

서울 대기 중 미세 먼지 노출로 인한 위해도에 근거한 우선 관리 지역 선정 -이론적 사망 위해도 및 손실비용을 근거로-

김 예 신, 이 용 진, 신 동 천**

연세대학교 환경공해연구소, *연세대학교 의과대학 예방의학교실

Selection of Priority Areas Based on Human and Economic Risk from Exposure to Fine Particles in Seoul

Ye-Shin Kim, Yong-Jin Lee and Dong-Chun Shin**

Institute for Environmental Research, Yonsei University (IERY)

**Department of Preventive Medicine and Public Health, College of Medicine, Yonsei University*

ABSTRACT

It is important to select a risk based priority area for environmental policy formation and decision-making. We estimated the health risks and associated damage costs from exposure to fine particles and assigned priority areas for twenty-five districts in Seoul. In order to estimate the theoretical mortality incidence of the health risk, baseline risks were estimated from mortality rates in two low level areas of fine particles, Seocho Gu and Cheju city. To estimate the damage cost from the risk estimates, we investigated and estimated the willingness to pay (WTP) for specific risk reduction. We assumed two different locations as the reference area, Cheju city as Scenario I and Seocho gu as Scenario II. From the results, the five districts, Kwangjin, Chungnang, Kangbuk, Nowon, and Kangnam, ranked high in the categories of both health risk and economic risk. Damage costs were over twenty billion won in each of these districts. As there are uncertainties in these results, the parameter values such as $PM_{2.5}$ level, dose-response slope factor, baseline risk, exposure population and WTP should be continuously validated and refined.

Key words : fine particle ($PM_{2.5}$), mortality risk, damage cost, baseline risk, risk_based priority area

서 론

20세기 중반에 발생한 여러 가지 대기오염 사건으로 인한 사망률과 유병률의 현저한 증가는 중공업과 가정에서 소비되는 화석연료로 인한 대기오

염이 공중보건에 얼마나 큰 위해가 되는지를 일깨워 주었다(Brimblecombe, 2001). 1979년 Holland와 그의 동료는 오염물질 배출에 대한 규제만 잘한다면 대기오염이 인간의 건강에 큰 위협요소로 작용하지 않을 것이라는 결론을 내렸다. 그러나 1990년대 초반부터, 다양한 역학연구의 결과에서 이러한 결론에 이의를 제기하기 시작하였고, 미국이나 유럽과 같이 대기 오염 수준이 낮은 국가에서조차도

* To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-361-5361, E-mail: dshin5@yumc.yonsei.ac.kr

대기오염과 사망률 및 유병율 증가사이의 유의한 관련성을 보고하였다(Pope and Dockery, 1994). 이러한 문제들이 제기되면서, 대기오염의 지표물질이라 할 수 있는 미세 먼지와 만성 사망간의 관련성에 대한 역학 연구들이 활발히 진행되어져 왔다.

미세 먼지와 만성 사망간의 대표적 연구로서, 두 가지 전향적 코호트(cohort) 연구인 Harvard Six Cities Study (Dockery *et al.*, 1993)와 American Cancer Society (ACS) Study (Pope *et al.*, 1995)에서는 미세 먼지(PM_{2.5})의 수준이 높은 지역에 거주하는 사람들의 장기간 평균 사망률은 흡연 유무나 병력(病歷) 등과 같이 다른 위해 요인의 영향을 고려하더라도 보통 17~26% 더 높은 것으로 조사되었다. 또한, Pope 등(2002)의 최근 연구에 따르면, 미세 먼지의 농도가 10 µg/m³ 증가할 경우, 전체 사망(사망의 외인은 제외)은 약 4%, 심폐 질환으로 인한 사망은 약 6%, 폐암으로 인한 사망은 약 8% 증가시키는 것으로 보고하면서, 미세먼지와 만성 사망과의 관련성을 다시 한번 입증하였다.

특히, ACS 연구(Pope *et al.*, 1995)와 그 연구를 재분석한 연구(Krewski *et al.*, 2000)를 비교한 결과, 농도가 20 µg/m³ 증가할 때, 미세 먼지(PM_{2.5})의 상대 위해도(relative risk)는 1.14로 조대 입자(PM₁₅)의 상대 위해도 1.04에 비하여 통계적으로 유의하게 사망 위해도가 높은 것으로 나타났다(US EPA, 2001). 또한 Pope 등(2002)의 연구에서도 미세 먼지에 대한 위해성이 PM₁₀보다 높은 것을 보고한 바 있다.

