서울시 미세먼지(PM₁₀)로 인한 사망영향에 대한 기온의 수정효과

배현주[†] · 임유라 · 유승도* · 김정화* · 조용성*

한국환경정책평가연구원,
*국립환경과학원 환경보건연구과

Temperature Modifies the Association between PM₁₀ and Mortality in Seoul

Hyun-joo Bae[†], Yu-ra Lim, Seung Do Yu*, Joung Hwa Kim*, and Yong-Sung Cho*

Korea Environment Institute, Seoul, Korea

**Environmental Health Research Department, National Institute of Environmental Research*

ABSTRACT

Objectives: Many studies have shown that air pollution and temperature have adverse effects on mortality and morbidity. But the interactive effect between air pollution and temperature on mortality has been rarely investigated. This study aims to explore whether temperature modifies the associations between ambient particulate matter less than 10 μm in diameter (PM₁₀) and mortality in Seoul, Korea.

Methods: The time-series analysis examined the effect of the interaction between PM₁₀ and temperature on mortality from 1999 to 2010 in Seoul. In order to examine the interactive effect between PM₁₀ and temperature on mortality, we fitted a response surface model controlling the time-trends and meteorological variables. The effects of PM₁₀ were stratified by temperature stratum to quantitatively estimate the PM₁₀-health outcome associations.

Results: When temperature was low (below the threshold temperature), the percentage increases per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase of PM₁₀ increased 0.38% (95% Confidence Interval[CI]: 0.09~0.68%) and 0.31% (95% CI: -0.07~0.68%) of mortality in the all age group and ≥ 65 year age group, respectively. When temperature was high (above the threshold temperature), the percentage increases per 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase of PM₁₀ increased 1.09% (95% CI: 0.47~1.72%) and 1.35% (95% CI: 0.65~2.06%) for mortality in the all age group and ≥ 65 year age group, respectively.

Conclusion: The results of this study showed strong modification by temperature in the association between PM₁₀ and mortality. We recommend that public health strategies to minimize adverse health impact of heat and PM₁₀ should be considered in control and prevention measures for air pollution and weather-related health impacts.

Keywords : particulate matter, temperature, effect modification, mortality, response surface model

I. 서 론

전 세계적으로 대기오염으로 인한 건강영향에 관

한 많은 역학연구들이 진행되었다. 미세먼지(Particulate Matter less than 10 μm in diameter; PM₁₀)는 기도 자극, 폐기능 감소, 천식 악화, 만성기관지염 발생

[†]Corresponding author: Korea Environment Institute, 290 Jinheungno, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, South Korea, E-mail: hjbae@kei.re.kr

Received: 5 December 2012, Revised: 7 January 2013, Accepted: 25 February 2013

등 호흡기계 관련 질환^{1,3)} 및 부정맥, 경미한 심장마비, 심혈관계 관련질환, 심지어 조기사망에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.^{4,6)}

고온에 노출되면 체온조절 능력이 저하되면서 열경련, 열기절, 열피로, 일사병 등과 같은 고온 관련 질환을 야기할 수 있다.⁷⁾ 그리고 뇌졸중, 부정맥 등과 같은 심혈관계 관련질환, 천식과 만성폐쇄성폐질환 등 호흡기계 관련질환, 고온 관련 사망을 야기할 수 있다.⁸⁻¹²⁾

기후변화에 의한 정부간 패널(Intergovernmental panel on Climate Change, IPCC)의 평가보고서에서는 온실가스 영향으로 21세기 기온은 1~4°C 증가할 것으로 예측하였다.¹³⁾ 기후변화는 지역적인 기상조건을 변화시키고, 기상조건은 대기오염물질의 생성, 이동, 확산, 침착에 영향을 주기 때문에 기후변화는 대기오염물질과 관련된 질환과 사망에 영향을 줄 수 있다.^{14,15)} 또한 고온은 기존 건강 상태를 악화시켜 대기오염으로 인한 건강영향을 더욱 크게 할 수 있다.

