

논문

배출목록 기반 국내 PM_{2.5} 농도와 노출 감소에 효과적인 주요 배출 지자체 선정

Prioritizing Local Authorities Effective to Lower the Nationwide PM_{2.5} Concentrations and the Personal Exposure Based on the Source Apportionment with the CAPSS 2016 Emissions Inventory

배창한, 김은혜¹⁾, 유 철, 김형천, 김영민²⁾, 김순태³⁾,*

국가미세먼지정보센터 배출량조사팀, ¹⁾아주대학교 환경연구소,

²⁾국가미세먼지정보센터 정책지원팀, ³⁾아주대학교 환경안전공학과

접수일 2021년 3월 19일
수정일 2021년 4월 27일
채택일 2021년 5월 7일

Received 19 March 2021
Revised 27 April 2021
Accepted 7 May 2021

*Corresponding author

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

E-mail : soontaekim@ajou.ac.kr

Changhan Bae, Eunhye Kim¹⁾, Chul Yoo, Hyung-Chun Kim,
Young Min Kim²⁾, Soontae Kim³⁾,*

Emission Inventory Management Team, National Air Emission
Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

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

²⁾Policy Support Team, National Air Emission Inventory and Research Center, Cheongju, Republic of Korea

³⁾Department of Environmental & Safety Engineering, Ajou University, Suwon, Republic of Korea

Abstract We quantitatively estimated the PM_{2.5} contributions of SO₂, NO_x, NH₃, VOC, and Primary PM_{2.5} (PPM_{2.5}) emissions released from the local authorities in South Korea for 2016. The Comprehensive Air Quality Model with extensions (CAMx) equipped with the Particulate Source Apportionment Technology (PSAT) was applied to simulate the concentrations and contributions of the criteria air pollutants. The self-contributions and the rest domestic contributions to the annual mean PM_{2.5} concentrations in the local authorities ranged from 0.2 to 18.0 µg/m³ (average: 1.7 µg/m³), and 1.9 to 14.5 µg/m³ (average: 7.1 µg/m³), respectively. The top-10 local authorities (Dangjin, Pohang, Incheon, Gwangyang, Ulsan, Seoul, Seosan, Boryeong, Yeosu, Taean) that show the highest nationwide PM_{2.5} contributions accounted for 35% of the domestic total contribution. SO₂, NO_x, and PPM_{2.5} emissions from the top-10 local authorities accounted for 65%, 49%, 31% of the domestic total while production processes, combustion in manufacturing industry, combustion in energy production, and transportation were the dominant emission sources in the areas. It means that selecting the key emission regions and sources at the local authority level would be effective to reduce the PM_{2.5} concentration. Population weighted exposure contribution (PWEC) was also calculated based on the PM_{2.5} contribution and the number of populations by local authorities. Busan, Daegu, and Hwaseong are newly added in the top-10 local authorities that exhibit the highest PWECs in South Korea. Considering that the mobile and non-industrial emissions plays a significant role in increasing the PWEC, more stringent regulations on the transportation and non-industrial emission sectors should be considered to effectively minimize the personal exposure.

Key words: PM_{2.5}, Contribution, Exposure, Key emission area and sector, Regulation

1. 서 론

2016년 초미세먼지 (Particulate Matter of which dia-

meter is equal to or less than 2.5 µm; 이하 PM_{2.5}) 전국 평균 농도는 26 µg/m³으로, WHO (Worldwide Health Organization) 권고기준 (10 µg/m³)을 2배 이상 초과하

였다. 정부에서는 PM_{2.5} 농도 관리를 위해 ‘미세먼지 관리 특별대책’ (MOE, 2016)을 마련하였으며, 2017년에는 미세먼지 배출량 30% 감축을 목표로 ‘미세먼지 관리 종합대책’을 발표하였다 (MOE, 2017). 하지만 2018년 PM_{2.5} 농도는 23 µg/m³으로, 여전히 연평균 대기환경기준 (15 µg/m³)을 초과하였다. 이에 2020년 4월에는 대기환경기준을 초과하는 지역을 집중적으로 관리하고자 ‘대기관리권역의 대기환경개선에 관한 특별법’을 제정·시행하였다.

대기관리권역의 PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 기초 지자체 수준에서 주요 배출지역에 대한 확인과 배출량 감축이 요구된다. 특히, 해당 권역의 PM_{2.5} 농도 개선에 효과적인 주요 배출원을 파악하는 것이 중요하다. 국내의 경우 하나의 광역 지자체 내에서도 기초 지자체 간 배출 특성이 상이하므로, PM_{2.5} 농도 관리를 위해 기초 지자체 수준에서 대기오염물질 배출량과 PM_{2.5} 농도 관계를 고려한 배출 기여도를 상세하게 분석할 필요가 있다. 또한, PM_{2.5}와 같은 2차 대기오염물질은 배출원이 위치한 지자체뿐만 아니라 주변 지자체에도 영향을 미친다는 점에서 (Ju *et al.*, 2018) 주요 배출지역의 영향을 정략적으로 분석할 필요가 있다.

한편, PM_{2.5}를 포함한 대기오염물질 농도 관리의 목적은 국민 건강 보호에 있으므로, 배출량 감축은 PM_{2.5} 농도와 함께 인구노출을 효과적으로 감소시킬 수 있는 방향으로 이루어져야 한다 (Li *et al.*, 2019; SI, 2018; KEI, 2013). 하지만 국내에서 지자체별 PM_{2.5} 농도에 대한 배출 기여도와 인구노출을 함께 평가한 연구는 많지 않다.

이에 본 연구에서는 전국을 대상으로 고해상도 대기질 모사를 수행하여 기초 지자체별 배출량이 국내와 각 시군의 PM_{2.5} 농도에 미치는 배출 기여도를 추정하였다. 이와 함께 배출 기여도에 시군별 인구수를 가중하여서 한 지역의 배출량에 의한 국내 인구가중 노출 기여도를 계산하였다. 이를 통해 PM_{2.5} 농도 및 인구노출 관점에서 우선적인 배출량 감축이 필요한 지자체를 도출하였다.

2. 연구 방법

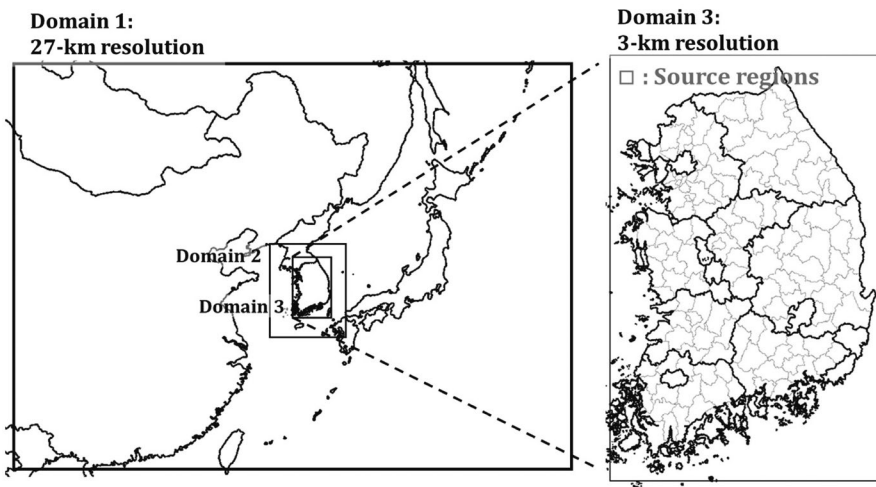
2.1 기상 및 대기질 모사

대기질 모사를 위해 기상 모델 - 인위적/자연적 배출량 모델 - 3차원 광화학 수송 모델을 이용한 모사 체계를 구성하였다. 기상 모델은 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock and Klemp, 2008) version 3.4.1을 이용하였으며 기상 초기 및 경계 조건으로 NCEP-FNL (National Centers for Environmental Prediction-Final)을 사용하였다 (표 1 참조). WRF 모델의 결과는 MCIP (Meteorology-Chemistry Interface Processor) version 3과 WRFCAMx processor version 3.4 (<http://www.camx.com/download/support-software.aspx>)로 각각 후처리하여 배출량 모델과 대기질 모델의 입력자료로 변환하였다. 인위적 배출량은 동북아 지역에 대하여 2015년 CREATE (Comprehensive Regional Emissions inventory for Atmospheric Transport Experiment; Woo *et al.*, 2020) 배출목록을 이용하였으며, 남한 지역에 대해서는 2016년 CAPSS (Clean Air Policy Support System) 배출목록을 이용하였다. 각 배출목록은 배출량 모델 SMOKE (Sparse Matrix Operator Kernel Emission; Benjey *et al.*, 2001) version 3.1을 통해 대기질 모델에 이용할 수 있는 입력자료로 변환하였으며, 배출목록에 포함된 SCC (Source Classification Code)를 기준으로 시·공간 할당과 화학종 분배 과정을 거쳤다 (Kim *et al.*, 2008). 자연적 배출량은 식생자료를 바탕으로 MEGAN (The Model of Emissions of Gases and Aerosols from Nature; Guenther *et al.*, 2006) version 2.0.4 모델을 통해 준비하였다. 3차원 광화학 모델은 CAMx (Comprehensive Air Quality Model with Extensions) version 6.1을 이용하였으며 세부적인 물리 옵션은 표 1에 자세히 서술하였다.

