Journal of Korean Society for Atmospheric Environment
Vol. 34, No. 6, December 2018, pp. 806-821
https://doi.org/10.5572/KOSAE.2018.34.6.806
p-ISSN 1598-7132, e-ISSN 2383-5346

논 문

전국 시군구 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 추정 방법 제안: 전국규모 국가대기오염측정망 측정 자료가 없는 2001~2014년을 중심으로

An Approach to Estimating National-scale Annual-average Concentrations of $PM_{2.5}$ before 2015 when National Air Quality Monitoring Data are Available in South Korea

이수현, 김옥진[1], 김선영[1],*, 김 호
서울대학교 보건대학원 보건학과
[1]국립암센터 국제암대학원대학교 암관리학과

접수일 2018년 10월 15일
수정일 2018년 11월 19일
채택일 2018년 11월 26일

Received 15 October 2018
Revised 19 November 2018
Accepted 26 November 2018

***Corresponding author**
Tel : +82-(0)31-920-2745
E-mail : sykim@ncc.re.kr

Soo Hyun Lee, Ok-jin Kim[1], Sun-Young Kim[1],*, Ho Kim
Graduate School of Public Health, Seoul National University
[1]*Department of Cancer Control and Population Health, Graduate School of Cancer Science and Policy, National Cancer Center,*

Abstract Previous national cohort studies in Europe and North America have reported the relationship between long-term exposure to fine particulate matter air pollution and human health. However, there have been few studies in South Korea, because nationwide $PM_{2.5}$ regulatory air quality monitoring data were not available before 2015. This study aimed to develop an approach to predicting nationwide annual average $PM_{2.5}$ concentrations for 2001~2014 using the ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10}. We used regulatory air quality monitoring data for $PM_{2.5}$ available only in Seoul for 2001~2014 and for the entire country in 2015, as well as national-scale data for PM_{10} for 2001~2015. Our approach is based on multiplication of the district-specific annual means of PM_{10} for 2001~2014 predicted from a previously-developed approach by ratios of annual average $PM_{2.5}$ to PM_{10}. Given the limited data availability to match $PM_{2.5}$ and PM_{10} data over time and space, we explored five approaches for computing ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10}: 1) an overall ratio based on national data in 2015; 2) a ratio for 2001~2014 in Seoul; 3) annual ratios for 2001~2014 in Seoul; 4) regional ratios in 2015; 5) regional ratios in 2015 with a spatial adjustment factor. We validated the models using $PM_{2.5}$ data for 2011~2014 collected at 24 regulatory monitoring sties in the second largest metropolitan city in South Korea, Busan. Whereas R^2 was computed over all sites and all years, spatial R^2 was computed by using 4-year averages at each site focusing on spatial prediction ability. In our validation, the approach 5 gave the largest overall and spatial R^2 of 0.79 and 0.84. Our highly predictive approach for estimating national-scale annual-average $PM_{2.5}$ concentrations for 15 years will allow future cohort studies to investigate health effects of long-term exposure to $PM_{2.5}$ in South Korea.

Key words: Air pollution, Fine particulate matter, Long-term exposure, National prediction, Particulate matter concentration ratio

1. 서 론

미세먼지가 건강에 미치는 악영향은 오랜 동안 다양한 지역에서 수행된 역학 연구를 통해서 보고되었다. 그 중에서도 공기역학직경이 2.5 μm 이하의 미세먼지($PM_{2.5}$)의 단 · 장기 노출은 사망 및 질병 이환의 위험을 증가시켰다(US EPA, 2009; WHO, 2003; Burnett *et al.*, 2000). 특히, 북미와 유럽을 중심으로 한 대규모 코호트 연구에서는 $PM_{2.5}$의 장기 노출이 건강에 미치는 영향을 보고했으며, 최근 다른 지역 국가

및 전 세계를 연구지역으로 $PM_{2.5}$ 장기 노출의 사망 영향을 추정하는 연구가 진행되었다(Cohen *et al.*, 2017; Di *et al.*, 2017; Beelen *et al.*, 2014; Hoek *et al.*, 2013; Lim *et al.*, 2012).

코호트를 기반으로 $PM_{2.5}$ 장기 노출의 건강 영향을 추정하는 역학 연구를 수행하기 위해서는, 코호트 추적 기간의 개인별 노출 값을 산출하는 노출 평가가 필수적이다. $PM_{2.5}$의 노출 평가는 지상의 대기오염 측정소에서 측정한 농도값을 이용해왔다. 그런데, $PM_{2.5}$에 대한 대규모 지역의 지속적인 측정은 상대적으로 최근 시기에 시작되었다. 북미와 서유럽에서도 전국규모의 지속적인 측정은 각각 1990년대 후반과 2000년대 중반 이후 시작하였다(US EPA, 2009; WHO, 2004). 그러나 $PM_{2.5}$ 장기 노출이 건강에 미치는 영향을 평가하기 위한 자료원이 되는 많은 코호트들은 $PM_{2.5}$의 측정시기보다 앞서 구축되었다. 따라서, 측정 농도값이 없는 과거 시기가 코호트 연구 기간에 포함되어 있어 노출 평가에 어려움이 있다(Kim *et al.*, 2017c).

우리나라에서도 전국 단위로 $PM_{2.5}$ 장기 노출과 건강 간의 연관성을 평가하는 연구가 수행되지 못한 가장 큰 이유는, 과거 $PM_{2.5}$ 측정 자료가 존재하지 않기 때문이다. 국내에서는 1995년부터 국가 및 지자체에서 운영하는 일반대기오염 측정망의 대기오염 측정소를 통해서 공기역학직경 10 μm 이하의 미세먼지(PM_{10}) 농도 측정 자료를 수집하였고, 2001년부터의 자료를 공개하고 있다(MOE, 2011). 이렇게 2001년부터 공개된 PM_{10}을 자료를 이용해서 2002년부터 시작된 전국 단위의 코호트 자료와 함께 PM_{10} 장기 노출의 사망 영향을 추정한 국내 연구가 최근에 수행되었다(Kim *et al.*, 2017b). 반면 $PM_{2.5}$는 2011년 대기환경기준이 신설되고 2015년 1월 1일부터 적용되어 2015년부터 대기환경기준물질에 추가됨에 따라 전국규모 측정값이 공개되기 시작하였다(MOE, 2017). 때문에, 2015년 이전에 구축된 코호트에 적용하기에 제한점을 가진다. 또한, PM_{10}과 비교하여 전국규모 측정소 개수가 상대적으로 매우 적다.

국가에서 운영하는 광범위한 대기오염 측정소의 최근 도입으로 인한 과거 $PM_{2.5}$ 농도 측정값의 부재는 우리나라뿐만 아니라 유럽 등 다른 국가의 미세먼지 건강 영향 평가에서도 공통되는 제한점이다. 이러한 제한점을 극복하기 위해 장기 노출의 건강 영향을 추정하는 많은 역학 연구에서 과거 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법을 개발하였다. 이들 연구에서는 $PM_{2.5}$와 연관성이 높은 다른 대기오염 물질들을 이용하거나, 시정거리, 배출 자료, 확산 모형과 광화학반응 모형, 통계모형, 인공위성 측정값, 물질 간의 비율 등을 이용하여 시공간적으로 다양한 범위의 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하는 모형과 방법을 개발하였다(Kim *et al.*, 2017c; Li *et al.*, 2017; Brauer *et al.*, 2016; Beelen *et al.*, 2014; Hogrefe *et al.*, 2009; Paciorek *et al.*, 2009; Ozkaynak *et al.*, 1985).

이러한 $PM_{2.5}$ 예측 방법 중, 많은 연구에서는 $PM_{2.5}$ 농도와 입자가 큰 미세먼지 농도의 비율을 이용했다. 즉, $PM_{2.5}$ 측정값이 없는 과거시기에 측정된 입자가 큰 미세먼지 농도값에 $PM_{2.5}$ 측정값이 있는 시기 동안 계산된 비율을 곱해서, 과거 시기의 $PM_{2.5}$을 예측했다. 비율을 이용하는 방법은 적용법이 단순하지만, 쉽게 사용이 가능하고 상대적으로 높은 예측력을 보였다. 미국의 한 연구에서는 전국규모 측정망이 설치된 1999년 이전의 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하기 위해, 1999년 이후의 PM_{10}과 총부유입자(total suspended particle: TSP)의 비율과 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 이용하였다. 이 연구에서는 1999~2000년의 $PM_{2.5}/PM_{10}$과 1989~1997년의 $PM_{2.5}$/TSP 비율을 산출하고 두 비율을 곱하여 $PM_{2.5}$/TSP를 계산하였다. 이렇게 산출된 두 비율과 1999년 이전에 측정된 TSP나 PM_{10} 농도값을 직접 곱하여 과거 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하였다(Lall *et al.*, 2004). 또 다른 미국의 연구에서는 $PM_{2.5}$이 측정된 시기 동안 계산한 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 이용한 시공간 모형을 통해서 $PM_{2.5}$ 측정값이 없는 시기의 비율을 예측한 후, PM_{10} 농도값에 곱하여 $PM_{2.5}$ 농도를 추정하였다(Yanosky *et al.*, 2009). 전 세계 단위의 노출 예측 연구에서는 $PM_{2.5}$ 측정값이 없는 지역에서 PM_{10}

측정값과 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 이용하여 $PM_{2.5}$ 농도값을 예측하였다(Brauer *et al.*, 2016). 뿐만 아니라 홍콩의 환경보호부(Environmental Protection Department)는 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하기 위한 가이드라인에 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 사용하는 방법을 직접 제시하고 있다(HKSAR-EPA, 2016).

