



논문

2015~2017년 지자체별 PM_{2.5} 농도 및 인구 노출도 평가 Evaluations on PM_{2.5} Concentrations and the Population Exposure Levels for Local Authorities in South Korea during 2015~2017

손규원, 김은혜, 배민아, 유승희, 강윤희¹⁾, 김현철^{2),3)}, 김병욱⁴⁾, 김순태*

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

Kyuwon Son, Eunhye Kim, Minah Bae, Seunghee You, Yoon-Hee Kang¹⁾,
Hyun Cheol Kim^{2),3)}, Byeong-Uk Kim⁴⁾, Soontae Kim*

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

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

²⁾Cooperative Institute for Satellite Earth System Studies, University of Maryland, USA

³⁾Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD, 20740, USA

⁴⁾Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, 30354, USA

접수일 2020년 9월 13일
수정일 2020년 12월 3일
채택일 2020년 12월 15일

Received 13 September 2020
Revised 3 December 2020
Accepted 15 December 2020

*Corresponding author
Tel : +82-31-219-2511
E-mail : soontaeim@ajou.ac.kr

Abstract The ambient concentration of an air pollutant can represent how bad air quality is aggravated, but local authorities may need the alternative indicator to show the urgency of air quality improvement in terms of the personal exposure. In this study, we compare PM_{2.5} concentration and the population exposures at the municipal and provincial authority levels in South Korea. For this purpose, we calculated three PM_{2.5} exposure indicators (i.e. PM_{2.5} concentration, Total Population Exposure; TPE, Population Weighted Exposure; PWE) for each municipal and provincial authority in South Korea during 2015-2017. The Kriging spatial interpolation was applied to fill out the spatiotemporal scarcity of the surface measurements. Jeonbuk presented the highest period-mean PM_{2.5} concentration (27.2 µg/m³) among 17 provinces while 15 municipal authorities in Jeonbuk show the intra-provincial variation as large as 6.4 µg/m³ (24.8 µg/m³~31.2 µg/m³). Meanwhile, the TPE value, which means the authority's total health burden, was highest in Gyeonggi owing to the high gross population. The PWE, which represents individual population exposure, was highest in Jeonbuk (13.9 µg/m³). The PWEs of municipal authorities in Jeonbuk ranged from 9.8 (Muju) to 17.0 µg/m³ (Iksan). When sorted, three exposure indicators for an authority placed in different rankings. However, there exist some provincial or municipal authorities that consistently take high rankings for all those indicators. It implies that urgent air quality improvement plans should be implemented to minimize the population exposure in those authorities.

Key words: Population exposure, PM_{2.5}, Annual mean concentration, TPE, PWE

1. 서론

기준성 대기오염물질 중 초미세먼지(이하 PM_{2.5}; Particulate Matter of which diameter is equal to or less than 2.5 µm)는 심혈관계질환과 폐질환을 유발할 수 있다(Han *et al.*, 2018; Lim *et al.*, 2016; Apte *et al.*, 2015; Lim *et al.*, 2012; Hong and Jo, 2003). 이에 정부

에서는 국민의 건강 보호를 위해 PM_{2.5} 농도에 대한 대기환경기준을 설정하여 관리하고 있다. 그러나, 2015~2018년 평균 PM_{2.5} 농도는 약 25 µg/m³으로 (NIER, 2019, 2018, 2017, 2016), 연평균 대기환경기준 (15 µg/m³)을 크게 웃돌았다.

2015~2017년의 PM_{2.5} 농도는 광역 지자체별로 차이를 보일 뿐만 아니라 한 광역 지자체 내에서도 기

초 지자체별로 PM_{2.5} 농도가 상이하었다 (NIER, 2018, 2017, 2016). Son *et al.* (2020)에 따르면, 2015~2017년 전북에서 연평균 PM_{2.5} 농도는 기초 지자체별로 최대 6 µg/m³의 차이를 보였다. 이러한 PM_{2.5} 농도 차이는 지역별 배출 형태와 지형, 기상 여건에 따라 차이를 보이므로, 동일한 대기질 개선 정책에 따른 PM_{2.5} 농도 감소 폭 또한 지자체별로 다르게 나타날 수 있다 (Yeo and Kim, 2019). 이를 위해 환경부에서는 지역 현황을 고려한 대기관리권역 도입을 통해 지역 맞춤형 대기오염물질 저감 방안을 강구하고 있다 (MOE, 2020a). 또한, 정부에서는 대기질 관리의 궁극적인 목적인 국민의 건강 보호 및 노출 현황 파악을 위해 인구 밀집 지역을 중심으로 도시대기측정망을 설치 및 운영하고 있다. 측정 농도는 대기질 현황 파악 및 예보, 개선 정책 수립 등 전반적인 대기질 관리의 기초 자료로 활용된다 (NIER, 2019; KOSIS, 2015).

한편, 대기환경 관리 정책의 수립과 시행에는 막대한 비용이 소요되지만, 한 광역 지자체 내에서도 농도 및 인구 분포가 상이하기 때문에 동일한 농도 저감에 대한 노출 저감 효과는 달라질 수 있다. 따라서 대기 중 농도 외에 인구 분포를 고려한 지역별 노출 개선 정도를 분석할 필요가 있다. 미 환경청의 경우, 대기관리권역 설정 시에 농도 현황뿐 아니라 인구 자료를 함께 검토한다 (EPA, 2006). 이처럼, 대기질 개선 정책의 궁극적인 목표인 노출 감소는 농도 감소와 더불어 중요한 평가 대상이 된다. 한 예로 Lin *et al.* (2016)은 대기오염 현황을 나타내는 PM_{2.5} 농도와 인구를 고려한 PM_{2.5} 노출도를 기반으로 지역별 대기질 개선의 시급성을 제시하였다. 그 외 선행 연구들 (i.e., Chen *et al.*, 2017; Leem *et al.*, 2015; Ha and Moon, 2013; Arunachalam *et al.*, 2011; Boldo *et al.*, 2011; Pope *et al.*, 2009)에서는 조기 사망률과 건강 부담 추정 시, 지역별 대기오염물질의 현황 농도와 더불어 인구 분포를 고려한 대기오염 노출 평가를 수행한 바 있다.

이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 2015~2017년 동안 관측 기반 공간 내삽 자료를 통해 국내 기초/

광역 지자체별 PM_{2.5} 농도 현황을 분석하고, 지자체별 인구를 고려한 노출도를 산정 및 비교하였다. 이를 통해 국내 기초/광역 지자체별 PM_{2.5} 농도 개선이 시급한 지역을 검토하고, 지자체별 노출 수준을 활용한 노출도 저감 효과 분석 및 노출 인구 산정을 수행한다.

2. 연구 방법

2.1 지자체별 PM_{2.5} 농도

본 연구의 대상 기간은 PM_{2.5} 관측이 도시대기측정망 등에서 공식적으로 시작된 2015년부터 2017년까지 3년간이다. 해당 기간에 대한 국내 PM_{2.5} 농도 자료 마련을 위하여 도시대기측정망 282개, 교외대기측정망 22개, 국가배경측정망 3개소에서 관측된 1시간 평균 자료를 이용하였고, 일평균 유효 관측 비율이 75% 이상인 경우에 대해 분석하였다. 또한, 도로 변측정망은 국지적인 고농도 특성을 보일 수 있어 본 연구에서는 제외하였다 (Lee *et al.*, 2012; Bae and Lee, 2009).

