

수도권 대기 중 입자상 물질로 인한 건강부담 추정과 불확실성

Uncertainty and Estimation of Health Burden from Particulate Matter in Seoul Metropolitan Region

하 종 식 · 문 난 경*
한국환경정책·평가연구원

(2013년 2월 7일 접수, 2013년 4월 24일 수정, 2013년 5월 13일 채택)

Jongsik Ha and Nankyong Moon*
Korea Environment Institute

(Received 7 February 2013, revised 24 April 2013, accepted 13 May 2013)

Abstract

It is well known that exposure to high level of PM (particulate matter) can adversely affect human health. However, little is known about health burden of PM considering the relationship, exposed level of PM, and health level in local communities. And, there is scarcely methodical assessment of uncertainty for application to policies of these assessment results.

The scope of this study is divided into two parts: firstly to estimate the death burden of PM₁₀ (particulate matter less than 10 μm in diameter) in Seoul metropolitan region, and secondly to evaluate potential uncertainties in these estimates.

To estimate the death burden of PM₁₀ in Seoul metropolitan region from 2005 ~ 2010, we firstly assessed the relationship between daily mean PM₁₀ and daily death counts in Seoul from 2000 ~ 2010, and calculated the death burden of PM₁₀ using BenMAP (Environmental Benefits Mapping and Analysis Program). After that, we identified and characterized uncertainties to substantially influence the results of death burden.

The daily mortality risk was increased 1.000227 times ($p\text{-value} < 0.001$) associated with 1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase of daily mean PM₁₀ for all ages population, Seoul. And, death burdens of PM₁₀ in Seoul metropolitan region were estimated from 5.51 in 2005 to 5.12 in 2010 per 100,000 people. Finally, we categorized context, model, and input uncertainty and characterized these uncertainties in three dimensions (i.e. location, level, and nature) using uncertainty typology.

In our study, we argue that uncertainties need to be identified, assessed, reported and interpreted in order for assessment results to adequately support decision making, such as the establishment of air quality standards based on health burden of air quality.

Key words : Particulate matter, Health burden, Uncertainty, Environment health policy

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)2 380-7607, E-mail : nkmoon@kei.re.kr

1. 서 론

PM(particulate matter)은 대기 중에 고체나 액체로 존재하는 직경이 0.001~500 μm 의 미세한 물질로, 그 크기에 따라서 호흡기에 침적 또는 제거 기전이 달라 인체영향도 다르다(Yoon *et al.*, 2003). 특히 PM10(particulate matter less than 10 μm in diameter)은 직경이 10 μm 보다 작은 미립자로서 인체에 흡입되어 폐포에 침착됨으로서 심폐질환 및 사망 등 다양한 건강상의 문제를 유발하거나 악화시킬 수 있다(Pope *et al.*, 2006; WHO, 2004). 이러한 PM10의 건강 악영향은 전 세계적으로 사망(Dominici *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2005; Katsouyanni *et al.*, 1997), 호흡기계 및 심혈관계 관련 질환입원(Dominici *et al.*, 2006; Atkinson *et al.*, 2001; Zanobetti *et al.*, 2000; Schwartz, 1999; Anderson *et al.*, 1998), 응급실 방문(Wilson *et al.*, 2005), 그리고 저체중아(Bell *et al.*, 2007) 등으로 보고되었으며, 국내에서도 이미 여러 차례 보고된바 있다(Seo *et al.*, 2006; Kim *et al.*, 2004; Cho *et al.*, 2003).

PM 노출로 인한 건강부담은 지역사회의 PM으로 인한 건강영향 관련성에 해당 지역의 PM 노출 수준 및 건강수준을 고려하여 산출된다. 이러한 건강부담은 다양한 환경위험요인들로 인한 건강부담을 비교 가능하게 하며, 대기오염 기준 선정 또는 환경오염의 예방과 관리 등 정책수립에 도움을 줄 수 있다. 지금까지 국내의 PM 노출에 따른 건강부담 연구는 PM10에 의한 조기사망(Bae and Park, 2009) 및 소아천식 입원(Bae *et al.*, 2009), 그리고 PM2.5(particulate matter less than 2.5 μm in diameter)에 의한 조기사망(Bae *et al.*, 2010)에 대해 수행된바 있다. 하지만 이 연구들은 대부분이 PM의 농도 개선으로 인한 조기사망자수 또는 입원 발생수를 산출할 뿐, 이들 산출과정에서의 가정 및 다양한 활용 모수의 불확실성(uncertainty) 평가는 부족한 실정이다. 그리고 이들 연구들은 대부분이 토론부문에서 모수에 대한 민감도만을 제시하고 있다.

불확실성은 '특정 평가체계에서 완전한 지식까지의 어떤 편차'로 정의될 수 있다(Walker *et al.*, 2003). 일반적으로 불확실성은 완전히 없앨 수 없지만 불확실성을 어떻게 처리할지에 대한 개선의 여지는 존재한다. 만일 연구자 및 정책결정자들이 PM 노출로 인한

건강부담 평가에 있어 잠재적인 불확실성의 정도 및 최종 평가결과에 어떻게 영향을 미칠 것인지를 알 수 있다면, 불확실성 평가는 정책결정에 있어 매우 유용할 것이다.

최근 국내에서 2015년부터의 제2차 수도권 대기환경개선 특별대책에 있어 건강영향에 근거한 기준수립이 강조되고 있다. 비록 대기오염물질에 의한 건강영향은 다양하게 평가될 수 있지만 연구결과의 정책적 활용을 위해서는 평가결과의 신뢰성 확보가 무엇보다도 중요하다. 본 연구는 수도권 PM 노출로 인한 건강부담으로 PM10 노출로 인한 사망부담을 산출하고, 이러한 평가에 있어 나타날 수 있는 잠재적인 불확실성에 대해 체계적인 방법으로 평가하고자 하였다.

2. 연구대상 및 방법

2.1 PM10 노출로 인한 사망부담 산출

본 연구에서 PM10 노출로 인한 사망부담 산출은 2005년부터 2010년까지 수도권(서울, 인천, 경기)을 대상으로 하였다. 하지만 사망부담 산출에 필수적인 PM10 노출로 인한 사망발생 관련성은 서울의 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지를 대상으로 추정하였다.

2.1.1 PM10 노출로 인한 사망발생 관련성 추정

PM10 노출로 인한 사망발생 관련성을 추정하기 위한 주요 자료는 대기오염 측정망자료, 사망원인자료, 그리고 기상자료이다. 각각의 자료는 관련성 평가를 위한 서울의 일자료(daily data)로 가공하였다.

대기오염 측정망자료는 국립환경과학원의 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 서울에 속한 각 측정망의 시간별 PM10 농도자료를 활용하였다. 서울의 일평균PM10 농도는 서울의 각 측정망에 대한 시간별 값을 평균화하여 서울의 시간별 PM10 농도로 계산하고, 이렇게 계산된 일 24회 값을 평균화하여 산출하였다. 이렇게 계산된 일평균PM10 농도는 분석 기간 동안 결측값이 존재하지 않았다.

