

대기오염 지표로서의 시정과 일별 호흡기계 사망간의 연관성에 관한 시계열적 연구

A Time-series Study on Relationship between Visibility as an Indicator of Air Pollution and Daily Respiratory Mortality

조용성 · 정창훈¹⁾ · 손지영 · 전영신²⁾ · 이종태*

한양대학교 일반대학원 보건학과, ¹⁾경인여자대학 환경보건과,

²⁾기상연구소 태풍황사연구팀

(2007년 3월 26일 접수, 2007년 8월 21일 채택)

Yong-Sung Cho, Chang-Hoon Jung¹⁾, Ji-Young Son,
Youngsin Chun²⁾ and Jong-Tae Lee*

Department of Public Health, Graduate School of Hanyang University,
Hanyang University, Seoul, Korea

¹⁾Department of Environmental Health, Kyungin Women's College, Incheon, Korea

²⁾Typoon and Asian Dust Research Laboratory, Meteorological Research Institute,
Seoul, Korea

(Received 26 March 2007, accepted 21 August 2007)

Abstract

There seems to be a consensus among most people that visibility impairment is the most obvious indicator of air pollution. While considerable evidence on the association between air pollution and health outcomes including death and disease have been established, based on industrial complex areas or huge urban cities, time-series, case-crossover and cohort studies, scarce literature exists on the direct evidence for the association between visibility and adverse health outcomes. Our study is assessed the effect of air pollution measured by visibility impairment on respiratory mortality over a period of six years. Relative risks in respiratory deaths were estimated by a Poisson regression model of daily deaths between 1999~2004. Daily counts of respiratory deaths as dependent variable was modelled with daily 24-hr mean visibility measurements (kilometers) as independent variable by means of Poisson regression. This model is controlled for confounding factors such as day of weeks, weather variables, seasonal variables and PM₁₀. The results in this study is observed the statistically significant association between an inverse health effect and visibility during the study period for respiratory mortality (percentage change in the relative risk for all aged -0.57% , 95% CI, $-1.01\% \sim -0.12\%$; for 0~15 aged -7.12% , 95% CI, $-13.29\% \sim -0.51\%$; for 65+ aged -0.43% , 95% CI, $-0.93\% \sim -0.06\%$ per 1 km increased in visibility). The effect size was

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)2-2220-0248, E-mail : jlee@hanyang.ac.kr

much reduced during warm season. Visibility impairment resulting from air pollution is strongly associated with respiratory mortality, especially for children may be spent at outdoor. Our result provides a quick and useful indicator for eliciting the contribution of air pollution to the excess risk of respiratory mortality in Seoul, Korea.

Key words : Visibility, Air pollution, Respiratory mortality, Time-series analysis

1. 서 론

지난 20여 년간 대기오염과 사망간의 관련성을 규명하기 위한 국내·외적인 많은 연구들이 수행되었으며, 그 결과 전세계 국가별 혹은 도시별 대기오염이 사망에 통계적으로 유의한 영향을 준다고 일관되게 보고되고 있다(조용성 등, 2006; Dominici *et al.*, 2003; Lee *et al.*, 2000; Katsouyanni *et al.*, 1997). 그러나 이러한 대기오염에 대한 영향을 평가하기 위해서는 대기오염 수준을 측정하고 분석하는 데 필요한 많은 시간과 비용이 소요된다는 제한점이 있다. 이러한 제한점을 개선하기 위해서는 대기오염 수준을 대표하는 지표를 이용함으로써 사망 및 상병간의 관련성을 살펴보는 것이 더 효과적일 수 있으며, 이러한 대기오염의 대표적인 지표로서 시정(visibility, 가시거리)이 이용되고 있다(김경원과 김영준, 2003).

시정은 육안으로 식별이 쉬워 일반 시민들에게는 체감오염의 지표로 인식되고 있으며, 미세먼지의 질량농도, 특히 극미세먼지의 질량농도와 높은 상관성을 갖는 것으로 밝혀져 먼지에 의한 대기오염의 대표적인 지표로 알려져 있다(김용표, 2007). 특히 대기 중 미세먼지에 의한 시정감소현상은 중요한 대기환경문제로 지적되고 있으며 이러한 시정감소 현상과 대기 중 미세먼지의 관계에 대한 연구는 매우 중요한 주제로 부각되고 있다(국립환경연구원, 1995, 1987, 1984; 한국과학기술연구원, 1994).

미세먼지에 의한 시정감소현상에는 미세먼지의 크기분포와 화학적인 성분 등이 가장 중요한 영향인자로 작용한다. 이중 화학 성분은 입자의 굴절률(refractive index)에 영향을 미치게 되고 이 입자의 굴절률과 미세먼지의 크기 분포는 입자의 산란강도에 영향을 미치게 된다(Garcia Nieto, 2002; Seinfeld and Pandis, 1998). 지금까지의 시정에 관한 연구를 살펴보면 주로 미세먼지의 질량 포집 측정을 통해 이를 화학

적으로 분석하고 미세먼지의 성분농도와 성분별 입자산란효율의 통계적 함수로 표현하였다(Kim *et al.*, 2001; 국립환경연구원, 1995). 또한 윤순창과 이강웅(1998)은 시정을 Koschmeider식에 대입하여 역산출한 빛 소멸계수는 $0.56 \mu\text{m} \sim 2.5 \mu\text{m}$ 입경구간의 입자수농도와 높은 상관관계를 나타내었다고 보고하였다.

이와 같이 대기 중의 미세먼지의 농도 변화는 시정의 변화와 밀접한 연관을 가지고 있다. 우리나라의 경우, 이러한 미세먼지의 농도변화가 호흡기 관련 질병, 사망 등 인체에 미치는 영향은 PM_{10} 를 중심으로 연구되고 있으나 실제 인체에 많은 악영향을 미치는 것으로 알려진 $2.5 \mu\text{m}$ 이하의 극미세먼지 농도와 인체영향에 관한 연구는 매우 드물며, 입경별 농도와 인체에 미치는 영향에 관한 연구는 거의 전무한 실정이다. 미세먼지는 입경에 따라 다양한 개수 농도를 가지고 있으며, 따라서 이러한 입경별 농도를 측정하는 데에는 많은 비용과 시간이 소비된다. 따라서 이러한 미세먼지와 상병자료와의 상관관계를 파악하기 위해서는 다양한 입경 분포를 갖는 미세먼지의 농도를 대표하는 지표와 사망 및 상병 자료의 관련성을 살펴보는 것이 더 효과적일 수 있다.