그림 1은 본 연구에서 이용된 측정망의 위치를 나타낸다. 대상 기간 동안 관측 자료를 이용하는 경우, 지역 대표 농도 도출이 가능한 기초 지자체 수는 131곳(국내 전체 기초 지자체의 52.4%)으로, 국내 전 지역에 대한 분석은 제한적이다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 연구에서는 매시간 관측 농도를 기반으로 공간 내삽 방법의 일종인 Kriging 기법을 활용하여 전국에 대한 농도장을 마련하였다. Kriging 기법은 반베리오그램(semivariogram)을 통해 측정값의 공간적 상관성을 고려하여 내삽하며, 다른 내삽법에 비해 예측 값이 비교적 정확하여 다양한 선행연구 (i.e., Masroor *et al.*, 2020; Son *et al.*, 2020; Song *et al.*, 2018; Lee, 2017; Kim and Jo, 2012)에서 활용되었다. 다만, 본 연구에서는 공간 내삽과정에서 관측 농도의 부재로 발생할 수 있는 농도 왜곡을 보완하기 위해 해안 및 도서 지역에 한해 대기질 모사 자료를 보조적으로 이용하였다. 이에 대한 자세한 내용은 Son *et*

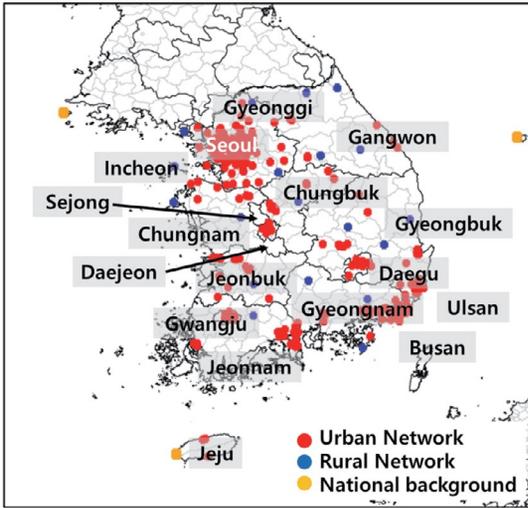


Fig. 1. Spatial locations of air quality monitoring stations available in South Korea for 2017. Red, blue, and orange symbols represent urban, rural, and national background network, respectively.

al. (2020)를 참조할 수 있다. 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도는 내삽 농도장을 토대로 국토지리정보원에서 제공하는 행정 구역별 차지 면적의 모양에 따라 추출하였다. 또한, 노출도 평가를 위해 2015년부터 2017년까지 3년 평균 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도를 이용하였다(Kim et al., 2018). 다만, 경북과 충북의 경우 $PM_{2.5}$ 관측 자료가 각각 2015년 5월과 2015년 11월 이후에 대해 이용 가능하므로, 공간 내삽 시 이전 기간에 대해서는 이용 가능한 다른 지역의 관측 자료만이 활용되었다. 이러한 관측 자료 이용의 제한은 본 연구에서 제시한 결과의 오차를 유발할 수 있다.

공간 내삽 시 보조적으로 활용된 대기질 모사의 $PM_{2.5}$ 농도는 관측 농도와 상관계수(R) 및 RMSE가 각각 0.9, $6.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 보다 자세한 모사 수행평가는 Son et al. (2020)을 참고할 수 있다. 또한, 도시대기 측정망을 기준으로 공간 내삽된 농도장과 관측 농도의 비교를 부록 그림 1에 제시하였다. 도시대기 측정망 기준으로 $PM_{2.5}$ 관측 농도는 대상 기간 평균 $25.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 내삽 농도는 관측 농도에 비해 $0.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 낮은 $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다.

2.2 $PM_{2.5}$ 인구 노출 평가

2.2.1 인구 노출도 계산

대기오염물질에 대한 노출도는 산정 방식에 따라 다양하게 정의된다(Lee et al., 2016; Kim et al., 2004). 본 연구에서는 $PM_{2.5}$ 농도 외에 두 종류의 인구 노출도를 살펴보았다.

$$TPE_i = \sum_{j=1}^N P_j \times D_j \quad (1)$$

단, i 가 광역 지자체일 경우 j 는 기초 지자체를 나타내며, i 가 기초 지자체일 경우 j 는 동 단위 행정구역을 나타낸다.

TPE_i = Total population exposure (person $\times \mu\text{g}/\text{m}^3$)

N = The number of lower-level authorities

P_j = Population at the j^{th} lower-level authority

D_j = $PM_{2.5}$ exceedance calculated by subtracting the annual mean $PM_{2.5}$ standard ($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$) from the annual mean $PM_{2.5}$ concentration at the j^{th} authority (C_j)

식(1)에서 D_j 는 하위 지자체의 연평균 $PM_{2.5}$ 농도(C_j)의 해당 대기환경기준($15 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하는 농도를 의미하며, 하위 지자체 j 의 TPE는 인구 수(P_j)와 초과 농도(D_j)의 곱으로 산정된다. 하위 지자체별 TPE가 산정이 되면, 상위 지자체 i 의 TPE는 하위 지자체들의 TPE의 총합으로 계산된다. 인구수와 대기환경기준 초과 농도를 곱하여 TPE를 산정하는 방식은 Han et al. (2018)이 인구수와 대기 중 농도를 이용하여 조기 사망자수를 산정한 방식과 유사하다. 다만, Han et al. (2018)과 같은 선행 연구에서는 연평균 $PM_{2.5}$ 농도를 이용하였으며, 본 연구에서는 대기환경기준을 초과하는 지역에 대한 대기질 개선의 시급성을 비교하기 위해 인구 노출도 산정 시 대기환경기준 초과 농도를 이용하였다.

TPE는 대기관리권역 설정과 같이 관리 대상 지역에 대한 대기오염의 심각성을 분석함에 있어 단순히 농도만을 고려하는 것이 아니라, 대상지역의 총 인구

수를 함께 반영한다. TPE는 중앙정부나 지방정부에서는 대기질 개선 정책 시행에 따른 비용-효과 분석에 활용될 수 있다. 다만, TPE는 계산 식에 의해 대기환경기준을 크게 초과하거나 인구수가 많은 지역에서 높게 산정된다. TPE의 계산 방식에 따라 TPE가 지역 내 총 인구에 비례하는 점을 고려하여, 본 연구에서는 TPE를 지역 내 총 인가로 정규화(normalized)한 인구 가중 노출도(Population Weighted Exposure; PWE)를 함께 검토하였다. PWE는 한 지자체 내에서 개인별 평균 노출도를 보이는 지표로서 수용체 중심의 노출 정도를 나타내며, 이는 Anun et al. (2018)과 Fann et al. (2017)이 이용한 population-weighted annual mean concentration의 개념과 유사하다. PWE 산정에도 TPE와 마찬가지로 대기환경기준 초과 농도를 이용하였다. PWE 역시 TPE와 마찬가지로 광역지자체 또는 기초 지자체에 대해 적용이 가능하며, 산정 방식은 식 (2)와 같다. 식 (2)를 통해 도출된 PWE는 지역 내의 인구와 농도의 수평 분포에 따라 산정되는 값이 달라진다. 한 지자체 i 의 PWE는 식 (2)와 같이 해당 지역의 TPE (TPE_i)를 총 인구 (P_i)로 나누어 계산한다.

$$PWE_i = \frac{TPE_i}{P_i} \quad (2)$$

PWE_i = Population Weighted Exposure at i authority ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

P_i = Total population at i authority

본 연구에서는 지표 관측 자료를 기반으로 공간 내삽 기법을 적용한 PM_{2.5} 농도와 TPE, 그리고 PWE를

도출한다. 그림 2에 기초/광역 지자체에 대한 인구 노출도 산정 절차를 요약하였다.

내삽된 농도장은 방법론에 의해 관측 농도와 일부 오차를 보일 수 있으며, 이는 식 1과 식 2에 의해 본 연구에서 산출한 인구 노출도 차이로 이어질 수 있다. 따라서, 3.4절에서 관측 자료가 이용 가능한 지역에 한해 관측 자료와 공간 내삽 자료를 통해 도출한 TPE를 서로 비교 및 검토하였다.

2.2.2 노출 지표 비교

PM_{2.5} 농도와 인구 노출도를 나타내는 TPE와 PWE 등 세 가지 지표에 대해 산정 방식과 결과의 차이, 그리고 활용성을 그림 3에 예시하였다. 그림 3에서 세 지역의 하위 지자체 (a1~c2 등)의 인구분포는 상이하나, PM_{2.5} 농도는 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 지역간 모두 동일하다. 하위 지자체의 면적이 모두 같다면, 세 지역의 PM_{2.5} 평균 농도는 모두 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 동일하다. 이처럼 PM_{2.5} 농도는 인구 분포와 무관하게 하위 지자체별 PM_{2.5} 농도의 평균으로 산정된다. 지역 내 총 인구와 초과 농도로 산정되는 TPE의 경우, 인구가 가장 많은 B 지역에서 가장 높다. 이는 초과 농도가 동일한 경우, TPE는 많은 인구수에 의해 높게 산정되므로 동일한 농도 조건에서도 B 지역에 대한 대기오염 개선이 다른 지역에 비해 우선적으로 이뤄져야 함을 시사한다. 또한, 하위 지자체들의 인구 노출도가 동일한 경우에는 하위 지자체의 수가 많은 상위 지자체에서 TPE가 상대적으로 높아질 수 있다.

