

메타분석을 적용한 전국 7개 대도시의 대기오염과 일일사망발생의 상관성 연구(1998년~2001년)

조용성*,** · 이종태**† · 손지영** · 김윤신**

*국립환경과학원 환경보건센터, **한양대학교 보건관리학과

A Meta-Analysis of Air Pollution in Relation to Daily Mortality in Seven Major Cities of Korea, 1998-2001

Yong-Sung Cho*,** · Jong-Tae Lee**† · Ji-Young Son** · Yoon-Shin Kim**

*National Center for Environmental Health, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

**Department of Health Management, Hanyang University, Seoul, Korea

(Received May 15, 2006/Accepted August 11, 2006)

ABSTRACT

This study is performed to reexamine the association between ambient air pollution and daily mortality in seven major cities of Korea using a method of meta-analysis with the data filed for the period 1998-2001. These cities account for half of the Korean population (about 23 million). The observed concentrations of carbon monoxide (CO, mean = 1.08 ppm), ozone (O₃, mean = 33.97 ppb), particulate matter less than 10 μm (PM₁₀, mean = 57.11 μg/m³), nitrogen dioxide (NO₂, mean = 25.09 ppb), and sulfur dioxide (SO₂, mean = 9.14 ppb) during the study period were at levels below Korea's current ambient air quality standards. Generalized additive models were applied to allow for the highly flexible fitting of seasonal and long-term time trends in air pollution as well as nonlinear associations with weather variables, such as air temperature and relative humidity. Also, we calculated a weighted mean as a meta-analysis summary of the estimates and its standard error. In city-specific analyses, an increase of 41.17 μg/m³ (IQR) of PM₁₀ corresponded to 1~12% more deaths, given constant weather conditions. Like most of air pollution epidemiologic studies, this meta-analysis cannot avoid fleeing from measurement misclassification since no personal measurement was taken. However, we can expect that a measurement bias be reduced in district-specific estimate since a monitoring station is better representative of air quality of the matched district. Significant heterogeneity was found for the effect of all pollutants. The estimated relative risks from meta-like analysis increased compared to those relative risks from pooled analysis. The similar results to those from the previous studies indicated existence of health effect of air pollution at current levels in many industrialized countries, including Korea.

Keywords: air pollution, daily death counts, time-series analysis, generalized additive model

I. 서 론

대기오염 문제의 심각성은 1900년대에 이르러 급격한 산업화로 인하여 발생된 오염피해 사례를 경험하면서 대두되기 시작하였다. 특히 1950년대 초반 영국의 런던스모그 사건과 미국의 LA 스모그 사건을 통해 수천명의 사망자가 발생한 이후 대기오염과 건강영향간의 사회적 관심이 집중되기 시작하였으며, 그 이후 대

기오염과 사망간의 관련성을 규명하기 위한 많은 연구들이 수행되기 시작하였다.^{1,2)} 유럽 및 미국을 중심으로 대기오염의 인체위해성에 대한 본격적인 역학적 연구가 수행되기 시작하여 상이한 시간·공간적 차이, 인구·사회학적 차이, 환경적 조건, 산업구조 혹은 대기오염 발생원 차이에서 기인된 대기오염의 질적 차이에도 불구하고 대기오염의 인체위해 가능성을 일관되게 제시하였을 뿐만 아니라, 특히 어린이와 노약자 및 천식과 심혈관계 질환자 등 만성 호흡기성 질환자들과 같은 민감집단(susceptible group)에 있어서는 더 큰 영향을 주는 것으로 규명되고 있다.^{3,5)} 또한, 선진국은 물론이고 우리나라를 포함한 여러나라에서 대기질 관리를

†Corresponding author : Department of Health Management, Hanyang University
Tel: 82-2-2220-0248, Fax: 82-2-2298-0248
E-mail : jlce@hanyang.ac.kr

위해 제정한 대기기준 이하의 농도에서도 이 같은 위해성이 규명되고 있어 사회적인 불안을 더욱 가중시키고 있다.^{6,8)}

한편, 우리나라에서 수행된 기존의 대기관련 연구에서는 대기오염과 인체영향과의 관련성을 규명한 연구보다는 거주민의 lifestyle⁹⁾이나 대기오염측정과 발생원 규명 및 기여도 산정 등의 측정·분석 관련 연구가 주로 이루어지고 있었으며,^{9,11)} 1970년대 이후부터 대기오염물질과 사망간의 관련성에 대한 연구가 시작되었으나, 대기오염노출에 대한 만성영향을 주로 설문조사에 의존해서 알아보았기 때문에 결과가 너무 주관적이었고 혼란변수를 제대로 통제하지 못한 결과를 제시하였다.¹²⁾ 이러한 상황에서 1990년대 후반부터 1990년대 자료를 통해 대기오염과 일별 사망에 미치는 단기효과에 대한 연구가 시작되면서, 서울에서 오존 50 ppb 증가가 사망을 1.5% 증가시키고, 울산에서는 2.0% 증가시켰다고 보고되었다. 또한 일별 사망이 아황산가스와 오존 농도와 관련이 있으며, 총부유분진과는 관계가 없다고 보고하였다.¹³⁾ 1991~1997년까지의 자료를 가지고 7개 주요대도시를 대상으로 한 연구에서는 오존이 사망에 유의한 영향을 미치지 않았고, 총부유분진과 아황산가스가 유의한 영향을 미쳤다고 보고하였다.⁷⁾

본 연구에서는 대기오염과 건강영향에 대한 관련성을 규명하기 위해 1998년부터 2001년까지 우리나라 7개 주요 대도시의 4년간의 대기, 기상, 사망 자료를 모아 대기오염과 일별 사망간의 관련성을 규명하고자 하였으며, 세부목적으로는 각 도시별 사망위해도 및 전체 도시를 병합(pooling)한 위해도, 연령별 위해도 차이를 대기오염물질별로 구분하여 사망간의 변이성(variation)을 평가하고자 하였다. 또한, 각 도시별 개별 위해도를 병합하여 하나의 통일된 병합위해도를 산정하기 위하여 메타분석을 수행하였으며, 이 결과를 7개 도시를 병합한 결과와 비교하였다.

II. 연구방법

본 연구는 1998년 1월부터 2001년 12월까지의 7개 대도시(서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 인천, 울산)의 일일 사망자료와 환경측정자료 및 기상자료를 이용하여 시계열 분석방법 및 메타분석방법으로 대기오염물질이 일별 사망에 미치는 영향을 추정하였다. 구체적인 목적으로는 첫째, 각 도시별 사망위해도 및 전체 도시를 병합한 위해도, 연령별 위해도 차이를 대기오염물질별로 구분하여 사망간의 변이성을 평가하였으며, 둘째, 각 도시별 개별 위해도를 병합하여 하나의 통일된 병합 위

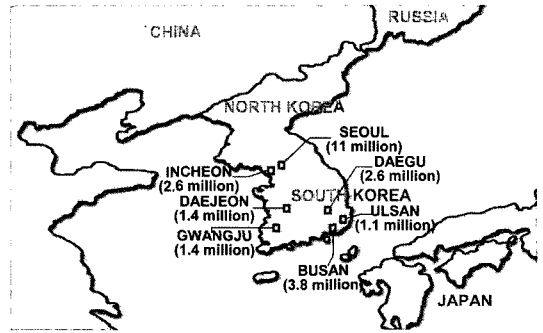


Fig. 1. Location of seven major cities in this study.

해도를 산정하기 위하여 메타분석을 수행하였으며, 이 결과를 7개 도시를 병합한 결과와 비교하였다.

