

논문

공간 내삽 자료를 이용한 2015~2017년 남한 지자체별 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도의 상관성 검토

Inter-comparisons of Spatially Interpolated Short-term and Long-term PM_{2.5} Concentrations of Local Authorities in South Korea 2015~2017

손규원, 유승희, 김현철^{1),2)}, 김병욱³⁾, 김순태*

아주대학교 환경안전공학과, ¹⁾미국국립해양대기청

²⁾메릴랜드대학 기후·위성 연구소, ³⁾미국조지아주환경청

Kyuwon Son, Seunghee You, Hyun Cheol Kim^{1),2)}, Byeong-Uk Kim³⁾, Soontae Kim*

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

¹⁾Air Resources Laboratory, National Oceanic and Atmospheric Administration, College Park, MD, 20740, USA

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

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

접수일 2020년 1월 23일

수정일 2020년 2월 19일

채택일 2020년 2월 26일

Received 23 January 2020

Revised 19 February 2020

Accepted 26 February 2020

*Corresponding author

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

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

Abstract Current national air quality improvement plans are supposed to lower long-term (annual mean) PM_{2.5} concentrations by strictly regulating domestic emissions. However, it is not clear if they can mitigate the frequency of PM_{2.5} exceedance days since short-term (daily mean) air quality largely depends on meteorological conditions. In this study, we evaluate the relationship between annual mean PM_{2.5} concentrations and frequency of daily mean PM_{2.5} exceedances at local authorities in South Korea based on spatially interpolated PM_{2.5} data from the urban air quality monitoring network during the recent 3 years (2015~2017). Correlation and slope between long-term PM_{2.5} concentrations and frequencies of daily mean PM_{2.5} exceedance (> 35 µg/m³) for provinces of which annual mean PM_{2.5} concentrations were higher than 23 µg/m³ was 0.89 and 9.9 days/µg/m³, respectively. It implies that countermeasures to alleviate the long-term PM_{2.5} concentrations would be effective to reduce the number of the short-term exceedances and vice versa. However, for the elevated daily mean PM_{2.5} concentrations (> 50 or 75 µg/m³), the correlation (slope) reduced to 0.80 (4.65) and 0.57 (0.7), respectively. This result exhibits that domestic emission control may not be effective to reduce the frequency of those high PM_{2.5} days. Jeonbuk showed the highest annual mean PM_{2.5} concentration during the 3 years while the maximum differences in annual mean PM_{2.5} concentrations and the daily PM_{2.5} exceedances between basic local authorities in South Korea was 19.1 µg/m³ and 116 days/year, respectively, during the years.

Key words: PM_{2.5}, Annual mean, Daily exceedance, Correlation, Province, Local authority

1. 서 론

최근 사회적으로 많은 관심이 모아지고 있는 대기 중 초미세먼지(이하 PM_{2.5}; Particulate Matter of which diameter is equal to or less than 2.5 µm)는 시정

장애를 유발하고, 심혈관계 및 폐질환 등 건강에 영향을 미친다(Lim *et al.*, 2012; Hong and Ko, 2003). 대기 오염물질의 농도는 지역별로 차이와 계절 변화를 보이며, 인체 노출 정도와 만성 및 급성 건강 영향을 추정하는 중요 지표가 된다(Yi *et al.*, 2016; Kim *et al.*,

2014). PM_{2.5} 농도의 국내 대기환경기준은 장기 노출 관리를 위한 연평균 농도와 단기 고농도 노출을 평가하기 위한 24시간 평균 농도로 구분된다(Chang and Cheong, 2012). 2015년 이후 도시대기측정망 관측 자료가 공식적으로 공개되는 PM_{2.5} 농도 수준을 살펴보면, 2015~2017년 3년간 전국 연평균 농도는 25 µg/m³ 또는 26 µg/m³ ('대기환경 월간/연간 보고서', Air-Korea, Nov 29, 2019, <http://www.airkorea.or.kr>)를 보여 장기 대기환경기준인 15 µg/m³을 초과한다.

기존의 대기질 개선을 위한 미세먼지 관리 종합대책(MOE, 2017)과 2차 수도권 대기환경관리 기본계획(MOE, 2013), 국가기후환경회의의 계절 관리제(2019년) 등에서 PM_{2.5} 목표 농도의 달성 여부는 국민 건강 보호 차원에서 중요하다(Leem *et al.*, 2015; Ha and Moon, 2013; Pope *et al.*, 2009). 또한 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도 분석은 지역별 인체 노출 정보 외에 대기환경기준 초과 정도와 개선의 시급성 등을 파악하는 데 있어 유용한 자료가 된다.

앞서 언급된 대기질 개선 대책들은 연평균 PM_{2.5} 농도 저감과 함께, 국민들이 많이 불안해 하는 고농도 PM_{2.5} 발생일의 빈도수를 감소시키는 데 목적이 있다(Kim *et al.*, 2018). 다만, 일평균과 같은 단기 PM_{2.5} 농도의 결정은 배출량 외에 외부 유입과 기상 요인에 의한 영향을 받으므로(Nam *et al.*, 2019; Yeo *et al.*, 2019; Park, 2017; Guerra *et al.*, 2006), 국내 배출량 저감이 반드시 단기 고농도 PM_{2.5} 발생 감소로 이어질지는 미지수이다(Lee, 2018). 따라서 기존 측정 자료를 이용한 지역별 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도의 상관성 분석을 통해 현재의 국내 지역별 배출 저감 노력이 얼마나 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도 감소로 이어질지 간접적으로 추정할 수 있다.

지역별 대기질 현황은 관측 자료를 기반으로 분석될 수 있으나, 측정소 위치의 지역별 편중과 결측으로 인해 시도별 장기 및 단기 농도 분석이 어렵다. 더욱이 측정이 이뤄지지 않는 지역에 대한 농도 추정은 불가피하여, EPA 보고서 등 기존 연구에서는 공간 내삽 방법 등을 통해 보다 넓은 면적에 대한 농도 추정 및

노출 평가를 수행하였다. 국내에서는 2015년 이후 PM_{2.5} 농도를 관측하는 측정소가 다수 증가했다는 점에서 측정 자료만을 이용한 상세 지역별(i.e., 기초 지자체) 장기간 분석을 수행하기에는 한계점이 존재한다.

이러한 점을 고려하여 본 연구에서는 2015~2017년 동안 이용 가능한 국내 PM_{2.5} 측정 자료를 공간 내삽 자료하고, 생성된 자료를 이용하여 국내 광역 및 기초 지자체별 장기 및 단기 농도 현황을 분석하였다. 또한, 지자체별 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도의 상관성 분석을 통해 국내 배출 저감에 따른 PM_{2.5} 농도 개선 정도를 유추하고, 실측 농도만을 이용한 지역별 분석과의 차이점을 논의하였다.