일부 연구에서는 대기오염으로 인한 건강영향이 겨울철 보다는 여름철에 더욱 크게 나타난다고 하는 계절적 차이를 보고하였다.¹⁶⁻¹⁹⁾ 이러한 차이는 기온에 따른 대기오염농도의 차이에 기인한 것으로 볼 수 있으며, 또한 이것은 기온이 잠재적으로 대기오염의 건강영향을 수정한다는 것을 의미한다. 수정효과는 제3의 변수 수준에 따라서 노출효과의 크기가 변화하는 것을 의미한다. 기온 수준에 따른 대기오염이 건강에 미치는 영향에 관한 연구들이 진행되고 있으나, 인구학적 특성과 지리학적 특성 등에 따라서 상반된 연구결과를 보이고 있다.¹⁶⁻¹⁹⁾

본 연구의 목적은 크게 두가지로, 첫째 미세먼지(PM₁₀)와 기온이 사망에 미치는 영향을 파악하고자, 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인한 사망영향과 기온 상승으로 인한 건강영향을 각각 정량적으로 분석하였다. 둘째, 일별 사망에 대한 미세먼지(PM₁₀)와 기온의 상호 관련성을 살펴보고, 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 사망영향을 분석하여 기온이 미세먼지(PM₁₀)의 사망영향을 수정효과하는 지를 파악하고자 하였다.

II. 연구자료 및 방법

본 연구는 1999년부터 2010년 여름철(6, 7, 8월)

서울시를 대상으로 기상자료, 대기오염자료, 사망자료를 이용하여 미세먼지(PM₁₀)와 기온이 사망에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

1. 기상자료

기상자료는 기상청의 기상대에서 관측하는 기온과 상대습도 자료를 이용하였으며, 기온과 상대습도는 1시간 간격으로 관측되고 있다. 기온의 경우 당일(lag=0)과 하루 전날(lag=1) 일별 평균 기온의 이동평균값(moving average)을 일별 대푯값으로 사용하였다. 상대습도의 일별 대푯값은 일별 평균값을 사용하였다.

2. 대기오염자료

대기오염자료는 국립환경과학원의 국가 지역 대기 측정망 자료를 이용하였으며, 서울시에 27개 대기오염자동측정소를 운영하고 있다. 본 연구에서는 27개 측정망의 시간대별 미세먼지(PM₁₀) 농도값을 평균하여 해당 분석 지역의 일 24회 시간별 대표치를 평균하고, 이것의 일별 평균값을 일별 대푯값으로 사용하였다.

3. 사망자료

사망자료는 통계청의 사망원인 통계자료를 이용하였다. 사망자료는 사망 시점을 기준으로 분석 대상 지역에 거주하지 않거나 사고사(International Classification of Disease, 10th Revision; ICD-10, code V00~Y99)로 인한 사망자는 분석에서 제외하였다. 본 연구에서는 사고사를 제외한 전체원인 사망(ICD-10, code A00~U99)을 대상으로 하였다.

4. 통계분석방법

본 연구에서는 기온 상승과 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가가 일별 사망에 미치는 영향을 각각 평가하였다. 또한 기온과 미세먼지(PM₁₀)가 상호작용하여 일별 사망에 영향을 주는 지를 반응표면모형(response surface model)을 적용하여 평가하고, 상호작용이 있다고 판단되면 기온의 역치수준을 기준으로 층화하여 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가가 일별 사망에 미치는 영향을 분석하였다.

첫 번째 단계로 기온 상승과 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가에 따른 일별 사망발생의 변화를 정량적으로 산

출하기 위해, 포아송 회귀 모형(Poisson regression model)을 적용하였다. 포아송 회귀 모형에서는 평활 함수(Smoothing function)를 이용하여 분석에 영향을 줄 수 있는 혼란변수들을 보정할 수 있으며, 평활함수는 자연 3차 스플라인(Natural Cubic Spline; NS)을 적용하였다. 기온 상승에 따른 사망발생의 변화를 추정하는 최종 모형은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \ln E[Y] = & \alpha_0 + D_0(\text{day of week}) + D_1(\text{year}) \\ & + ns(\text{date}) + ns(\text{humidity}) + ns(O_3) \\ & + ns(\text{temperature}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $E[Y]$ 는 일별 기대 사망자수이며, 요일 변수(day of week)는 요일과 휴일효과를 보정하기 위해 가변수(Dummy variable)를 적용하고, 연도 변수(year)는 건강영향의 장기추세를 보정하기 위해 가변수(Dummy variable)를 적용하였다. 날짜 변수(date)는 여름철 동안의 건강영향 수준 변화를 보정하기 위해 자유도(degree of freedom) 3으로 평활하였다. 또한 분석대상기간이 여름철으로 대기오염물질 중 오존의 농도가 높으므로, 오존 농도(O_3)를 평활하여 보정하였다.

