



인구구조 변동 추세를 반영한 미세먼지 노출에 의한 조기 사망자 추정

박정현^{1,2} , 장용철² , 이종현^{1*}

¹이에이치알앤씨(주) 부설 환경보건안전연구소, ²충남대학교 환경공학과

Estimation of Premature Deaths due to Exposure to Particulate Matter (PM_{2.5}) Reflecting Population Structure Change in South Korea

Junghyun Park^{1,2}, Yong-Chul Jang², and Jong-Hyeon Lee^{1*}

¹Research Institute of Environmental Health and Safety (RIEHS), EH R&C Co. Ltd., ²Department of Environmental Engineering, Chungnam National University

ABSTRACT

Background: PM_{2.5} pollution has been a persistent problem in South Korea, with concentrations consistently exceeding World Health Organization (WHO) guidelines. The aging of the population in the country further exacerbates the health impacts of PM_{2.5} since older adults are more susceptible to the adverse effects of air pollution.

Objectives: This study aims to evaluate how the health impact (premature death) due to long-term exposure to PM_{2.5} in South Korea could change in the future according to the trend of change in the country's population structure.

Methods: The study employs a relative risk function, which accounts for age-specific relative risks, to assess the changes in premature deaths by age and region at the average annual PM_{2.5} concentration for 2022 and at PM_{2.5} concentration improvement levels. Premature deaths were estimated using the Global Exposure Mortality Model (GEMM).

Results: The findings indicate that the increase in premature deaths resulting from the projected population structure changes up to 2050 would significantly outweigh the health benefits (reduction in premature deaths) compared to 2012. This is primarily attributed to the rising number of premature deaths among the elderly due to population aging. Furthermore, the study suggests that the effectiveness of the current domestic PM_{2.5} standard would be halved by 2050 due to the increasing impact of population aging on PM_{2.5}-related mortality.

Conclusions: The study highlights the importance of considering trends in population structure when evaluating the health benefits of air pollution reduction measures. By comparing and evaluating the health benefits in reflection of changes in population structure to the predicted PM_{2.5} concentration improvements at the provincial level, a more comprehensive assessment of regional air quality management strategies can be achieved.

Key words: Ultrafine particulate matter, relative risk, health impact assessment, demographic aging

Received November 15, 2023

Revised December 8, 2023

Accepted December 12, 2023

Highlights:

- Estimating the number of premature deaths reflecting trends in population structure changes such as aging.
- Reflecting the trend of population structure change until 2050, the number of premature deaths increases significantly with age in the age group over 60.
- Due to an increase in the number of premature deaths in the older age group due to the aging population structure, the effectiveness of the current domestic fine dust standards will be halved by 2050.

*Corresponding author:

Research Institute of Environmental Health and Safety (RIEHS), EH R&C Co. Ltd., 410 Jeongseojin-ro, Seo-gu, Incheon 22689, Republic of Korea
Tel: +82-32-677-0850
Fax: +82-70-8610-0852
E-mail: jhlecheju@gmail.com



I. 서론

미세먼지를 포함한 대기오염은 지구적 규모의 질병부담(Global Burden of Disease, GBD)의 5번째 기여요인으로 평가되고 있다.¹⁾ 그러나 대기오염의 건강영향 중 가장 큰 비중을 차지하는 것으로 알려진 미세먼지 장기노출에 의한 건강영향은 국내에서는 아직 충분히 연구가 진행되어 있지 못한 상태이다.²⁾

미세먼지 장기노출에 의한 건강영향은 여러 코호트 연구를 통해서 비사망 사망 또는 미세먼지 관련 피해질환(심장질환 및 호흡기계 질환 등)에 의한 사망에 대한 미세먼지의 기여도 평가를 통해서 이루어져 왔다. 각 피해질환별로 미세먼지에 의한 조기 사망자수를 예측하기 위해서는 질환별 사망률이 연령별로 큰 차이를 보이기 때문에 연령별로 조기 사망자수를 추정할 필요가 있다. 특히 미래의 연령별 조기 사망자수 예측을 위해서는 고령화와 같은 인구구조 변동에 영향을 받을 수밖에 없으므로 인구구조 변동 추세 반영은 필수적이다.³⁾

현재까지 미세먼지 장기노출에 따른 건강영향에 대한 국내 연구결과들은 심장 및 호흡기계 질환에 대한 조기 사망자수의 증가에 대해서 상대위험도가 일정한 값을 갖는 콕스의 비례위험모형을 적용해 왔다.^{2,4)} 특히, Ha (2017)²⁾의 연구는 국내외 역학연구들에 대해서 비례위험모형에 기반한 메타분석을 통해서 상대위험도의 대표값을 제시한 바 있다. 이 방법에 따르면 미세먼지 건강영향평가 방법은 미세먼지의 농도변화에 비례해서 조기 사망자가 변화되는 정도를 추정할 수 있다. 그러나 비례위험모형에 기반한 연구들은 미세먼지 농도수준별 상대위험도가 동일하다고 가정하고 있고, 고연령층에 대한 상대위험도를 별도로 제시하고 있지만 모든 연령대별로 조기 사망자수를 추정하는 방안을 제시하지 못하고 있다는 한계를 가지고 있다.