1. 연구대상기간 및 지역

1998년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지를 연구기간으로 선정하였으며, 대한민국 수도인 서울시는 한강하류에 위치하였고 전 국민의 22% 이상인 1,100만여명의 인구가 거주하는 대도시로 행정구역은 25개 구와 530개 동으로 이루어져 있고, 면적은 606.58 km²이다. 또한, Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 본 연구의 대상지역인 7개 도시 전체가 차지하는 비율은 인구의 경우 23,094,968명으로 전체의 47.83%를 차지하고 있으며, 상대적으로 면적은 99,538 km²로 전 국토의 5.36%만을 차지하고 있어 7개 도시에 인구가 밀집되어 있음을 알 수 있다.¹⁴⁾

2. 연구자료

1) 사망자료

본 연구에서는 1998년 1월 1일부터 2001년 12월 31일까지 연구기간으로 정하여 전국 7개 도시에서 발생된 사망건수자료를 국립통계청으로부터 받아 일별로 사망자 수로 파악하였다. 사망원인별 분류에서 사고사나 외인사로 인한 사망(ICD 10th, V01-Y89)은 분석에서 제외하였고 그 도시의 거주자라도 도시 밖에서 사망한 경우는 본 분석에서 제외하였다. 일별 사망자 수를 의인사를 제외한 총사망(ICD 10th, A00-R99)과 연령별 4구분[전체연령, 소아(0~15세), 노인(65세 이상), 성인(16~64세)]으로 나누어 분석하였다.

2) 대기자료

대기오염자동측정소에서는 대기중의 PM₁₀, 아황산가스(SO₂), 이산화질소(NO₂), 오존(O₃), 일산화탄소(CO) 등 대기환경기준물질로 선정된 5개 항목을 대상으로 하였으며, 측정된 모든 자료는 자동감시체계(TMS)를 통

해 관할 환경관리청 및 환경부로 전송되고 있다.

본 연구에서는 PM₁₀, 아황산가스, 그리고 이산화질소의 경우 각 측정지점에서의 날짜에 따른 시간별 평균값을 구하고 이들 각 시간평균값을 이용하여 지역별 일일평균값을 구하였다. 이는 각 측정지점에서 연속적으로 측정값이 빠지게 되었을 때의 경우를 보정하기 위함이다. 또한 오존과 일산화탄소의 경우는 각 측정지점에서의 일일 1시간 평균값의 최고값을 이용하여 이들의 평균값을 이용하여 일일평균값을 구하였다.

3) 기상자료

기상자료는 기상청에서 측정한 자료 중 기온과 상대습도를 이용하였는데 이는 사망률의 일일 변동이 기온과 습도의 변화에 따라 연관성이 큰 것으로 보고되고 있기 때문이다. 따라서 본 연구에서는 사망발생과 동일한 날의 기상자료를 혼란변수로 적용하여 분석하였으며 이들 자료의 일일평균값을 이용하였다.

3. 통계분석

본 연구에서 종속변수는 7대 도시에서 발생한 당일 사망자수이고 이 중 외인사를 제외한 총사망을 대상으로 분석하였으며, 독립변수는 대기오염물질농도(PM₁₀, SO₂, NO₂, O₃, CO), 기온, 상대습도 등의 기상변수를 사용하였다.

사망에 영향을 미치는 독립변수들이 사망당일에 즉시 영향을 보일 수 있지만 지연효과를 보일 수 있으므로 사망당일과 1일전~7일전의 오염농도 및 대기오염으로 인한 영향을 많이 받은 날들에 대한 평균 오염농도로 구분하여 lag time을 주어 일별 사망자 수를 가장 잘 설명하는 변수를 선정하였다.

일반적으로 일별 사망수는 전체 인구집단에 비해 매우 드물게 일어나며, 단위는 발생 숫자이므로 항상 양의 정수가 된다. 따라서 하루 동안 발생한 사망자수에 대한 확률 모형은 포아송분포(Poisson distribution)가 사용되며 대상인구집단이 동일한(homogenous) 위험을 지니고 있는 것으로 가정한다. 일반적으로 포아송 선형 회귀모형(Poisson linear regression model)을 보면 다음과 같다.

$$\ln E(Y) = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k$$

여기서, $E(Y)$ 는 종속변수(Y)에 대한 기댓값이고, β_i 는 각 예측변수(predictor variable)에 대한 회귀계수(regression coefficient)이며, X_i 는 예측변수를 나타낸다.

사망률의 일일 변동은 대기기온과 상대습도의 변화와 밀접한 관련성이 있다는 여러 연구들^{15,16)}에 따라 본 연구에서는 사망발생과 동일한 날의 기상조건을 혼란변

수로 적용하여 통계분석에 이용하였다.

또한 각 대기오염물질 노출과 사망과의 상관성을 추정하는데 있어서 소위 'lead-lag' 효과에 대한 적절한 추정을 위해 lag time을 제시하였으며, 대기오염농도 및 기상요인 등에 의해 서로 연계되어진 사망간의 자기상관관계(autocorrelation)을 보정하고 계절적 변동을 보정하며, 예측변수에 대한 변환함수를 통해 비선형적 관계를 반영하기 위해 비모수적 평활(nonparametric smoothing)에 의해 회귀분석을 적합시키는 Generalized Additive Model(GAM)을 이용하여 분석하였다. 최근에는 위의 일반화부가모형의 오류(default convergency)를 보정하도록 설계한 GAM-control 모델이 이용되고 있다. 본 연구에서 사용될 GAM-control은 다음의 식으로 정의되며,

$$\ln E(Y) = S_1(X_1) + S_2(X_2) + \dots + S_k(X_k)$$

여기서, S_i 는 i 번째 변수에 대한 평활함수를 나타낸다.

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 습도를 통제하였다. 사망에 대한 장기추세, 계절변동, 기온, 습도, 요일 효과들이 포함된 최종 모형은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\ln E(\text{Daily death count}) = S(\text{date}) + S(\text{air temperature}) + S(\text{humidity}) + D(\text{day of the week}) + \text{각 오염물질 농도}$$

여기서, S 는 Loess 평활함수이며, D 는 가변수(Dummy variable)를 나타내었다.

4. 메타분석

본 연구에서는 대기 오염물질 노출과 사망간의 관계를 전국 7대 도시의 개별 위해결과를 토대로 회귀계수, 표준오차, 유의확률이나 95% 신뢰구간등의 정보를 추출하였다. 위의 과정을 거쳐 최종적으로 각 오염물질별 농도 증가에 따른 위해도(relative risk)를 산정한 후 각 위해도를 병합(pooling)하여 병합된 영향을 평가하고, 각 연구들간의 이질성(heterogeneity)을 확인하기 위해 다음의 메타분석 방법들을 이용하였다.

첫째, 연구들간의 병합 가능성을 평가하기 위해 이질성 검정을 수행하였는데 이를 위해 처리효과의 일관성을 평가하는 Q-test를 수행하였으며 다음과 같이 산출

하였다.¹⁷⁾

$$Q = \sum_{i=1}^k (\theta_i - \theta)^2 \omega_i \sim \chi^2(k-1)$$

여기서, θ 는 i 번째 연구의 효과크기
 θ_i 는 i 번째 연구의 효과크기의 추정량
 ω_i 는 i 번째 연구의 효과크기의 역분산 추정량
 $\chi^2(k-1)$ 는 자유도 $k-1$ 에서의 chi-square test이다.

둘째, 효과크기의 병합 추정량을 계산하기 위해 고정 효과모형(fixed effects model)과 랜덤효과모형(random effects model)을 사용하였다. 각 연구의 모수(대상 연구 집단은 고정(일정)되었다는 가정에서 여러 연구들의 효과크기를 병합하는 고정효과모형은 동일한 효과크기(예를 들어, 회귀계수, 표준편차 등)로 표현하여 결과를 도출한 연구들을 병합하는 방법으로서 연구의 정밀도(즉, 처리효과: treatment effect)는 가중(weighting)시킨 연구결과와 역변수(inverse of the variance)에 의해 평가하였으며 다음과 같이 산출하였다.¹⁸⁾

$$U = \sum_{i=1}^k (\theta_i \omega_i)^2 / \sum_{i=1}^k \omega_i \sim \chi^2(k-1)$$

여기서, θ 는 i 번째 연구의 효과크기의 추정량
 ω 는 i 번째 연구의 효과크기의 역분산 추정량
 $\chi^2(k-1)$ 는 자유도 $k-1$ 에서의 chi-square test이다.