한편, PWE는 하위 지자체의 농도와 인구 밀집도를 모두 고려하여 산정된다. 그림 3에서 A 지역과 C

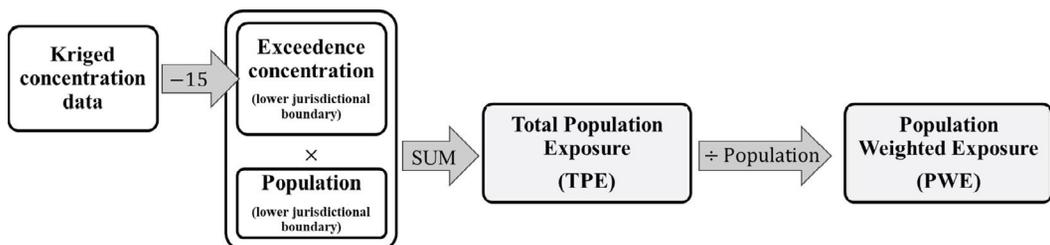


Fig. 2. Conceptual diagram for calculating population exposure in this study.

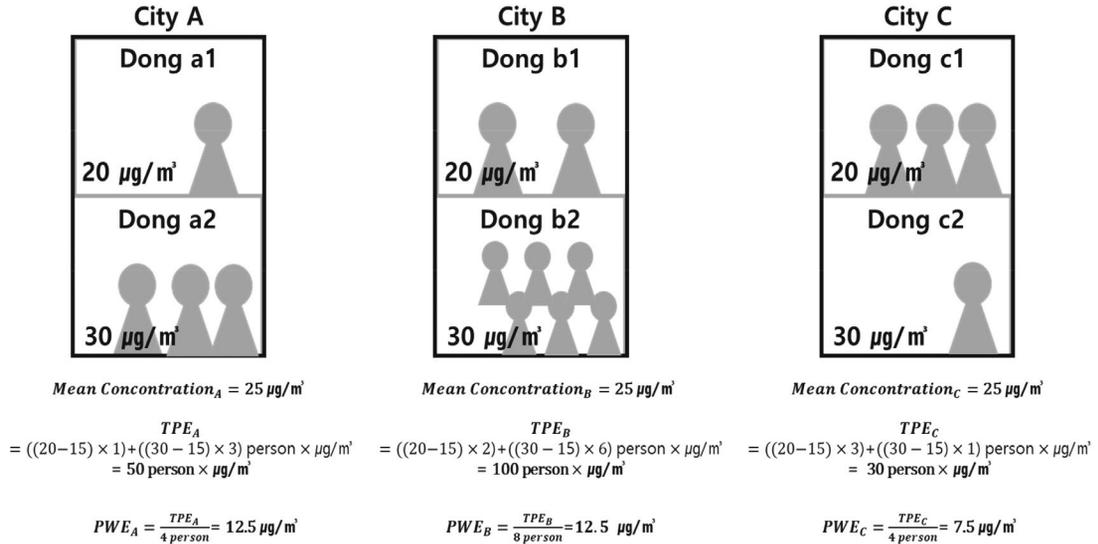


Fig. 3. Examples of exposure levels in terms of PM_{2.5} concentration, TPE, and PWE. Cities A, B, and C include dong named a1 and a2, b1 and b2, and c1 and c2, respectively. Assumed that all dong have the same areal coverages.

지역을 비교해 보면, a2동과 c2동은 동일한 초과 농도를 보인다. 다만, a2동의 인구가 c2동보다 더 많기 때문에 PWE는 A 지역에서 C 지역에 비해 높다. 즉, PM_{2.5} 농도가 같은 두 지역 중에서 PWE가 높은 지역은 고농도 PM_{2.5}에 노출되는 인구가 상대적으로 많음을 의미한다. 이처럼, PWE는 소위 hot-spot 등 오염도가 높은 지역에 상주하는 인구가 많을 시 높아진다.

위와 같이 본 연구에서 검토한 세 가지 노출 지표 (PM_{2.5} 농도, TPE, PWE)는 산정 방식과, 의미, 활용 측면에서 차이를 보이므로, 지표 간의 직접적인 비교는 어렵다. 다만, 제시된 노출 지표들은 목적에 따라 다양한 측면에서 한 지역의 대기오염 수준과 총 인구를 고려한 개선 대책의 중요도, 그리고 개인별 노출도를 보여줄 수 있다.

3. 결과 분석

3.1 공간 내삽 자료를 이용한 지자체별 PM_{2.5} 농도에 따른 노출 인구 검토

국내 광역 지자체 간 인구수의 편차는 최대 42배이

며, 기초 지자체 간 인구수의 편차는 최대 85배이다 (KOSTAT, 2018). 지자체별로 인구뿐 아니라 PM_{2.5} 농도 또한 차이를 보이는 점을 고려하면, 한 지자체의 인구 노출과 이를 개선하기 위한 대책 마련의 필요성에 대한 가중치는 지자체별 인구와 PM_{2.5} 농도에 따라 달라지게 된다.

그림 4에 제시한 각 기초 지자체별 PM_{2.5} 농도 현황과 노출 인구는 한 광역 지자체 내에서도 많은 차이를 보인다. 특히, 인천, 강원, 충북, 충남 등과 같은 여러 광역 지자체 내에서 기초 지자체별 PM_{2.5} 농도는 최대 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 차이를 보인다. 이에 따라, 분석 대상 지역을 어떻게 결정하는지에 따라 산정되는 PM_{2.5} 노출도는 달라질 수 있다. 예를 들어, 강원도 원주시에서는 대상기간 동안 $29.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 PM_{2.5} 농도에 시민 34만 명이 노출된다. 반면, 강원도 전체 PM_{2.5} 평균 농도는 $22.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 원주시의 PM_{2.5} 농도와 $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 큰 차이를 보인다. 따라서, 지역별 PM_{2.5} 농도 편차가 클수록 상세한 농도와 인구 자료를 바탕으로 하는 노출도 분석이 필요하다. 이러한 점을 고려하여 미국에서는 대기오염물질에 대한 노출 인구 산정 시 국내의 광역이나 기초 지자체보다

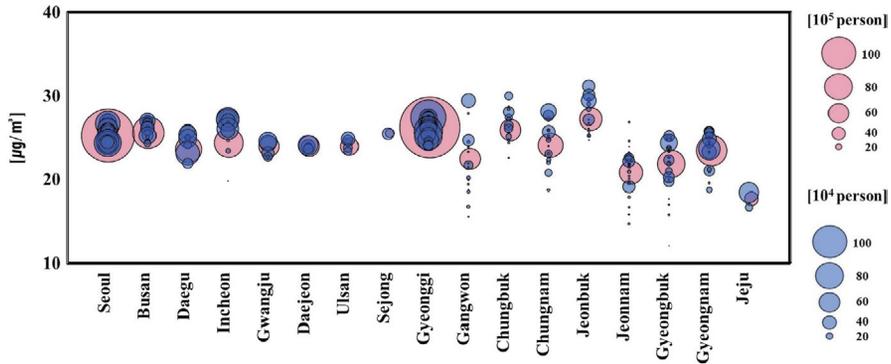


Fig. 4. The PM_{2.5} exposure levels and the number of populations for each province from 2015 to 2017. Pink-colored circles represent the total population in a province. The PM_{2.5} exposure levels and the populations in local authorities in a province are separately presented with blue-colored circles.