선진 각국의 경우는 장기적 계획을 통해 미세 먼지에 대한 연구 및 정책에 대한 많은 비용을 투자하여 위해성 평가 및 관리에 역점을 두고 있다. 특히 미세 먼지로 인한 모니터링, 위해성 평가, 사회적 비용 산출 및 비용-편익 분석을 통해 규제기준을 설정하거나 기존의 규제기준에 대한 적절성을 판단하고, 규제 기준을 달성하기 위한 가장 비용-효과적인 공학적 처리 대안을 모색하는 등 계속적인 노력 중이다(US EPA, 2001; EC, 1997).

우리나라의 경우 미세 먼지에 대한 위해성에 대해서는 인식하고 있지만, 관리를 위한 체계적인 준비가 되어있지 않다. 위해도 관리를 위해서 다양한 위해도 지표(인체, 생태, 인지 또는 경제 위해도 등)에 근거한 우선적으로 비용을 투자할 지역에 대한 선정이 필요하고(김예신 등, 2002), 우선 순위

지역에 대한 위해도 감소를 위해 원인 배출원을 규명하고 공학적 처리를 통해 배출원 차단 또는 억제 또는 규제기준 강화 등과 같은 일련의 작업들이 필요하다.

이 중 우선 순위 지역 선정을 위해서는 미세 먼지에 위해성 평가나 경제성 평가를 위한 많은 자료들이 필요하다. 즉, 인체 위해성 평가를 위해서는 대표성 있는 오염도 자료, 미세먼지와 인체영향간의 용량-반응 평가 자료 등이 필요하고, 손실 비용 평가를 위해서는 인체 위해도, 위해도 감소를 위한 지불의사금액 등에 대한 기본 자료들이 필요하다(김예신 등, 2003). 여기서 특히 지불의사금액을 도출하기 위해서는 시간과 비용이 소요되고, 방법론도 고도의 통계적 기법을 요한다.

손실 비용과 같은 경제성 평가는 우선 순위 선정에 하나의 지표로서도 활용이 가능하지만, 실제 감소 전략에 투자 비용에 대한 규모를 가늠할 수 있는 정보를 제공한다. 더 나아가 비용-편익 분석에서도 정보가 활용되고 결국 이는 환경 오염의 최적 감소 전략(optimal reduction strategy) 선택이나 최적 관리 수준(optimal control level)의 결정, 특정 전략에 대한 효율성 평가, 투자 결정의 지침, 가격 정책 설계 등에 아주 귀중한 자료로 활용될 수 있다(US EPA, 2000).

그러나 우리나라는 현재 오염수준에 대한 평가는 PM₁₀을 중심으로 이루어지고 있어, 앞으로 미세 먼지(PM_{2.5})에 대한 국가 수준의 모니터링을 결과들을 동시에 생산해내는 것이 중요한 과제중의 하나이다. 또한, 앞에서 언급한 것처럼 선진국에서는 많은 비용을 들여, 미세먼지와 사망률 증가사이의 관련성을 규명하기 위해 장기간의 역학연구에 투자하고 있다. 반면, 우리나라의 경우는 미세먼지로 인한 급성 영향에 대한 연구이외에 만성 영향에 대한 연구들이 여러 가지 제약조건으로 인해 이루어지지 못하고 있지만, 장기적 코호트를 구성하여 환경 오염과 만성 사망에 대한 용량-반응 상관관계를 규명하거나 국내에 적용이 가능한 또는 전문가적 합의를 통한 용량-반응 함수를 도출하는 작업이 필요하다.

그러나 위와 같은 제약 조건으로 인하여 인체 위해성이 높은 미세 먼지에 대한 관리를 위해 많은 시간을 요하는 역학적 결과를 기다리고만 있을 수는 없다. 따라서, 현재 가용한 정보를 가지고 위해

성을 평가하여, 위해도에 대한 수치적인 정보를 제공하고 정책의 우선 순위를 정하기 위한 중간 결과물을 도출하는 것이 중요하다고 판단된다.

또한 미세먼지에 대한 위해성 평가나 경제성 평가에 대한 방법론을 개선·보완하여, 도출된 결과에 대한 불확실성을 감소시키려는 노력이 필요하고, 우선 순위가 높은 지역에 대한 위해성 관리 방안이 필요하다.

따라서 이 연구에서는 서울 지역을 모델로 하여 미세먼지에 대한 위해성을 평가하고 손실 비용을 추정하여, 이들 두 가지 지표에 근거하여 우선적인 관리가 필요한 지역을 선정하고자 한다.