사망원인자료는 통계청의 2000년부터 2010년까지 사망발생 당시 서울에 주소지를 가지는 사망자의 정보자료를 사용하였다. 서울의 일사망자수는 전체 연령의 사망자를 대상으로 사고사를 제외한 전체 원인

사망(ICD10 code: A00~R99)에 대해 산출하였다.

기상자료는 기상청의 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 서울 기상관측지점에서 관측한 매 시간별 기온 및 상대습도 자료를 활용하였다. 서울의 일평균기온과 일평균상대습도는 일 24회 값을 평균화하여 산출하였다. 이렇게 계산된 일평균기온과 일평균상대습도는 분석기간 동안 결측값이 존재하지 않았다.

일평균PM10 노출로 인한 일사망자수 발생 관련성 평가는 시계열 분석으로 진행하였다(Dominici *et al.*, 2002). 이 연구에서 시계열 분석은 비선형 포아송 회귀모형(nonlinear poisson regression model)을 활용했는데, 비선형에 대한 평활함수는 NCS(Natural Cubic Spline)을 활용했다. 다음은 이번 분석에 활용한 관련성 평가의 최종모형이다(1).

$$\begin{aligned} \ln[E(Y)] = & \beta_0 \\ & + \alpha(\text{day_of_week}) \\ & + \text{NCS}(\text{day_number}, \text{df}=44) \\ & + \text{NCS}(\text{temperature}, \text{df}=3) \\ & + \text{NCS}(\text{humidity}, \text{df}=3) \\ & + \beta_1 \cdot \text{PM10} \end{aligned} \quad (1)$$

여기에서 E(Y)는 기대되는 일사망자수를 의미한다. 먼저 일사망자수의 장기적 경향(long-term trend)을 보정하기 위해 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지의 날짜 순서값(sequence values)을 자유도(degree of freedom) 44로 평활하였다. 또한 일사망자수는 기온, 상대습도, 그리고 요일과 관련성이 있다는 과거 연구결과들을 바탕으로(Dominici *et al.*, 2006; Atkinson *et al.*, 2001; Zanobetti *et al.*, 2000), 요일 효과를 지시변수(indicator variable)로 통제했으며, 일평균기온 및 일평균상대습도를 자유도 3으로 평활하여 통제했다. 최종 일평균PM10의 단위변화에 따른 일사망자수 발생위험(risk)의 상대위험비(relative risk; RR₀)는 exp(β₁)로 추정했다. 이 분석은 R소프트웨어 버전 2.14.0을 사용하여 수행하였다(The R Foundation for Statistical Computing, version 2.14.0, 2011, <http://cran.r-project.org>).

2.1.2 PM10 노출로 인한 사망발생 관련성을 활용한 사망부담 산출
PM10 노출로 인한 사망부담을 산출하기 위한 주

요 자료는 CR함수(concentration-response function), 대기오염 노출자료, 사망 발생률 자료 및 인구수 자료이다. CR함수를 제외한 각각의 자료는 연도별 사망부담 산출을 위한 수도권의 시군구별 연도자료(yearly data)로 가공하였다.

CR함수는 대기오염물질과 특정 건강영향 사이의 관련성을 의미한다. 본 분석의 수도권 CR함수는 서울의 CR함수와 동일한 것으로 가정했으며, PM10의 단기노출(short-term exposure)로 인한 급성(acute) 사망영향으로서 서울의 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 PM10 노출로 인한 전체연령의 전체 원인 사망발생 시계열 분석결과를 활용하였다.

대기오염 노출자료는 국립환경과학원의 2005년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 수도권에 속한 각 측정망의 시간별 PM10을 활용하였다. 각 측정망의 매 시간별 PM10 농도를 평균화하여 각 측정망의 일평균PM10 농도로 계산하였으며, 이때 황사의 영향을 제거하기 위해 시간별 PM10 농도가 400 μg/m³을 초과하는 경우에 결측값으로 처리하였다. 수도권의 시군구별 연평균PM10 농도는 사망부담 산출에 활용한 BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)의 VNA(Voronoi Neighborhood Averaging) 방법을 적용하여 계산하였다. 여기에서 VAN 방법은 산출하고자 하는 지점의 농도를 측정지점의 농도값에 거리의 역수값으로 가중평균화하여 산출하는 방법이다(Abt Associates Inc, 2008).

사망 발생률 자료는 통계청의 2005년부터 2010년까지 인구동향조사의 수도권 시군구별 전체원인 사망률 자료를 활용하였다. 각 시군구별 인구수 자료는 통계청의 2005년부터 2010년까지 시도추계인구의 수도권(서울, 인천, 경기도) 인구수 및 2010년 인구총조사에 제시된 각 시도의 시군구별 인구 구성비 자료를 적용하여 활용하였다.

본 연구에서의 PM10 노출로 인한 사망부담 산출은 미국 EPA에서 대기질 개선정책의 건강편익(health benefit)을 경제적 가치로 추정하기 위해 활용하고 있는 환경-편익 분석 프로그램인 BenMAP을 활용하였다(Abt Associates Inc, 2008; Davidson *et al.*, 2007). BenMAP은 CR함수에 지역사회의 대기오염물질 농도수준, 지역사회의 건강수준(즉 특정 건강영향의 발생률), 그리고 지역사회의 인구수를 적용하여 지역사회의 대기오염물질로 인한 초과사망자수(excess death

counts)를 계산한다. 다음은 이번 분석에 활용한 PM10 노출로 인한 초과사망자수 산출공식이다 (2).

$$\begin{aligned} & \text{Excess death counts} \\ & =[(RR-1)/RR] \cdot \text{Incidence} \cdot \text{Population} \quad (2) \end{aligned}$$

여기에서 Excess death counts는 지역사회의 PM10으로 인한 초과사망자수, Incidence는 지역사회의 사망률, 그리고 Population은 지역사회의 인구수를 의미한다. [(RR-1)/RR]은 지역사회의 PM10으로 노출로 인한 사망발생 기여분(attributable fraction)을 의미하는데, 지역사회의 모든 사람이 PM10에 노출되는 것으로 가정하였다. RR은 지역사회 PM10 농도 기준수준(reference level; x_0)에 대비한 노출수준(exposure level; x_1)에서의 상대위험비를 의미하는데, 여기에서 본 연구의 공식(1)에서 도출된 결과를 활용한 $RR = \exp(\beta_1 \cdot (x_1 - x_0))$ 로 계산하였으며, PM10 농도 기준수준(baseline level)을 $0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가정하였다.