미세먼지(PM_{10}) 농도 증가에 따른 사망발생의 변화를 추정하는 최종 모형은 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \ln E[Y] = & \alpha_0 + D_0(\text{day of week}) + D_1(\text{year}) \\ & + ns(\text{date}) + ns(\text{humidity}) + ns(O_3) \\ & + ns(PM_{10}) \end{aligned} \quad (2)$$

두 번째 단계로 기온 상승과 미세먼지(PM_{10}) 농도 증가에 따른 건강영향 관련성을 시각적으로 파악하기 위해 반응표면모형(Response surface model)을 적용하였다. 반응표면모형은 두 개 요인에 의한 영향을 3차원의 표면 형태로 나타내며, 두 개 요인에 의한 전반적인 관계를 파악하는데 유용하다.^{20,21)} 본 연구에서 적용한 반응표면모형은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \ln E[Y] = & \alpha_0 + D_0(\text{day of week}) + D_1(\text{year}) \\ & + ns(\text{date}) + ns(\text{humidity}) + ns(O_3) \\ & + ns(\text{temperature} * PM_{10}) \end{aligned} \quad (3)$$

마지막 단계로, 반응표면모형에서 건강영향에 대

해 기온과 미세먼지(PM_{10}) 농도가 전체적인 관련성이 있는 것으로 판단되면, 기온 수준별로 층화하여 미세먼지(PM_{10})의 건강영향을 분석하였다. 기온 수준은 기온의 역치수준을 기준으로 적용하였고, 기온 역치수준 이상과 기온 역치수준 미만으로 구분하였다. 기온 수준별 일별 미세먼지(PM_{10})의 건강영향 관련성을 선형으로 분석한 모형식은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \ln E[Y] = & \alpha_0 + D_0(\text{day of week}) + D_1(\text{year}) \\ & + ns(\text{date}) + ns(\text{humidity}) + ns(O_3) + ns(PM_{10}^-) \\ & + ns(PM_{10}^+) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 일별 기온이 역치수준 이상인 경우 PM_{10}^- 은 0이고, PM_{10}^+ 은 일별 미세먼지(PM_{10}) 농도값이다. 또한 일별 기온이 역치수준 미만인 경우 PM_{10}^- 은 일별 미세먼지(PM_{10}) 농도값이고, PM_{10}^+ 은 0이다.

본 연구에서는 미세먼지(PM_{10}) 건강영향을 평가하는데 있어서 지연효과(Lag effect)를 고려하였다. 대기오염물질에 대한 적절한 지연효과에 대해서 규명된 바가 없기 때문에 당일(lag=0)부터 최고 5일 전(lag=5)까지의 지연효과를 평가하고, 건강영향과 연관성이 가장 높게 나타난 날을 지연효과 일로 선정하였다. 통계 분석은 S-Plus 2000 Professional Release와 SAS 9.2를 이용하였다.

III. 연구결과

1. 기술 통계 분석

1999년부터 2010년까지 여름철(6, 7, 8월) 기간 동안 기상변수, 대기오염변수, 일별 사망자수의 평균값, 표준편차 및 분포는 Table 1과 같다. 연구기간동안 일평균 기온은 24.46°C이었으며, 일평균 습도는 71.75% 이었다.

미세먼지(PM_{10})의 일평균 농도는 50.05 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이고, 총 연구기간인 1,104일 중에서 대기환경기준인 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과한 일수는 70일이었다. 해당기간동안 미세먼지(PM_{10})의 최소값은 9.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나 최대값은 212.44 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 범위가 상당히 크게 나타났으며, 미세먼지(PM_{10}) 농도의 상위1%는 이상치(outlier)로 간주하여 결측(missing) 처리하였다.