한편 각 연구마다 모수가 임의로 변한다는 가정에서 연구들을 병합하는 랜덤효과모형은 통계분포의 형태인 여러 가지 효과크기를 포함한 연구들을 평가하고 내부 변수(즉, sampling effect)와 외부정밀도(즉, treatment effect) 모두를 포함한 측정자료의 편차에 관한 전체 모

집단에 대한 평균효과(average effect)를 평가하는 방법으로서 다음과 같이 산출하였다.¹⁸⁾

$$U = \sum_{i=1}^k (\theta_i \Psi_i)^2 / \sum_{i=1}^k \Psi_i \sim \chi^2(k-1)$$

$$\Psi_i = 1/(\omega_i^{-1} + \tau^2)$$

여기서, θ 는 i 번째 연구의 효과크기의 추정량
 ω_i 는 i 번째 연구의 효과크기의 역분산 추정량
 $\chi^2(k-1)$ 는 자유도 $k-1$ 에서의 chi-square test이다.

이 두 가지 모델에 대한 선택은 τ^2 의 적률 추정량에 의해 선택하였는데, $\tau^2 > 0$ 이면 고정효과모형과 랜덤효과모형에 대한 결과가 틀려지므로 두 모델을 모두 사용하여야 한다. 본 연구에서는 대부분의 경우 τ^2 의 값이 0 이상을 나타내어 두 가지 모델을 함께 사용하였으며 다음의 식으로 산출하였다.¹⁹⁾

$$\tau^2 = \{Q - (k-1)\} / \left\{ \sum_{i=1}^k \omega_i - \left(\sum_{i=1}^k \omega_i^2 / \sum_{i=1}^k \omega_i \right) \right\}$$

여기서, ω_i 는 i 번째 연구의 효과크기의 역분산 추정량
 Q 는 각 모델에 대한 이질성 검정량을 나타낸다.

III. 연구결과

1. 기술적 분석

Table 1은 1,461일의 총 연구기간(1998년 1월 1일부터 2001년 12월 31일)에 사고사와 같은 외인사(ICD-10, V01~Y89)를 제외한 7대 도시의 일평균 사망자수, 대기오염물질, 그리고 기상요인에 대한 평균값, 표준편차 및 분포를 나타낸 것이다. 7대 도시 전체의 경우,

Table 1. Summary statistics for daily deaths, air pollutants, and weather in seven major cities, 1998-2001

City	CO (ppm)	O ₃ (ppb)	PM ₁₀ (µg/m ³)	NO ₂ (ppb)	SO ₂ (ppb)	Temp. (°C)	HUMD (%)	Number of deaths (person)	Number of population (person)
Seoul	1.16(0.56)	33.30(19.03)	68.14(37.82)	33.48(11.32)	6.50(2.80)	13.17(10.40)	63.64(13.26)	103.10(12.61)	10,331,224
Busan	1.05(0.46)	35.89(14.04)	63.09(30.28)	24.21(8.20)	11.86(5.24)	15.32(8.04)	65.45(18.75)	49.15(7.98)	3,786,033
Incheon	0.92(0.44)	31.65(15.53)	53.74(30.16)	26.17(9.65)	7.66(2.79)	12.86(10.06)	68.47(13.78)	28.13(5.90)	2,581,557
Daegu	1.07(0.83)	34.30(17.77)	66.02(31.56)	27.90(11.21)	10.37(7.33)	14.62(9.30)	60.14(15.76)	30.24(6.14)	2,539,587
Gwangju	1.01(0.60)	33.45(14.26)	54.57(27.56)	20.86(8.48)	6.01(2.85)	14.19(9.28)	66.68(12.71)	15.32(4.08)	1,387,360
Daejeon	1.50(0.75)	37.54(17.89)	52.73(27.73)	22.62(11.33)	7.64(3.89)	13.09(9.92)	68.33(14.16)	15.23(3.98)	1,408,809
Ulsan	0.85(0.29)	31.68(12.34)	41.15(23.10)	20.40(5.59)	13.90(5.00)	14.65(8.51)	61.95(18.23)	10.31(3.32)	1,060,378
Total	1.08(0.62)	33.97(16.12)	57.11(31.29)	25.09(10.50)	9.14(5.32)	13.98(9.43)	64.95(15.67)	35.93(30.77)	23,094,948

Note. Values are mean (±SD); TEMP, temperature; HUMD, humidity.

전체 연령 사망자 수는 일일 평균은 35.93명이었다. 한편, 소아 사망자는 0.66명이었으며 노인 사망자의 경우는 20.48명이었다(결과 생략). 이 기간동안 측정된 대기 오염물질인 CO, O₃, PM₁₀, NO₂, SO₂의 평균값은 각각 1.08 ppm, 33.97 ppb, 57.11 µg/m³, 25.09 ppb, 그리고 9.14 ppb으로 대기환경기준을 초과하지 않았다. 가스상 대기오염물질별 농도를 도시별로 비교해 보면

CO의 경우에는 대전 > 서울 > 대구 > 부산 > 광주 > 인천 > 울산, O₃의 경우에는 대전 > 부산 > 대구 > 광주 > 서울 > 울산 > 인천, NO₂의 경우에는 서울 > 대구 > 인천 > 부산 > 대전 > 광주 > 울산, 그리고 SO₂의 경우에는 울산 > 부산 > 대구 > 인천 > 대전 > 서울 > 광주 순으로 나타났다. 이러한 결과는 일반적인 예상과는 달리 인구 밀집도나 자동차운행 횟

