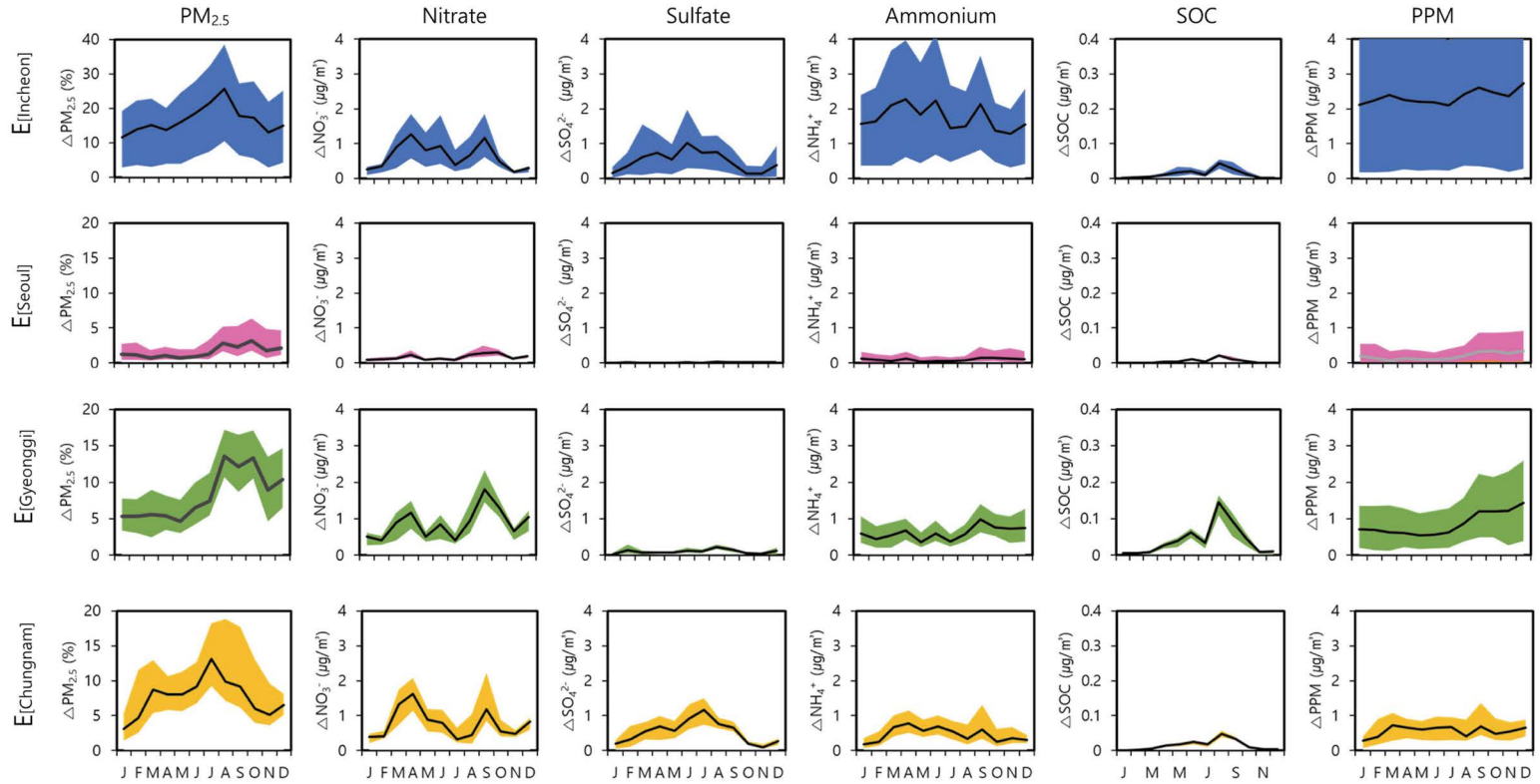


Fig. 10. Monthly contributions of emissions released from Incheon (top), Seoul (upper middle), Gyeonggi (lower middle), and Chungnam (bottom) to PM_{2.5}, nitrate, sulfate, ammonium, secondary organic carbon, and primary PM_{2.5} during the simulation period of 2016. Relative contribution (%) is used for PM_{2.5} while absolute contributions ($\mu g/m^3$) are used for other species. The ' Δ ' in the y-axis denotes contribution.

한 여름철에 높아진다. 이는 가스상과 액상 산화에 의한 황산염 생성이 겨울철보다는 여름철에 증가하기 때문이다. 또한, 북태평양 고기압의 발생으로 남풍 계열의 계절풍이 주요해지면서 SO₂ 배출량 많은 충남의 영향을 받기 때문이다(Bae *et al.*, 2020b; Bae *et al.*, 2019; Kim *et al.*, 2019). 인천 지역 황산염에 대한 자체 기여농도는 6월에 1.0 µg/m³, 충남 기여농도는 7월에 1.2 µg/m³로 가장 높았다.