우리나라에서도 장기간 노출된 미세먼지의 건강영향에 대한 관심이 증가하면서, 코호트 연구들이 증가하고 있다. 예를 들어, 국민건강보험공단이 전국민 대표성을 가지도록 설계해서 2014년에 배포한 건강보험 표본코호트는 2002~2014년의 추적자료를 포함하고 있다. 이러한 자료들을 이용하여 전국 단위 $PM_{2.5}$ 장기 노출의 건강 영향을 평가하기 위해서는, 전국 단위 측정값이 없는 과거 시기인 2015년 이전 전국의 $PM_{2.5}$ 농도를 예측할 수 있는 방법의 개발이 필수적이다. 그러나, 우리나라에서는 이러한 예측 방법 개발을 위한 연구가 수행되지 않았다. 본 연구에서는 $PM_{2.5}$ 장기 노출의 건강 영향을 평가하기 위해, 단순하지만 예측력이 높다고 보고된 PM_{10}과의 비율을 이용하는 방법을 적용하여 과거 $PM_{2.5}$ 농도를 예측하고자 한다. 즉, 2001년부터 2014년까지 $PM_{2.5}$ 측정값이 없는 전국 시군구의 과거 $PM_{2.5}$ 연평균 농도를 예측하고자 한다. 예측의 공간적인 단위는, 건강보험, 사망 및 출산 자료 등 우리나라 정부기관에서 제공하는 대부분 건강자료의 주소지 공개 단위인 시군구로 설정하였다.

2. 연구 방법

2.1 미세먼지($PM_{2.5}$와 PM_{10}) 자료

$PM_{2.5}$ 농도 예측을 위해 국립환경과학원으로부터 전국 일반대기오염측정망 측정소에서 측정된 시간별 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 농도 자료를 획득하였다. 일반대기오염측정망은 지자체 및 중앙정부가 운영하는 도시대기, 도로변대기, 국가배경농도, 교외대기 측정망으로 구성되어 있다. 지자체가 운영하는 도시대기와 도로변대기 측정망은 각 도시지역의 평균대기질 농도를 파악하여 환경기준 달성여부를 판정하고, 자동차 통행량과 유동인구가 많은 도로변 대기질을 파악하는 것을 목적으로 한다. 중앙정부에서 직접 운영하는 국가배경농도 측정망은 국가적인 배경농도를 파악하고 외국으로부터의 오염물질 유입 · 유출 상태, 장거리 이동 현황 등을 파악하는 것을 목적으로 한다. 교외대기 측정망도 중앙정부에서 직접 운영하는데, 광범위한 지역의 배경농도를 파악하는 것이 목적이다. $PM_{2.5}$와 PM_{10}은 베타선흡수법(β-Ray Absorption Method)을 이용해서 1시간을 주기로(24시간/일) 측정된다. 베타선흡수법 측정결과는 상온 상태(20℃, 1기압)로 환산된 단위부피 당 질량농도($\mu g/m^3$)로 계산된다(MOE, 2017).

본 연구의 $PM_{2.5}$ 예측은 코호트 연구에의 적용을 궁극적인 목표로 하기 때문에, 일반대기오염측정망 4개 중 인구집단의 노출수준 파악을 위해 측정된 도시대기 측정망의 측정 자료만 사용하였다. 2015년 기준으로 4개의 측정망 중 도시대기측정망의 PM_{10} 측정소는 전체 268개 중 215개로 약 80%이고, $PM_{2.5}$ 측정소는 전체 107개 중 97개로 약 91%를 차지한다. 게다가 연평균 $PM_{2.5}/PM_{10}$의 값이 산출 가능한 공통 측정소는 도시대기 측정망의 측정소가 87개로 전체 96개의 약 91%이다.

PM_{10} 측정농도값은 2001~2015년 전국 모든 측정소에서 측정된 자료를 국립환경과학원에 자료요청을 통해 획득했다. 반면, $PM_{2.5}$ 측정값은 전국 수준의 자료가 이용 가능한 2015년 자료를 획득하였다. 2015년 이전 측정 자료에 대해서는 각 지방자치단체 보건환경연구원에 자료요청을 통해, 서울특별시 측정소의 2001~2014년 측정 자료와 부산광역시 24개 측정소의 2011~2014년 자료를 획득하였다. 따라서, 본 연구에서는 PM_{10}은 2001년부터 2015년까지 전국 측정소의 시간별 측정 자료를 이용하였고, $PM_{2.5}$는 2001년부터 2014년까지는 서울특별시 소재 측정소의 시간별 측정값과 2015년의 전국 시간별 측정값을 이용하였다. 부산광역시 측정 자료는 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법

의 검증을 위해서 사용하였다.

측정소별 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 시간별 측정값을 이용하여 연간 평균을 계산하였다. 이때 각 측정소별 일평균과 연평균 미세먼지 농도값이 '일'과 '년'의 대표성을 가지도록 이전 연구에서 사용한 측정소 포함 기준을 적용하였다(Kim and Song, 2017; Yi *et al.*, 2016). 우선 측정소별 하루 24시간의 측정 중에서 25% (6시간) 미만의 결측값을 갖는 날에 대한 일평균 농도를 계산하였다. 이후, 측정소별 연평균 농도는 연중 일평균 값이 75% (274일) 이상 있고, 연중 10개의 월마다 한 개 이상의 일별 측정값이 있고, 연속 45일 이상의 일별 측정에 결측이 없는 포함 기준을 만족하는 측정소에서 일평균 농도의 연간 산술평균으로 산출하였다. 특히, 두 번째 측정소 포함 기준의 적용은 첫 번째 기준을 바탕으로 산출한 일평균 농도의 계절적 불균형에서 발생하는 오차를 최소로 하기 위함이다. 예를 들면, 일평균 농도가 특정한 계절과 월에 결측값이 집중되어 있다면, 이 자료를 바탕으로 산출된 연평균 농도는 '년'을 대표하여 모든 계절을 균등하게 포함하고 있다고 보기 어려울 것이다.

2.2 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법

본 연구에서는 PM_{10} 농도에 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 곱하는 기존 연구(HKSAR-EPA, 2016; Lall *et al.*, 2004)를 바탕으로, 측정값이 없는 2015년 이전 2001~2014년의 전국 시군구에서 $PM_{2.5}$ 연평균 농도를 예측하는 방법을 개발하였다(식 1). PM_{10} 농도($PM_{10,st}$)는 선행 연구(Kim and Song, 2017; Song and Kim 2016)에서 개발된 방법으로 예측된 전국 시군구별 2001년부터 2014년까지의 PM_{10} 연평균 농도값이었다. $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 연평균 비율($Ratio_{R,T}$)은 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 측정값을 이용하여 산출하였다. 또한, 시간과 공간에 따라 변하는 비율을 보정하기 위해, 보정요소($Adjustment\ Factor_{R,2015}$)를 포함하였다.

$$PM_{2.5,st} = PM_{10,st} \times Ratio_{R,T} \times Adjustment\ factor_{R,2015} \quad (1)$$

t: year (2001 to 2014)
s: sigungu area (1 to 252)
R: region (1 to 16 metropolitan cities and provinces)
T: year when $PM_{2.5}$ is available (t or fixed year in 2015 or for 2001~2014 depending on the prediction approach shown in Table 1)

예측 방법에 이용된 전국 시군구 단위의 2002~2014년 연평균 PM_{10} 농도는 선행 연구의 PM_{10} 농도 예측 모형을 통해 산출된 시군구 대푯값을 차용하였다. 선행 연구에서는 2001~2014년 PM_{10} 측정 자료를 바탕으로 일반크리깅(Universal Kriging) 예측 모형을 이용해서 전국규모 점 예측 모형을 개발하였다(Kim and Song, 2017). 일반크리깅 모형에는 322개 지리변수로부터 부분최소제곱(Partial Least Squares)을 통해 추정한 3개 예측변수와 공간적인 상관관계를 포함하였다. 이 모형을 이용해서 전국 6만여 개 집계구내 최대 거주지역 중심점에 PM_{10} 연평균 농도를 예측한 후, 이들 예측값의 시군구별 평균값을 계산하였다(Song and Kim 2016). 2010년 기준으로 40%에 해당하는 시군구에 측정소가 존재하지 않고, 다른 대부분의 시군구도 1~2개에 불과한 측정소를 포함하는 점을 고려할 때, 집계구 중심점은 인구대표성 있는 시군구 대푯값을 제공할 것으로 기대되었다.

$PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율은 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 측정 자료가 동시에 있는 측정소의 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 연평균 농도를 이용하여 측정소별로 계산한 후 16개 시도(7개 특별 · 광역시와 9개 도) 단위로 연도별 산술 평균하여 산출하고자 하였다. 그러나 이용 가능한 $PM_{2.5}$ 자료의 시공간적인 제한으로, 이 비율은 시간 또는 공간적으로 일정한 비율, 서울에 한정된 연도별 비율, 또는 1년(2015년)에 한정된 시도별 비율로 산출하였다. $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 시군구가 아닌 16개 시도 단위로 산출한 이유는, 2015년 기준 50% 이상의 시군구의 $PM_{2.5}$ 측정 자료가 없어서 시군구 단위로 비율을 산출할 수 없었기 때문이었다.