대상기간은 미세먼지 관리 종합계획의 기준연도인 2016년으로 선정하였으며, 대기오염물질 농도의 계절적 변동을 고려할 수 있도록 1년 전 기간을 모두 포함하였다. 모사 영역은 등지격자 형태로 구성하였다. 상위 모사 영역은 한반도, 중국 및 일본이 포함된 동북

Table 1. Summary of WRF and CAMx configurations adopted in this study.

| (a) WRF | |
|------------------------------|---|
| Version | Version 4.3.1 |
| Global MET inputs | FNL (NCEP, 2000) |
| Micro Physics | WSM 6-class (Hong <i>et al.</i> , 2004) |
| PBL Scheme | YSU (Hong <i>et al.</i> , 2006) |
| LSM Scheme | NOAH Land (Chen and Dudhia, 2001) |
| (b) CAMx | |
| Version | Version 6.1 |
| Horizontal Advection | Piece-wise Parabolic Method (Colella and Woodward, 1984) |
| Gas-phase Chemical Mechanism | SAPRC99 (Carter, 2000) |
| Aerosol Chemistry | RADM-AQ (Chang <i>et al.</i> , 1987) ISORROPIA (Nenes <i>et al.</i> , 1998) SOAP (Strader <i>et al.</i> , 1999) Static 2-mode (Coarse-Fine; CF Scheme) for size distribution (ENVIRON International Corporation, 2014) |
| Dry Deposition Model | Resistance model (Zhang <i>et al.</i> , 2001, 2003) |
| Wet Deposition | Scavenging model (Seinfeld and Pandis, 2016) |

**Fig. 1.** Modeling domains (Left) and gray-colored 160 local authority level source regions (Right). Three domains adopted 27-km (Domain 1), 9-km (Domain 2), and 3-km (Domain 3) horizontal grid resolution, respectively.

아 영역으로(수평 해상도 27-km), 장거리 수송을 고려할 수 있도록 설정하였다. 하위 모사 영역은 기초 지자체 수준의 기여도 분석을 위해 남한 지역 전체를

3-km 수평 해상도로 설정하였다(그림 1 참조). 단, 하위 모사 영역은 계산 시간 증가를 고려하여 제주도를 제외한 국내 내륙지역만을 포함하였으며, 해안선에

인접하게 설정하였다. 한편, 해륙풍 순환 등의 영향을 반영하기 위해 상위 모사 영역과 상호작용할 수 있는 two-way 옵션을 이용하였다.

2.2 지자체별 배출 기여도 선정

기여도 분석은 CAMx 모델에서 제공하는 PSAT (Particulate Source Apportionment Technology; Yarwood *et al.*, 2007)을 이용하였다. PSAT은 표식자 방법을 기반으로 대기질 모델 내에서 전구물질 배출량이 물리-화학적 과정을 통해 미세먼지로 변환되는 과정을 추적한다. 한 번의 모사로 복수의 배출원과 배출지역에 대한 기여도를 분석할 수 있는 장점이 있어 본 연구와 같이 다수의 배출지역을 대상으로 기여도 분석을 하는 경우에 적합하다(Kim *et al.*, 2017). 본 연구는 시군 등 기초 지자체 수준에서 배출지역별 기여도 분석을 수행하였다. 단, 특별시와 광역시는 자치구의 면적이 최소 3 km² 수준이므로, 본 연구에 적용된 모사 해상도에서는 배출 지역을 명확히 구분하기 어렵다. 따라서, 특별시와 광역시 등은 세분화하지 않고 하나의 배출지역으로 설정하여 남한을 총 160개의 배출 지자체(이하 ‘지자체’)로 구분하였다. 지자체 수준의 기여도 분석은 ‘지자체별 배출 기여도’, ‘자체 기여도(self-contribution)’ 그리고 ‘국내 타 지역 기여도(the rest domestic contribution)’로 구분하였다. ‘지자체별 배출 기여도’는 각 지자체가 국내 전체 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여도로 식 1과 같이 산정하여 3.3절에 제시하였다.

$$C_{s,nw} = \frac{\sum_{r=1}^n (C_{s,r} \times A_r)}{A_{total}} \quad (1)$$

n = The total number of local authorities in the study domain (South Korea)

A_r = Coverage area of a receptor local authority (km²)

A_{total} = Total coverage of South Korea (km²)

C_{s,r} = The contribution of emissions released from a source local authority “*s*” to the PM_{2.5} concentration in the receptor local authority “*r*” (μg/m³)

C_{s,nw} = The coverage-weighted contribution of emissions released from a source local authority “*s*” to

the nationwide PM_{2.5} concentration (μg/m³)

자체 기여도는 각 지자체의 배출량이 동일 지역의 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여도로 정의하였다. 국내 타 지역 기여도는 대상 지자체를 제외한 외부 지자체 배출량이 대상 지자체의 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여도로 정의하였다(식 2).

$$C_{rd,r} = \sum_{s=1}^m (C_{s,r}) \quad (2)$$

C_{rd,r} = The rest of domestic contribution to the PM_{2.5} concentrations in a receptor local authority “*r*”
m = *n* - 1 (to exclude the self-contribution)

대기질 모델을 통해 도출된 기여도는 모사 농도와 관측 농도의 불일치를 고려하여 실측 농도를 이용한 보정이 고려될 수 있다(Bae *et al.*, 2017). 다만, 본 연구는 국내 PM_{2.5} 농도와 노출 감소에 효과적인 주요 지자체 선정방법을 제안하는 것이므로 별도의 보정 과정을 거치지 않았다. 한편, 대상 기간인 2016년의 경우 이용 가능한 PM_{2.5} 관측망이 지자체 수준의 분석결과를 보정하기에 충분하지 않은 측면도 존재한다.

2.3 인구가중 노출 기여도 선정

선행 연구에서는 PM_{2.5} 농도에 인구 분포를 가중하여 단위 인구당 평균 노출도인 PWE (Population Weighted Exposure)를 계산하였다(Son *et al.*, 2020; Anan *et al.*, 2018). 본 연구는 이러한 개념을 이용하여, PM_{2.5} 농도 대신 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도에 인구 분포를 가중하여 ‘인구가중 노출 기여도(Population Weighted Exposure Contribution; 이하 PWEC)’를 산정하였다(식 3). 인구 가중 시 이용되는 자료는 2016년을 대상으로 집계된 통계청 인구 자료를 이용하였다(MOIS, 2020).

PWEC는 1) 지자체별 배출량이 각 지자체의 PM_{2.5} 농도에 미치는 기여도를 산정하고, 이를 지자체별 인구수로 가중한 다음 2) 국내 총 인구로 나누어 계산된다. 이렇게 계산된 PWEC는 해당 지자체의 배출량이 국내의 단위 인구당 PM_{2.5} 농도 노출에 미치는 평균적인 기여도를 의미한다.

$$PWEC_s = \frac{\sum_{r=1}^n (C_{s,r} \times P_r)}{P_{total}} \quad (3)$$

n = The total number of local authorities in the study domain (South Korea)

$C_{s,r}$ = The contribution of emissions released from a source local authority "s" to the PM_{2.5} concentration in the receptor local authority "r" (μg/m³)

P_r = Population at the receptor local authority (person)

P_{total} = Total population in South Korea (person)

$PWEC_s$ = Population-weighted exposure due to the emissions from the source local authority (μg/m³)

2.4 PM_{2.5} 우선 관리대상 지자체 도출

2.2와 2.3절에서 제시한 방법론을 이용하여 지자체별 배출 기여도 및 인구가중 노출 기여도를 산정하였

다. 각 기여도는 내림차순으로 정렬하여 상위에 분포하는 지자체를 우선적인 배출관리가 필요한 지자체(배출지역)로 선정하였고, 배출량 저감대책 수립에 도움이 될 수 있도록 우선 관리대상 지자체의 주요 대기 오염물질 배출원을 분석하였다. 우선 관리 지자체 선정 시 이용된 기여도는 국내 전 지역에 대한 PM_{2.5} 평균 농도와 전체 인구를 대상으로 계산된 값이다.

3. 결과 및 고찰

3.1 모사 재현성 검토

기여도 분석에 이용된 대기질 모사의 재현성을 평가하기 위해 NO_x, SO₂, PM_{2.5}를 대상으로, 국립환경과학원에서 제공되는 도시대기측정망의 관측농도와 본 연구의 대기질 모사농도를 광역 지자체별로 평균하여

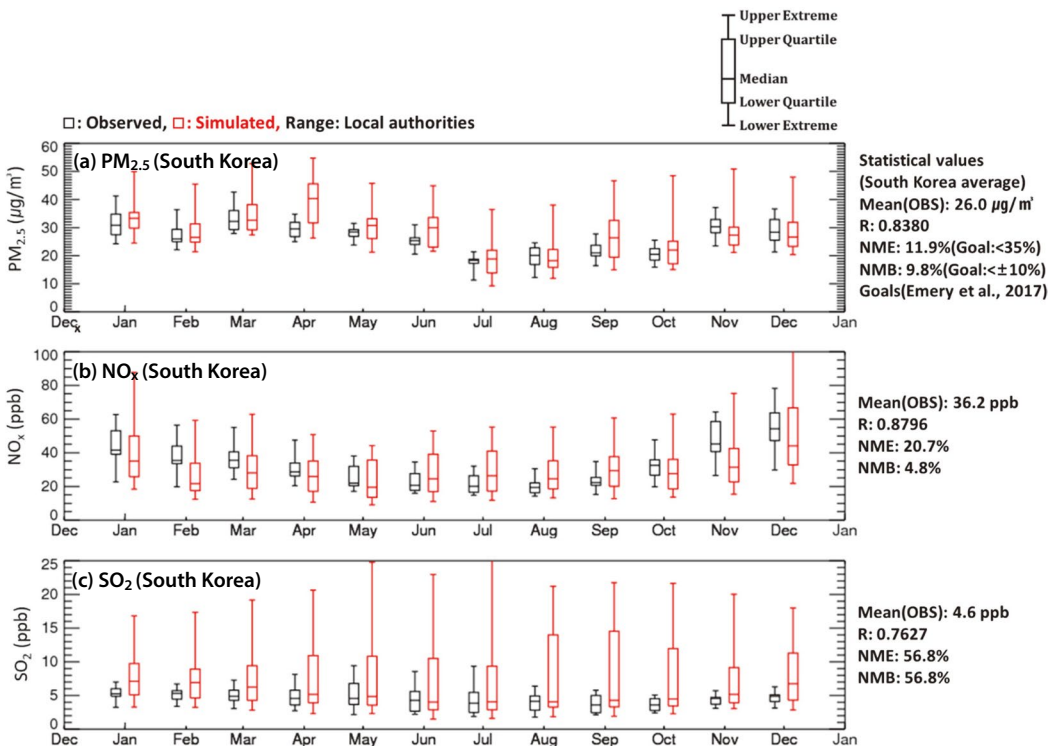


Fig. 2. Comparisons of the observed and simulated monthly mean (a) PM_{2.5}, (b) NO_x, and (c) SO₂ over the South Korea AMS sites during 2016. Black and red boxes represent the observed and simulated concentrations, respectively. Statistical goal values referenced from Emery *et al.* (2017).

