

서울시 미세먼자 (PM_{2.5})의 호흡기질환 사망과의 연관성 연구 Respiratory Health Effects of Fine Particles (PM_{2.5}) in Seoul

강충민 · 박성균 · 선우 영¹⁾ · 강병욱²⁾ · 이학성^{3),*}

Harvard 보건대학원, ¹⁾건국대학교 환경공학과,

²⁾충주대학교 환경공학부, ³⁾서원대학교 환경건설정보학과

(2006년 2월 19일 접수, 2006년 5월 16일 채택)

Choong-Min Kang, Sung Kyun Park, Young Sunwoo¹⁾,

Byung-Wook Kang²⁾ and Hak Sung Lee^{3),*}

Department of Environmental Health, School of Public Health, Harvard University

¹⁾*Department of Environmental Engineering, Konkuk University*

²⁾*Divison of Environmental Engineering, Chungju National University*

³⁾*Department of Environmental, Civil and Information System, Seowon University*

(Received 19 February 2006, accepted 16 May 2006)

Abstract

Numerous epidemiological studies have shown stronger associations between PM_{2.5} and both mortality and morbidity than PM₁₀. The association of PM_{2.5} with respiratory mortality was examined in Seoul, during the period of 1996~2002. Because PM_{2.5} data were available for only 10% of this time period, a prediction regression model was developed to estimate PM_{2.5} concentration. Death count due to respiratory-related diseases (total respiratory mortality; ICD-10, J00-J98) and death counts (cause-specific mortality) due to pneumonia (ICD-10, J12-J18), COPD (ICD-10, J40-J44) and asthma (ICD-10, J45-J46) were considered in this study. Averaged daily mortality was 5.6 for total respiratory mortality and 1.1 to 1.6 for cause-specific mortality.

Generalized additive Poisson models controlling for confounders were used to evaluate the acute effects of particle exposures on total respiratory mortality and cause-specific mortality. An IQR increase in 5-day moving average of PM_{2.5} (22.6 µg/m³) was associated with an 8.2% (95% CI: 4.5 to 12.1%) increase in total respiratory mortality. The association of PM_{2.5} was stronger for the elderly (≥65 years old, 10.1%, 95% CI: 5.8 to 14.5%) and for males (8.9%, 95% CI: 2.1 to 11.3%). A 10-µg/m³ increase in 5-day moving average of PM_{2.5} was strongly associated with total respiratory mortality in winter (9.5%, 95% CI: 6.6 to 12.4%), followed by spring (3.1%, 95% CI: -1.2 to 7.5%), which was a different pattern with the finding in North American cities. However, our results are generally consistent with those observed in recent epidemiological studies, and suggest that PM_{2.5} has a stronger effect on respiratory mortality in Seoul.

Key words : PM_{2.5}, Total respiratory mortality, Cause-specific mortality, Stratified analysis, Seoul

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)43-299-8722, E-mail : hsl@seowon.ac.kr

1. 서 론

과거 20년 동안의 인체에 대한 환경대기 중 입자상 물질의 영향에 관한 연구결과를 근거로 입자상 물질 농도는 인체의 호흡기(respiratory) 및 심혈관계(cardiovascular)에 악영향을 미치며, 이러한 악영향은 호흡기 및 심장혈관계 질환에 의한 일별 및 연 사망률 증가 등의 결과를 초래한다. 또한 입경이 작은 미세먼지 입자일수록 입자상 물질 농도에 의한 초과사망자수는 더 통계적으로 유의하게 큰 증가율을 나타낸다(Klemm *et al.*, 2000; Lighty *et al.*, 2000; Libaca *et al.*, 1999; Schwartz *et al.*, 1996; Dockery and Pope 1994; Dockery *et al.*, 1993, 1992). 이와 관련해서 미국 EPA (Environmental Protection Agency)는 1997년 7월 입자상 물질에 대한 수정된 환경기준을 공표하였는데, 기존의 PM₁₀ (dp≤10 μm)에 대한 일 최대 및 연평균 농도에 관한 기준치는 존속시키면서 새로운 기준치인 PM_{2.5} (dp≤2.5 μm)에 대한 규제치를 신설하였다. 생물학적 기전에 관한 연구에 의하면, 입자상 물질 자체 또는 기체상 물질인 SO₂, NO₂, O₃, CO 및 VOCs (volatile organic compounds)와의 반응 생성물이 인체의 폐포 상피세포와 자율신경계 등에 자극을 주어 폐기능을 저하시키며, 특히, 입경이 작은 미세먼지의 경우는 폐포 모세혈관으로 유입되어 폐포의 조직인 간, 골수, 심장 등으로 이동하여 기관장애를 일으키는 원인이 되기도 한다(Lighty *et al.*, 2000).

최근에 들어 우리나라의 주요도시에서 TSP (total suspended particles), PM₁₀, O₃, SO₂, CO와 NO₂ 농도에 대해서 일별 사망건수와와의 연관성이 평가되었다(Lee *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 1999b; Hong *et al.*, 1999). 서울시 TSP, SO₂, O₃ 농도 및 일별 사망자수를 메타분석방법을 적용하여 얻은 결과에 의하면, TSP 농도가 100 μg/m³ 증가할 때 마다 3%의 초과사망률이 발생하며, SO₂와 O₃ 농도가 각각 50 ppb 증가함에 따라 초과사망률은 각각 5%와 3%씩 증가된 것으로 평가되었다(Lee *et al.*, 1999b). 또한 설문지에 통한 대기오염에 따른 호흡기계 증상과의 관련성을 평가한 연구결과도 발표된 바 있다(권호장 등, 1994). 하지만, 환경대기 중 PM_{2.5} 농도는 TSP나 PM₁₀보다 더 인체의 호흡기 및 심혈관계 질환 및 사망률과 깊은 관련성이 있으며, 환경적인 측면에서도 산성비, 시정장애

에 영향을 미치는 대표적인 오염물질이다. 이와 관련해서 선진국을 중심으로 1990년대 중반부터 정부의 대폭적인 지원 하에 광범위한 연구를 수행하고 있는 반면, 국내에서는 이와 관련된 연구 및 지원은 아직 미미한 실정이다. 특히, 서울시 PM_{2.5} 농도가 외국의 주요 대도시에 비해 훨씬 높은 수준(Kang *et al.*, 2004a, b; Lee *et al.*, 1999a)이란 점을 고려할 때, PM_{2.5} 농도에 의한 호흡기 및 심혈관계 질환 초과 사망률은 매우 클 것으로 예상 되어진다.

