

서울시 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인한 사망영향

배현주[†]
한국환경정책·평가연구원

Effects of Short-term Exposure to PM₁₀ and PM_{2.5} on Mortality in Seoul

Hyun-joo Bae[†]
Korea Environment Institute, Seoul, Korea

ABSTRACT

Objectives: Although a number of epidemiologic studies have examined the association between air pollution and mortality, data limitations have resulted in fewer studies of particulate matter with an aerodynamic diameter of $\leq 2.5 \mu\text{m}$ (PM_{2.5}). We conducted a time-series study of the acute effects of particulate matter with an aerodynamic diameter of $\leq 10 \mu\text{m}$ (PM₁₀) and PM_{2.5} on the increased risk of death for all causes and cardiovascular mortality in Seoul, Korea from 2006 to 2010.

Methods: We applied the generalized additive model (GAM) with penalized splines, adjusting for time, day of week, holiday, temperature, and relative humidity in order to investigate the association between risk of mortality and particulate matter.

Results: We found that PM₁₀ and PM_{2.5} were associated with an increased risk of mortality for all causes and of cardiovascular mortality in Seoul. A $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in the concentration of PM₁₀ corresponded to 0.44% (95% Confidence Interval [CI]: 0.25-0.63%), and 0.95% (95% CI: 0.16-1.73%) increase of all causes and of cardiovascular mortality. A $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in the concentration of PM_{2.5} corresponded to 0.76% (95% CI: 0.40-1.12%), and 1.63% (95% CI: 0.89-2.37%) increase of all causes and cardiovascular mortality.

Conclusion: We conclude that PM₁₀ and PM_{2.5} have an adverse effect on population health and that this strengthens the rationale for further limiting levels of PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul.

Keywords: All causes mortality, Cardiovascular mortality, Short-term exposure, PM_{2.5}, PM₁₀

I. 서 론

대기오염물질 중 입자상 물질(Particulate Matter; PM)은 천식 악화, 만성폐쇄성폐질환 등 호흡기계 관련질환¹⁻³⁾과 불규칙한 심장박동, 혈관 기능 장애, 부정맥 등 심혈관계 관련질환 발생위험⁴⁻⁶⁾을 높이는 것으로 보고되었다. 또한 세계 여러 지역을 대상으로

한 연구에서 입자상 물질은 급성 및 만성 조기사망 과도 유의한 관련성이 있는 것으로 보고되었다.⁷⁻¹³⁾

입자상 물질의 크기와 성분은 매우 복잡하고 다양하며, 입자의 크기, 표면적, 화학적 조성이 건강영향을 결정하게 된다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 입자상 물질은 크기에 따라 TSP(Total Suspended Particle), PM₁₀(Particulate Matter less than $10 \mu\text{m}$ in diameter), PM_{10-2.5} (Particulate Matter in the

[†]Corresponding author: Korea Environment Institute, Seoul 122-706, Tel: +82-2-380-7681, Fax: +82-2-380-7744, E-mail: hjbae@kei.re.kr

Received: 22 September, 2014, Revised: 16 October, 2014, Accepted: 28 October, 2014

2.5-10 μm range), $\text{PM}_{2.5}$ (Particulate Matter less than 2.5 μm in diameter)로 구분할 수 있다.

미세먼지(PM_{10})와 건강영향 연구를 종합분석한 연구¹⁷⁾에서, 미세먼지(PM_{10}) 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 초과사망발생위험은 미국 0.29%(95% Confidence Interval[CI] : 0.18~0.40%), 유럽 0.33% (95% CI : 0.22~0.44%), 캐나다 0.84% (95% CI : 0.30~1.40%)인 것으로 보고하였다. 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 건강영향 연구를 메타분석한 Atkinson의 연구결과¹⁸⁾에서 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)로 인한 초과사망발생위험은 미국 0.94~2.08%이었고, 유럽 1.23%, 서태평양지역 0.25~0.90%으로 입자상 물질의 건강영향은 지역별로 차이를 보이고 있었다.

미세먼지(PM_{10})의 경우 환경역학과 독성학적 연구 결과를 토대로 많은 국가들이 대기환경기준을 마련하여 관리하고 있으나, 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 경우 미국, 일본, 호주, 중국 등 일부 국가에서만 규제기준을 정하고 있다. 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency; EPA)은 1999년 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 대기질 기준 마련하였고, 2006년 환경역학연구결과를 토대로 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 24시간 농도기준을 65 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개정하였다.¹⁹⁾ 또한 2013년 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 단기 및 장기 노출로 인한 조기사망, 병원입원, 응급실 방문, 호흡기계 발달 저해 등 건강위험을 줄이기 위하여 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 연평균 농도기준을 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 12 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강화한 바 있다.¹⁹⁾

우리나라에서는 2011년 ‘환경정책기본법’ 개정을 통하여 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 대기환경기준을 24시간 농도기준 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 연평균농도 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 공표하였고, 2015년부터 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 대기환경기준을 시행예정이다. 그러나 아직까지 대기환경기준을 과학적으로 뒷받침하기 위한 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)와 건강영향에 대한 연구는 미비한 상황이다. 본 연구에서는 서울시를 대상으로 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)의 단기 노출로 인한 전체원인 및 심혈관계 사망영향을 파악하고자 하였다.