Table 1. Daily distribution of weather, PM₁₀ and mortality between 1999 and 2010 in Seoul

Variables	Percentiles					Mean	Standard deviation
	Min	25%	Median	75%	Max		
Temperature(°C)	14.94	22.74	24.60	26.19	30.43	24.46	2.56
Humidity(%)	24.00	65.21	72.06	79.85	96.00	71.75	11.82
O ₃ (ppb)	3.35	22.88	35.86	50.20	109.47	37.62	18.84
PM ₁₀ (μg/m ³)	9.48	28.06	44.63	65.29	212.44	50.05	29.20
Number of death							
All age	56	80	86.5	93	133	87.07	10.19
≥ 65 year age	28	50	56	63	103	56.95	9.23

Fig. 1. Dose-response association of temperature with mortality in Seoul, 1999-2010.**Table 2.** Percent increase in risk of death (95% CI) per 1°C in temperature and per 10 μg/m³ in PM₁₀ in Seoul, 1999-2010

Variable		All age		≥ 65 year age	
		Percent increase in daily mortality	95% Confidence interval	Percent increase in daily mortality	95% Confidence interval
Temperature	Per 1°C	2.92	1.42~4.44	4.86	2.97~6.80
PM ₁₀	Per 10 μg/m ³	0.43	0.13~0.72	0.44	0.06~0.81

전체 연구기간 동안 사고사와 같은 외인사(ICD-10, code V00~Y99)를 제외한 서울시의 전체 연령 집단의 사망자수는 96,123명으로 일평균 사망자수는 87.07명 이었다. 65세 이상 연령집단의 사망자수는 62,871명으로 전체 사망자수의 65%를 차지하였으며, 일평균 사망자수는 56.95명이었다.

2. 미세먼지(PM₁₀)와 기온이 사망에 미치는 영향

서울시 기온의 이동평균값이 1°C 상승함에 따른 일별 사망자수에 대한 Log(상대위험비) 함수를 나타낸 것은 Fig. 1과 같다. Fig. 1에서와 같이 일별 기온 상승으로 인한 일별 사망자수 증가는 역치관련성을 나타내었으며, 이것을 정량적으로 평가한 결과는

Table 2와 같다.

서울시 일별 사망에 대한 기온의 역치수준은 26.9°C 이었으며, 26.9°C 이상에서 기온이 1°C 상승하면 전체 연령집단에서 사망발생위험을 각각 2.92%(95% Confidence Interval[CI]: 1.42~4.44%) 높였다. 또한 기온 역치수준 이상에서 기온이 1°C 상승하면 65세 이상 연령집단에서 사망발생위험을 4.86%(95% CI: 2.97~6.80%) 높여 민감집단으로 보고된 65세 이상 연령집단에서 전체 연령집단에 비해 기온상승으로 인한 건강영향을 더 받는 것으로 나타났다.

서울시 미세먼지(PM₁₀) 농도가 10 μg/m³ 증가함에 따른 일별 사망자수에 대한 Log(상대위험비) 함수를 나타낸 것은 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서와 같이 일별

Fig. 2. Dose-response association of PM₁₀ with mortality in Seoul, 1999-2010.

Fig. 3. Bivariate response surface of temperature and PM₁₀ on mortality of all age group in Seoul.

미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인한 일별 사망자수 증가는 선형관련성을 나타내었고, 미세먼지(PM₁₀)의 사망발생위험을 정량적으로 평가한 결과는 Table 2와 같다.

일별 미세먼지(PM₁₀)와 일별 사망의 관련성에서 지연효과를 살펴본 결과, 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 각각 당일(lag=0)과 하루전(lag=1) 날에 관련성이 가장 강한 것으로 나타났다.

미세먼지(PM₁₀) 농도가 10 µg/m³ 증가시 전체 연

령집단과 65세 이상 연령집단에서 사망발생위험을 각각 0.43%(95% CI: 0.13~0.72%)과 0.44%(95% CI: 0.06~0.81%) 높였다(Table 2).