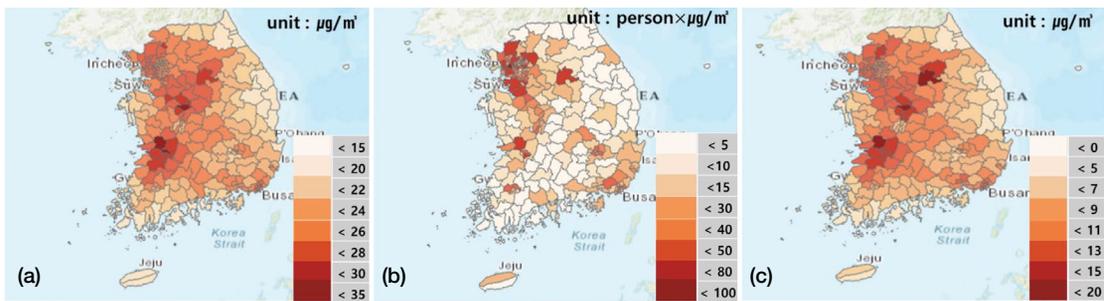


Fig. 5. Spatial plots of (a) 3-yr mean PM_{2.5} concentration, (b) TPE, and (c) PWE estimated for each local authority during 2015~2017.

상세한 인구조사 분할구역 (census tract)을 기반으로 한다 (Hayes *et al.*, 2020; Coker *et al.*, 2015; Batterman *et al.*, 2014). 따라서 국내에서도 인구 노출 평가를 위해서는 보다 고해상도의 지역 범위를 대상으로 파악하는 것이 필요하다.

3.2 기초 지자체별 PM_{2.5} 농도 및 노출 평가

본 절에서는 기초 지자체 수준의 PM_{2.5} 노출도를 검토하였다. 2015~2017년 사이 기초 지자체별 PM_{2.5}의 연평균 농도는 대체로 충북, 전북, 강원 등에 위치한 기초 지자체에서 높았으며, 전북 익산이 31.2 µg/m³으로 가장 높게 나타났다(그림 5(a)). 또한, 전체 250개의 기초 지자체 중에서 전남 완도와 경북 울릉 두 곳을 제외한 248곳(99%)에서 연평균 PM_{2.5} 대기

환경기준을 초과하였다. 한편, 관측 자료를 기반으로 검토 가능한 기초 지자체에서는 모두 연평균 PM_{2.5} 대기환경기준을 초과하였다.

그림 5(c)에 나타난 기초 지자체별 TPE는 주로 인구가 많은 지역에서 높아, 상위 20위권에 수도권 기초 지자체 18곳이 포함된다. 국내 TPE 상위 3곳의 기초 지자체는 경기의 부천(인구: 0.9×10⁶명)과 화성(인구: 0.7×10⁶명), 서울의 강서(인구: 0.6×10⁶명) 순이다(그림 6(b), 그림 6(c)). 노출 인구 관점에서 볼 때, 이처럼 TPE가 높게 나타나는 지역에서 PM_{2.5} 농도 개선에 대한 비용-편익 효과가 상대적으로 높을 것으로 보인다. 기초 지자체 내의 개인별 PM_{2.5}에 대한 노출 수준인 PWE를 보인 그림 5(d)는 전북 익산에서 약 17.0 µg/m³로 가장 높고, 강원 원주(15.7 µg/m³),

충북 청원(15.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 등이 뒤를 잇는다. 한편, 기간 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 PWE를 통해 대기질 개선 우선 순위를 비교한 경우 경기 연천에서 150위($\text{PM}_{2.5}$ 농도)에서 81위(PWE)로 최대 69위 상승하였고, 서울 도봉구에서 108위($\text{PM}_{2.5}$ 농도)에서 136위(PWE)로 최대 28위 낮아졌다.

이처럼 각 노출 지표의 의미와 산정하는 방식에 따라 기초 지자체의 노출 수준은 차이를 보인다. 예를 들어, 기초 지자체 수준에서 농도(그림 6(a))와 PWE(그림 6(d)) 가장 높았던 전북 익산의 TPE는 상위 21위이다. 한편, 지자체의 TPE가 가장 높았던 경기 부천의 $\text{PM}_{2.5}$ 농도와 PWE 노출 수준은 각각 상위 22위, 26위였다. 한편, 전북의 익산과 덕진, 강원 원주, 경기 부천 등에서는 3가지 지표(농도, TPE, PWE) 모두 상위 약 15% (250개 중 33위) 이내에 속하므로 해당 지자체들에 대해 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 및 노출 개선이 시급한 것으로 판단된다.

다만, 본 연구에서 도출된 PWE와 연평균 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 바탕으로 추산한 기초 지자체별 노출 위험 순위는 전반적으로 유사한 결과를 보인다. 이는 현재 공간 내습장을 생성하는 데 이용된 측정소의 개수가

292개로, 기초 지자체의 PWE 산출에 필요한 동별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도의 공간적 편차를 표현하기에는 다소 부족하기 때문이다. 하지만, 최근 관측소 확충과 향후 마이크로 센서의 도입 등을 고려하면 추후 고해상도 관측 농도 자료의 확보가 가능해질 것으로 보인다. 추후 이를 통해 보다 세분화된 지역에 대한 인구 노출도를 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

3.3 광역 지자체별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 및 노출 평가

$\text{PM}_{2.5}$ 농도는 지역 자체적인 배출 영향뿐 아니라 인근 지역에서 배출된 오염물질의 2차 생성을 통해 영향을 받는다(KEI, 2017). 따라서, 효과적인 대기관리지역 검토를 위해서는 기초 지자체뿐 아니라 보다 넓은 지역인 광역 지자체 단위에서 $\text{PM}_{2.5}$ 노출 수준을 검토할 필요가 있다.

그림 7(a)는 광역 지자체별 $\text{PM}_{2.5}$ 농도를 나타낸다. 대상 기간 평균 전북에서 27.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높았으며, 경기(26.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)와 충북(25.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)이 뒤이었다. 한편, 광역 지자체의 TPE는 인구가 약 12.9×10^6 명인 경기에서 가장 높다(그림 7(b)). 전북(인구 1.9×10^6 명)의 경우 인구수는 경기의 약 14% 수준으

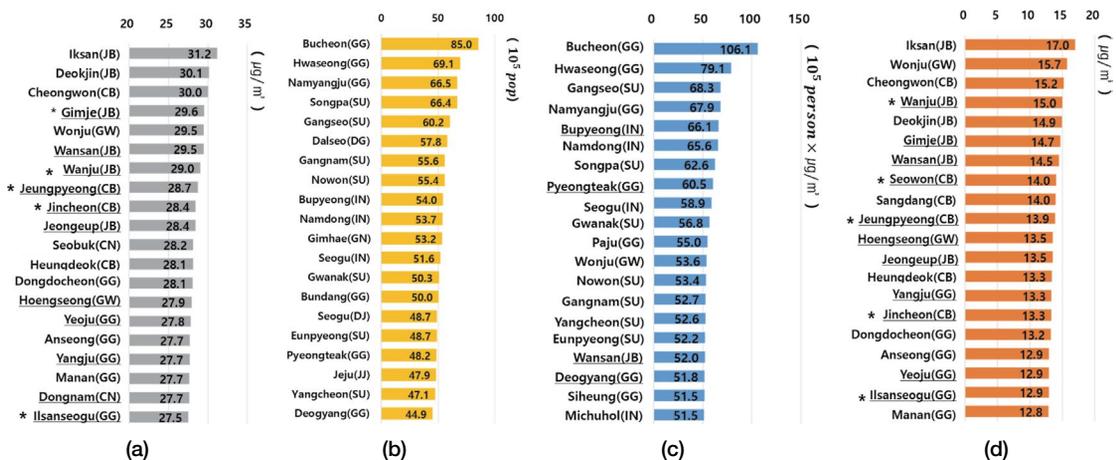


Fig. 6. Bar graphs of (a) 3-yr mean $\text{PM}_{2.5}$ concentration (gray), (b) Population (yellow), (c) TPE (blue), and (d) PWE (orange) in top-20 local authorities. Underlying authorities indicate that the number of valid observational data is less than the criteria (< 75%). Also, the asterisk symbols represent areas in which there are no observations until 2019. SU in parenthesis represents Seoul, GG for Gyeonggi, IN for Incheon, GW for Gangwon, CB for Chungbuk, CN for Chungnam, DG for Daegu, GN for Gyeongnam, and JB for Jeonbuk.