인천 전 지역에 대한 암모늄 농도의 월평균 자체 기여농도는 1.3~2.3 µg/m³ 사이로 모사되며, 연평균 기여농도와 마찬가지로 기초 지자체 간 월평균 암모늄 기여농도의 차이는 계절에 상관없이 꾸준히 유지된다. 기초 지자체별로 볼 때, 암모니아 배출이 많은 지역에서 월평균 암모늄 자체 기여농도 역시 높다. 다만, 암모늄의 경우 PM_{2.5} 농도를 구성함에 있어 주로 질산암모늄과 황산암모늄의 형태로 존재하나, 인천의 연평균 또는 월평균 암모늄 기여농도는 질산염과 황산염 기여농도에 대한 당량비 대비 매우 높게 모사된다. 이는 인천을 포함한 국내는 대개 암모니아 풍부 조건으로(Park and Cho, 2020), 장거리 이동과 인접 지역으로부터 유입되는 질산암모늄과 황산암모늄의 전구물질 또는 중간물질과 인천에서 배출된 암모니아가 결합하는 과정이 더해지기 때문으로 판단된다(Kim *et al.*, 2021a). 다만, 인천을 포함한 국내의 경우 Adjusted Gas Ratio (AdjGR; Pinder *et al.*, 2008)가 많은 지역에서 1보다 높으므로(Park and Cho, 2020), 본 연구에서 제시된 암모늄의 기여농도가 높다고 해서 반드시 암모니아 배출관리가 PM_{2.5} 농도 저감에 효과적임을 의미하지는 않는다. Kim *et al.* (2021b)은 대기질 모사의 민감도를 통해 국내의 암모니아 풍부 또는 결핍 조건을 분석하였는데, 인천 내륙 중심부는 암모니아 풍부 조건으로 구분되나, 일부 해안 및 도서 지역에서는 암모니아 결핍으로 제시하였다. 이러한 결과는 인천 지역의 암모니아 배출 조건은 국내의 유입 영향 등을 따라 변화할 수 있으며, 특히 고농도 PM_{2.5} 발생 과정에 따라 암모니아 배출관리의 중요도가 달라질 수 있음을 의미한다. 본 절

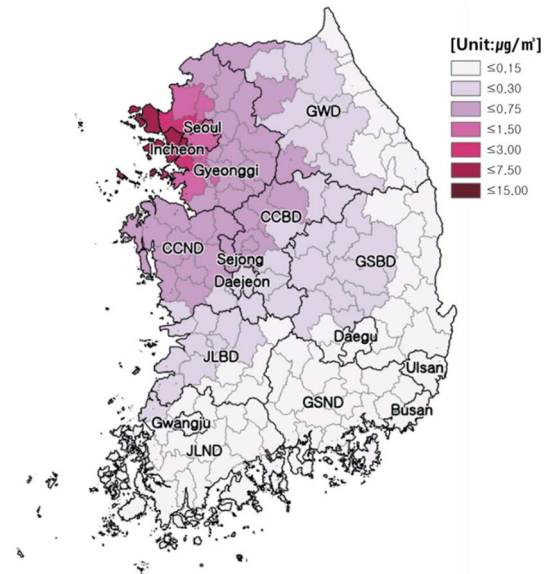


Fig. 11. Contributions of emissions released from Incheon to annual mean PM_{2.5} concentrations by individual local authorities in South Korea during the simulation period of 2016. 0.15, 0.30, 0.75, 1.50, 3.0, 7.0, and 15.0 µg/m³ in the legend are equivalent to 1, 2, 5, 10, 20, 50, and 100% of the national ambient air quality standard.

에서 논의된 PM_{2.5} 구성 성분의 경우, 모사에 이용된 국외 배출량에 대한 정량적 검증이 부족하므로 기여율 표기는 지양하였다. 제시된 기여농도는 모사에 이용된 국가 배출목록을 기반으로 PM_{2.5} 전구물질의 배출량 삭감에 의한 잠재적 농도 개선 폭의 확인과, 주요 구성성분 농도의 과대 과소 모사 등을 평가하는데 활용하는 것이 바람직해 보인다.

3.6 인천 배출에 의한 PM_{2.5} 기여농도

인천 지역의 배출량은 자체 및 수도권과 충남, 강원 등과 같은 수도권 지역에 영향을 미칠 수 있다. 그림 11은 제주도를 제외한 남한 전체에 대해 인천에서 배출되는 대기오염물질의 PM_{2.5} 연평균 기여농도를 보인다. 다만, 본 연구에서 분석한 배출 지역별 기여농도는 해당 배출 지역의 배출량 저감이 PM_{2.5} 연평균 대기환경기준 달성에 얼마나 유효한지 파악하는데 의의가 있다. 이를 체계적으로 설명하기 위해 그