2. 연구 방법

2.1 관측 자료

본 연구에서는 시도별 PM_{2.5}의 장단기 농도 현황 분석과 인구 노출 평가를 위하여 2015~2017년 사이의 도시대기측정망, 교외대기측정망, 국가배정측정망을 이용하였다(환경부 확정 자료; <http://www.airkorea.or.kr>). 이용된 관측 자료에는 도시대기측정망 282개, 교외대기측정망 22개, 국가배정측정망 3개소가 포함되며, 개별 측정소 위치는 2017년 기준으로 그림 1에 보였다. 대상 기간 동안 PM_{2.5} 농도의 결측률은 3년 평균 17.2%이며, 특히 2017년 교외대기측정망의 결측률은 30% 정도이다('대기환경 월간/연간 보고서', AirKorea, Dec 09, 2019, <http://www.airkorea.or.kr>).

2.2 시공간적 자료 보안을 위한 자료 내삽

본 연구에서는 관측 농도에 대한 공간 내삽을 통해 배출 및 기상, 지형 등 주변 여건 등 대기 중 농도에 영향을 미치는 요소들을 직간접적으로 고려하였다. 대기질 모사에 있어서 공간 내삽 기법 중 Kriging 기법은 선행 연구들(i.e., Lee, 2017; US EPA, 2004; Trujillo *et al.*, 1991)에서 적용된 바 있다. Kriging 외의 다른

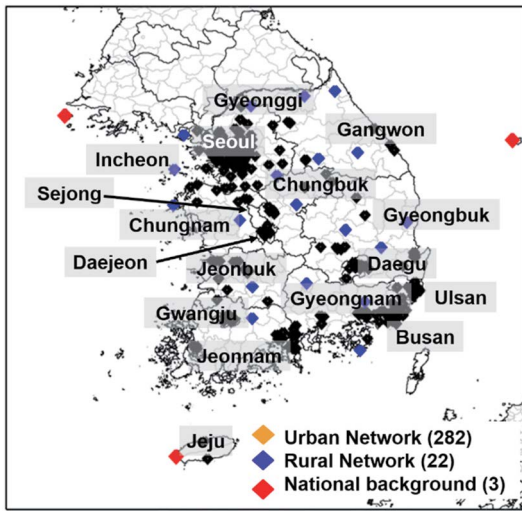


Fig. 1. Locations of air quality monitoring stations in South Korea used this study. Black, blue, and red diamond represents an individual station in urban, rural, and national background network, respectively. Numbers in parenthesis indicate the total number of stations in each network for 2017.

공간 내삽 방법으로는 IDW (Inverse Distance Weighted Interpolation)가 있으나 이는 단순히 거리의 가중치만을 고려하여 나타낸다. 반면, Kriging 공간 내삽의 경우 측정 지점 간 거리뿐만 아니라 측정 자료의 공간적 구조와 공간 상관성 (Spatial autocorrelation)에 근거한 반베리오그램 (semivariogram)을 통해 가중치를 적용한다 (Harman *et al.*, 2016; Kim and Jo, 2012). 이러한 이유로 선행 연구 (i.e., Lee, 2017)에서는 서울에 대한 대기질 모사 시 IDW 방법보다는 Kriging 방법이 오차가 적음을 제시한 바 있다.

본 연구에서는 많은 자료의 처리를 위하여 IDL (Interface Definition Language)의 내장 함수인 Krig2D를 이용하였다. 다만, Kriging 방법은 측정 지점이 존재하는 지역에서는 대체로 양호한 공간 내삽 결과를 보이나, 관측이 존재하지 않는 지역에서는 자료의 왜곡을 발생시킬 수 있다 (Song *et al.*, 2018; McKnight *et al.*, 2007; Little and Rubin, 2002). 도서 해안이 많고 삼면이 바다인 국내 특성상 측정소의 공간적 배치는 Kriging 공간 내삽 시 문제점으로 작용

할 수 있다 (Kondrashov and Ghil, 2006). 따라서 본 연구에서는 이러한 문제점을 고려하여 해안과 도서 지역에 대해서는 3차원 광화학 모사 농도를 활용하였다. 이를 포함한 공간 내삽 과정은 2.4절에 순차적으로 자세히 설명하였다. 공간 내삽된 PM_{2.5} 농도 자료를 바탕으로 측정소별 일평균과 연평균 농도를 기초 지자체별로 산정하고, 이후 광역 지자체별 농도를 산출하였다. 한 가지 유의할 점으로 대기질 예보나 미세먼지 비상 저감 조치 등에서 24시간 평균치 대신 일평균 농도가 실질적으로 많이 이용되므로, 본 연구에서는 단기 PM_{2.5} 농도는 일평균 농도를 기준으로 평가하였다.

2.3 대기질 모사 자료

앞 절에서 설명한 바와 같이 본 연구에서 대기질 모사 자료는 공간 내삽을 위해 보조적으로 활용하였다. 연구 기간 (2015~2017년)에 대한 모사 농도를 격자별, 시간별로 생산하기 위하여 3차원 광화학 모델인 CMAQ (Community Multiscale Air Quality; Byun and Schere, 2006) version 4.7.1을 이용하였다. 배출량은 국내의 경우 CAPSS 2010, 국외 지역에 대해서는 MICS 2010을 적용하였다. 모사 영역 구성은 9-km 수평 해상도 격자 크기로 남한 지역 (67×82 cells)을 포함하며, 본문에 제시하지는 않았으나 동북아 지역이 배출 영향을 포함하기 위해 27-km 수평 해상도의 모사 영역이 우선적으로 이용되었다 (Ju *et al.*, 2018).

대기질 모사를 위한 기상 입력 자료의 마련을 위해 기상 모델인 WRF (Weather Research and Forecasting; Skamarock and Klemp, 2008) version 3.4.1을 수행하였고, 기상 초기장으로는 미국해양대기청 (NOAA)의 재분석 자료인 FNL (Final Operational Global Analysis data; NCEP, 2000)을 이용하였다. 기상 및 대기 모델링을 위한 옵션은 표 1에 나타났다.

그림 2에 PM_{2.5}을 비롯한 주요 기준성 대기오염물질에 대한 시계열과 산포도 분석 자료를 제시하였다. 대상기간 동안 PM_{2.5} 측정 농도는 25.5 µg/m³이며, 공간 내삽을 통한 모사 농도는 24.4 µg/m³로 측정 농도