이와 달리 최근에 개발된 미세먼지 건강영향 평가방법론들은 전지구적 규모의 미세먼지 노출수준을 모두 포괄하기 위해 Integrated Exposure-Response (IER) model을 활용해서 노출수준에 따라서 다른 상대위험도 값을 적용하는 방법을 채택하고 있다.⁵⁾ 또한 미세먼지에 의한 조기사망이 연령별로 상이하다는 가정하에 추정된 연령별 상대위험도를 예측하는 Global Exposure Mortality Model (GEMM)이 개발되었고, 미래의 인구구조 변동 추세를 반영해서 미세먼지 건강영향을 평가하는데 활용되고 있다.^{5,6)}

GEMM은 일정한 상대위험도 대신에 위험요인들(노출농도와 연령)의 함수로 취급하는 '상대위험도 함수(Relative Risk Function, RRF)' 모형을 이용하고 있다. 따라서 이 모형을 이용한 미세먼지 건강영향평가에서는 각 피해질환 내 연령별 사망률, 미세먼지의 농도수준별 상대위험도, 그리고 인구규모와 연령구조의 변동 등이 주요한 변수로 취급된다.³⁾

이들 변수 중에서 미세먼지 농도수준별 상대위험도는 지속해서 수정-제안되고 있다. 담배나 고체연료에 의한 실내공기오

염 등 고농도 노출수준 자료를 확보하기 위해서 대기농도 이외의 노출자료들을 이용했던 IER model 대신에 중국의 고농도 수준에서 수행된 코호트 연구를 포함 총 16개국 41개 대기 중 미세먼지 코호트 연구만을 이용한 상대위험도를 적용한 결과 저농도 수준에서 미세먼지 피해질환에 의한 조기 사망자수가 거의 2배 정도 증가하는 결과를 보였다.⁷⁾

고농도의 미세먼지 농도구간을 포함하는 전지구적 규모의 미세먼지 건강영향평가와 달리 국내에서는 $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 낮은 미세먼지 농도 수준에서의 상대위험도를 반영해서 건강영향을 평가할 필요가 있다. 저농도 수준에서도 일정한 상대위험도를 가정하지 않고 노출농도 수준과 비선형적 관계를 가정한 상대위험도함수 모형을 적용할 필요성이 확인되었다.⁷⁾ 이와 관련하여 국내 노출 및 건강영향 자료들을 이용한 미세먼지 장기노출에 따른 건강영향을 평가하기 위한 후향적 코호트 연구들이 진행되고 있고, 이를 지속적인 건강영향평가 체계로 활용할 필요가 있다.⁸⁾

반면에 고령화, 지역적 인구이동의 심화 등 인구구조의 변동에 따른 미세먼지 건강영향의 추세를 파악하는 것이 더욱 중요하게 부각되고 있다.^{9,10)} 고령화 등 인구구조의 변동이 미세먼지의 건강영향에 미치는 영향은 전국적 규모의 평균적인 분석만으로는 불충분하고, 고령화 속도가 심각한 지방을 포함하는 시-도 단위로 세분화해서 공간적으로 보다 상세한 분석이 필수적이다. 지역별 인구구조의 변동 추세뿐만 아니라 미세먼지의 농도수준의 차이도 함께 고려되어서 미세먼지의 건강영향에 대한 평가가 진행될 필요가 있다.

II. 재료 및 방법

1. 상대위험비(Relative Risk) 및 사망자수(Mortality) 산정

이 연구에서는 $\text{PM}_{2.5}$ 에 의한 질환, 연령 및 농도에 따른 상대위험도(Relative Risk, RR)와 사망자수를 추정하기 위하여 Global Exposure Mortality Model (GEMM)⁷⁾의 방법을 적용하였다.

Burnett (2018)⁷⁾에서는 사망원인(k), 연령(a), 지역(i), 연도(j)에 따른 RR 및 조기 사망자수를 산정하기 위하여 다음과 같은 산정식을 제시하였다.

$$RR_{i,j,k,a} = \exp \left\{ \theta_{k,a} \log \left(\frac{z_{i,j}}{\alpha_k} + 1 \right) \left[\frac{1}{1 + \exp \left(-\frac{z_{i,j} - \mu_k}{\nu_k} \right)} \right] \right\}$$

여기서, $z_{i,j} = C_{ij} - cf$ 로, C_{ij} 는 지역과 연도에 따른 $\text{PM}_{2.5}$ 의 연평균 농도($\mu\text{g}/\text{m}^3$)로, 이 연구에서는 2022년 $\text{PM}_{2.5}$ 의 시도단위의 지역별 연평균 농도자료를 적용하였다. cf 는 추가 위험이 없다고 가정되는 $\text{PM}_{2.5}$ 의 반사실적 농도이고, 이 연구에서

는 WHO의 Climate change mitigation, air quality and health (CLIMAQ-H) 모델¹¹⁾에서 적용했던 GBD 2019 Risk Factors Collaborators (2020)¹²⁾의 2.4 µg/m³를 적용하였다. θ, α, μ, ν 는 GEMM에서 농도와 RR 사이의 관계를 나타내는 다양한 형태의 곡선을 표현해 주는 비선형 회귀식의 매개변수로, 16개국의 41개 코호트 연구를 통해서 제시된 값을 적용하였다. θ, α, μ, ν 는 GEMM에서 농도와 RR 사이의 관계가 연령(a)과 질환(k)에 따라서 어떻게 달라지는 지를 반영하고 있는 매개변수들이다. θ 는 연령과 질환별로 RR에 미치는 영향을 반영하고 있고, α, μ, ν 는 질환별 영향만 반영하는 매개변수로 설정되어 있다.⁷⁾

사망원인(k), 연령(a), 지역(i), 연도(j)에 따른 조기 사망자수 ($D_{i,j,k,a}$)는 다음과 같은 산정식을 적용하였다.

$$D_{i,j,k,a} = E_{i,j,k,a}^0 \times AF_{i,j,k,a} \times Pop_{i,j,a}$$

$$= E_{i,j,k,a}^0 \times [(RR_{i,j,k,a} - 1) / RR_{i,j,k,a}] \times Pop_{i,j,a}$$

여기서, E^0 은 기준연도에서의 사망원인, 연령, 지역에 따른 기준연도에서의 사망률이다. AF는 PM_{2.5}에 의한 상대위험도 기여

비율, Pop는 PM_{2.5}에 노출될 수 있는 인구수(명)이다.