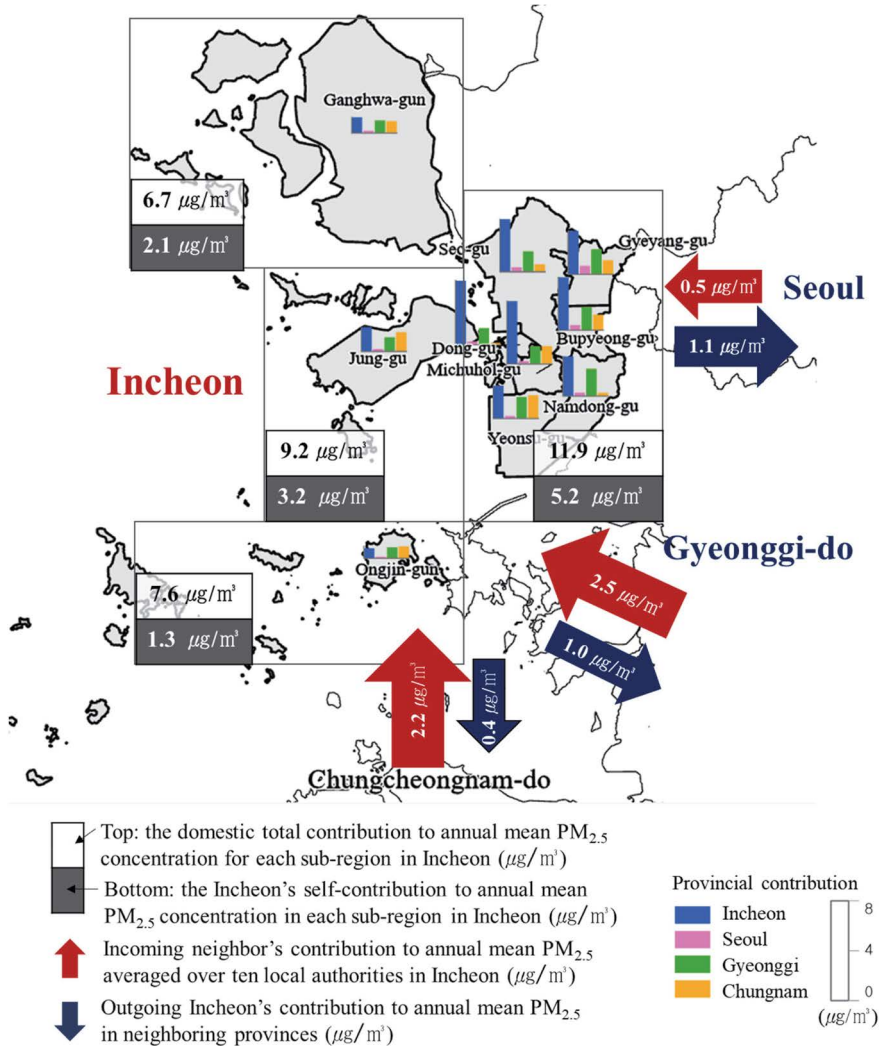


Fig. 12. Summary of PM_{2.5} contributions in and around four sub-regions of Inchoen during the simulation period of 2016. Four boxes show three insular sub-regions (Ganghwa-gun, Onjin-gun, and Jung-gu), and one inland sub-region encompassing seven local authorities, respectively, in Incheon.

림 11에서는 인천 배출의 기여농도 구간을 연평균 대기환경기준 ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)의 1, 2, 5, 10, 20, 50, 100 %에 해당하는 농도 구간으로 구분하여 제시하였다. 인천 배출량이 남한 전체의 PM_{2.5} 농도에 대한 기여농도는 지역적인 차이를 보이나, PM_{2.5} 연평균 대기환경기준의 1%에 해당하는 $0.15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 높은 값이 전국에 걸쳐 나타난다. 강원, 경북, 전북 등 일부 지역에서 연평균 PM_{2.5} 대기환경기준의 2% ($0.30 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 그리고

충남 대부분 지역, 충북과 강원 일부 지역에 대해서는 연평균 기준의 5% ($0.75 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이상의 기여농도를 보인다. 특히, 인천과 인접한 수도권 일부 지역에서는 연평균 대기환경기준의 10%와 20%에 해당하는 $1.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $3.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 상회하는 기여농도를 미친다. 이를 통해 인천은 주변 지역으로부터 대기오염물질의 배출 영향을 받는 동시에, 주변 지역의 대기질