본 연구에서는 시공간적으로 제한된 $PM_{2.5}$ 자료를 이용해서 계산한 비율을 보정하고자, 5가지 예측 방

법을 탐색하였다. 각 방법은 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 연평균 비율의 시공간적인 분포에 대한 가정 하에 계산된 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율(Ratio)과 이용된 보정요소(Adjustment factor)에 따라 표 1과 같이 정리할 수 있다.

각 5개의 예측 방법에서 사용한 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율은 다음과 같다. 방법 1(A1: spatial average)과 2(A2: temporal average)는 2015년 전국 평균 비율($Ratio_{National,2015}$)과 2001~2014년 서울 평균 비율($Ratio_{Seoul,2001-14}$)을 이용하였다. 방법 3(A3: regional average)은 2015년 각 지역 비율($Ratio_{R,2015}$)을 이용한 반면, 방법 4(A4: annual average)는 서울의 각 연도별 비율($Ratio_{Seoul,t}$)을 이용하였다. 방법 5(A5: regional and annual average)는 방법 3 또는 방법 4에 보정요소를 추가함으로써 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 비율 분포의 시공간적 변이를 보정한 방법이다. 즉, 방법 5-1은 방법 3과 동일한 비율($Ratio_{R,2015}$)을 사용하고 보정요소로 서울의 2015년 비율 대비 각 연도별 비율을 이용하였다. 방법 5-2는 방법 4와 동일한 비율($Ratio_{Seoul,t}$)을 이용하되, 보정요소로 2015년 서울의 비율 대비 각 지역 비율을 적용하였다. 본 연구에서 이용한 측정자료의 시공간적 한계로 인하여 방법 5의 식은 두 가지 서로 다른 가정 적용 과정을 통해서 수식상 동일하게 유도할 수 있다. 즉, 방법 5-1은 방법 3의 비율과 서울의 연도별 비율을 시간 보정요소로 이용하여 방법 5의 결과식을 유도할 수 있다. 또한 방법 4의 비율과 2015년 각 지역 비율을 공간 보정요소로 사용한 방법 5-2 역시 방법 5의 결과식을 유도할 수 있다. A1-A4에서는 보정요소를 고려하지 않았다.

본 연구에서 제안한 5가지 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법은 다음과 같은 가정 하에 고안되었다. A1은 과거 어느 해의 어느 지역이든 2015년 전국 비율의 총 평균한 값을 이용하여 예측하는 방법으로, 연평균 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 비율의 공간적 평균이 연도에 따라 크게 달라지지 않는다는 가정을 적용하였다. A2는 과거 어느 해의 어느 지역이든 2001~2014년 서울 비율의 총 평균한 값을 이용하여 예측하는 방법이고, 비율의 시간적 평균이 공간 즉, 지역에 따라 다르지 않다고 가정하였다. A3은 과거 어떤 해의 한 지역의 $PM_{2.5}$ 농도를 2015년 동일 지역의 비율을 이용하여 예측하는 방법으로 지역의 비율이 연도에 따라 변하지 않는다는 가정이다. A4는 과거 한 해 어느 지역의 농도는 동일 시기의 서울에서 계산된 비율을 이용하여 예측하는 방법이고 동일 연도의 비율은 공간 즉, 지역에 상관없이 일정하다는 가정을 적용하였다. 마지막으로, A5는 A3 또는 A4를 기준으로 시공간 보정요소를 이용하여 예측하는 방법으로 결과적으로 비율이 시공간적으로 달라진다고 가정하였다.

본 연구에서 개발된 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법의 예측력은 2011년부터 2014년까지 부산광역시의 24개 도시대기 측정망의 $PM_{2.5}$ 측정 자료를 이용하여 평가하였다. 5가지 예측 방법을 통해 2011년부터 2014년까지 24개 측정소별로 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 예측값(predicted $PM_{2.5}$) 농도를 산출하고, 이 값을 동일 측정소의 측정값으로부터 계산된 연평균(observed $PM_{2.5}$) 농도와 비교했다. 두 값의 비교를 위한 검정통계량으로 평균제곱근오차(root mean square error: RMSE)와 평균제곱오차(mean square error: MSE)를 이용한 결정계수(MSE-based r-squared value: R^2)를 산출하였다(Kim and Song, 2017; Kim *et al.*, 2016b; Keller *et al.*, 2015).

$$\mathrm{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum (predicted\ PM_{2.5} - observed\ PM_{2.5})^2}{n}} \quad (2)$$

$$R^2 = \frac{1 - MSE\,(predicted\ PM_{2.5})}{Var(observed\ PM_{2.5})}$$

$$= 1 - \frac{\sum (predicted\ PM_{2.5} - observed\ PM_{2.5})^2}{\sum (observed\ PM_{2.5} - \overline{observed\ PM_{2.5}})^2} \quad (3)$$

평균제곱근오차(RMSE)는 $PM_{2.5}$ 연평균 농도와 동일한 단위를 갖고 있으므로 $PM_{2.5}$ 연평균 농도의 평균이나 표준편차와 오차의 크기 비교가 가능하다(식 2). 평균제곱오차를 기반으로 한 결정계수(R^2)는 회귀선을 기준으로 상관계수의 제곱으로 표현되는 회귀 결정계수와는 다르게 기울기가 1인 1:1 대응선을 기준으로 하기 때문에 측정값과 예측값 사이의 일

Table 1. Five approaches using ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10} for predicting $PM_{2.5}$ annual average concentrations for 2001~2014 in South Korea.

Approach	Ratio	Time	Space	Adjustment factor	Formula[a]	Assumption
A1 (spatial average)	$Ratio_{National,2015}$	2015	National (average)	None	$\frac{1}{N}\sum_{site=1}^{N}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,2015}$	Consistent spatial average over time
A2 (temporal average)	$Ratio_{Seoul,2001\text{-}14}$	2001~2014 (average)	Seoul (average)	None	$\frac{1}{N_{Seoul,t}\times 14}\sum_{site=1}^{N_{Seoul,t}}\sum_{t=2001}^{2014}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,t}$	Consistent temporal average over space
A3 (regional average)	$Ratio_{R,2015}$	2015	National (each region)	None	$\frac{1}{N_R}\sum_{site=1}^{N_R}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,2015}$	Consistent temporal pattern of spatial distribution
A4 (annual average)	$Ratio_{Seoul,t}$	2001~2014 (annual)	Seoul (average)	None	$\frac{1}{N_{Seoul,t}}\sum_{site=1}^{N_{Seoul,t}}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,t}$	Consistent spatial pattern of temporal distribution
A5[b] (regional and annual average)	$\frac{Ratio_{R,2015}}{Ratio_{Seoul,t}}$	2001~2014 (annual)	National (each region)	Ratio in each year to ratio for 2015 in Seoul[†] / Regional ratio in each region to Seoul ratio for 2015 [†]	$\frac{1}{N_R}\sum_{site=1}^{N_R}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,2015}\times\left(\frac{\frac{1}{N_{Seoul,t}}\sum_{site=1}^{N_{Seoul,t}}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,t}}{\frac{1}{N_{Seoul,2015}}\sum_{site=1}^{N_{Seoul,2015}}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,2015}}\right)^{\dagger}$ / $\frac{1}{N_{Seoul,t}}\sum_{site=1}^{N_{Seoul,t}}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,t}\times\left(\frac{\frac{1}{N_R}\sum_{site=1}^{N_R}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,2015}}{\frac{1}{N_{Seoul,2015}}\sum_{site=1}^{N_{Seoul,2015}}\left(\frac{PM_{2.5}}{PM_{10}}\right)_{site,2015}}\right)^{\dagger}$	Inconsistent spatial and temporal distribution

[a]N: the number of monitoring sites in 2015; $N_{Seoul,t}$: the numbers of monitoring sites in Seoul for each year; N_R: the numbers of monitoring sites in each region for 2015

[b]A5: the same formula for A5 is derived from A3 (A5-1) and A4 (A5-2). A5-1 consists of the ratio, $Ratio_{R,2015}$, of A3 and a temporal adjustment factor[†] and A5-2 consists of the ratio, $Ratio_{Seoul,t}$, of A4 and a spatial adjustment factor[†].

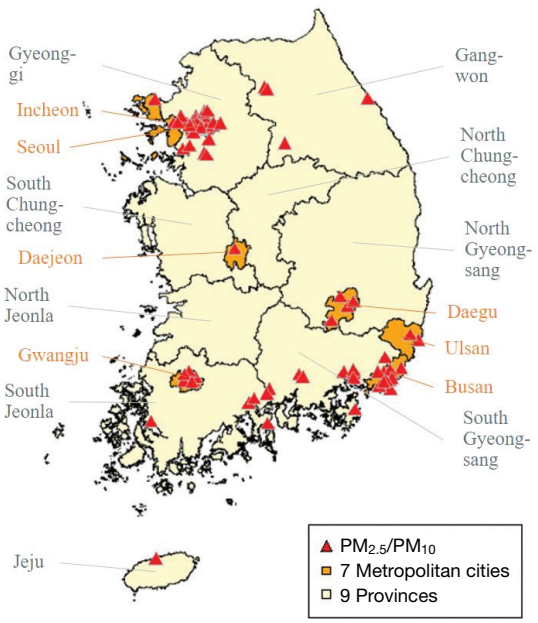

Fig. 1. Map 84 sites for $PM_{2.5}/PM_{10}$ out of the 226 urban background sites of the air quality regulatory monitoring network used in this study for 2015 in South Korea.