II. 연구자료 및 방법

본 연구는 2006년부터 2010년까지 서울시를 대상으로 대기오염자료, 기상자료, 사망자료를 이용하여

미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$)가 사망에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

1. 대기오염자료

미세먼지(PM_{10}) 농도 자료는 국립환경과학원의 국가 지역 대기측정망 자료를 이용하였고, 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도 자료는 서울시 보건환경연구원의 대기측정망 자료를 이용하였다.

서울시는 27개 대기오염자동측정소를 운영하고 있으며, 본 연구에서는 대기측정망의 시간대별 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도값을 평균하여 일 24회 시간별 대푯값을 계산하고, 이것의 일별 평균값을 일별 대푯값으로 사용하였다.²⁰⁾

2. 기상자료

기상자료는 기상청의 기상 자동측정망 자료를 이용하였고, 기상자료 중 기온, 상대습도와 해수면 기압을 이용하였다. 이것은 사망률의 일일변동이 기온, 습도와 해수면기압의 변화에 따라 관련성이 있는 것으로 보고되었기 때문이다.²¹⁾ 기온과 상대습도는 1시간 간격으로 관측되고 있으며, 기온의 경우 당일(lag=0)과 하루 전날(lag=1) 일별 평균 기온의 이동평균값(moving average)를 일별 대푯값으로 사용하였다. 상대습도는 일별 평균값을 일별 대푯값으로 사용하였다.

3. 사망자료

사망자료는 통계청의 사망원인 통계자료를 이용하였다. 사망자료는 사망원인에 따라서 전체원인 사망과 심혈관계 사망으로 구분하였다. 전체원인 사망의 경우 사망원인이 사고사(International Classification of Disease, 10th Revision; ICD-10, code V00~Y99)인 사망외인을 분석에서 제외한 전체원인 사망(ICD-10, code A00~U99)을 대상으로 하였다. 또한 우리나라 3대 사망원인 중의 하나인 심혈관계 사망의 경우 ICD-10 코드가 I00~I99를 대상으로 하였다.

4. 통계분석방법

본 연구에서 일별 미세먼지(PM_{10})와 초미세먼지($\text{PM}_{2.5}$) 농도 증가가 일별 사망에 미치는 영향을 평가하기 위하여 시계열분석하였다. 일반적으로 전체 인구집단에서 일별 사망은 매우 드문 사건이므로 일

별 사망자수에 대한 확률분포는 포아송분포(Poisson distribution)를 사용한다. 포아송 회귀 모형(Poisson Regression Model)의 일반식은 다음 식과 같다.

$$\ln E(Y) = B_0 + B_1 X_1 + B_2 X_2 + B_3 X_3 + \dots + B_r X_r$$

여기서, E[Y]는 종속변수에 대한 기댓값이고, X_i는 예측변수이고, B_i는 예측변수에 대한 회귀계수(regression coefficient)이다.

대기오염의 건강영향을 분석하기 위해 일반화 부가모형(Generalized additive model, GAM)을 적용하였다. GAM 모형은 혼란변수들을 보정하고 예측변수에 대한 비선형적 관계를 반영하기 위하여 비모수적 평활(nonparametric smoothing)에 의해 회귀분석에 적합시키는 것이다. 본 연구에서는 일별 사망에 대한 장기추세, 계절변동, 기상요인, 요일 효과 등의 혼란변수를 보정하였다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 사망영향에 대한 최종 분석 모형은 다음 식과 같다.

$$\ln E[Y] = B_0 + B_1(\text{Pollutant}) + D(\text{Day of week}) + S_1(\text{Temperature}) + S_2(\text{Humidity}) + S_3(\text{Pressure at sealevel}) + S_4(\text{Date}) \quad (1)$$

여기서, E[Y]는 일별 기대 사망자수이며, 요일(day of week)는 요일과 휴일효과를 보정하기 위한 가변서(Dummy variable)를 적용하였고, S는 각 변수에 대한 Loess평활함수이다.

통계모형의 선정은 모형적합도(goodness of fit)의 기준이 되는 통계량인 Akaike's information criterion (AIC)가 가장 작은 값을 가지는 각 변수에 대한 평활함수를 선택하여 모형으로 선정하였다.²²⁾

또한 대기오염으로 인한 건강영향은 대기오염이 발생한 당일에 즉시 영향을 줄 수도 있지만, 일정 시간이 경과한 이후에 나타날 수도 있으므로 대기오염이 일별 사망에 미치는 지연효과(lag effect)를 고려하였다. 대기오염-건강영향에 대한 적절한 지연효과에 대해 확정된 바가 없으므로 건강영향 발생 당일(lag=0)부터 최고 6일 이전(lag=6)까지의 지연효과를 분석하였다. 대기오염과 건강영향의 관련성이 가장 높게 나타난 날을 지연효과일로 선정하였다.