따라서, 환경대기 중 PM_{2.5} 농도와 호흡기 및 심혈관계 질환 사망건수와의 연관성 연구는 가까운 장래에 제정될 미세먼지 (PM_{2.5}) 대기환경기준을 위한 귀중한 기초자료가 될 것이다. 하지만, 이를 위한 역학 연구에서 가장 큰 제한요소는 연속적인 농도자료의 부재이다. 본 연구에서는 서울시에서 발생한 호흡기 질환 사망건수를 대상으로 예측회귀모델을 이용하여 평가된 연속적인 PM_{2.5} 농도와와의 연관성을 평가하였다. 또한, PM_{2.5} 농도에 민감한 인구집단을 구하기 위하여 사망자의 연령별 및 성별로 세분화하여 평가하였고, 계절별 특성을 평가하기 위하여 PM_{2.5} 농도를 계절별로 세분화하여 연관성을 평가하였다.

2. 연구 방법

2.1 호흡기질환 사망건수

연구기간은 1996년 10월 1일부터 2002년 2월 28일까지였으며, 이 기간 동안 서울시 거주자를 대상으로 발생한 호흡기질환 사망건수 자료를 국립통계청에서 확보하였다. 이 자료는 사망일, 사망시점의 거주지, 나이, 성별 및 국제질병분류법(International Classification of Diseases, ICD-10)에 따른 사망원인 등의 항목이 포함되어 있었다. 최종적으로 통계분석에 사용된 사망건수 자료는 서울시 거주자 중에서 사망 장소가 서울시내인 경우만을 포함하며, 서울시 거주자가 서울시 외부에서 사망하였을 경우와 외부인이 서울시에서 사망하였을 경우는 분석에서 제외되었다. 따라서, 일별 호흡기질환 사망건수(ICD-10, J00-J98)자료는 상대적으로 대기오염에 의한 영향이 큰 것으로 추정되는 폐렴(pneumonia, J12-J18), 만성 폐쇄성 호흡기질환(chronic obstructive pulmonary disease, COPD, J40-J44) 및 천식(asthma, J45-J46)에

의한 사망건수로 세분화 되었고, 사망연령 및 성별로도 세분화하여 통계분석에 사용하였다.

2.2 대기오염 및 기상자료

환경대기 중 PM_{2.5} 농도는 디누더 측정기(annular denuder system)을 이용하여 1996년 10월 9일부터 2002년 2월 7일까지는 서울시 5개 대기오염 자동측정소(광화문, 문래동, 구의동, 쌍문동, 잠실본동)에서 실측된 PM_{2.5} 농도의 일 평균농도를 이용하였다. 본 연구를 위해 선정된 5개의 자동측정소는 기존의 환경부 연구과제에서 TM좌표를 근거로 서울시 대기오염도를 가장 대표할 수 있는 최적 측정소로 선정된 곳이었기 때문에 서울시 대기오염도를 대표할 수 있는 농도자료를 제공하였을 것으로 고려하였다. 디누더 측정기는 47 mm 필터팩, 조대입자(입경, dp < 2.5 μm)를 제거하기 위한 테프론 코팅된 사이클론으로 구성된다. 총 373개의 PM_{2.5} 농도자료가 5개의 측정소에서 측정되었으며, 183일 동안 측정되었기 때문에 PM_{2.5}의 총 자료 수는 183개였다. 계절별 측정일 수는 봄철(3월~5월, n=43), 여름철(6월~8월, n=39), 가을철(9월~11월, n=52) 및 겨울철(12월~2월, n=49)로서 대체로 균일하였다. PM_{2.5} 농도 이외에 PM₁₀(β-ray absorption method), SO₂(ultraviolet fluorescence method), NO₂(chemiluminescence method), CO(non-dispersive infrared method)농도는 5개의 자동측정소에서 측정된 자료를 PM_{2.5} 측정시간대별로 평균하여 일 평균농도를, O₃(ultraviolet photometry method)은 1시간 최대값을 모델 입력 값으로 하였다. 기상자료는 서울시 기상청에서 관측된 일 평균기온과 상대 습도를 모델 입력 값으로 하였다.

PM₁₀과는 달리, PM_{2.5}는 대기오염 자동측정소에서 원칙적으로 측정되지 않기 때문에 자료의 수는 매우 적었다. 그러므로 연구기간 중 일별 PM_{2.5} 농도를 예측회귀모델을 이용하여 예측하여 실측된 PM_{2.5} 농도자료와 비교되었다. 예측회귀모델은 혼란변수(confounders)인 추세변동, 요일 및 계절 효과, PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도관계, O₃, SO₂, NO₂, CO, 기온 및 상대습도를 제어한 일반화 부가모형(generalized additive model, GAM)이었다. 따라서 PM_{2.5} 예측회귀모델의 기본모형은 다음과 같이 표현된다.

$$E(PM_{2.5}) = \beta_0 + S_1(\text{time}) + S_2(\text{temp}) + S_3(\text{rh}) + S_4(O_3)$$

$$+ S_5(SO_2) + S_6(NO_2) + S_7(CO) + I_1(\text{dow}) + I_2(\text{season})$$

여기서, β₀는 상수, S₁₋₇는 smooth 함수, I₁₋₂는 지시변수였다. 우선, 183개의 실측된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 선형 관계식(PM_{2.5} = 3.09 + 0.63 × PM₁₀)으로부터 총 1,977개의 1차적인 PM_{2.5} 농도 값을 구하여 예측회귀모델의 종속변수로 사용하였다. 또한 환경대기 중 PM_{2.5} 농도에 영향을 미치는 인자들인 다른 오염물질을 비롯한 혼란변수들을 제어하기 위하여 예측회귀모델을 이용하여 2차적인 농도 값을 구하였다. 호흡기질환 사망건수와 연관성을 평가하기 위해서는 예측회귀모델에 의해 구한 2차적인 농도 값에 실측된 183개의 PM_{2.5} 농도를 포함하는 최종적인 PM_{2.5} 농도 값이 이용되었다.