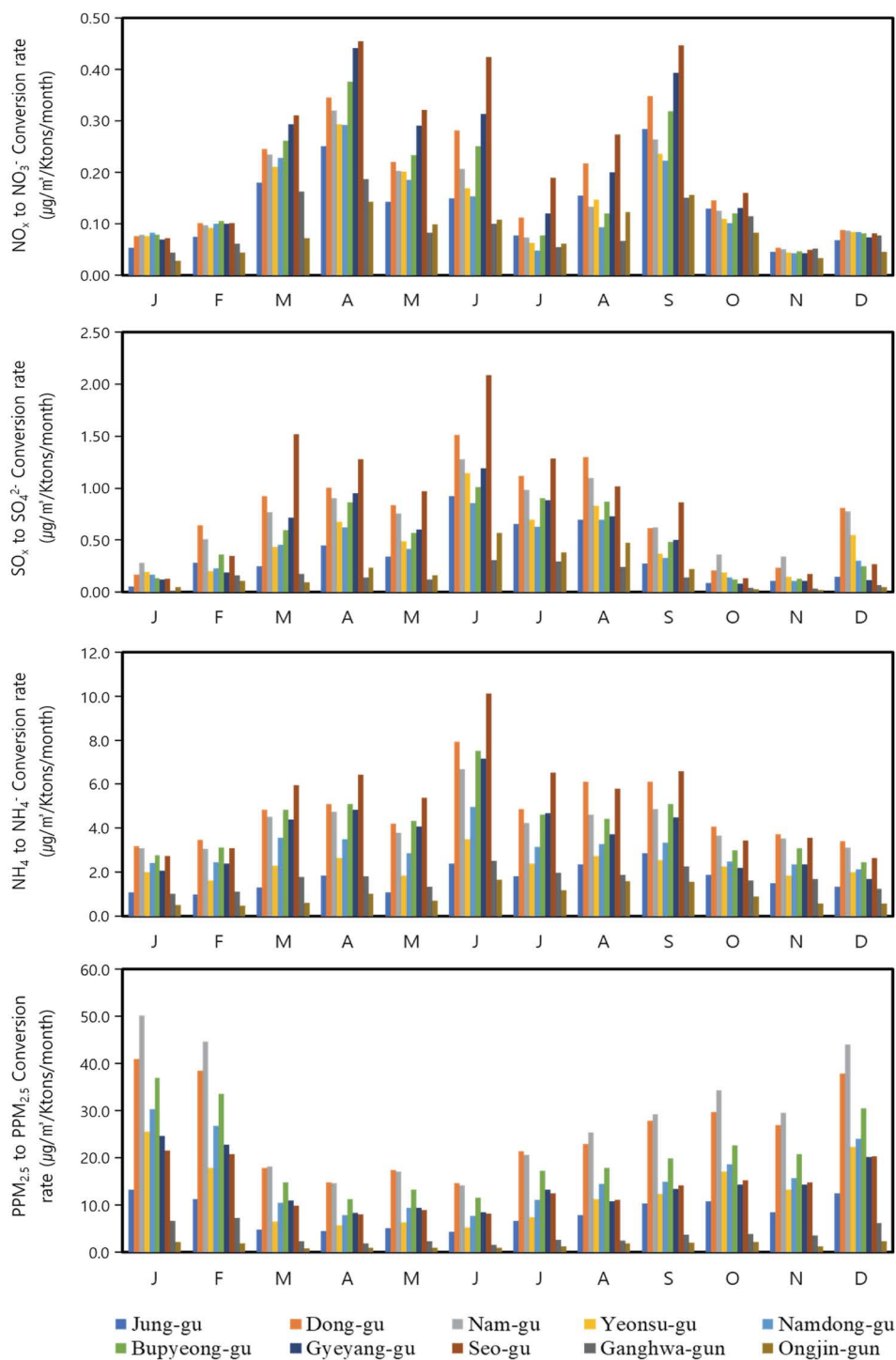


Fig. 13. Monthly conversion rates of NO_x, SO_x, NH₃, PPM_{2.5} emissions to nitrate, sulfate, ammonium, and PPM_{2.5} concentrations over ten sub-regions in Incheon during the simulation period of 2016.

에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 따라서, 광역 지자체 간의 상호 협력이 대기질 관리에 매우 중요할 것으로 판단된다.

그림 12는 앞서 제시한 결과들을 종합하여 정리한 것으로, 인천의 도서 및 해안 지역에 위치하는 강화군, 옹진군, 그리고 중구에서는 내륙에 위치하는 인천의 다른 지역에 비해 국내 기여농도와 인천의 자체 기여농도가 절반 가량으로 낮다. 특히, 주변 시도의 배출 기여농도를 보면, 서울과 인접한 계양구를 제외하면 인천 전 지역에 대한 서울의 기여율은 경기와 충남의 20~25% 수준이다. 이와 다르게 서울과 경기의 PM_{2.5} 농도에 대한 인천 배출 기여농도는 1 µg/m³ 내외로 충남의 PM_{2.5} 농도에 대한 기여농도 대비 2배 이상 높다.

인천~서울 간 상호 기여농도는 인천의 유출 기여농도가 2배가량 높으며, 인천~경기 간에는 인천으로의 유입 기여농도가 경기 지역으로의 유출 기여농도에 비해 2.5배 높다. 인천~충남 간의 기여농도는 인천의 유입 기여농도가 유출 기여농도에 비해 5배 이상 높는데, 이는 충남의 주요 배출지역이 인천과 인접한 충남 북부지역에 위치하는 공간적 특성이 반영된 것으로 보인다. 옹진군을 제외하면 인천 자체 기여농도가 주변 지역의 배출 기여농도보다 높으며, 특히 내륙에 위치한 인천의 기초 지자체에서는 자체 기여농도가 주변 지역 기여농도에 비해 뚜렷이 높다. 다만, 주변 지역을 포함한 국내 다른 지역의 기여농도에 비해 자체 기여농도가 낮은 점은 향후 인천 지역에서 PM_{2.5} 농도 개선을 위한 대책 수립 시 고려되어야 할 사안으로 판단된다.

3.7 인천 배출량의 PM_{2.5} 농도 자체 전환율

본 절에서는 PSAT 결과를 이용하여 인천에서 배출된 전구물질이 얼마나 인천의 기초 지자체별 농도에 기여하는지를 단위 배출량당 자체 농도 전환율(=기초 지자체별 기여농도/인천 전체 배출량)로 산정하였다. 그림 13에서 인천에서의 연평균 NO_x → NO₃⁻ 전환율은 1.3 × 10⁻² µg/m³/ktpy (kilo-tons per year)이

다. NO_x → NO₃⁻ 전환율의 월별 변화는 그림 10에 제시한 질산염 농도의 월 변화와 유사한 계절 변화를 보인다. 4월과 9월의 NO_x → NO₃⁻ 전환율은 각각 0.31, 0.28 µg/m³/ktpm (kilo-tons per month)으로, 고농도 PM_{2.5}가 발생하는 1월(0.07 µg/m³/ktpm)과 2월(0.09 µg/m³/ktpm)에 비해 4~5배 높다. 이는 1월과 2월보다는 3월과 4월에 NO_x 배출 저감에 따른 인천의 PM_{2.5} 농도 개선 효과가 그만큼 높아지는 것을 의미한다. 또한, 1월과 2월 동안 NO_x 배출량 저감에 따른 PM_{2.5} 농도 감소를 위해서는 다른 월에 비해 추가적인 NO_x 배출 감소가 필요하다. 기초 지자체별로는 옹진군과 강화군에서 상대적으로 낮은 NO_x → NO₃⁻ 전환율을 보이는데, 이는 이들 지역에서 NO_x 배출량이 낮고(부록 그림 1 참조), 다른 인천지역에서 배출되는 NO_x 영향을 덜 받기 때문이다. 다만, 동구나 연수구 등 옹진군에 비해 낮은 NO_x 배출을 보이는 지역에서는 질산염 기여농도와 전환율이 높다. 본 연구에서 제시된 기여농도와 전환율은 기초 지자체별 배출량이 아닌, 인천 전체 지역에 대한 배출량을 대상으로 분석하였다. 따라서, 동구나 연수구는 해당 기초 지자체의 NO_x 배출량은 낮으나, 인천 내의 인근 기초 지자체에서 배출된 NO_x 배출 영향을 포함한다.