최근 홍콩에서는 2000년부터 2003년까지 시정과 사망간의 관련성을 규명한 결과, 시정이 10 km 증가할 때 마다 통계적으로 유의하게 총 사망이 약 5% 감소하고 호흡기계 사망의 경우 약 8% 감소한다고 보고되었으나(Thach *et al.*, 2004), 국내에서는 아직 이러한 대기오염 지표와 사망 및 상병에 관한 연구가 진행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 점에 착안하여 대기의 시정 변화를 미세먼지 농도 변화의 지표로 보고 이들 시정의 변화와 호흡기 사망간의 관련성을 규명하기 위해 1999년부터 2004년까지 6년 간의 자료를 대상으로 서울시 시정과 일별 호흡기계 사망간의 관련성을 확인하고자 하였다.

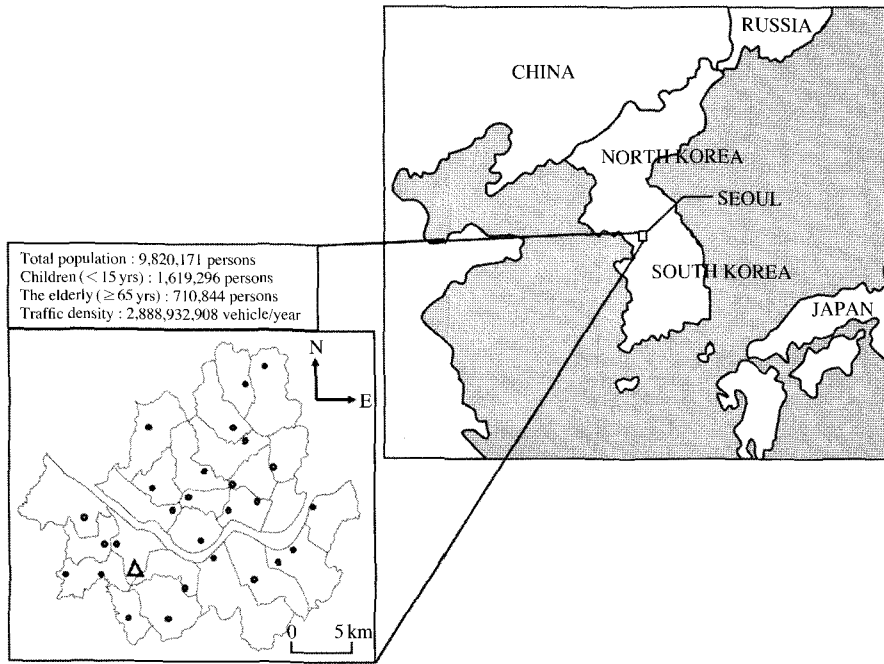


Fig. 1. Location of monitoring stations, population demographics and traffic density in Seoul. The circles mark the location of 27 monitoring stations for PM₁₀ mass concentration and the triangle marks the location of the monitoring station for visibility.

2. 연구 방법

본 연구는 시계열 분석방법을 이용하여 1999년부터 2004년까지의 서울시 인구집단을 대상으로 일일 사망자료와 환경측정자료 및 기상자료를 이용하여 대기오염의 지표인 시정이 일별 호흡기계 사망에 미치는 영향을 추정하였다.

2.1 연구대상지역

연구대상지역인 서울시는 대한민국의 수도로서 한강하류에 위치하였고 전 국민의 22% 이상인 약 1,000만여 명의 인구가 거주하는 대도시로 면적은 606.58 km²이며, 연간 교통량은 약 30억 대인 것으로 보고되고 있다(그림 1).

2.2 연구자료

2.2.1 사망자료

본 연구기간 동안의 서울시에서 발생한 사망건수

자료를 국립통계청으로부터 받아 일별 사망자 수로 파악하였다. 사망원인 중 본 연구에서는 호흡기계 사망(ICD 10th, J00-J99)만을 대상으로 하였으며, 서울시 거주자라도 도시 밖에서 사망한 경우는 본 분석에서 제외하였다. 또한, 연령에 따른 시정노출의 민감집단을 확인하기 위하여 전체연령, 소아(0~15세), 노인(65세 이상), 성인(16~64세)으로 나누어 분석하였다.

2.2.2 시정자료

본 연구에서 사용한 시정자료는 사망자료와 동일한 기간에 기상청에서 측정한 목측 관측한 자료를 이용하였다. 목측 자료는 3시간 간격으로 1일 8회(03, 06, 08, 12, 15, 18, 21, 24시)의 관측이 이루어지며, 야간의 경우 주간과 같은 밝기로 가정하여 목표물을 확인하며 집광되지 않은 백색의 전등빛 등을 이용하여 km 단위로 관측하였다. 관측된 시정자료는 호흡기계 사망발생과 동일한 날에 독립변수로 적용하여 분석하였으며 이들 자료의 일일평균값을 이용하였다.

2.2.3 대기자료

본 연구에서는 서울시에 설치된 총 27개의 대기오염 자동 측정소에서 상시 측정되는 미세먼지(PM_{10}) 농도를 국립환경과학원으로부터 얻어, 각 측정지점에서의 날짜에 따른 시간별 평균값을 구하고 이들 각 시간평균값을 이용하여 일일평균값을 구하였다. 이는 각 측정지점에서 연속적으로 측정값이 빠지게 되었을 때의 경우를 보정하기 위함이다. 또한, 본 연구에서는 시정과 기준 대기오염물질간의 상관성을 나타내기 위하여 아황산가스, 이산화질소, 오존 그리고 일산화탄소에 대한 일일평균값을 구하였다. 오존과 일산화탄소의 경우는 각 측정지점에서의 일일 8시간 이동평균값의 최고값을 이용하여 일일평균값을 구하였다. 최종적인 모델에는 시정과 관련성이 높은 PM_{10} 만을 이용하였다.

또한, 대기 중 미세먼지의 개수농도를 측정하기 위하여 2001년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 서울시 동작구 신대방동에 위치한 기상청 건물에서 측정된 광학적 입자 계수기(미국 HIAC/ROYCO사, Model: 5230)에 의한 매시간별 미세먼지의 개수 농도 자료를 이용하였다. 광학적 입자 계수기(OPC: optical particle counter)는 개개의 입자에 대한 산란광의 강도를 측정하여 그 강도와 미리 정해진 강도와의 관계에 의해 입자의 크기를 추정하는 방법이다(정창훈 등, 2003). 본 연구에서 사용된 자료는 매 시간별로 진공펌프에 의해 $1\text{ft}^3/\text{min}$ 의 공기를 흡입시켜 구간별 수 농도를 3회 측정된 후 그 평균값을 이용하였다. 측정구간은 $0.3\sim 25\mu\text{m}$ 인 미세먼지를 지수 척도로 동일한 8개 구간으로 나누었다(CH-1 ($0.30\sim 0.50\mu\text{m}$), CH-2 ($0.50\sim 0.82\mu\text{m}$), CH-3 ($0.82\sim 1.35\mu\text{m}$), CH-4 ($1.35\sim 2.23\mu\text{m}$), CH-5 ($2.23\sim 3.67\mu\text{m}$), CH-6 ($3.67\sim 6.06\mu\text{m}$), CH-7 ($6.06\sim 10.00\mu\text{m}$), CH-8 ($10.00\sim 25.00\mu\text{m}$)).