2.3 통계적 방법

호흡기질환 사망건수를 전체 인구집단으로 볼 때, 매우 드문 사건(호흡기 질환에 의한 일 평균 사망자수: 약 5.6명)으로 정규분포를 따르지 않고 포아송 분포를 따르는 치우친 형태를 보이게 된다. 따라서, 본 연구에서 사용한 회귀모형은 날짜에 대하여 포아송 분포를 가정하였다. 시계열 자료의 분석에서 모델을 구축하는데 있어서 일차적으로 고려해야 할 변수는 장기적인 추세변동과 계절변동 요인이다. 시계열 자료에서는 장기적인 추세를 보이는 두 변수는 반드시 상관관계를 나타내게 된다. 따라서 정확한 인과관계를 평가하기 위해서는 이에 대한 적절한 통계가 이루어져야 한다. 일별 호흡기질환 사망건수는 일반적으로 계절적 변동을 보이고 이러한 변동의 주요한 요인이 대기오염이 아니기 때문에, 계절적 변동을 초래한 요인은 대기오염과 일별 사망건수의 관계를 보는 데 있어 중요한 혼란변수로 작용하게 된다. 비록 기온이나 상대습도와 같은 기상요인이 이러한 계절적 변동의 일부를 설명하기는 하지만 그것이 전부 아닐 것으로 생각되고 있다. 따라서 안전한 방법은 자료에서 이러한 변동요인을 제거한 후에 대기오염과 호흡기질환 사망건수의 관련성을 보는 것이다(Schwartz *et al.*, 1996). 또한 변동요인을 제거하는 방법은 자료에 존재하는 특정 패턴을 적합시키기에 충분히 유연해야 한다. 이러한 문제를 해결하는 분석방법 중 하나가 GAM이다.

기상조건에 따른 호흡기질환 사망건의 발생은 선형적이지 않은 것으로 알려져 있다. 즉, 온도가 너무 덥거나 추울 때, 사망자수가 증가하는 U-자형을 나타내므로 모형에 선형 온도변수를 포함시키는 것은 적합하지 않다 (Schwartz, 1994a). 따라서 온도와 상대습도도 추세변동과 마찬가지로 smooth 함수로 cubic smoothing splines를 사용하여 혼란변수로써의 작용을 제어하였다. 또 다른 혼란변수로 예상되는 것은 요일 및 계절 효과이다. 일반적으로 병원 입원자수 자료와는 달리, 요일효과가 크지 않을 것으로 예상되지만, 지시변수로서 가능한 혼란변수의 작용을 제어하였다. 따라서 본 연구에서는 총 4개의 혼란변수를 제어한 대기오염과 호흡기질환 사망건수와의 연관성을 평가하는 기본모형이 만들어 졌다.

$$\begin{aligned} \log(\text{no. of dily respiratory mortality}) \\ = S_1(\text{time}) + S_2(\text{temperature}) + S_3(\text{relative humidity}) \\ + I_1(\text{day of the week}) + I_2(\text{season}) \end{aligned}$$

기본모형의 적합성을 평가한 후, 기본모형에 PM_{2.5} 농도변수를 포함시킨 단일오염물질 모형을 만들었다. 호흡기질환에 의한 사망건수에 영향을 미치는 변수들의 효과는 즉시 나타날 수도 있지만 지연효과 (lag effect)를 보일 수도 있다. 따라서 단일 오염물질 모형 (one-pollutant model)에서는 PM_{2.5}의 당일농도부터 5일 전까지의 농도, 3일 및 5일 이동평균농도를 차례로 넣어 잔차와의 차를 최소화 하는 지연시간을 결정하였다. 또한 대기오염물질은 단일하게 영향을 미칠 뿐 아니라 다른 대기오염물질 (O₃, SO₂, NO₂, CO)과의 복합적 효과를 가져올 수도 있으므로 다른 오염물질의 영향을 제어한 상태에서 각 오염물질의 독립적인 효과를 평가하여야 한다. 본 연구에서는 단일 오염물질 모형에서 유의성이 인정된 변수에 대하여 다른 오염물질을 포함시킨 두 오염물질 모형 (two-pollutant model)과 다 오염물질 모형 (multi-pollutant model)을 만들어 유의성의 지속여부를 평가하였다.

이 모형으로부터 PM_{2.5} 농도의 단위증가 [Interquartile Range (IQR) 또는 10 µg/m³]에 대한 상대위험비 (relative risk)와 95% 신뢰구간 (confidence interval, CI)으로부터 상대위험률 {percent change = [EXP (β × IQR) - 1] × 100%}와 95% CI {= [EXP [IQR × (β ± 1.96 × SE)] - 1] × 100%}를 구하였다. 여기서, β와 SE는 모형에서 평가된 상관계수와 표준오차이었다.

또한 서울시 환경대기 중 PM_{2.5} 농도에 더 민감한 인구집단을 선정하기 위하여, 사망건수를 연령별, 성별 및 계절별로 분류하여 동일한 모형으로 분석하였다. 본 연구에서 P-value가 0.05보다 작은 경우를 통계적으로 유의한 것으로 고려하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 호흡기질환 사망건수 및 PM_{2.5} 농도수준

표 1에 일별 호흡기질환 사망건수, 대기오염물질 농도, 기온 및 상대습도의 통계 값을 요약하였다. 서울시에서 총 연구기간 (총 1,977일) 중 호흡기질환으로 인한 총 사망건수는 11,042명이었으며, 폐렴으로 인한 사망건수는 2,937명, 만성 폐쇄성 호흡기질환으로 인한 사망건수는 3,213명, 천식으로 인한 사망건수는 2,123명이었다. 이는 평균적으로 하루에 약 5.6명 (폐렴에 의해 약 1.5명, 만성 폐쇄성 호흡기질환에 의해 약 1.6명, 천식에 의해 약 1.1명)이 호흡기질환 사망임을 나타낸다.