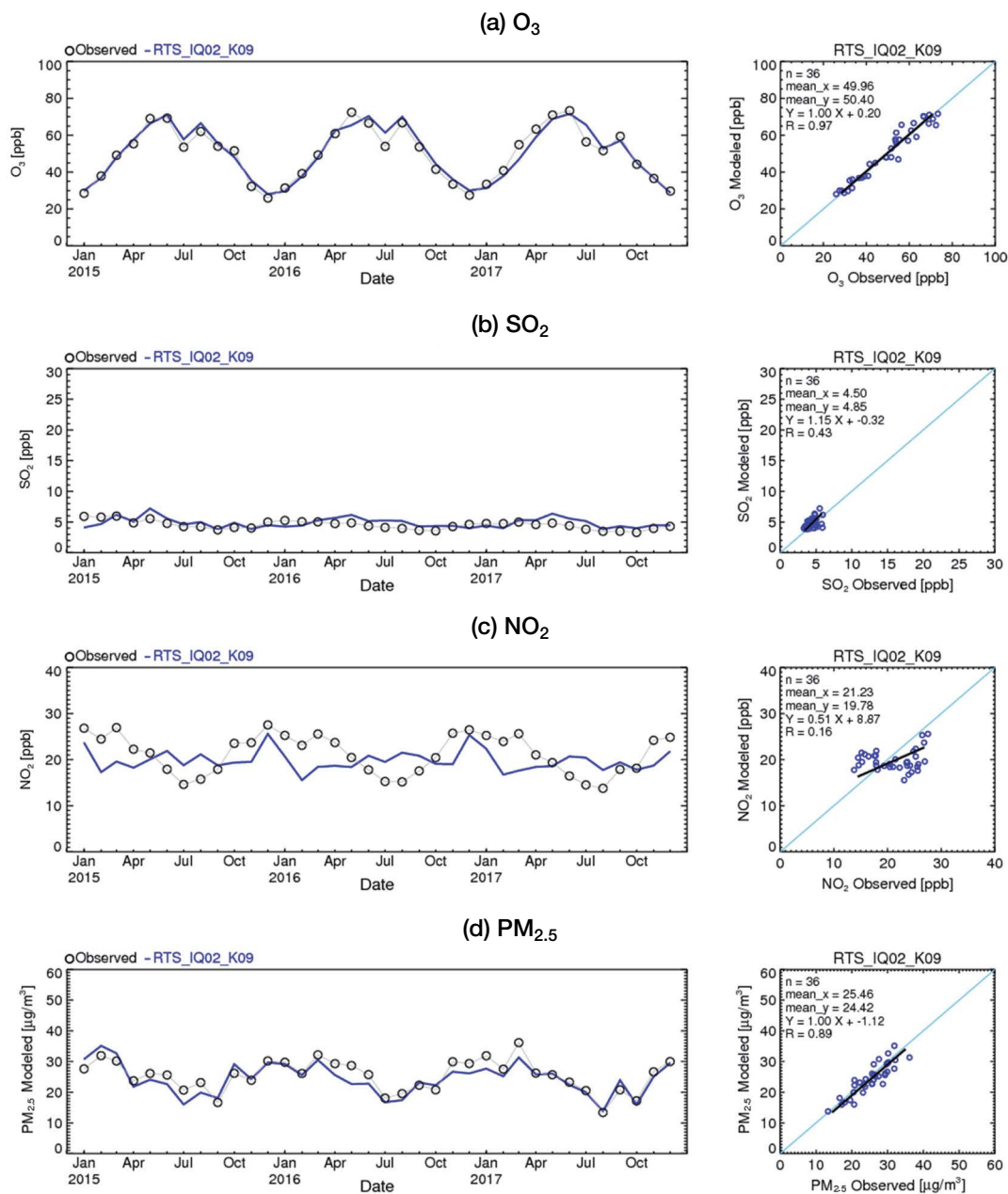


Fig. 2. Time series of nation-wide monthly mean observed and modeled air pollutants selected for model performance evaluations during the simulation period in 2015~2017.

에 비해 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 가량의 과소 모사를 보였으며, 상관 계수는 0.89, RMSE는 $6.61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 보였다. 본 연구의 자세한 모사 수행 평가는 선행 연구(i.e., Bae et al.,

2017)를 참고할 수 있다. 제시된 수행 평가를 통해 배출 목록의 작성 연도, 처리 과정 및 기상/대기질 모사 과정 중 발생할 수 있는 불확도 범위를 검토하였다.

Table 1. WRF and CMAQ simulation configurations used in this study.

WRF	Option	CMAQ	Option
Version	3.4.1	Version	4.7.1
Initial field	FNL	Boundary	Profile for 27 km, nest down for 9 km
Micro physics	WSM6	Chemical mechanism	SAPRC99
Short wave radiation	Goddard	Aerosol module	AEROS
Land-surface model	NOAH	Advection scheme	YAMO scheme
PBL scheme	YSU	Horizontal diffusion	Eddy scheme

2.4 공간 내삽 자료 생산

그림 3은 본 연구에서 적용한 공간 내삽 과정을 2017년 7월 1일에 대해 예시한 것이다. 그림 3(a)는 모사에 이용된 측정소의 위치를 보이는 것으로 전체 이용 가능한 308개 측정소 중 91곳(29.5%)은 결측 등으로 누락되었고 ‘X’ 표시로 위치를 나타내었다. 또한, 수도권 등 대도시 지역에는 많은 측정소가 운영 중이나, 강원, 충남, 경북 등에는 상대적으로 적은 수의 측정소가 위치한다. 강원과 경북의 경우와 같이 관측소가 부족한 지역은 공간 내삽 시 불확도가 높아질 수 있다. 이런 지역의 경우 대기질 모사 자료를 직접 이용하는 방법도 고려할 수 있다. 그러나, 관측이 부재한 지역에서는 모사 평가 역시 불가하여 본 연구에서는 일관성 유지를 위해 Kriging 공간 내삽 방법을 해당 지역에도 동일하게 적용하였다. 그림 3(b)는 그림 3(a)의 측정 자료만을 이용하여 Kriging을 적용 시 발생하는 왜곡을 보인다. 측정소가 많이 위치하는 내륙에서는 공간 내삽에 무리가 없으나, 국내 측정소가 위치하지 않는 해안이나 도서 지역에서는 인접한 측정 농도에 기반한 결과가 도출된다. 이러한 점을 보완하기 위하여 앞서 설명한 바와 같이 국내 육지를 제외한 주변 해상 지역에 대해서는 대기질 모사 결과를 이용하였다. 그림 3(c)는 본 연구에서 공간 내삽을 위해 이용된 관측 및 모사 농도를 보이는 것으로 육지에 대해 이용된 측정 자료와 같이 해상 및 주변 지역에 이용된 대기질 모사 자료를 함께 제시하였다. 그림 3(d)는 그림 3(c)에 보인 자료를 기반으로 Kriging 방법을 적용한 공간 내삽된 PM_{2.5} 농도장의 예시이다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 대상 기간

동안 매시간 (3년×365일/년×24시간/일)별로 PM_{2.5} 농도장을 마련하였다.

3. 결과 분석

3.1 지역별 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도

앞 장에서 설명한 공간 내삽 자료를 이용한 국내 전 면적에 대한 연평균 PM_{2.5} 농도는 24 µg/m³으로, 대기환경연보와는 1.6 µg/m³가량 차이를 보인다. 이러한 차이가 발생하는 원인으로 본 연구는 측정 위치 뿐만 아니라 국내 전역에 대해 농도를 산정한 점과, 결측 시간에 대한 시공간 내삽 등이 적용되었기 때문으로 사료된다. 이러한 시공간 내삽 결과는 본 연구의 분석 대상 기간인 2015년~2017년을 대상으로 도출된 것으로, 최근 측정망 확충과 PM_{2.5} 농도 변화 추세를 감안하면 달라질 수 있다.

