Original Article

지역간 상대위험도 변동을 고려한 미세먼지 기인 질병부담 및 사회경제적 비용 추정 연구

변가람¹ , 최용수² , 길준수³ , 차준일³ , 이미혜³ , 이종태^{1,2,4*}

¹고려대학교 정밀보건과학융합전공, ²고려대학교 일반대학원 보건학과, ³고려대학교 지구환경과학과, ⁴고려대학교 보건과학대학 보건정책관리학부

Health and Economic Burden Attributable to Particulate Matter in South Korea: Considering Spatial Variation in Relative Risk

Garam Byun¹, Yongsoo Choi², Junsu Gil³, Junil Cha³, Meehye Lee³, and Jong-Tae Lee^{1,2,4*}

¹Interdisciplinary Program in Precision Public Health, Korea University, ²Department of Public Health Science, Graduate School, Korea University, ³Department of Earth and Environmental Science, Korea University, ⁴School of Health Policy and Management, College of Health Science, Korea University

ABSTRACT

Background: Particulate matter (PM) is one of the leading causes of premature death worldwide. Previous studies in South Korea have applied a relative risk calculated from Western populations when estimating the disease burden attributable to PM. However, the relative risk of PM on health outcomes may not be the same across different countries or regions.

Objectives: This study aimed to estimate the premature deaths and socioeconomic costs attributable to long-term exposure to PM in South Korea. We considered not only the difference in PM concentration between regions, but also the difference in relative risk.

Methods: National monitoring data of PM concentrations was obtained, and missing values were imputed using the AERMOD model and linear regression model. As a surrogate for relative risk, hazard ratios (HRs) of PM for cardiovascular and respiratory mortality were estimated using the National Health Insurance Service-National Sample Cohort. The nation was divided into five areas (metropolitan, central, southern, south-eastern, and Gangwon-do Province regions). The number of PM attributable deaths in 2018 was calculated at the district level. The socioeconomic cost was derived by multiplying the number of deaths and the statistical value of life.

Results: The average PM₁₀ concentration for 2014~2018 was 45.2 µg/m³. The association between long-term exposure to PM₁₀ and mortality was heterogeneous between areas. When applying area-specific HRs, 23,811 premature deaths from cardiovascular and respiratory disease in 2018 were attributable to PM₁₀ (reference level 20 µg/m³). The corresponding socioeconomic cost was about 31 trillion won. These estimated values were higher than that when applying nationwide HRs.

Conclusions: This study is the first research to estimate the premature mortality caused by long-term exposure to PM using relative risks derived from the national population. This study will help precisely identify the national and regional health burden attributed to PM and establish the priorities of air quality policy.

Key words: Particulate matter, premature mortality, relative risk, attributable risk, socioeconomic cost

Received August 18, 2021

Revised September 14, 2021

Accepted September 23, 2021

Highlights:

- The relative risks of PM₁₀ on cardiovascular and respiratory mortality showed heterogeneity between areas in South Korea.
- A total of 23,811 cardiovascular and respiratory deaths and corresponding 31 trillion won were attributable to PM₁₀ in 2018.
- Failure to considering spatial variation in relative risk might result in underestimation of the national health and economic burden from PM.

*Corresponding author:

School of Health Policy and Management,
College of Health Science, 373 B dong,
Hana Science Hall, Korea University, 145
Anam-ro, Seongbuk-gu, Seoul 02841,
Republic of Korea
Tel: +82-2-940-2770
Fax: +82-2-921-7361
E-mail: jtlee@korea.ac.kr

I. 서 론

미세먼지는 오늘날 전 세계적으로 가장 큰 환경문제 중 하나로서, 심혈관계 질환, 호흡기계 질환, 폐암 등의 다양한 질환 및 그로 인한 조기 사망과 연관이 있는 것으로 알려져 있다.¹⁻⁴⁾ 2015년 Global Burden of Disease (GBD) 연구에서는 실외 대기오염(초미세먼지, $PM_{2.5}$)으로 인한 조기사망이 전 세계적으로 약 4.2백만 명에 달하는 것으로 보고하였으며, 한국의 경우에는 18,200명의 조기사망이 발생한 것으로 추정되었다.⁵⁾ 그런데 이러한 국제적인 수준의 연구에서는 국가 내 세부 지역 별 정보를 얻는 데 한계가 있음에 따라 국내에서도 미세먼지로 인한 질병 부담을 파악하고자 하는 연구들이 진행된 바 있다. 한국환경정책·평가연구원에서 수도권을 대상으로 분석한 결과 30세 이상에서 $PM_{2.5}$ 로 인한 초과사망자가 2015년 7,852명인 것으로 나타났다.⁶⁾ Han et al. (2018),⁷⁾ Kim et al. (2018)⁸⁾의 연구에서는 전국 지역별 자료를 활용하여 분석한 결과 $PM_{2.5}$ 로 인한 초과사망자가 각각 2015년 기준 11,924명, 2013년 기준 17,224명인 것으로 추정되었다.