범위로 제시하였다(그림 2). 모사 재현성 검토 지표로는 Emery *et al.* (2017)이 제시한 통계값의 목표치, 최소치와 유럽 및 중국 등에서 수행된 대기질 모델링 실험 연구 모사 재현성을 참고하였다(Hu *et al.*, 2016; Xing *et al.*, 2015).

도시대기측정망을 기준으로 국내 전 지역 월평균 PM_{2.5} 모사 재현성을 평가하면, NME (Normalized Mean Error)는 11.9%, NMB (Normalized Mean Bias)는 9.8%, 상관계수(이하 R; Correlation Coefficient)는 0.84이다(그림 2(a)). 세 가지 통계값 모두 Emery *et al.* (2017)에서 제시된 목표치를 만족하였다. PM_{2.5}의 전구 물질인 NO_x는 여름철에 과대, 겨울철은 과소 모사하였으며, NME는 20% 수준이다(그림 2(b)). SO₂는 R값이 0.88로 월별 농도 변화에 대한 경향성은 유사하게 나타났으나, NMB, NME는 모두 56%로 2.6 ppb가량 과대 모사하였다. SO₂의 국지적인 과대 모사 특성은 선행연구에서도 유사하게 보고되고 있으며, 향후 배출량 입력자료 개선을 통해 보완되어야 할 것으로 판단된다(Kim *et al.*, 2020).

3.2 지자체별 PM_{2.5} 배출 기여도

PM_{2.5} 농도 개선을 위해 우선적인 배출 관리가 필요한 지역을 선별하고자 자체 기여도와 국내 타 지역 기여도를 지자체별로 분석하였다(그림 3, 표 S1). 160개 지자체의 연평균 PM_{2.5} 농도에 대한 자체 기여도

는 평균 1.7 µg/m³, 중앙값은 1.3 µg/m³로 모사되었다. 자체 기여도는 지자체에 따라 최소 0.2 µg/m³(강원 태백), 최대 17.9 µg/m³(충남 당진)으로 수십 배 이상 차이를 보였다. 특히, 당진, 포항, 광양은 자체 기여도가 평균 11.6 µg/m³으로 모사되어 타 지자체에 비해 높았다(그림 3). 대구모 산업단지가 위치한 지자체에서 자체 기여도가 상대적으로 높게 나타났으며, Primary PM_{2.5} (PPM_{2.5}), NO_x, SO₂ 등 대기오염물질의 배출 밀도 또한 높았다(그림 S1 참조). 이와 반대로, 고성, 울진, 계룡, 인제, 영양, 태백의 경우 자체 기여도가 0.3 µg/m³ 이하로 타 지자체보다 낮게 모사되었다.

각 지자체의 PM_{2.5} 농도에 대한 국내 타 지역 기여도는 평균 7.1 µg/m³, 중앙값 6.9 µg/m³으로 1.9(강원도 고성)~14.5 µg/m³(경기 평택) 범위에서 모사되었다. 지자체별 국내 타 지역 기여도는 자체 기여도에 비해 평균 4.1배 높았으며, 대다수(157개) 지자체에서 자체 기여도보다 높았다. 이는 현재 대기 개선정책에 적용되는 국가 배출 목록을 활용하여 배출량 감축 방안을 고려할 때, 자체지역뿐만 아니라 타 지역의 배출량 관리가 함께 이루어져야 함을 뜻한다(You *et al.*, 2020; Ju *et al.*, 2018). 분석 대상 지자체 중 56%(90개)는 국내 타 지역 기여도가 자체 기여도보다 5 µg/m³ 이상 높게 나타났다. 예로, 예산군의 경우 국내 배출에 의한 PM_{2.5} 기여도 중 19%(2.8 µg/m³)가 자체, 81%(11.8 µg/m³)가 국내 타 지역에서 기인한 것으로 평가

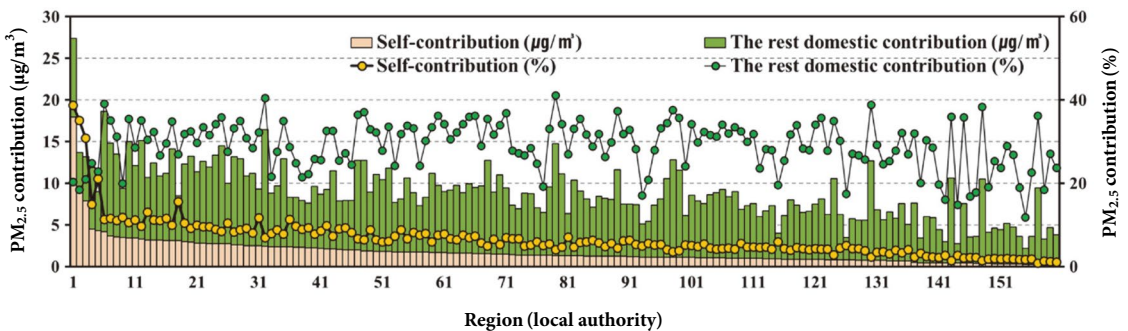


Fig. 3. Self-contributions and the rest domestic contributions to the annual PM_{2.5} concentration for each local authority during the simulation period of 2016. Data are sorted in descending order of the self-contribution. The rest of domestic contributions are calculated as follows; the rest domestic contribution = total domestic contribution – self-contribution. The names of local authorities can be found from Table S1.

되었으며, 타 지역 기여도 중 당진시의 기여도가 25% ($3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)로 가장 높았다. 당진시와 같이 대기오염 물질 배출량 상대적으로 많은 지자체는 주변 지자체의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대해서도 기여도가 높게 나타난다 (그림 S2 참조). 따라서 예산군과 같이 타 지역 기여도가 높고, 주변에 다량의 대기오염물질 배출 지역이 있는 지자체는 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선을 위해 주변지역 배출 영향에 대한 정량적인 파악이 우선되어야 할 것이다.

3.3 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선을 위한 우선 관리대상 지자체

국내 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 관리에 효과적인 우선 관리대상 지자체를 선별하기 위해 지자체별 배출 기여도를 내림차순으로 정렬하였다. 총 160개 지자체 중 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 배출 기여도가 높은 상위 10개 지자체는 당진 (충남), 포항 (경북), 인천, 광양 (전남), 울산, 서울, 서산 (충남), 보령 (충남), 여수 (전남), 태안 (충남) 순이다. 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 이들 지역의 배출 기여도는 국내 전체 배출 기여도 중 35% ($2.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 차지한다. 배출 기여도가 높은 상위 20개 지역(48%, $3.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 경기 남부와 대구, 부산 등이 포함되며, 상위 30개 지역(57%, $4.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$)에는 충남과 전북의 일부 지역, 그리고 대전과 세종이 추가로 포함된다(그림 4).

한편, 기여도가 높은 상위 10개 지역의 배출량은 국내 전체 배출량 중 SO_2 65%, $\text{PPM}_{2.5}$ 49%, NO_x 31%, VOC 31%, NH_3 19%를 차지한다. 배출물질별로 주요 배출원을 살펴보면, SO_2 의 경우 생산공정(46%), 제조업연소(26%), 에너지산업 연소(19%)가 주요하였으며, $\text{PPM}_{2.5}$ 는 제조업 연소(70%), 생산공정(10%), 비도로이동오염원(6%)의 순서로 높았다. NO_x 의 경우 도로이동오염원(22%), 제조업연소(19%), 에너지 산업연소(19%)에서의 배출이 주요하였다.

정리하면, 국내 $\text{PM}_{2.5}$ 기여농도의 35%를 차지하는 상위 10개 지역의 주요 배출원은 생산공정, 제조업연소, 그리고 이동오염원으로 분석된다. 따라서, $\text{PM}_{2.5}$ 농도 개선을 위한 배출량 저감대책 수립 시에는 배출 기여도가 높은 상위 지자체와 이들 지자체의 주요 배

출원에 대한 세부적인 검토가 필요하다. 특히, 이전부터 지속적인 배출관리가 이루어진 발전소 등 에너지 산업연소와 경유차 등 도로이동오염원 이외에도 산업 부문의 배출량 감축 등이 추가적으로 고려될 수 있다. 다만, 국내 배출목록을 이용한 대기질 모사에서 제철·제강 업종 등이 밀집된 지역의 SO_2 가 과대 모사되고 있으며(Kim *et al.*, 2020), 일부 지자체는 국내 배출 기여도가 지나치게 높게 산정되는 바, 이들 지역에 대한 배출량과 배출 형태 등 배출 정보에 대한 확인은 필요하다(Kim *et al.*, 2020; Ju *et al.*, 2019).