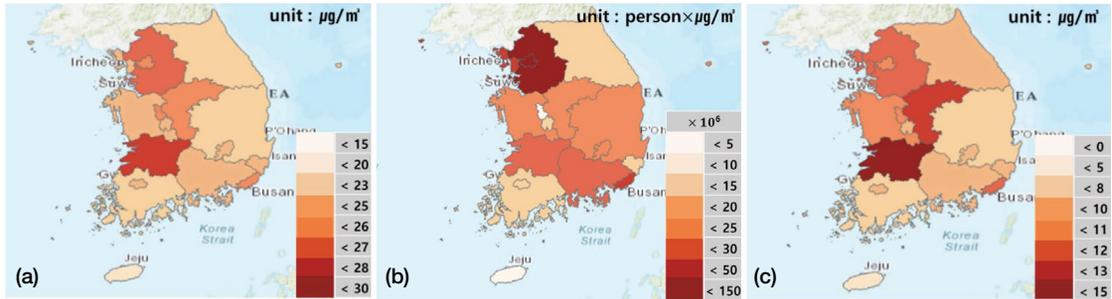


Fig. 7. Spatial distributions of (a) 3-yr mean PM_{2.5} concentration, (b) TPE, and (c) PWE for the provincial authority in South Korea.

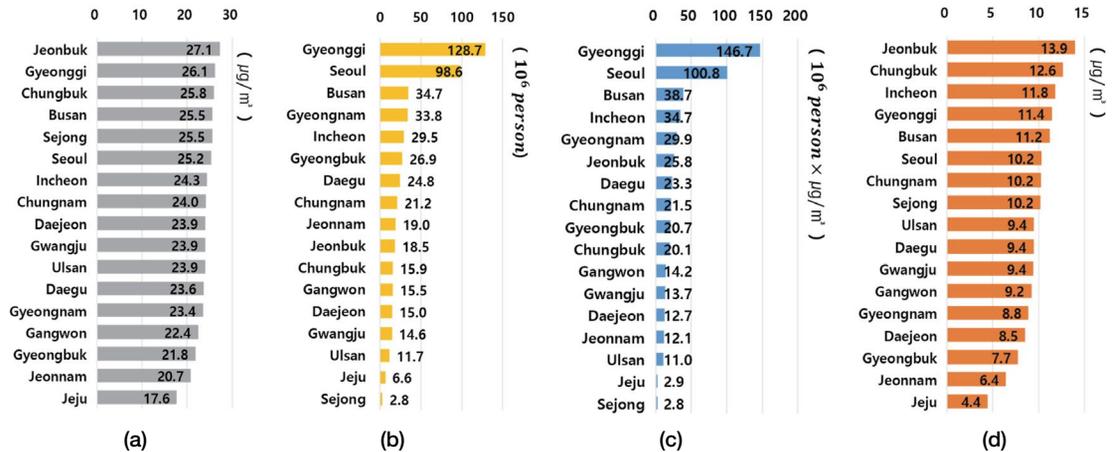


Fig. 8. Bar graphs of (a) 3-yr mean PM_{2.5} concentration (gray), (b) Population (yellow), (c) TPE (blue), and (d) PWE (orange) in the provincial authorities.

로, 연평균 PM_{2.5} 농도는 경기보다 약 1 µg/m³가량 높은 27.1 µg/m³이지만 국내 광역 지자체별 TPE는 여섯 번째로 높게 산정되었다(그림 8(c)). 광역 지자체별 PWE(그림 7(c))는 대체로 그림 7(a)에 나타난 연평균 PM_{2.5} 농도 수준과 유사하며, 4.4 µg/m³로 가장 낮은 제주를 제외하면 광역 지자체간 최대 2배 정도 차이를 보인다. 연평균 PM_{2.5} 농도가 가장 높았던 전북의 경우, PWE 또한 13.9 µg/m³로 가장 높고, 충북, 인천 등이 뒤를 잇는다(그림 8(d)). 서울, 경기, 부산은 PM_{2.5} 농도를 비롯한 TPE와 PWE 모두 상위 5위 안에 들어, 해당 지역의 PM_{2.5} 농도 개선 및 노출 감소 방안이 시급해 보인다.

한편, 인천, 충북, 충남, 강원 의 경우 연평균 PM_{2.5} 순위 대비 PWE 순위가 상승한다. 예를 들어, 인천의 연평균 PM_{2.5} 농도 순위는 7위이나(그림 8(a)), PWE는 3위로 높아진다(그림 8(d)). 이는 인천 내 기초 지자체들의 연평균 PM_{2.5} 농도의 평균(mean)은 24.3 µg/m³이나, 중앙값(median)은 27 µg/m³로 광역 지자체 내에서 농도 편차가 크며, 그림 4를 참고하면 PM_{2.5} 농도가 중앙값을 초과하는 기초 지자체에 인천 인구의 2/3가 밀집하여 있기 때문으로 판단된다. 이처럼 광역 지자체 내에서도 인구와 농도 분포에 따라 PWE에서 제시하는 1인당 노출도가 다르다. 따라서, 그림 9에서 인천, 충북, 충남, 강원, 전남, 경북 등과 같이 각

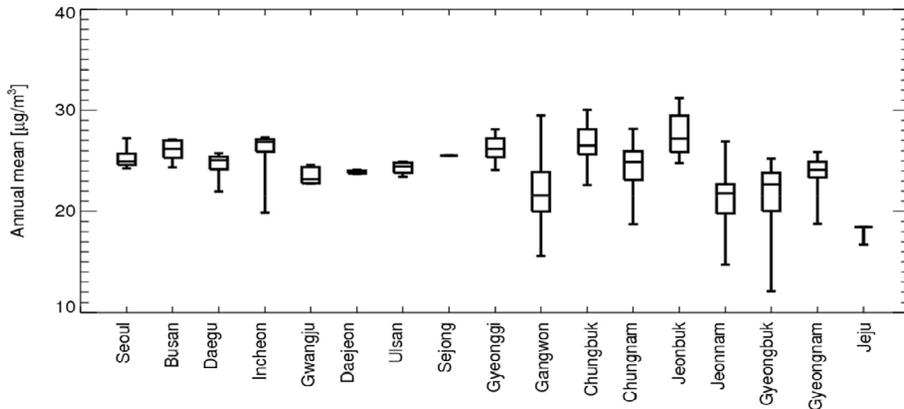


Fig. 9. Box whisker plot of 3-yr mean $PM_{2.5}$ concentrations of local authorities in each province in South Korea during 2015~2017.

지자체의 평균 농도에 비해 중앙값이 높고, 해당 지역에 인구가 밀집된 지역은 $PM_{2.5}$ 농도보다 PWE 이용 시 대기질 개선 시급성이 더 크게 나타난다.

3.4 관측 자료와 공간 내삽 자료의 인구 가중 노출도 비교

본 절에서는 $PM_{2.5}$ 공간 내삽 방법을 통한 인구 노출도 산정 과정을 평가하였다. 이를 위해 이용 가능한 관측 자료가 있는 기초 지자체를 대상으로 관측 농도를 직접 활용하여 TPE를 산정하였으며(그림 10(a)), 이를 본 연구에서 이용된 공간 내삽 농도 기반의 TPE와 비교하였다(그림 10(b)).

기초 지자체별 관측 농도와 공간 내삽 농도의 TPE의 표준편차는 평균 3%이며, 상관성(R^2)은 0.65였다. 관측 농도의 TPE와 공간 내삽 농도의 TPE는 지역에 따라 최대 1.5배의 차이를 보였는데, 특히, 인구가 40만 명 이상인 기초 지자체에서 차이가 크게 나타났다(그림 10(b)). 국내 도시대기측정망은 인구수를 기준으로 설치되므로, 도시 지역에는 면적대비 측정소가 많이 분포하고 있다. 이에 따라 도시 지역의 경우 측정소가 인접해 있는 경우가 많은데, 인접한 측정소 간의 관측 농도 차이가 큰 경우 내삽 농도장은 실제 관측 농도의 공간적 변화를 반영하기 어렵다. 따라서, 수도권의 부천, 기흥과 같은 지역에서 계산되는 TPE

는 해당 지역의 많은 인구수로 인해 더욱 큰 편차를 보인다. 이처럼, 이용되는 농도 자료에 따라 TPE 산정 결과가 달라지는 것은 인구가 많은 국내 지역에서 대체로 농도 편차가 크게 나타나고 있음을 반증한다. 또한, 해당 기간의 지표 관측 자료의 해상도 수준이 지역 내 농도 편차를 보이기에 충분하지 않음을 시사한다.