인천 전 지역의 SO₂ 배출량이 황산염 농도에 미치는 자체 기여농도를 이용하여 살펴본 SO₂ → SO₄²⁻ 전환율은 연평균 4.2 × 10⁻² µg/m³/ktpy로 NO_x → NO₃⁻ 전환율에 비해 3배가량 높다. 인천의 NO_x 배출량은 SO₂ 배출량의 4배 정도이므로 이들 두 물질이 인천의 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여농도는 유사하다. 다만, SO₂ → SO₄²⁻ 전환율은 1월과 2월에는 각각 0.13 µg/m³/ktpm, 0.30 µg/m³/ktpm 정도로 낮고, 6~8월 동안에는 0.78~1.09 µg/m³/ktpm가량으로 높아진다. 연평균 SO₂ → SO₄²⁻ 전환율을 기준으로 보면 강화군이 1.2 × 10⁻² µg/m³/ktpy로 가장 낮고, 서구는 7.0 × 10⁻² µg/m³/ktpy로 가장 높은 수치를 보여 기초 지자체별 편차가 크다. SO_x 배출량이 선박이나 항만 등에서 많이 배출되는 점을 고려하면(Lee *et al.*, 2020), 인천에서는 비도로 이동오염원 등의 SO_x 배출

량 평가와 관리 방안 마련이 중요해 보인다.

인천에서 연평균 $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$ 전환율은 $26.3 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpy}$ 로 질산염과 황산염의 전환율에 비해 월등히 높다. $\text{NH}_3 \rightarrow \text{NH}_4^+$ 전환율의 월별 변화는 황산염과 유사하게 겨울철에 감소하고 봄철과 여름철에 증가한다. 1월과 2월에는 $2.0, 2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpm}$ 로 낮으며, 6월과 9월에 각각 $5.4, 4.0 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpm}$ 으로 높은 전환율을 보인다. 기초 지자체별로는 암모니아 배출량이 가장 높은 서구에서 연평균 전환율이 $43.2 \times 10^{-2} \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpy}$ 로 가장 높다. 암모니아의 경우 국내 배출량에 대한 불확도가 높으며 국외 이동 영향도 보고되는 점을 고려하면, 보다 심도 깊은 논의가 필요하다 (Park et al., 2020; Song et al., 2020).

인천의 $\text{PPM}_{2.5}$ 전환율은 봄철이 가장 낮은 U자형 월별 변화를 보인다. 4월에 지역 평균 $7.7 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpm}$ 로 가장 낮으며, 1월과 12월에는 각각 $25.1, 22.0 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpm}$ 의 전환율을 보여 3배 이상 차이를 보인다. $\text{PPM}_{2.5}$ 의 경우 앞서 언급한 바와 같이 화학 변환 과정이 생략되기 때문에 월별 전환율의 차이는 풍속과 혼합고 등 기상 조건 변화로 인한 물리적인 이류와 확산 정도에 따라 달라지는 것으로 이해된다. 모사기간 동안 연평균 $\text{PPM}_{2.5}$ 배출의 농도 전환율은 인천 평균 $1.2 \mu\text{g}/\text{m}^3/\text{ktpy}$ 로 산정되었으며, 다른 물질에 비해 월등히 높은 수치이다.

한편, 본 연구에서는 2016년 국가배출목록을 기반으로 대기질 모사를 수행하였으나, 최근 공개된 2017년 국가배출목록으로부터 인천에서 배출되는 NO_x (2016년 대비 25%), SO_x (8%), NH_3 (7%), CO (25%), VOC (8%), 1차 $\text{PM}_{2.5}$ (39%) 등 대기오염물질 배출량이 크게 증가한 것을 알 수 있었다. 배출량 변화의 상대적 비율을 이용하여 2017년에 대한 기여농도를 다시 산정해 보면, $\text{PPM}_{2.5}$ 배출에 의한 인천 자체 기여농도는 2016년 배출목록 이용 대비 $0.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 증가한다. 같은 방법으로 인천의 NO_x 배출량 25% 증가는 기여농도를 $0.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도 증가시킨다. 인천 자체 기여농도가 $1.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 기여율은 38%에서 5% 상승하여 43%가 된다.

4. 결 론

인천은 서울과 경기도 인접한 한편, 강화군과 옹진군 등 도서 지역을 포함하고 있어 국내 배출저감에 따른 대기질 개선 효과가 지역적으로 차이를 보일 수 있다. 본 연구에서는 2016년 국가 배출목록을 기반으로 표식 방법을 이용한 대기질 모사를 통해 인천 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 국내외 기여농도와 자체 및 주변 지역에 대한 기여농도를 기초 지자체 수준에서 살펴보았다.