2. 질환별 사망자수 및 인구수 자료 수집

국내 인구의 사망자수와 인구수에 대한 정보는 통계청의 국가통계포털(Korean statistical information service, KOSIS)의 사망원인통계, 장래인구추계 데이터를 활용하였다. 사망원인(104 항목)에 대한 사망원인통계로부터 지역(17개 시도)과 연령(5세 단위)을 구분하여 PM_{2.5} 노출로 발생할 수 있는 주요 질환에 의한 2022년 사망자수를 정리하였다. Burnett (2018)⁷⁾ 연구에서는 PM_{2.5}의 노출을 발생시키는 주요 원인으로 대기 중 PM_{2.5} 외에도 직간접 흡연을 포함하였고, 이로 인한 주요 사망원인을 비전염성 질환(Noncommunicable diseases, NCD)과 하부 호흡기 감염(lower respiratory infections, LRI)을 대상으로 하였다. NCD 질환으로는 허혈성 심장 질환(Ischemic heart disease, IHD), 뇌혈관 질환(Stroke), 만성 하기도 질환(Chronic Obstructive Pulmonary Disease, COPD), 폐암(Lung cancer)을 적용하였다. Burnett (2018)⁷⁾ 연구에서는 적용한 LRI 질환의 종류가 언급되지 않았으므로, World Health Organization

Table 1. Disease classification codes applied by WHO and this study

Diseases category	WHO (2020)	This study
IHD	I20-I25	I20-I25
COPD	J40-J44	J40-J47
Stroke	I60-I69	I60-I69
Trachea, bronchus, lung cancers	C33-C34	C33-C34
LRI	J09-J22, P23, U04	J09-J11 (influenza) J12-J18 (pneumonia) J20-J22, U04 (other acute LRI)

IHD: ischemic heart disease, COPD: chronic obstructive pulmonary disease, LRI: lower respiratory infections.

Table 2. Population by age in target year

Age group	Population			
	2022	2030	2040	2050
25 to 29	3,475,340	2,693,051	2,478,245	1,447,776
30 to 34	3,317,257	3,430,590	2,455,771	1,968,061
35 to 39	3,298,254	3,589,871	2,665,687	2,452,622
40 to 44	4,026,249	3,244,406	3,387,210	2,416,360
45 to 49	4,046,868	3,829,171	3,576,072	2,658,735
50 to 54	4,542,072	3,847,685	3,250,106	3,403,060
55 to 59	4,069,992	4,319,666	3,808,892	3,572,201
60 to 64	4,218,037	4,209,740	3,777,114	3,207,546
65 to 69	3,185,502	4,027,289	4,171,671	3,709,007
70 to 74	2,208,256	3,532,151	3,980,283	3,618,518
75 to 79	1,617,461	2,353,038	3,654,343	3,871,961
80 up	2,256,071	3,143,848	5,438,573	7,804,403

(WHO) (2020)¹³⁾로부터 각 질병에 대한 질병분류코드를 파악하고, 이를 사망원인통계에 연계하여 해당 질병에 대한 사망자수를 확인하였다(Table 1). World Health Organization (WHO) (2020)¹³⁾은 WHO의 세계보건통계(Global Health Estimates, GHE) 중 사망원인에 대한 국가별 사망자수를 집계하기 위한 방법과 질병별 분류체계가 제시되었다.

이 연구에서는 현재(2022년)와 미래에 대한 연령 및 지역별 인구수는 통계청의 성, 연령 및 시도별 추계인구 통계표로부터 파악하였다. 이 통계표는 과거 1970년부터 장래 2050년까지의 인구수를 제시하고 있으며, 이 연구에서는 2022년, 2030년, 2040년, 2050년으로 구분하여 17개 시도, 5세 단위로 인구수에 대한 정보를 수집하였다(Table 2).

Table 3. Average relative risk by cause of death depending on age and regional annual air concentration in 2022

Cause of death	Age group	Relative risk (RR) (95% CI)	
		Constant	Age-specific
NCD+LRI	25 to 29	1.178 (1.166~1.19)	1.199 (1.193~1.193)
	30 to 34		1.198 (1.192~1.192)
	35 to 39		1.197 (1.191~1.191)
	40 to 44		1.195 (1.189~1.189)
	45 to 49		1.192 (1.186~1.186)
	50 to 54		1.187 (1.181~1.181)
	55 to 59		1.182 (1.177~1.177)
	60 to 64		1.177 (1.171~1.171)
	65 to 69		1.17 (1.165~1.165)
	70 to 74		1.163 (1.158~1.158)
IHD	25 to 29	1.393 (1.379~1.407)	1.763 (1.748~1.748)
	30 to 34		1.703 (1.689~1.689)
	35 to 39		1.645 (1.633~1.633)
	40 to 44		1.59 (1.579~1.579)
	45 to 49		1.536 (1.526~1.526)
	50 to 54		1.484 (1.475~1.475)
	55 to 59		1.434 (1.426~1.426)
	60 to 64		1.386 (1.379~1.379)
	65 to 69		1.339 (1.333~1.333)
	70 to 74		1.293 (1.289~1.289)
Stroke	25 to 29	1.171 (1.145~1.198)	1.3 (1.273~1.273)
	30 to 34		1.28 (1.254~1.254)
	35 to 39		1.259 (1.236~1.236)
	40 to 44		1.239 (1.218~1.218)
	45 to 49		1.22 (1.2~1.2)
	50 to 54		1.201 (1.183~1.183)
	55 to 59		1.182 (1.166~1.166)
	60 to 64		1.163 (1.149~1.149)
	65 to 69		1.145 (1.132~1.132)
	70 to 74		1.127 (1.116~1.116)
	75 to 79	1.109 (1.1~1.1)	
	80 up	1.083 (1.076~1.076)	

NCD: non-communicable diseases, LRI: lower respiratory infections, IHD: ischemic heart disease.