서울시에서 실측된 PM_{2.5} 평균농도는 43.9 µg/m³ (농도범위: 7.8 ~ 214.6 µg/m³)이었고, 예측모델에 의해 평가된 PM_{2.5} 평균농도는 42.9 µg/m³ (농도범위: 9.2 ~ 104.3 µg/m³)으로 대체로 잘 일치하고 있지만, 고농도(극대값)에 대해서는 과소평가되는 경향을 보였기 때문에 최종적으로 사용된 PM_{2.5} 농도는 실측된 PM_{2.5} 농도를 포함시켰다. 실측된 PM_{2.5} 농도는 예측모델에 의해 평가된 PM_{2.5} 농도와 높은 상관성 (r=0.85)을 나타내면서 예측모델에 의해 비교적 잘 설명되었다. 그림 1에는 예측모델에 의해 평가된 PM_{2.5} 농도의 계절적 변화를 비모수적 smoothing line으로 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 평가된 PM_{2.5} 농도는 기존의 서울시 PM_{2.5} 연구결과 (Kang *et al.*, 2004a; Lee *et al.*, 1999a)와 마찬가지로 겨울철에 최대농도와 여름철에 최소농도를 나타내는 뚜렷한 계절변화를 보였다.

서울시 대기오염도 수준은 선진국 주요도시보다 높은 농도수준을 보인다. 총 연구기간인 1,977일 중 에서 일 평균 PM₁₀ 농도는 총 38일 동안 우리나라 대기환경기준치 (24시간 평균농도: 150 µg/m³)를 초과하였으며, 1시간 최대 O₃ 농도 (1시간 최대농도: 100 ppb)는 총 23일, 일 평균 NO₂ 농도 (24시간 평균

Table 1. Summary of daily respiratory mortality, air pollution and weather variables in Seoul, during the study period (1996~2002).

Variables	Mean	Min	Percentile			Max
			25th	Median	75th	
Respiratory Mortality (No/day)						
Total respiratory deaths	5.6	0.0	4.0	5.0	7.0	21.0
Pneumonia ^a	1.5	0.0	0.0	1.0	2.0	10.0
COPD ^{a, b}	1.6	0.0	1.0	1.0	2.0	9.0
Asthma ^a	1.1	0.0	0.0	1.0	2.0	6.0
Male	3.1	0.0	2.0	3.0	4.0	14.0
Female	2.5	0.0	1.0	2.0	3.0	14.0
Elderly (≥ 65)	4.4	0.0	3.0	4.0	6.0	17.0
< 65	1.2	0.0	0.0	1.0	2.0	8.0
Air Pollution and Weather						
PM _{2.5} (µg/m ³)	43.9	7.8	25.2	36.1	54.9	214.6
PM _{2.5} (µg/m ³) ^c	42.9	9.2	30.9	41.6	53.0	104.3
PM ₁₀ (µg/m ³)	63.4	14.0	39.6	57.3	78.8	320.6
O ₃ (ppb)	36.9	3.2	23.8	32.4	46.0	126.2
SO ₂ (ppb)	8.6	1.5	5.3	7.6	10.6	36.1
NO ₂ (ppb)	31.8	6.6	22.4	30.0	39.0	88.4
CO (ppm)	11.1	2.8	7.9	10.3	13.7	36.7
Temperature (°C)	12.5	-15.5	3.6	13.5	21.8	30.4
Relative humidity (%)	63.1	26.1	53.6	63.5	72.5	96.0

^aMortality due to pneumonia, COPD and asthma, ^bChronic obstructive pulmonary disease, ^cDaily PM_{2.5} estimated from the prediction model. The number of all variables is 1977, except the PM_{2.5} measurements (n=183).

농도 : 80 ppb)는 총 3일 동안 대기환경기준치를 초과한 반면, 일 평균 SO₂ 농도는 연구기간 중 대기환경기준치(24시간 평균농도 : 50 ppb)를 초과하지 않았다. 우리나라에는 PM_{2.5} 농도 기준치가 없기 때문에 실측 및 예측된 PM_{2.5} 농도를 미국 대기환경기준(United States National Ambient Air Quality Standards, 65 µg/m³)과 비교하였다. 서울시에서 실측된 총 183일 동안의 PM_{2.5} 농도는 미국 대기환경기준치를 30일 동안 초과하였으며, 예측모델에 의해 평가된 PM_{2.5} 농도는 총 1,977일 중 186일이 초과하였다. 또한 실측(r=0.81) 및 평가(r=0.77)된 PM_{2.5} 농도는 PM₁₀ 농도와 높은 상관성을 나타냈다. PM_{2.5}, SO₂ 및 NO₂ 농도들 간에는 대체로 양호한 양의 상관성(r=0.49~0.74)을 보인 반면, 기온은 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 농도들과 음의 상관성(r=-0.15~-0.32)을 나타냈다. 1시간 최대 O₃ 농도는 기온(r=0.56)을 제외한 변수들과 매우 약한 상관성(r=-0.23~0.07)을 보였다.

계절별로 살펴보면, 호흡기질환 사망건수는 겨울철에 최대 수치를 보였으며, 대기오염물질 농도도 대체로 겨울철에 최대 평균농도를, 여름철에 최소 평균농

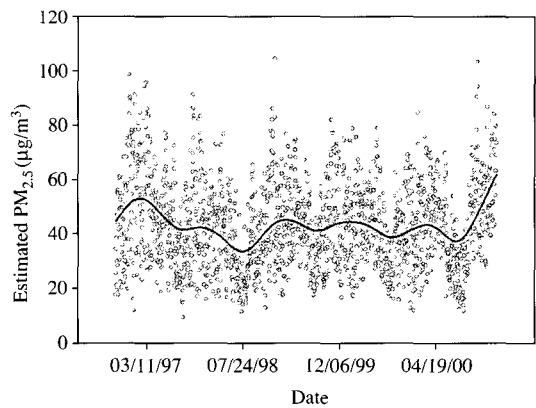


Fig. 1. Distributions and a nonparametric smoothing line of the estimates of daily PM_{2.5}.

도를 나타냈다. 반면에 O₃ 농도는 이와 반대경향을 나타냈다. 기온의 온도범위도 -15.5에서 30.4°C로 뚜렷한 계절변화를 보였다. 이러한 변수들의 뚜렷한 계절변화는 부분적일지라도 추운 날씨에 의해 추가적인 사망자수가 발생할 가능성을 내포한다. 이를 제

어하기 위해 앞에서도 언급했듯이, 회귀모델에 계절 변화라는 혼란변수를 제어하기 위해 '계절'이란 지시변수를 포함하였다.