재료 및 방법

1. 미세먼지로 인한 인체 위해도 추정

미세 먼지로 인한 이론적 사망수를 추정하기 위

Table 1. PM₁₀ and PM_{2.5} levels, number of deaths and exposure population in each district

District (Gu)	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	Exposure population
Jongro	84.7	52.5	103,898
Chung	70.9	44.0	71,197
Yongsan	72.4	44.9	132,652
Sungdong	80.0	49.6	179,919
Kwangjin	81.3	50.4	197,092
Dongdaemun	70.9	43.9	255,853
Chungnang	80.8	50.1	198,804
Sungbuk	66.7	41.3	252,789
Kangbuk	84.9	52.6	196,827
Dobong	70.0	43.4	204,920
Nowon	74.7	46.3	270,632
Unpyong	60.6	37.6	204,391
Seodaemun	61.2	38.0	212,724
Mapo	74.1	45.9	219,799
Yangchun	73.1	45.3	264,419
Kangseo	66.1	41.0	285,959
Guro	60.3	37.4	254,976
Kumchon	62.4	38.7	240,960
Yongdungpo	66.1	41.0	325,485
Dongjak	58.5	36.3	250,346
Kwanak	69.4	43.1	209,100
Secho	58.0	36.0	343,027
Kangnam	82.6	51.2	198,784
Songpa	60.4	37.4	188,616
Kangdong	77.3	48.0	138,200

해서, PM_{2.5} 농도 자료를 이용해야 하나, 서울지역에서 대표성 있는 실측 자료를 얻기가 어려웠으므로, 자동 측정망에서 제공되는 PM₁₀ 자료 (환경부, 2000, 2001, 2002)를 이용하였고, 이 농도에 미세먼지에 대한 분율을 고려하여 PM_{2.5}의 농도로 가정하였다. 이 농도에 노출 인구수, 역학연구에서 도출된 용량-반응 함수 기율기와 바탕 위해도를 고려하여 위해도를 추정하였다.

1) 노출 정보 분석

(1) 대상 지역 및 PM₁₀ 오염도 자료

미세 먼지로 인한 인체 영향을 평가하기 위하여, 연구 대상 지역은 자동 측정망을 통해 세부 지역에 대한 정보가 많고, 자료 입수가 용이한 서울을 대상으로 하였으며, 세부 지역은 행정구역상의 25개 구(區)로 분류하였다. 보통 각 구에는 1개 동에 자동 측정망이 있으며, 1개 동의 3개년간 연평균 오염도(1999년, 2000년, 2001년)를 해당 구의 대표 농도(Table 1)로 간주하였다.

(2) PM₁₀중 PM_{2.5}의 분율

PM₁₀ 농도로부터 미세 먼지(PM_{2.5})의 농도를 추정하기 위해서, 국내 연구결과(권호장 등, 2001)로부터 도출된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 분율을 적용하였다. 국내에서 측정된 PM_{2.5}와 PM₁₀의 분율은 약 0.62로 국외 대도시지역의 비율이 비슷하였다(Table 2).

(3) PM_{2.5}의 오염도 및 노출 인구수

앞에서 PM₁₀의 농도에 PM_{2.5}/PM₁₀의 분율을 적용한 결과, PM_{2.5}의 농도는 Table 1과 같다. 또한 이

Table 2. Ratio of PM_{2.5} to PM₁₀

Area	PM ₁₀ (µg/m ³)	PM _{2.5} (µg/m ³)	PM _{2.5} /PM ₁₀	PM _{2.5-10} /PM ₁₀
Seoul*	93	57	0.61	0.39
	124	71	0.57	0.43
	111	76	0.68	0.32
	Average		0.62	0.38
Detroit, MA [†]	31	18	0.58	0.42
Philadelphia, PA [†]	24	17	0.72	0.28
Atlanta, GA [†]	31	20	0.65	0.35
Pittsburgh, PA [†]	Not reported	Not reported	0.67	0.33
8 Canadian cities [†]	25	13	0.51	0.49
Mexico city [†]	44	27	0.61	0.39
Santiago [†]	110	64	0.58	0.42
	Average		0.62	0.38

*source: Kwon *et al.* (2002) †source: US EPA (2001)

때 노출 인구수는 행정 구역상의 구에 포함되는 30세 이상의 모든 인구수(통계청, 2002)로 가정하였다. 여기서 30세 이상의 인구만을 고려한 것은 미세먼지로 인한 만성 사망을 주요 영향으로 규정하였기 때문이다.