Table 4. Disease-specific premature deaths attributed to PM_{2.5} estimated with and without age-specific relative risk by Global Exposure Mortality Model (GEMM) in 2022

Cause of death	Age group	The number of premature deaths (95% CI)		(A)~(B)
		Constant (A)	Age-specific (B)	
NCD+LRI	25 to 29	52 (49~55)	57 (56~59)	-6 (-7~-4)
	30 to 34	79 (74~83)	86 (84~89)	-8 (-10~-6)
	35 to 39	185 (174~196)	201 (196~207)	-17 (-23~-12)
	40 to 44	415 (390~440)	449 (437~461)	-35 (-48~-22)
	45 to 49	718 (675~760)	765 (745~785)	-48 (-71~-26)
	50 to 54	1,252 (1,177~1,326)	1,308 (1,274~1,343)	-57 (-97~-17)
	55 to 59	2,065 (1,942~2,188)	2,108 (2,052~2,164)	-43 (-111~23)
	60 to 64	3,406 (3,202~3,608)	3,386 (3,296~3,476)	19 (-94~132)
	65 to 69	4,558 (4,285~4,829)	4,391 (4,274~4,508)	166 (11~320)
	70 to 74	6,163 (5,794~6,529)	5,715 (5,561~5,868)	447 (232~660)
	75 to 79	8,830 (8,301~9,354)	7,803 (7,593~8,013)	1,026 (708~1,340)
	80 up	36,323 (34,148~38,478)	29,388 (28,589~30,185)	6,934 (5,558~8,293)
	total	64,051 (60,216~67,851)	55,665 (54,162~57,163)	8,385 (6,053~10,688)
IHD	25 to 29	22 (21~23)	35 (34~35)	-13 (-13~-13)
	30 to 34	43 (42~44)	64 (63~65)	-21 (-22~-21)
	35 to 39	121 (118~124)	170 (168~172)	-50 (-51~-48)
	40 to 44	238 (231~244)	315 (311~319)	-78 (-80~-75)
	45 to 49	396 (386~407)	493 (487~499)	-97 (-102~-93)
	50 to 54	670 (652~687)	777 (767~787)	-108 (-116~-100)
	55 to 59	986 (960~1,012)	1,059 (1,046~1,072)	-73 (-86~-61)
	60 to 64	1,319 (1,284~1,354)	1,300 (1,283~1,317)	19 (1~37)
	65 to 69	1,435 (1,397~1,473)	1,284 (1,267~1,300)	151 (130~172)
	70 to 74	1,690 (1,645~1,734)	1,352 (1,334~1,369)	338 (311~364)
	75 to 79	2,348 (2,286~2,410)	1,651 (1,629~1,673)	697 (657~736)
	80 up	10,150 (9,881~10,417)	5,608 (5,531~5,685)	4,542 (4,350~4,731)
	total	19,424 (18,910~19,935)	14,113 (13,925~14,300)	5,311 (4,984~5,635)
Stroke	25 to 29	22 (19~25)	35 (32~37)	-14 (-14~-13)
	30 to 34	33 (29~37)	50 (46~53)	-17 (-18~-17)
	35 to 39	69 (60~79)	98 (91~105)	-29 (-32~-27)
	40 to 44	168 (146~191)	223 (207~240)	-55 (-62~-49)
	45 to 49	269 (233~305)	332 (308~357)	-64 (-75~-53)
	50 to 54	394 (341~446)	451 (417~485)	-58 (-77~-39)
	55 to 59	588 (509~666)	619 (572~665)	-31 (-64~1)
	60 to 64	862 (746~976)	826 (763~888)	36 (-18~88)
	65 to 69	1,036 (896~1,174)	895 (826~963)	141 (70~210)
	70 to 74	1,328 (1,149~1,504)	1,018 (940~1,096)	309 (209~408)
	75 to 79	2,081 (1,800~2,356)	1,392 (1,284~1,500)	688 (515~856)
	80 up	8,925 (7,720~10,106)	4,642 (4,279~5,003)	4,282 (3,440~5,102)
	Total	15,782 (13,651~17,871)	10,588 (9,770~11,398)	5,194 (3,880~6,472)

NCD: non-communicable diseases, LRI: lower respiratory infections, IHD: ischemic heart disease.

3. 국내와 WHO의 PM_{2.5} 기준에 따른 조기 사망자수 산정

환경부에서는 2022년의 PM_{2.5}의 연평균 농도는 지역별로 14~20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위였고, 전국 평균은 18 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 발표하였다. 한국의 대기환경기준 중 PM_{2.5}의 연평균 농도기준이 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, WHO는 공기질 관리지침(Air quality guidelines, AQGs)¹⁴⁾ 중 PM_{2.5}의 연평균 농도기준은 2005년에 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 2021년에 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 제시하였다. 이에 따라 현재 국내 PM_{2.5}의 연평균 농도는 국내 및 WHO의 기준을 만족하지 못하는 수준이었다.