최종 지역사회 PM10 노출로 인한 사망부담은 해당 지역사회의 인구수를 활용하여 인구 10만명당 초과사망자수로 환산하여 산출하였다. 다음은 이번 분석에서 활용한 PM10 노출로 인한 사망부담 산출공식이다(3).

$$\begin{aligned} & \text{Death burden} \\ & =(\text{Excess death counts}/\text{Population}) \cdot 100000 \quad (3) \end{aligned}$$

2.2 PM 노출로 인한 건강부담 산출의 불확실성 평가

불확실성 평가를 위해서는 다양한 형태의 불확실성을 종합적으로 평가할 수 있는 개념이 필요하다. 불확실성 평가의 전문가들은 3차원의 불확실성 평가체계를 제안했는데, 첫째 불확실성의 위치(location), 둘째 불확실성의 수준(level), 그리고 불확실성의 원인(nature)으로 구분하여 평가하였다(Walker *et al.*, 2003). 불확실성의 위치(location)는 특정 평가단계에서 불확실성이 나타날 수 있는 지점과 관련된다. 이러한 불확실성의 위치는 문맥의 불확실성(context uncertainty), 모형구조의 불확실성(model uncertainty), 입력 자료의 불확실성(input uncertainty), 그리고 모형결과의 불확실성(model outcome uncertainty)으로 세분화된다. 불확실성의 수준(level)은 지식의 존재(knowledge exists)를 나타내는 완전한 무지에서 완벽한 앎까지의 범위와 관련된다. 불확실성의 수준은

미래 상황이나 결과에 대해 확실성이 있는 경우의 결정(decision)에서부터 통계적 불확실성(statistical uncertainty), 시나리오 불확실성(scenario uncertainty), 인지적 무지(recognised ignorance), 그리고 알고 있지 못하다는 것조차 알지 못하는 완전한 무지(total ignorance)로 세분화된다. 마지막으로 불확실성의 원인(nature)은 지식의 불확실성(epistemic uncertainty)과 가변성의 불확실성(variability uncertainty)으로 세분화된다. 지식의 불확실성은 연구자의 지식이 불완전함으로 인해 발생하는 불확실성을 의미하며, 가변성의 불확실성(variability uncertainty)은 본질적인 변동성으로 인해 나타나는 불확실성을 의미한다.

불확실성 평가는 불확실성 매트릭스(uncertainty matrix)를 통해 시각적으로 나타낼 수 있다. 불확실성 매트릭스는 불확실성이 어디에 나타나고, 이러한 불확실성의 수준 및 원인이 어떤 특징을 가지는지에 대한 목록을 만드는 것과 같다. 본 연구의 PM 노출로 인한 건강부담 산출의 불확실성 평가는 불확실성 매트릭스를 활용하여 잠재적인 불확실성을 확인 및 특성화하였으며, 이로 인한 최종 건강부담 산출결과에 대한 잠재적인 영향에 대해 제시하였다.

3. 연구결과

3.1 사망부담 산출

3.1.1 PM10 노출로 인한 사망발생 관련성 추정

표 1은 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 서울의 일사망자수 및 일평균PM10에 대한 연도별 특성을 보여준다. 서울의 일사망자수는 분석기간 동안 평균 93.5명이었으며, 2004년까지 감소하다가 다시 증가하는 경향을 보였다. 반면에 서울의 일평균 PM10은 분석기간 동안 평균 $62.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2000년부터 지속적으로 감소하는 경향을 보였다. 특히 연도별 또는 전체 분석기간의 일평균PM10 최대값들은 일반적인 이상값(outlier) 기준인 $Q3 + 1.5 \times IQR$ 의 값보다 더 큰 것으로 나타났다.

그림 1은 서울의 2000년 1월 1일부터 2010년 12월 31일까지 비선형 포아송회귀모형을 적용한 당일(lag=0) 일평균PM10 증가로 인한 일사망자수의 CR 함수 곡선이다.

일평균PM10의 증가에 따른 일사망자수의 발생위

Table 1. Characteristic of daily death counts and daily mean PM10 in Seoul, 2000~2010.

Year	Daily death counts (N)		Daily mean PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)					
	Mean (SD) ¹	Mean (SD) ¹	Min	Q1 ²	Median	Q3 ³	Max	Q3 ³ +1.5×IQR ⁴
2000	95.7 (13.6)	70.7 (37.7)	14.3	47.3	64.4	86.5	287.1	145.3
2001	94.2 (11.0)	70.9 (41.8)	14.2	43.1	62.0	82.1	306.8	140.6
2002	94.8 (13.1)	76.3 (85.6)	11.8	43.0	65.4	84.5	1016.4	146.8
2003	91.8 (11.2)	69.6 (38.6)	11.9	43.0	63.4	85.6	246.2	149.5
2004	91.5 (10.7)	60.7 (31.5)	10.3	38.8	53.5	77.6	288.2	135.8
2005	92.7 (11.7)	59.3 (30.0)	11.5	37.5	52.5	75.1	191.4	131.5
2006	92.6 (10.3)	59.7 (54.6)	11.1	33.9	52.5	73.1	871.3	131.9
2007	93.6 (10.7)	62.7 (41.1)	12.4	37.5	53.2	77.5	451.0	137.5
2008	92.2 (11.4)	54.8 (25.6)	18.0	37.8	49.7	64.2	196.6	103.8
2009	92.7 (11.6)	53.2 (26.9)	14.1	36.3	47.7	60.6	216.2	97.1
2010	96.6 (11.4)	51.4 (26.7)	12.5	33.9	45.2	61.0	209.5	101.7
Total	93.5 (11.7)	62.7 (44.0)	10.3	38.4	54.5	76.0	1016.4	132.4

¹SD: Standard Deviation; ²Q1: First quartile; ³Q3: Third quartile; ⁴IQR: Interquartile range (IQR=Q3-Q1)

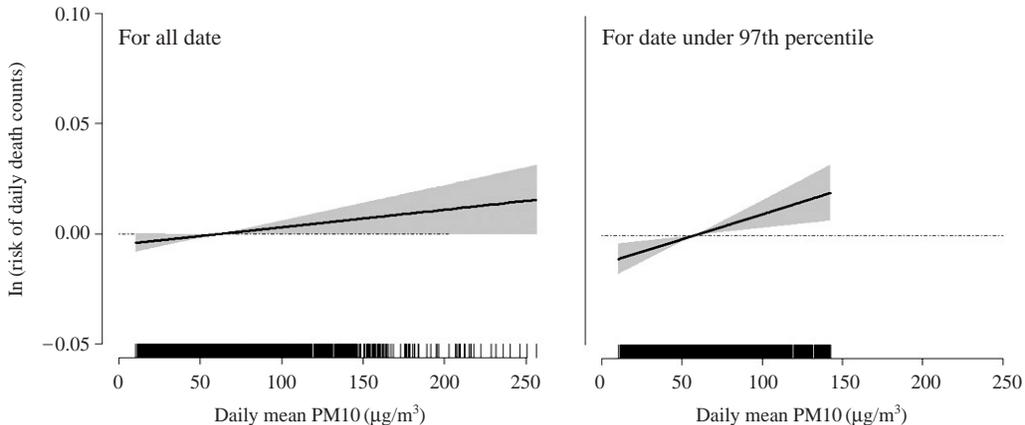


Fig. 1. Concentration-response curve for daily death counts and daily mean PM10 for all ages in Seoul, 2000~2010.