미세먼지로 인한 질병부담은 대상 질환에 대한 건강 정보, 미세먼지 농도 정보, 그리고 미세먼지와 건강의 연관성인 상대위험도 정보를 사용하여 산출되는데, 이때 정확한 질병부담을 산출하기 위해 가장 중요한 부분은 상대위험도를 타당하게 추정하는 것이다. 국내에는 미세먼지 장기 노출에 대한 상대위험도를 추정한 연구가 부족함에 따라 앞서 언급한 선행 연구들은 미세먼지로 인한 질병부담을 추정하는 과정에서 미국이나 유럽 위주의 국외 연구들⁹⁻¹¹⁾에서 산출된 상대위험도를 국내 전체 인구집단에 동일하게 적용하였다. 그러나 미세먼지의 상대위험도는 항상 동일하기보다는 국가나 지역에 따라 달라질 수 있다.¹²⁻¹⁴⁾ 즉, 국내와 국외는 미세먼지 구성 성분이나 인구집단 특성이 다를 수 있기 때문에 국외에서 산출된 상대위험도를 국내에 적용할 경우 국내 실정에 맞는 질병부담을 산출하지 못할 수 있다. 또한 국가 내에서도 상대위험도의 변동이 고려되지 않을 경우 지역 간 미세먼지 기인 질병부담의 차이를 제대로 평가하지 못할 수 있다.

미세먼지로 인한 질병부담 연구 결과는 국가 전반의 피해수준을 파악할 수 있는데 사용할 수 있을 뿐만 아니라, 이러한 피해 수준이 집단별로 어떻게 다른지 살펴봄으로써 취약집단을 규명하고 정책적 우선순위를 설정하는 데 활용될 수 있다는 점에서 공중보건학적으로 중요한 의미를 가진다. 따라서 본 연구는 지역별 미세먼지 기인 질병부담을 보다 타당하게 산출하기 위해 미세먼지 농도 변동뿐만 아니라 상대위험도의 변동을 함께 고려하는 연구를 수행하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 먼저 미세먼지 장기 노출과 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환으로 인한 사망의 연관성이 지역에 따라 어떻게 달라지는 지 평가하였다. 이후 지역별로 미세먼지 장기 노출에 기인한 초과 사

망자수를 산출하고 그에 따른 사회경제적 비용을 추정하였다.

II. 재료 및 방법

1. 연구 대상 및 지역

본 연구에서는 미세먼지 장기 노출과 사망의 연관성을 평가하기 위해 국민건강보험공단 표본코호트DB를 활용하였다. 표본코호트2.0 DB는 2006년 기준으로 건강보험 자격대상자 100만 명(전 국민의 약 2%)을 표본 추출하여 생성된 자료로, 2002~2015년의 전향 및 후향적 정보를 제공한다.¹⁵⁾ 개인의 사망 정보는 통계청의 사망원인통계자료와 연계되어 제공되는데, 2006년을 기준으로 표본추출 하였기 때문에 사망자는 2007년부터 발생하게 된다. 사망 정보가 연계되지 않은 대상자는 추적이 끝나는 2015년까지 생존해 있는 것으로 처리하였다. 분석 대상 사망 원인으로서는 심혈관계 질환(한국표준질병·사인분류 코드[KCD] I00-I52)과 호흡기계 질환(KCD J00-J99)을 선정하였다.

본 연구는 우리나라 전국을 대상으로 하지만, 표본코호트DB 관찰 기간인 2002년에서 2015년 사이에 시군구 수준에서 행정구역이 분할되거나(예: 고양시 일산구가 고양시 일산동구와 일산서구로 분할) 신설되는 경우에는(예: 세종특별자치시) 전 기간에 대해 미세먼지 농도를 할당할 수 없었다. 이에 따라 총 18개 시군구(세종특별자치시; 경기도 고양시 일산동구, 고양시 일산서구, 용인시 처인구, 용인시 기흥구, 용인시 수지구; 충청북도 청주시 상당구, 청주시 서원구, 청주시 흥덕구, 청주시 청원구; 충청남도 천안시 동남구, 천안시 서북구, 공주시; 경상남도 창원시 의창구, 창원시 성산구, 창원시 마산합포구, 창원시 마산회원구, 창원시 진해구)를 연관성 평가 분석 대상에서 제외하였다.

표본코호트DB 대상자 중 분석 대상자는 2006년을 기준으로 연관성 평가 대상 지역에 거주하는 사람들로 한정하였다. 2006년 이후 거주지가 분석 대상 지역을 벗어난 사람들은 해당 시점을 기준으로 중도 절단(censoring)된 것으로 처리하였다. 또한 아래 3. 보정 변수에 기술된 정보가 없는 사람들은 분석 대상에서 제외하였다. 최종 분석 대상자는 총 521,282명이었다.

2. 미세먼지 노출 평가

미세먼지 농도 자료는 2002년~2018년 국립환경과학원의 도시대기 측정망에서 1시간 단위로 측정된 자료를 수집하였으며, 표본코호트를 활용한 연관성 평가 시에는 2002년부터 2015년까지의 자료를 활용하였다. 단, $PM_{2.5}$ 는 전국적으로 측정이 시작된 시점이 2015년부터임에 따라 타당한 노출평가가 이루어지기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 미세먼지와 사망의 연관성을 평가하는 데 PM_{10} 만을 대상으로 하였다. 시간별

미세먼지 농도 자료는 24시간 평균내어 일평균값을 산출하였으며, 24시간 중 75% 이상이 확보되지 않으면 해당 날짜의 일평균값은 결측값으로 처리하였다. 하나의 시군구 내 여러 개의 대기오염 측정소가 있을 경우 해당 측정소 내 측정값들은 모두 평균내어 시군구별 일별 대푯값을 산출하였다.