대기오염 물질간의 상호작용을 평가하기 위하여 단일 오염물질 모형 (one-pollutant model)에 기타 오염물질 (O₃, SO₂, NO₂ 및 CO)변수를 모델에 추가했을 때 기존의 호흡기질환 사망건수에 대한 단일 PM_{2.5} 농도의 영향 정도를 평가한 결과를 표 2에 나타냈다. 표에서 알 수 있듯이, 호흡기질환 사망건수에 대한 PM_{2.5} 농도의 영향은 PM₁₀, O₃, SO₂ 및 NO₂가 포함된 두 오염물질 모형 (two-pollutant model)에서도 큰 변화를 보이지 않았지만, CO가 포함된 두 오염물질 모형에서는 통계적 유의성을 상실하였다. 다 오염물질 모형 (multi-pollutant model)의 경우에서도 CO를 제외한 다른 오염물질을 포함한 모형에서는 큰 변화를 나타내지 않았지만 CO를 포함한 모형에서는 두 오염물질 모형과 유사한 결과를 나타냈다.

Table 2. Mortality relative risks for an IQR increase in PM_{2.5} concentration with adding other pollutants (one- and two-pollutant models).

Model	RR ^a	95% CI
Not Adjusted	1.082	1.045 ~ 1.121
Adjusted for PM ₁₀	1.088	1.044 ~ 1.135
Adjusted for O ₃	1.072	1.034 ~ 1.110
Adjusted for SO ₂	1.074	1.032 ~ 1.118
Adjusted for NO ₂	1.082	1.041 ~ 1.125
Adjusted for CO	1.025	0.987 ~ 1.064

^aRelative risks for total respiratory mortality, CI denotes confidence intervals.

3.2 상대위험률 및 민감 집단

표 3에는 혼란변수들을 제어한 기본모형을 이용하여 다양한 지연시간에 따른 IQR (22.6 µg/m³)만큼의 PM_{2.5} 농도증가에 따른 호흡기질환 사망건수의 초과 증가율 (상대위험률)을 나타냈다. 표에서 알 수 있듯이, PM_{2.5} 농도들에 대한 총 호흡기질환 사망건수 (total respiratory mortality)의 상관성은 대체로 통계적으로 유의한 반면, 천식 (asthma)의 경우는 모든 PM_{2.5} 농도에 대해서 통계적으로 유의한 결과를 나타내지 않았다. 총 호흡기질환 사망건수의 경우, 가장 큰 상관성은 PM_{2.5} 농도들 중에서 5일 이동평균농도에 의해 8.2% (95% 신뢰구간: 4.5 ~ 12.1%)로 통계적으로 유의하면서 가장 큰 상대위험률을 보였다. 폐렴은 당일 농도에 의해 9.8% (95% 신뢰구간: 4.3 ~ 15.6%), 만성 폐쇄성 호흡기질환은 5일 이동평균농도와 6.6% (95% 신뢰구간: 0.0 ~ 13.7%)로 가장 큰 상대위험률을 나타냈다. 천식의 경우는 4일전 농도와 6.6% (95% 신뢰구간: 1.0 ~ 12.5%)로 통계적으로 유의하면서 가장 큰 상대위험률을 보였다.

환경대기 중 PM_{2.5} 농도에 민감한 인구집단을 선정하기 위하여 사망건수 자료를 연령별 및 성별로 세분화하여 동일한 일반화 부가모형으로 분석한 결과를 그림 2(a)에 나타냈다. 서울시 PM_{2.5}의 IQR만큼의 농도증가는 노인층 10.1% (95% 신뢰구간: 5.8 ~ 14.5%)의 총 호흡기질환 사망건수의 증가를 초래하는 것으로 평가되어 전체집단 (전 연령층, 8.2%)에 비해 높은 상대위험률을 나타냈다. 이는 노인층이 대기오염도에 더 민감한 인구집단이라는 외국에서의 연구결과와 비슷한 결과이다 (Goldberg *et al.*, 2001;

Table 3. Estimated percent change (with 95% CI) in respiratory mortality with an IQR (22.6 µg/m³) increase in PM_{2.5} concentration^a.

Exposure day	Total Respiratory ^b		Pneumonia ^c		COPD ^c		Asthma ^c	
	%	95% CI	%	95% CI	%	95% CI	%	95% CI
0	5.0	2.3 ~ 7.7	9.8*	4.3 ~ 15.6	1.9	-2.9 ~ 6.8	3.6	-2.1 ~ 9.7
1	4.5	1.8 ~ 7.2	4.9	-0.2 ~ 10.3	3.5	-1.3 ~ 8.5	2.9	-2.7 ~ 8.9
2	2.4	-0.2 ~ 5.1	1.0	-3.9 ~ 6.2	3.4	-1.3 ~ 8.3	2.1	-3.7 ~ 8.1
3	4.5	1.9 ~ 7.2	3.6	-1.5 ~ 9.1	4.7	0.1 ~ 9.6	3.3	-2.4 ~ 9.4
4	3.8	1.2 ~ 6.4	3.4	-1.7 ~ 8.8	3.0	-1.9 ~ 8.0	6.6*	1.0 ~ 12.5
5	2.0	-0.6 ~ 4.6	1.2	-3.7 ~ 6.5	5.3	0.7 ~ 10.2	5.2	-0.6 ~ 11.5
3-day ^d	6.2	2.9 ~ 9.6	8.0	1.6 ~ 15.0	4.6	-1.3 ~ 10.8	4.4	-2.7 ~ 12.1
5-day ^e	8.2*	4.5 ~ 12.1	8.8	1.5 ~ 16.6	6.6*	0.0 ~ 13.7	7.5	-0.6 ~ 16.3

^aDaily PM_{2.5} estimated from the prediction model, ^bTotal Respiratory Mortality, ^cMortality due to pneumonia, COPD and asthma, ^d3-day moving average, ^e5-day moving average, *The highest increase with p < 0.05, CI denotes confidence interval.