이 연구에서는 PM_{2.5} 기준을 충족했을 때의 조기 사망자수를 추정하기 위하여 한국의 대기환경기준, WHO의 AQGs에서의 PM_{2.5}의 연평균 농도기준인 15, 10, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 포함하고, WHO의 2005년과 2021년의 AQGs의 중간에 해당하는 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용하였다. 이상의 농도에서 산정한 조기 사망자수는 2022년 시도단위의 지역별 연평균 농도 중 가장 높은 농도였던 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 적용했을 때의 조기 사망자수와 비교하였다.

III. 결 과

1. 연령별 상대위험도 도출 및 적용 여부에 따른 조기 사망자수 비교

Table 3은 2022년을 기준으로 미세먼지 농도와 인구구조가 동일한 조건에서 GEMM에서 제시한 25세 이상 인구집단 전체(Constant) 또는 연령군별(Age-specific) 입력변수(θ , α , μ , ν)를 적용한 상대위험도를 보여주고 있다. GEMM에서는 IHD, stroke, 그리고 NCD+LRI에 대해서만 연령별 입력변수가 제시되어 있고, LC, COPD, LRI에 대한 입력변수는 별도의 연령이 구분되어 있지 않았다(Supplementary Table 1). 이에 따라 LC, COPD, LRI의 상대위험도 및 조기 사망자수 산정은 이 연구에서 제외하였다.

GEMM에 따르면 연령별 보정계수(θ)는 연령이 낮을수록 높으므로, 미세먼지의 상대위험도가 연령이 낮을수록 높은 결과를 보인다.

Table 4는 인구집단 전체(Constant) 또는 연령군별(Age-specific) 상대위험도를 이용한 연령군별 조기 사망자수를 보여주고 있다. 상대위험도는 연령이 적을수록 높았지만, 조기 사망자수는 연령이 높을수록 증가하는 추세를 보인다.

2. 인구구조 변동 추세 반영 여부간의 조기 사망자수 비교

Supplementary Table 2는 미세먼지 농도와 연령군별 사망률이 2022년과 동일하게 유지되는 조건에서 연령군별 상대위험도를 2030년, 2040년, 2050년에 예측되는 인구구조에 적용하여 도출한 조기 사망자수를 2022년과 비교한 결과이다. 이

는 현재의 인구구조가 동일하게 유지된다는 가정하에서 대기오염의 건강편익을 추정해 왔던 기존의 방법과 달리 고령인구의 증가, 특히 농촌지역에서의 고령화 가속화 등 지역 인구구조 변동 추세를 반영하는 것에 의미를 둘 수 있다. 평가 결과, 인구구조가 변하지 않은 것을 가정한 2022년보다 2030년, 2040년, 2050년에 지속적으로 조기 사망자수가 증가하였다. 65세 이전 조기 사망자수는 연도가 증가할수록 줄어들었고, 65세 이상부터는 사망자수가 증가하였다. 이러한 특징은 고령화의 가속화가 예상되는 농촌지역 명확하게 확인되었다. 특히, 65세 이상에서도 연령이 증가할수록 조기 사망자수가 가파르게 증가하였다. 이는 고연령층의 인구가 증가하는 것과 함께 고연령일수록 미세먼지 관련 질환의 사망률이 높으므로 비록 고연령일수록 상대위험도가 낮지만, 최종적인 조기 사망자수는 증가한 것으로 확인되었다.

3. 미세먼지 농도 개선 수준에 따른 조기 사망자수 비교

Fig. 1은 PM_{2.5}의 전국 연평균 농도를 20, 15, 10, 7, 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가정하고, 2022년, 2030년, 2040년, 2050년의 장래 추계 인구를 적용하여 추정된 연령군별 조기 사망자수를 비교한 결과이다. 연평균 농도가 적을수록 전체 조기 사망자수는 감소하는 추세였다. 적용 연도가 증가함에 따라 조기 사망자수는 지속해서 증가하였다. 특히, 65세 이전의 조기 사망자수는 적용연도가 증가함에 따라 감소하였고, 65세 이상에서는 크게 증가하였다. Fig. 1에 대한 상세한 조기 사망자수는 Supplementary Table 3에 제시하였다.

Fig. 2는 미세먼지 농도 개선수준에 따른 건강편익이 지역별로 어떻게 달라지는지를 보여주고 있다. 인구규모를 반영한 조기 사망자수를 지역별로 비교해 보면 경기도와 서울 순으로 인구규모가 큰 시도에서 조기 사망자수가 많았다. Fig. 2에 대한 상세한 조기 사망자수는 Supplementary Table 4에 제시하였다.

Fig. 3은 인구 10만 명당 지역별 조기 사망자 수를 보여주고 있으며, 고연령층의 비율이 높은 전라남북도, 경상북도, 강원도 등 지방이 높았고, 고연령층의 비율이 낮은 경기도, 서울, 세종시가 낮았다. 특히, 전라남북도처럼 노령인구가 많은 시도가 인천과 같이 인구수는 많지만 노령인구 비율이 적은 시도에 비해서 조기 사망자수가 비슷하게 추정되었다. 이상의 결과는 미세먼지에 의한 건강피해를 입는 위험인구가 어디에 어떤 연령층에서 얼마나 많은 수로 존재하는지를 추정할 수 있게 해준다. 따라서 이에 대비해서 미세먼지로 인한 건강피해를 사전에 예방하기 위한 맞춤형 환경 보건 서비스를 설계하는 데 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 국내에서 처음으로 미세먼지의 노출수준과