2018년 기준 전국 시군구는 총 250개로, 이 중 연구 기간 내 도시대기 측정망이 적어도 한 곳 이상 존재하는 시군구는 총 213개(85%)였으며, PM_{10} 결측 비율은 평균적으로 서울 6.6%, 광역시 30.1%, 비광역시 63.3%였다. 대기오염 측정망이 존재하지 않거나, 1분기 이상의 장기 결측이 존재하는 지역(시군구)은 공백지역으로 구분하여 AMS/EPA Regulatory Model (AERMOD)을 활용해 결측된 미세먼지 농도를 추정하였다. AERMOD 모델을 활용한 공백지역의 미세먼지 결측 자료 추정 시, 인근 측정소의 측정값을 배출원으로 가정하여 매 3시간 간격으로 확산과정을 모델링하여 타겟으로 하는 공백지역의 미세먼지 농도를 추정하였다. 이때 공백지역은 인접한 지역의 자료가 존재하는 인접 공백지역(1단계)과 자료가 존재하지 않는 비 인접 공백지역(2단계)로 구분하였다. 1단계 지역은 인접 지역의 자료를 활용하여 AERMOD 모델을 사용하였으며, 2단계 지역의 미세먼지 결측 자료 추정 시, 1단계 지역의 자료 보완을 먼저 수행한 후 이를 AERMOD 모델에 활용하여 결측 자료 추정을 진행하였다. 서울 내 1개 시군구(성북구), 광역시 내 1개 시군구(부산시 해운대구), 그리고 비광역시 내 1개 시군구(강원도 강릉시)를 대상으로 모델 추정값과 실제 측정값의 비교를 수행한 결과 부분편향 절댓값은 0.25보다 작았으며, 평균 편향 오차는 $0.0\sim 9.5 \mu g/m^3$ 였다.

1분기 이하의 단기 결측이 존재하는 지역은 선형 회귀 모델을 사용하여 결측 자료를 보완하였다. 전체 자료 기간(2002~2018)동안 각 지역(시군구)의 월별 일 평균 profile을 생성하고, 연도별 월 평균값의 변화를 선형 회귀 모델로 모사하여 각 지역의 월별 선형 회귀 계수를 산출하였다. 이를 통해 단기 결측 기간 내 일 평균 미세먼지 농도를 추정하였다. 전국 모든 시군구 지역을 대상으로 선형 회귀 모델의 결과를 실제 측정값과 비교하였을 때, 평균절대오차는 $1.8\sim 36.0 \mu g/m^3$ 이었고, 피어슨상관계수는 $0.16\sim 0.99$ 이었다.

결측 처리된 시군구별 일별 미세먼지 농도는 시군구별 연도별로 다시 평균내어 표본코호트 연구 대상자의 기준연도와 거주지를 기준으로 연계하였다. 이후 각 대상자별로 2006년에서 2015년까지 5년 이동평균(Moving average)을 산출하여 미세먼지 장기 노출값으로 할당하였다.

3. 보정 변수

개인 수준 보정 변수로는 표본코호트DB의 자격DB에서 제공하는 성(남성, 여성), 연령(30세 미만, 30~44세, 45~64세, 65세 이상), 소득수준(보험료 0~2분위, 3~5분위, 6~8분위,

9~10분위)과 건강검진DB에서 제공하는 흡연(비흡연, 과거흡연, 현재흡연), 음주(거의 마시지 않음, 월 2~3회 마심, 일주일에 1회 이상 마심), 체질량지수(Body mass index, BMI: $\leq 18.5 \text{ kg/m}^2$, $18.6\sim 22.9 \text{ kg/m}^2$, $23\sim 24.9 \text{ kg/m}^2$, $\geq 25 \text{ kg/m}^2$), 신체활동(안함, 일주일에 1회 이상) 변수를 포함하였다. 건강검진 자료는 2009년 건강검진 체계 개편으로 인해 2002~2008년과 2009~2015년 사이에 검사 항목 및 변수 범주에 다소 차이가 있음에 따라 두 기간에서 변수 범주가 다르게 조사된 경우 통일된 범주로 변환하여 사용하였다. 또한 개인별로 2006~2015년 사이의 첫 번째 건강검진자료만을 활용하였다.

개인 수준 변수와 함께 지역의 환경적, 사회경제적 특성을 반영하는 변수들을 선정하여 보정변수로 활용하였다. 시군구별 녹지 수준에 대한 지표로써 정규식생지수(Normalized Difference Vegetation Index, NDVI)를 활용하였다. 미국항공우주국 NASA (National Aeronautics and Space Administration)의 Terra 위성에 탑재된 센서인 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer)의 위성영상을 활용하여 각 픽셀의 NDVI값 중 양수인 값들을 시군구별로 평균 낸 후, 매년 5월부터 10월까지의 기간 내에서 중앙값을 산출하였다. 시군구별 인구밀도, 65세 이상 인구 비율과 시도별 기초생활수급자 비율은 국가통계포털 자료에서 산출하였다. 25세 이상 65세 미만 인구 중 고등학교 졸업 미만 인구 비율은 통계청 인구총조사 자료(2010년, 2015년)를 활용하여 산출하였다. 시군구별 의료인프라 현황을 파악하기 위하여 통계청 시도별 기본통계를 활용하여 인구 100,000명당 의료인력 수, 병원 수, 병상 수를 표준화한 값을 합한 의료지수를 산출하여 사용하였다. 각 지역 특성 변수들은 2006년~2015년 사이의 연도별 값을 모두 평균내어 각 시군구별로 단일 대푯값을 산출하여 사용하였다.

4. 미세먼지와 사망의 연관성 분석

미세먼지의 장기 노출과 사망의 연관성은 콕스 비례위험모형(Cox proportional hazards model)을 통해 평가하였다. 미세먼지 농도는 시간에 따라 달라지는(Time-dependent) 변수로 처리하였다. 기저위험함수(Baseline hazard function)는 성과 연령에 따라 층화 하였으며, 3. 보정변수에 기술된 모든 개인 및 지역 수준 변수들을 보정하였다. 모형의 비례위험가정(Proportional hazard assumption)은 Scaled Schoenfeld residuals를 기반으로 평가하였다.