험을 선형관계로 적합한 결과, 양의 관련성을 확인할 수 있었다. 특히 전체자료에 대한 관련성보다는 전체 자료의 97th 백분위수인 $143.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 자료만을 이용한 관련성이 더 큰 것을 확인할 수 있었다. 본 분석에서 일평균PM10 당일 (lag=0)부터 3일전 (lag=3)의 일사망자수 효과를 모두 평가했는데, 당일효과가 가장 큰 관련성을 보였다. 또한 이러한 지연별 효과는 전체자료를 이용한 분석보다는 전체자료의 97th 백분위수 이하의 자료만을 이용한 분석에서 더 큰 관련성을 가지는 일관성을 보였다. 최종적으로 서울 2000년부터 2010년까지 일평균PM10의 상위 3% 자료를 제외한 일평균PM10 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가에 따른 일

사망자수 발생위험은 1.000227배 (i.e. $\beta_1=0.0002265$) 증가하는 것으로 추정되었다. β_1 추정값의 표준오차 (standard error)는 0.0000761이었으며, 유의확률 (significance probability)은 0.003으로 유의수준 (significance level) 0.01에서 통계적으로 유의미한 것으로 나타났다.

3.1.2 PM10 노출로 인한 사망부담 산출

BenMAP을 활용, 서울 일평균PM10 노출로 인한 일사망자수 발생 관련성을 적용한 수도권 시군구 단위의 PM10 연중 노출로 인한 초과사망자수 및 사망 부담을 산출하였다. 이를 수도권으로 취합한 결과는

Table 2. Yearly PM10, population, mortality and death burden in Seoul metropolitan region, 2005~2010.

Year	Yearly PM10 concentration ¹ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Population (N)	Mortality (per 100,000)	Excess death counts N (95% CI)	Death burden (per 100,000) (95% CI)
2005	62.55	23,202,135	395	1,278 (439~2,112)	5.51 (1.89~9.10)
2006	66.13	23,472,058	389	1,350 (464~2,229)	5.75 (1.97~9.50)
2007	64.37	23,710,795	392	1,344 (461~2,219)	5.67 (1.95~9.36)
2008	58.12	23,997,947	389	1,198 (411~1,980)	4.99 (1.71~8.25)
2009	59.46	24,170,980	393	1,254 (430~2,071)	5.19 (1.78~8.57)
2010	56.20	24,339,494	407	1,246 (428~2,059)	5.12 (1.76~8.46)

¹Yearly PM10 concentration of Seoul metropolitan region is the area weighted average of *SIGUNGU* in Seoul metropolitan region.

표 2와 같다.

수도권 PM10 연중 농도는 2005년 $62.55 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서 2007년 $64.37 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 증가하다가 2010년에 $56.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 감소하는 경향을 보였다. 하지만 수도권 인구수 및 사망 발생율은 2005년에 각각 2,320만명 및 인구 10만명당 395명에서 2010년에 각각 2,434만명 및 인구 10만명당 407명으로 증가하는 경향을 보였다. 최종 수도권 시군구별 연중 PM10 농도, 인구수, 사망 발생률 그리고 일평균PM10 농도에 따른 일 사망자수 발생 관련성을 적용한 연중 초과사망자수 및 사망부담은 일평균PM10 연중 농도의 변화와 유사한 증감경향을 보였다. 수도권 일평균PM10 연중 농도로 인한 연중 사망부담은 인구 10만명당 2005년 5.51명에서 2007년 5.67명, 그리고 2010년 5.12명으로 산출되었다.

3. 2 불확실성 평가

표 3은 수도권의 대기 중 PM으로 인한 건강부담 산출과정에서 나타날 수 있는 불확실성에 대해 불확실성의 위치, 수준, 그리고 원인을 불확실성 매트릭스로 작성한 결과이다.

3. 2. 1 문맥의 불확실성

지금까지 많은 연구들은 PM 노출로 인한 다양한 건강영향 관련성을 평가했다. 최근 PM 노출지표로서 PM10 (Dominici *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2005; Katsouyanni *et al.*, 1997) 뿐만 아니라 PM2.5 (Bell *et al.*, 2009; Eftim *et al.*, 2008; Zeger *et al.*, 2008; Franklin *et al.*, 2007; Dominici *et al.*, 2006; Metzger *et al.*, 2004)를 사용한 연구들이 있으며, 또한 PM10 노출로 인한 건강영향 지표로서 사망 (Dominici *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2005; Katsouyanni *et al.*, 1997), 입원 (Dominici *et al.*,

et al., 2006; Atkinson *et al.*, 2001; Zanobetti *et al.*, 2000; Schwartz, 1999; Anderson *et al.*, 1998), 응급실방문 (Wilson *et al.*, 2005), 그리고 저체중아 출산 (Bell *et al.*, 2007) 등을 사용한 연구들이 있다. 사실상 이들 모든 노출지표 및 건강영향 지표를 고려한 PM 노출로 인한 건강부담을 산출하는 것은 불가능하다. 결국 PM 노출로 인한 건강부담 추정에서 PM 노출의 지표 및 건강영향의 정의는 최종 산출되는 건강부담에 불확실성을 야기할 수 있다. 이러한 불확실성은 지식적인 불확실성보다는 사회 또는 규범적인 불확실성이 높으며, 시나리오적인 불확실성의 특성을 가진다(표 3).

PM10은 직경이 $10 \mu\text{m}$ 보다 작은 미립자를 의미하는데, 직경의 크기가 $2.5 \mu\text{m}$ 보다 작은 경우를 PM2.5라고 한다. 지금까지의 많은 연구들은 PM10의 건강영향 연구를 수행하였는데, 최근 PM2.5에 대한 인체 유해성이 강조되고 있다 (Bell *et al.*, 2009; Eftim *et al.*, 2008; Zeger *et al.*, 2008; Franklin *et al.*, 2007; Dominici *et al.*, 2006; Metzger *et al.*, 2004). 이는 입자의 크기가 작을수록 호흡기에서 입자의 제거 속도가 느려지며, 인체 내부로의 침투가 용이하고, 폐나 기도 등의 인체 장기에서 흡수되기 쉬우며, 세포와의 반응성이 증가하기 때문이다 (WHO, 2003b). 본 연구는 PM 노출지표로 PM10을 선정하였는데, PM2.5로의 선정은 다른 수준의 건강부담 산출결과를 가져올 수 있을 것이다.

다른 한편으로 PM10 노출로 인한 건강영향은 저체중아 출산, 호흡기계 및 심혈관계 질환, 나아가 사망에 이르기까지 다양하게 언급되고 있다 (Bell *et al.*, 2007; Dominici *et al.*, 2006; Dominici *et al.*, 2005; Peng *et al.*, 2005; Atkinson *et al.*, 2001; Zanobetti *et al.*, 2000; Schwartz, 1999; Anderson *et al.*, 1998; Katsouyanni *et al.*, 1997). 따라서 본 연구의 PM10 노출로 인한 사망

Table 3. Uncertainty matrix for death burden from particulate matter in Seoul metropolitan region, 2005~2010.

	Location	Level			Nature	
		Statistical uncertainty	Scenario uncertainty	Recognised ignorance	Epistemic uncertainty	Variability uncertainty
Context	Multiple ways of defining the PM		+			+
	A subset of adverse health outcome		+			+
Model	Acute health impact vs. chronic health impact	+			+	
	Shape of concentration response curve		+		+	
	The effects of both PM and other correlated pollutants	+			+	
	RR in susceptible population	+			+	
Inputs	Interpolating of exposure data (or measuring exposure population)	+			+	
	Measuring of health data	+			+	

[†]The sign of + indicates whether the characterization is or not in the uncertainty matrix.