그림 4에서 국내 PM_{2.5} 농도의 공간 분포는 전체적으로 서쪽 지역이 높고, 동쪽 지역이 낮은 서고동저의 형태를 띤다. 다만, 부산 등 일부 광역 지자체의 경우 산업단지 및 항만 등 배출 여건과 지리 및 기상학적 요인 등으로 인해 높은 농도를 보인다 (Lee and Lee, 2018; Sohn, 2018). 해당 기간 동안 연평균 PM_{2.5} 농도는 전북이 27.1 µg/m³로 가장 높으며, 그 다음으로 경기와 충북이 각각 26.1 µg/m³과 25.8 µg/m³으로 높았다. 제주는 약 17.6 µg/m³으로 광역 지자체 중 가장 낮았으며, 광역 지자체 간 연평균 PM_{2.5} 농도는 최대 9.5 µg/m³ 차이를 보인다.

반면, 전국 250개의 기초 지자체 중 PM_{2.5} 농도가

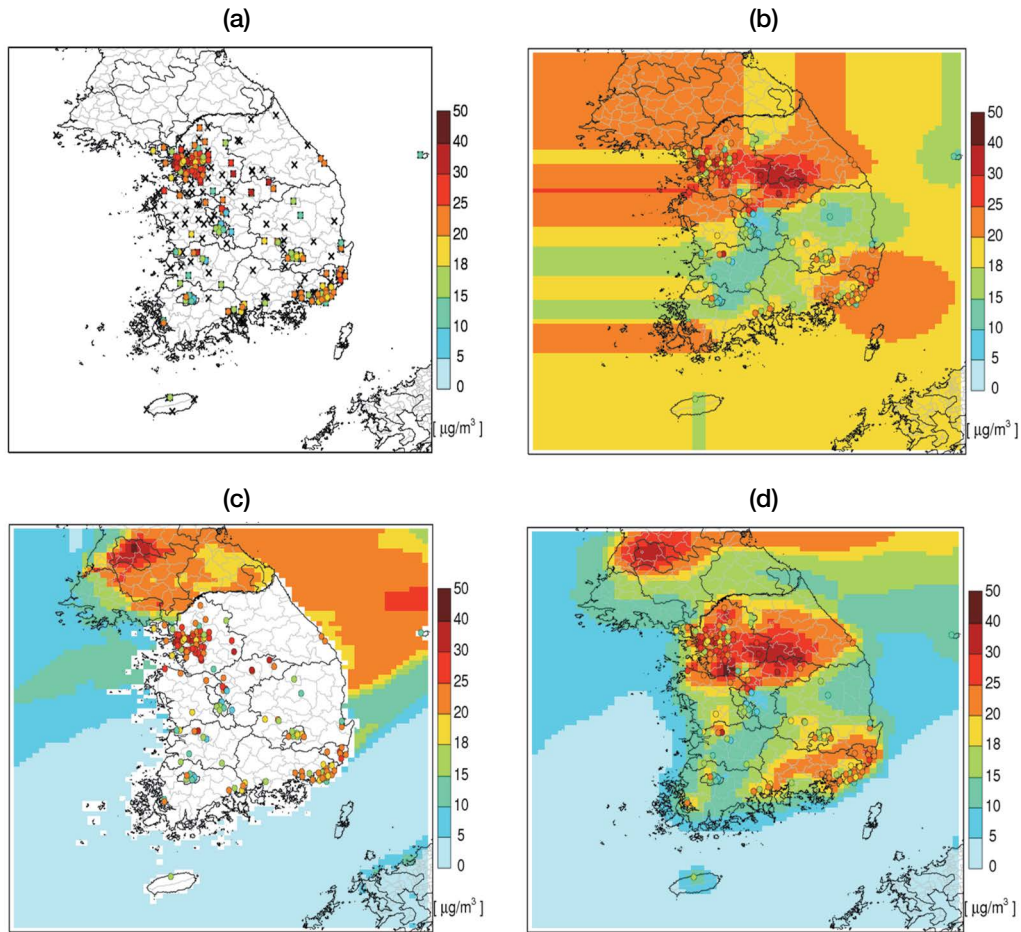


Fig. 3. Spatial plots of (a) observed daily mean $PM_{2.5}$ concentrations, (b) spatially interpolated $PM_{2.5}$ concentration field with the observations only, (c) the observations and modeled $PM_{2.5}$ concentrations for spatial interpolation, and (d) a $PM_{2.5}$ concentration field interpolated with the observations and simulations for July 1st, 2017. 'x' symbols represent the locations of the missing observations.

가장 높은 곳은 전북 익산, 가장 낮은 곳은 경북 울릉군 ($12.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 기초 지자체별로 최대 $19.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보인다(그림 4). 하나의 광역 지자체 내에서 기초 지자체 간 연평균 $PM_{2.5}$ 농도 차이도 작지 않다. 그 예로 전북의 기초 지자체별 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 $24.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (무주)~ $31.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (익산)로 광역 지자체 내에서도 $6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상의 차이를 보인다. 상대적으로 농도가 높게 나타난 익산의 경우 측정소와 배출이 많은 산업단지 간의 거리가 가까운 반면, 무주는 측정소 주변에 덕유산 등 자연 녹지가 위치하여

인위적 배출량이 적으며, 이로 인해 농도 또한 낮아지는 것으로 판단된다. 이처럼 관측 농도는 지형과 기상 조건, 그리고 주변 배출의 직간접적인 영향을 받고 있다. 또한, 충남에 위치한 천안 서북구와 태안에서도 연평균 $PM_{2.5}$ 농도는 각각 $24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 와 $18.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 대략 $5.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보인다.

일평균 $PM_{2.5}$ 농도가 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 초과하는 일수는 대상기간(1,096일) 동안 광역 지자체에서 평균적으로 연간 약 61일을 초과하는 것으로 조사되었다. 광역 지자체별로 살펴보면, 전북이 3년간 258일이 $PM_{2.5}$