3. 미세먼지(PM₁₀)와 기온의 상호작용이 사망에 미치는 영향

건강영향에 대한 일별 기온 상승과 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가의 상호작용을 평가하기 위해 반응 표면모형을 적용하여 일별 기온, 일별 미세먼지(PM₁₀),

Fig. 4. Bivariate response surface of temperature and PM₁₀ on mortality among people aged ≥ 65 years in Seoul.

Table 3. Percent increase in risk of death (95% CI) for a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in PM₁₀ across temperature level in Seoul, 1999-2010

Cur-off	Temperature	All age		≥ 65 year age	
		Percent increase in daily mortality	95% Confidence interval	Percent increase in daily mortality	95% Confidence interval
26.9°C	Low	0.38	0.09~0.68	0.31	-0.07~0.68
	High	1.09	0.47~1.72	1.35	0.65~2.06

그리고 일별 사망지수의 3차원 Log(상대위험비)곡선으로 나타낸 것은 Fig. 3 및 Fig. 4와 같다. Fig. 3 및 Fig. 4의 왼쪽 상단 그림에서와 같이, 일별 사망에 대하여 기온 상승과 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가는 상호관련성이 있는 것으로 나타났다. 서울시의 일별 사망에 대한 기온 역치수준이 26.9°C이었으므로, Fig. 3과 Fig. 4의 하단 그림에서와 같이 기온 역치수준인 26.9°C를 기준으로 26.9°C 이상인 날과 26.9°C 미만인 날로 구분하여, 일별 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가로 인한 일별 사망발생위험을 평가하였다. Fig. 3과 Fig. 4의 오른쪽 상단 그림은 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 사망영향을 나타낸 것이다.

전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 기온 수

준별 미세먼지(PM₁₀)의 사망발생위험을 정량적으로 평가한 결과는 Table 3과 같다. 전체 연령집단에서 기온이 26.9°C 미만인 날 미세먼지(PM₁₀) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 사망발생위험은 0.38%(95% CI: 0.09~0.68%)이었고, 26.9°C 이상인 날 미세먼지(PM₁₀)로 인한 사망발생위험은 1.09%(95% CI: 0.47~1.72%)으로 기온 수준에 따른 미세먼지(PM₁₀)의 사망발생위험의 차이는 0.71%이었다.

65세 이상 연령집단에서 26.9°C 미만인 날 미세먼지(PM₁₀) 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 사망발생위험은 0.31%(95% CI: -0.07~0.68%)로 통계적으로 유의하지 않은 반면, 26.9°C 이상인 날 미세먼지(PM₁₀)의 사망발생위험은 1.35%(95% CI: 0.65~2.06%)로 기온 수

준에 따른 미세먼지(PM₁₀)의 사망발생위험의 차이는 1.04%이었다.

IV. 고찰 및 결론

본 연구에서는 서울시 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단을 대상으로 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가가 일별 사망에 미치는 영향과 기온 상승이 일별 사망에 미치는 영향을 정량적으로 평가하였다. 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가와 기온 상승은 사망발생에 유의한 영향을 주고 있었으며, 이것은 기존 연구결과와 일관된 결과를 보였다.^{6,8)} 또한 반응표면모형을 적용하여 미세먼지(PM₁₀)와 기온의 상호 관련성을 파악하고, 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 사망영향을 분석하여 기온 역치수준 미만인 날 보다 기온 역치수준 이상인 날 미세먼지(PM₁₀)로 인한 사망영향이 큰 것을 확인하였다.

일부 국외연구들은 대기오염으로 인한 사망영향에서 계절 요인의 수정효과를 보고하였다. 12개 유럽 도시를 대상으로 한 APHEA(Air Pollution and Health : A European Approach) 연구에서는 미세먼지(PM₁₀)와 전체 사망발생위험을 계절로 구분하여 분석하였다. 서유럽지역에서 미세먼지(PM₁₀) 10 µg/m³ 증가시 추운 계절의 사망발생위험은 1.0% (95% CI: -0.02~2.2%)인 것에 비해, 따뜻한 계절의 사망발생위험은 4.3%(95% CI: 2.7~6.0%)이었다.²²⁾ Peng 등은(2005) 미국 100개 도시를 대상으로 한 NMMAPS(National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study) 연구에서 봄철과 여름철에만 미세먼지(PM₁₀)와 일별 사망의 관련성이 통계적으로 유의하다고 보고하였다.²³⁾