포아송 회귀분석의 회귀계수(β)는 대기오염물질의 단위 농도 증가가 사망발생건수에 미치는 정도를 의미하므로, 대기오염 농도 증가로 인한 건강영향 발

생위험인 상대위험비(Relative Risk, RR)는 $RR = \exp(\beta)$ 로 계산한다. 또한 상대위험비를 이용하여 건강영향의 백분율 변화(percentage change)는 식 (2)와 같이 계산한다.

$$\% \text{chance} = (RR - 1) \times 100 \quad (2)$$

자료의 정리는 SAS 9.2 version을 사용하였고, 자료를 GAM에 적합시키는 것은 S-Plus 6.1 version을 이용하였다.

III. 연구결과

1. 기술 통계 분석

2006년부터 2010년까지 서울시 기상변수, 대기오염변수, 사망원일별 사망자수의 평균값, 표준편차 및 분포는 Table 1과 같다. 연구기간동안 일평균 기온은 12.88°C이었고, 일평균 습도는 61.26%이었다.

미세먼지(PM₁₀)의 일평균 농도는 55.70 μg/m³이고, 총 연구기간인 1,826일 중에서 대기환경기준인 100 μg/m³을 초과한 일수는 154일이었다. 초미세먼지(PM_{2.5})의 일평균 농도는 27.18 μg/m³이고, 총 연구기간인 1,826일 중에서 2015년부터 시행예정인 초미세먼지(PM_{2.5})의 대기환경기준 50 μg/m³을 초과한 일수는 153일이었다.

연구기간동안 미세먼지(PM₁₀)의 최소값은 8.97 μg/m³이고 최대값은 782.55 μg/m³이었고, 초미세먼지(PM_{2.5})의 최소값은 4.22 μg/m³이고 최대값은 219.03 μg/m³으로 입자상 물질의 농도 범위가 상당히 크게 나타났다. 따라서 일별 평균 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도의 변동이 심한 상위 1%에 대한 것은 이상치(outlier)로 간주하여 결측(missing) 처리하였다.

전체 연구기간 동안 사고사와 같은 외인사(ICD-10, code V00~Y99)를 제외한 서울시의 전체원인 사망자수는 전체 연령집단에서 170,847명이었고, 65세 이상 연령집단의 사망자수는 119,010명으로 전체 사망자수의 69.66%를 차지하였다. 연구기간 동안 전체 연령집단의 심혈관계 관련질환으로 인한 사망자수는 43,063명이었고, 전체 사망자수의 25.20%를 차지하였다. 연구기간동안 발생한 심혈관계 사망자수는 65세 이상 연령집단의 사망자수는 33,780명이고, 65세 이상 연령집단에서 심혈관계 사망은 전체사망의 28.38%를 차지하였다.

Table 1. Daily distribution of weather, PM₁₀, PM_{2.5} and mortality between 2006 and 2010 in Seoul

Variables	Percentiles					Mean	Standard deviation	
	Min	25%	Median	75%	Max			
Weather								
Temperature(°C)	-13.15	4.29	14.39	21.97	30.04	12.88	10.18	
Humidity(%)	19.42	50.46	61.96	72.08	96.25	61.26	14.82	
Press at sea level(hPa)	993.78	1009.80	1016.05	1022.29	1037.83	1015.95	8.05	
Air pollutant								
PM ₁₀ (µg/m ³)	8.97	33.71	48.31	67.91	782.55	55.70	38.89	
PM _{2.5} (µg/m ³)	4.22	16.32	23.96	33.62	219.03	27.18	15.80	
Number of death								
All cause mortality	All age	56	86	94	101	138	93.56	11.20
	≥ 65 year age	35	59	65	72	103	65.18	9.45
Cardiovascular mortality	All age	9	20	24	27	42	23.58	5.42
	≥ 65 year age	7	15	18	21	35	18.50	4.63