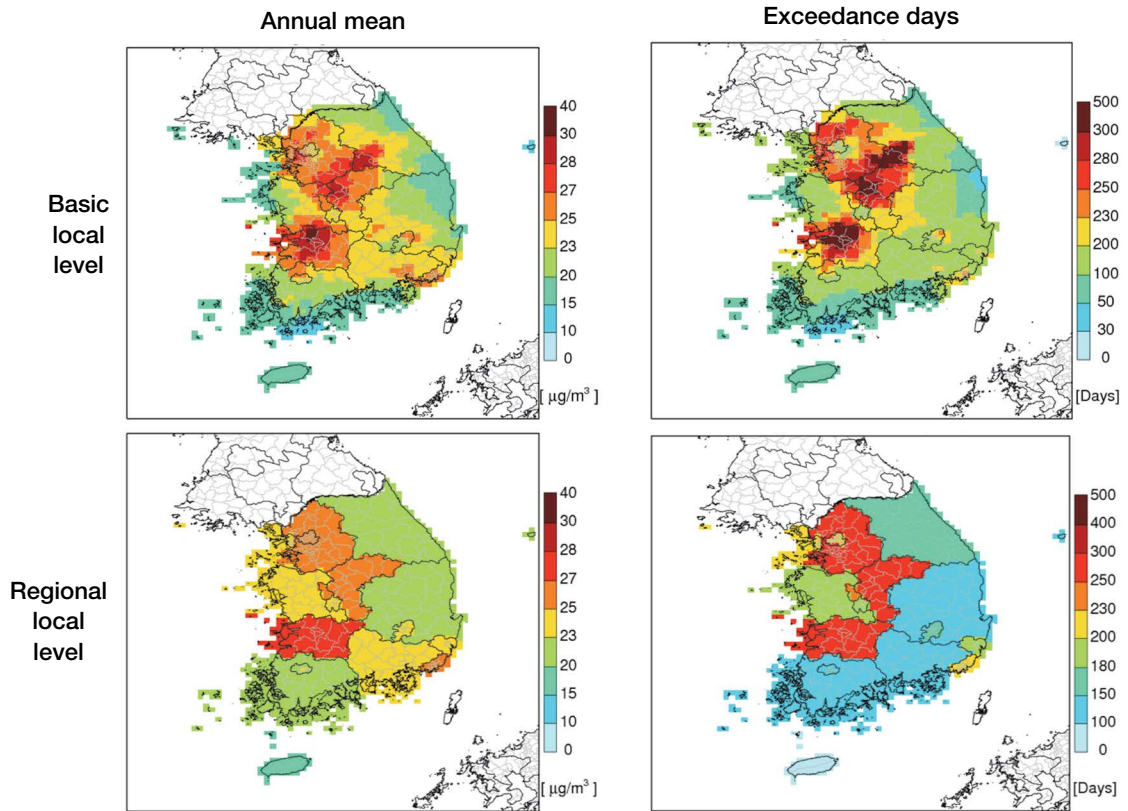


Fig. 4. Annual mean PM_{2.5} concentrations (left), and the number of PM_{2.5} exceedance days ($>$ daily mean $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$) for basic (top) and regional (bottom) local governments during 2015~2017. PM_{2.5} concentrations for each governmental authority were processed with spatially interpolated gridded data.

단기 대기환경기준을 초과하였으며, 충북과 경기에서 각각 255일, 251일이 초과되었다. 제주의 경우 단기 대기환경기준 초과일은 75일로 광역 지자체 중에서 가장 낮다. 기초 지자체의 경우, 전북 익산에서 연간 123일(33.7%)이 PM_{2.5} 단기 대기환경기준을 초과하며, 경북 울릉군은 23일(6.3%)로 가장 낮아 100일 정도의 차이를 보였다.

광역 지자체 내에서는 다수의 관측소가 존재하며, 그림 5(a)는 내삽된 연평균 PM_{2.5} 농도를 지자체 내 관측소 위치별로 추출하여 box whisker로 보였다. 면적이 610 km^2 이하인 광주, 서울, 세종 등에서는 지역 내 편차가 $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 나타나지만, 면적이 $19,050 \text{ km}^2$ 이상인 전남, 경북, 강원 등에서는 지자체 내 관측소별 PM_{2.5} 농도 편차가 $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상을 보인다.

그림 5(a)에 내삽된 PM_{2.5} 농도 외에 관측소별 PM_{2.5} 농도를 별도로 제시하였는데, 경기도의 경우 공간 내삽된 PM_{2.5} 농도의 편차는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 인 데 비해, 관측된 농도의 편차는 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이상을 보인다. 이러한 차이는 관측소의 위치(지역 내 공간적으로 편중, 인접 거리 등)와 측정 자료 결측, 내삽 자료에서의 평활화 효과(i.e., smoothing effects) 등에 의한 것으로 추정된다. 또한, 본 연구에서 각 측정소의 결측률은 연간 일간 농도의 유효 측정 비율, 연보의 경우 연간 1시간 평균 자료의 유효 측정 비율을 고려하기 때문에 연보와 그림 5에 나타난 결측률은 차이가 있다.

그림 5(b)는 그림 5(a)와 동일한 비교를 단기 기준 초과 일수에 대해 적용한 것으로 내삽 농도를 기준으로 보면 하나의 광역 지자체 내에서도 일평균 PM_{2.5}

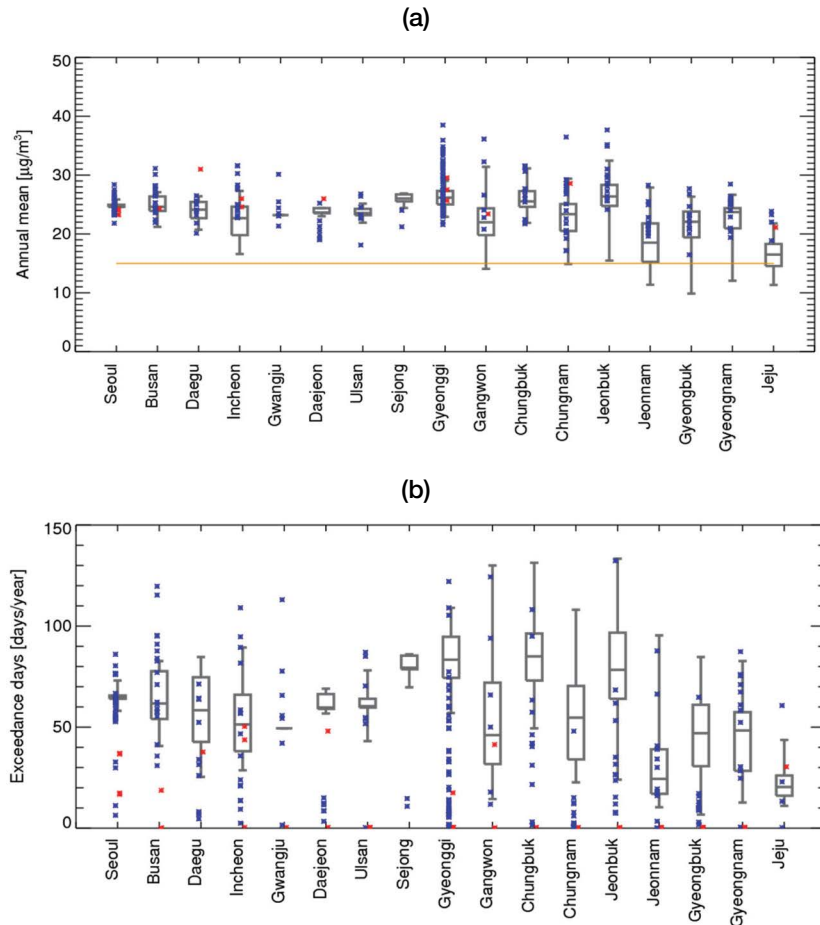


Fig. 5. Box-whisker plots of provincial (a) annual mean $PM_{2.5}$ concentrations, and (b) the number of $PM_{2.5}$ exceedance days ($>$ daily mean $35 \mu g/m^3$) with the spatially interpolated $PM_{2.5}$ concentrations during 2015~2017. Blue-colored symbols represent the same statistics with observations. Red-colored symbols are separately used for the monitoring stations at which the missing rates of daily mean $PM_{2.5}$ are higher than 25%.

농도 $35 \mu g/m^3$ 를 초과하는 일수가 많은 차이를 보인다. 예를 들어 서울처럼 면적이 작은 경우 초과 일수는 65일 내외로 유사하나, 충남의 경우 기초 지자체별 초과일 수는 35~110일가량으로 3배 정도의 차이를 보인다. 강원, 인천, 전북 등과 같이 지자체의 면적이 넓어질수록 일평균 $PM_{2.5}$ 초과 일수는 2~3배 이상의 차이를 보인다.