부담은 다양한 부정적 건강부담의 일부분에 해당되며, 그 외 다른 건강영향을 고려할 경우에 다른 수준의 건강부담 산출결과를 가져올 수 있을 것이다.

3.2.2 모형구조의 불확실성

모형구조의 불확실성은 평가체계에서 인과관계(causal relationship)의 구조에 관한 불확실성과 관련된다. 이는 다양한 원인들로 인한 건강영향에 있어 상대적으로 작은 영향을 끼치는 환경위험에 대한 인과관계의 해석에 다양한 관점이 존재할 수 있기 때문이다. PM 노출로 인한 건강부담 산출은 PM 노출로 인한 건강영향 관련성을 나타내는 CR함수, PM 노출수준, 건강영향의 기준(baseline) 발생률, 그리고 노출되는 인구수에 의해 계산된다. 이중 CR함수가 PM 노출로 인한 건강영향의 인과관계 구조를 설명하므로 대부분의 모형구조 불확실성은 CR함수의 도출과 관계된다. 그리고 이러한 불확실성은 계속적인 연구를 통해 새로운 정보를 축적함으로써 해결할 수 있는 지식적인 불확실성이 높으며 통계적인 불확실성의 특성을 가진다(표 3).

대기오염으로 인한 건강영향 연구에서 중요한 쟁점 중의 하나는 단기노출(short-term exposure)로 인한 급성(acute) 건강영향과 장기노출(long-term exposure)로 인한 만성(chronic) 건강영향의 효과 차이이다. 비록 대기오염의 건강영향 연구에서 두 연구는 의미 있는 기여를 하는 것으로 평가되지만(WHO, 2000), 코호트 연구를 통한 대기오염의 만성 건강영향이 시계

열 연구의 급성 건강영향보다 약 5~10배 높게 추정되는 것으로 보고한다(Kunzli *et al.*, 2001). 본 연구는 PM10의 단기노출로 인한 급성 사망영향을 이용한 사망부담을 산출하였다. 사실상 PM10으로 인한 사망부담은 PM10의 단기 및 장기노출을 모두 고려한 영향으로 평가될 때 더욱 참값에 도달할 수 있으므로(UK Department of Health, 1998), 이번 연구 결과의 PM10 노출로 인한 사망부담은 과소추정(underestimate)되었을 수 있다.

PM10 노출로 인한 사망발생 영향에서 CR함수의 형태는 또 다른 모형구조의 불확실성이 된다. CR함수의 역치수준(threshold level) 존재여부는 보건학적인 중요성과 관련될 수 있으며, 나아가 PM10 노출로 인한 사망부담 산출에 상당한 영향을 끼칠 수 있다. 많은 연구들은 PM10의 낮은 노출수준에서 여전히 부정적 건강영향이 존재함을 보고하고 있다(Gwynn *et al.*, 2000; Schwartz, 2000; Schwartz and Zanobetti, 2000). 하지만 여전히 PM10 농도 수준에 따라서 사망영향 크기는 다를 수 있다. 본 연구는 역치수준이 존재하지 않는 것으로 가정하였으며, 이에 기준 농도를 0 µg/m³으로 정의하였다. 따라서 이러한 가정은 PM10의 특정 농도 수준 이하에서 사망발생 효과가 다른 농도 수준보다 작을 경우에 과대추정(overestimate)의 불확실성을 야기할 수 있다.

PM10 노출로 인한 사망부담 산출에서의 CR함수는 통계분석 모형의 설계 및 추정 과정에서 다른 대기오염물질 및 기상조건 등에 완전히 배타적일 수

없다. 일반적으로 PM으로 인한 건강영향은 가스상 대기오염물질들(즉 SO₂, CO, NO₂, O₃ 등)에 혼란을 받을 수 있으며(Lee *et al.*, 1999), 기온과 상호작용효과를 가질 수도 있다(Stafoggia *et al.*, 2008; Ren and Tong, 2006; Roberts, 2004). 본 연구는 기온을 혼란변수로 통제했을 뿐, 상호작용으로의 효과 및 타 대기오염물질의 관련성을 고려하지 못했다. 따라서 본 연구에 사용된 CR함수는 타 대기오염물질의 영향이 중복되었을 가능성이 있어 과대추정의 불확실성을 야기할 수 있다.

본 연구의 CR함수는 수도권의 모든 사람이 동일한 PM10 노출에 동일한 사망발생이 나타나는 것으로 가정하였다. 하지만 대기오염물질 노출로 인한 건강영향은 노출지역 및 노출된 인구 특성에 따라서 달라질 수 있다. 일반적으로 영아나 어린이 그리고 노약자는 동일한 수준의 PM10에 노출되더라도 더 큰 건강영향을 받을 수 있다(Lin *et al.*, 2005; Schwartz, 2004; Bobak *et al.*, 1999). 또한 동일한 PM10에 노출되더라도 해당 노출지역의 지역적인 특성에 따라서 건강영향 정도는 달라질 수 있다(Samet *et al.*, 2001; Lee *et al.*, 2000; Dockery *et al.*, 1993). 따라서 본 연구에서 수도권 전체 인구에 대한 동일한 CR함수의 적용은 사망부담 추정에 있어 불확실성을 야기할 수 있다.

3.2.3 입력 자료의 불확실성

입력 자료의 불확실성은 관련된 자료 부족 및 부정확한 측정 등에 의해 발생한다. 수도권 PM 관련 노출자료(노출 인구수 포함)와 건강자료(사망자 및 사망발생률 자료)는 PM 노출로 인한 사망부담 산출의 필수적인 자료라 할 수 있는데, 노출자료는 실제 값을 이용한 예측값의 평가가 가능하고 건강자료는 특정 신뢰구간으로 제시될 수 있으므로 통계적 수준의 불확실성이 높으며, 노출 및 건강자료에 대한 확대된 조사를 통해 개선될 수 있으므로 지식적 불확실성의 특성을 가진다(표 3).

대기오염 노출자료는 특정지점에서의 주기적인 모니터링을 통해 생산된다. 하지만 행정구역별 사망부담 산출을 위한 대기오염수준의 행정구역별 산출은 통계적인 모형을 활용하게 되어 부정확한 노출수준으로 생산될 수 있다. 이러한 대기오염의 노출수준에 대한 부정확한 측정은 대기오염 역학연구에서 부득

이하게 발생하는데(Sarnat *et al.*, 2007), 이러한 대기오염 노출수준의 부정확한 측정은 공간적 변동으로 인한 특정 개인들의 노출수준을 대표할 수 없게 만든다. 본 연구에서 PM10 노출로 인한 사망발생 관련성 평가에서의 서울지역 일노출 수준은 서울지역에 포함된 대기오염측정망의 시간대별 평균값을 평균화함으로써 정의하였으며, 수도권의 각 행정구역별 PM10 연중 노출수준은 각 대기오염측정망의 연중 PM10 노출수준을 내삽(interpolation)하여 정의하였다. 결국 이러한 방법론적인 적용은 대기오염 노출수준의 부정확한 측정으로 CR함수 추정 및 CR함수를 적용한 시군구별 사망부담 산출에 불확실성을 야기할 수 있다.