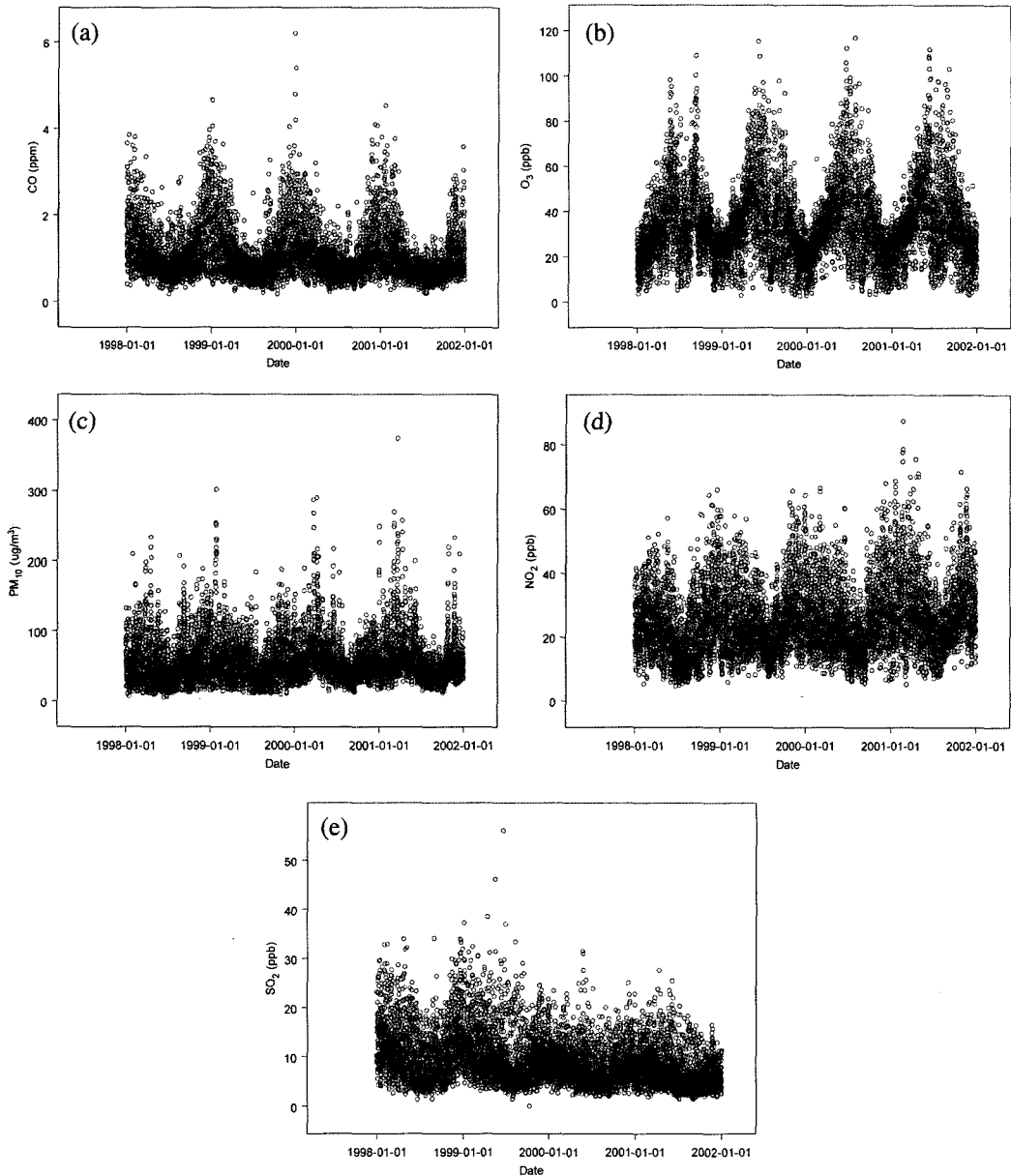


Fig. 2. Daily average concentration of CO (a), O₃ (b), PM₁₀ (c), NO₂ (d), and SO₂ (e) using long-term time trends in seven major cities, 1998-2001.

수와 대기오염도는 큰 연계성을 나타내지 않았으며, 국내 환경기준치를 모두 넘지 않는 수준이었다.

알려진 바와 같이 대기오염도의 분포 특성은 다섯 가지 오염물질 모두 오른쪽으로 치우친 분포(right skewed)를 보였으며, 상대적으로 NO₂는 정규분포에 가까운 양상을 보였다.

2. 일일사망자료 및 환경 측정자료 분석

Fig. 2는 대기오염물질의 농도 수준에 대한 일별 분포를 나타낸 것이다. 연구기간 동안 관찰된 대기오염물질의 일별추세를 살펴보면 뚜렷한 계절적 변동추세를 볼 수 있었다. 특히, 장기적인 추세변동을 관찰할 수 있었는데, CO와 SO₂의 경우에는 감소추세를 나타내었으나 O₃, PM₁₀, NO₂의 경우에는 증가추세를 나타내었다. 이러한 결과는 아황산가스의 경우 측정도구가 정교해졌음과 더불어 정부의 지속적인 규제정책 노력으로 인해 오염도가 지속적으로 줄었음을 말해주며, O₃, PM₁₀, NO₂의 경우에는 자동차 운행횟수 및 기온과의 관련성이 있음을 제시하는 결과라 판단된다.

대기오염물질 농도는 겨울철이 여름철보다 비교적 높은 편이었고, 2000년 4월에 급격히 증가하는 추세를 보였는데 이는 황사의 영향으로 사료된다. SO₂는 장기적인 변화 추이를 볼 때 현저히 감소하는 추세를 보여 주고 있어서 아황산가스 경우에 한하여 정부의 저감정책이 효과를 거두고 있는 것으로 평가된다. O₃는 SO₂와 반대로 농도값이 여름철이 높고 겨울철인 낮은 계절적 변동을 보여주었다.

3. 통계적 분석

본 연구에서는 대기오염의 건강영향을 평가하는데 있어서 지연효과(Lag effect 혹은 induction time)를 고려

하였는데 지금까지 각 오염물질에 대한 적절한 지연효과에 대하여 밝혀진 것이 없기 때문에 하루에서 최고 7일 이전까지의 지연효과를 평가하였다. 따라서 특정한 날의 사망자 수는 당일의 대기오염농도(lag0), 1일 전(lag1), 2일 전(lag2), 3일 전(lag3), 4일 전(lag4), 5일 전(lag5), 6일 전(lag6), 7일 전(lag7)으로 나누어 분석하였고, 각 오염물질에 적합한 지연효과를 평가하기 위하여 가장 높은 상관관계를 보이는 때를 정하였다.

각 오염물질의 지연효과에 있어 전 연령층의 경우 CO, O₃, 그리고 PM₁₀의 경우에는 당일 대기오염농도(lag0)에서 가장 관련성이 높았고, NO₂ 및 SO₂의 경우에는 1일 전(lag1)에서 관련성이 높은 것으로 평가되었다. 한편, 소아의 경우에는 전 연령층과는 달리 당일부터 6일전까지 다양한 지연효과를 나타내었으며, 일반 연령층과 노인의 경우에는 전 연령층과 마찬가지로 당일 혹은 1일전에서 대부분 관련성이 높은 것으로 나타나 대기오염물질과 총 사망간에는 비교적 빠른 급성적인 영향을 나타내는 것으로 평가되었다(결과 생략).

Fig. 3은 PM₁₀과 O₃의 농도 수준과 전 연령층에 대한 사망의 상대위해도간의 관계를 비모수적 방법에 의해 나타낸 그림으로서, O₃의 경우에는 일정 농도 이상부터 상대위험도가 직선적으로 증가하는 모양을 보이고 있었으며, PM₁₀의 경우에는 약 100 µg/m³까지는 직선적으로 증가하는 추세를 보이다가 그 이후에는 오히려 감소하는 추세를 나타내었는데, 이러한 결과는 100 µg/m³ 이상의 농도는 본 연구자료에서 변외값(outlier)으로 작용한 것으로 판단된다. 한편, CO의 경우 농도 수준이 증가함에 따라 사망의 상대위해도 값이 선형으로 증가함을 나타내어 본 연구에서 가장한 오염물질 농도 증가와 사망 발생의 선형성이 타당함을 제시 하였으며, NO₂와 SO₂의 경우에는 처음에는 증가하다가

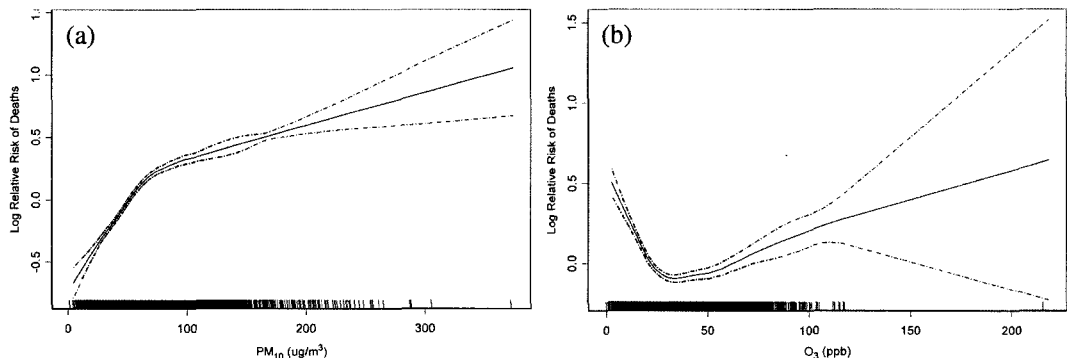


Fig. 3. Log relative risk of total death count (all aged) vs. the concentration of PM₁₀ (a) and O₃ (b) using a single-pollutant model adjusted for long-term time trends and weather information in seven major cities, 1998-2001.

일정 농도 이상부터는 더 이상 증가하지 않는 고원부 (plateau)를 보이고 있었다(결과 생략).