다른 주목해야 할 점은 광주, 세종 등 많은 지자체에서 관측 농도와 내삽 농도를 기반으로 산정한 일평균 $PM_{2.5}$ 초과 일수가 큰 차이를 보인다는 것이다. 이

는 관측 농도만을 이용할 경우 하나의 모사 격자 내에 복수의 관측소가 위치할 수 있으며, 위치에 따른 관측 농도의 편차가 그대로 반영될 수 있는 반면, 공간 내삽 자료에서는 농도 보간에 따라 이러한 편차가 상쇄될 수 있다. 다른 중요한 원인으로 대기환경기준 초과일에 대해 측정소에 따라 결정되는 경우 연간 총 초과 일수에서 제외되나, 내삽 자료의 경우 공간적인 보간으로 인해 결측 부분이 보완될 수 있다. 다만, 이러한 차이는 각 자료의 처리 과정에 따라 달라질 수 있다. 또한, 그림 5(b)에서 관측 농도만을 이용하는

경우, 지자체별 일평균 PM_{2.5} 초과 일수는 내삽 자료와 차이를 보인다. 이는 유효한 관측 자료가 특정 기간 내 충분치 못할 경우 해당 지역의 농도 현황을 대변하기 어렵게 된다. 특히, 고농도 발생일 동안 결측이 발생할 경우 해당일에 대한 단기 대기환경기준 초과를 포함되지 않을 가능성이 높아진다. 본 연구에서는 이러한 점을 고려하여 내삽 자료를 통해 관측 자료를 보완하고, 분석에 이용하였다.

3.2 지자체별 장기 및 단기 PM_{2.5} 농도의 상관성

그림 6에서는 지자체별 장기 대기환경기준인 연평균 PM_{2.5} 농도와 단기 대기환경기준인 일평균 PM_{2.5} 농도(> 35 µg/m³) 초과 일수의 상관성을 보였다. 그림 6에서는 장기 PM_{2.5} 농도와 단기 초과 일수의 선형 추세를 가정하였다. 변곡이 생기는 연평균 농도 23 µg/m³을 임의로 기준으로 삼아 저농도 구간과 고농도 구간으로 구분할 경우, 장단기 대기환경기준에 대한 지자체별 상관도는 0.8~0.9이다(그림 6(a), (b)).

그림 6에서 일평균 PM_{2.5} 농도 35 µg/m³을 고농도 발생 기준으로 살펴볼 경우, 국내에서는 고농도 발생 일수와 연평균 농도의 높은 상관성을 보인다. 이는 지자체별 장기 연평균 PM_{2.5} 농도 개선을 위해서는 단기적인 일평균 PM_{2.5} 농도의 관리도 중요함을 의미한다. 반대로 연평균 PM_{2.5} 농도가 낮아질 경우 단기 고농도 PM_{2.5} 발생일도 감소할 것으로 예상된다.

이러한 경향성은 고농도 PM_{2.5} 농도 발생일 판단 기준에 따라 달라질 수 있으므로, 본 연구에서는 현재의 단기 대기환경기준이 아닌, 미세먼지 비상저감조치의 기준이 되는 일평균 PM_{2.5} 농도 50 µg/m³, 75 µg/m³을 기준으로 고농도일 발생 일수와 연평균 농도의 상관성을 추가적으로 분석하였다. 그림 6에 제시한 바와 같이 고농도 PM_{2.5} 발생일 기준 농도가 높아짐에 따라 연평균 PM_{2.5} 농도와 고농도 PM_{2.5} 발생 일수 간의 상관성은 낮아진다. 이는 일정 수준 이상의 일평균 PM_{2.5} 농도는 연평균 PM_{2.5} 농도에 상관없이 나타나는 것으로, 특정 농도 이상의 PM_{2.5} 고농도일 발생은 일시적인 국외 유입 등이 원인이 될 수 있다.

일평균 PM_{2.5} 기준 농도가 높아짐에 따라 연평균

농도 23 µg/m³ 이상 지역에 대한 추세선의 기울기가 급격히 낮아진다. 예를 들어, 그림 6(a)에서 연평균 PM_{2.5} 농도가 1 µg/m³ 감소할 때 35 µg/m³ 이상의 고농도 PM_{2.5} 발생일은 9.5일 감소하나, 고농도 발생 기준을 50 µg/m³과 75 µg/m³으로 높일 경우, 연평균 PM_{2.5} 농도가 1 µg/m³ 감소할 때, PM_{2.5} 고농도 일수는 각각 4.7일, 0.7일 감소한다. 이는 일평균 PM_{2.5} 농도가 높아질수록 연평균 PM_{2.5} 감소와 무관하다는 점을 의미한다.

그림 6(a)와 (b)에서 연평균 PM_{2.5} 농도는 광역 지자체와 기초 지자체에서 각각 최대 27.1 µg/m³, 31.2 µg/m³로, 분석 대상지역을 세분화함에 따라 약 4 µg/m³ 정도 차이를 보인다. 일평균 35 µg/m³ 초과일 또한 연간 전북이 86일이나 전북 익산에서는 124일로 기초 지자체 수준에서 30일 이상 높게 나타난다. 최저 연평균 PM_{2.5} 농도와 단기 기준 초과일은 광역 지자체 수준에서는 각각 17.6 µg/m³과 25일이지만, 기초 지자체에 대해서는 12.1 µg/m³과 8일로 제시된다. 이러한 결과는 광역 지자체와 기초 지자체 간의 연평균 PM_{2.5} 농도 수준 파악 및 노출 평가는 분석 대상의 범위에 따라 달라지며, 향후 별도의 PM_{2.5} 집중관리 구역 등 국지적 오염 관리가 중요하고 필요함을 보인다. 다만, 장기와 단기 PM_{2.5} 농도의 대기환경기준 초과 원인이 국지적인, 혹은 국내적인 요인이 아닐 경우 국내 대기질 개선 대책에 의한 효과는 낮아질 수 있다. 특히, 연평균 PM_{2.5} 농도가 낮은 제주, 전남, 경북, 강원도의 경우 다른 지역에 비해 중국 기여도가 큰 것으로 알려져 있다(Bae *et al.*, 2020). 따라서 PM_{2.5} 대책 수립에 앞서 해당 지역의 장기 및 단기 대기환경기준 초과 원인 규명을 제시하는 것이 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 2015~2017년 사이 PM_{2.5} 장기와 단기 농도 현황과 상관성을 지자체별로 살펴보기 위하여 관측 자료를 바탕으로 공간 내삽을 적용하였다. 대상 기간 동안 17개 광역 지자체에서 연평균 농도는