선행연구에서는 국내 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도에 대한 권역별 기여도 분석에서 중부권(충청도, 대전 세종 포함)이 31%로 가장 높은 국내 기여도를 보였으며(MOE, 2019a), 충남(20~27%)과 수도권(23~26%)도 상대적으로 높은 국내 기여도를 보였다(KEI, 2019; NIER, 2017). 본 연구에서 제시한 지자체별 배출 기여도를 시도 수준에서 종합하면, 충남 23%, 수도권 22%, 전남 11%로 선행연구에서 제시된 주요 배출 지역과 기여도 값이 유사하게 나타났다. 주요 배출원의 경우 이동오염원(13.3%) 및 제조업 연소(7.6%)의 기여도가 높은 것으로 분석되었으며(Kang *et al.*, 2021), 이동오염원(33%)과 산업(25%) 부문이 주요 배출원으로 분석되기도 하였다(KEI, 2019). 본 연구에서는 배출원별 기여도를 직접적으로 산정하지 않아 정량적인 비교는 어렵지만, 배출 기여도가 높은 상위 10개 지자체의 주요 배출원인 생산공정, 제조업연소, 이동오염원과 선행연구에서 제시된 주요 배출원 분석 결과가 대체로 유사하였다. 다만 기여도 분석은 방법론, 대상 기간 및 지역 등 다양한 조건에 의해 차이가 발생할 수 있다. 그러므로 다양한 연구 결과를 분석 및 종합하여 공통적으로 제시하고 있는 주요 지역과 발생원을 규명해야 하며, 이를 토대로 신중하게 관리대책을 수립할 필요가 있다.

3.4 국내 인구노출 감소를 위한 우선 관리대상 지자체

국민 건강 보호 관점에서 산정된 국내 지자체별

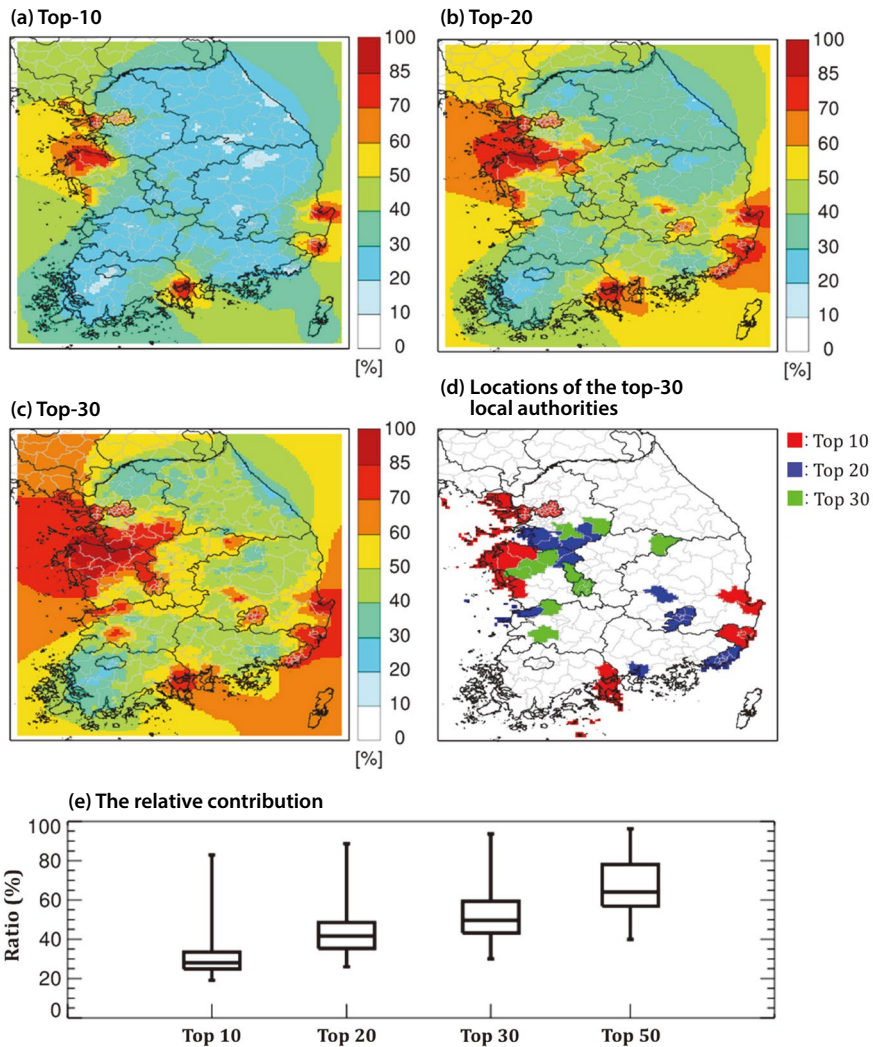


Fig. 4. Contributions of the aggregated emissions from the (a) top-10, (b) top-20, and (c) top-30 local authorities (LA) on the nationwide annual mean PM_{2.5} concentrations, (d) geographical locations of top-30 local authorities, and (e) ratios of their contributions to the national total contributions in the 160 local authorities during the simulation period of 2016.

PM_{2.5} 인구노출 기여도(PWEC)를 기반으로 우선 관리대상 지자체를 그림 5에 제시하였다. PWEC가 상대적으로 높은 상위 지자체의 PWEC합과 국내 전체 배출 PWEC의 상대적 비율을 지자체별로 계산하여 공간적으로 보였으며(그림 5(a)~5(c)), 그 값을 박스 플롯으로 그림 5(e)에 제시하였다. 국내에서 PWEC가 높은 상위 10개 지자체는 서울, 인천, 당진, 포항, 부산, 울산, 대구, 화성, 서산, 광양으로(그림 5(a), 5(d)), 해

당 지자체의 PWEC 합은 국내 전체 배출의 PWEC 중 44%를 차지한다. 따라서, PWEC 역시 PM_{2.5} 배출 기여도와 마찬가지로 일부 지자체에 대한 배출관리를 통해 PM_{2.5}에 대한 인구노출을 상당부분 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다(그림 5(b)~(e)).

PWEC 대상 상위 10개 지자체에는 PM_{2.5} 배출 기여도 기준 상위 10개 지자체에 포함되지 않았던 부산, 대구, 화성이 보령, 여수, 태안을 대체하며 신규로 포함되

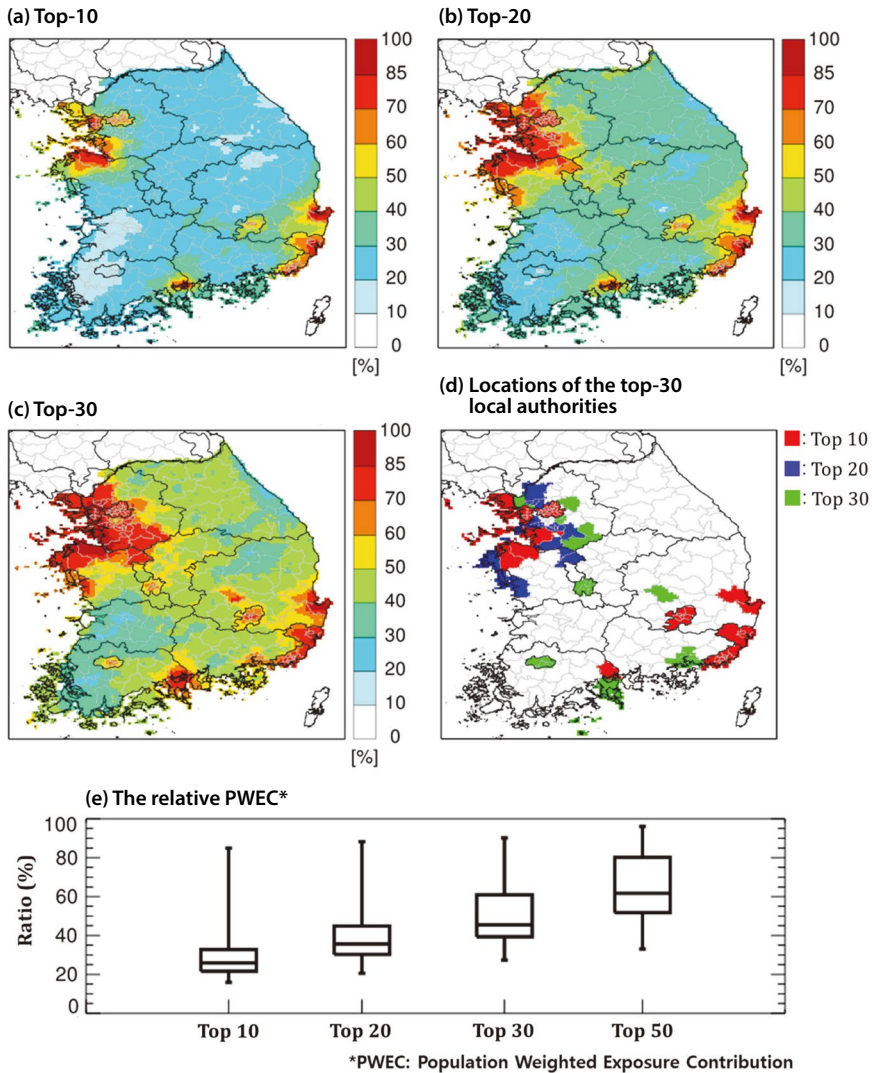


Fig. 5. Contributions of the aggregated emissions from the (a) top-10, (b) top-20, and (c) top-30 local authorities (LA) on the nationwide population weighted $PM_{2.5}$ exposure, (d) geographical locations of top-30 local authorities, and (e) ratios of their population weighted exposure contributions (PWEC) to the national total PWEC in the 160 local authorities during the simulation period of 2016.