지역간 미세먼지와 사망의 연관성의 차이를 평가하기 위해 환경부에서 지정한 대기관리권역 구분을 기반으로 총 5개 권역으로 지역을 구분하였다(1. 수도권-서울특별시, 인천광역시, 경기도 2. 중부권-대전광역시, 충청남도, 충청북도, 전라북도 3. 남부권-광주광역시, 전라남도, 제주도 4. 동남권-부산광역시, 대구광역시, 울산광역시, 경상북도, 경상남도 5. 강원권-강원도). 이후 자료를 각 권역별로 층화하여 각 층별 미세먼지와

사망의 연관성을 평가하였다.

5. 미세먼지 기인 초과 사망자수 및 사회경제적 비용 추정

본 연구에서는 같은 지역(시군구)에 거주하는 인구집단은 모두 같은 수준의 농도에 노출된다고 가정하였다. 따라서 다음의 공식에 따라 2018년을 기준으로 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환 사망에 대한 미세먼지 장기 노출의 기여 분율을 산출하였다.

$$AF_s = \frac{RR_s^{x_s-c} - 1}{RR_s^{x_s-c}} \quad (1)$$

AF_s =시군구 s에서 미세먼지 기여 분율

RR_s =시군구 s에서 미세먼지 농도 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 당 상대위험도

x_s =시군구 s에서의 실제 농도

c =기준 농도

미세먼지 상대 위험도는 앞서 연관성 분석 단계에서 산출된 위험비(Hazard ratio, HR)를 활용하였다. HR은 종속 변수 발생 확률이 낮을 경우 상대위험도(relative risk, RR)와 유사한 값을 가지는 것으로 알려져 있다.¹⁶⁾ 전국을 대상으로 산출된 상대위험도를 사용하는 경우에는 모든 시군구가 동일하게 해당 상대위험도를 가지는 것으로 할당하였으며, 권역별로 산출된 상대위험도를 사용하는 경우에는 각 권역 내에 포함된 시군구가 동일한 값을 가지도록 할당하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 의 경우 노출자료의 한계로 사망과의 연관성을 분석하지 못함에 따라 PM_{10} 에서 산출된 상대위험도와 동일 할 것으로 가정하였다. 일반적으로 같은 단위 농도 증가 당 PM_{10} 에 비해 $\text{PM}_{2.5}$ 가 건강 위험도 증가와 더 큰 연관성이 있는 것으로 알려져 있기 때문에,¹⁷⁾ 이는 보수적인 가정에 기반한다고 할 수 있다.

본 연구에서 미세먼지 장기 노출과 사망의 연관성 추정 시 5년 이동평균을 노출값으로 활용하였기 때문에 PM_{10} 에 대해서는 2018년 실제 농도를 해당 연도를 포함한 이전 5년 동안의 평균값(2014~2018년 평균)으로 설정하였다. $\text{PM}_{2.5}$ 는 자료가 가용한 2015~2018년 평균값을 실제 농도로 설정하였다. 기준 농도는 WHO 연평균 권고기준에 따라 PM_{10} 은 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 는 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정하였다.

최종적으로 미세먼지 장기 노출로 인한 초과 사망자수는 2018년 시군구별 전체 사망자 수에 미세먼지 기여 분율을 곱하여 산출하였다. 심혈관질환 및 호흡기계 질환으로 인한 전체 사망자 수는 통계청 사망원인통계에서 산출하였다. 미세먼지로 인한 사회경제적 비용은 미세먼지 기인 초과사망자수에 1인당 통계적인간생명가치를 곱하여 추정하였다. 통계적인간생명가

치로는 신영철 외(2017)¹⁸⁾의 연구에서 지불의사접근법을 기반으로 한 연구들의 메타회귀분석을 통해 도출된 13억 3,300만 원을 적용하였다.

III. 결 과

미세먼지 장기 노출과 사망의 연관성 평가를 위한 연구 대상자는 총 512,282명으로, 심혈관계 질환 사망자수는 1,636명, 호흡기계 질환 사망자수는 1,162명이었다(Table 1). 연구 대상자의 기타 특성별 분포는 Table 1에 나타내었다.

미세먼지 장기 노출과 사망의 연관성 평가 결과는 Table 2에 제시하였다. 전국을 대상으로 분석한 결과 PM_{10} 농도 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 당 심혈관계 질환 사망에 대한 위험비는 1.088 (95%

Table 1. Characteristics of the study subjects in the NHIS-NSC

Characteristics		n (%)
Total		521,282 (100.00)
Cause of death	Cardiovascular disease	1,636 (0.31)
	Respiratory disease	1,162 (0.22)
Sex	Male	261,375 (50.14)
	Female	259,907 (49.86)
Age (years)	≤29	174,493 (33.47)
	30~44	174,493 (33.47)
	45~64	180,120 (34.55)
	≥65	47,901 (9.19)
Income	0th to 2nd decile	83,580 (16.03)
	3rd to 5th decile	137,827 (26.44)
	6th to 8th decile	166,997 (32.04)
	9th to 10th decile	132,878 (25.49)
Smoking status	Never	337,830 (64.81)
	Former	50,110 (9.61)
	Current	133,342 (25.58)
Drinking frequency	(almost) None	268,680 (51.54)
	2~3 times a month	107,428 (20.61)
	≥Once in a week	145,174 (27.85)
Body mass index (kg/m ²)	≤18.5	23,584 (4.52)
	18.6~22.9	211,478 (40.57)
	23~24.9	120,858 (23.18)
	≥25	165,362 (31.72)
Physical activity	No	277,231 (53.18)
	Yes	244,051 (46.82)
Residential area	Metropolitan region	254,365 (48.80)
	Central region	62,020 (11.90)
	Southern region	44,580 (8.55)
	South-eastern region	143,169 (27.46)
	Gangwon region	17,148 (3.29)