건강자료는 대기오염 노출자료에서와 동일한 불확실성을 야기할 수 있다. 일반적으로 건강자료는 특정 집단에 대한 역학연구를 통해 획득된다(Kruijshaar *et al.*, 2002). 따라서 이런 자료들은 다양한 역학연구 결과들의 활용 그리고 매우 높은 공간적 해상도를 가지는 결과를 활용할 때에 불확실성이 낮아지게 된다. 본 연구는 전수조사 성격을 가지는 사망원인발생률 자료와 이를 이용한 지역별 사망률 자료를 활용하였으므로 건강자료와 관련된 불확실성은 매우 낮을 것으로 판단된다.

4. 고 찰

특정 환경위험요인으로 인한 건강부담은 지역사회인구집단의 특정 환경위험요인으로 인한 질병의 양적 정도(the amount of disease)를 단일의 단위지표(unit indicator)를 사용함으로써 다양한 환경위험요인, 인구집단, 그리고 시공간별 비교를 가능하게 한다(WHO, 2003a). 하지만 이번 연구는 수도권 PM의 노출로 인한 건강부담의 절대적인 값을 제시하기 보다는 건강부담의 일부분으로서 수도권 PM10 노출로 인한 사망부담의 수준 및 경향을 제시한다고 할 수 있다. 이번 연구에서 수도권 2005년부터 2010년까지 PM10 연중 노출로 인한 사망부담은 대체로 감소경향을 보였다. 이는 수도권 PM10 연중 노출의 감소경향과 매우 유사하였으며, 수도권 연중 사망 발생률에 의해서도 사망부담의 증감경향이 영향을 받고 있었다(그림 2).

최근 대기오염에 의한 건강영향에 대한 관심, 그리

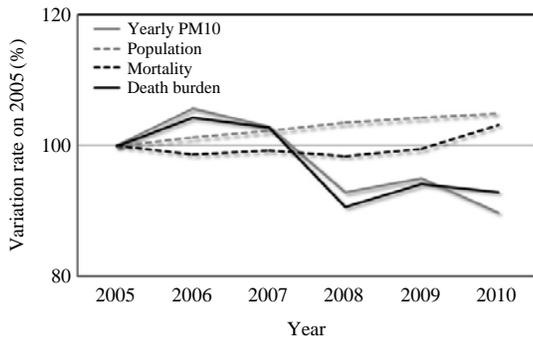


Fig. 2. Variation rate of yearly PM10, population and death burden in Seoul metropolitan region, 2005~2010.

고 이에 대한 대기관리 목표기준 수립 및 효과적인 환경개선 정책의 평가 등은 건강영향에 기반한 정책 근거를 요구하고 있다. 이는 일반적으로 대기질 관리 목표기준의 설정이 대기질에 의한 지역사회 건강부담 정도를 기준으로 수립되기 때문이다. 다른 한편으로 대기 관련 환경정책은 대기오염물질 노출로 인한 건강영향 정도에 지역사회의 노출수준 및 인구특성을 고려함으로써 지역사회의 현재 상황에 대한 판단을 요구한다. 이는 현재 수준의 대기질로 인한 건강부담에 기반하여 대기오염물질 배출량 관리, 노출관리, 건강보호 대책 관리, 그리고 지역사회 건강수준 관리 등 다양한 대기오염 관련 환경정책의 현황을 판단할 수 있기 때문이다.

결국 본 연구의 PM10 노출로 인한 사망부담 산출 결과는 이전의 PM10 노출로 인한 사망발생 관련성 연구결과들(Kim et al., 2004; Cho et al., 2003; Kwon et al., 2001)과는 달리 지역사회의 연도별 PM10 노출수준, 인구수, 그리고 사망 발생률 수준을 고려함으로써 지역사회의 다양한 환경위험요인으로 인한 사망부담과의 상대적 비교를 가능케 한다. 또한 Bae and Park (2009)의 미래 PM10 농도 관리 기준에 따른 초과사망자수 감소 정도를 추정한 결과와는 달리 현재 수준의 PM10 노출, 인구수, 사망 발생률 수준을 적용함으로써 현재 시점의 PM10으로 인한 사망부담을 산출하여 PM10 관련한 현재의 환경정책 평가 및 향후 제안될 수 있는 정책에의 정량적 근거로 활용될 수 있다.

지금까지 많은 환경보건 관련 연구들은 몇 개의

모수 및 입력 자료에 대한 통계적인 불확실성에 기반하여 연구결과의 정책적 활용에 유의하도록 하고 있다. 역시 PM 노출에 따른 건강부담 산출 연구도 많은 가정을 두어 제시되고 있다. 하지만 환경보건 관련 지식과 자료는 불완전하기에 건강부담 산출값에 대한 불확실성은 유의미할 수 있으며, 이러한 산출값을 활용한 환경정책 결정에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 따라서 환경보건 관련 연구결과의 정책적 활용에서는 이에 대한 체계적인 불확실성 평가가 필수적이라 할 수 있다.

본 연구는 수도권 PM10 연중 노출에 따른 사망부담 산출에 대한 불확실성을 3차원의 불확실성 매트릭스를 통해 평가했다. 하지만 이는 정성적인 평가로서 동일한 방법론을 적용하더라도 연구자들마다 불확실성의 확인, 수준, 그리고 원인에 대해 주관성을 가질 수 있다. 또한 이러한 불확실성 평가는 새로운 지식 또는 정보가 추가됨으로서 동일한 내용에 대해서도 평가 시기별로 그 결과가 달라질 수 있다. 그럼에도 불구하고 불확실성에 대한 체계적인 평가는 연구결과들의 정책적 활용을 위한 근거로의 관리 및 나아가 연구결과의 불확실성 감소까지도 이끌어 낼 수 있다(Knol et al., 2009; Walker et al., 2003). 이번 연구의 PM 노출로 인한 건강부담 산출과 관련된 불확실성은 그 종류별로 다음 3가지의 개선방향을 생각해 볼 수 있다.

첫째, PM 노출로 인한 건강부담 산출에 대한 문맥의 불확실성은 PM의 정의, PM 관련 질환의 정의 및 경계를 선택하는 것과 관련된다. 또한 건강부담 산출이라는 특정한 평가를 목적으로 하기 때문에 이러한 대부분의 정의들은 정량적인 평가와 조화를 이룰 수 없다. 따라서 문맥의 불확실성을 다루는 최선의 방법은 몇 가지 일반적인 가이드라인을 제시하는 것이며, 이러한 선택적 정의와 경계는 관련 이해당사자들과 논의함으로써 제시될 수 있겠다. 비록 이해당사자들과의 논의가 획기적인 불확실성을 줄일 수는 없지만, 하나 이상의 합리적인 정의를 만들어 일관되게 사용한다면 안정적인 평가의 기초를 마련할 수 있을 것이다.