었고, 상위 30개 지자체는 1/3인 10개 지자체가 신규로 포함된다(그림 6). 배출 기여도에 비해 PWEC가 높은 지자체의 경우 배출원 인근에 인구수가 많은 지역이 위치하는 것으로 보인다. PWEC를 기준으로 할 때 우선 관리대상 지자체에 새롭게 추가된 지역의(10개 지자체) 주요 배출원을 살펴보면, 수송 부문(도로 및 비도로이동오염원)이 NO_x , $PPM_{2.5}$ 배출량의 각각

79%, 45%를 차지하였으며, 산업 연소 부문이 SO_2 의 배출의 37%를 차지하여 가장 큰 비중을 보였다(그림 7). 앞서 3.3에 보인 $PM_{2.5}$ 농도개선을 위한 우선 관리 지자체의 주요 배출원 구성과 비교 시, NO_x 는 수송 부문의 비중이 1.6배 증가, SO_2 는 수송, 산업 연소, 비산업 연소 부문의 비중이 9% 이상 증가한 반면 생산공정의 비중이 20%가량 낮아졌으며, $PPM_{2.5}$ 는 수송 부문

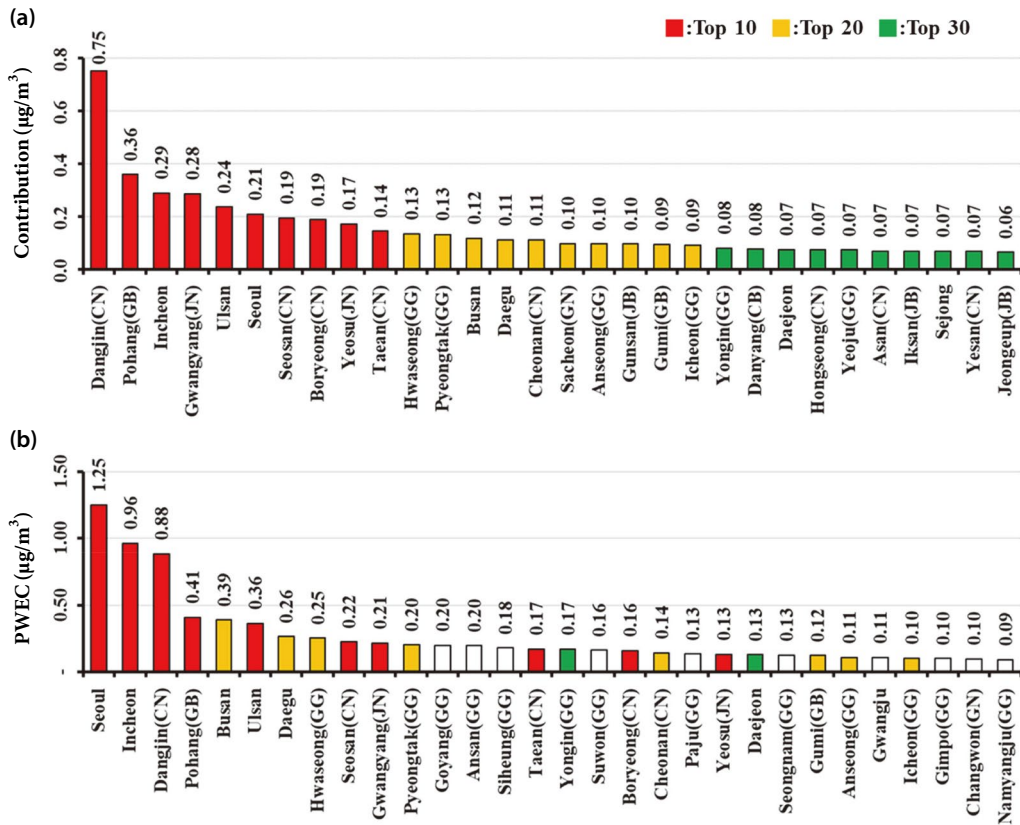


Fig. 6. Top-30 local authorities in terms of (a) the nationwide PM_{2.5} contributions, and (b) the PWEC during the simulation period of 2016. Red, yellow, and green colors represent the top-10, 20, and 30 contributing local authorities.

과 비산먼지의 비중이 20% 이상 높아지고 산업 연소의 비중이 37% 낮아졌다(그림 7). 인구노출 감소를 위한 배출량 감축은 수송 부문의 배출량 관리대책이 가장 중요할 것으로 판단되며, 기존의 배출량 저감대책에서 상대적으로 후순위로 평가되던 비산업 부문의 중요도가 높아졌다. 종합하면, PM_{2.5} 인구노출 저감을 위해서는 PM_{2.5} 농도 개선에 효과적인 배출원을 관리함과 동시에 인구노출 관점에서 기여도가 높은 배출원을 선별하고 관리하는 것이 중요할 것으로 보인다.

3.5 PM_{2.5} 배출 기여도와 PWEC를 함께 고려한 우선 배출관리 지역 선별

앞서 제시된 지자체별 배출 기여도와 PWEC는 대기질을 효과적으로 관리할 수 있는 우선 배출관리 지

역 도출에 활용될 수 있다. 본 절에서는 이에 대한 활용 방법을 제시하였다. 그림 8(a)에서 지자체별 국내 PM_{2.5} 농도에 대한 배출 기여도와 PWEC를 비교하였다. 다른 지자체보다 배출 기여도 또는 PWEC가 상대적으로 높게 나타나는 지자체로는 서울, 인천, 당진, 부산, 울산, 포항, 광양 등이 있다(그림 8(a)). 이 지자체들은 주로 국내의 북서(수도권 및 충청권) 또는 동남부에 위치하며, 인구수가 높거나 주요 산업단지가 밀집해 있다.

PM_{2.5} 농도에 대한 배출 기여도를 기준으로 우선 배출관리 지자체 선별 시, 산포도(그림 8(a))의 가장 우측에 위치한 당진이 1순위가 된다. 반면, 인구노출을 중심으로 우선 배출관리 지자체를 선별하면, 산포도(그림 8(a))의 상단에 위치한 서울, 인천, 당진의 순서

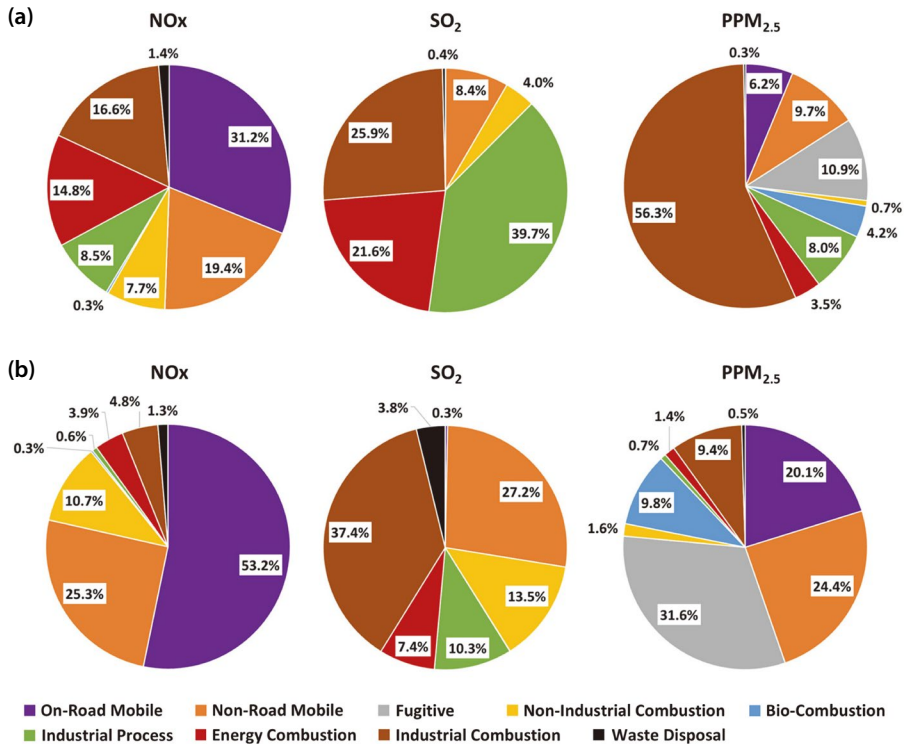


Fig. 7. The major source sectors of NO_x, SO₂, and PPM_{2.5} emissions in (a) the top-30 local authorities that show the highest nationwide PM_{2.5} contributions, and (b) in the newly added 10 local authorities to the top-30 PWEC among 160 local authorities.