2.2.4 기상자료

기상자료는 기상청에서 측정한 자료 중 기온, 상대습도 및 해면기압을 이용하였는데 이는 사망률의 일일 변동이 기온, 습도 및 해면기압의 변화에 따라 연관성이 큰 것으로 보고되고 있기 때문이다(Pope and Kalkstein, 1996). 따라서 본 연구에서는 사망발생과 동일한 날의 기상자료를 혼란변수로 적용하여 분석하였으며 이들 자료의 일일평균값을 이용하였다.

2.3 통계분석

본 연구에서 종속변수는 서울시에서 발생된 당일 사망자수 중 호흡기계 사망을 대상으로 분석하였으며, 독립변수는 요일(day of week), 기온, 상대습도, 해면기압 등의 기상변수 및 시정과 관련이 높은 대기오염물질 중 PM_{10} 농도를 사용하였다. 또한, 장기적인 추세변동과 계절변동, 기상요인, 요일 및 시정과 관련성이 높은 미세먼지 등 본 연구에 영향을 미칠 수 있는 혼란변수들을 보정한 상태에서 시정이 호흡기계 사망에 미치는 영향을 분석하기 위해 일반화 부가모형(GAM: Generalized Additive Model)을 사용하였다. 일반화 부가모형을 이용한 시계열 연구에서는 하루의 전체인구집단과 인구집단에 영향을 미치는 위해요소의 효과를 보기 때문에, 연령이나 성 등과 같은 개인적인 차이를 고려하지 않아도 되는 장점이 있다. 또한 많은 연구에서 대기오염의 급성영향은 당일 즉시, 또는 노출 후 1~7일 이내에 나타난다고 보고되어 있다(조용성 등, 2003; Lee *et al.*, 2002; Schwartz, 1994). 따라서 본 연구에서는 당일 및 노출 후 7일까지의 시정의 적절한 지연시간(lag time)을 고려하기 위하여 AIC(Akaike's information criterion)가 가장 작은 지연시간을 선택하였다. 한편, 최근에는 위의 일반화 부가모형의 오류(default convergency)를 보정하도록 설계한 GAM-control 모델이 이용되고 있으며, 본 연구에서도 이와 같은 오류를 보정한 GAM-control을 사용하였다. GAM-control은 일반적인 선형회귀모형처럼 예측변수 X_i 와 반응변수 Y 사이의 관계를 나타내는 특정함수 형태가 있는 것이 아니라 실제 자료에 근거하여 요약된 그림의 형태로 표현해 주는 특징을 갖는데, 이는 선형성을 가정하기 힘든 경우 둘 사이의 관계를 파악할 수 있다는 장점을 갖는다. 본 연구에서는 기상변수에 비모수적 평활방법인 Loess를 통해, 기온과 습도 및 해면기압을 통제하였다. 사망에 대한 장기추세, 계절변동, 기온, 습도, 기압, 요일 효과들이 포함된 최종 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{LnE (Daily death count)}=$$

$$S(\text{date})+S(\text{temperature})+S(\text{humidity})+S(\text{pressure}) \\ +D(\text{day of the week})+PM_{10} \text{ 농도}+ \text{시정거리}$$

여기서, S는 Loess 평활함수이며, D는 가변수(Dummy variable)를 나타내었다.

3. 결 과

3.1 기술적 분석

표 1은 본 연구에서 이용된 모델의 종속변수로 사용한 호흡기계 사망자수와 독립변수로 사용한 날짜, 요일, 기온, 습도, 대기 중 PM₁₀ 농도 및 시정거리의 관련성을 평가하기 위한 포아송 회귀모델식의 적절성을 확인하기 위하여 AIC를 통해 평가한 결과이다. AIC 값이 작을수록 모델의 적합성이 증가하는 결과를 나타내는 것이며, 표에서 제시된 바와 같이 독립 변수들을 추가할 수록 AIC 값이 적어져 최종적인 모델에서는 가장 적은 결과를 나타내었다. 이러한 결과를 본 연구에서 사용한 모델이 적합함을 확인한 결

과이다.

표 2는 2,192일의 총 연구기간(1999년 1월 1일부터 2004년 12월 31일)에 서울시의 일평균 호흡기계 사망자수, 시정, 대기오염물질, 그리고 기상요인에 대한 평균값, 표준편차 및 분포를 나타낸 것이다. 전체 연령 사망자 수는 12,205명으로 일일 평균은 5.6명, 소아 사망자는 127명으로 10일에 1명, 그리고 노인 사망자의 경우는 9,896명으로 일일 평균은 4.5명이었다. 이 기간동안 측정된 시정의 일평균 거리는 12.2km였으며, 대기오염물질 중 시정과 가장 밀접한 관계가 있는 PM₁₀의 일 평균값은 68.5 µg/m³으로 대기환경기준을 초과하지 않았다. 한편, PM₁₀의 경우 단기기준(150 µg/m³)을 초과하는 날이 75일이었다.

그림 2는 호흡기계 사망자 수와 시정, 대기 중 미세먼지 농도 수준 및 기상 수준에 대한 일별 분포를 나타낸 것이다. 연구기간 동안 관찰된 호흡기계 사망자수의 일별추세를 보면 장기적인 추세변동은 관찰할 수 없었으나 겨울철에 사망자 수가 다소 증가하는 계절변동을 볼 수 있었다. 시정의 경우에는 점차 시정거리가 개선되고 있음을 확인할 수 있었으며 사망자 수와 유사한 계절변동을 나타내었다. 대기 중 미세먼지의 경우에는 2002년 황사로 인한 극한치가 존재하는 것을 확인할 수 있었고, 기온, 습도, 기압은 뚜렷한 계절적 변동추세를 볼 수 있었다. 특히, 습도의 경우에는 시정거리와 유사한 패턴을 나타내었다.

Table 1. Schematic procedure of building a model to describe the variation in the daily respiratory deaths of all age in Seoul, 1999~2004.