인천의 10개 기초 지자체에 대해 국외 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도는 강화군이 $21.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높고, 남동구가 $19.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 낮아 최대 $2.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 편차를 보였다. 이에 반해 2016년 국가 배출목록을 이용한 인천의 기초 지자체별 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도는 $6.7 \sim 14.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 $11.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 산정되어, 기초 지자체별로 2배 이상의 차이를 보였다. 이러한 인천 기초 지자체 간 국내 기여농도의 편차는 국외 기여율 산정에도 영향을 미친다. 향후 인천 전 지역에 대한 대기질 개선대책 수립 시에는 도서 및 해안 지역을 공단이나 교통이 밀집한 지역과 분리하여 접근하는 것에 대한 고민이 필요하다.

인천의 중심에 위치하는 기초 지자체들은 상대적으로 높은 배출량과 기초 지자체 간 인접성으로 인천 배출에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 자체 기여도 ($5.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$)가 국내 배출 기여도의 절반 정도를 차지하였다. 반면, 도서 및 해안에 위치하는 옹진군, 강화군, 중구에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 국내 기여농도 중 2/3 이상이 인천이 아닌 국내 타 지역으로부터 기인하는 것으로 분석되었다. 특히, 경기 ($2.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$)와 충남 ($2.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 지역의 배출에 의한 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도가 높게 나타나는 점을 고려하면, 이들 광역 지자체와의 협력을 통한 대기질 개선 대책을 도모하는 것이 인천 지역의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선에 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

배출물질별로는 $\text{PPM}_{2.5}$ 의 기여농도가 가장 높았으며, 그 다음으로는 암모늄, 질산염, 황산염 순이었다. 2차 무기성 성분들은 계절별로 기여농도뿐만 아

나라 전환율에서도 큰 차이를 보이므로, 이를 감안한 대책 마련이 필요해 보인다. 특히, 2016년과 2017년 국가배출목록에서 인천 지역의 배출량이 크게 증가한 점은 현재 이들 배출량에 대한 불확도 범위가 크고, 아직 배출목록에 포함되지 못한 배출량이 존재할 수 있음을 의미한다. 따라서 관측이나 대기질 모사 등을 통해 이러한 불확도를 검토해 나가는 과정이 필요하다.

감사의 글

고 변대원 교수님의 10주기를 맞아 예전의 열정적이고 헌신적이었던 그 모습을 다시 떠올리게 됩니다. 감사합니다.

References

- Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2019) Long-Range Transport Influence on Key Chemical Components of $PM_{2.5}$ in the Seoul Metropolitan Area, South Korea, during the Years 2012-2016, *Atmosphere*, 11(1). <https://doi.org/10.3390/atmos11010048>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2020a) 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., Yoo, C., Kim, S. (2020b) Estimating the Shutdown Effect of the Old Coal-fired Power Plants on $PM_{2.5}$ and its Composition, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(1), 48-63, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.1.048>
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in Models-3, US EPA. <https://cfpub.epa.gov/si/> (accessed on July 20, 2020).
- Choi, K.-C., Lim, Y., Lee, J.-B., Nam, K., Lee, H., Lee, Y., Myoung, J., Kim, T., Jang, L., Kim, J.S., Woo, J.-H., Kim, S., Choi, K.-H. (2018) Evaluation of the Simulated $PM_{2.5}$ Concentrations using Air Quality Forecasting System according to Emission Inventories - Focused on China and South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(2), 306-320, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.2.306>
- 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(11), 3181-3210.
- Ju, H., Bae, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Yoo, C., Kim, S. (2018) $PM_{2.5}$ Source Apportionment Analysis to Investigate Contributions of the Major Source Areas in the South-eastern Region of South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(4), 517-533, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.4.517>
- Ke, W., Zhang, S., Wu, Y., Zhao, B., Wang, S., Hao, J. (2017) Assessing the Future Vehicle Fleet Electrification: The Impacts on Regional and Urban Air Quality, *Environmental Science & Technology*, 51(2), 1007-1016. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04253>
- Kim, E., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018a) Evaluation of the Effectiveness of Emission Control Measures to Improve $PM_{2.5}$ Concentration in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(3), 469-485, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.3.469>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021a) Sensitivity of fine particulate matter concentrations in South Korea to regional ammonia emissions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*, 273, 116428. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116428>
- Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021b) Direct and cross impacts of upwind emission control on downwind $PM_{2.5}$ under various NH_3 conditions in Northeast Asia, *Environmental Pollution*. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2020.115794>
- Kim, E., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2019) $PM_{2.5}$ Simulations for the Seoul Metropolitan Area: (VI) Estimating Influence of Sectoral Emissions from 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., Lee, S.-M., Chai, T., Ngan, F., Pan, L., Lee, P. (2018b). A Conservative Downscaling of Satellite-Detected