치성을 비교하기에 더 적합하다(식 3). 또한 공간적 예측력을 검증하기 위해서 측정소별 2001~2014년 4년 평균을 이용하여 예측값과 측정값 사이의 공간 평균제곱근오차(spatial RMSE)와 공간 결정계수(spatial R^2)를 계산하였다.

3. 연구 결과

3.1 미세먼지($PM_{2.5}$와 PM_{10}) 측정값 및 비율

본 연구에서 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 연평균 농도를 계산하는데 이용한 도시대기 측정망의 측정소는 2015년을 기준으로 $PM_{2.5}$는 일반대기오염측정망의 107개 측정소 중에서 95개, PM_{10}은 일반대기오염측정망의 268개 측정소 중에서 215개 측정소에서 측정값을 제공하였다(그림 1). 2015년 도시대기 측정소 226개 중, 84개 측정소에서 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 측정값을 동시에

Table 2. Descriptive statistics of the annual average concentrations of $PM_{2.5}$ and PM_{10} for 2001~2015 in 16 metropolitan cities and provinces of South Korea.

Area		PM_{10} (μg/m³)						$PM_{2.5}$ (μg/m³)					
		2001		2010		2015		2001		2010		2015	
		N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)	N	Mean (SD)
7 mertro-politan cities	Seoul	16	71.6 (11.0)	24	49.1 (3.3)	25	45.5 (2.2)	2	47.8 (5.78)	24	25.0 (1.8)	25	23.3 (1.7)
	Busan	9	59.6 (8.9)	17	48.8 (9.4)	14	46.01 (5.6)	–	–	–	–	19	25.6 (3.4)
	Daegu	5	66.7 (8.9)	11	51.1 (8.8)	11	46.3 (7.0)	–	–	–	–	7	25.8 (3.45)
	Incheon	9	52.3 (5.5)	15	55.3 (5.9)	15	52.5 (7.6)	–	–	–	–	3	26.0 (3.3)
	Gwang-ju	3	56.2 (13.7)	7	45.34 (6.2)	6	42.5 (6.8)	–	–	–	–	6	26.3 (4.8)
	Deajeon	3	48.0 (8.2)	7	43.6 (2.4)	8	46.1 (3.8)	–	–	–	–	1	29.0 (–)
	Ulsan	6	54.0 (13.1)	13	47.6 (5.1)	7	45.2 (4.2)	–	–	–	–	5	24.8 (3.2)
9 provinces	Gyeong-gi	26	72.5 (15.2)	64	58.0 (7.6)	46	53.0 (5.0)	–	–	–	–	9	25.6 (3.9)
	Gang-won	2	47.8 (1.0)	7	50.9 (7.9)	7	50.1 (8.5)	–	–	–	–	4	26.5 (6.0)
	North Chung-cheong	3	62.5 (11.9)	7	61.2 (7.6)	9	51.2 (6.9)	–	–	–	–	0	–
	South Chung-cheong	3	53.2 (6.1)	7	45.8 (6.6)	7	45.8 (5.1)	–	–	–	–	0	–
	North Jeonla	5	64.4 (19.6)	10	53.0 (3.6)	12	50.7 (4.67)	–	–	–	–	0	–
	South Jeonla	5	45.8 (11.1)	14	41.8 (7.0)	16	38.3 (6.3)	–	–	–	–	6	25.1 (4.0)
	North Gyeong-sang	9	50.8 (9.4)	10	47.0 (8.2)	11	46.5 (7.2)	–	–	–	–	0	-
	South Gyeong-sang	6	51.7 (14.3)	13	45.1 (5.5)	19	46.2 (5.3)	–	–	–	–	11	25.5 (3.4)
	Jeju	1	46.7 (–)	3	48.3 (3.6)	2	45.9 (0.7)	–	–	–	–	1	23.4 (–)
All	All	111	61.4 (15.0)	229	51.4 (8.6)	215	47.9 (6.8)	2	47.8 (5.78)	24	25.0 (1.8)	97	25.0 (3.4)

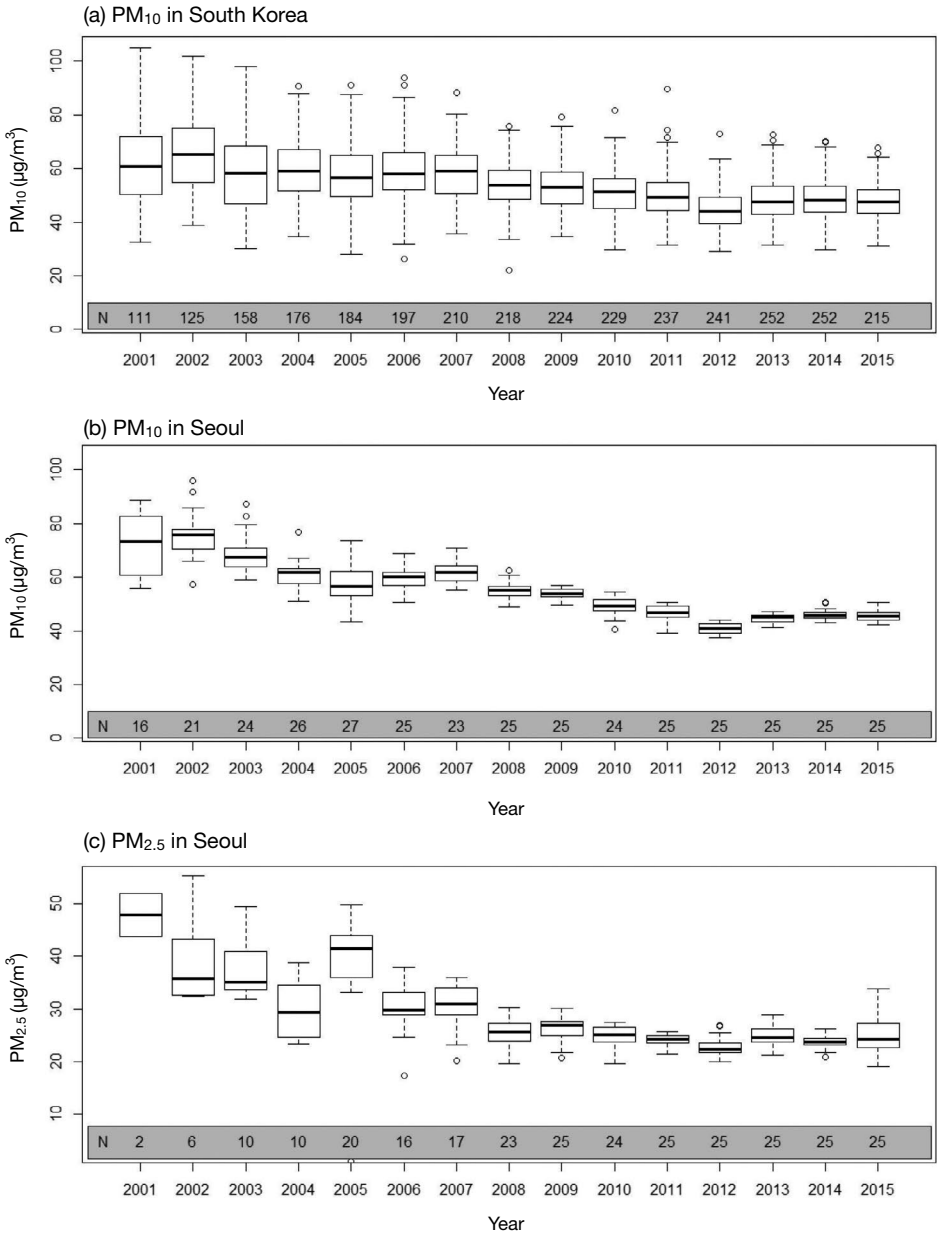

Fig. 2. Box plots of the annual average concentrations of (a) PM_{10} in South Korea, (b) PM_{10} in Seoul, and (c) $PM_{2.5}$ in Seoul for 2001~2015 (N: the numbers of sites; Boxplot: upper and lower whiskers = 1.5 * interquartile range (IQR) from 75% quantile and −1.5 * IQR from 25% quantile; upper and lower limits of boxes = 75% and 25% quantile; solid line in the middle of box = median/ 50% quantile).

제공하여 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 산출하였다.