Description of model	AIC ^a
Time	
T ₁ : smoothed function of date	2425.475
T ₂ : T ₁ +indicator variables for day of week	2422.451
Weather	
W: T ₂ +smoothing function of TEMP ^b +HUMID ^c +PRESSURE ^d	2385.167
Pollutant (covariate)	
P: W+PM ₁₀	2373.896
Visibility	
V: P+visibility	2370.841

^aAkaike's information criterion, ^bAir temperature, ^cRelative humidity, ^dBarometric pressure

3.2 독립변수(시정, 대기오염물질 및 기상변수)들간의 상관분석

표 3은 연구대상기간 동안의 시정과 대기오염 기

Table 2. Summary statistics for daily respiratory deaths, pollutants, weather and visibility in Seoul, 1999~2004.

Variable	N ^a	Min ^b	Percentile			Max ^c	Mean	SD ^d	IQR ^e	
			25 th	50 th	75 th					
Respiratory death counts	All aged	12205	0.0	4.0	5.0	7.0	21.0	5.6	2.7	3.0
	0~15 aged	127	0.0	0.0	0.0	0.0	2.0	0.1	0.2	0.0
	16~64 aged	2182	0.0	0.0	1.0	2.0	8.0	1.0	1.0	2.0
	65+ aged	9896	0.0	3.0	4.0	6.0	17.0	4.5	2.4	3.0
Visibility	Visibility (km)	2192	0.5	8.3	12.3	15.9	27.3	12.2	5.2	7.6
Air pollutants	PM ₁₀ (µg/m ³)	2192	10.3	42.1	61.1	82.6	1016.4	68.5	48.2	40.5
Weather	Temperature (°C)	2192	-15.7	4.2	14.3	22.0	30.4	13.0	10.1	17.8
	Relative humidity (%)	2192	26.0	52.5	63.0	72.9	95.8	62.9	14.2	20.4
	Barometric pressure (hPa)	2192	990.7	1009.8	1016.0	1022.3	1039.2	1016.1	8.1	12.5

^aNumber of sample size, ^bMinimum, ^cMaximum, ^dStandard deviation, ^eInterquartile range

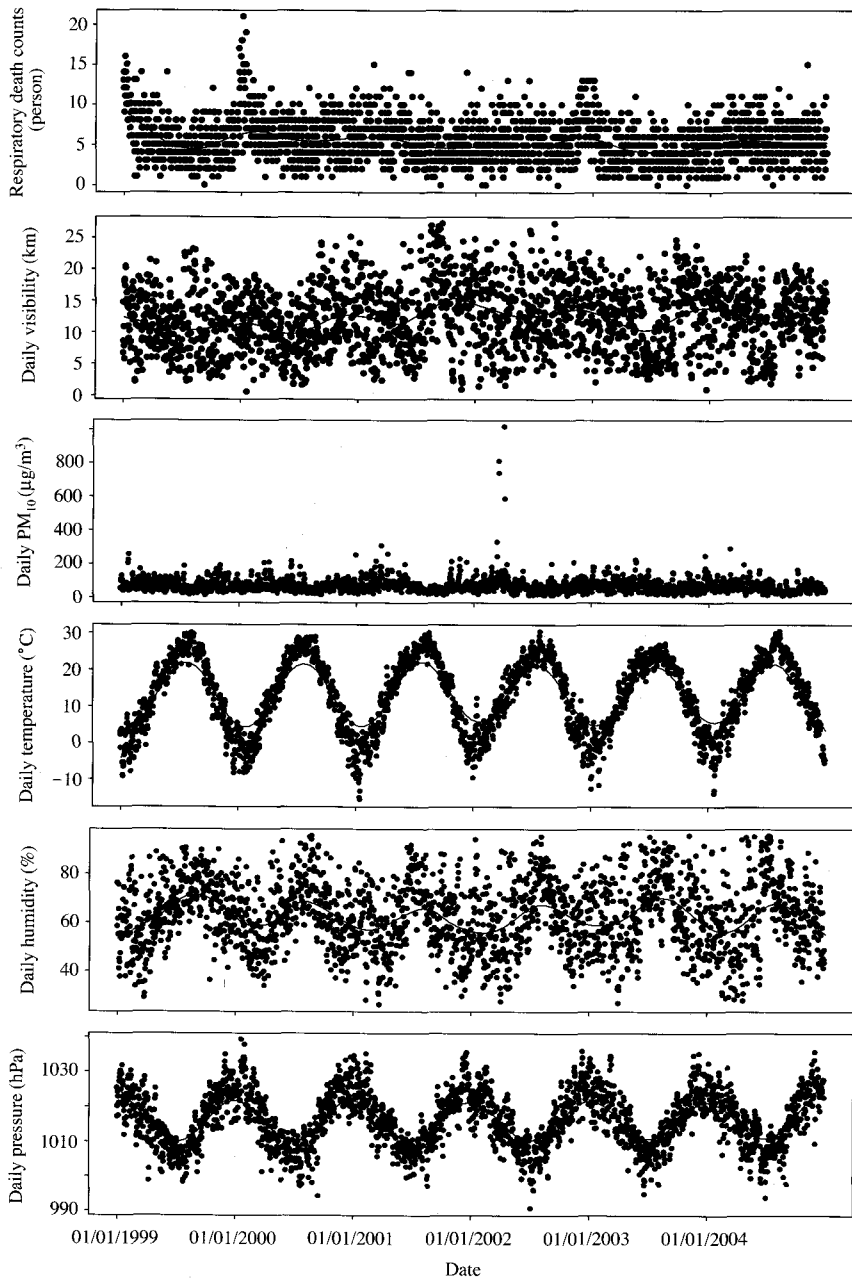


Fig. 2. Daily number of respiratory death count for all aged, and daily average concentration of visibility, PM₁₀, air temperature, relative humidity, and barometric pressure using long-term time trends in Seoul, 1999~2004.

준물질 및 기상변수들간의 상관성을 분석한 결과이다. 기존의 문헌에서와 마찬가지로 시정은 대기오염 물질 중 미세먼지와 가장 높은 역상관성($r=-0.46$)

을 나타내었으며, 기상자료 중에는 습도와 가장 높은 역상관성을 나타내었다. 한편, 동일한 장소(서울시 동작구 신대방동에 위치한 기상청)에서 측정된 입경

별 미세먼지의 개수농도와 시정간의 상관성을 분석한 결과, 중량농도($r = -0.62$)보다 높은 상관성($r = -0.77$)을 나타내었고 특히, 입경이 작을 수록 상관성의 크기가 증가하는 결과를 나타내어 시정과 미세먼지 개수농도간에 유의한 관련성이 있음을 확인(시정과 상관성의 크기: CH-2 > CH-3 > CH-4 > CH-5 > CH-6 > CH-7) 하였다(표 4).