2) 위험도 추정

(1) 바탕 위험도 (baseline risk) 추정

미세 먼지로 인한 이론적 사망 위험도를 추정하기 위해서는 우선, 미세먼지로 인해 영향이 없을 것으로 기대되는 최저 농도에서의 사망율을 조사하여야 한다. 보통 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 에서의 사망율을 바탕 위험도로 간주하나, 우리나라에서는 이들에 대한 정보가 없기 때문에, 두 가지를 가정하였다. 첫 번째 가정 (Scenarios I)은 서울 이외의 지역인 제주도의 제주시의 평균농도(E_0)와 이 때 사망율을 바탕 위험도(P_0)로 간주하고, 두 번째 가정 (Scenarios II)은 서울지역 내에서 가장 낮은 농도(E_0) 지역, 서초구의 사망율을 바탕 위험도(P_0)로 간주하였다(그림 1).

(2) 사망 위험도 추정

현재 미세먼지의 노출 수준(E)에서 사망수(D)를 추정하기 위하여, 바탕수준(E_0)에서의 사망률(P_0)을 고려한 후, 바탕 수준 이상에서 미세 먼지 농도와 용량-반응 함수 기울기를 고려하였다(Fig. 1). 이 때, D_{10} (미세 먼지 농도가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하였을 때, 사망수의 증분)을 정확히 정의하여야 한다. 여기서 D_{10} 을 구하기 위해서 필요한 용량-반응 함수의 기울기 (slope, β 또는 상대 위험도, Relative Risk)는 최근 Pope 등(2002)이 보고한 역학 연구 결과를 인용하였으며, 미세 먼지 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 당 전체 사망은 4% (RR, 1.04), 폐암사망은 8% (RR, 1.08)를 적용하였다.

바탕수준(E_0)에서의 PM_{10} 농도와 전체 사망률($P_{0_all-cause mortality}$)은 제주도가 각각 $33.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 3,220명(백만명당)이었고, 서울 서초구가 각각 $58.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 5,074명(백만명당)이었다. 폐암으로 인한 사망률($P_{0_lung cancer mortality}$)은 제주도가 150명(백만명당)이었고, 서울 서초구가 210명(백만명당)이었다. 이 때, 지역의 사망자수(P_0)는 30세 이상만을 고려하였고, 통계청(2000)의 인구동태 자료를 사용하였다.

이들 자료들을 근거로 바탕 수준에서의 농도와

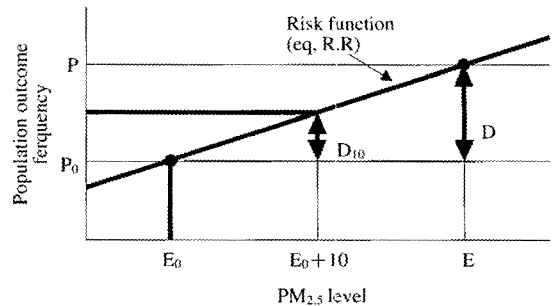


Fig. 1. Model to derive theoretical mortality risk (Source; Kunzli et al., 2000).

위험도, $\text{PM}_{2.5}$ 가 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 경우의 사망 기여발생률(D_{10})과 해당 지역에서의 오염도를 이용하여, 미세 먼지로 인한 만성 사망수를 추정하였다(Kunzli et al., 2000).

$$R_{ij} = (P_{ij} - P_{0ij}) \times EP \div 1,000,000 \quad \text{EQUATION 1}$$

where, R_{ij} = 참고지역 i에서 endpoint j에 대한 사망 수 추정치

$$P_{ij} = \text{PM}_{10} \text{ 농도} \times 0.62 (\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10} \text{ 분율}) \times D_{10j} \times 0.1 + \{P_{0ij} - (E_0 \times D_{10j} \times 0.1)\}$$

$$D_{10j} = (RR - 1) \times P_{0ij}$$

$$RR = \text{relative risk (all-cause; 1.04, lung cancer; 1.08)}$$

$$P_{0ij} = \text{바탕농도가 } E_0 \text{인 참고 지역 i에서 endpoint j에 대한 백만명당 사망률}$$

$$EP = \text{노출 인구수}$$

3) 불확실성 분석

이론적 사망수를 계산하는데 있어, 적용한 모수의 값에 불확실성이 존재하므로, 이러한 불확실성을 감안하기 위해서 Monte-Carlo simulation을 실행하였다. 여기서 불확실성이 존재하는 모수로서는 PM_{10} 오염도, PM_{10} 중 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 분율, 바탕 위험도, 용량-반응 기울기, 노출 인구수이다. 그러나 여기서 자료의 확률분포를 감안할 수 있는 모수는 PM_{10} 오염도, PM_{10} 중 $\text{PM}_{2.5}$ 에 대한 분율, 용량-반응 기울기 등이다. 이들 모수(input parameter)는 표 3에 제시한 확률 분포를 가정하여, Equation 1에 따라 최종 위험도(output parameter) 추정을 하였다. 그 외 나머지 모수 값은 하나의 값(point value)을

입력하였다.