3.5 인구 노출도 활용 방안

본 연구에서 산정한 인구 노출도를 고려하여 지자체별 저감 대책을 시행하는 경우, 지역별 대책에 따라 단위 농도 저감 대비 노출 편익 효과가 달라질 수 있다. 예를 들어, 전북의 경우 기초 지자체별 TPE가 가장 높았던 완산(TPE: 5.2×10^6 person \times $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 농도가 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 저감될 경우, 광역 지자체인 전북에 대해 0.3×10^6 person \times $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 총 인구 노출도 감소와 $0.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량 PWE의 감소가 예상된다. 한편, 총 인구 노출도가 가장 낮았던 무주(TPE: 0.2×10^6 person \times $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에서 농도 저감 시, 노출도 저감 효과는 완산의 약 10분의 1 수준이다. 따라서, 한 광역 지자체 내에서도 기초 지자체의 TPE를 고려한 선별적인 저감을 통해 노출도 개선 효과가 달라질 수 있다.

이러한 인구 노출도는 지자체별 $PM_{2.5}$ 농도를 기반

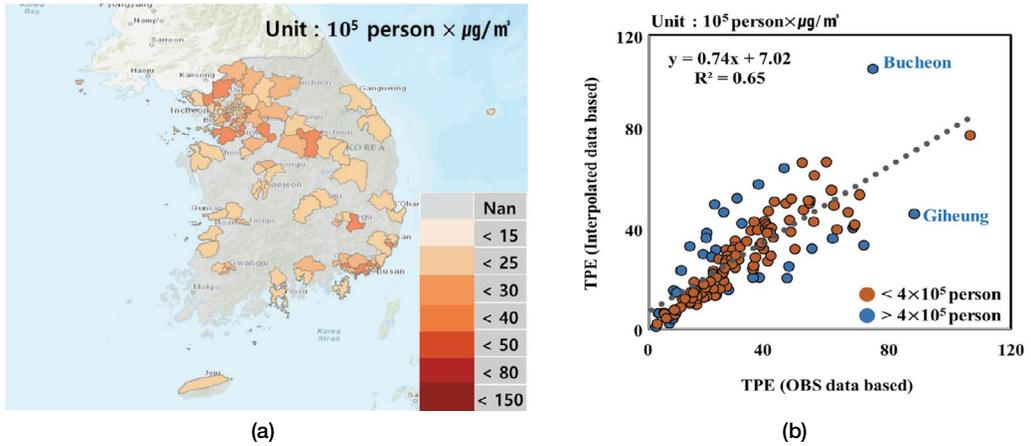


Fig. 10. (a) The spatial plot of TPE based on the observations, and (b) scatter between TPE based on the observations and TPE estimated with the interpolated data by local authorities.

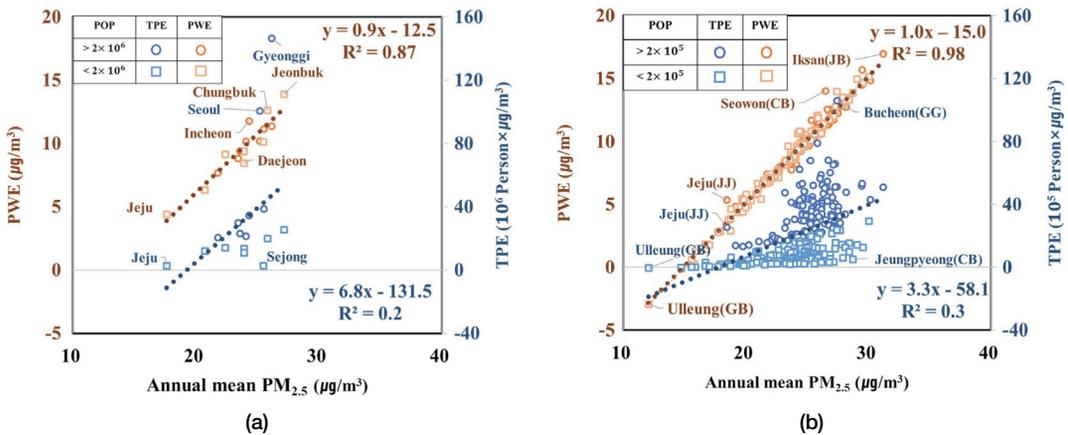


Fig. 11. Scatters of 3-yr means PM_{2.5} (x-axis) against TPE (blue) and PWE (orange) among (a) 17 provinces, and (b) 250 local authorities.

으로 산정되므로, 각 지자체의 인구 노출 지표와 PM_{2.5} 농도를 함께 살펴볼 필요성이 있다. 이를 위해 그림 11(a)와 (b)에 각각 광역, 기초 지자체에 대해 인구를 고려한 TPE, PWE와 연평균 PM_{2.5} 농도와의 상관성을 나타내었다. 각 지자체에서 총 인구가 많은 지역은 TPE와 PM_{2.5} 농도의 추세선에서 위쪽에 위치하여, 연평균 농도 수준에 비해 총 인구 노출도가 높게 나타난다. 한편, 유사한 농도 수준이라도 인구 분포에 따라 기초 지자체의 TPE는 충북 증평과 경기

부천에서 최대 30배, 광역 지자체의 TPE는 세종과 경기에서 35배 이상의 차이를 보였다. 한편, PWE와 PM_{2.5} 농도의 상관계수(R)는 0.87(광역 지자체)~0.98(기초 지자체)로 대체로 선형적인 관계를 가져, 농도 수준을 고려한 대기질 관리가 개인별 노출도 관리로 이어질 수 있음을 보인다. 한편, 기초 지자체에서 광역 지자체에 비해 PWE와 PM_{2.5} 농도의 상관계수가 더 큰 것은 앞서 언급한 이용된 농도장의 공간 해상도와 관련이 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 3년간(2015년~2017년)의 국내 지자체별 PM_{2.5} 농도, TPE, PWE의 3가지 지표를 이용하여 지자체별 PM_{2.5} 농도 관리가 시급한 지역을 추정하였다. 대상 기간 평균 PM_{2.5} 농도는 기초 지자체 2곳(전남 완도, 경북 울릉)을 제외한 국내 전역에서 대기환경기준(연평균 15 µg/m³)을 초과하여, 국내 전반적인 대기질 개선이 필요할 것으로 판단된다. TPE는 경기에서 최대 146.7 × 10⁶ person × µg/m³로 나타나는 등 대체로 인구가 많은 지역에서 노출 관리가 더욱 시급하였다. PM_{2.5} 농도 수준과 노출 관리 시급성이 유사한 PWE는 하위 지자체의 초과 농도와 노출 인구에 따라 일부 지역에서 연평균 농도와 차이를 보였다. 이와 같이 동일 지역이라고 하더라도 PM_{2.5} 농도, 그에 따른 TPE와 PWE 등 이용 지표에 따라 대기질 우선 관리 지역이 다르게 나타난다. 다만, 광역 지자체 수준에서는 서울과 경기, 기초 지자체 수준에서는 전북 익산과 덕진 등 일부 지역에서는 3가지 노출 지표에서 모두 높아, 해당 지역에 대해서는 노출도 저감 대책 수립이 시급하다고 판단된다.

본 연구에서는 광역 및 기초 지자체별 농도, TPE, PWE를 도출함으로써 지자체별 노출 농도에 따른 인구 및 노출도를 정량화하였다. 이를 바탕으로 중앙정부에서는 대기질 개선을 위한 단위 농도 개선 대비 노출도 저감 효과를 증대할 수 있을 것으로 보인다. 최근 국내 대기질 관리는 권역 관리와 통합환경관리 등의 시행과 함께, 지역적인 대기오염 저감에 있어 배출 총량(cap and trade) 관리가 더해지고 있다(MOE, 2020b). 이러한 배출 관리에 따른 PM_{2.5} 등 대기오염물질의 농도 감소와 함께 인구 노출 지표 변화가 검토된다면, 보다 실질적인 대기질 개선 대책 마련 및 효과 분석이 가능해질 것으로 보인다. 다만, 상세 지역의 정확한 노출도 평가를 위해서는 가능한 많은 유효 관측 자료의 내삽을 통해 농도장의 오차를 줄임으로써, 신뢰성을 확보해야 한다.