4. 대기오염물질의 영향 분석

Table 2에서는 각 오염물질 중 PM_{10} 의 사분위수 범위(interquartile range, 이하 IQR 범위의 증가에 따른 총 사망의 연령별 상대위해도를 제시하였다. 전체 오염물질의 단위와 변동정도가 차이가 있기 때문에 오염물질에 대한 사망의 효과를 볼 때 일관성있는 기준이 필요하고, 많은 연구에서 전체변동에서 25%에서 75% 사이에 해당하는 값인 사분위수를 사용하여 사분위수만큼 농도가 증가할 때 사망자가 얼마나 증가할 위험이 있는지 살펴보았다.

PM_{10} 을 기본모델에 포함시켜 연령별·도시별로 구분하여 보면 전체연령의 경우, 대구를 제외하고는 모든 도시에서 통계적으로 유의하게 PM_{10} 노출로 인한 사망자 수가 증가하는 결과를 나타내었으며, 7대 도시 모두를 합친 결과 PM_{10} 이 $41.17 \mu g/m^3$ (IQR) 증가함에 따라 사망자가 1.1% 증가하는 결과를 나타내었다. 도시별로는 울산 > 대전 > 인천 > 광주 > 서울 > 부산 > 대전 순으로 나타났으며, 연령별로는 민감집단인 15세 미만 소아와 65세 이상 노인의 사망자가 일반집단

및 전체 사망자 수를 반응변수로 할 때와 비교하여 모두 통계적으로 유의하게 증가된 결과를 나타내었다. 결과적으로, PM_{10} 의 IQR 범위의 증가에 대하여 총 사망의 경우 약 1~12% 가량 증가하는 것으로 평가되었다.

Table 3은 전국 7대 도시 분석결과를 마치 서로 다른 개별연구에서 도출된 것으로 가정하고 이 각각의 연구결과를 메타분석 방법에 의하여 통합하여 최종결과를 7대 도시 전체 자료를 합친 결과와 비교하여 제시한 결과로서, 대기오염물질별 노출증가로 인해 사망위해도에 어떠한 영향을 주며, 각 연령별로 대기오염물질 노출량과 비례하여 얼마나 높은 위해도를 나타내는지, 그리고 전체 자료를 합친 결과와 메타분석 결과 간에는 어떠한 차이가 있는지를 판단하고자 오염물질 노출 증가 수준별로 병합 위해도를 산정하였다. 또한, 이 표에서는 각 연령별로 오염물질 노출 증가에 따라, 고정효과모형 및 랜덤효과모형을 통해 병합된 효과크기와 7대 도시 전체의 효과크기를 나타내었다. 표에서 보는 바와 같이 본 메타분석의 결과 대기오염과 일별 사망 발생 사이에는 유의한 상관성이 있는 것으로 분석되었다. 또한, 최종적으로 메타분석을 통해 얻은 위해도가 실질적으로 7대 도시 전체의 자료를 통해 얻은 위해도보다 높게 나타나 메타분석의 결과가 과대평가된 것으

Table 2. Relative risks (RR) with 95% confidence intervals of all-cause mortality by an interquartile increase in daily concentration of PM_{10} with selected best lag time using single-pollutant model* in seven major cities, 1998-2001

City	Relative Risk (95% Confidence Interval)			
	All aged	Children (less than 15 aged)	General population (16~64 aged)	Elderly (more than 65 aged)
Seoul	1.013 (lag0) (1.007-1.019)	1.045 (lag5) (1.000-1.092)	1.008 (lag0) (0.999-1.017)	1.015 (lag1) (1.007-1.022)
Busan	1.009 (lag0) (1.001-1.017)	1.029 (lag5) (0.968-1.095)	1.013 (lag4) (1.002-1.025)	1.017 (lag0) (1.007-1.028)
Incheon	1.019 (lag1) (1.008-1.029)	1.046 (lag7) (0.968-1.130)	1.016 (lag0) (1.000-1.031)	1.027 (lag1) (1.014-1.041)
Daegu	1.011 (lag3) (0.999-1.023)	1.080 (lag5) (0.992-1.175)	1.012 (lag4) (0.994-1.031)	1.021 (lag3) (1.006-1.037)
Gwangju	1.014 (lag0) (1.000-1.028)	1.123 (lag3) (1.025-1.231)	1.010 (lag5) (0.988-1.033)	1.027 (lag0) (1.009-1.045)
Daejeon	1.020 (lag4) (1.005-1.035)	1.027 (lag3) (0.921-1.145)	1.034 (lag3) (1.010-1.059)	1.025 (lag4) (1.005-1.045)
Ulsan	1.023 (lag0) (1.003-1.044)	1.060 (lag6) (0.932-1.205)	1.027 (lag0) (0.996-1.059)	1.020 (lag3) (0.992-1.048)
7 Cities	1.011 (lag5) (1.007-1.015)	1.017 (lag4) (0.988-1.047)	1.006 (lag4) (1.000-1.012)	1.015 (lag2) (1.010-1.020)

*These models include the following variables for day of week and smooth spline function of date, temperature, and humidity as well IQR of Seoul, Busan, Incheon, Daegu, Gwangju, Daejeon, Ulsan, and 7 cities is 41.17, 32.21, 32.21, 37.29, 29.74, 31.07, 25.96, and 34.38 $\mu g/m^3$, respectively.

Table 3. Comparisons of analysis results from pooled data and combined meta-like analysis for total aged, children(less than 15 aged), general population(16-64 aged), and elderly(more than 65 aged) by Poisson regression analysis of daily mortality and each ambient air pollutant with selected best lag time in single-pollutant model in seven major cities, 1998-2001

Pollutant	Pooled analysis ^a		Meta-like combined analysis ^b		<i>P_{het}</i>
	Relative risk (95% CI)	Relative risk (95% CI)			
		Fixed effects model	Random effects model		
(Total aged)					
CO	1.013 (1.010-1.017)	1.017 (1.013-1.021)	1.019 (1.012-1.026) ^c	0.004	
O ₃	1.006 (1.001-1.010)	1.009 (1.004-1.014)	1.009 (1.004-1.014)	0.754	
PM ₁₀	1.011 (1.007-1.015)	1.014 (1.010-1.017)	1.014 (1.010-1.017)	0.673	
NO ₂	1.021 (1.016-1.027)	1.021 (1.016-1.026)	1.021 (1.013-1.028)	0.014	
SO ₂	1.019 (1.013-1.025)	1.019 (1.014-1.023)	1.019 (1.010-1.029)	0.001	
(Children)					
CO	1.026 (0.999-1.054)	1.057 (1.030-1.085)	1.068 (1.028-1.109)	0.070	
O ₃	1.011 (0.975-1.048)	1.045 (1.010-1.081)	1.045 (1.010-1.081)	0.684	
PM ₁₀	1.017 (0.988-1.047)	1.052 (1.024-1.081)	1.052 (1.024-1.081)	0.793	
NO ₂	1.023 (0.989-1.059)	1.049 (1.013-1.086)	1.053 (1.011-1.096)	0.254	
SO ₂	1.024 (0.988-1.016)	1.054 (1.023-1.087)	1.054 (1.023-1.087)	0.835	
(General population)					
CO	1.010 (1.005-1.016)	1.015 (1.009-1.021)	1.015 (1.009-1.021)	0.430	
O ₃	1.007 (1.000-1.015)	1.016 (1.009-1.024)	1.017 (1.009-1.025)	0.340	
PM ₁₀	1.006 (1.000-1.012)	1.013 (1.007-1.018)	1.013 (1.007-1.018)	0.538	
NO ₂	1.013 (1.006-1.021)	1.015 (1.008-1.023)	1.015 (1.007-1.023)	0.303	
SO ₂	1.015 (1.006-1.023)	1.020 (1.013-1.027)	1.021 (1.013-1.029)	0.238	
(Elderly)					
CO	1.018 (1.013-1.022)	1.021 (1.016-1.026)	1.024 (1.015-1.032)	0.009	
O ₃	1.005 (0.998-1.011)	1.010 (1.003-1.016)	1.010 (1.003-1.016)	0.850	
PM ₁₀	1.015 (1.010-1.020)	1.019 (1.014-1.024)	1.019 (1.014-1.024)	0.708	
NO ₂	1.028 (1.022-1.035)	1.030 (1.024-1.036)	1.030 (1.024-1.036)	0.860	
SO ₂	1.023 (1.015-1.030)	1.024 (1.018-1.030)	1.025 (1.015-1.034)	0.020	

Note. CI, confidence intervals; *P_{het}*, *P* value from χ^2 for heterogeneity.