2. 미세먼지로 인한 손실 비용 추정

미세 먼지로 인한 사망에 따른 손실 비용을 추정하기 위해서는 지불의사금액 (Willingness to Pay; 이하 WTP), ΔR (감소 하고자하는 위해도 크기), 통계적 생명가치액 (Value of Statistical Life: 이하 VSL)이라는 개별 요소들이 필요하다. 여기서 WTP 만 추정을 하면 VSL을 계산할 수 있다. WTP는 개인 면접을 통해 정보를 입수하게 되고, 소득과 같은 여러 가지 변수에 의해 영향을 받게 된다. 따라서 WTP 추정 모형내에는 이러한 변수들을 포함하고 있어야 하므로, 이들 영향 변수들을 설문에 포함하여 조사하였다.

1) 지불의사금액 추정

대기오염으로 인한 10년간 5/1,000 (년간 5/10,000)에 해당하는 위해도 감소에 대한 지불의사금액을 추정하기 위하여, 서울 시민 200명을 대상으로 개인면접을 통한 설문조사를 실시하였다. 설문지 구성은 총 6개 영역으로 지불 의사금액을 묻는 부분외에 5개 세부 영역으로 분류하였다 (Part A: 건강상태 및 삶의 질 조사, Part B: 위해도 인식, Part C: 확률 및 위해도에 대한 이해도, Part D: 소득 및 지출비용, Part E: 지불의사금액, Part F: 기타 정보).

여기서, 지불의사금액 (WTP)을 이끌어 내기 위하여 가상 가치 평가법 (contingent valuation method)을 이용하였다. 이 방법에서 초기 제시 금액 설정은 투표 모형에서 발생할 수 있는 출발점 편향 (starting point bias)를 최소화하기 위해서 예비조사를 실시하여 10,000원, 20,000원, 40,000원과 60,000원으로 결정하였다. 그리고 지불 의사 금액을 유도하기 위하여 2단계 양분선택법 (double-bounded dichotomous choice)을 이용하였으며, 지불 수단 (vehicle payment)으로는 기부금을 선택하였다.

지불의사금액을 추정하기 위한 기본 모델로는 lower-bounded Turnbull method, Weibull model, Spike model을 사용하였다. 이들 추정모형에 설명 변수로서 소득, 성, 연령, 질병 상태, 주택 소유 여부, 삶의 질, 인식도 (환경오염에 대한 일반적인 인식도, 환경오염으로 인한 사회적 가치에 대한 영향), 확률 및 위해도에 대한 검사 점수를 포함시켜 WTP를 추정하였다 (김예신 등, 2003).

2) 손실 비용 추정

건강 손실 비용은 사망 (mortality)으로 인한 손실 비용과 질병 이환 (morbidity)으로 인한 손실비용으로 분류할 수 있으나, 본 연구에서는 사망 손실비용만을 추정하였다.

통계적 생명가치액은 각각의 환경문제로 인한 위해도 감소를 위한 지불의사금액 (3가지 모델에 의한 평균값의 추정치)을 위해도 감소분 (ΔR ; 이 연구에서는 5/10,000)으로 나누어서 산출하였다 (equation 2).

건강 손실 비용은 각각의 환경문제에 해당하는 통계적 생명 가치액에 인체 위해도 평가에서 추정된 이론적 사망수를 곱하여 산출하였다 (equation 3).

$$\therefore VSL = WTP / \Delta R, \text{ Change in probability of death} \quad \text{EQUATION 2}$$

$$\therefore \text{Damage cost (W)} = VSL \times \text{Theoretical Mortality Incidence (from equation 1)} \quad \text{EQUATION 3}$$

3) 불확실성 분석

건강 손실 비용에 대한 불확실성을 감안하기 위하여, 1.-3)과 동일한 방법을 적용하였고, 표 3에서 제시한 변수를 포함하여, 손실비용 추정을 위한 주요 변수인 WTP 분포 (Weibull 분포)를 추가하였다.