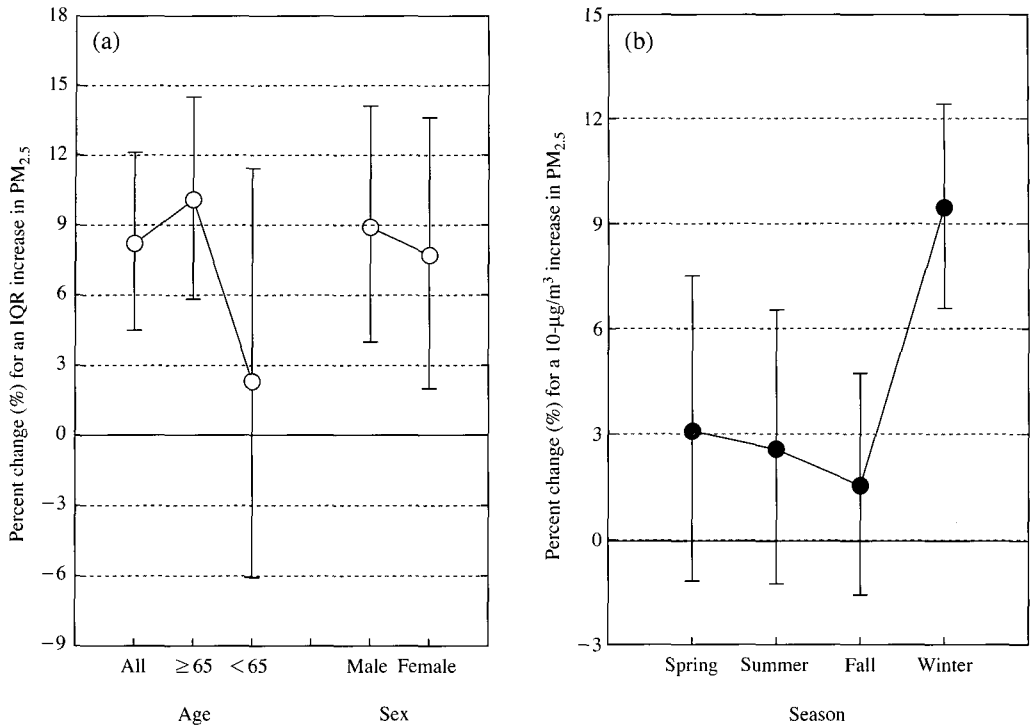


Fig. 2. (a) Stratified analyses by age and sex where percent changes (%) were based upon an IQR (22.6 µg/m³) increase, (b) stratified analysis by season where percent changes (%) were based upon a 10-µg/m³ increase in PM_{2.5} concentration.

Ostro *et al.*, 1999; Dockery and Pope 1994; Schwartz 1994b). 또한 심근경색과 같은 질병 (myocardial damage)을 갖고 있는 사람(주로 노인층)이 입자상 오염물질에 폭로되었을 때, 기관지염 (bronchilitis), 폐렴 (pneumonia)과 같은 급성 폐질환 (pulmonary disease)을 유발하고 결국에는 울혈성 심부전 (congestive heart failure)으로 사망할 위험성이 높다는 Bates의 가설과도 일치한다(Bates, 1992).

사망자의 성별에 따라서는 남성 (8.9%, 95% 신뢰구간: 4.0~14.1%)이 여성 (7.7%, 95% 신뢰구간: 2.0~13.6%)보다는 더 높은 상대위험률을 나타냈다. 2001년에 조사된 OECD (Organization for Economic Cooperation and Development) 국가들에 대한 성인 (15세 이상) 흡연율 통계 (<http://www.nosmokersguide.or.kr>)를 보면, 우리나라 남성 흡연율은 58.7%로서 OECD국가 중 가장 높은 반면, 여성 흡연율은 5.6%로서 OECD국가 중 가장 낮은 비율을 나타냈다. 또

한 이는 미국 성인 남성 흡연율(남성: 25.1%, 여성: 20.6%)과 비교해서도 상당히 높은 수준이었다 (Mokdad *et al.*, 2004). 흡연은 가장 중요한 실내오염 원인과 동시에 가장 중요한 호흡기질환 사망원인이라는 많은 연구결과들이 있다 (Zorrilla-Torras *et al.*, 2005; Mokdad *et al.*, 2004; Dockery *et al.*, 1993; Koutrakis *et al.*, 1992). 하지만, 본 연구에서 사용된 일반화 부가모형과 같은 시계열 분석에서는 성인 흡연율 및 호흡기질환 사망건수의 연관성을 직접적으로 규명할 수는 없다. 더불어, 흡연 이외에도 성별에 따른 다른 결과를 설명할 수 있는 몇몇 가설이 제안될 수 있을 것이다. 첫째, 남성은 여성보다 많은 시간을 실외에서 보내며, 이는 환경대기 중 PM_{2.5}에 더 많은 폭로기회를 초래할 것이다. 둘째, 남성은 여성에 비해 PM_{2.5} 농도에 민감한 어떤 생물학적인 차이점이 존재할 수도 있을 것이다. 하지만, 이런 가설과 관련된 문헌을 확인할 수는 없었다.

3.3 계절별 상대위험률

계절적으로 다른 IQR값을 표준화하기 위하여, PM_{2.5} 단위농도 (10 µg/m³)증가에 따른 상대위험률 (percent change)을 계절별로 평가하여 그림 2 (b)에 나타냈다. 계절별 상대위험률은 겨울철에 9.5% (95% 신뢰구간: 6.6~12.4%)로서 가장 큰 것으로 평가되었으며, 그 다음으로 봄철에 3.1% (95% 신뢰구간: -1.2~7.5%), 여름철에 2.6% (95% 신뢰구간: -1.3~6.5%) 및 가을철에 1.5% (95% 신뢰구간: -1.6~4.7%) 순으로 나타났다.