^aData from all cities were pooled and analyzed in the same model that included indicator variables for all cities.

^bRegression coefficients from each city were combined as followed by meta-analysis to calculate the summary estimate.

^cThe estimated between-city variation, τ^2 , was a negative value. Thus, τ^2 was substituted to zero which meant that the random-effects model became the same as the fixed-effects model.

로 나타났다. 각 연령층별로 볼 때, 전체 연령층의 경우에는 모두 통계적으로 유의하게 대기오염이 증가함에 따라 사망률이 증가하는 것으로 나타났으며, 특히 민감집단인 어린이와 노인의 경우에는 그 위해정도가 더 크게 나타났다. 각 물질별·도시별 대기오염물질과 사망간의 관련성에 관한 상세한 결과는 기존 보고된 논문에 서술되었다.²⁰⁻²³⁾

IV. 고 찰

대기오염물질과 사망자 수의 일별 변동과 같은 시계

열자료의 분석에서 가장 중요한 내용은 장기적인 추세 변동이나 계절변동, 기상요인, 인플루엔자의 유행, 요일 등의 영향으로 인한 교란작용을 어떻게 제거하느냐에 따라 달려 있다. 본 연구에서는 GAM(general additive Poisson model)을 사용하여 분석하였는데 시간, 기온, 습도 등은 nonparametric smooth function을 사용하였고 요일은 위장변수(dummy variable)로 처리하여 모델에 포함시켰다.

시계열적 분석을 통한 Table 2의 결과는 각 오염물질이 IQR로 증가할 때 일별사망자 수의 상대적 증가율을 나타내고 있다. 이 분석의 결과는 비록 측정된 대기

오염물질의 오염도가 대기환경기준치 이내이긴 하지만 일별사망자 수 증가와 유의한 상관관계가 있음을 나타내었고, 특히 소아와 노약자의 경우 더 큰 증가율을 나타내었다. 위의 결과들을 국외 연구와 비교해 보면 1985년에서 1990년 사이의 시카고지역에서 행한 연구에서는 PM_{10} 이 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 외인사를 제외한 총사망률이 0.3% 증가하였고 통계적으로도 유의한 값이었으며, 이러한 결과는 본 연구와 유사한 결과를 보였다.²⁴⁾ 또한 브라질의 상파울로의 연구에서는 65세 이상의 노인 사망이 PM_{10} $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 0.5% 증가하며 통계적으로 유의하였다.²⁵⁾ 유럽 국가들의 결과를 메타분석한 APHEA project (Air Pollution and Health: A European Approach) 연구에서는 외인사를 제외한 총사망자 수가 약 0.2% 정도 증가되었고 통계적으로 유의하였다.⁶⁾

대기오염물질 중에서 최근에 증가하는 경향을 띠며, 현재 정부 및 학계에 중요한 관심으로 대두된 오염물질이 PM_{10} 과 O_3 로, 우리나라에서는 70년대 이후 환경오염에 대한 규제로 대기오염정도가 덜해졌지만 자동차가 증가하면서 오히려 PM_{10} 과 O_3 및 NO_2 는 증가했다. 본 연구에서 측정된 PM_{10} 의 농도 경향을 보면 허용기준치와 비교할 때 농도가 높다고 할 수는 없다. 그러나 1990년 후반기의 전국 대도시의 자료를 사용한 연구들에서는 PM_{10} 과 O_3 가 폐기능을 감소시키고, 천식과 같은 기존의 호흡기질환을 악화시키며, 일별 입원을 과 호흡기 질환으로 인한 응급실 방문수와 사망을 증가시키는 것으로 알려져 있다.³²⁶⁻³¹⁾ 또한, PM_{10} 은 일별 사망수와의 관계를 볼 때, 비교적 선형적인 증가경향을 가지는 것으로 관찰되었다(Fig. 3의 a). 따라서 농도가 증가함에 따라 사망 또한 선형적으로 증가하는 경향을 나타낸 반면, O_3 는 낮은 농도의 특정점 이후에 사망이 증가하기 시작하는 비선형적인 관계를 나타내었다(Fig. 3의 b). 따라서, 현재 O_3 의 경우에는 O_3 농도 증가와 사망간의 관련성에 있어서 역치(threshold)가 존재할 가능성이 있음을 시사하고 있다. 그동안 미세분진에 대한 연구가 많았고 미세분진의 역치에 대해서도 관심을 가졌는데, Ostro는 런던 자료를 통해 PM_{10} 이 사망에 미치는 역치를 찾지 못했고,³²⁾ Daniel 등은 미국 20개 대도시에서 실시한 PM_{10} 이 사망에 미치는 영향에 관한 연구에서 역치모형보다 선형모형에 더 적합한 것으로 보고하였다.³³⁾ 그러나 O_3 에 있어서는 역치가 발견되는데, Hong 등은 23 ppb 근처에서 역치를 관찰한 결과를 발표하였다.³⁴⁾ Kim 등은 30 ppb에서 역치를 찾았고, 역치모형을 사용해서 O_3 가 20.12 ppb 증가할 때 2.4% 사망이 늘었으며, O_3 가 역치 이상일 때 총사망은

2.0% 증가했고 호흡기계와 심혈관계질환의 사망은 3.1%가 더 생겼다고 보고하였다.³⁵⁾

한편, 대기오염이 일별사망에 미치는 단기적인 악영향이 세계각지의 여러 연구를 통해 동일한 결과를 보이고 있기는 하지만, 몇 가지 제한점을 가지고 있다. 대기오염과 사망과의 인과관계의 불명확성, 개인노출과 집단측정치의 측정오차, 병리생태학적 기전을 알 수 있는지의 여부 등을 고려해 볼 수 있다.³⁶⁾ 또한, 측정오차에 대한 문제는, O_3 가 서울시내 27개 지역의 관측소에서 측정되는 집단노출자료여서 집밖과 집안을 드나들고 다양한 지역에서 생활하는 개개인의 개인노출과는 차이가 있을 수 있기 때문에 발생하는 문제이다. 이러한 개인노출과 외부 관측소(monitoring station) 관측치와의 차이는 개개인에 따라 집밖과 안에서 지내는 시간이 다르기 때문인 것으로 해석된다.

한편, 메타분석 결과의 타당성을 확보하는데 있어서 동질성검증 결과가 보조적인 수단으로 이용될 수 있는데 본 연구에서는 동질성 가설이 기각되었다(Table 3). 이는 메타분석의 결과를 일반화하는데 있어서 도시간 특성, 즉 사회인구특성 및 대기오염발생원 분포 특성 등에 따라 그룹화를 하여 결과를 제시하거나 통합된 결과를 산출하는데 있어서 각 도시별 연구결과에 대하여 랜덤효과(random effect) 모형을 고려하여야 한다는 것을 나타낸다.³⁷⁾ 이와 같은 결과는 단위 연구대상 지역인 도시에서 측정되는 대기오염측정값의 대표성이 각 도시별로 차이가 날 수 있다는 점에 기인한다고 할 수 있다. 즉 특정지역에서의 대기오염 측정소는 그 지역 주민의 대기오염노출 상황을 잘 반영하는 반면 어떤 지역은 그렇지 않을 수도 있는 것이다. 따라서 본 연구는 각 개별 연구결과간의 변이를 고려한 랜덤효과모형의 결과를 제시하였으며, 그 결과 모든 오염물질이 사망발생과 유의한 상관관계가 있음을 보여주고 있다.