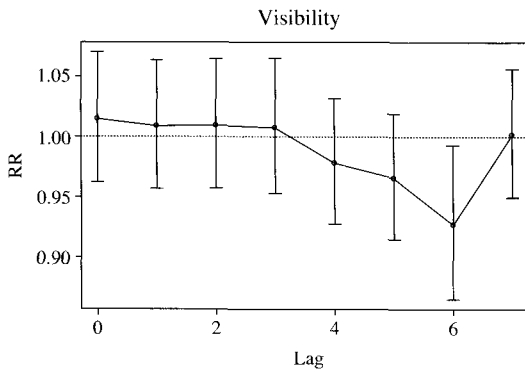


Fig. 3. Relative risk (RR) and 95% confidence interval (CI) for the relation of visibility and respiratory death of children (0~15 years old) according to various lags, in Seoul, 1999~2004.

3.3 시정과 연령별·계절별 사망의 상대위험을

본 연구에서는 대기오염의 지표인 시정을 통해 건강영향을 평가하는 데 있어서 당일에서 7일 이전까지의 지연효과(Lag effect 혹은 induction time)를 평가하였다. 그림 2는 15세 이하 연령층에서 노출 후 6

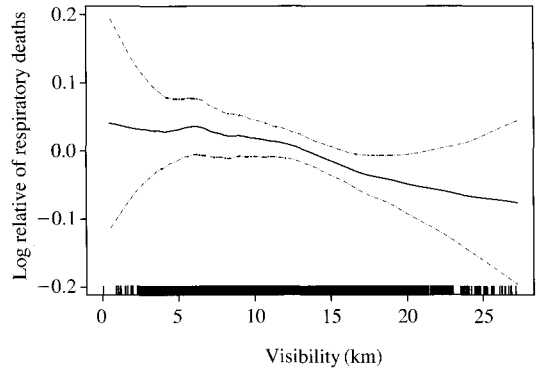


Fig. 4. Log relative risk of respiratory death count (all aged) vs. the visibility adjusted for long-term time trends and weather information in Seoul, 1999~2004. The dashed lines give 95% confidence limits, and the vertical lines along the x-axis indicate the number of observations.

Table 3. Pearson correlation coefficients between daily mean concentration of air pollutants and weather variables (N=2192 days).

Variable	Visibility	PM ₁₀	CO	O ₃	SO ₂	NO ₂	Temperature	Humidity	Pressure
Visibility	1.00	-0.46 (<0.01)	-0.29 (<0.01)	0.01 (0.91)	-0.27 (<0.01)	-0.34 (<0.01)	-0.17 (<0.01)	-0.59 (<0.01)	0.28 (<0.01)
PM ₁₀		1.00	0.35 (<0.01)	0.04 (0.07)	0.38 (<0.01)	0.43 (<0.01)	-0.09 (<0.01)	-0.09 (<0.01)	0.05 (0.02)
CO			1.00	-0.29 (<0.01)	0.82 (<0.01)	0.62 (<0.01)	-0.42 (<0.01)	-0.09 (<0.01)	0.44 (<0.01)
O ₃				1.00	-0.15 (<0.01)	-0.15 (<0.01)	0.53 (<0.01)	-0.16 (<0.01)	-0.46 (<0.01)
SO ₂					1.00	0.65 (<0.01)	-0.42 (<0.01)	-0.22 (<0.01)	0.42 (<0.01)
NO ₂						1.00	-0.23 (<0.01)	-0.19 (<0.01)	0.34 (<0.01)
Temperature							1.00	0.39 (<0.01)	-0.77 (<0.01)
Humidity								1.00	-0.48 (<0.01)
Pressure									1.00

Note : The parentheses are p-value.

Table 4. Pearson correlation coefficients between various particle concentration and visibility in Seoul, 2001.

	Visibility	PM ₁₀	CH-2	CH-3	CH-4	CH-5	CH-6	CH-7
Visibility	1.00	-0.62 (<0.01)	-0.77 (<0.01)	-0.63 (<0.01)	-0.50 (<0.01)	-0.35 (<0.01)	-0.17 (<0.01)	-0.13 (0.02)
PM ₁₀		1.00	0.51 (<0.01)	0.56 (<0.01)	0.53 (<0.01)	0.56 (<0.01)	0.52 (<0.01)	0.48 (<0.01)
CH-2			1.00	0.85 (<0.01)	0.66 (<0.01)	0.38 (<0.01)	0.09 (0.12)	-0.01 (0.94)
CH-3				1.00	0.94 (<0.01)	0.67 (<0.01)	0.29 (<0.01)	0.15 (<0.01)
CH-4					1.00	0.85 (<0.01)	0.48 (<0.01)	0.31 (<0.01)
CH-5						1.00	0.85 (<0.01)	0.70 (<0.01)
CH-6							1.00	0.94 (<0.01)
CH-7								1.00

Note : The parentheses are p-value; The size range of CH-2, CH-3, CH-4, CH-5, CH-6 and CH-7 are 0.50~0.82 μm, 0.82~1.35 μm, 1.35~2.23 μm, 2.23~3.67 μm, 3.67~6.06 μm and 6.06~10.00 μm, respectively using OPC (optical particle counter) measured at KMA site.

Table 5. Estimated percentage change in the risk of respiratory death and 95% confidence intervals associated with unit increase in the daily average visibility with selected best lag time in GAM model^a in Seoul, 1999~2004.

Age group	All season		Spring		Summer		Fall		Winter	
	RR ^b %	95% CI ^c	RR %	95% CI	RR %	95% CI	RR %	95% CI	RR %	95% CI
All aged	-0.57	-1.01~-0.12	0.00	-1.04~1.04	0.45	-0.43~1.33	-0.66	-1.59~0.29	-0.41	-1.55~0.75
0~15 aged	-7.12	-13.29~-0.51	-6.05	-18.92~8.87	-3.75	-16.59~11.06	-0.96	-15.20~15.69	-12.16	-23.82~1.28
16~64 aged	-0.20	-1.26~0.87	-1.82	-4.17~0.59	1.64	-0.38~3.70	0.75	-1.53~3.08	-0.23	-2.90~2.53
65+ aged	-0.43	-0.93~0.06	0.68	-0.47~1.85	0.42	-0.58~1.42	-0.98	-2.01~0.06	-0.49	-1.75~0.79

^aThis model includes the following variables for day of week and air particle matter, and smooth loess function of date, temperature, humidity, and barometric pressure, ^bRelative risk, ^cConfidence interval.