대기오염으로 인한 사망영향이 계절별로 차이가 나타나는 것을 기온의 효과로 간주하는 것은 무리가 있을 수 있다. 여름철 기간 동안 미세먼지(PM₁₀)로 인한 건강피해가 더 커지는 것은 노출의 차이 때문일 수도 있다. 즉, 겨울철에 비해 여름철에 창문을 열어둔다거나 또는 실외에서 좀더 많은 시간을 보내기 때문에 여름철에 미세먼지(PM₁₀)에 보다 많이 노출될 수 있다. 그밖에도 계절에 따라 미세먼지(PM₁₀)의 조성성분에 차이가 있어 계절에 따른 건강영향에 차이가 있을 수 있다.²⁴⁾

최근 들어 반응표면모형을 적용하여 대기오염물질

과 기온의 상호작용을 시각적으로 파악하고 기온 수준별 건강영향을 평가하는 연구들이 수행되고 있다. Ren 등은(2006) 호주 브리스베인을 대상으로 반응표면모형을 이용하여 미세먼지(PM₁₀)와 기온의 상호 관련성을 파악하고, 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향을 평가하였다. 미세먼지(PM₁₀) 10 µg/m³ 증가시 27°C 미만인 날 심혈관계 사망발생위험은 1.97%(95% CI: -2.68~6.83%)이었으나, 27°C 이상인 날 심혈관계 사망발생위험은 6.96%(95% CI: 0.95~13.33%)이었다.²⁵⁾ 이탈리아 9개 도시를 대상으로 한 Stagogia 등(2008)의 연구에서는 대기오염물질과 기온의 상호작용을 반응표면모형으로 파악하고, 환자-교차연구(case-cross design)방법을 적용하여 기온 수준별로 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향을 분석하였다. 연구기간동안 기온 수준이 전체 기온범위의 50% 이하인 경우 미세먼지(PM₁₀)로 인한 사망발생위험은 0.21%(95% CI: -0.06~0.24%)이었으나, 기온 수준이 75% 이상인 날의 사망발생위험은 2.55%(95% CI: 1.58~3.52%)이었다.²⁴⁾ 또한 Meng 등은(2012) 중국 8개 도시를 대상으로 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향을 분석하였다. 미세먼지(PM₁₀) 10 µg/m³ 증가시 기온 수준이 전체 기온범위의 5~95%에 해당하는 날 사망발생위험은 0.54%(95% CI: 0.39~0.69%)이었으나, 고온인 날(기온 수준이 95% 이상인 날) 사망발생위험은 1.35%(95% CI: 0.80~1.91%)로 고온인 날 사망발생위험이 더 높게 나타났다.²⁶⁾

기온이 대기오염과 건강영향의 관계를 수정효과하는 것에 대한 생리학적 경로는 아직까지 명확하게 규명되지 않았고, 생물학적 또는 생리학적 반응이 복잡하기 때문에 상호작용의 메커니즘은 매우 복잡적이다.²⁷⁾ Gordon(2003)은 기온과 대기오염의 두 요인에 동시에 노출되는 경우, 두 요인의 상호작용하여 건강에 영향을 미치는 것은 생리적으로 타당하다고 보고하였다.²⁸⁾ 고온에 노출되면 생리학적 스트레스를 야기하고 이에 따라 유해물질에 대한 생리학적 반응이 변화하게 된다.²⁹⁾ 체온 조절계에서는 심혈관계, 호흡기계, 발한의 3개 주요 시스템을 활성화하여 과도한 열을 제거한다. 이와 같은 체온 조절계의 활성화는 유해물질이 체내로 유입하는 것에 직접적 또는 간접적으로 영향을 줄 수 있어, 대기오염물질의 체내 흡수를 증가시킨다.²⁸⁾ 또한 대기오염에 노출되면 흡입을 통해 기도에 직접적으로 영향을 주게

되고, 자율신경계의 변화와 염증을 유발하게 된다. 결국 대기오염물질과 기온에 함께 노출되면 두 요인의 상호작용으로 인한 건강영향을 초래하게 된다.²⁵⁾