선진국에서조차도 연속적인 PM_{2.5} 농도자료의 부족으로 인해 PM_{2.5} 폭로에 따른 계절별 상대위험률을 평가한 연구는 극히 드물다. Ostro (1995)는 미국 California에서 가시도 (visibility)를 근거로 하여 연속적인 PM_{2.5} 농도를 평가한 후, 총 호흡기질환 사망건수에 대한 계절별 특성을 평가하였다. PM_{2.5} 농도와는 달리, 계절별 PM₁₀의 영향에 관한 연구는 몇몇 보고되고 있다. 한 예로 미국 100개의 도시들에서 PM₁₀ 폭로에 따른 호흡기질환 사망건수의 상대위험률을 평가한 연구가 있다 (Peng *et al.*, 2005). 이들 연구결과를 종합하면, PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도는 겨울철 보다는 여름철에 총 호흡기질환 사망건수와 강한 연관성을 보였다. 이는 본 연구에서 평가된 계절패턴과는 상이한 결과이다. 이런 상이한 계절패턴을 설명하기 위해서 몇몇 가능한 가설이 제안될 수 있다. 첫째, 외국의 주요도시와는 다른 주요 PM_{2.5} 발생원을 들 수 있다. 특히, 서울시는 여름철에 약 한달 동안 장마전선의 영향으로 집중우기를 갖는 반면, 겨울철에 더 위험한 발생원에 영향을 받았을 것이다. 일련의 수용 모델을 이용하여 서울시 환경대기 중 PM_{2.5} 농도 및 구성성분에 영향을 주는 주요 발생원을 조사한 연구들이 있다 (Kang *et al.*, 2006; 이학성 등, 2005; KOSEF 2003). 이들 연구결과에 의하면, 겨울철 동안 서울시 PM_{2.5} 농도에 영향을 준 주요 발생원은 농촌소각을 포함한 biomass burning, 자동차 배출원, (NH₄)₂SO₄ 및 NH₄NO₃로 이루어진 이차입자 등이었다. 반면, 여름철 주요 발생원은 자동차 배출원과 이차입자였지만, 앞에서 언급했듯이, 여름철 동안 서울시는 주로 습하고 깨끗한 북태평양 해양성 기단 영향하에 있으며, 6~7월 사이에 약 한달 동안 장마전선에 영향을 받는다. 이런 기상학적 영향은 겨울철 (52.9 µg/m³, 18.3~136.4 µg/m³)에 비해 훨씬 낮은 여름철 PM_{2.5}

평균농도 (27.6 µg/m³, 10.9~82.6 µg/m³)를 초래하였다. 겨울철 다음으로 높은 상관성을 보인 봄철에도 겨울철과 마찬가지로 국지적 오염원 뿐만 아니라 장거리 이동 오염물질 오염원 ("Chinese Aerosol" 및 농촌소각을 포함한 biomass burning)에 영향을 많이 받은 것으로 평가되었다. 따라서 겨울철과 봄철에 더 위험한 발생원에 영향을 받은 PM_{2.5}는 다른 계절에 비해 높은 상대위험률을 초래한 것으로 생각된다. 둘째, 서울시민은 선진국 주요도시의 시민들보다 겨울철에 더 많은 시간을 실외에서 보낼 가능성이 있다. 미국 성인들은 약 90%를 실내에서 보내며, 실내 PM_{2.5} 농도의 약 60~75%는 실외에서 유입된다는 몇몇 연구가 있다 (Abt *et al.*, 2000; Schwartz *et al.*, 1996; Koutrakis *et al.*, 1992). 하지만, 우리나라의 경우는 이러한 연구가 전무한 실정이기 때문에 서울시민이 실내·외에서 보내는 시간을 추정할 수는 없었다. 하지만, 개발도상국의 도시민들은 선진국의 도시민들보다 더 많은 시간을 실외에서 보낸다는 보고가 있다 (Ostro *et al.*, 1999).

서울시에서 PM_{2.5} 농도가 호흡기질환 사망건수에 미치는 영향 정도를 다른 도시에서 수행된 결과와 비교하였다. 서울시에서 PM_{2.5} 10 µg/m³의 농도증가는 총 호흡기질환 사망건수 3.6%의 초과증가를 초래하는 것으로 평가되었다. 특히 겨울철에는 PM_{2.5} 10 µg/m³의 농도증가는 총 호흡기질환 사망건수 9.5%의 초과증가를 초래하였다. 본 연구결과는 미국 Los Angeles (2.2%, 95% CI: 0.3~3.9%)와 캐나다 Montreal (5.1%, 95% CI: 3.3~7.0%)에서 가시도 또는 CoH (coefficient of haze)으로부터 예측된 PM_{2.5} 10 µg/m³의 농도증가에 따른 총 호흡기질환 사망건수의 상대위험률과 유사하거나 높은 결과였다 (Goldberg *et al.*, 2001; Ostro 1995).

4. 결 론

서울시 환경대기 중 PM_{2.5} 농도증가에 따른 호흡기질환 사망건수에 대한 영향이 평가되었다. 실측된 PM_{2.5} 농도 자료수의 부족으로 다른 대기오염물질 및 기상변수 등을 근거로 한 예측회귀모델이 개발되었고, 예측모델에 의해 평가된 PM_{2.5} 농도가 호흡기질환 사망건수와의 연관성을 규명하는데 이용되었

다. 본 연구에서 제시된 통계결과들은 몇몇 가설 또는 가정을 포함한다. 첫째, 본 연구와 같은 시계열자료의 분석에서 고려될 수 있는 또 다른 혼란변수로 인플루엔자 유행의 여부이다. 본 연구에서는 연구기간 중 대규모 인플루엔자의 유행은 없는 것으로 가정하였지만, 이러한 혼란변수는 추후의 연구에서 고려될 것이다. 둘째, 대기오염 자동측정소는 해당지역의 대기오염도를 가장 잘 대표할 수 있는 지점에 선정되지만, 본 연구에서 선정된 서울시 대기오염 자동측정소 중 5개소의 농도자료가 전체 서울시민의 PM_{2.5}를 비롯한 대기오염 폭로를 얼마나 정확하게 반영하는지를 평가하는 것은 매우 어려운 일이다. 셋째, 본 연구에서 사용된 PM_{2.5} 예측회귀모델은 처음으로 시도된 새로운 방법론으로서 많은 분야에 걸쳐 응용될 수 있는 부분이라 사료된다. 따라서 저자들도 더 나은 모형으로 개선하기 위해 계속 연구될 것입니다.

연구결과를 요약하면, 통계적으로 유의하면서 강한 상관성은 대체로 PM_{2.5} 5일 이동평균농도에서 나타났다. 단위 IQR (22.6 µg/m³) 농도증가는 총 호흡기질환 사망건수 8.2% (95% 신뢰구간: 4.5~12.1%)의 증가를 초래하는 것으로 평가되었으며, 노인층 (10.1%) 및 남성 (8.9%)이 PM_{2.5} 폭로에 더 민감한 집단으로 평가되었다. 계절별로는 PM_{2.5} 농도의 10 µg/m³ 만큼 증가할 때, 타 계절에 비해 겨울철 (9.5%)에 가장 높은 상대위험률을 나타냈다. 이러한 결과는 최근에 선진국에서 보고된 역학연구결과와 대체로 유의하거나 더 강한 연관성을 나타낸 것으로, 서울시 PM_{2.5} 기준치 신설 등 저감을 위한 구체적인 정책이 시급한 것으로 평가되었다. 또한 역학연구에서 가장 큰 난제인 부족한 PM_{2.5} 농도자료를 위한 하나의 방법론을 제시하고자 하였다.