감사의 글

본 연구는 국가미세먼지정보센터의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

References

- Apte, J.S., Marshall, J.D., Cohen, A.J., Brauer, M. (2015) Addressing Global Mortality from Ambient PM_{2.5}, *Environmental Science & Technology*, 49, 8057-8066. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01236>
- Arunachalam, S., Wang, B., Davis, N., Baek, B.H., Levy, J.I. (2011) Effect of chemistry-transport model scale and resolution on population exposure to PM_{2.5} from aircraft emissions during landing and takeoff, *Atmospheric Environment*, 45(19), 3294-3300. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2011.03.029>
- 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, G.-N., Lee, S.-B. (2009) Contamination Level of Vehicle-Related Air Pollutants at a Roadside in the Downtown Area of Seoul, *The Korean Society of Automotive Engineers*, 340-345, <http://pubs.kist.re.kr/handle/201004/35329> (Accessed on Dec 15, 2020).
- Batterman, S., Chambliss, S., Isakov, V. (2014) Spatial resolution requirements for traffic-related air pollutant exposure evaluations, *Atmospheric Environment*, 94, 518-528. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.05.065>
- Boldo, E., Linares, C., Lumbreras, J., Borge, R., Narros, A., García-Pérez, J., Fernández-Navarro, P., Pérez-Gómez, B., Aragonés, N., Ramis, R. (2011) Health impact assessment of a reduction in ambient PM_{2.5} levels in Spain, *Environment International*, 37(2), 342-348. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2010.10.004>
- Chen, L., Shi, M., Gao, S., Li, S., Mao, J., Zhang, H., Sun, Y., Bai, Z., Wang, Z. (2017) Assessment of population exposure to PM_{2.5} for mortality in China and its public health benefit based on BenMAP, *Environmental Pollution*, 221, 311-317. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.11.080>
- Coker, E., Ghosh, J., Jerrett, M., Gomez-Rubio, V., Beckerman, B., Cockburn, M., Liverani, S., Su, J., Li, A., Kile, M.L., Ritz,

- B., Molitor, J. (2015) Modeling spatial effects of PM_{2.5} on term low birth weight in Los Angeles County, *Environmental Research*, 142, 354-364. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2015.06.044>
- Fann, N., Kim, S.Y., Olives, C., Sheppard, L. (2017) Estimated Changes in Life Expectancy and Adult Mortality Resulting from Declining PM_{2.5} Exposures in the Contiguous United States: 1980-2010, *Environmental Health Perspect*, 125(9), 097003. <https://doi.org/10.1289/EHP507>
- Ha, J., Moon, N. (2013) Uncertainty and Estimation of Health Burden from Particulate Matter in Seoul Metropolitan Region, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 29(3), 275-286, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2013.29.3.275>
- Han, C., Kim, S., Lim, Y.-H., Bae, H.-J., Hong, Y.-C. (2018) Spatial and Temporal Trends of Number of Deaths Attributable to Ambient PM_{2.5} in the Korea. *Journal of Korean Medical Science*, 33(30), 1-14. <https://doi.org/10.3346/jkms.2018.33.e193>
- Hayes, R.B., Lim, C., Zhang, Y., Cromar, K., Shao, Y., Reynolds, H.R., Silverman, D.T., Jones, R.R., Park, Y., Jerrett, M., Ahn, J., Thurston, G.D. (2020) PM_{2.5} air pollution and cause-specific cardiovascular disease mortality, *International Journal of Epidemiology*, 49, 25-35. <https://doi.org/10.1093/ije/dyz114>
- Hong, J.-H., Ko, Y.K. (2003) The Health Effects of PM_{2.5}: evidence from Korea, *Environmental and Resource Economics Review*, 12(3), 469-485 (in Korean with English abstract).
- Kim, H., Lee, S.-M., Chai, T., Ngan, F., Pan, L., Lee, P. (2018). 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.-J., Jo, W.-K. (2012) Assessment of PM-10 Monitoring Stations in Daegu using GIS Interpolation. *Journal of Korean Society for Geospatial Information System*, 20(2), 3-13, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.7319/kogsis.2012.20.2.003>
- Kim, Y.-S., Lee, Y.-J., Shin, D.-C. (2004) Selection of Priority Areas Based on Human and Economic Risk from Exposure to Fine Particles in Seoul, *Journal of Environmental Analysis Health and Toxicology*, 19(1), 49-58 (in Korean with English abstract).
- Korea Environment Institute (KEI) (2017) Analysis System for Regional Environmental Status to Support Environmental Assessment: Source Apportionment Analysis of Air Pollutants from Major Industrial Complexes and Local Governments, (in Korean with English abstract). https://www.kei.re.kr/elibList.es?mid=a20403000000&elibName=researchreport&class_id=&act=view&c_id=716430&rn=190&nPage=19&keyField=&keyWord= (Accessed on Dec 15, 2020).
- Korean Statistical information Service (KOSIS) (2015) Air Pollution Status: 2015 Regular Statistical Quality Assessment Report, www.kostat.go.kr (Accessed on Dec 15, 2020).
- Lee, J.H., Park, G.U., Ha, K.C. (2016) Evaluation of Indoor ETS Exposure Levels in Pubs, PC Game Rooms, and Billiards Halls around a University Campus using PM_{2.5} Concentrations, *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, 26(4), 411-417, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.15269/JKSOEH.2016.26.4.411>
- Lee, S.-S. (2017) A comparative study on prediction of fine particulate matter using spatial analysis (Masters dissertation). University of Seoul, Seoul, Korea.
- Lee, Y.-K., Lee, K.-J., Lee, J.-S., Shin, E.-S. (2012) Regional Characteristics of Particle Size Distribution of PM₁₀, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 666-674, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2012.28.6.666>
- Leem, J.H., Kim, S.T., Kim, H.C. (2015) Public-health impact of outdoor air pollution for 2nd air pollution management policy in Seoul metropolitan area, Korea. *Annals of Occupational and Environmental Medicine*, 27, 6-14. <https://doi.org/10.1186/s40557-015-0058-z>
- Lim, C., Guak, S., Lee, K., Hong, Y.-C. (2016) Time-activity Patterns and PM_{2.5} Exposure of the Elderly in Ura and Rural Areas, *Korean Journal of Environmental Health Sciences*, 42, 1-9, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5668/jehs.2016.42.1.1>
- Lim, S.S., Vos, T., Flaxman, A.D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., AlMazroa, M.A., Amann, M., Anderson, H.R., Andrews, K.G., Aryee, M., Atkinson, C., Bacchus, L.J., Bahalim, A.N., Balakrishnan, K., Balmes, J., Barker-Collo, S., Baxter, A., Bell, M.L., Blore, J.D., Blyth, F., Bonner, C., Borges, G., Bourne, R., Boussinesq, M., Brauer, M., Brooks, P., Bruce, N.G., Brunekreef, B., Bryan-Hancock, C., Bucello, C., Buchbinder, R., Bull, F., Burnett, R.T., Byers, T.E., Calabria, B., Carapetis, J., Carnahan, E., Chafe, Z., Charlson, F., Chen, H., Chen, J.S., Cheng, A.T.-A., Child, J.C., Cohen, A., Colson, K.E., Cowie, B.C., Darby, S., Darling, S., Davis, A., Degen-