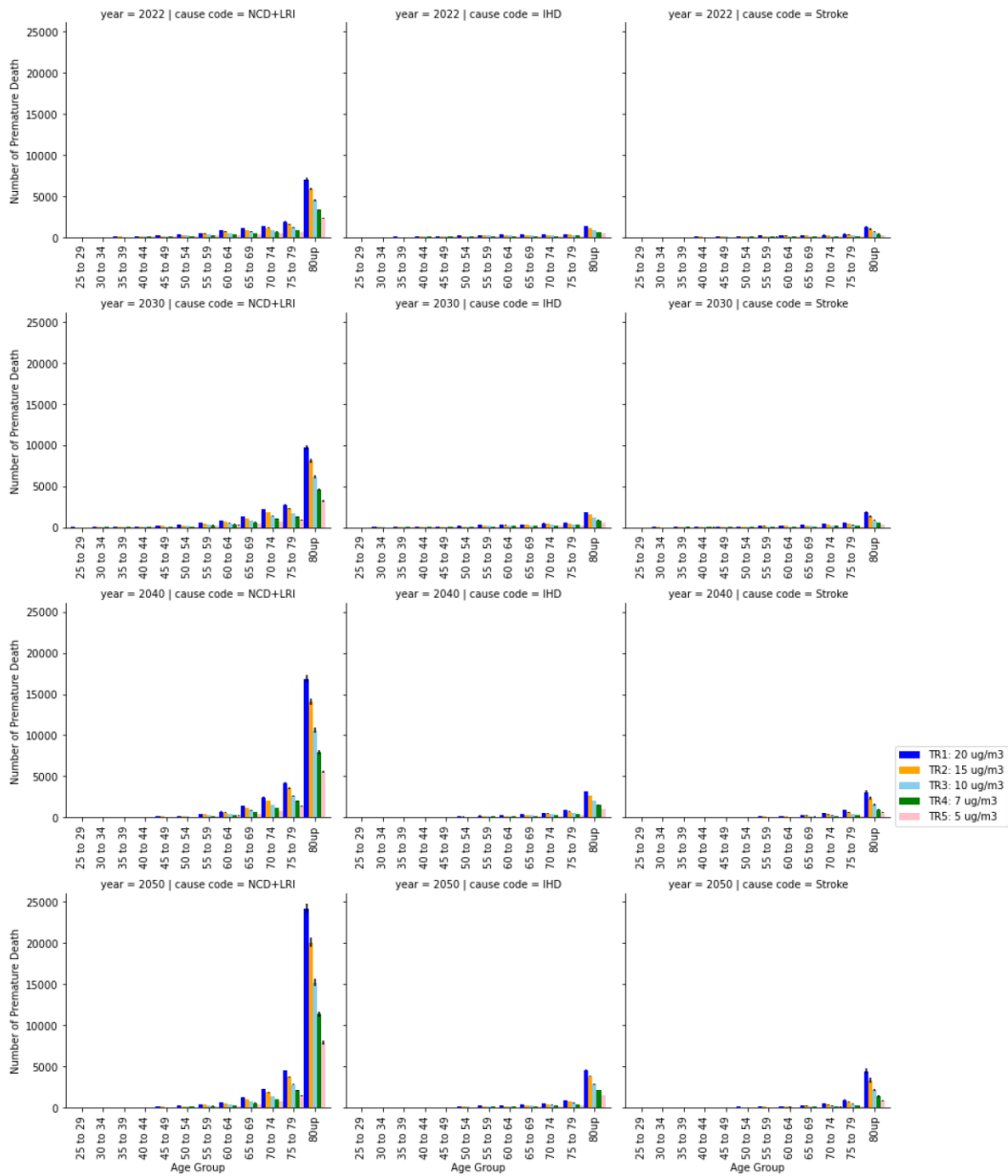


Fig. 1. Disease-specific premature deaths attributed to PM_{2.5} for different ambient PM_{2.5} concentrations (20, 15, 10, 7, 5 µg/m³) by age (see Supplementary Table 3 for details)

사망원인 질환의 연령별 상대위험도를 정량적으로 추정할 수 있는 GEMM을 이용해서 미세먼지 장기노출에 의한 조기 사망자를 추정하였다. 국제적으로는 연령과 미세먼지 노출수준에 따른 미세먼지 건강영향을 평가할 수 있는 GEMM이 제시되어서 이미 활용되고 있으나,⁶⁾ 국내에서는 아직 활용된 사례가 없다. 다만 Hwang (2019)⁹⁾은 콕스의 비례위험모형을 활용해서 국민건강보험공단 표본코호트 DB 중 2002년 서울시 거주 만 65세 이상 고령자 대상으로 2015년까지 미세먼지 노출에 대한 장기건강영향을 평가하였다. 2015년 초미세먼지로 인한 서

울지역 고령자 조기 사망자수는 WHO 권고기준(10 µg/m³) 대비 조기 사망자수는 연간 1,162명으로 추정되었다. 2030년까지 2015년의 초미세먼지 평균 농도를 유지한다는 전제하에서 2030년 초미세먼지로 인한 고령자 조기 사망자수는 서울시 장래 고령화율 전망을 활용해서 WHO 권고기준 대비 연간 2,133명으로 추정하였다. 위 연구는 서울지역 고령인구만을 대상으로 한 연구에 그치고 있지만, 향후에는 고령화가 심각한 수준에 이른 지방을 포함한 전국을 대상으로 65세 이상 고령군만이 아니라 모든 연령을 포함한 인구구조 변동추세를 반