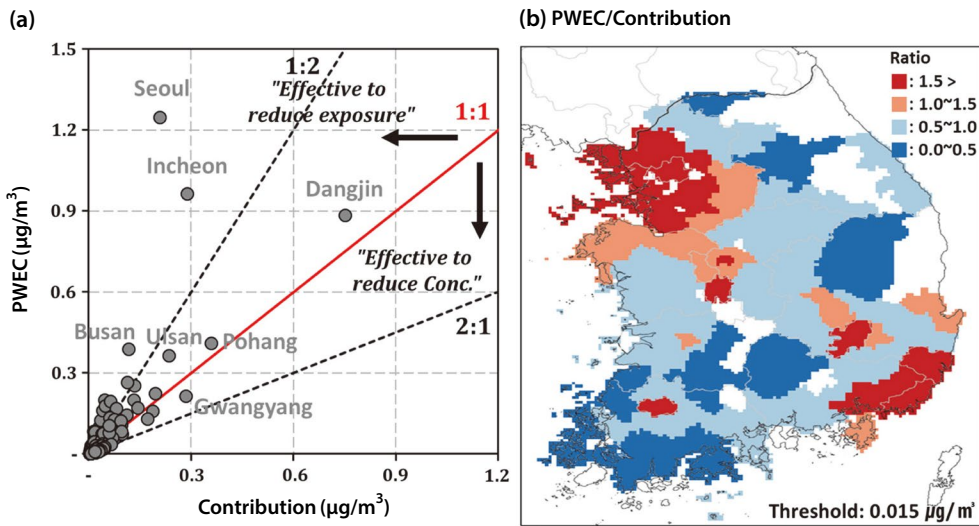


Fig. 8. (a) The relationship between contributions to the national-wide PM_{2.5} concentration and PWEC, and (b) spatial distribution of the ratio of contribution to PWEC in 160 local authorities (Red color represents the region to reduce PM_{2.5} exposure effectively, and blue color represents the region to reduce PM_{2.5} concentration effectively. Areas that contribution less than 0.0015 µg/m³ were excluded).

로 선택된다. PWEC를 당진과 인천에 대해 비교하면 3% 이내의 차이를 보이나, 대기오염물질 배출량은 당진이 인천에 비해 SO_x는 3~10배, PPM_{2.5}는 6배 높다. 당진이 인천에 비해 배출량이 높은데도 불구하고 두 지자체의 PWEC가 비슷한 이유는, 당진의 경우 높은 산업부문 배출량으로 인해 PM_{2.5} 배출 기여도는 높으나, 인천에 비해 영향 범위 내의 인구가 적기 때문이다. 특히, 당진의 PM_{2.5} 관련 배출량이 인천보다 수 배 높은 점을 감안하면 인천의 배출량을 우선적으로 관리하는 것이 동일한 배출량 감축 노력 대비 얻을 수 있는 인구노출 감소에 효과적일 것으로 보인다. 이와 유사하게, 배출 기여도는 포항이 울산과 부산에 비해 각각 1.2배, 3.1배 높으나, PWEC 차이는 10% 이내로 작다. 이를 배출량 규모에서 살펴보면, 부산의 배출량은 포항에 비해 SO₂는 0.3배, PPM_{2.5}는 0.2배 수준으로 낮다. 즉, 동일한 배출량 관리 시행 시, 부산이 포항에 비해 인구노출을 더 많이 감소시킬 수 있다. 이는 배출 기여도 대비 PWEC의 상대적인 비율이 높은 지자체의 배출량을 우선적으로 관리하는 것이 인구노출 감소에 효과적임을 의미한다. 'PWEC/배출 기여도' 값이 높다는 것은 지자체 배출량이 인구가 밀집된 지역의 PM_{2.5} 농도에 기여도가 높다는 것을 의미한다. 그림 8(b)은 각 지자체별 'PWEC/배출 기여도'를 보인 것으로, 값이 상대적으로 높게 나타나는 수도권, 세종, 광주, 대구, 울산, 부산지역의 배출관리 시 인구노출을 효과적으로 줄일 수 있을 것으로 예상된다.

4. 결 론

2016년 이후 지금까지 우리나라 PM_{2.5} 관리 정책은 모든 배출원을 대상으로 최대한의 배출 감축을 끌어내기 위한 노력에 집중하고 있다. 2016년 '특별대책'부터 최근 시행된 '강화대책'의 목표는 미세먼지 배출량을 30.5~35.8% 감축하는 것으로, 정부정책은 배출량 감축에 최우선적 목표를 두고 있다(MOE, 2019b, 2016). 하지만 대기오염물질은 배출량 감축, PM_{2.5} 농

도 개선, 국민 건강 보호가 순차적으로 연결되어 있다. 따라서, 배출량 감축이 어떻게 국민 건강 보호(노출 감소)로 연계되는지 파악하고, 우선 감축 대상 지역과 배출원을 추정하는 연구를 통해 대기오염물질 관리 정책을 큰 틀에서 수립해야 한다.

본 연구에서는 3차원 광화학 대기질 모델을 이용하여 국내 지자체별 배출에 의한 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도 및 PWEC를 정량적으로 평가하였으며, 이를 통해 PM_{2.5} 농도와 인구노출 감소에 효과적인 배출관리 우선 지역을 제시하였다. 국내 지자체별 자체 기여도는 0.2~18.0 µg/m³ 범위이며, 평균 1.7 µg/m³로 조사되었다. 산업지역 또는 대도시가 포함된 일부 지자체를 제외하면, 다수의 지자체에서 자체 기여보다 국내 타 지역 기여도가 높게 나타났다. 따라서, PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 대기질 관리 권역 설정과 같은 광역적인 배출량 저감대책 수립이 필요하다. 다만, PM_{2.5} 농도와 자체 기여도는 낮으나(2% 이하), 상대적으로 국내 타 지역으로부터의 유입 영향이 높게 나타나는 지역의 경우, 풍선효과와 같은 부작용을 방지하기 위해 대기질 관리권역에 함께 포함되는 방안이 검토되어야 한다.

국내 PM_{2.5} 농도에 대하여 기여도가 높은 상위 10개, 30개 지자체의 기여도 합은 각각 국내 전체 배출 기여도의 35%, 57%를 차지하였다. 따라서, 기여도가 높은 상위 지자체를 대상으로 주요 배출원을 분석하여 저감대책을 수립한다면 국내 PM_{2.5} 농도를 효과적으로 관리할 수 있을 것이다. 다만, 배출목록에 기반한 기여도 분석 시 특정 업종 사업장이 주로 위치한 일부 지자체에 대해 기여도가 과도하게 산정될 수 있다. 또한, 분석 대상지역이 세분화되는 경우 고해상도 배출량 입력자료의 이용이 불가피하다.

한편, 본 연구에서는 PM_{2.5} 농도에 대한 인구노출 산정 시에 지자체별 기여도 개념을 도입하여 인구노출 감소에 효과적인 배출관리 우선지역을 함께 선별하였다. 인구노출 측면에서 추가적으로 선별된 지자체는 수송과 비산업 부문의 대기오염물질 배출이 높은 특징이 있었다. 본 연구에서는 PWEC를 중심으로

주요 관리 대상 지자체를 선별하였고, 해당 지역에 위치한 주요 배출원의 관리 필요성을 제시하였다. 그러나 PWEC는 PM_{2.5} 기여도와 마찬가지로 배출원에 따라 지역적인 차이가 발생할 수 있으므로 (Ju *et al.*, 2019), 향후에는 PWEC를 지자체별, 배출원별로 세분화하여 분석할 필요가 있다. 이는 PM_{2.5} 노출도와 배출량의 인과 관계를 정량적으로 파악하는 데 적용할 수 있으며, 주요 배출량 저감 정책 선별, 정책별 소요 비용, 건강 편익 등과 연계하여 최적의 PM_{2.5} 노출 감소 정책을 수립하는 데 이용될 수 있을 것이다

또한, 지자체별 PM_{2.5} 농도에 대한 기여도와 PWEC를 병행 비교하여 동일한 수준의 배출량 감축 노력으로 인구노출을 보다 효과적으로 관리할 수 있는 지역을 선별하는 활용 방안을 검토하였다. 이러한 접근은 향후 다양한 대기질 관리 권역에서 배출관리 우선지역을 선별하는 데 도움이 될 것으로 판단된다. 인구노출의 경우 아동, 노약자와 같이 대기오염물질에 특히 민감한 그룹은 건강영향이 다르게 나타나므로 별도의 분석이 필요하다. 다만, 지자체별 총 인구수와 민감군(아동인구(0~17세)와 고령자(65세 이상)) 인구수는 비례 관계($R^2: 0.9987$)를 보이므로(그림 S3 참조; MOIS, 2020), 본 연구에서 제시한 배출관리 우선지역은 민감군의 인구노출을 대상으로 하여도 유의미할 것으로 판단된다. 향후에는 보다 정교한 배출량 자료 확보, 고해상도 대기질 모델링을 이용한 평가 방법론 정립, 개별 화학 성분에 대한 건강영향 평가 등 결과의 신뢰성을 증진시킬 수 있는 체계적 연구가 필요할 것이다.