CI: 1.007, 1.177), 호흡기계 질환에 대한 HR은 1.105 (95% CI: 1.008, 1.211)로 추정되었다. 권역별 층화 분석을 수행한 결과, 수도권에서 심혈관계 질환 사망에 대한 HR은 1.244

Table 2. Hazard Ratios* (95% CI) for mortality per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase of PM_{10} by area

Area	Cause of death	
	Cardiovascular disease	Respiratory disease
Nationwide	1.088 (1.007, 1.177)	1.105 (1.008, 1.211)
Metropolitan region	1.244 (1.041, 1.487)	1.166 (0.943, 1.440)
Central region	1.211 (0.952, 1.540)	1.466 (1.125, 1.912)
Southern region	0.840 (0.511, 1.382)	0.905 (0.524, 1.561)
South-eastern region	1.053 (0.927, 1.195)	1.171 (0.993, 1.382)
Gangwon region	1.136 (0.739, 1.746)	1.118 (0.705, 1.774)

*Adjusted for sex, age, income level, smoking, drinking, body mass index, physical activity, normalized difference vegetation index, population density, population of the elderly, proportion of people with no high school diploma, proportion of basic livelihood security recipients, and medical index.

(95% CI: 1.041, 1.487)로 다른 권역에 비해 높았다. 반면 호흡기계 질환 사망의 경우 중부권에서 HR이 1.466 (95% CI: 1.125, 1.912)으로 가장 높았다. 남부권에서는 PM_{10} 과 사망의 연관성이 심혈관계 질환과 호흡기계 질환 모두에서 낮게 관찰되었다.

2014년~2018년 전국 평균 PM_{10} 농도는 $45.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 농도는 $24.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었다. Fig. 1은 전국 시군구 단위의 PM_{10} 및 $\text{PM}_{2.5}$ 농도 분포를 보여준다. 수도권과 중부권에서 다른 지역에 비해 미세먼지 농도가 높은 것으로 나타났다.

전국을 대상으로 2018년 기준 미세먼지 장기 노출로 인한 사망 기여 분율 및 기여 사망자수를 추정한 결과는 Table 3과 같다. 전국에 대해 동일한 상대위험도(RR)를 적용하였을 때에는 미세먼지 기여 분율이 10~20% 수준이었으며, 심혈관계 질환 사망 중 PM_{10} 장기 노출로 인한 기여 사망자 수는 7,397명 (95% CI: 677명, 12,870명), 호흡기계 질환 사망 중 PM_{10} 장기 노출로 인한 기여 사망자 수는 8,380명(95% CI: 715명, 14,398명) 이었다. 권역별 상대위험도를 적용하였을 때에는 사망에 대한 미세먼지 기여 분율 및 기여 사망자수가 전반적으로 더 크게 추정되었다. 기여 분율은 20~30% 수준이었으며, 심혈

Fig. 1. Mean concentration of PM_{10} (A) and $\text{PM}_{2.5}$ (B) for 2014~2018 in South Korea

Table 3. PM attributable fraction and number of deaths using the nationwide or area-specific relative risks

Relative risk	Cause of death	Attributable fraction (95% CI)		Attributable number of deaths (95% CI)	
		PM ₁₀	PM _{2.5}	PM ₁₀	PM _{2.5}
Nationwide	Cardiovascular disease	0.192 (0.018, 0.334)	0.119 (0.010, 0.214)	7,397 (677, 12,870)	4,462 (392, 8,074)
	Respiratory disease	0.221 (0.019, 0.380)	0.138 (0.011, 0.247)	8,380 (715, 14,398)	5,142 (418, 9,239)
Area specific	Cardiovascular disease	0.275 (0.032, 0.551)	0.177 (0.019, 0.389)	10,902 (1,565, 20,793)	6,900 (905, 14,302)
	Respiratory disease	0.349 (0.056, 0.640)	0.230 (0.036, 0.464)	12,979 (1,855, 23,904)	8,421 (1,169, 17,029)

Fig. 2. Spatial distribution of PM₁₀ attributable fraction and number of deaths for cardiovascular mortality in 2018 using the nationwide (A1, A2) or area specific (B1, B2) relative risks

관계 질환에 대한 PM_{10} 기여 사망자 수는 10,902명(95% CI: 1,565명, 20,793명), 호흡기계 질환에 대한 PM_{10} 기여 사망자 수는 12,979명(95% CI: 1,855명, 23,904명) 이었다.

Fig. 2와 3에는 각각 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환 사망에 대한 PM_{10} 기여 분율 및 기여 사망자수의 지역별 분포를 나타내었다. 심혈관계 질환 사망의 경우 전국 동일 상대위험도를 적용하였을 때 보다 권역별 상대위험도를 적용하였을 때 수도권

에서의 기여 분율 및 기여 사망자수가 더욱 높아졌다. 호흡기계 질환 사망은 전국 동일 상대위험도를 적용하였을 때 보다 권역별 상대위험도를 적용하였을 때 중부권에서의 기여 분율 및 기여 사망자수가 높아지는 것으로 나타났다.