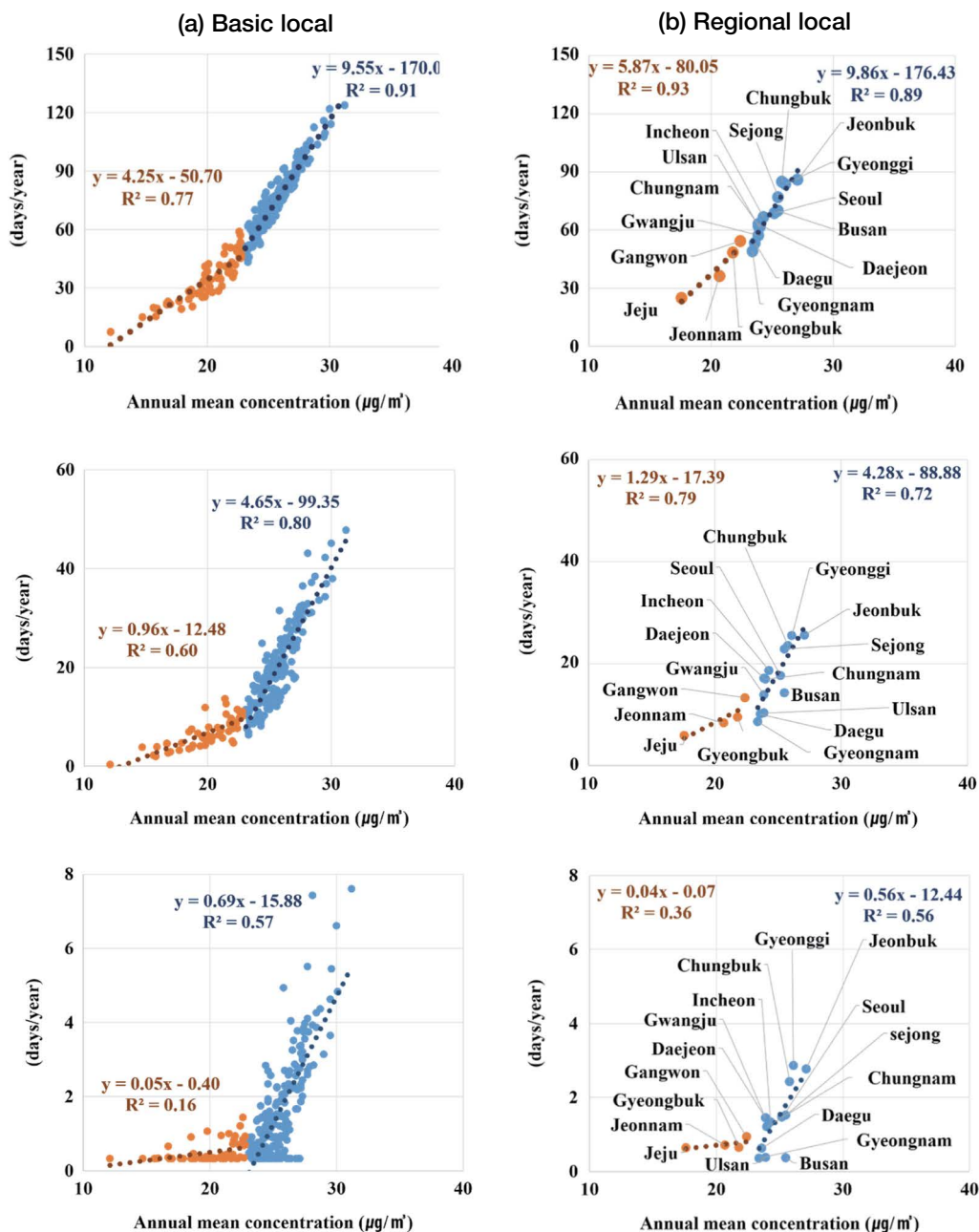


Fig. 6. Scatters between 3-yr mean PM_{2.5} concentration (x-axis) and the number of daily PM_{2.5} exceedances during the target period on (a) basic and (b) regional local authorities. Short term standards are 35, 50, 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively, from the top.

17.6~27.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 사이로 광역 지자체 간 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 가까운 차이를 보이고, 기초 지자체별 연평균 PM_{2.5} 농도는 12.1~31.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 약 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 차이를 보

인다. 특히, 한 광역 지자체 내에서도 기초 지자체 간 연평균 PM_{2.5} 농도는 충북에서 17.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연간 단기 대기환경기준 초과일 (> 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)은 강원에서 95일

차이를 보였다. 단기 PM_{2.5} 대기환경기준 초과 일수는 전국 연간 평균 61일로 조사되었다. 단기 기준 초과 일의 경우 연평균 PM_{2.5} 농도가 높았던 전북(86일), 경기(83일), 충북(85일) 순으로 높았다.

일평균 PM_{2.5} 농도 35 µg/m³을 기준으로 고농도 발생 빈도와 연평균 농도의 상관성(R²)과 기울기는 기초 및 광역 지자체에서 모두 0.9로 연평균 농도 1 µg/m³ 감소 시 고농도일 발생은 9.5일 정도 낮아졌다. 그러나, PM_{2.5} 고농도 발생일 기준을 50 µg/m³과 75 µg/m³로 높이면 연평균 농도 1 µg/m³ 낮아짐에 따른 고농도 발생은 4.7일과 0.7일 감소하는 데 그쳤다. 특히, 연평균 PM_{2.5} 농도가 23 µg/m³ 이하인 광역 지자체에서는 고농도 발생 기준을 높일수록 연평균 PM_{2.5} 농도와 고농도 발생 빈도 간의 상관성은 현저히 낮아졌다. 이러한 결과는 연구 대상 기간 동안 50 µg/m³ 이상의 PM_{2.5} 발생 빈도는 국내 배출량 저감에 따라 개선이 어려움을 의미한다. 다만, 현재의 단기 대기환경기준에 해당하는 35 µg/m³를 초과하는 고농도 일수는 국내 배출 저감 노력이 효과적일 수 있음을 보인다.

본 연구는 공간 내삽 자료를 이용하여 지자체별 PM_{2.5} 장단기 농도 및 상관성을 분석하였다. 국내 지자체에서 대체로 대기환경기준을 상회함을 확인하였고, PM_{2.5} 고농도 수준에 따른 장단기 농도 수준의 상관성을 검토하였다. 다만, 국내에서는 2015년부터 집중적인 PM_{2.5} 관리를 위해 현재까지 관측소가 확충되고 있다. 관측소 확충에 따른 공간 내삽 방법과 최적 옵션 선택에 따른 비교 연구가 향후 필요하다. 또한, 본문에 제시한 바와 같이 관측 자료가 부재한 지역에 대한 보완 방법 등도 함께 검토되어야 할 것이다. 이를 통해 국내 지자체별 PM_{2.5} 농도 현황에 대해 더 명확히 이해할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 환경부, 보건복지부) 재원으로 한국연구재단-미세먼지 국가전략

프로젝트사업(2017M3D8A1092020) 및 환경부 기후변화특성화대학원사업의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