본 연구에서는 몇 가지 제한점이 있다. 첫째, 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가와 기온 상승의 상호작용으로 인한 건강영향을 파악하기 위해 반응표면모형을 적용하여 전반적인 관련성을 파악하였다. 그러나 반응표면모형에서는 미세먼지(PM₁₀)와 기온의 상호작용에 의한 건강영향을 통계적 값으로 추정할 수 없어 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향을 평가하였다. 둘째, 미세먼지(PM₁₀)와 기온의 상호작용을 평가하기 위해, 기온의 건강영향이 나타나기 시작하는 시점인 기온의 역치수준을 기준으로 하여 기온 수준별 미세먼지(PM₁₀)의 건강영향을 평가하였다. 그러나 기온의 기준을 어떻게 설정하느냐에 따라 건강영향은 차이가 있을 수 있다. Ren 등은(2006) 기온의 기준(cut-off)을 다르게 적용하여 대기오염으로 인한 건강영향을 각각 평가하여 비교한 바 있다.²⁵⁾

이러한 제한점에도 불구하고 본 연구에서는 기온이 높으면 동일한 수준의 미세먼지(PM₁₀) 농도 증가가 사망에 미치는 영향이 더 커지는 것을 확인하였다. IPCC 4차 평가보고서(2007)에서는 기후변화에 따른 미래 고온의 발생 빈도와 강도가 커질 것으로 예측하였고,¹³⁾ 이에 따라 기후변화로 인한 미래 미세먼지(PM₁₀)로 인한 건강피해는 더욱 커질 것으로 예상된다. 따라서 기후변화와 대기오염으로 인한 건강피해를 줄이기 위한 선제적 대응방안 마련이 시급하다.

감사의 글

이 연구는 환경부 국립환경과학원으로부터 지원받은 「기후변화에 따른 대기오염 및 건강영향 연구(II)」의 연구결과 일부입니다.

참고문헌

1. Canova C, Dunster C, Kelly FJ, Minelli C, Shah PL, Caneja C, et al. PM10-induced hospital admissions for asthma and chronic obstructive pulmonary disease: the modifying effect of individual characteristics. *Epidemiology*. 2012; 23(4): 607-615.
2. Faustini A, Stafoggia M, Cappai G, Forastiere F. Short-term effects of air pollution in a cohort of patients with chronic obstructive pulmonary disease. *Epidemiology*. 2012; 23(6): 861-879.
3. Ostro B, Roth L, Malig B, Marty M. The effects of fine particle components on respiratory hospital admissions in children. *Environ Health Perspect*. 2009; 117(3): 475-480.
4. Colais P, Faustini A, Stafoggia M, Berti G, Bisanti L, Cadum E, et al.; EPIAIR Collaborative Group. Particulate air pollution and hospital admissions for cardiac diseases in potentially sensitive subgroups. *Epidemiology*. 2012; 23(3): 473-481.
5. Katsouyanni K, Samet JM, Anderson HR, Atkinson R, Le Tertre A, Medina S, et al.; HEI Health Review Committee. Air pollution and health: a European and North American approach (APH-ENA). *Res Rep Health Eff Inst*. 2009; 142: 5-90.
6. Goodman PG, Dockery DW, Clancy L. Cause-specific mortality and the extended effects of particulate pollution and temperature exposure. *Environ Health Perspect*. 2004; 112(2): 179-185.
7. World Health Organization. Public health Advice on preventing health effects of heat: New and updated information for different audiences; 2011.
8. Son JY, Lee JT, Anderson GB, Bell ML. The impact of heat waves on mortality in seven major cities in Korea. *Environ Health Perspect*. 2012; 120(4): 566-571.
9. Ebi KL, Mills DM, Smith JB, Grambsch A. Climate change and human health impacts in the United States: an update on the results of the U.S. national assessment. *Environ Health Perspect*. 2006; 114(9): 1318-1324.
10. Medina-Ramn M, Zanobetti A, Cavanagh DP, Schwartz J. Extreme temperatures and mortality: assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case-only analysis. *Environ Health Perspect*. 2006; 114(9): 1331-1336.
11. Michelozzi P, Accetta G, De Sario M, D'Ippoliti D, Marino C, Baccini M, et al.; PHEWE Collaborative Group. High temperature and hospitalizations for cardiovascular and respiratory causes in 12 European cities. *Am J Respir Crit Care Med*. 2009; 179(5): 383-389.
12. McMichael AJ, Wilkinson P, Kovats RS, Pattenden S, Hajat S, Armstrong B, et al. International study of temperature, heat and urban mortality: the 'ISOThURM' project. *Int J Epidemiol*. 2008; 37(5): 1121-1131.
13. IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). Climate change 2007: The physical science basis.

- Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S; Qin, D; Manning, M; et al.; (eds.)]. Cambridge, United Kingdom and New York, NY: Cambridge University Press; 2007. p. 996.
14. Jacob DJ, Winner DA. Effect of climate change on air quality. *Atmos Environ*. 2009; 43: 5163.
 15. Vautard R, Hauglustaine D. Impact of global climate change on regional air quality: Introduction to the thematic issue. *Comptes Rendus Geoscience*. 2007; 339(11-12): 703-708.
 16. Ren C, Williams GM, Morawska L, Mengersen K, Tong S. Temperature enhanced effects of ozone on cardiovascular mortality in 95 large US communities, 1987-2000: Assessment using the NMMAPS data. *Arch Environ Occup Health*. 2009; 64(3): 177-184.
 17. Pattenden S, Armstrong B, Milojevic A, Heal MR, Chalabi Z, Doherty R, et al. Ozone, heat and mortality: acute effects in 15 British conurbations. *Occup Environ Med*. 2010; 67(10): 699-707.
 18. Cheng Y, Kan H. Effect of the interaction between outdoor air pollution and extreme temperature on daily mortality in Shanghai, China. *J Epidemiol*. 2012; 22(1): 28-36.
 19. Qian Z, He Q, Lin HM, Kong L, Bentley CM, Liu W, et al. High temperatures enhanced acute mortality effects of ambient particle pollution in the "oven" city of Wuhan, China. *Environ Health Perspect*. 2008; 116(9): 1172-1178.
 20. Chambers, JM, and Hastie TJ. *Statistical models in S*. London: Chapman & Hall. 1993.
 21. Greenland, S. Basic problems in interaction assessment. *Environ Health Perspect*. 1993; 101:s59-66.
 22. Katsouyanni K, Touloumi G, Spix C, Schwartz J, Balducci F, Medina S, et al. Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *Air Pollution and Health: a European Approach. BMJ*. 1997; 314(7095): 1658-1663.
 23. Peng RD, Dominici F, Pastor-Barriuso R, Zeger SL, Samet JM. Seasonal analyses of air pollution and mortality in 100 US cities. *Am J Epidemiol*. 2005; 161(6): 585-594.
 24. Stafoggia M, Schwartz J, Forastiere F, Perucci CA; SISTI Group. Does temperature modify the association between air pollution and mortality? A multicity case-crossover analysis in Italy. *Am J Epidemiol*. 2008; 167(12): 1476-1485.
 25. Ren C, Tong S. Temperature modifies the health effects of particulate matter in Brisbane, Australia. *Int J Biometeorol*. 2006; 51(2): 87-96.
 26. Meng X, Zhang Y, Zhao Z, Duan X, Xu X, Kan H. Temperature modifies the acute effect of particulate air pollution on mortality in eight Chinese cities. *Sci Total Environ*. 2012; 435-436: 215-221.
 27. Ren C, Williams GM, Mengersen K, Morawska L, Tong S. Does temperature modify short-term effects of ozone on total mortality in 60 large eastern US communities? An assessment using the NMMAPS data. *Environ Int*. 2008; 34(4):451-458.
 28. Gordon CJ. Role of environmental stress in the physiological response to chemical toxicants. *Environ Res*. 2003; 92(1): 1-7.
 29. Irres RA, Holz O, Zachgo W, Timm P, Koschik S, Miller B, et al. The effect of repeated ozone exposures on inflammatory markers in bronchoalveolar lavage fluid and mucosal biopsies. *Am J Respir Crit Care Med*. 2000; 161(6): 1855-1861.