미세먼지로 인한 초과사망에 대한 사회경제적 비용은 Table 4와 같이 산출되었다. 권역별 상대위험도를 사용했을 때를 기준으로, PM_{10} 기인 심혈관계 질환 초과 사망으로 인한 사회경

Fig. 3. Spatial distribution of PM_{10} attributable fraction and number of deaths for respiratory mortality in 2018 using the nationwide (A1, A2) or area specific (B1, B2) relative risks

Table 4. Socioeconomic costs of premature deaths attributable to PM (billion won)

Relative risk	Cause of death	Attributable cost (95% CI)	
		PM ₁₀	PM _{2.5}
Nationwide	Cardiovascular disease	9,860 (903, 17,156)	5,948 (522, 10,762)
	Respiratory disease	11,171 (954, 19,193)	6,854 (558, 12,315)
Area specific	Cardiovascular disease	14,533 (2,086, 27,717)	9,198 (1,207, 19,064)
	Respiratory disease	17,300 (2,472, 31,864)	11,225 (1,558, 22,700)

제적 비용은 약 14조 5천억원, 호흡기계 질환 초과 사망으로 인한 사회경제적 비용은 약 17조 3천억원으로, 심혈관계 질환 사망과 호흡기계 질환 사망을 합쳐 총 약 31조 8천억원으로 추정되었다.

IV. 고 찰

본 연구는 국내에서 대표성 있는 표본 자료를 활용하여 미세먼지와 사망의 연관성을 평가하고, 이를 기반으로 미세먼지 기인 초과 사망자수와 그로 인한 사회경제적 비용을 추정하였다.

국내 인구집단을 대상으로 한 분석 결과 미세먼지(PM₁₀) 장기 노출은 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환으로 인한 사망 위험의 증가와 통계적으로 유의한 연관성이 있는 것으로 나타났다. 최근 발표된 PM_{2.5} 장기 노출과 사망에 대한 체계적 문헌 고찰 및 메타 분석 연구 결과에 따르면 PM_{2.5} 농도 10 µg/m³ 증가당 요약(summary) 상대위험도 추정치는 순환기계 질환 사망의 경우 1.11 (95% CI: 1.09, 1.14), 호흡기계 질환의 경우 1.10 (95% CI: 1.03, 1.18) 이었다.¹⁹⁾ 단 메타분석에 포함된 연구들 간 이질성이 크게 나타나, 연구 지역이나 인구집단 특성에 따라 미세먼지의 건강영향이 달라질 수 있음을 시사하였다. 본 연구에서 추정된 미세먼지 장기 노출에 대한 상대위험도는 국제 메타분석 연구 결과와 비교적 일관된 경향을 보이고 있으며, 국내 미세먼지 및 인구집단의 특성을 반영하고 있을 것으로 기대된다.

본 연구에서는 지역별로 미세먼지 장기 노출과 사망 간 연관성의 크기가 다른 것으로 평가되었다. 이는 국내 전국 수준에서 미세먼지 장기 노출의 건강영향에 대한 이질성을 보고한 첫 사례라고 할 수 있다. 지역 간 미세먼지 건강영향 이질성의 원인으로서는 미세먼지 구성성분의 차이, 인구집단 취약성, 사회경제적 환경 등이 있을 수 있으며, 추후 연구에서는 이러한 지역 간 이질성의 원인에 대해 심층적으로 분석할 필요가 있다. 미세먼지 구성성분과 관련해서는 건강 피해가 높은 성분을 규명하고, 지역별로 해당 성분의 농도 또는 해당 성분과 연관된 주요 배출원의 분포를 파악해야 한다. 미세먼지 구성성분 및 배출원에 따른 건강영향 차이에 대한 연구는 미세먼지 양적 관리를 넘어 질적 관리를 위한 근거를 제시할 수 있다. 어떠한 인구

집단 및 지역 특성이 미세먼지 취약성과 연관 되어있는지 확인하는 연구 또한 필요하다. 기존 국내 7개 도시를 대상으로 국민 건강영양조사-사망원인통계 연계자료를 활용하여 대기오염 장기 노출과 사망의 연관성을 분석한 연구에서는 박탈 수준이 낮은 지역에서 박탈 수준이 높은 지역에 비해 미세먼지 장기 노출에 취약한 것으로 보고되었다.²⁰⁾

본 연구에서 권역별로 다른 상대위험도를 사용하였을 때 전국 단위로 동일한 상대위험도를 사용하였을 때 보다 전국 미세먼지 기인 초과 사망자 수가 더 크게 추정되었다. 이는 사망에 대한 미세먼지 상대위험도가 높은 수도권 및 중부권에서 미세먼지 농도나 사망자 수 또한 높기 때문이다. 즉 국내에서 미세먼지 기인 초과 사망자 수를 추정하는 데 있어 지역 간 농도 차이만을 고려하고 상대위험도의 차이를 고려하지 못한다면 전체 미세먼지 기인 초과 사망자 수를 과소 추정할 가능성이 있다.