일체의 지연효과를 나타내었는데, 이러한 결과는 시정으로 표현된 대기오염의 수준이 당일날 바로 영향을 나타내지 않고 약 6일 전의 대기오염 수준이 급성적인 영향을 나타내는 것으로 평가되었다(그림 3).

그림 4는 시정과 전 연령층에 대한 호흡기계 사망의 상대위해도간의 관계를 비모수적 방법에 의해 나타낸 그림으로서, 시정이 증가함에 따라 사망의 상대위해도 값이 선형적으로 감소함을 나타내어 본 연구에서 가정된 시정 증가와 사망 발생의 역선형성이 타당함을 제시하였다. 또한 시정 거리의 전 구간에 걸쳐 이러한 역선형성이 나타난다는 의미는 대기오염 수준의 저감을 통해 시정을 개선하면 할수록 건강영향은 좋아질 수 있다는 것을 확인하였다.

표 5에서는 시정이 1 km 증가함에 따라 호흡기계

사망의 연령별·계절별 상대위해도를 제시하였다. 전체연령의 경우 시정이 1 km 증가함에 따라 통계적으로 유의하게 사망 위해도가 0.57% (95% 신뢰구간: -1.01%~-0.12%) 감소하는 결과를 나타내었으며, 특히 야외활동이 많고 대기오염에 민감하다고 보고되고 있는 15세 이하 어린이의 경우에는 통계적으로 유의하게 사망위해도가 7.12% (95% 신뢰구간: -13.29%~-0.51%) 감소하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 기존의 문헌에서 보고된 바와 같이 대기오염 민감집단인 어린이와 노인에게 있어서 사망위해도의 크기가 증가함을 확인할 수 있었고 특히 주로 실내에서만 생활하는 노인보다는 야외활동이 잦은 어린이가 더 민감하게 영향을 받는 것을 확인할 수 있었다. 1998년부터 2001년까지의 서울 인구집단을 대상으

로 수행한 대기오염 노출과 사망에 관한 시계열 연구에서도 미세먼지 노출로 인한 사망위해도가 노인(1.5% 증가)에 비해 어린이(4.5% 증가)에서 더 높은 사망위해도를 나타낸 바 있다(조용성 등, 2003). 한편, 홍콩에서의 연구에서는 시정이 10 km 증가할 때 마다 통계적으로 유의하게 호흡기계 사망이 약 8% 감소하여 본 연구와 유사한 결과를 보고하였다(Thach *et al.*, 2004). 또한, 시정이 계절적인 변화를 나타내고 있음을 감안(그림 2)하여 계절별 상대위해도를 계산한 결과, 모든 계절에서 어린이가 가장 큰 영향을 받는 것으로 나타났고 특히 겨울철에는 그 위해도의 크기가 다른 계절에 비해 2배 이상 높게 나타남을 확인하였다.

4. 고 찰

시정은 육안으로 식별이 쉬워 일반 국민들에게는 체감 오염의 지표로 인식되고 있으며, 특히 대기오염 물질 중 가장 인체에 위해한 것으로 보고되고 있는 대기 중 미세먼지와 높은 상관성을 나타내어, 미세먼지에 의한 대기오염의 대표적인 지표로 알려져 있다. 따라서 본 연구에서는 이러한 시정을 대기 중 미세먼지 농도의 지표로 보고 이들 시정의 변화와 호흡기계 사망간의 관련성을 평가한 결과, 시정이 증가함에 따라 호흡기계 사망 위해도가 통계적으로 유의하게 감소하였고 특히, 외부활동이 많고 대기오염 민감 집단으로 구별되는 15세 이하 어린이의 경우에는 그 위해도가 더 크게 나타남을 확인하였다.

2005년 서울시의 연간 교통량은 약 30억 대인 것으로 보고되고 있어 자동차에서 직접 배출되는 미세먼지를 시정 장애의 주요 원인으로 생각할 수 있다(그림 1). 이러한 자동차에서의 미세먼지 배출의 영향은 아침의 높은 상대습도와 안정한 대기 상태에서 더욱 커질 수 있으며 수분을 흡수하여 성장한 입자는 기온이 상승하여 상대습도가 낮아져도 수분을 쉽게 방출하지 않아 빛 소산에 유효한 크기를 유지함으로써 오후에도 시정악화를 초래할 수 있는 것으로 보고되고 있다(Seinfeld and Pandis, 1998). 또한 여름철 오후에는 광화학 반응에 의해 생성된 미세먼지가 시정 장애에 기여할 수 있으며, 특히 이들 모든 변화의 배경에는 황사를 포함하여 중국에서 배출된 대기

오염물질이 이동하며 형성된 2차 오염물질이 자리잡고 있는 것으로 알려져 있다(김영성 등, 2002). 한편, 본 연구기간 동안의 우리나라 대기오염과 시정간의 관계를 살펴보면, 환경부의 대기오염 저감 정책에 힘입어 SO₂와 CO는 현저히 감소하는 추세를 나타내고 있으나, 자동차 배출에 의해 영향을 받는 NO₂와 중국 황사 등의 영향을 받는 PM₁₀ 농도는 증가하는 추세를 보이고 있다. 그러나 시정의 경우에는 다양한 대기오염 개선을 위한 노력에도 불구하고 전혀 개선되고 있지 않음을 확인할 수 있었다. 이러한 이유로는 시정과 관련성이 가장 큰 대기 중 미세먼지의 농도가 개선되고 있지 않기 때문인 것으로 판단된다.

기상청의 시정은 목측에 의한 것으로 하늘을 배경으로 검은 빛을 띤 수목이나 건물을 구별할 수 있는 최대거리를 지칭한다. 지상 약 1.5 m의 눈높이에서 수평 방향의 사물을 바라보며, 방향별로 시정이 다를 때는 최소시정을 기록한다. 사물의 구별이 어려운 야간에는 주로 전등의 불빛 등을 대상으로 한다. 물론 장비를 이용한 측정과 달리 목측에 의한 측정은 개인의 숙련도나 특히, 빛공해가 심한 야간에는 배경의 변화에 영향을 받을 수 있으며, 각 측정소마다 목표물의 수와 거리가 제한되어 있어 최고 및 최저 시정이 결정되는 문제점이 있다(김영성 등, 2002). 또한 김경원과 김영준(2003)이 보고한 바와 같이 시정은 미세먼지 자체 이외에도 이산화황과 이산화질소의 2차오염물질인 황산염과 질산염 및 유기화합물, 원소탄소입자 등에 의해서도 영향을 받을 수 있으나 본 연구에서는 자료수집의 어려움으로 인하여 이부분에 대한 분석이 이루어지지 않았다. 그러나 이러한 제한점에도 불구하고 시정은 식별이 쉬워 시민들에게 대기오염에 대한 체감오염의 지표로 많이 인식되고 있다는 점을 고려할 때 본 연구에서 사용된 대기오염과 사망간의 관련성을 평가하기 위한 지표로서 유용하다고 판단된다.