감사의 글

이 논문은 정부재원 (교육인적자원부 학술연구조성사업비)으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 연구되었음 (No. M01-2004-000-10038-0).

참고 문헌

권호장, 조수현, 김선민, 하미나, 한상환 (1994) 설문지에 의한

대기오염의 호흡기계 증상 발현에 관한 조사연구, 예방의학회지, 27(2), 313-325.

이학성, 강충민, 강병욱, 이상권 (2005) 수용모델을 이용한 서울지역 미세먼지(PM_{2.5})에 영향을 미치는 배출원 특성에 관한 연구, 한국대기환경학회지, 21(3), 329-341.

KOSEF (2003) 도시지역 미세먼지(PM_{2.5}) 저감을 위한 미세먼지 배출원 특성 및 배출원 기여도 규명에 관한 연구, 한국과학재단, 연구보고서 (R01-2000-000-00340-0), 80 pp.

Abt, E., H.H. Suh, G. Allen, and P. Koutrakis (2000). Characterization of indoor particle sources: A study conducted in the metropolitan Boston area, Environ. Health Perspect., 108, 35-44.

Bates, D.V. (1992) Health indices of the adverse effects of air pollution: The question of coherence, Environ. Res., 59, 336-349.

Dockery, D.W. and C.A. Pope III (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution, Annu. Rev. Public. Health, 15, 107-132.

Dockery, D.W. and C.A. Pope III, X. Xu, J.D. Spengler, J.H. Ware, and M.E. Fay (1993) An association between air pollution and mortality in six U.S. Cities, N. Engl. J. Med., 329, 1753-1759.

Dockery, D.W., J. Schwartz, and J.D. Spengler (1992) Air pollution and daily mortality: Associations with particulates and acid aerosols, Environ. Res., 59, 362-373.

Goldberg, M.S., R.T. Burnett, J.C. Bailar III, J. Brook, Y. Bonvalot, and R. Tamblin (2001) The association between daily mortality and ambient air particle pollution in Montreal, Quebec. 2. Cause-specific mortality, Environ. Res. 86, 26-36.

Hong, Y.C., J.H. Leem, E.H. Ha, and D.C. Christiani (1999) PM₁₀ exposure, gaseous pollutants, and daily mortality in Incheon, South Korea, Environ. Health Perspect., 107, 873-878.

Kang, C.M., B.W. Kang, and H.S. Lee (2006) Source identification and trends in concentrations of gaseous and PM_{2.5} principal species in Seoul, South Korea, J. Air & Waste Manag. Assoc., 56, 911-921.

Kang, C.M., H.S. Lee, B.W. Kang, S.K. Lee, and Y. Sunwoo (2004a) Chemical characteristics of acidic gas pollutants and PM_{2.5} species during hazy episodes in Seoul, South Korea, Atmos. Environ., 38, 4749-4760.

Kang, C.M., Y. Sunwoo, H.S. Lee, B.W. Kang, and S.K. Lee (2004b) Atmospheric concentrations of PM_{2.5} trace

- elements in the Seoul urban area of South Korea, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 54, 432-439.
- Klemm, R.J., R.M. Mason Jr., C.M. Heilig, L.M. Neas, and D.W. Dockery (2000) Is daily mortality associated specifically with fine particles? Data reconstruction and replication of analyses, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 50, 1215-1222.
- Koutrakis, P., S. Briggs, and B. Leaderer (1992) Source apportionment of indoor aerosols in Suffolk and Onondaga counties, New York, *Environ. Sci. Technol.*, 26, 521-527.
- Lee, H.S., C.M. Kang, B.W. Kang, and H.K. Kim (1999a) Seasonal variations of acidic air pollutants in Seoul, South Korea, *Atmos. Environ.*, 33, 3143-3152.
- 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.
- Lee, J.T., D. Shin, and Y. Chung (1999b) Air pollution and daily mortality in Seoul and Ulsan, Korea, *Environ. Health Perspect.*, 107, 149-154.
- Liabaca, M., I. Olaeta, E. Campos, J. Villaire, M. Tellez-Rojo, and I. Romieu (1999) Association between levels of fine particulate and emergency visits for pneumonia and other respiratory illnesses among children in Santiago, Chile, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 49, 154-163.
- Lighty, J.S., J.M. Veranth, and A.F. Sarofim (2000) Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 50, 1565-1618.
- Mokdad, A.H., J.S. Marks, D.E. Stroup, and J.L. Gerberding (2004) Actual causes of death in the United States, 2000, *J. Am. Med. Assoc.*, 291, 1238-1245.
- Ostro, B., L. Chestnut, N. Vichit-Vadakan, and A. Laixuthai (1999) The impact of particulate matter on daily mortality in Bangkok, Thailand, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 49, 100-107.
- Ostro, B. (1995) Fine particulate air pollution and mortality in two Southern California Counties, *Environ. Res.*, 70, 98-104.
- Peng, R.D., F. Dominici, R. Pastor-Barriuso, S.L. Zeger, and J.M. Samet (2005) Seasonal analyses of air pollution and mortality in 100 US cities, *Am. J. Epidemiol.*, 161, 585-594.
- Schwartz, J., D.W. Dockery, and L.M. Neas (1996) Is daily mortality associated specifically with fine particles?, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 46, 927-939.
- Schwartz, J. (1994a) Air pollution and hospital admissions for the elderly in Detroit, Michigan, *Am. J. Respir. Crit. Care Med.*, 150, 648-655.
- Schwartz, J. (1994b) What are people dying of on high air pollution days?, *Environ. Res.*, 64, 26-35.
- Zorrilla-Torras, B., N. Garcia-Marin, I. Galan-Labaca, and A. Gandarillas-Grande (2005) Smoking attributable mortality in the community of Madrid: 1992-1998, *Eur. J. Public Health*, 15, 43-50.