- Chemical Compositions: NO₂ Column Densities of OMI, GOME-2, and CMAQ, Remote Sensing, 10(7), 1001. <https://doi.org/10.3390/rs10071001>
- Kim, H.C., Kim, E., Bae, C., Cho, J.H., Kim, B.-U., Kim, S. (2017a) Regional contributions to particulate matter concentration in the Seoul metropolitan area, South Korea: seasonal variation and sensitivity to meteorology and emissions inventory, Atmospheric Chemistry and Physics, 17(17), 10315-10332. <https://doi.org/10.5194/acp-17-10315-2017>
- Kim, 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. (2017b) Recent increase of surface particulate matter concentrations in the Seoul Metropolitan Area, Korea, Scientific Reports, 7(1), 4710. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-05092-8>
- Kim, O., Bae, M., Kim, S. (2020) Evaluation on Provincial NO_x and SO₂ Emissions in CAPSS 2016 Based on Photochemical Model Simulation, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(1), 64-83, (in Korean with English abstract). <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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.2.139>
- Kim, S., Bae, C., Kim, E., You, S., Bae, M., Lee, J.-B., Seo, I., Lim, Y., Kim, B.-U., Kim, H.C., Woo, J.-H. (2017d) Domestic Ozone Sensitivity to Chinese Emissions Inventories: A Comparison between MICS-Asia 2010 and INTEX-B 2006, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 33(5), 480-496, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2017.33.5.480>
- Kim, Y.J., Woo, J.-H., Ma, Y.-I., Kim, S., Nam, J.S., Sung, H., Choi, K.-C., Seo, J., Kim, J.S., Kang, C.-H. (2009) Chemical characteristics of long-range transport aerosol at background sites in Korea, Atmospheric Environment, 43(34), 5556-5566. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2009.03.062>
- Koo, B., Knipping, E., Yarwood, G. (2014) 1.5-Dimensional volatility basis set approach for modeling organic aerosol in CAMx and CMAQ, Atmospheric Environment, 95, 158-164. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.031>
- Korean Statistical Information Service (KOSIS) (2020) <https://kosis.kr/index/index.do> (accessed on Oct 06, 2020).
- Lee, J.S., Choi, S.I., Lee, C.D., Bang, K.I., Kwon, M.J., Dong, J.I. (2020) A Study on the Improvement of Temporal Resolution and Application of CMAQ Simulations for Quantitative Assessment on Source Contribution of Emissions from Cargo Ships Focused on PM_{2.5}, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 36(1), 93-107, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.1.093>
- Ministry of Environment (MOE) (2019) Seasonal PM_{2.5} Management System, <http://www.me.go.kr/home/web/board/read.do?menuId=290&boardMasterId=39&boardCategoryId=55&boardId=1407380> (accessed on Nov 02, 2020).
- Morino, Y., Ueda, K., Takami, A., Nagashima, T., Tanabe, K., Sato, K., Noguchi, T., Ariga, T., Matsuhashi, K., Ohara, T. (2017) Sensitivities of Simulated Source Contributions and Health Impacts of PM_{2.5} to Aerosol Models, Environmental Science & Technology, 51(24), 14273-14282. <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b04000>
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) ANNUAL REPORT OF AIR QUALITY IN KOREA 2017 (in Korean). https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on 2018).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) ANNUAL REPORT OF AIR QUALITY IN KOREA 2018 (in Korean). https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on 2019).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) ANNUAL REPORT OF AIR QUALITY IN KOREA 2019 (in Korean). https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on 2020).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) National air pollutants emission, <http://airemiss.nier.go.kr/mbshome/mbshome/airemiss/index.do> (accessed on Oct 29, 2019).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2020) MONTHLY REPORT OF AIR QUALITY, JAN. 2020 (in Korean). https://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on March, 2021).
- Oh, H.-R., Ho, C.-H., Koo, Y.-S., Baek, K.-G., Yun, H.-Y., Hur, S.-K., Choi, D.-R., Jhun, J.-G., Shim, J.-S. (2020) Impact of Chinese air pollutants on a record-breaking PMs

- episode in the Republic of Korea for 11-15 January 2019, *Atmospheric Environment*, 223. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117262>
- Park, H., Cho, S. (2020). The Effects of NH₃ Emission Reduction on Secondary Inorganic Aerosols Evaluated by CMAQ, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(3), 375-387, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.3.375>
- Park, J., Ryoo, J., Jee, J., Song, M. (2020) Origins and Distributions of Atmospheric Ammonia in Jeonju during 2019~2020, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 262-274, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.2.262>
- Pinder, R.W., Dennis, R.L., Bhavsar, P.V. (2008) Observable indicators of the sensitivity of PM_{2.5} nitrate to emission reductions-Part I: Derivation of the adjusted gas ratio and applicability at regulatory-relevant time scales, *Atmospheric Environment*, 42(6), 1275-1286. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2007.10.039>
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split non-hydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227, 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Song, M., Kim, M., Kim, M., Lee, K.-H., Bae, M.-S. (2020) Relationship between Long-range Transport of Ammonia and Ammonium in Wintertime in Suburban Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(4), 543-557, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2020.36.4.543>
- Wang, J., Xu, J., He, Y., Chen, Y., Meng, F. (2016) Long range transport of nitrate in the low atmosphere over Northeast Asia, *Atmospheric Environment*, 144, 315-324. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.08.084>
- 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
- Yoo, H., Kim, J., Shin, J., Kim, Y., Min, S., Jegal, D., Bang, K., Lee, S. (2017) Health Vulnerability Assessment for PM₁₀ due to Climate Change in Incheon, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 43(3), 240-246. <https://doi.org/10.5668/jehs.2017.43.3.240>
- Zhao, B., Wang, S., Donahue, N.M., Chuang, W., Hildebrandt Ruiz, L., Ng, N.L., Wang, Y., Hao, J. (2015) Evaluation of one-dimensional and two-dimensional volatility basis sets in simulating the aging of secondary organic aerosol with smog-chamber experiments, *Environmental Science & Technology*, 49(4), 2245-2254. <https://doi.org/10.1021/es5048914>
- 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*, 6, 28815. <https://doi.org/10.1038/srep28815>