시정거리와 사망자 수의 일별 변동과 같은 시계열 자료의 분석에서 가장 중요한 내용은 장기적인 추세 변동이나 계절변동, 기상요인, 인플루엔자의 유행, 요일 등의 영향으로 인한 교란작용을 어떻게 제거하느냐에 따라 달려 있다. 본 연구에서는 GAM을 사용하여 이러한 교란작용을 보정하였고, 시간, 기온, 습도, 기압 등은 nonparametric smooth function을 사용하였고 요일은 위장변수(dummy variable)로 처리하여

모델에 포함시켰다. 한편, 이러한 통계적 방법을 사용하여 우리나라를 포함한 전 세계적으로 대기오염과 사망간의 관련성을 평가하기 위한 수단으로 사용되고 있는 시계열 분석의 경우, 대기오염 수준을 평가하는 데 있어서 대기 측정 모니터링 자료를 이용하고 있다. 그러나 이러한 시계열 분석은 일반인의 환경오염 노출상황이 특정 오염물질에 비선택적이라는 데 있어서 근본적인 제한점을 가지고 있다. 즉, 대기오염의 경우 일반인이 호흡과정에서 선택적으로 특정 물질만을 호흡하는 것이 불가능하며 대기 중에 존재하는 모든 오염물질들이 복합적(complex mixture)으로 인체에 흡입된다고 하는 것이 합리적인 것이다. 이러한 점에 비추어 대기오염 관련한 인체영향은 인체 내로 흡입된 오염물질들의 복합적 영향으로 보는 것이 타당하여 지금까지의 많은 시계열 연구들이 특정 오염물질의 영향을 개별적으로 평가하였다는 점에서 연구결과의 일반화가 제한적일 수밖에 없다(이종태와 김 호, 2001).

이러한 제한점과 더불어 본 연구에서는 시정과 가장 밀접한 관련이 있다고 보고되고 있는 극미세먼지(PM_{2.5})를 측정자료의 부재로 인해 보정하지 못하였다는 점이다. 최근 강충민 등(2006)은 이러한 극미세먼지 자료의 보완방법으로 일정기간 동안 실제 측정된 PM_{2.5} 자료와 측정망에서 모니터링 된 PM₁₀ 자료를 이용하여 회귀식을 구한 후 이를 호흡기질환 사망간의 연관성을 규명하였다. 그 결과 극미세먼지(PM_{2.5})와 호흡기질환 사망간에 통계적으로 유의한 상관성을 제시하였으나, 통계적 분석방법의 제한점으로 인해 PM₁₀과 PM_{2.5}간의 상대위험률을 비교하지 못하였다. 이러한 종합적인 문제를 해결하기 위해서는 극미세먼지의 질량농도에 대한 정부차원의 측정망이 필요하지만 현재 상황에서는 이를 해결하기가 쉽지 않고 그 대안으로서 입경별 미세먼지 농도를 산출할 수 있는 개수농도에 대한 연구가 필요하다고 판단된다. Cho *et al.* (2007)은 서울시 대기 중 미세먼지 개수농도가 총사망과 호흡기계 및 심혈관계 조기 사망간에 통계적으로 유의한 관련성이 있음을 보고하여 대기 중 미세먼지의 지표로서 개수농도가 생리학적으로 중요한 지표임을 확인하였다. 특히, 대기 중 미세먼지 표면에는 황산염, 질산염, 산, 각종 중금속 등 다양한 유해물질이 흡착되어 있어 동일한 농도일 경우 전체 체표면적이 상대적으로 큰 미세먼지가 건

강에 더 큰 영향을 줄것으로 보고되고 있어, 현재 대기 중 미세먼지의 지표농도로 가장 널리 사용되고 있는 질량 농도보다는 개수농도가 생리학적으로 더 중요한 지표 농도로 여겨지고 있는 추세이다. 정창훈 등은 2004년 황사기간 동안 인천 지역을 대상으로 대기 중 미세먼지의 특성을 분석한 결과, 질량농도와 개수농도간에 약 70%의 높은 상관성을 나타내었다고 보고하였으며, 이러한 결과는 질량농도의 대체자(surrogator)로서 개수농도가 적합한 것임을 제시한 결과라 할 수 있다(정창훈 등, 2005). 특히 이 연구에서 시사할 점은 개수 농도자료는 질량 농도 자료와 달리 입자의 크기별 개수 농도를 알 수 있어서 입자의 크기 분포를 파악하는 데 적절한 방법임을 제안하였다.

이상과 같이 대기오염으로 인한 건강영향을 평가하기 위해서는 대기오염 수준을 정확히 판단할 수 있는 직접적인 측정과 분석에 관한 연구나 사업이 필요하지만 이를 위해서는 많은 비용과 시간이 소요된다. 이러한 제한점을 감안하여 대기오염의 수준을 간접적으로 확인할 수 있고 보다 적은 비용과 시간이 소요되는 시정, 자동차 운행횟수, 거주지와 도로와의 거리 등 기존의 모니터링 자료를 활용한 대기오염 지표를 이용하는 것이 필요하다고 판단된다.

5. 결 론

본 연구는 1999년 1월부터 2004년 12월까지의 서울시 인구집단을 대상으로 대기오염의 지표인 시정이 호흡기계 사망에 미치는 영향을 추정한 결과, 연구기간동안 관측된 시정의 평균거리는 12.2 km 였으며, 호흡기계 사망자 중 전체연령, 어린이(0~15세), 성인(16~64세), 노인(65세 이상)의 일일 사망자수는 각각 5.6명, 0.1명, 1.0명, 4.5명으로 나타났다. 또한 시정과 밀접한 관련이 있어 본 연구에서 시정의 공변량(covariate)으로 사용된 PM₁₀의 평균값은 68.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 대기환경기준을 초과하지 않았다. 또한, 비모수적인 방법을 이용하여 시정거리의 증가에 따른 호흡기계 사망의 상대위해도간의 관계를 평가한 결과, 시정 거리의 전 구간에 걸쳐 역선형성이 나타나 대기오염 수준을 저감하여 그 결과 시정이 개선되면 호흡기계 사망도 줄어들 수 있다는 것을 확인

하였다. 즉, 서울시에서 대기환경을 개선하여 시정을 1 km 증가시키면 통계적으로 유의하게 사망 위해도가 0.57% (95% 신뢰구간: -1.01%~ -0.12%) 감소하는 결과를 나타내었으며, 특히 15세 이하 어린이의 경우에는 통계적으로 유의하게 사망위해도가 7.12% (95% 신뢰구간: -13.29%~-0.51%) 감소하는 것으로 나타났다.