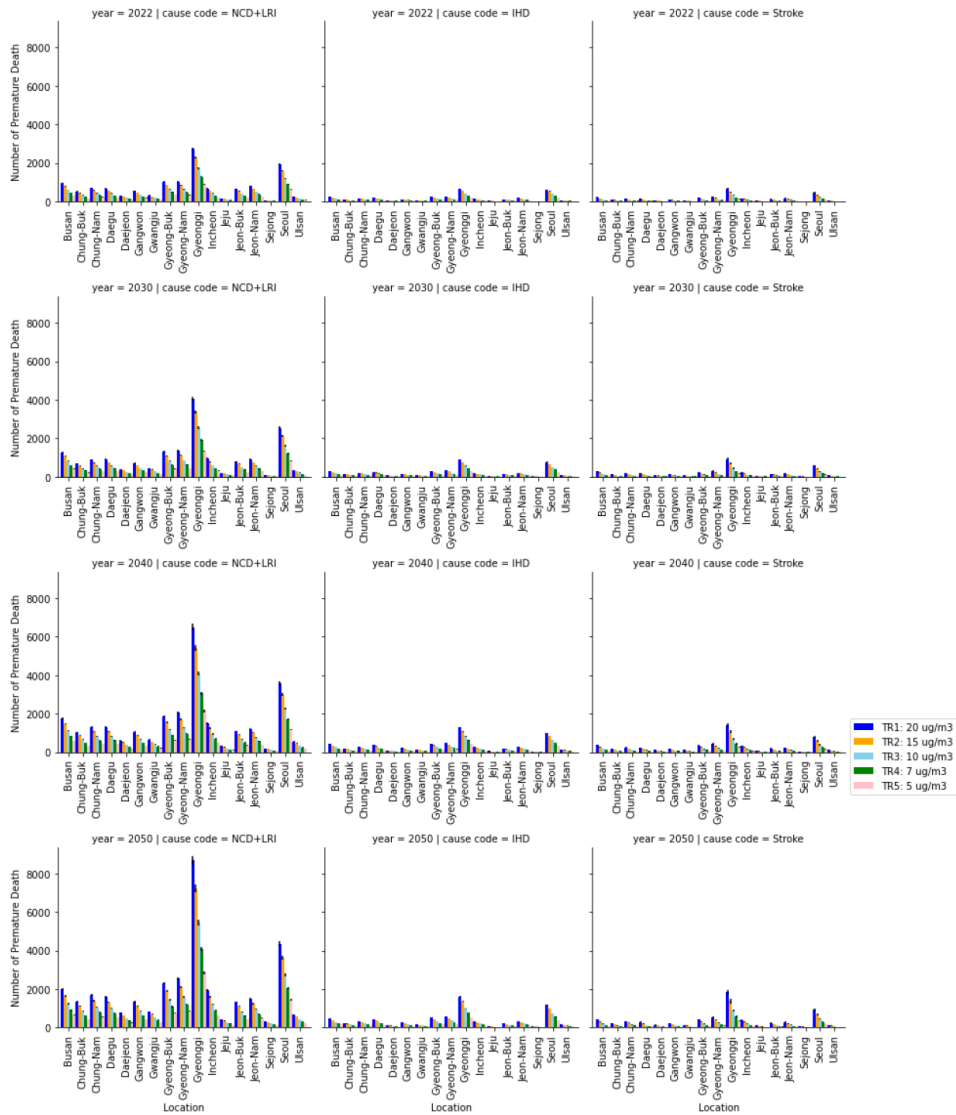


Fig. 2. Disease-specific premature deaths attributed to PM_{2.5} for different ambient PM_{2.5} concentrations (20, 15, 10, 7, 5 μg/m³) by location (see Supplementary Table 4 for details)

영한 조건에서 현재의 대기오염 저감대책들에 대한 건강편익을 산정하는 데까지 확대해서 적용될 필요가 있다.

이 연구에서 적용한 방법론이 적용된 Burnett (2018)⁷⁾은 미세먼지가 조기 사망자 발생에 미치는 영향을 사망원인별로 연령과 노출수준에 따라서 상대위험도를 추정하는 새로운 유형의 용량-반응관계 모형인 GEMM을 개발하여 미세먼지 건강영향평가에 활용하였다. GEMM은 기존의 비례위험모형과 달리 사망원인 질환별로 연령과 노출농도 수준에 따라서 상대위험도가 달라지는 새로운 유형의 용량-반응관계 모형이다. 따라서 기존 건강영향평가 방법처럼 미세먼지 농도변화 수준에 단순 대응하는 상대위험도를 예측하는 것과 달리 연령별, 노출수준별로 상대위험도를 예측하고, 인구구조 변동 추세를 반영해

서 미래의 건강영향을 보다 현실적인 여건을 반영해서 예측하는데 활용할 수 있다.

대기오염 저감대책의 건강편익을 분석할 때 전국단위의 총편익을 추정하는 대신에 지역별 노출농도수준과 인구구성을 반영해서 분석하는 경우가 보다 정밀한 전국 총사망자수 추정과 함께 지자체 단위로 활용할 수 있는 건강편익 분석방법을 제공해 줄 수 있다. 본 연구에서는 지역단위의 대기오염 농도 측정을 이용하여 지역 및 연령군에 대한 조기 사망자를 추정한 결과를 제시하였다. 본 연구에서 제시된 방법을 활용하면 전국뿐만 아니라 지자체 단위에서 구체적인 대기오염저감 대책에 따른 미세먼지 농도변화 예측 결과에 대한 건강편익 평가가 노출수준과 수용체의 특성을 더 상세하게 반영할 수 있다.