지금까지의 본 연구결과를 종합해 보면, 최근 4년간의 서울시 대기오염 농도 수준은 우리 인체에 안전하다고 판단하여 설정한 대기환경기준을 모두 만족하고 있으나, 최종적인 health-end-point인 사망간의 관련성을 볼 때는 그러한 낮은 수준의 오염농도에서도 사망에 영향을 주는 것으로 규명되었다. 이러한 결과는 여러 국가의 연구결과와도 일관된 결과를 제시하는 것으로서, 우리나라를 포함하여 선진국의 대도시를 대상으로 한 최근의 역학연구들은 비록 장기적으로 허용기준을 만족시키는 대기오염 수준이라 할지라도, 단기적 대기오염 수준의 변동이 대기오염 관련 질환의 사망률, 입원건수, 응급실 방문건수, 외래 방문건수 등에 유의한

영향을 미치고 있음을 논증하는 결과라 할 수 있다. 이처럼 최근의 사회적 관심이 황사나 특정 에피소드 때의 심각한 대기오염 수준 보다 현재 설정되어 있는 허용기준 하에서 일상적인 대기오염의 단기간 변동에 모아지고 있는 이유는 현재의 대기환경 기준이 감수성이 예민한 사람들을 포함하여 다양한 건강수준을 지닌 사람들을 각종 질환, 특히 환경성 질환으로부터 안전하게 지켜줄 수 있는 지에 대한 의문이 제기되고 있기 때문에 이에 대한 구체적인 조사가 이뤄져야 할 것으로 판단된다.

V. 요약 및 결론

본 연구는 1998년 1월부터 2001년 12월까지의 전국 7개 대도시(서울, 부산, 대구, 광주, 대전, 인천, 울산)의 일일사망자료와 환경측정자료 및 기상자료를 이용하여 시계열 분석방법 및 메타분석방법으로 대기오염물질이 일별 사망에 미치는 영향을 추정한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 연구기간동안 측정된 대기오염물질인 CO, O₃, PM₁₀, NO₂, SO₂의 평균값은 각각 1.08 ppm, 33.97 ppb, 57.11 µg/m³, 25.09 ppb, 그리고 9.14 ppb으로 대기환경기준을 초과하지 않았다.

2) 관찰된 사망자수의 일별추세를 분석한 결과, 장기적인 추세변동은 관찰할 수 없었으나 전형적인 계절변동을 볼 수 있었고, 측정된 대기오염물질의 경우에는 뚜렷한 계절적 변동추세를 볼 수 있었다. 특히, 대기오염물질의 경우에는 장기적인 추세변동을 관찰할 수 있었는데, CO와 SO₂의 경우에는 감소추세를 나타내었으나 O₃, PM₁₀, NO₂의 경우에는 증가추세를 나타내었다.

3) 각 오염물질의 지연효과에 있어 전 연령층의 경우 CO, O₃, 그리고 PM₁₀의 경우에는 당일 대기오염농도(lag0)에서 가장 관련성이 높았고, NO₂ 및 SO₂의 경우에는 1일 전(lag1)에서 관련성이 높은 것으로 나타나 대기오염물질과 총 사망간에는 비교적 빠른 급성적인 영향을 나타내는 것으로 평가되었다.

4) 각 대기오염물질의 농도 수준과 전 연령층에 대한 사망의 상대위해도간의 관계를 비모수적 방법에 의해 평가한 결과, O₃의 경우에는 일정 농도 이상부터 상대위험도가 직선적으로 증가하는 모양을 보이고 있으며, PM₁₀의 경우에는 약 100 µg/m³까지는 직선적으로 증가하는 추세를 보이다가 그 이후에는 오히려 감소하는 추세를 나타내었다.

5) PM₁₀을 기본모델에 포함시켜 연령별·도시별로 구분하여 보면 전체연령의 경우, 대구를 제외하고는 모

든 도시에서 통계적으로 유의하게 PM₁₀ 노출로 인한 사망자 수가 증가하는 결과를 나타내었으며, 7개 도시 모두를 합친 결과 PM₁₀이 41.17 µg/m³(IQR) 증가함에 따라 사망자가 1.1% 증가하는 결과를 나타내었다. 도시별로는 울산 > 대전 > 인천 > 광주 > 서울 > 부산 > 대전 순으로 나타났으며, 연령별로는 민감집단인 15세 미만 소아와 65세 이상 노인의 사망자가 일반집단 및 전체 사망자 수를 반응변수로 할 때와 비교하여 모두 통계적으로 유의하게 증가된 결과를 나타내었다.

6) 전국 7개 도시 분석결과를 마치 서로 다른 개별연구에서 도출된 것으로 가정하고 이 각각의 연구결과를 메타분석 방법에 의하여 통합하여 최종결과를 7개 도시 전체 자료를 합친 결과와 비교하여 제시한 결과, 대기오염과 일별 사망발생 사이에는 유의한 상관성이 있는 것으로 분석되었으며, 메타분석을 통해 얻은 위해도가 실질적으로 7개 도시 전체의 자료를 통해 얻은 위해도보다 높게 나타나 메타분석의 결과가 과대평가된 것으로 나타났다.

본 연구결과를 종합해 보면, 최근 4년 간의 서울시 대기오염 농도 수준은 우리 인체에 안전하다고 판단하여 설정한 대기환경기준을 모두 만족하고 있으나, 최종적인 health-end-point인 사망간의 관련성을 볼 때는 그러한 낮은 수준의 오염농도에서도 사망에 영향을 주는 것으로 규명되었다. 이러한 결과는 여러 국가의 연구결과와도 일관된 결과를 제시하는 것으로서, 우리나라를 포함하여 선진국의 대도시를 대상으로 한 최근의 역학 연구들은 비록 장기적으로 허용기준을 만족시키는 대기오염 수준이라 할지라도, 단기적 대기오염 수준의 변동이 대기오염 관련 질환의 사망률, 입원건수, 응급실 방문건수, 외래 방문건수 등에 유의한 영향을 미치고 있음을 논증하는 결과라 할 수 있다. 이처럼 최근의 우리의 관심이 황사나 특정 에피소드 수준의 심각한 대기오염 보다 현재 설정되어 있는 허용기준 하에서 일상적인 대기오염의 단기간 변동에 모아지고 있는 이유는 현재의 대기환경 기준이 감수성이 예민한 사람들을 포함하여 다양한 건강수준을 지닌 사람들을 각종 질환, 특히 환경성 질환으로부터 안전하게 지켜줄 수 있는 지에 대한 의문이 제기되고 있기 때문에 이에 대한 구체적인 조사가 이뤄져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 환경부 “차세대 핵심환경기술개발사업”으로 지원받은 과제임.