전국 도시대기 측정망 측정소의 측정값으로부터 산출한 PM_{10} 연평균 농도의 평균은 2001년에 61.39 $\mu g/m^3$에서 2015년에 47.86 $\mu g/m^3$으로 감소하는 경향을 나타냈다(표 2, 그림 2). 이러한 경향은 대부분의 지역에서 차이가 없었으며 서울에서 30% 이상의 가

장 큰 감소 추세를 보였다. $PM_{2.5}$는 서울에서 2001년의 연평균 농도값의 평균이 47.82 μg/m^{3}이었고 2015년에는 23.26 μg/m^{3}으로 PM_{10}의 감소 추세와 비슷한 경향을 보였다. 그러나, 2005년에는 거의 변화가 없거나 약간 감소하는 경향을 보이는 PM_{10}과는 다르게, $PM_{2.5}$는 2005년 전후 년도와 비교하여 크게 높은 연평균 농도값을 보이고 있었다(그림 2). 2015년부터 $PM_{2.5}$의 측정이 전국 단위로 확대되었으나 충청북도, 충청남도, 전라북도, 경상북도에는 여전히 측정소가 없었고, 대전과 제주도에는 1개의 측정소만 있었다. 2015년 $PM_{2.5}$ 연평균 농도의 평균은 대전에서 28.99 μg/m^{3}로 가장 높게 나타났고 서울에서 23.26 μg/m^{3}으로 가장 낮게 나타났다.

$PM_{2.5}$와 PM_{10}의 서울지역 연평균 비율은 2001~2014년 전 기간 평균이 0.53이었다(그림 3). 다른 해에 비해 이상적으로 $PM_{2.5}$ 농도가 높았던 2005년을 제외하면, 2001년에 0.58로 가장 높았고 2008년에 0.47로 가장 낮았으나, 연도별 평균의 차이는 크지 않았다. 반면, 2015년 전국 단위의 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율의 시도별 평균은 측정소가 없었던 4개 도를 제외한 12개의 시도 중 대전에서 0.67로 가장 높았고 경기도에서 0.47로 가장 낮았다. 시도별 평균은 서울에서의 연도별 평균에 비해 상대적으로 큰 차이를 보였다.

3. 2 $PM_{2.5}$ 농도 예측

본 연구에서 개발된 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법을 부산광

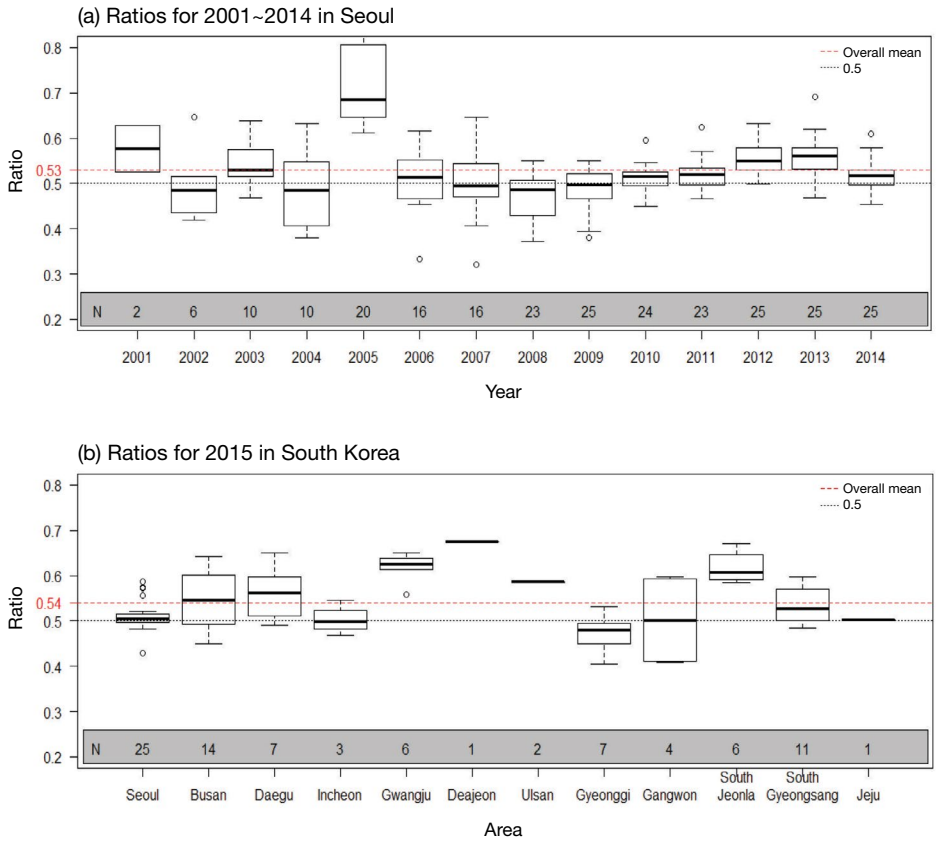

Fig. 3. Ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10} at air quality regulatory monitoring sites (a) across 14 years for 2001~2014 in Seoul and (b) across 16 metropolitan cities and provinces for 2015 in South Korea (N: the numbers of sites; Boxplot: upper and lower whiskers = 1.5 * interquartile range (IQR) from 75% quantile and −1.5 * IQR from 25% quantile; upper and lower limits of boxes = 75% and 25% quantile; solid line in the middle of box = median/50% quantile).

역시의 $PM_{2.5}$ 측정 자료를 이용하여 검증한 결과, 평균제곱근오차는 8.91~21.73 μg/m^3, 결정계수는 0.49~0.79였다(표 3). 공간 평균제곱근오차(spatial RMSE)는 5.82~19.66 μg/m^3, 공간 결정계수(spatial R^2)는 0.45~0.84였다.

5개의 $PM_{2.5}$ 농도 예측 방법에서는 전반적으로 과소추정하는 것으로 나타났다(그림 4). 그러나, 비율의 분포가 시공간적으로 일정하지 않다고 가정하여 공간 보정 변수를 추가한 A5가 1:1 대응선에 가장 가깝게 다가가며, 가장 낮은 평균제곱근오차(8.91 μg/m^3)와 가장 높은 결정계수(0.79)를 보였다. 이러한 높은 예측력은 연도마다의 변이를 제거한, 공간 평균제곱근오차와 공간결정계수에서도 일관적이었다(5.82 μg/m^3; 0.84). 반면, 비율의 시간적 평균값이 공간에 따라 일정하다고 가정한 방법(A2)은 가장 높은 평균제곱근오차 및 공간 평균제곱근오차(21.73 μg/

Table 3. Validation statistics of the predicted $PM_{2.5}$ annual average concentrations from five prediction approaches using ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10} across 24 sites in Busan for 2011~2014.

Approach	RMSE[a]	R^{2b}	Spatial RMSE	Spatial R^2
A1 (spatial average)	18.41	0.57	16.31	0.55
A2 (temporal average)	21.73	0.49	19.66	0.45
A3 (regional average)	19.56	0.54	17.29	0.52
A4 (annual average)	14.66	0.66	12.50	0.65
A5 (regional and annual average)	8.91	0.79	5.82	0.84

[a]RMSE: root mean square error; [b]R^2: MSE (mean square error)-based r-squared value

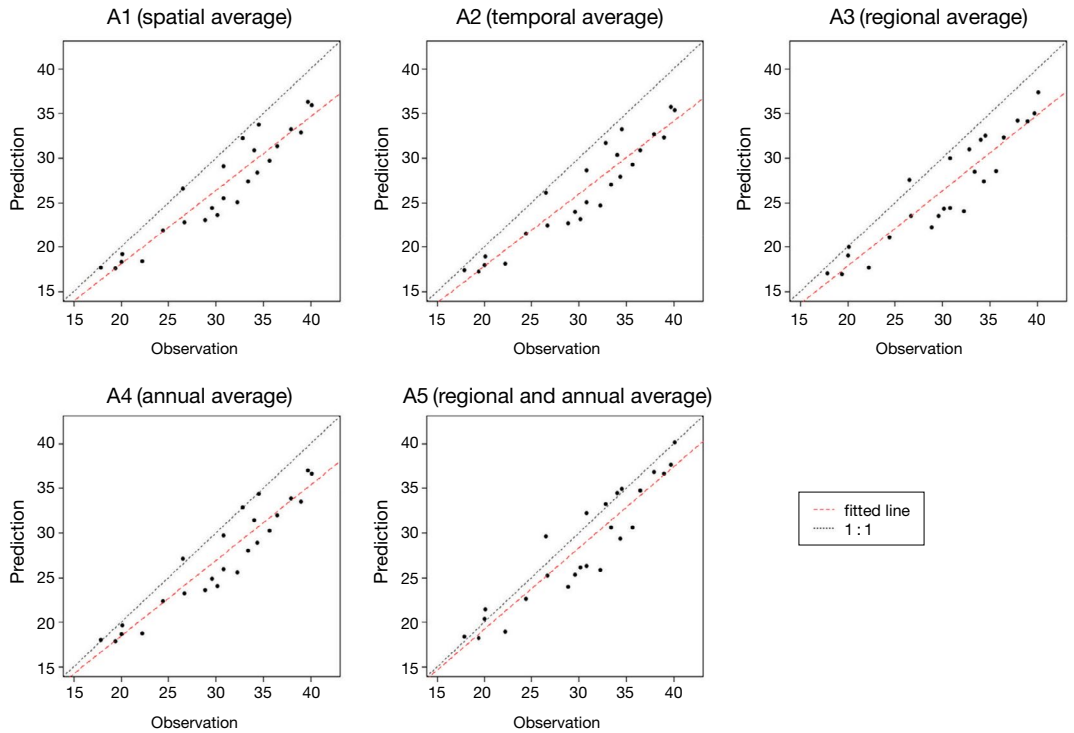

Fig. 4. Scatter plots of observations and predictions of the annual average $PM_{2.5}$ concentrations from five prediction approaches using ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10} across 24 sites in Busan for 2011~2014.