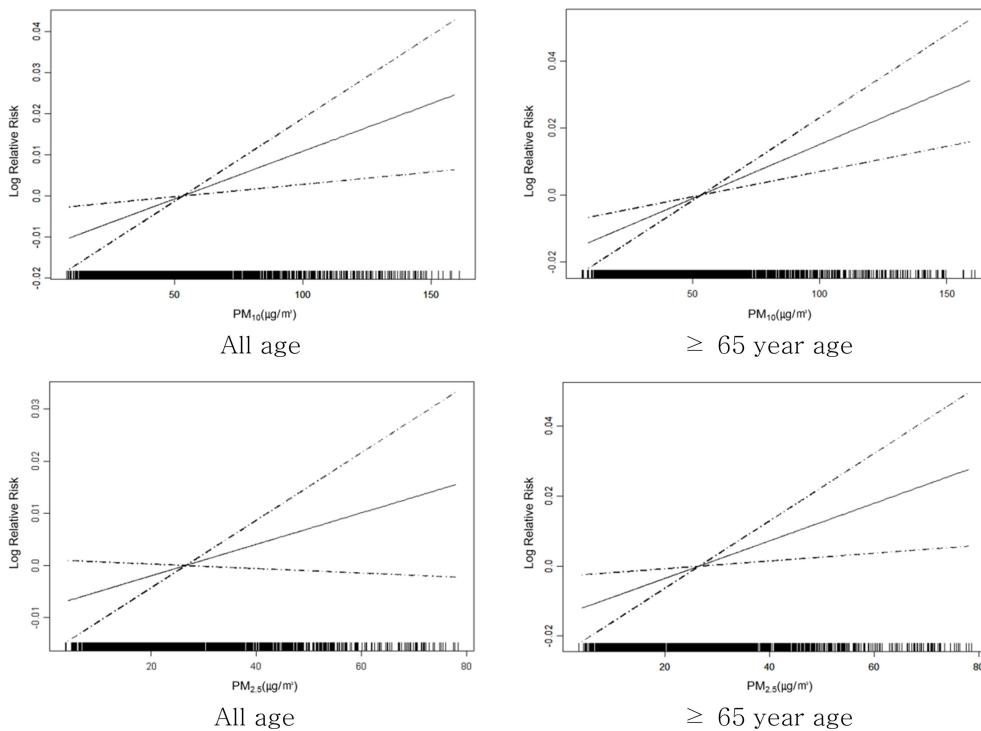


Fig. 1. Dose-response association of PM₁₀ and PM_{2.5} with all causes mortality in Seoul, 2006-2010.

2. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인한 전체원인 사망 영향

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가가 전체원인 사망에 대한 영향을 평가하였다. 인구집단

은 연령에 따라서 전체 연령집단과 65세 이상 연령 집단으로 나누어 분석하였다.

서울특별시의 일별 평균 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 1 µg/m³ 증가함에 따른 일별 사

Table 2. Percent increase in risk of all causes mortality (95% CI) per 10 µg/m³ in PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul, 2006-2010

Air pollutant	Lag	All age		≥ 65 year age	
		Percent increase in daily mortality (Per 10 µg/m ³)	95% Confidence interval (Per 10 µg/m ³)	Percent increase in daily mortality (Per 10 µg/m ³)	95% Confidence interval (Per 10 µg/m ³)
PM ₁₀	Lag 0	0.44	0.25~0.63	0.64	0.41~0.87
	Lag 1	0.27	0.08~0.46	0.44	0.21~0.67
	Lag 2	0.14	-0.05~0.34	0.12	-0.12~0.35
	Lag 3	0.05	-0.14~0.24	0.05	-0.19~0.28
	Lag 4	0.04	-0.15~0.24	0.02	-0.21~0.26
	Lag 5	-0.11	-0.30~0.09	-0.05	-0.28~0.19
	Lag 6	0.01	-0.18~0.20	-0.08	-0.31~0.16
PM _{2.5}	Lag 0	0.95	0.57~1.34	1.37	0.90~1.84
	Lag 1	0.49	0.11~0.87	0.62	0.16~1.09
	Lag 2	0.37	-0.01~0.75	0.20	-0.27~0.67
	Lag 3	-0.08	-0.46~0.31	-0.15	-0.62~0.32
	Lag 4	0.01	-0.54~0.23	-0.08	-0.55~0.39
	Lag 5	0.16	-0.54~0.23	-0.08	-0.56~0.39
	Lag 6	0.03	-0.42~0.35	-0.04	-0.52~0.43

망자수에 대한 Log(상대위험비) 함수를 나타낸 것은 Fig. 1과 같다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가에 따른 전체원인 사망에 대한 영향을 정량적으로 평가한 결과는 Table 2와 같다.

일별 미세먼지(PM₁₀), 일별 초미세먼지(PM_{2.5})와 일별 전체원인 사망의 관련성에서 지연효과를 살펴본 결과, 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 모두 당일(lag=0)에 관련성이 가장 강한 것으로 나타났다.

전체 연령집단에서는 미세먼지(PM₁₀) 농도가 10 µg/m³ 증가시 초과사망발생위험을 0.44% (95% CI : 0.25~0.63%) 높였고, 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 10 µg/m³ 증가시 초과사망발생위험을 0.95% (95% CI : 0.57~1.34%) 높였다. 또한 65세 이상 연령집단에서 미세먼지(PM₁₀) 농도와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 10 µg/m³ 증가시 초과사망발생위험은 각각 0.64% (95% CI : 0.41~0.87%) 와 1.37% (95% CI : 0.90~1.84%) 높였다. 전체 연령집단에 비하여 민감집단으로 보고된 65세 이상 연령집단에서 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가로 인한 전체원인 초과사망발생위험이 더 높은 것으로 나타났다.

3. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인한 심혈관계 사망 영향

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가가 심혈관계 사망에 대한 영향을 평가하였다. 분석대상은 연령에 따라서 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단으로 나누어 분석하였다.

서울시의 일별 평균 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 1 µg/m³ 증가함에 따른 일별 사망자수에 대한 Log(상대위험비) 함수를 나타낸 것은 Fig. 2와 같다.

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가에 따른 심혈관계 사망에 대한 영향을 평가한 결과는 Table 3과 같다. 일별 미세먼지(PM₁₀), 일별 초미세먼지(PM_{2.5})와 일별 심혈관계 사망의 관련성에서 지연효과를 살펴본 결과, 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단에서 모두 당일(lag=0)에 관련성이 가장 강한 것으로 나타났다.

전체 연령집단에서는 미세먼지(PM₁₀) 농도가 10 µg/m³ 증가시 심혈관계 초과사망발생위험을 0.76% (95% CI : 0.40~1.12%) 높였고, 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도가 10 µg/m³ 증가시 초과사망발생위험을 1.63% (95% CI : 0.89~2.37%) 높였다. 또한 65세 이상 연

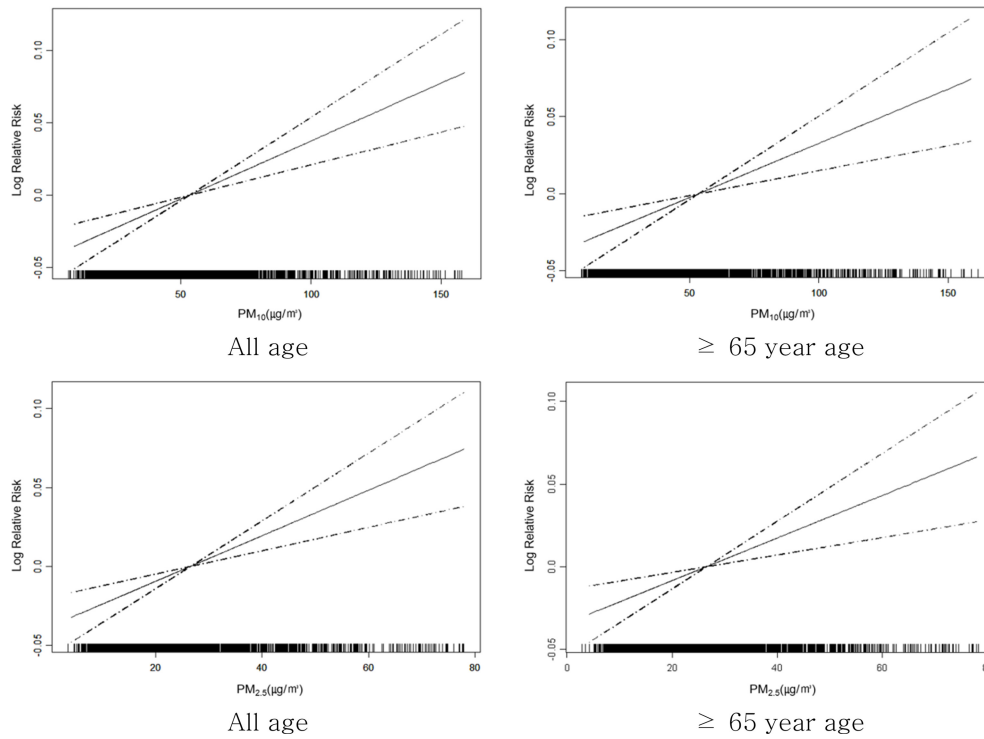


Fig. 2. Dose-response association of PM₁₀ and PM_{2.5} with cardiovascular mortality in Seoul, 2006-2010.

Table 3. Percent increase in risk of cardiovascular mortality (95% CI) per 10 µg/m³ in PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul, 2006-2010

Air pollutant	Lag	All age		≥ 65 year age	
		Percent increase in daily mortality (Per 10 µg/m ³)	95% Confidence interval (Per 10 µg/m ³)	Percent increase in daily mortality (Per 10 µg/m ³)	95% Confidence interval (Per 10 µg/m ³)
PM ₁₀ (Per 10 µg/m ³)	Lag 0	0.76	0.40~1.12	0.80	0.39~1.21
	Lag 1	0.62	0.26~0.98	0.59	0.18~1.00
	Lag 2	0.36	0.00~0.73	0.34	-0.07~0.76
	Lag 3	0.06	-0.30~0.43	0.07	-0.35~0.49
	Lag 4	0.03	-0.34~0.40	-0.08	-0.05~0.35
	Lag 5	-0.02	-0.39~0.35	0.07	-0.35~0.50
	Lag 6	0.14	-0.23~0.51	0.14	-0.29~0.56
PM _{2.5} (Per 10 µg/m ³)	Lag 0	1.63	0.89~2.37	1.75	0.91~2.59
	Lag 1	1.07	0.35~1.80	0.96	0.14~1.79
	Lag 2	0.42	-0.31~1.16	0.61	-0.22~1.45
	Lag 3	0.17	-0.56~0.91	0.35	-0.48~1.19
	Lag 4	0.28	-0.46~1.02	0.09	-0.74~0.93
	Lag 5	-0.01	-0.74~0.73	0.01	-0.83~0.84
	Lag 6	-0.08	-0.82~0.66	-0.08	-0.92~0.77