참고문헌

- Dockery, D. W., Speizer, F. E., Stram, D. O., Ware, J. H., Spengler, J. D. and Ferris, B. G. : Effects of inhalable particles on respiratory health of children. *American Review of Respiratory Disease*, **139**, 587-594, 1989.
- Schwartz, J., Slater, D., Larson, T. V., Peirson, W. E. and Koenig, J. Q. : Particulate air pollution and hospital emergency room visits for asthma in Seattle. *American Review of Respiratory Disease*, **147**, 826-831, 1993.
- Burnett, R. T., Cakmak, S., Brook, J. R. and Krewski, D. : The role of particulate size and chemistry in the association between summertime ambient air pollution and hospitalization for cardiorespiratory disease. *Environmental Health Perspectives*, **105**, 614-620, 1997.
- Delfino, R. J., Murphy-Moulton, A. M., Burnett, R. T., Brook, J. R. and Becklake, M. R. : Effects of air pollution on emergency room visits for respiratory illnesses in Montreal, Quebec. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **155**, 568-576, 1997.
- Lee, J. T., Kim, H., Song, H., Hong, Y. C., Cho, Y. S., Shin, S. Y., Hyun, Y. J. and Kim, Y. S. : Air pollution and asthma among children in Seoul, Korea. *Epidemiology*, **13**, 481-484, 2002.
- Katsouyanni, K., Touloumi, G., Spix, C., Schwartz, J., Balducci, F., Medina, S., Rossi, G., Wojtyniak, B., Sunyer, J., Bacharova, L., Schouten, J. P., Ponka, A. and Anderson, H. R. : 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. *British Medical Journal*, **314**, 1658-1663, 1997.
- Lee, J. T., Kim, H., Hong, Y. C., Kwon, H. J., Schwartz, J. and Christiani, D. C. : Air pollution and daily mortality in seven major cities of Korea, 1991-1997. *Environmental Research*, **84**, 247-254, 2000.
- Stieb, D. M., Judek, S. and Burnett, R. T. : Meta-analysis of time series studies of air pollution and mortality : Effects of gases and particles and the influence of cause of death, age, and season. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **52**, 258-261, 2002.
- 양원호, 김대원, 정문호, 양진섭, 박기선 : 아산 및 서울 일부 지역의 대기 중 PM₁₀의 농도 및 금속원소 성분의 특성 연구. *한국환경보건학회지*, **30**(2), 92-97, 2004.
- 서광엽, 백계진, 신대윤 : 통계분석을 이용한 광주지역 대기오염도. *한국환경보건학회지*, **30**(5), 417-426, 2004.
- 김성연, 정문호, 손부순, 양원호, 최경호 : 서울시 일부 지역의 대기 중 미세먼지에 관한 연구. *한국환경보건학회지*, **31**(4), 301-308, 2005.
- 이종태, 김호 : 대기오염 건강영향평가를 위한 역학연구 설계 및 방법론. *예방의학회지*, **34**(2), 119-126, 2001.
- Lee, J. T., Shin, D. C. and Chung, Y. : Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea. *Environmental Health Perspectives*, **107**, 149-154, 1999.
- 통계청 : 통계연보, 2001.
- Anderson, H. R., de Leon, A. P., Bland, J. M., Bower, J. S. and Strachan, D. P. : Air pollution and daily mortality in London: 1987-92. *British Medical Journal*, **312**, 665-669, 1996.
- Ballester, F., Corella, D., Perez-Hoyos, S., Saez, M. and Hervas, A. : Mortality as a function of temperature. A study in Valencia, Spain, 1991-1993. *International Journal of Epidemiology*, **26**, 551-561, 1997.
- Colditz, G. A., Burdick, E. and Mosteller, F. : Heterogeneity in meta-analysis of data from epidemiologic studies : A commentary. *American Journal of Epidemiology*, **142**(4), 371-382, 1995.
- Li, Y., Powers, T. E. and Roth, H. D. : Random-effects linear regression meta-analysis models with application to the nitrogen dioxide health effects studies. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **44**, 261-270, 1994.
- 송혜향 : 메타분석법. 청문각, 1998.
- 조용성, 이종태, 김윤신, 홍승철, 김호, 하은희, 박혜숙, 이보은 : 서울시 대기오염과 일별 사망의 상관성에 관한 시계열적 연구(1998-2001). *한국대기환경학회지*, **19**(6), 625-637, 2003.
- 조용성, 이종태, 김윤신, 현연주, 문정숙 : 인천시 대기오염과 일별 사망의 상관성에 관한 시계열적 연구(1998-2001). *대한위생학회지*, **18**(3), 89-100, 2003.
- 조용성, 이종태, 김윤신, 현연주, 박원석 : 광주시 대기오염과 일별 사망의 상관성에 관한 시계열적 연구(1998-2001). *대한보건협회학술지*, **29**(2), 181-189, 2003.
- 조용성, 이종태, 김윤신, 대전광역시 대기오염과 일별 사망자 수의 상관성에 관한 시계열적 연구(1998년~2001년). *한국환경영향평가학회지*, **13**(1), 9-19, 2004.
- Styer, P., McMillan, N., Gao, F., Davis, J. and Sacks, J. : Effect of outdoor airborne particulate matter on daily death counts. *Environmental Health Perspectives*, **103**, 490-497, 1995.
- Saldiva, P. H., Pope, C. A. III, Schwartz, J., Dockery, D. W., Lichtenfels, A. J., Salge, J. M., Barone, I. and Bohm, G. M. : Air pollution and mortality in elderly people : A time-series study in Sao Paulo, Brazil. *Archives of Environmental Health*, **50**, 159-163, 1995.
- Burnett, R. T., Dales, R. E., Raizenne, M. E., Krewski, D., Summers, P. W., Roberts, G. R., May, R. Y., Dann, T. and Brook, J. : Effect of low ambient levels of ozone and sulfates on the frequency of respiratory admissions to Ontario hospitals. *Environmental Research*, **65**, 172-194, 1994.
- Schouten, J. P., Vonk, J. M. and Graaf, A. : Short term effects of air pollution on emergency hospital admissions for respiratory disease : Results of the APHEA project in two major cities in the Netherlands, 1977-89. *Journal of Epidemiology and Community Health*, **50**(Suppl 1), S22-S29, 1996.
- Sunyer, J., Castellsague, J., Saez, M., Tobias, A. and Anto, J. M. : Air pollution and mortality in Barce-

- lona. *Journal of Epidemiology and Community Health*, **50**(Suppl 1), S76-S80, 1996.
29. Borja-Aburto, V. H., Loomis, D. P., Bangdiwala, S. I., Shy, C. M. and Rascon-Pacheco, R. A. : Ozone, suspended particulates, and daily mortality in Mexico city. *American Journal of Epidemiology*, **145**, 258-268, 1997.
 30. Moolgavkar, S. H., Luebeck, E. G. and Anderson, E. L. : Air pollution and hospital admissions for respiratory causes in Minneapolis St. Paul and Birmingham. *Epidemiology*, **8**(4), 364-370, 1997.
 31. Burnett, R. T., Smith-Doiron, M., Stieb, D., Rai-zenne, M. E., Brook, J. R., Dales, R. E., Leech, J. A., Cakmak, S. and Krewski, D. : Association between ozone and hospitalization for acute respiratory disease in children less than 2 years of age. *American Journal of Epidemiology*, **153**, 444-452, 2001.
 32. Ostro, B. D. : A search for a threshold in the relationship of air pollution to mortality : A reanalysis of data on London winters. *Environmental Health Perspectives*, **58**, 397-399, 1984.
 33. Daniel, M. J., Dominic, F., Samet, J. M. and Zeger, S. L. : Estimating particulate matter - Mortality dose-response curves and threshold levels : An analysis of daily time-series for the 20 largest US cities. *American Journal of Epidemiology*, **152**, 397-406, 2000.
 34. Hong, Y. C., Leem, J. G., Ha, E. H. and Christani, D. C. : PM₁₀ exposure, gaseous pollutants, and daily mortality in Incheon, South Korea. *Environmental Health Perspectives*, **107**, 873-878, 1999.
 35. Kim, H., Kim, Y. S. and Hong, Y. C. : The lag effect pattern of particulate air pollution on daily mortality in Seoul, Korea. *International Journal of Biometeorology*, **48**, 25-30, 2003.
 36. 하은희, 권호장 : 대기오염 역학연구의 주요쟁점들. *예방의학지*, **34**(2), 109-118, 2001.
 37. 조용성, 김호, 이종태, 현연주, 김윤신 : 메타분석을 적용한 대기오염과 소아 천식 관련 입원의 상관성 평가 연구. *한국대기환경학회지*, **17**(5), 425-437, 2001.