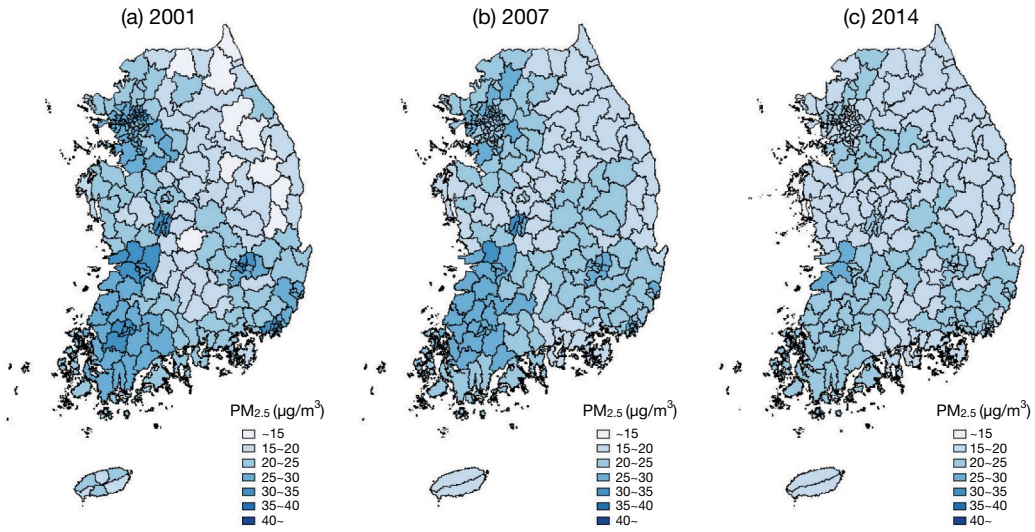

Fig. 5. Maps of the annual average concentrations of $PM_{2.5}$ predicted from the prediction approach using spatiotemporally-adjusted ratios of $PM_{2.5}$ to PM_{10} in (a) 2001, (b) 2007, and (c) 2014 in South Korea.

m^3; 19.66 μg/m^3)와 가장 낮은 결정계수 및 공간결정계수(0.49; 0.45)를 보였다. 그러나, 시간적인 분포가 공간에 따라 일정하다고 가정한 A4는 공간적인 분포나 공간평균이 시간에 따라 일정하다고 가정한 A1과 A3 보다 예측력이 높았다.

A5를 이용해서 예측한 2001년부터 2014년 전국 시군구 단위의 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 예측값의 평균은 2001년에 29.66 μg/m^3에서 2014년에 24.99 μg/m^3으로 감소하는 경향을 나타냈다(그림 5). 서울과 경기도 및 광역시에서 $PM_{2.5}$ 연평균 농도 예측값이 높게 나타났고, 2005년을 제외하고 대부분의 지역에서 매년 감소하는 경향을 예측값 지도에서 확인할 수 있었다.

4. 고 찰

본 연구는 전국규모 $PM_{2.5}$ 자료가 이용가능해진 2015년 이전 기간인 2001년부터 2014년까지의 전국 시군구 단위 $PM_{2.5}$ 연평균 농도를 예측하기 위해, 2001년부터 2014년 서울과 2015년 전국의 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 대기오염측정망 측정 자료를 바탕으로 계산한 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 이용하였다. 이때 비율의 시공간적인 변화를 고려하고자, 시간과 공간에 따라 일관된 비율부터 보정을 통해 변화를 반영한 비율까지 5가지 다른 예측 방법을 비교하였다. 예측력의 비교 결과, $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율의 시공간적인 분포의 차이를 가정한 방법에서 예측력이 가장 높은 것을 확인할 수 있었다.

4.1 예측 방법의 기존 연구와 예측력 비교

본 연구에서 시공간적으로 보정된 비율을 이용한 $PM_{2.5}$ 예측 방법의 결정계수는 79%로 $PM_{2.5}$ 예측 모형에 대한 기존 연구 결과와 비슷하거나 더 높은 예측력을 보여주었다. 미국 전역의 100개가 넘는 대도시통계지역(metropolitan statistical area, MSA)에서 측정값을 통해서 산출한 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 $PM_{2.5}$ 예측에 이용한 Lall *et al.* (2004)의 연구에서는 결정계수가 0.43으로 낮았다. 이러한 결과는 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 직접 산출한 기간(1987~2000)보다 이전(1979~1983)의 $PM_{2.5}$ 측정값을 이용하여 비율 예측 방법을 검증했기 때문일 수 있다. 미국 동부 및 중서부에서 $PM_{2.5}$ 예측 모형을 개발한 연구는 본 연구와 유사한 방법으로 PM_{10} 예측농도에 비율을 곱한 $PM_{2.5}$ 예측 모형을 이용하였고 교차검증(cross-vali-

dated)의 결정계수가 0.69로 높았다(Yanosky *et al.*, 2009). 한편, 본 연구 결과는 비율을 사용하지 않고 시공간 통계 모형을 이용한 연구와도 유사한 정도의 예측력을 보였다. Kim *et al.* (2017c)의 연구에서는 미국 전역에서 지리 변수를 이용하여 개발된 시공간 통계 모형을 이용해서 0.84~0.91의 높은 예측력을 보였다. 이와 비슷하게 미국 캘리포니아에서 PM_{10} 측정값과 다양한 시공간 변수를 이용하여 시공간 통계 모형을 개발한 연구에서도 모형의 결정계수가 0.81로 높게 나타났다(Li *et al.*, 2017). 일반적으로 비율을 직접적으로 이용한 연구보다 다양한 변수를 포함하는 통계 모형을 이용한 연구에서 예측력이 높았으나, 비율을 이용한 본 연구에서는 비율을 이용하지 않은 연구 방법과 유사한 예측력을 보였다. 이러한 결과는 본 연구에서 비율의 시공간 보정을 추가해, 비율을 이용하는 단순한 예측법을 최대한 효과적으로 적용하고 있음을 의미한다.

본 연구에서는 기존연구에서 흔히 사용한 교차검증에 비해 보수적인 외부타당성 검증을 이용해서 높은 설명력을 보였다. 모형구축에 이용한 자료를 모형 검증에 이용하는 교차검증은, 자료가 부족한 상태에서 예측력을 검증하는 장점이 있다. 반면 모형구축에 이용하지 않은 자료를 이용하는 외부타당성 검증에 비해 예측력을 과대 추정할 위험이 있다(Wang *et al.*, 2012). 본 연구 결과에서는 모형구축에 사용하지 않은 부산광역시에서의 2011년부터 2014년까지의 $PM_{2.5}$ 측정값을 검증에 이용함으로써 이러한 과대추정의 위험을 방지하고자 하였다. 그러나 4년간 9개 측정소의 자료로 본 연구에서의 예측기간(2001~2014년)인 14년보다 짧고 최근 자료이기 때문에 높은 예측력에 영향을 미쳤을 수도 있다. 반면, 5가지 농도 예측 방법의 차이에서 보이는 일관된 결과는 과대추정의 낮은 가능성을 시사한다.

4.2 $PM_{2.5}$의 시간에 따른 공간적 분포 의의

$PM_{2.5}$가 건강에 미치는 악영향에 대한 역학적인 연구 결과가 많이 축적되어 온 가운데, $PM_{2.5}$의 대규모 공간적인 측정이 상대적으로 늦게 시작된 점은 코호트 연구의 주요한 제한점 중 하나로 지적되었다. 그동안의 많은 역학연구에서는 측정된 시기 동안 $PM_{2.5}$의 공간적인 분포가 측정되지 않은 과거 시기의 분포와 동일하다는 가정 하에, 코호트 수집 시기 후의 $PM_{2.5}$를 적용해 왔다(Beelen *et al.*, 2014; Weichenthal *et al.*, 2014). 그러나 이러한 연구의 결과는 측정오차가 건강영향 분석에 미치는 영향을 배제하기 어렵다. 특히, 우리나라와 같이 단기간 동안 극대화된 경제개발로 인해 광범위한 도시환경 변화를 경험한 지역에서는 측정오차의 영향이 클 수 있다. 본 연구 결과에서 보인 2001~2014년 서울지역의 $PM_{2.5}$와 PM_{10} 비율의 변화에 비해 지역적인 비율의 큰 차이와 지역적인 분포를 무시한 예측 방법의 낮은 설명력 또한 공간적인 변화의 고려해야 할 필요성을 나타낸다.