References

- Aunan, K., Ma, Q., Lund, M.T., Wang, S. (2018) Population-weighted exposure to PM_{2.5} pollution in China: An integrated approach, *Environment International*, 120, 111-120. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2018.07.042>
- Bae, C., Yoo, C., Kim, B.U., Kim, H.C., Kim, S. (2017) 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, (in Korean with English abstract).
- Benjey, W., Houyoux, M., Susick, J. (2001) Implementation of the SMOKE emission data processor and SMOKE tool input data processor in models-3, United States Environmental Protection Agency.
- Carter, W.P. (2000) Implementation of the SAPRC-99 chemical mechanism into the Models-3 framework. Report to the United States Environmental Protection Agency, January, 29.
- Chang, J.S., Brost, R.A., Isaksen, I.S.A., Madronich, S., Middleton, P., Stockwell, W.R., Walcek, C.J. (1987) A three-dimensional Eulerian acid deposition model: Physical concepts and formulation, *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 92(D12), 14681-14700.
- 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(4), 569-585.
- Colella, P., Woodward, P.R. (1984) The piecewise parabolic method (PPM) for gas-dynamical simulations, *Journal of Computational Physics*, 54(1), 174-201.
- Emery, C., Liu, Z., Russell, A.G., Odman, M.T., Yarwood, G., Kumar, N. (2017) Recommendations on statistics and benchmarks to assess photochemical model performance, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 67(5), 582-598.
- ENVIRON International Corporation (2014) User's Guide: COMPREHENSIVE AIR QUALITY MODEL with EXTENSIONS Version 6.1.
- 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, 318-3210.
- Hong, S.Y., Dudhia, J., Chen, S.H. (2004) A revised approach to ice microphysical processes for the bulk parameterization of clouds and precipitation, *Monthly Weather Review*, 132(1), 103-120.
- 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.
- Hu, J., Chen, J., Ying, Q., Zhang, H. (2016) One-year simulation of ozone and particulate matter in China using WRF/CMAQ modeling system, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 16(16), 10333-10350.
- 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).
- 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, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.5.593>
- Kang, Y.H., Kim, E.H., You, S.H., Bae, M., Son, K.W., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2021) Source Sectoral Impacts on Provincial PM_{2.5} Concentrations based on the CAPSS 2016 using the CMAQ Model, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 37(1), 17-44, (in Korean with English abstract).
- Kim, B.-U., Bae, C., Kim, H.C., Kim, E., Kim, S. (2017) Spatially and chemically resolved source apportionment analysis: Case study of high particulate matter event, *Atmospheric Environment*, 162, 55-70.
- Kim, O.K., Bae, M.A., 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).
- Kim, S., Moon, N.K., Byun, D.W. (2008) Korea emissions inventory processing using the US EPA's SMOKE system, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 2(1), 34-46.
- Korea Environment Institute (KEI) (2013) A Study on the Health Impact and Management Policy of PM_{2.5} in Korea (2). http://library.kei.re.kr/dmme/img/001/009/002/%EA%B8%B0%EB%B3%B82013_09_%EA%B3%B5%EC%84%B1%EC%9A%A9.pdf. Accessed 08 April 2021 (in Korean).
- Korea Environment Institute (KEI) (2019) Study on Integrated Management of Particulate Matter Pollution, http://library.kei.re.kr/dmme/img/001/014/010/%EC%82%AC%EC%97%852020_08_01_%EC%8B%AC%EC%B0%BD%EC%84%AD.pdf. Accessed 18 April 2021 (in Korean).
- Li, J., Zhu, Y., Kelly, J.T., Jang, C.J., Wang, S., Hanna A., Xing, J., Lin, C.J., Long, S., Yu, L. (2019) Health benefit assessment of PM_{2.5} reduction in pearl river delta region of China using a model-monitor data fusion approach, *Environmental Management*, 233, 489-498.
- Ministry of Environment (MOE) (2016) Special policies for particulate matter management, <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=168738&fileSeq=2>. Accessed 08 April 2020 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2017) Comprehensive policies for particulate matter management, <http://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=168738&fileSeq=2>. Accessed 08 April 2020 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2019a) Fine Dust Management. Comprehensive Plan, <https://www.me.go.kr/home/file/readDownloadFile.do?fileId=168738&fileSeq=5>. Accessed 10 May 2021 (in Korean).
- Ministry of Environment (MOE) (2019b) Comprehensive Plan on Fine Dust, <https://www.me.go.kr/cleanair/index.do>. Accessed 18 April 2021 (in Korean).
- Ministry of the Interior and Safety (MOIS) (2020) Population Statistics Based on Resident Registration, <https://jumin.mois.go.kr/>. Accessed 18 April 2021 (in Korean).
- National Centers for Environmental Prediction/National Weather Service/NOAA/US Department of Commerce (2000) NCEP FNL operational model global tropospheric analyses, continuing from July 1999, Research Data Archive at the National Center for Atmospheric Research, Computational and Information Systems Laboratory.
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) A Study on quantitative estimation of emission sources and regional contributions to air quality on forecasting areas (I), pp. 14-19.
- Nenes, A., Pandis, S.N., Pilinis, C. (1998) ISORROPIA: A new thermodynamic equilibrium model for multiphase multi-component inorganic aerosols, *Aquatic Geochemistry*, 4(1), 123-152.
- Seinfeld, J.H., Pandis, S.N. (2016) Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change. John Wiley & Sons.
- Seoul Institute (SI) (2018) Benefits of Management Policy of Seoul on Airborne Particulate Matter, <https://www.si.re.kr/node/62089>. Accessed 16 September 2020 (in Korean).
- Skamarock, W.C., Klemp, J.B. (2008) A time-split nonhydrostatic atmospheric model for weather research and forecasting applications, *Journal of Computational Physics*, 227(7), 3465-3485. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2007.01.037>
- Son, K., Kim, E.H., Bae, M., You, S., Kang, Y.H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Evaluations on PM_{2.5} Concentrations and The Population Exposure Levels for Local Authorities in South Korea during 2015-2017, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(6), 806-819.
- Strader, R., Lurmann, F., Pandis, S.N. (1999) Evaluation of second-

- ary organic aerosol formation in winter, *Atmospheric Environment*, 33(29), 4849-4863.
- Woo, J.H., Kim, Y., Kim, H.K., Choi, K.C., Eum, J.H., Lee, J.B., Lim, J.H., Kim, J.Y., Seong, M. (2020) Development of the CREATE Inventory in Support of Integrated Climate and Air Quality Modeling for Asia, *Sustainability*, 12(19), 7930.
- Xing, J., Mathur, R., Pleim, J., Hogrefe, C., Gan, C.M., Wong, D.C., Wei, C., Gilliam, R., Pouliot, G. (2015) Observations and modeling of air quality trends over 1990-2010 across the Northern Hemisphere: China, the United States and Europe, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 15(5), 2723-2747.
- Yarwood, G., Morris, R.E., Wilson, G.M. (2007) Particulate matter source apportionment technology (PSAT) in the CAMx photochemical grid model, *Air Pollution Modeling and its Application XVII*, 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.
- Zhang, L., Gong, S., Padro, J., Barrie, L. (2001) A size-segregated particle dry deposition scheme for an atmospheric aerosol module, *Atmospheric Environment*, 35(3), 549-560.
- Zhang, L., Brook, J.R., Vet, R. (2003) A revised parameterization for gaseous dry deposition in air-quality models, *Atmospheric Chemistry and Physics*, 3(6), 2067-2082.

Authors Information

배창한(국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 연구원)
 김은혜(아주대학교 환경연구소 연구원)
 유 철(국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 팀장)
 김형천(국가미세먼지정보센터 배출량조사팀 연구사)
 김영민(국가미세먼지정보센터 센터장)
 김순태(아주대학교 환경안전공학과 교수)

Supplementary Materials

Table S1. Numbers and names of local authorities listed in the top/bottom 30 of the annual mean PM_{2.5} self-contribution represented in the Fig. 2.

| Number | Name | Number | Name |
|--------|----------------------------------|--------|----------------------------------|
| 1 | Chungcheongnam-do, Dangjin-si | 131 | Jeollabuk-do, Jinan-gun |
| 2 | Gyeongsangbuk-do, Pohang-si | 132 | Gangwon-do, Hongcheon-gun |
| 3 | Jeollanam-do, Gwangyang-si | 133 | Gyeonggi-do, Gapyeong-gun |
| 4 | Seoul | 134 | Gyeongsangnam-do, Hamyang-gun |
| 5 | Ulsan | 135 | Chungcheongbuk-do, Yeongdon-gun |
| 6 | Gyeonggi-do, Pyeongtaek-si | 136 | Gyeongsangnam-do, Geoje-si |
| 7 | Gyeonggi-do, Icheon-si | 137 | Chungcheongnam-do, Geumsan-gun |
| 8 | Chungcheongnam-do, Hongseong-gun | 138 | Gangwon-do, Samcheok-si |
| 9 | Incheon | 139 | Gyeongsangbuk-do, Cheongson-gun |
| 10 | Gyeonggi-do, Anseong-si | 140 | Jeollabuk-do, Muju-gun |
| 11 | Chungcheongnam-do, Seosan-si | 141 | Jeollanam-do, Sinan-gun |
| 12 | Gyeonggi-do, Hwaseong-si | 142 | Gangwon-do, Yangyang-gun |
| 13 | Gyeongsangbuk-do, Gumi-si | 143 | Gyeonggi-do, Gwacheon-si |
| 14 | Chungcheongbuk-do, Cheongju-si | 144 | Gangwon-do, Sokcho-si |
| 15 | Chungcheongnam-do, Boryeong-si | 145 | Gyeongsangnam-do, Namhae-gun |
| 16 | Jeollabuk-do, Jeonju-si | 146 | Jeollanam-do, Jindo-gun |
| 17 | Chungcheongnam-do, Cheonan-si | 147 | Gangwon-do, Yanggu-gun |
| 18 | Busan | 148 | Chungcheongbuk-do, Cheongwon-gun |
| 19 | Jeollabuk-do, Iksan-si | 149 | Gangwon-do, Hwacheon-gun |
| 20 | Gyeonggi-do, Siheung-si | 150 | Gangwon-do, Jeongseon-gun |
| 21 | Jeollabuk-do, Gunsan-si | 151 | Gangwon-do, Pyeongchang-gun |
| 22 | Sejong | 152 | Gyeongsangnam-do, Tongyeong-si |
| 23 | Jeollabuk-do, Gimje-si | 153 | Gyeongsangbuk-do, Yeongdeok-gun |
| 24 | Gyeonggi-do, Suwon-si | 154 | Jeollanam-do, Wando-gun |
| 25 | Chungcheongnam-do, Yesan-gun | 155 | Gangwon-do, Goseong-gun |
| 26 | Jeollabuk-do, Jeongeup-si | 156 | Gyeongsangbuk-do, Uljin-gun |
| 27 | Gyeonggi-do, Ansan-si | 157 | Chungcheongnam-do, Gyeryong-si |
| 28 | Gyeonggi-do, Yeosu-si | 158 | Gangwon-do, Inje-gun |
| 29 | Chungcheongnam-do, Nonsan-si | 159 | Gyeongsangbuk-do, Yeongyang-gun |
| 30 | Gyeonggi-do, Goyang-si | 160 | Gangwon-do, Taebaek-si |