References

- Bae, C., Kim, E., Kim, B.-U., Kim, H., Woo, J.-H., Moon, K.-J., Shin, H.-J., Song, I., Kim, S.T. (2017) Impact of Emission Inventory Choices on PM₁₀ Forecast Accuracy and Contributions in the Seoul Metropolitan Area, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 33(5), 497-514, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2017.33.5.497>
- Bae, M., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S.T. (2020) A Multiscale Tiered Approach to Quantify Contributions: A Case Study of PM_{2.5} in South Korea During 2010-2017, *Atmosphere*, 11(2), 141, <https://doi.org/10.3390/atmos11020141>
- Byun, D.W., Schere, K.L. (2006). Review of the governing equations, computational algorithms, and other components of the models-3 community multiscale air quality (CMAQ) modeling system, *Applied Mechanics Reviews*, 59(2), 51-77, <https://doi.org/10.1115/1.2128636>
- Chang, J.-S., Cheong, J.P. (2012) Estimation of the Probability of Exceeding PM_{2.5} Standards in Busan, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 28(6), 9, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/kosae.2012.28.6.697>
- Guerra, S.A., Lane, D.D., Marotz, G.A., Carter, R.E., Hohl, C.M., Baldauf, R.W. (2006) Effects of Wind Direction on Coarse and Fine Particulate Matter Concentrations in Southeast Kansas, *Journal of the Air & Waste Management Association*, 56(11), 1525-1531, <https://doi.org/10.1080/10473289.2006.10464559>
- 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, 275-286, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/kosae.2013.29.3.275>
- Harman, B.I., Koseoglu, H., Yigit, C.O. (2016) Performance evaluation of IDW, Kriging and multiquadric interpolation methods in producing noise mapping: A case study at the city of Isparta, Turkey, *Applied Acoustics*, 112, 147-157, <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.05.024>

- 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), G704-000752.2003.12.3.003
- Ju, H., Kim, H.C., Kim, B.-U., Ghim, Y.S., Shin, H.J., Kim, S. (2018) Long-term Trend Analysis of Key Criteria Air Pollutants over Air Quality Control Regions in South Korea using Observation Data and Air Quality Simulation, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 34(1), 101-119, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/kosae.2018.34.1.101>
- Kim, E., Bae, C., Yoo, C., Kim, B.-U., Kim, H.C., Kim, S. (2018) 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., Park, H., Hong, Y.-C., Ha, M., Kim, Y., Kim, B.-N., Kim, Y., Roh, Y.-M., Lee, B.-E., Ryu, J.-M., Kim, B.-M., Ha, E.-H. (2014) Prenatal exposure to PM₁₀ and NO₂ and children's neurodevelopment from birth to 24 months of age: Mothers and Children's Environmental Health (MOCEH) study, *Science of The Total Environment*, 481, 439-445, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.01.107>
- 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>
- Kondrashov, D., Ghil, M. (2006) Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets, *Nonlinear Processes in Geophysics*, 13, 151-159, <https://doi.org/10.5194/npg-13-151-2006>
- Lee, J.-J. (2018) Impact analysis of PM_{2.5} emissions reduction during high concentration episodes in seoul metropolitan area using CMAQ (Masters dissertation). Konkuk University, Seoul, Korea (in Korean with English abstract).
- Lee, M.-W., Lee, H.-S. (2018) A Study on Atmospheric Dispersion Pattern of Ship Emissions - Focusing on Port of Busan, *Journal of Korea Port Economic Association*, 34, 35-50 (in Korean with English abstract).
- Lee, S.-S. (2017) A comparative study on prediction of fine particulate matter using spatial analysis (in Korean with English abstract).
- 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, 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., Degenhardt, L., Den-tenner, 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, 10.1016/S0140-6736(12)61766-8
- McKnight, P.E., McKnight, K.M., Sidani, S., Figueredo, A.J. (2007) *Missing Data - A Gentle Introduction*. The Guilford Press, New York.
- Ministry Of Environment (MOE). (2013) 2nd stage of air quality management plan revision over the Seoul Metropolitan Area, http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=6482 (accessed on Feb 28, 2020).
- Ministry Of Environment (MOE). (2017) *Comprehensive Plan Report*. http://www.me.go.kr/home/web/policy_data/read.do?menuId=10262&seq=7053 (accessed on Feb 28, 2020).
- Nam, K.-P., Lee, D.-G., Jang, L.-S. (2019) Analysis of PM_{2.5} Concentration and Contribution Characteristics in South Korea according to Seasonal Weather Patterns in East Asia: Focusing on the Intensive Measurement Periods in 2015, *Journal of Environmental Impact Assess-*

- ment, 28, 183-200, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.14249/eia.2019.28.3.183>
- Park, C.-S. (2017) Variations of PM₁₀ concentration in Seoul during 2015 and relationships to weather condition, *Journal of the Association of Korean Photo-Geographers*, 27, 47-64, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.35149/jakpg.2017.27.2.004>
- 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>
- Roderick, J.A.L., Donald, B.R. (2002) *Statistical Analysis with Missing Data*, 2nd Edition, Wiley, Chichester.
- 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, 10.1016/j.jcp.2007.01.037
- Sohn, Y.-G. (2018) A Study on Improvement Measurement on the Management of Air Pollution Matter from Ships (in Korean with English abstract).
- 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.
- Trujillo-Ventura, A., Ellis, J.H. (1991) Multiobjective air pollution monitoring network design, *Atmospheric Environment*, 25(2), 469-479, [https://doi.org/10.1016/0960-1686\(91\)90318-2](https://doi.org/10.1016/0960-1686(91)90318-2)
- United States Environmental Protection Agency (US EPA). (2004) Developing Spatially Interpolated Surfaces and Estimating Uncertainty. <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/P1002QG4.TXT?ZyActionD=ZyDocument&Client=EPA&Index=2000+Thru+2005&Docs=&Query=&Time=&EndTime=&SearchMethod=1&TocRestrict=t=n&Toc=&TocEntry=&QField=&QFieldYear=&QFieldMonth=&QFieldDay=&IntQFieldOp=0&ExtQFieldOp=0&XmlQuery=&File=D%3A%5Czyfiles%5CIndex%20Data%5C00thru05%5CTxt%5C00000018%5CP1002QG4.txt&User=ANONYMOUS&Password=anonymous&SortMethod=h%7C-&MaximumDocuments=1&FuzzyDegree=0&ImageQuality=r75g8/r75g8/x150y150g16/i425&Display=hpfr&DefSeekPage=x&SearchBack=ZyActionL&Back=ZyActionS&BackDesc=Results%20page&MaximumPages=1&ZyEntry=1&SeekPage=x&ZyPURL> (accessed on Feb 28, 2020).
- Yeo, M., IM, Y., Yoo, S., Jeon, E., Kim, Y. (2019) Long-term trend of PM_{2.5} Concentration in Seoul, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 35(4), 438-450, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/KOSAE.2019.35.4.438>.
- Yi, S.-J., Kim, H., Kim, S.-Y. (2016) Exploration and Application of Regulatory PM₁₀ Measurement Data for Developing Long-term Prediction Models in South Korea, *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, 32(1), 114-126, (in Korean with English abstract), <https://doi.org/10.5572/kosae.2016.32.1.114>

Authors Information

손규원 (아주대학교 환경안전공학과 석사과정)

유승희 (아주대학교 환경안전공학과 박사과정)

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

김병욱 (Program Manager 1, Georgia Environmental Protection Division, Atlanta, GA, USA)

김순태 (아주대학교 환경안전공학과 교수)