Authors Information

- 김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)
 유승희 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
 강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구교수)
 김은혜 (아주대학교 환경안전공학과 강사)
 배민아 (아주대학교 환경공학과 박사과정)
 손규원 (아주대학교 환경공학과 석사과정)
 김윤하 (아주대학교 환경연구소 연구원)
 김병욱 (Program Manager I, Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA)
 김현철 (Research Scientist, Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD, USA)

Supplementary Materials

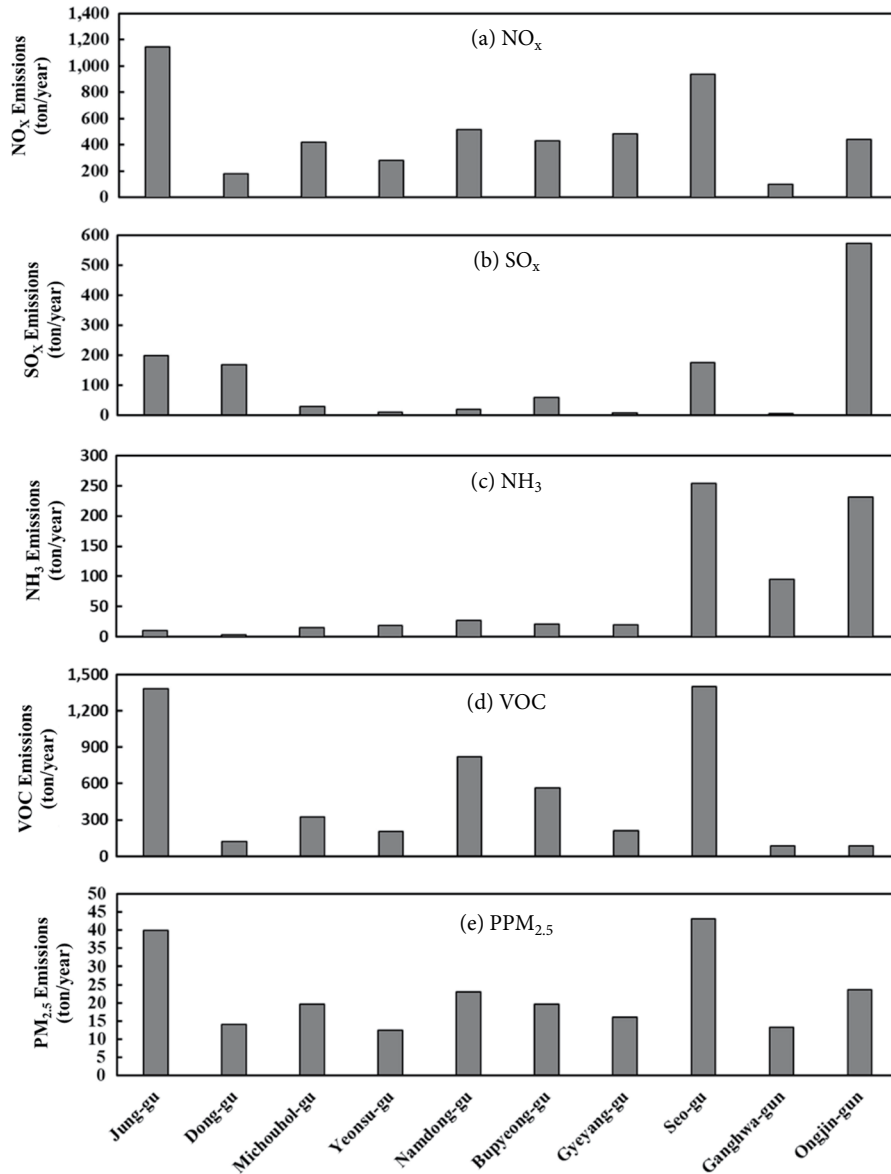


Fig. S1. Annual emission rates of (a) NO_x , (b) SO_x , (c) NH_3 , (d) VOC, and (e) Primary $\text{PM}_{2.5}$ released from ten local authorities in Incheon based on CAPSS 2016.

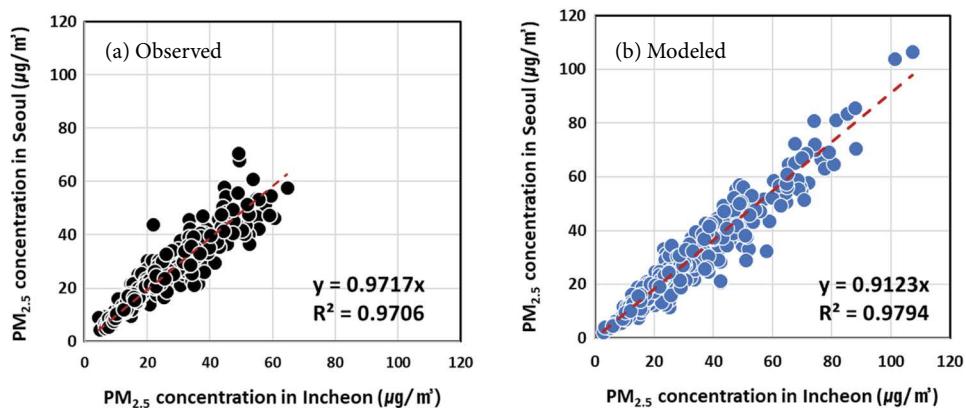


Fig. S2. Scatters of (a) observed, and (b) modeled daily mean PM_{2.5} concentrations between Incheon and Seoul during the simulation period of 2016. The observational data from twenty-five and fifteen monitoring stations at Seoul and Incheon respectively were used. Modeled data for Seoul and Incheon were extracted from the cells covering those two regions, respectively.