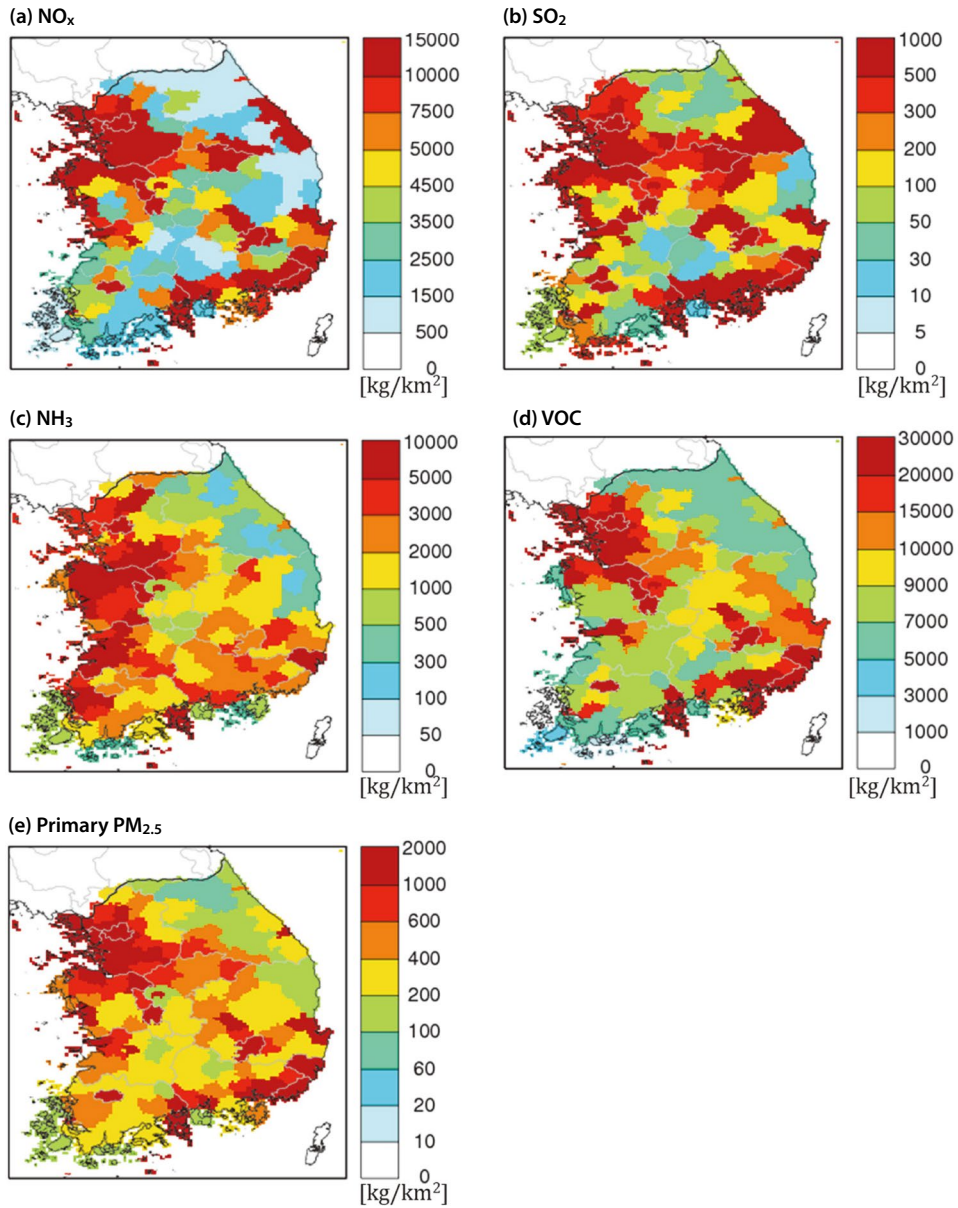


Fig. S1. Emissions densities of (a) NO_x , (b) SO_2 , (c) NH_3 , (d) VOC, and (e) primary $\text{PM}_{2.5}$ for 160 local authorities based on the CAPSS 2016 emissions inventory in South Korea.

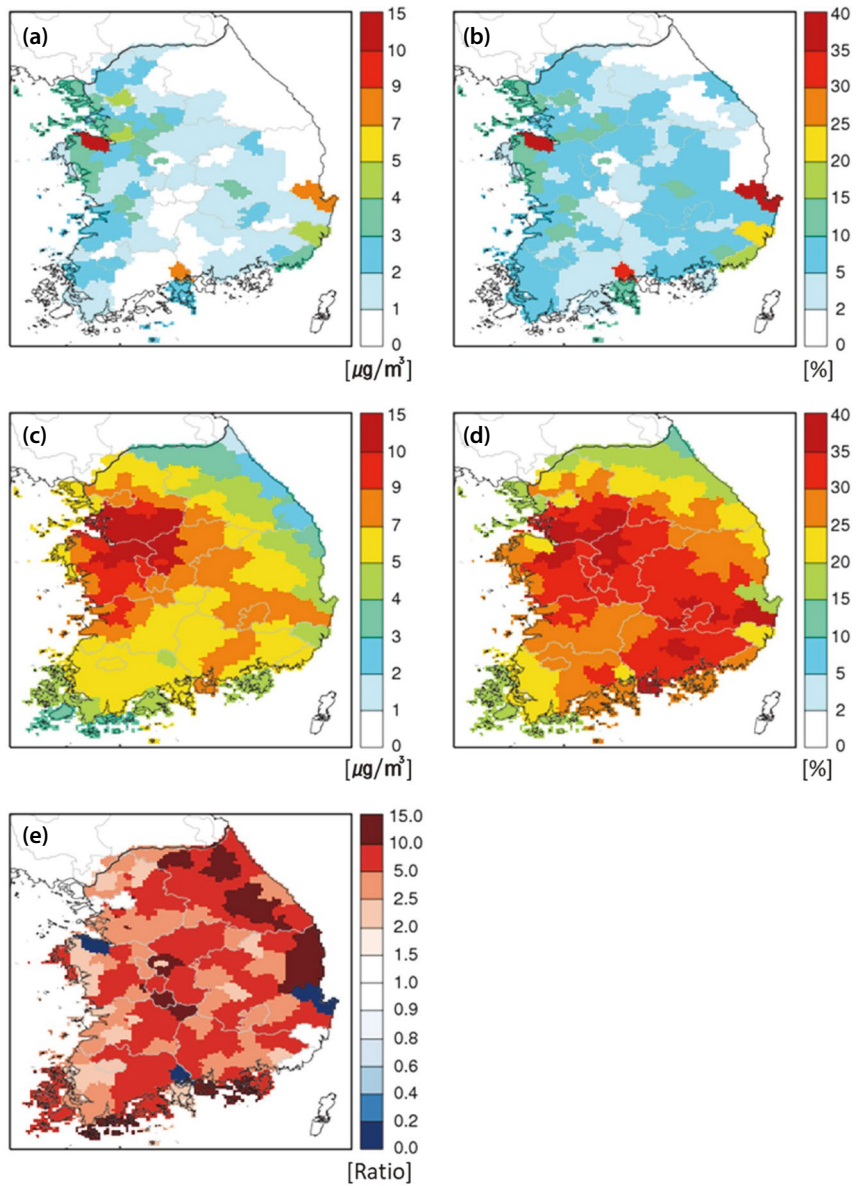


Fig. S2. Spatial plots of (a) PM_{2.5} self-contribution, (b) the relative self-contribution, (c) the rest domestic contribution, and (d) the ratio of the rest domestic contribution to the domestic contribution, and (e) the ratio of rest domestic contribution to the self-contribution in 160 local authorities during the simulation period of 2016.

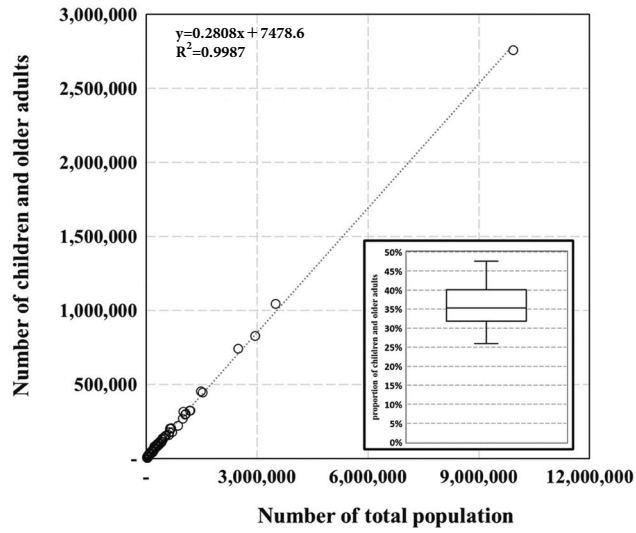


Fig. S3. The comparison of total population and the number of children and older adults for each local authority. Small box represents proportion of children and older adults for each local authority (the box represents the 25th to 75th percentiles, and the whiskers represent the upper and lower extremes) (MOIS, 2020).