령집단에서 미세먼지(PM₁₀) 농도와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 증가시 심혈관계 초과사망발생위험은 각각 0.80% (95% CI : 0.39~1.21%), 1.75% (95% CI : 0.91~2.59%) 높았다.

IV. 고 찰

본 연구에서는 서울시 전체 연령집단과 65세 이상 연령집단을 대상으로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가가 일별 사망에 미치는 영향을 파악하였다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 증가는 전체원인과 심혈관계 초과사망발생위험을 통계적으로 유의하게 높였다.

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 초과사망발생위험을 비교하면, 전체 연령집단에서 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도 10 µg/m³ 증가시 전체원인 초과사망발생위험을 각각 0.44% (95% CI : 0.25~0.63%)와 0.95% (95% CI : 0.57~1.34%) 높였고, 심혈관계 초과사망발생위험을 각각 0.76% (95% CI : 0.40~1.12%)와 1.63% (95% CI : 0.89~2.37%) 높였다. 전체원인 초과사망발생위험과 심혈관계 초과사망발생위험은 미세먼지(PM₁₀) 보다 초미세먼지(PM_{2.5})에서 다소 높은 것으로 나타났으며, 이것은 기존에 수행된 연구결과와 동일한 경향을 보였다. Janssen 등은(2013)²³⁾은 2008-2009년 네덜란드를 대상으로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})가 일별 사망에 미치는 영향을 분석하였다. 연구결과 미세먼지(PM₁₀) 10 µg/m³ 증가시 전체원인 초과사망발생위험은 0.6% (95% CI : 0.2~1.0%)이었고, 초미세먼지(PM_{2.5}) 10 µg/m³ 증가시 전체원인 초과사망발생위험은 0.8% (95% CI : 0.3~1.2%)으로 보고하였다. Samoli 등²⁴⁾은 프랑스, 그리스, 이탈리아, 스페인 등의 12개 유럽도시지역을 대상으로 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 사망영향을 분석하였다. 전체원인 사망의 경우 미세먼지(PM₁₀) 10 µg/m³ 증가시 초과사망발생위험은 0.32% (95% CI : 0.13~0.52%)이었고, 초미세먼지(PM_{2.5}) 10 µg/m³ 증가시 초과사망발생위험은 0.55% (95% CI : 0.27~0.84%)로 미세먼지(PM₁₀) 보다 초미세먼지(PM_{2.5})의 초과사망발생위험이 다소 높은 것으로 나타났다. 본 연구결과와 비교하면, 서울시의 경우 미세먼지(PM₁₀)로 인한 초과사망발생위험은 네덜란드와 유사하였으

나 유럽지역보다는 약간 높았고, 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 초과사망발생위험은 네덜란드와 유럽지역의 연구결과보다 다소 높게 나타났다. 또한 미국 EPA에서 입자상 물질과 건강영향을 종합하여 분석한 연구에서는 초미세먼지(PM_{2.5}) 보다 미세먼지(PM₁₀)로 인한 초과사망발생위험이 높은 것으로 보고하였다.¹⁷⁾ 초미세먼지(PM_{2.5})는 입자의 크기가 매우 작고 표면적이 크기 때문에 세포로의 침투가 용이하고, 폐 또는 기도 등의 장기에 용이하게 흡수되며, 폐에서 세포와의 반응성이 높은 것으로 보고되고 있다.²⁵⁾

미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 사망원인별 초과사망발생위험을 살펴보면, 입자상물질로 인하여 전체원인 초과사망발생위험보다는 심혈관계 초과사망발생위험이 다소 높은 것으로 나타났다. 12개 유럽도시지역을 대상으로 한 Samoli 연구²⁴⁾에서 초미세먼지(PM_{2.5}) 10 µg/m³ 증가시 전체원인 초과사망발생위험은 0.55%(95% CI : 0.27~0.84%)이었고, 심혈관계 초과사망발생위험은 0.57%(95% CI : 0.07~1.08%)으로 초미세먼지(PM_{2.5})의 사망원인별 초과사망발생위험이 차이를 보이지 않았다. 반면에 중국을 대상으로 대기오염-건강영향 연구를 종합한 분석결과에서는 초미세먼지(PM_{2.5}) 10 µg/m³ 증가시 전체원인 초과사망발생위험은 0.38%(95% CI : 0.31~0.45%) 증가하였고, 심혈관계 초과사망발생위험을 0.44%(95% CI : 0.33~0.54%) 높여 전체원인 초과사망발생위험보다는 심혈관계 초과사망발생위험이 다소 높은 것으로 보고하였다.²⁶⁾