- hardt, L., Dentener, F., Des Jarlais, D.C., Devries, K., Dherani, M., Ding, E.L., Dorsey, E.R., Driscoll, T., Edmond, K., Ali, S.E., Engell, R.E., Erwin, P.J., Fahimi, S., Falder, G., Farzadfar, F., Ferrari, A., Finucane, M.M., Flaxman, S., Fowkes, F.G.R., Freedman, G., Freeman, M.K., Gakidou, E., Ghosh, S., Giovannucci, E., Gmel, G., Graham, K., Grainger, R., Grant, B., Gunnell, D., Gutierrez, H.R., Hall, W., Hoek, H.W., Hogan, A., Hosgood, H.D., Hoy, D., Hu, H., Hubbell, B.J., Hutchings, S.J., Ibeanusi, S.E., Jacklyn, G.L., Jasrasaria, R., Jonas, J.B., Kan, H., Kanis, J.A., Kassebaum, N., Kawakami, N., Khang, Y.-H., Khatibzadeh, S. (2012) A comparative risk assessment of burden of disease and injury attributable to 67 risk factors and risk factor clusters in 21 regions, 1990-2010: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2010, *The Lancet*, 380, 2224-2260. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(12\)61766-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(12)61766-8)
- Lin, C., Li, Y., Lau, A.K.H., Deng, X., Tse, T.K.T., Fung, J.C.H., Li, C., Li, Z., Lu, X., Zhang, X., Yu, Q. (2016) Estimation of long-term population exposure to PM_{2.5} for dense urban areas using 1-km MODIS data, *Remote Sensing of Environment*, 179, 13-22. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.023>
- Masroor, K., Fanaei, F., Yousefi, S., Raeesi, M., Abbaslou, H., Shahsavani, A., Hadei, M. (2020) Spatial modelling of PM_{2.5} concentrations in Tehran using Kriging and inverse distance weighting (IDW) methods, *Journal of Air Pollution and Health*, 5(2), 89-96. <https://doi.org/10.18502/japh.v5i2.4237>
- Ministry Of Environment (MOE) (2020a) http://www.law.go.kr/DRF/lawService.do?OC=me_pr&target=admrul&D=2100000187981&type=HTML&mobileYn=0 (Accessed on Nov 10, 2020).
- Ministry Of Environment (MOE) (2020b) <https://www.me.go.kr/cleanair/cleanair/read.do?boardId=1362890&boardMasterId=740> (Accessed on April 5, 2020).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2016) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea (in Korean) http://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on Dec 15, 2020).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2017) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea (in Korean) http://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on Dec 15, 2020).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2018) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea (in Korean) http://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on Dec 15, 2020).
- National Institute of Environmental Research (NIER) (2019) Annual Report of Ambient Air Quality in Korea (in Korean) http://www.airkorea.or.kr/web/detailViewDown?pMENU_NO=125 (Accessed on Dec 15, 2020).
- Pope, C.A., Burnett, R.T., Krewski, D., Jerrett, M., Shi, Y., Calle, E.E., Thun, M.J. (2009) Cardiovascular Mortality and Exposure to Airborne Fine Particulate Matter and Cigarette Smoke: Shape of the Exposure-Response Relationship, *Circulation*, 120, 941-948. <https://doi.org/10.1161/circulationaha.109.857888>
- Son, K.W., You, S., Kim, H.C., Kim, B.-U., Kim, S. (2020) Inter-comparisons of Spatially Interpolated Short-term and Long-term PM_{2.5} Concentrations of Local Authorities in South Korea 2015-2017, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 36(2), 185-197, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2020.36.2.185>
- Song, I., Lee, C., Park, K.-H. (2018) An Ensemble Machine Learning from Spatio-temporal Kriging for Imputation of PM₁₀ in Seoul, Korea, *Journal of the Korean Geographical Society*, 53(3), 427-444.
- Statistics Korea (KOSTAT) (2018) 2017 Population and Housing Census, https://www.kostat.go.kr/portal/korea/kor_ip/6/3/1/1/index.board (Accessed on Dec 15, 2020).
- United States Environmental Protection Agency (US EPA) (2006) A Framework For Assessing Health Risk of Environmental Exposures To Children, <https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=158363> (Accessed on Dec 15, 2020).
- Yeo, M.J., Kim, Y.P. (2019) Trends of the PM₁₀ concentrations and High PM₁₀ concentration cases in Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(2), 249-264, (in Korean with English abstract). <https://doi.org/10.5572/kosae.2019.35.2.249>

Authors Information

손규원 (아주대학교 환경안전공학과 석사과정)

김은혜 (아주대학교 환경공학과 강사)

배민아 (아주대학교 환경안전공학과 박사과정)

유승희 (아주대학교 환경안전공학과 박사과정)

강윤희 (아주대학교 환경연구소 연구원)

김현철 (Research Scientist, Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD, USA)

김병욱 (Program Manager I, Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA)

김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)

SUPPLEMENTARY MATERIALS

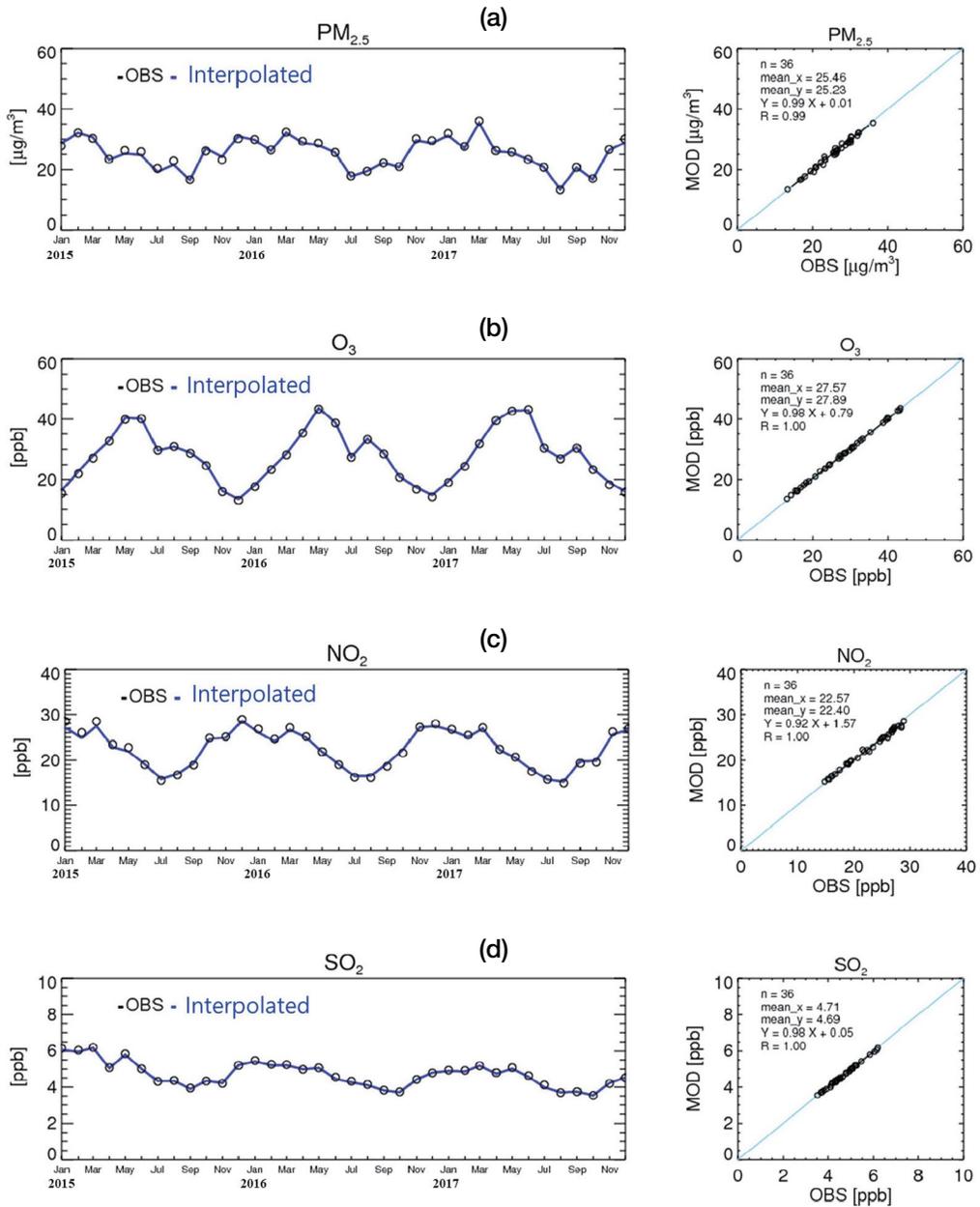


Fig. S1. Monthly mean observed and interpolated concentrations of (a) PM_{2.5}, (b) O₃, (c) NO₂, and (d) SO₂ in South Korea during 2015~2017. Circle and line represent the observed and interpolated data, respectively.