4.3 본 연구의 제한점과 향후 연구를 위한 제안점

본 연구는 몇 가지 제한점을 갖고 있고 이는 앞으로의 연구에서 발전시키고 보완해야 할 필요성이 있다. 가장 큰 제한점은 시공간적으로 대표성을 갖기에 제한점이 큰 $PM_{2.5}$ 측정 자료를 이용한 것이다. $PM_{2.5}$의 2015년 전국 단위 97개 측정소 측정값은 여전히 전국 250여 개 시군구를 대표하는 공간 범위를 갖기에는 측정소 수가 매우 부족하고 분포가 고르지 않았다. 이러한 자료의 한계는 A1과 비교하여 A3에서 공간에 대한 비율 분포의 차이를 포함하였음에도 불구하고 약간이지만 예측력이 감소하는 결과에서 확인할 수 있다. 그러나 본 연구에서 시공간에 대해 확대된 보정이 예측력을 증가시키는 결과에서 보이듯이, 이와 같은 제한점은 향후 연구에서 추가된 측정소의 최근 자료를 추가함으로써 향상될 수 있을 것으로 기대된다. 또한, 요즘 널리 사용되는 인공위성을 이용한 원격 탐사 자료와 같은 외부 자료를 이용하여 $PM_{2.5}$ 측정 자료의 한계를 보완할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 지역적인 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율 차이를 보정하고자 시도했으나, 제한된 $PM_{2.5}$ 자료로 지역적인 차이를 반영하기에 제한적이었을 수 있다. $PM_{2.5}$와 PM_{10}은 지역의 배출원과 지리적, 기후적 요

소에 따라서 시공간적으로 다른 분포를 보이고, 따라서 비율 또한 시공간적으로 크게 다를 수 있다(Eeftens *et al*., 2012; Querol *et al*., 2004). 시공간적 보정을 적용한 A5에서 다른 방법들과 비교하여 예측력이 크게 증가한 결과는 본 연구에서 이용한 시공간적 보정 요소가 효율적으로 적용되었음을 보이고 있다. 그러나 2015년 전국단위의 부족한 비율과 2001~2014년 서울에서의 비율만 이용한 본 연구의 농도 예측 방법은 특히 공간에 대한 $PM_{2.5}$ 분포를 예측하기에는 큰 제한점을 갖고 있다. 이러한 제한점은 본 연구에서 개발된 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 이용한 농도 예측 방법에 배출원에 따른 다양한 비율 또는 각 물질의 시공간적 추세를 좀 더 반영할 수 있는 지리적, 기후적 변수를 추가하여 모형의 예측력을 증가시키며 극복할 수 있을 것이다.

5. 결 론

본 연구의 결과는 우리나라의 전국 단위 $PM_{2.5}$ 장기 노출의 건강 영향을 평가를 위해 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 비율을 이용하는 농도 예측 방법의 높은 활용 가능성을 제안한다. 우리나라에서 $PM_{2.5}$ 장기 노출의 건강 영향에 대한 연구는, 최근 표본코호트를 포함해서 전국적으로 사용 가능한 코호트가 확대됨에 따라 연구 기회가 확대되어 왔다. 그러나, 전국규모 $PM_{2.5}$의 2015년 이전 자료 부재로 이러한 연구 기회는 2015년 이전 $PM_{2.5}$ 자료 이용이 가능한 서울지역 연구에 제한되어 왔다(Kim *et al*., 2017a; Kim *et al*., 2016a). 본 연구에서는 비교적 간단하면서도 설명력이 높은 농도 예측 방법을 제시함으로써, 향후 $PM_{2.5}$와 관련된 오염분포, 건강영향 및 질병부담 등에 대한 후속 연구에서 손쉽게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2013년 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(과제번호: 2013R1A6A3A04059017, 2018R1A2B600460)과 국립암센터의 기관고유사업(NCC-1810220-01)의 일환으로 수행되었습니다.

References

Beelen, R., Raaschou-Nielsen, O., Stafoggia, M., Andersen, Z.J., Weinmaryr, G., Hoffmann, B., Wolf, K., Samoli, E., Fischer, P., Nieuwenhuijsen, M., Vineis, P., Xun, W.W., Katsouyanni, K., Dimakopoulou, K., Oudin, A., Forsberg, B., Modig, L., Havulinna, A.S., Lanki, T., Turunen, A., Oftedal, B., Nystad, W., Nafstad, P., De Faire, U., Pedersen, N.L., Östenson, C.G., Fratiglioni, L., Penell, J., Korek, M., Pershagen, G., Eriksen, K.T., Overvad, K., Ellermann, T., Eeftens, M., Peeters, P.H., Meliefste, K., Wang, M., Bueno-de-Mesquita, B., Sugiri, D., Krämer, U., Heinrich, J., de Hoogh, K., Schindler, C., Schikowski, T., Adam, M., Phuleria, H., Vilier, A., Clavel-Chapelon, F., Declercq, C., Grioni, S., Krogh, V., Tsai, M.Y., Ricceri, F., Sacerdote, C., Galassi, C., Migliore, E., Ranzi, A., Cesaroni, G., Badaloni, C., Forastiere, F., Tamayo, I., Amiano, P., Dorronsoro, M., Matsoulis, M., Trichopoulou, A., Brunekreef, B., Hoek, G. (2014) Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project, Lancet, 383(9919), 785-795.

Brauer, M., Freedman, G., Frostad, J., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Dentener, F., van Dingenen, R., Estep, K., Amini, H., Apte, J.S., Balakrishnan, K., Barregard, L., Broday, D., Feigin, V., Ghosh, S., Hpoke, P.K., Knibbs, L.D., Kokubo, Y., Liu, Y., Ma, S., Morawska, L., Sangrador, J.L.T., Shaddick, G., Anderson, H.R., Vos, T., Forouzanfar, M.G., Vurnett, R.T., Cohen, A. (2016) Ambient air pollution exposure estimation for the Global Burden of Disease 2013, Environmental Science & Technology, 50, 79-88.

Burnett, R.T., Brook, J., Dann, T., Delocla, C., Philips, O., Cakmak, S., Vincent, R., Goldberg, M.S., Krewski, D. (2000) Association between particulate- and gas-phase components of urban air pollution and daily mortality in eight Canadian cities, Inhalation Toxicology, 12 (Suppl. 4), 15-39.

Cohen, A., Brauer, M., Burnett, R., Anderson, H.R., Frostad, J., Estep, K., Balakrishnan, K., Brunekreef, B., Dandona,

L., Dandona, R., Feigin, V., Freedman, G., Bubbell, B., Jobling, A., Kan, H., Knibbs, L., Liu, Y., Martin, R., Morawska, L., Pope III, C.A., Shin, H., Straif, K., Shaddick, G., Thomas, M., van Dingenen, R., van Donkelaar, A., Vos, T., Murray, C.J.L., Forouzanfar, M.H. (2017) Estimates and 25-year trends of the global burden of disease attributable to ambient air pollution: an analysis of data from the Global Burden of Diseases Study 2015, Lancet, 389, 1907-18.

Di, Q., Wang, Y., Zanobetti, A., Wang, Y., Koutrakis, P., Choirat, C., Dominici, F., Schwartz, J.D. (2017) Air Pollution and Mortality in the Medicare Population, The New England Journal of Medicine, 376, 2513-2522.

Eeftens, M., Tsai, M.Y., Ampe, C., Anwander, B., Beelen, R., Bellander, T., Cesaroni, G., Cirach, M., Cyrys, J., de Hoogh, K., De Nazelle, A., de Vocht, F., Declercq, C., Dédelé, A., Eriksen, K., Galassi, C., Gražulevičienė, R., Grivas, G., Heinrich, J., Hoomann, B., Iakovides, M., Ineichen, A., Katsouyanni, K., Korek, M., Krämer, U., Kuhlbusch, T., Lanki, T., Madsen, C., Meliefste, K., Mölter, A., Mosler, G., Nieuwenhuijsen, M., Lodenwening, M., Pennanen, A., Probst-Hensch, N., Quass, U., Raaschou-Nielsen, O., Ranzi, A., Stephanou, E., Sugiri, D., Udvardy, O., Vaskövi, É., Weinmayr, G., Brunekreef, B., Hoek, G. (2012) Spatial variation of $PM_{2.5}$, PM_{10}, $PM_{2.5}$ absorbance and PMcoarse concentrations between and within 20 European study areas and the relationship with NO_2 – Results of the ESCAPE project, Atmospheric Environment, 62, 303-317.

Gehring, U., Heinrich, J., Krämer, U., Grote, V., Hochadel, M., Sugiri, D., Kraft, M., Rauchfuss, K., Eberwein, H.G., Wichmann, H.-E. (2006) Long-Term Exposure to Ambient Air Pollution and Cardiopulmonary Mortality in Women, Epidemiology, 17, 545-551.

HKSAR-EPA (2016) Guidelines on the Estimation of $PM_{2.5}$ for Air Quality Assessment in Hong Kong, http://www.epd.gov.hk/epd/english/environmentinhk/air/guide_ref/guide_aqa_model_g5.html (accessed on Sep. 5, 2018).

Hoek, G., Krishnan, R.M., Beelen, R., Peters, A., Ostro, B., Brunekreef, B., Kaufman, J.D. (2013) Long-term air pollution exposure and cardio- respiratory mortality: a review, Environmental Health, 12(1), 43.

Hogrefe, C., Lynn, B., Goldberg, R., Rosenzweig, C., Zalewsky, E., Hao, W., Doraiswamy, P., Civerolo, K., Ku, J.Y., Sistla, G., Kinney, P.L. (2009) A combined model–observation approach to estimate historic gridded fields of $PM_{2.5}$ mass and species concentrations, Atmospheric Environment, 43, 2561-2570.

Hystad, P., Demers, P.A., Johnson, K.C., Brook, J., van Donkelaar, A., Lamsal, L., Martin, R., Brauer, M. (2012) Spatiotemporal air pollution exposure assessment for a Canadian population-based lung cancer case-control study, Environmental Health, 11, 22.