초미세먼지(PM_{2.5})가 심혈관계 초과사망발생위험을 높이는 기전은 흡입된 초미세먼지(PM_{2.5})가 폐포내에서 염증반응을 일으켜 혈액의 응고도를 증가시키고, 혈액의 변화는 급성 심혈관계 관련질환에 대한 민감도를 높이 것으로 보고되었다.²⁵⁾

분석대상 인구집단을 연령별로 나누어 살펴보면 전체연령집단보다는 65세 이상 고령집단에서 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 전체원인 초과사망발생위험이 높은 것으로 나타났다. Sacks 등²⁷⁾과 Bell 등²⁸⁾은 18세 미만 어린이, 65세 이상 고령자, 심혈관계 질환자, 천식과 만성폐쇄성폐질환 등 호흡기계 질환자, 당뇨 등 기존 질환자, 교육수준 또는 소득의 사회경제적 수준이 낮은 집단을 입자상 물질에 대한 민감집단으로 파악하였다. 미국 대기청정법(Clean air Act)은 국가 대기질 기준이 어린이,

노약자, 호흡기계 질환자 등과 같은 민감·취약집단을 보호할 수 있는 수준으로 설정되어야 한다고 규정하고 있다. 우리나라의 경우 인구의 고령화가 급속히 진행되고 있으며, 2026년 65세 이상 인구비율이 전체 20.8%로 초고령사회에 진입할 것으로 예측되고 있다. 인구의 고령화에 따라 대기오염의 민감·취약집단의 규모가 커지므로 이에 대한 환경보건학적 대책 마련이 시급하다.

본 연구에서는 몇가지 제한점이 있다. 첫째, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 농도 자료는 대기질 측정망자료를 사용하였다. 노출자료는 개개인의 노출 측정자료를 적용하는 것이 바람직하지만 시간적, 경제적 제약으로 개인 노출자료를 생산 및 적용하는 것이 어려우므로 본 연구에서는 대기질 측정망자료를 이용하였다. 둘째, 본 연구에서는 시계열연구의 GAM모형을 적용하기 위해 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 서울시 평균 농도를 적용하였다. 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 농도는 지역에 따라 차이가 크므로 지역의 대기오염 농도를 반영하는 환자-교차연구 등의 통계분석방법을 적용한 분석이 향후에 진행되어야 할 것이다.

V. 결 론

본 연구에서는 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})로 인한 초과사망발생위험을 평가한 결과, 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 단기노출로 인하여 전체원인 및 심혈관계 초과사망발생위험을 유의하게 높이고 있었다. 향후 호흡기계와 심혈관계 관련질환 등 다양한 건강영향을 대상으로, 여러지역을 대상으로, 단기노출 뿐만 아니라 장기노출로 인한 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 연구가 진행되어야 하며, 또한 대기오염과 건강영향에 대한 환경역학 연구결과를 토대로 지속적인 대기환경기준에 대한 검토가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 한국환경정책·평가연구원의 「초미세먼지(PM_{2.5})의 건강영향 평가 및 관리정책연구(I)」의 연구결과 일부입니다.

References

1. Qiu H, Yu IT, Tian L, Wang X, Tse LA, Tam W, Wong TW. Effects of coarse particulate matter on emergency hospital admissions for respiratory diseases: a time-series analysis in Hong Kong. *Environ Health Perspect.* 2012; 120(4): 572-576.
2. Lee SL, Wong WH, Lau YL. Association between air pollution and asthma admission among children in Hong Kong. *Clin Exp Allergy.* 2006; 36(9): 1138-1146.
3. Peng RD, Bell ML, Geyh AS, McDermott A, Zeger SL, Samet JM, et al. Emergency admissions for cardiovascular and respiratory diseases and the chemical composition of fine particle air pollution. *Environ Health Perspect.* 2009; 117(6): 957-963.
4. Ito K, Mathes R, Ross Z, Nádas A, Thurston G, Matte T. Fine particulate matter constituents associated with cardiovascular hospitalizations and mortality in New York City. *Environ Health Perspect.* 2011; 119(4): 467-473.
5. Bedada GB, Smith CJ, Tyrrell PJ, Hirst AA, Agius R. Short-term effects of ambient particulates and gaseous pollutants on the incidence of transient ischaemic attack and minor stroke: a case-cross-over study. *Environ Health.* 2012; 15(11): 77.
6. Martinelli N, Olivieri O, Girelli D. Air particulate matter and cardiovascular disease: a narrative review. *Eur J Intern Med.* 2013; 24(4): 295-302.
7. Adar SD, Filigrana PA, Clements N, Peel JL. Ambient coarse particulate matter and human health: a systematic review and meta-analysis. *Curr Environ Health Rep.* 2014; 8(1): 258-274.
8. Stafoggia M, Samoli E, Alessandrini E, Cadum E, Ostro B, Berti G, et al. Short-term associations between fine and coarse particulate matter and hospitalizations in Southern Europe: results from the MED-PARTICLES project. *Environ Health Perspect.* 2013; 121(9): 1026-1033.
9. Weichenthal S, Villeneuve PJ, Burnett RT, van Donkelaar A, Martin RV, Jones RR, et al. Long-term exposure to fine particulate matter: association with nonaccidental and cardiovascular mortality in the agricultural health study cohort. *Environ Health Perspect.* 2014; 122(6): 609-615.
10. Beelen R, Raaschou-Nielsen O, Stafoggia M, Andersen ZJ, Weinmayr G, Hoffmann B, et al. Effects of long-term exposure to air pollution on natural-cause mortality: an analysis of 22 European cohorts within the multicentre ESCAPE project. *Lancet.* 2014; 383(9919): 785-795.