Table 5에서는 미세먼지 장기 노출 기인 초과 사망과 관련하여 본 연구와 주요 선행 연구들의 결과를 비교하였다. 선행 연구들이 대체로 PM_{2.5}에 대한 분석 결과를 제시함에 따라 본 연구 결과 중 PM_{2.5}에 한정하여 비교하였다. 미세먼지 기여 사망자 수를 기준으로 할 때 본 연구 결과는 기존 연구들에서 추정된 결과의 범위를 크게 벗어나지 않은 것으로 확인하였다. 본 연구와 선행 연구들에서 가장 큰 차이점은 상대위험도를 추정하는 방법에 있다. 기존 연구들은 국외의 연구 결과를 활용한 반면, 본 연구에서는 국내의 대표성 있는 표본을 대상으로 산출된 상대위험도를 산출하여 활용하였다. 특히 지역 간 미세먼지 건강영향의 차이를 고려하여 전국에 동일한 상대위험도가 아닌 권역별로 추정된 상대위험도를 사용함에 따라 본 연구 결과는 기존 연구에 비해 국내 인구집단 및 지역적 특성을 반영한 추정치라고 할 수 있다.

그런데 본 연구에서 추정된 PM_{2.5} 기인 초과 사망으로 인한 사회경제적 비용은 총 약 20조 4,229억 원으로, 기존 배현주(2016)⁶⁾의 연구 결과와 비교해 보면 사망자 수의 차이를 감안 하더라도 훨씬 크게 추정된 것을 확인할 수 있다. 이는 본 연구에서는 1인당 통계적 인간생명가치로 13억 3,300만 원을 적용하였고, 배현주(2016)⁶⁾의 연구에서는 신영철(2008)²¹⁾의 연구에서 추정된 4억 700만 원을 적용하였기 때문이다. 본 연구에서 활용한 1인당 통계적 인간생명가치 13억 3,300만 원은 단

Table 5. Comparison between studies of premature death attributable to PM_{2.5}

Study	Region	Cause of death	Source of relative risk	Year	Reference concentration (μg/m ³)	Population	Attributable number of deaths	Socioeconomic cost
Present study	Nationwide	Cardiovascular disease, respiratory disease	South Korean population	2018	10	All	15,321 (7,104 for metropolitan region)	₩ 20.42 trillion (VSL* ₩1.3 billion)
Bae et al. (2016) ⁽⁶⁾	Metropolitan region	Non-accidental causes	US cohort ⁽⁹⁾	2015	10	Over 30	7,852	₩ 3.20 trillion (VSL* ₩ 400 million)
Han et al. (2018) ⁽⁷⁾	Nationwide	Ischemic heart disease, chronic obstructive pulmonary disease, lung cancer, stroke	Integrated exposure-response function ⁽¹⁰⁾	2015	2.4~5.9	All	11,924	-
Kim et al. (2018) ⁽⁸⁾	Nationwide	Lung cancer, ischemic heart disease, ischemic stroke, hemorrhagic stroke	US cohort ⁽¹¹⁾	2013	5.8~8.8	All	17,224	-

*Value of statistical life.

일 연구가 아닌 국내 다수 연구의 결과를 종합한 수치로, 개별 연구가 가지는 불확실성의 한계를 보완한 결과라고 할 수 있다. 국내 통계 13억 3,300만 원은 기존 연구에서 활용한 4억 700만 원에 비해서는 큰 수치이나, 미국 EPA (Environmental Protection Agency)에서 제안하는 통계적 인간생명가치인 7.4백만 달러보다는 낮은 수치였다.²²⁾

본 연구에는 몇 가지 한계점이 존재한다. 첫째, 표본코호트에 서 가용한 개인 수준의 사회경제적 수준에 대한 정보가 소득 수준(보험료)에만 제한됨에 따라 교육, 직업 등 기타 사회경제적 특성을 보정하지 못하였다. 그러나 개인의 생활 습관이나 지역의 사회경제적 수준을 보정함으로써 잠재적 교란효과를 최소화하고자 하였다. 둘째, 미세먼지에 대한 노출평가 시 개인 수준의 노출을 측정하지 못하고 지역(시군구 단위)의 평균 농도를 해당 지역에 거주하는 대상자들에게 일괄적으로 할당하였다. 같은 지역에 거주하더라도 개인의 노출 수준은 외부 활동 패턴 등에 따라 달라질 수 있으며, 이에 따른 노출 측정 오류가 발생하였을 수 있다. 그러나 이렇게 개인이 아닌 지역 수준에서의 평균 노출을 할당함으로써 발생하는 노출 측정 오류는 건강 영향 추정치의 타당도에 크게 영향을 미치지 않으며, 일반적으로 과소추정하게 만드는 경향이 있는 것으로 알려져 있다.²³⁾ 셋째, 전국 PM_{2.5} 농도 자료가 2015년 이후에서만 가용함에 따라 PM_{2.5}와 사망의 연관성을 직접 평가하지 못하였다. 일반적으로 PM_{2.5}는 PM₁₀에 비해 입자의 크기가 작고 독성이 높은 물질로 구성되어있기 때문에 같은 단위 농도 증가 당 건강영향이 더 큰 것으로 알려져 있다.¹⁷⁾ 즉 PM₁₀에 비해 PM_{2.5}의 상대위험도값이 더 클 것으로 기대된다. 본 연구에서는 보수적인 추정을 위해 PM₁₀에서 추정된 상대위험도를 동일하게 PM_{2.5}에 적용하였으며, 따라서 PM_{2.5}에 기인한 실제 질병부담은 본 연구에서 추정된 값 보다 높을 가능성이 있다.