Fig. 3. Disease-specific premature deaths per 100,000 people, attributed to PM_{2.5} for different ambient PM_{2.5} concentrations (20, 15, 10, 7, 5 μg/m³) by location

현재는 시도 단위의 분석이라는 한계점이 있지만, 피해질량과 인구추계가 시군구 단위로 확보 또는 추정할 수 있다면 분석단위를 시군구 단위로 확대해서 적용될 수 있을 것이다. 이렇게 분석의 공간적 해상도가 대기오염의 분포 특성을 반영할 정도로 시군구 단위까지 충분히 증가한다면 지역사회 차원에서 위험인구집단 및 개인들에 대한 사전 예방 차원의 맞춤형 환경보건 서비스를 제공할 수 있을 것으로 기대된다.

국내 미세먼지 건강영향평가 및 대기오염개선 대책의 건강편익 산정 등 정책수요에 대응하기 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

고령인구만이 아니라 가능한 어린이를 포함한 전체인구집단

을 대상으로 인구구조의 변동 전망에 따른 미세먼지 건강영향 평가로 확대 적용할 수 있다. 특히 어린이들에 대한 미세먼지 건강영향에 대한 평가가 조기사망에 따른 기대여명의 감소분을 기준으로 재평가되는 방안이 추가로 검토될 필요가 있다.

단순히 미세먼지 기준을 준수할 때에 대한 건강편익 추정에 그치지 않고, 대기오염 저감대책 시나리오별로 연평균 대기오염농도 예측결과를 활용해서 전국규모로 시도단위별 미세먼지 저감대책에 대한 건강편익을 산정할 필요가 있다. 현재의 대기환경기준을 유지한다고 해도 미세먼지로 인한 건강피해는 고령화의 심화로 인해 지속해서 증가할 수밖에 없다. 따라서 대기오염 저감대책의 목표와 규모에 대한 재평가가 지속해서 필요하다.

V. 결 론

미세먼지 장기노출에 의한 건강영향을 평가하기 위해서 사망원인 질환별로 동일한 상대위험도가 아닌 연령별 그리고 노출농도 수준별로 상대위험도를 도출한 GEMM을 이용해서 노령화 등 인구구조 변동추세를 반영한 조기 사망자수를 추정하였다. 2050년까지의 인구구조 변동추세를 반영했을 때 조기 사망자수가 65세이상 연령층에서 연령이 증가할수록 뚜렷하게 증가하는 것으로 추정되었다. 인구구조의 고령화로 인한 고연령층의 조기 사망자수 증가 현상으로 2050년에는 현행 국내 미세먼지 기준의 효과가 절반 수준으로 반감되는 것으로 평가되었다.

감사의 글

이 결과물은 환경부의 재원으로 한국환경산업기술원의 신기후체제 대응 환경기술개발사업의 지원을 받아 연구되었습니다 (2022003560007).

Conflict of Interest

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

Supplementary Materials

Supplementary materials can be found via <https://doi.org/10.5668/JEHS.2023.49.6.362>

References

1. GBD 2019 Diseases and Injuries Collaborators. Global burden of 369 diseases and injuries in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*. 2020; 396(10258): 1204-1222. Erratum in: *Lancet*. 2020; 396(10262): 1562.
2. Ha J. Concentration response functions for particulate matter related health risk assessment in South Korea. *J Environ Health Sci*.

- 2017; 43(3): 202-213.
3. Burnett R, Cohen A. Relative risk functions for estimating excess mortality attributable to outdoor PM_{2.5} air pollution: evolution and state-of-the-art. *Atmosphere*. 2020; 11(6): 589.
4. Bae HJ, Park J. Health benefits of improving air quality in the rapidly aging Korean society. *Sci Total Environ*. 2009; 407(23): 5971-5977.
5. 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. Erratum in: *Environ Health Perspect*. 2014; 122(9): A235.
6. Yin H, Brauer M, Zhang JJ, Cai W, Navrud S, Burnett R, et al. Population ageing and deaths attributable to ambient PM_{2.5} pollution: a global analysis of economic cost. *Lancet Planet Health*. 2021; 5(6): e356-e367. Erratum in: *Lancet Planet Health*. 2021; 5(11): e765.
7. Burnett R, Chen H, Szyszkowicz M, Fann N, Hubbell B, Pope CA 3rd, et al. Global estimates of mortality associated with long-term exposure to outdoor fine particulate matter. *Proc Natl Acad Sci US A*. 2018; 115(38): 9592-9597.
8. Bae HJ, Shin YS, Lim YH, Lim YH. A framework for estimating the long-term health effects of air pollution. Sejong: Korea Environment Institute; 2014 Dec. Report No.: 2014-16.
9. Hwang IC. The effects of aging and ultrafine dust on health. *Policy Rep*. 2019; 287: 1-22.
10. Shin JY. The health impact of fine dust and its policy implications. *Issue Focus*. 2023; 435: 1-10.
11. Centre for Environment & Health, Living & Working Environments. Achieving health benefits from carbon reductions. Manual for use of the climate change mitigation, air quality and health tool. Copenhagen: World Health Organization Regional Office for Europe; 2023.
12. GBD 2019 Risk Factors Collaborators. Global burden of 87 risk factors in 204 countries and territories, 1990-2019: a systematic analysis for the Global Burden of Disease Study 2019. *Lancet*. 2020; 396(10258): 1223-1249.
13. World Health Organization (WHO). WHO methods and data sources for country-level causes of death 2000-2019. Geneva: WHO; 2023.
14. World Health Organization (WHO). Air quality guidelines - update 2021. Copenhagen: WHO; 2021.

〈저자정보〉

박정현(연구원), 장용철(교수), 이종현(연구소장)