결론적으로, 대기오염에 대한 영향을 평가하기 위해서는 대기오염 수준을 측정하고 분석하는 데 필요한 많은 시간과 비용이 소요된다는 제한점이 있다. 이러한 제한점을 개선하기 위해서는 대기오염 수준을 대표하는 지표를 이용함으로써 사망 및 상병간의 관련성을 살펴보는 것이 더 효과적일 수 있으나, 국내에서는 아직 이러한 대기오염 지표와 사망 및 상병에 관한 연구가 진행된 바 없다. 따라서 본 연구에서는 이러한 시정을 대기 중 미세먼지 농도의 지표로 보고 이들 시정의 변화와 호흡기계 사망간의 관련성을 평가한 결과, 시정이 증가함에 따라 호흡기계 사망 위해도가 통계적으로 유의하게 감소하였고 특히, 외부활동이 많고 대기오염 민감집단으로 구별되는 15세 이하 어린이의 경우에는 그 위해도가 더 크게 나타남을 확인하였다. 비록 본 연구에서 자료로 활용된 시정변화가 대기오염 저감을 위한 직접적인 정책적 방안을 제안하기에는 제한점이 있지만, 대기오염 수준의 지표를 통해 대기오염 관리 정책으로 인한 국민 건강위해도를 평가함으로써 대기오염 정책의 효과를 판정하는 데 필요한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

참고 문헌

강충민, 박성균, 선우영, 강병욱, 이학성 (2006) 서울시 미세먼지(PM_{2.5})의 호흡기질환 사망과의 연관성 연구, 한국대기환경학회지, 22(5), 554-563.
 국립환경연구원 (1984) 수도권 지역의 시정장애현상규명을 위한 조사연구(I).

국립환경연구원 (1987) 대기 중 입자상물질의 생성 및 동태에 관한 연구.
 국립환경연구원 (1995) 수도권 지역의 시정장애현상규명을 위한 조사연구(II).
 김경원, 김영준 (2003) 에어로졸의 준실시간 관측에 의한 여름철 도시지역 시점 감쇄 현상의 광·화학적 특성 분석, 한국대기환경학회지, 19(6), 647-661.
 김영성, 이시혜, 김진영, 문길주, 김용표 (2002) 1980년대와 1990년대 우리나라의 시정 변화, 한국대기환경학회지, 18(6), 503-514.
 김용표 (2006) 서울의 미세먼지에 의한 대기오염, 한국대기환경학회지, 22(5), 535-553.
 윤순창, 이강웅 (1998) 서울지역의 시정 장애 요인에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 14(3), 229-235.
 이종태, 김 호 (2001) 대기오염의 건강영향평가를 위한 역학연구 설계 및 방법론, 예방의학회지, 34(2), 119-126.
 정창훈, 전영신, 최병철 (2003) OPC (광학적 입자 계수기)로 측정된 2001년 서울지역 에어로졸의 입경 분포, 한국대기환경학회지, 19(5), 515-528.
 정창훈, 조용성, 이종태 (2005) 광학적 입자계수기를 이용한 2004년 황사기간 인천지역 에어로졸 특성, 한국환경과학회지, 14(6), 565-575.
 조용성, 이종태, 김윤신, 홍승철, 김 호, 하은희, 박혜숙, 이보은 (2003) 서울시 대기오염과 일별 사망의 상관성에 관한 시계열적 연구(1998~2001), 한국대기환경학회지, 19(6), 625-637.
 조용성, 이종태, 손지영, 김윤신 (2006) 메타분석을 적용한 전국 7개 대도시의 대기오염과 일일사망발생의 상관성 연구(1998~2001), 한국환경보건학회지, 32(4), 304-315.
 한국과학기술연구원 (1994) 서울지방의 스모그현상 연구(III).
 Cho, Y.S., J.T. Lee, C.H. Jung, Y. Chun, and J.Y. Son (2007) Relationship between particulate matter measured by optical particle counter and mortality in Seoul, Korea during 2001, J. Environ. Health, Accepted for Publication.
 Dominici, F., A. McDermott, M. Daniels, S.L. Zeger, and J.M. Samet (2003) Mortality among residents of 90 cities. Revised analyses of time-series studies of air pollution and health. In: Health Effects Institute, Boston, MA, 2003.
 Garcia-Nieto, P.J. (2002) Study of visibility degradation due to coagulation, condensation, and gravitational settling of the atmospheric aerosol. Aerosol Sci. Tech., 36, 814-827.
 Katsouyanni, K., G. Touloumi, C. Spix, J. Schwartz, F. Bal-

- ducci, S. Medina, G. Rossi, B. Wojtyniak, J. Sunyer, L. Bacharova, J.P. Schouten, A. Ponka, and H.R. Anerson (1997) 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, *Br. Med. J.*, 314, 1658-1663.
- Kim, K.W., Y.J. Kim, and S.J. Oh (2001) Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea, *Atmos. Environ.*, 35, 5157-5167.
- Lee, J.T., H. Kim, H. Song, Y.C. Hong, Y.S. Cho, S.Y. Shin, Y.J. Hyun, and Y.S. Kim (2002) Air pollution and asthma among children in Seoul, Korea, *Epidemiology*, 13, 481-484.
- Lee, J.T., H. Kim, Y.C. Hong, H.J. Kwon, J. Schwartz, and D.C. Christiani (2000) Air pollution and daily mortality in seven major cities of Korea, 1991 ~ 1997, *Environ. Res.*, 84, 247-254.
- Pope, C.A. and L.S. Kalkstein (1996) Synoptic weather modeling and estimates of the exposure-response relationship between daily mortality and particulate air pollution, *Environ. Health Perspect.*, 104, 414-420.
- Schwartz, J. (1994) Air pollution and hospital admissions for the elderly in Birmingham, Alabama, *Am. J. Epidemiol.*, 139, 589-598.
- Seinfeld, J.H. and S.N. Pandis (1998) Atmospheric chemistry and physics: From air pollution to climate change. Wiley-Interscience, New York, NY, USA.
- Thach, T.Q., C.M. Wong, K.P. Chan, P.K. Chau, and A.J. Hedley (2004) Effects of air pollution measured by visibility on mortality in Hong Kong, Clifford E Carnicom, Santa Fe, New Mexico, June 2003.