Keller, J.P., Olives, C., Kim, S.Y., Sheppard, L., Sampson, P.D., Szpiro, A.A., Oron, A.P., Lindström, J., Vedal, S., Kaufman, J.D. (2015) A unified spatiotemporal modeling approach for prediction of multiple air pollutants in the Multi--Ethnic Study of Atherosclerosis and Air Pollution. Environmental Health Perspectives, 123(4), 301-309.

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 PM_{10} and NO_2 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.

Kim, H., Kim, J., Kim, S., Kang, S.H., Kim, H.J., Kim, H., Heo, J., Yi, S.M., Kim, K., Youn, T.J., Chae, I.H. (2017a) Cardiovascular Effects of Long-Term Exposure to Air Pollution: A Population-Based Study With 900 845 Person-Years of Follow-up, Journal of the American Heart Association, 6, e007170.

Kim, K.N., Lim, Y.H., Bae, H.J., Kim, M., Jung, K., Hong, Y.C. (2016a) Long-Term Fine Particulate Matter Exposure and Major Depressive Disorder in a Community-Based Urban Cohort, Environmental Health Perspectives, 124(10), 1547-1553.

Kim, O., Kim, S.Y., Kim, H. (2017b) Association between Long-Term Exposure to Particulate Matter Air Pollution and Mortality in a South Korean National Cohort: Comparison across Different Exposure Assessment Approaches, International Journal of Environmental Research and Public Health 14: 1103.

Kim, S.Y., Sheppard, L., Bergen, S., Szpiro, A.A., Sampson, P.D., Kaufman, J.D., Vedal, S. (2016b) Prediction of fine particulate matter chemical components with a spatio-temporal model for the Multi-Ethnic Study of Atherosclerosis cohort, Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology, 26(5), 520-528.

Kim, S.Y., Olives, C., Sheppard, L., Sampson, P.D., Larson, T.V., Keller, J.P., Kaufman, J.D. (2017c) Historical prediction modeling approach for estimating long-term concentrations of $PM_{2.5}$ in cohort studies before the 1999 implementation of widespread monitoring, Environmental Health Perspectives, 125(1), 38-46.

Kim, S.Y., Song, I. (2017) National-scale exposure prediction for long-term concentrations of particulate matter and nitrogen dioxide in South Korea. Environmental Pollution 226, 21-29.

Lall, R., Kendall, M., Ito, K., Thurston, G.D. (2004) Estimation of historical annual $PM_{2.5}$ exposures for health effects assessment, Atmospheric Environment, 38, 5217-5226.

Li, L., Wu, A.H., Cheng, I., Chen, J., Wu, J. (2017) Spatiotemporal estimation of historical $PM_{2.5}$ concentrations using PM_{10}, meteorological variables, and spatial effect, Atmospheric Environment, 166, 182-191.

Lim, S.S., Vos, T., Flaxman, A.D., Danaei, G., Shibuya, K., Adair-Rohani, H., 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., Child, J.C., Cohen, A., Colson, K.E., Cowie, B.C., Darby, S., Darling, S., Davis, A., Degenhardt, 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., 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 III, 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., Khoo, J.P., Kok, C., Laden, F., Lalloo, R., Lan, Q., Lathlean, T., Leasher, J.L., Leigh, J., Li, Y., Lin, J.K., Lipshultz, S.E., London, S., Lozano, R., Lu, Y., Mak, J., Malekzadeh, R., Mallinger, L., Marcenes, W., March, L., Marks, R., Martin, R., McGale, P., McGrath, J., Mehta, S., Mensah, G.A., Merriman, T.R., Micha, R., Michaud, C., Mishra, V., Mohd Hanafiah, K., Mokdad, A.A., Morawska, L., Mozaffarian, D., Murphy, T., Naghavi, M., Neal, B., Nelson, P.K., Nolla, J.M., Norman, R., Olives, C., Omer, S.B., Orchard, J., Osborne, R., Ostro, B., Page, A., Pandey, K.D., Parry. C.D., Passmore, E., Patra, J., Pearce, N., Pelizzari, P.M., Petzold, M., Phillips, M.R., Pope, D., Pope III, C.A., Powles, J., Rao, M., Razavi, H., Rehfuess, E.A., Rehm, J.T., Ritz, B., Rivara, F.P., Roberts, T., Robinson, C., Rodriguez-Portales, J.A., Romieu, I., Room, R., Rosenfeld, L.C., Roy, A., Rushton, L., Salomon, J.A., Sampson, U., Sanchez-Riera, L., Sanman, E., Sapkota, A., Seedat, S., Shi, P., Shield, K., Shivakoti, R., Singh, G.M., Sleet, D.A., Smith, E., Smith, K.R., Stapelberg, N.J., Steenland, K., Stöckl, H., Stovner, L.J., Straif, K., Straney, L., Thurston, G.D., Tran, J.H., Van Dingenen, R., van Donkelaar, A., Veerman, J.L., Vijayakumar, L., Weintraub, R., Weissman, M.M., White, R.A., Whiteford, H., Wiersma, S.T., Wilkinson, J.D., Williams, H.C., Williams, W., Wilson, N., Woolf, A.D., Yip, P., Zielinski, J.M., Lopez, A.D., Murray, C.J., Ezzati, M., AlMazroa, M.A., Memish, Z.A. (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, Lancet, 380(9859), 2224-2260.

Ministry of environment (MOE) (2011) Guidelines for installation and management of national air quality monitoring networks. (in Korean)

Ministry of environment (MOE) (2017) ANNUAL REPORT OF AIR QUALITY IN KOREA 2016. (in Korean)

Ozkaynak, H., Schatz, A.D., Thurston, G.D., Isaacs, R.G., Husar, R.B. (1985) Relationships between aerosol extinction coefficients derived from airport visual range observations and alternative measures of airborne particle mass, Journal of the Air Pollution Control Association, 35, 1176-1185.

Paciorek, C.J., Yanosky, J.D., Puett, R.C., Laden, F., Suh, H.H. (2009) Practical large-scale spatio-temporal modeling of particulate matter concentrations, The Annals of Applied Statistics, 3(1), 370-397.

Querol, X., Alastuey, A., Ruiz, C.R., Artiñano, B., Hansson, A.C., Harrison, R.M., Burningh, E., ten Brink, H.M., Lutz, M., Bruckmann, P., Straehl, P., Schneider, J. (2004) Speciation and origin of PM_{10} and $PM_{2.5}$ in selected European cities, Atmospheric Environment, 38, 6547-6555.

Son, J.Y., Bell, M.L., Lee, J.T. (2011) Survival analysis to estimate the association between long-term exposure to different sizes of airborne particulate matter and risk of infant mortality using a birth cohort in Seoul, Korea, Environmental Health Perspectives, 119(5), 725-730.

Song, C., He, J., Wu, L., Jin, T., Chen, X., Li, R., Ren, P., Zhang, L., Mao, H. (2017) Health burden attributable to ambient $PM_{2.5}$ in China, Environmental Pollution, 223,

575-586.

Song, I., Kim, S.Y. (2016) Estimation of Representative Area-Level Concentrations of Particulate Matter (PM_{10}) in Seoul, Korea, Journal of the Korean Association of Geographic Information Studies, 19(4), 118-129. (in Korean with English abstract)

U.S. Environmental Protection Agency (US EPA) (2009) Integrated Science Assessment (ISA) for Particulate Matter (Final Report, Dec 2009), U.S. Environmental Protection Agency, Washington, DC, EPA/600/R-08/139F, 2009, https://cfpub.epa.gov/ncea/risk/recordisplay.cfm?deid=216546 (accessed on Sep. 5, 2018).

Wang, M., Beelen, R., Eeftens, M., Meliefeste, K., Hoek, G., Brunekreef, B. (2012) Systematic Evaluation of Land Use Regression Models for NO_2, Environmental Science & Technology, 46, 4481-4489.

Weichenthal, S., Villeneuve, P.J., Burnett, R.T., van Donkelaar, A., Martin, R.V., Jones, R.R., DellaValle, C.T., Sandler, D.P., Ward, M.H., Hoppin, J.A. (2014) Long-term exposure to fine particulate matter: association with nonaccidental and cardiovascular mortality in the agricultural health study cohort, Environmental Health Perspectives, 122(6), 609-615.

World Health Organization (WHO) (2003) Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone, and nitrogen dioxide, http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0005/112199/E79097.pdf (accessed on Sep. 5, 2018).

World Health Organization (WHO) (2004) Review of Methods for Monitoring of $PM_{2.5}$ and PM_{10}, http://www.euro.who.int/__data/assets/pdf_file/0020/143156/E85769.pdf?ua=1 (accessed on Sep. 5, 2018).

Yanosky, J.D., Paciorek, C.J., Suh, H.H. (2009) Predicting Chronic Fine and Coarse Particulate Exposures Using Spatiotemporal Models for the Northeastern and Midwestern United States, Environmental Health Perspectives, 117, 522-529.

Yi, S.J., Kim, H., Kim, S.Y. (2016) Exploration and Application of Regulatory PM_{10} 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)

Authors Information

이수현(서울대학교 보건대학원 보건학과 박사과정 연구원)
김옥진(국립암센터 국제암대학원대학교 암관리학과 박사후 연구원)
김선영(국립암센터 국제암대학원대학교 암관리학과 교수)
김 호(서울대학교 보건대학원 보건학과 교수)