둘째, PM 노출로 인한 건강부담 산출 관련한 모형구조의 불확실성은 대부분이 논리학적으로 불완전하거나 모순된 지식과 관련된다. 따라서 더 진전된 연구를 통해 모형구조의 이해력을 높임으로서 불확실

성을 줄일 수 있다. 비록 실제 적용에서는 모형구조에 대한 이론적 한계와 관련된 가용자료의 한계로 제한적일 수 있지만, 모형구조에 대한 가정과 함께 그들에 대한 평가 및 표본 자료로의 적용을 통해 불확실성의 범위를 통계적으로 표현할 수 있을 것이다.

마지막으로 PM 노출로 인한 건강부담 산출 관련 입력 자료의 불확실성은 산출 결과물의 정책적 활용목적에 대한 입력 자료의 품질평가와 관련된다. 이러한 입력 자료의 품질평가는 산출 결과물을 이용한 정책적 활용목적(즉 지역적 비교, 시계열적 비교, 정책적 효과 평가 등)의 달성 여부를 결정하는데 적합하지에 대한 통계적, 정성적 평가를 포함한다. 일반적으로 관련분야에 대한 전문지식을 바탕으로 입력 자료의 실제 값, 단위, 시공간적 해상도, 자료의 출처, 그리고 타 기관에서의 자료에 대한 평가 등이 기준으로 사용될 수 있을 것이다.

5. 결 론

과학적인 연구결과 자체가 관련된 환경정책으로 직접 연계되지는 않는다. 하지만 Oxman *et al.* (2009)은 연구를 통한 어떤 사실 또는 근거가 의사결정(즉 정책)에 이어지는 단계에 대한 설명에서 정책결정자가 근거를 인지, 해석, 그리고 결론내리는 과정을 통해 적절히 부합될 수 있음을 제시한 바 있다. 본 연구의 대기 중 PM10 노출로 인한 사망부담 산출결과와 정책결정자들이 이를 올바르게 인지, 해석, 그리고 결론 내림으로서 관련 환경정책에 활용될 수 있을 것이다. 그리고 PM10 노출로 인한 사망부담 산출결과에 대한 불확실성의 체계적인 평가는 이러한 과정에 도움을 줄 수 있을 것이다.

본 연구에서 수도권 2005년부터 2010년의 PM10 노출로 인한 사망부담은 PM10 노출수준에 영향을 받아 전체적으로 감소경향을 보였다. 비록 다양한 불확실성에 대해 더욱 상세한 조사와 관리가 요구되지만, 이번 연구는 PM10 노출로 인한 사망부담의 감소하는 결과로 2005년부터 시행된 제1차 수도권 대기환경개선 특별대책의 효과를 예상해 볼 수 있겠다. 또한 사망부담은 지역사회 사망 발생률에 영향을 받는 것으로 나타나, 향후 우리사회의 급격한 노령화와 이로 인한 사망 발생률 증가는 PM10 노출로 인한

사망부담의 증가를 예상해 볼 수 있겠다. 마지막으로 현재 수도권의 PM10 노출로 인한 사망부담 산출결과 및 이에 대한 불확실성들에 대한 특성을 감안한 해석과 결론은 향후에 있을 2015년부터의 제2차 수도권 대기환경개선 특별대책의 대기질에 따른 건강영향에 기반한 대기질 관리 기준 수립에 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

감사의 글

이 연구는 한국환경정책·평가연구원의 「대기오염 위해성 관리를 위한 정책방향 설정 연구(No. 2012-072)」의 연구결과 일부입니다.

참 고 문 헌

- Abt Associates Inc. (2008) BenMAP: Environmental Benefits and Mapping Analysis Program user's manual.
- Anderson, H.R., de L.A. Ponce, J.M. Bland, J.S. Bower, J. Emberlin, and D.P. Strachan (1998) Air pollution, pollens, and daily admissions for asthma in London 1987~1992, *Thorax.*, 53, 842-848.
- Atkinson, R.W., H.R. Anderson, J. Sunver, J. Ayres, M. Bacchini, J.M. Vonk, A. Boumghar, F. Forastiere, B. Forsberg, G. Touloumi, J. Schwartz, and K. Katsouyanni (2001) Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. *Air pollution and health: a European approach, Am. J. Respir. Crit. Care. Med.*, 164, 1860-1866.
- Bae, H.J. and J. Park (2009) Health benefits of improving air quality in the rapidly aging Korean society, *Sci. Total. Environ.*, 407, 5971-5977.
- Bae, H.J., J.Y. Shin, C.K. Park, K. Jung, S.Y. Lee, M.Y. Kim, and J. Park (2010) Improving of Atmospheric PM2.5 Levels and Related Premature Deaths in Seoul, Korea, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 26, 10-20. (in Korean with English abstract)
- Bae, H.J., M. Kim, A.K. Lee, and J. Park (2009) Acute Effects of PM10 on Asthma Hospitalization Among Children and Benefit Analysis at Four Major Cities in Korea, *J. Env. Hlth. Sci.*, 35, 1-10. (in Korean with English abstract)
- Bell, M.L., K. Ebisu, and K. Belanger (2007) Ambient air pol-