11. Shang Y, Sun Z, Cao J, Wang X, Zhong L, Bi X, et al. Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality. *Environ Int.* 2013; 54: 100-111.
12. Zanobetti A, Schwartz J. The effect of fine and coarse particulate air pollution on mortality: a national analysis. *Environ Health Perspect.* 2009; 117(6): 898-903.
13. Fann N, Lamson AD, Anenberg SC, Wesson K, Riskey D, Hubbell BJ. Estimating the national public health burden associated with exposure to ambient PM_{2.5} and ozone. *Risk Anal.* 2012; 32(1): 81-95.
14. Shin DC. Health effects of ambient particulate matter. *J Korean Med. Assoc* 2007; 50(2): 175-182.
15. Son JY, Lee JT, Kim KH, Jung K, Bell ML. Characterization of fine particulate matter and associations between particulate chemical constituents and mortality in Seoul, Korea. *Environ Health Perspect.* 2012; 120(6): 872-878.
16. Bell ML. HEI Health Review Committee. Assessment of the health impacts of particulate matter characteristics. *Res Rep Health Eff Inst.* 2012; 161: 5-38.
17. Environmental Protection Agency. Intergrated science assessment for particulate matter. Available: http://www.sinia.cl/1292/articles-51242_Integrated_Science.pdf [assessed 1 September 2014].
18. Atkinson RW, Kang S, Anderson HR, Mills IC, Walton HA. Epidemiological time series studies of PM_{2.5} and daily mortality and hospital admissions: a systematic review and meta-analysis. *Thorax.* 2014; 69(7): 660-665.
19. Environmental Protection Agency. National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter; Final Rule <http://www.gpo.gov/fdsys/pkg/FR-2013-01-15/pdf/2012-30946.pdf> [assessed 1 September 2014].
20. Kheirbek II, Wheeler K, Walters S, Kass D, Matte T. PM_{2.5} and ozone health impacts and disparities in New York City: sensitivity to spatial and temporal resolution. *Air Qual Atmos Health.* 2013; 6(2): 473-486.
21. Pope CA 3rd, Kalkstein LS. Synoptic weather modeling and estimates of the exposure-response relationship between daily mortality and particulate air pollution. *Environ Health Perspect.* 1996; 104(4): 414-420.
22. Akaike, K. Information theory and an extension of the maximum likelihood principle. 2nd International Symposium on Information Theory, Budapest: Academiai Kiado; 1973. p.267-281.
23. Janssen NA, Fischer P, Marra M, Ameling C, Cassee FR. Short-term effects of PM_{2.5}, PM₁₀ and PM_{2.5-10} on daily mortality in The Netherlands. *Sci Total Environ.* 2013; 463-464: 20-26.
24. Samoli E, Stafoggia M, Rodopoulou S, Ostro B, Declercq C, Alessandrini E, et al. Associations between fine and coarse particles and mortality in Mediterranean cities: results from the MED-PARTICLES project. *Environ Health Perspect.* 2013; 121(8): 932-938.
25. Seaton A, MacNee W, Donaldson K, Godden D. Particulate air pollution and acute health effects. *Lancet.* 1995; 345(8943): 176-178.
26. Shang Y, Sun Z, Cao J, Wang X, Zhong L, Bi X, et al. Systematic review of Chinese studies of short-term exposure to air pollution and daily mortality. *Environ Int.* 2013; 54: 100-111.
27. Sacks JD, Stanek LW, Luben TJ, Johns DO, Buckley BJ, Brown JS, et al. Particulate matter-induced health effects: who is susceptible? *Environ Health Perspect.* 2011; 119(4): 446-454.
28. Bell ML, Zanobetti A, Dominici F. Evidence on vulnerability and susceptibility to health risks associated with short-term exposure to particulate matter: a systematic review and meta-analysis. *Am J Epidemiol.* 2013; 178(6): 865-876.