V. 결 론

본 연구는 미세먼지 장기 노출과 사망의 연관성을 평가하고, 이를 기반으로 미세먼지 기인 초과 사망자수 및 사회경제적 비용을 추정하였다. 2018년 기준 미세먼지(PM₁₀) 장기 노출로 인한 심혈관계 질환 및 호흡기계 질환 초과 사망자 수는 23,811명, 이에 따른 사회경제적 비용은 약 31조 8천억 원으로 추정되었다. 본 연구는 기존 국내의 미세먼지 기인 질병부담 추정 연구에서 국외 연구의 미세먼지 상대위험도를 활용한 것과 다르게 국내 인구집단을 대상으로 산출된 미세먼지 상대위험도를 활용하였다. 특히 미세먼지 장기 노출에 대한 건강영향은 지역별로 달라질 수 있으며, 이러한 경우 지역별 특성이 반영된 상대위험도를 적용하여야 타당한 미세먼지 기인 질병부담 추정이 가능함을 시사하였다.

감사의 글

본 연구는 2020년도 질병관리청 미세먼지 기인 질병 대응연구사업 지원으로 수행된 “미세먼지로 인한 질병부담측정 연구” 과제에 연구결과 일부입니다(2020ER670400).

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

References

- Pope CA 3rd, Dockery DW. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect. *J Air Waste Manag Assoc.* 2006; 56(6): 709-742.
- Rückerl R, Schneider A, Breitner S, Cyrys J, Peters A. Health effects of particulate air pollution: a review of epidemiological evidence. *Inhal Toxicol.* 2011; 23(10): 555-592.
- Bae HJ. Effects of short-term exposure to PM₁₀ and PM_{2.5} on mortality in Seoul. *J Environ Health Sci.* 2014; 40(5): 346-354.
- Lee H. Hospital visits, admissions and hospital costs among patients with respiratory and cardiovascular diseases according to particulate matter in Seoul. *J Environ Health Sci.* 2016; 42(5): 324-332.
- Cohen AJ, Brauer M, Burnett R, Anderson HR, Frostad J, Estep K, et al. 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.* 2017; 389(10082): 1907-1918.
- Bae HJ. The health impacts and benefits of cardiovascular and respiratory hospitalization attributed to PM_{2.5}. *Korea Rev Appl Econ.* 2016; 18(3): 125-139.
- Han C, Kim S, Lim YH, Bae HJ, Hong YC. Spatial and temporal trends of number of deaths attributable to ambient PM_{2.5} in the Korea. *J Korean Med Sci.* 2018; 33(30): e193.
- Kim JH, Oh IH, Park JH, Cheong HK. Premature deaths attributable to long-term exposure to ambient fine particulate matter in the Republic of Korea. *J Korean Med Sci.* 2018; 33(37): e251.
- Krewski D, Burnett RT, Goldberg MS, Hoover K, Siemiatycki J, Jerrett M, Abrahamowicz M, White WH. Reanalysis of the Harvard Six Cities Study and the American Cancer Society Study of Particulate Air Pollution and Mortality. Cambridge: Health Effects Institute; 2000.
- Burnett RT, Pope CA 3rd, Ezzati M, Olives C, Lim SS, Mehta S, et al. An integrated risk function for estimating the global burden of disease attributable to ambient fine particulate matter exposure. *Environ Health Perspect.* 2014; 122(4): 397-403.
- Turner MC, Jerrett M, Pope CA 3rd, Krewski D, Gapstur SM, Diver WR, et al. Long-term ozone exposure and mortality in a large prospective study. *Am J Respir Crit Care Med.* 2016; 193(10): 1134-1142.
- Kim H, Kim H, Lee JT. Spatial variation in lag structure in the short-term effects of air pollution on mortality in seven major South Korean cities, 2006-2013. *Environ Int.* 2019; 125: 595-605.
- Kim S, Kim H, Lee JT. Interactions between ambient air particles and greenness on cause-specific mortality in seven Korean metropolitan cities, 2008-2016. *Int J Environ Res Public Health.* 2019; 16(10): 1866.
- Zeka A, Zanobetti A, Schwartz J. Short term effects of particulate matter on cause specific mortality: effects of lags and modification by city characteristics. *Occup Environ Med.* 2005; 62(10): 718-725.
- Lee J, Lee JS, Park SH, Shin SA, Kim K. Cohort profile: The National Health Insurance Service-National Sample Cohort (NHIS-NSC), South Korea. *Int J Epidemiol.* 2017; 46(2): e15.
- Samuelsen SO, Eide GE. Attributable fractions with survival data. *Stat Med.* 2008; 27(9): 1447-1467.
- Kelly FJ, Fussell JC. Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmos Environ.* 2012; 60: 504-526.
- Shin YC. Establishment of Socio-Economic Analysis Foundation for Chemical Substances Management. Incheon: National Institute of Environmental Research; 2017.
- Chen J, Hoek G. Long-term exposure to PM and all-cause and cause-specific mortality: a systematic review and meta-analysis. *Environ Int.* 2020; 143: 105974.
- Kim H, Byun G, Choi Y, Kim S, Kim SY, Lee JT. Effects of long-term exposure to air pollution on all-cause mortality and cause-specific mortality in seven major cities of South Korea: Korean national health and nutritional examination surveys with mortality follow-up. *Environ Res.* 2021; 192: 110290.
- Shin YC. Estimating the value of statistical life by analysing disease protective behavior: focusing on medical examination of cancer. *Environ Resour Econ Rev.* 2008; 17(4): 845-873.
- United States Environmental Protection Agency. Guidelines for Preparing Economic Analyses. Washington, D.C.: EPA; 2010.
- Goldman GT, Mulholland JA, Russell AG, Strickland MJ, Klein M, Waller LA, et al. Impact of exposure measurement error in air pollution epidemiology: effect of error type in time-series studies. *Environ Health.* 2011; 10: 61.

〈저자정보〉

변가람(연구교수), 최용수(대학원생), 길준수(대학원생), 차준일(대학원생), 이미혜(교수), 이종태(교수)