- lution and low birth weight in Connecticut and Massachusetts, *Environ. Health Perspect.*, 115, 1118-1124.
- Bobak, M. and D.A. Leon (1999) The effect of air pollution on infant mortality appears specific for respiratory causes in the postneonatal period, *Epidemiology*, 10, 666-670.
- Cho, Y.S., J.T. Lee, Y.S. Kim, S.C. Hong, H. Kim, E.H. Ha, H.S. Park, and B.E. Lee (2003) A time-series study of ambient air pollution in relation to daily mortality in Seoul 1998-2001, *Korean J. of Atmos. Environ.*, 19, 625-637. (in Korean with English abstract)
- Davidson, K., A. Hallberg, D. McCubbin, and B. Hubbell (2007) Analysis of PM_{2.5} using the Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (BenMAP), *J. Toxicol. Environ. Health*, 32, 571-577.
- Dockery, D.W., C.A. Pope, X. Xu, J.D. Spengler, J.H. Ware, M.E. Fay, B.G. Ferris, and F.E. Speizer (1993) An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities, *N. Engl. J. Med.*, 329, 1753-1759.
- Dominici, F., A. McDermott, M. Daniels, S.L. Zeger, and J.M. Samet (2005) Revised analyses of the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study: mortality among residents of 90 cities, *J. Toxicol. Environ. Health A.*, 68, 1071-1092.
- Dominici, F., A. McDermott, S.L. Zeger, and J.M. Samet (2002) On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health, *Am. J. Epidemiol.*, 156, 193-203.
- Dominici, F., R.D. Peng, M.L. Bell, L. Pham, A. McDermott, S.L. Zeger, and J.M. Samet (2006) Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases, *JAMA.*, 295, 1127-1134.
- Eftim, S.E., J.M. Samet, H. Janes, A. McDermott, and F. Dominici (2008) Fine particulate matter and mortality: a comparison of the six cities and American Cancer Society cohorts with a medicare cohort, *Epidemiology*, 19, 209-216.
- Franklin, M., A. Zeka, and J. Schwartz (2007) Association between PM_{2.5} and all-cause and specific-cause mortality in 27 US communities, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 17, 279-287.
- Gwynn, R.C., R.T. Burnett, and G.D. Thurston (2000) A time-series analysis of acidic particulate matter and daily mortality and morbidity in the Buffalo, New York, region, *Environ. Health Perspect.*, 108, 125-133.
- Katsouyanni, K., G. Toulomi, C. Spix, J. Schwartz, F. Balducci, S. Medina, G. Rossi, B. Wojtyniak, J. Sunyer, L. Bacharova, J.P. Schouten, A. Ponka, and H.R. Anderson (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, *BMJ.*, 314, 1658-1663.
- Kim, H., J.T. Lee, Y.C. Hong, S.M. Yi, and Y. Kim (2004) Evaluating the effect of daily PM₁₀ variation on mortality, *Inhal. Toxicol.*, 16 (suppl 1): 55-58.
- Knol, A.B., A.C. Petersen, J.P. van der Sluijs, and E. Lebret (2009) Dealing with uncertainties in environmental burden of disease assessment, *Environ. Health*, 8, 21.
- Kruijshaar, M.E., J.J. Barendregt, N. Hoeymans (2002) The use of models in the estimation of disease epidemiology, *Bull. World Health Organ.*, 80, 622-628.
- Kunzli, N., S. Medina, R. Kaiser, P. Quenel, Jr Horak, and M. Studnicka (2001) Assessment of Deaths Attributable to Air Pollution: Should We Use Risk Estimates based on Time Series or on Cohort Studies? *Am. J. Epidemiol.*, 153, 1050-1058.
- Kwon, H.J., S.H. Cho, F. Nyberg, and G. Pershagen (2001) Effects of ambient air pollution on daily mortality in a cohort of patients with congestive heart failure, *Epidemiology*, 12, 413-419.
- Lee, J.T., D. Shin, and Y. Chung (1999) Air Pollution and Daily Mortality in Seoul and Ulsan, Korea, *Environ. Health Perspect.*, 107, 149-154.
- 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.
- Lin, M., D.M. Stieb, and Y. Chen (2005) Coarse particulate matter and hospitalization for respiratory infections in children younger than 15 years in Toronto: a case-crossover analysis, *Pediatrics*, 116, 235-240.
- Metzger, K.B., P.E. Tolbert, M. Klein, J.L. Peel, W.D. Flanders, K. Todd, J.A. Mulholland, P.B. Ryan, and H. Frumkin (2004) Ambient air pollution and cardiovascular emergency department visits, *Epidemiology* 15, 46-56.
- Pearce, N. (1999) Epidemiology as a population science, *International Journal of Epidemiology*, 28, S1015-S1018.
- Peng, R.D., F. Dominici, R. Pastor-Barrisuso, 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.
- Pope, C.A., J.G. Watson, J.L. Mauderly, D.L. Costa, R.E.

- Wyzga, S. Vedal, G.M. Hidy, S.L. Altshuler, D. Marrack, J.M. Heuss, G.T. Wolff, C.A. 3rd Pope, and D.W. Dockery (2006) Health Effects of Fine Particulate Air Pollution: Lines that Connect, *J. Air Waste Manag. Assoc.*, 56, 709-742.
- Ren, C. and S. Tong (2006) Temperature modified the health effects of particulate matter in Brisbane, Australia, *Int. J. Biometeorol.*, 51, 87-96.
- Roberts, S. (2004) Interactions between particulate air pollution and temperature in air pollution mortality time series studies, *Environ. Res.*, 96, 328-337
- Samet, J., J. Schwartz, and H.H. Suh (2001) Fine particulate air pollution and mortality in 20 US cities, *N. Engl. J. Med.*, 344, 1253-1254.
- Sarnat, J.A., W.E. Wilson, M. Strand, J. Brook, R. Wyzgr, and T. Lumley (2007) Panel discussion review: session one - exposure assessment and related errors in air pollution epidemiologic studies, *J. Expo. Sci. Environ. Epidemiol.*, 17, s75-s82.
- Schwartz, J. (1999) Air pollution and hospital admissions for heart disease in eight US counties, *Epidemiology*, 10, 17-22.
- Schwartz, J. (2000) Assessing confounding, effect modification, and threshold in the association between ambient particles and daily deaths, *Environ Health Perspect.*, 108, 563-568.
- Schwartz, J. (2004) Air pollution and children's health, *Pediatrics*, 113, 1037-1043.
- Schwartz, J. and A. Zanobetti (2000) Using meta-smoothing to estimate dose-response trends across multiple studies, with application to air pollution and daily death, *Epidemiology*, 11, 666-672.
- Seo, J.H., E.H. Ha, B.E. Lee, H.S. Park, H. Kim, Y.C. Hong, and O.H. Yi (2006) The effect of PM10 on respiratory-related admission in Seoul, *Korean J. Atmos. Environ.*, 22, 564-573. (in Korean with English abstract)
- Stafoggia, M., J. Schwartz, F. Forastiere, C.A. Perucci, and SISTI Group (2008) Does temperature modify the association between air pollution and mortality? A multicity case-crossover analysis in Italy, *Am. J. Epidemiol.*, 167, 1476-1485.
- UK Department of Health (1998) Quantification of the effects of air pollution on health in the United Kingdom.
- Walker, W.E., P. Harremoes, J. Rotmans, J.P. van der Sluijs, M.B.A. van Asselt, P. Janssen, and M.P. Krayner von Krauss (2003) Defining Uncertainty: A conceptual basis for uncertainty management in model-based decision support, *Integrated Assessment*, 4, 5-17.
- Wilson, A.M., C.P. Wake, T. Kelly, and J.C. Salloway (2005) Air pollution, weather, and respiratory emergency room visits in two northern New England cities: an ecological time series study, *Environ. Res.*, 97, 312-321.
- World Health Organization (2003a) Environmental Burden of Disease Series, No. I Introduction and methods: assessing the environmental burden of disease at national and local levels.
- World Health Organization (2003b) Health aspects of air pollution with particulate matter, ozone, and nitrogen dioxide.
- World Health Organization (2004) Health Aspects of Air Pollution-Results from the WHO project "Systematic Review of Health Aspects of Air Pollution in Europe".
- World Health Organization European center for environment and health (2000) Quantification of the Health Effects of Exposure to Air Pollution.
- Yoon, C.S., N.W. Paik, J.H. Kim (2003) Fume generation and content of total chromium and hexavalent chromium in flux-cored arc welding, *Ann. Occup. Hyg.*, 47(8), 671-680.
- Zanobetti, A., J. Schwartz, and D.W. Dockery (2000) Airborne particles are a risk factor for hospital admissions for heart and lung disease, *Environ. Health Perspect.*, 108, 1071-1077.
- Zeger, S.L., F. Dominici, A. McDermott, and J.M. Samet (2008) Mortality in the medicare population and chronic exposure to fine particulate air pollution in urban centers (2000-2005), *Environ. Health Perspect.*, 116, 1614-1619.