3. 우선 순위 지역 선정

각각의 대상지역에 대해 추정된 인체 및 손실 비용에 대한 값들 중 50 percentile값을 취하였다. 이들 값들로 이루어진 이론적 사망수 및 손실비용에 대한 분포에서 각각 20, 40, 60, 80 percentile값에 경계 값으로 하여 5가지 범주로 분류하였고, 상대적인 우선 순위를 위해서 각 지역에 해당하는 위

Table 3. Probability distribution of input parameter for uncertainty analysis

Parameter	Distribution	Value
PM ₁₀ levels	Log-normal	mean \pm S.D.*
PM _{2.5} /PM ₁₀ ratio	Uniform distribution	0.57 ~ 0.68 ¹⁾
Slope of dose-response function	Uniform distribution	
All cause		1.01 ~ 1.08 ²⁾
Lung cancer		1.01 ~ 1.16 ³⁾

* mean and standard deviation of PM₁₀ in each strict

¹⁾ range of PM_{2.5}/PM₁₀ ratio (Kwon *et al.*, 2002)

^{2),3)} 95% confidence interval of relative risk (Pope *et al.*, 2002)

Table 4. Criteria for categorical allocation

Category	Theoretical mortality incidence	Damage cost (billion₩)
High	60~	20~
Medium-High	40~60	15~20
Medium	30~40	10~15
Low-Medium	10~30	5~10
Low	~10	~5

해도 및 손실 비용의 50 percentile값들을 각 범주에 할당하였다(표 4).

결과 및 고찰

1. 인체 위해도 추정 결과

25개구 각각에서 사망수를 추정하고 각 구별 사망수를 합산하여, 서울 지역의 미세 먼지 오염으로 인한 이론적 사망수를 추정한 결과, 바탕 수준에서의 위해도를 제주도도 한 경우, 전체 사망자는 연간 약 1,789명, 폐암 사망자는 약 156명으로 추정되었으며, 서초구를 바탕 수준에서의 위해도로 한 경우, 전체 사망자는 연간 약 885명, 폐암 사망자는 약 71명으로 추정되었다(Table 5, 7). 또한 선행 연구(김예신 등, 2003)에서 바탕 수준을 고려하지 않고, 영점에서 용량-반응 함수가 linear하다고 가정하고 추정된 전체 사망자는 6,212명이며, 폐암 사망자는 350명으로 바탕 수준의 위해도를 고려하고 추정하였을 때 보다 과대 평가 되었다. 따라서 위해도 수치에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 우리나라 고유의 용량-반응 관계를 규명하기 위한 장기간의 역학 연구 뿐만 아니라 바탕 수준에서의 위해도(P_0)를 결정하는 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

각 구의 평균 농도를 적용하여 추정된 이론적 사망수의 불확실성을 고려하여 결과치를 범주화한 결과(Table 6), 시나리오 I, II에서 공히 광진구, 중랑구, 강북구, 노원구, 강남구가 우선 순위가 높은 지역(high)으로 선택되었고, 그 다음으로 보통-높음(medium-high)으로 분류된 지역은 종로구, 성동구, 동대문구, 마포구, 양천구로 분류되어 우선 관리가 필요한 지역으로 판단된다. 여기서 낮음(low)은 상대적인 순위가 낮음을 의미한다.

Table 5. All-cause mortality and lung cancer mortality estimated from each scenario in Seoul

Scenario	Estimated attributable number of cases (per year)	
	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)
Scenario I (Reference area; Cheju)	1,789 (527~3,244)	156 (32~298)
Scenario II (Reference area; Seocho)	885 (143~2,040)	71 (10~170)
Previous study	6,212 (3,913~9,176)	350 (221~519)

Table 6. Categorical classification by estimated attributable number of cases in the districts

Category*	Estimates per year	Scenario I	Scenario II
High	60~	18 other districts except 7 district allocated by 'Medium-High'	Kwangjin, Chungnang, Kangbuk, Nowon, Kangnam
Medium-High	40~60	Jongro, Yongsan, Unpyong, Seodaemun, Dongjak, Songpa, Kangdong	Jongro, Sungdong, Dongdaemun, Mapo, Yangchun
Medium	30~40		Dobong, Kangseo, Yongdungpo, Kwanak, Kangdong
Low-Medium	10~30		Chung, Yongsan, Sungbuk, Seodaemoun, Guro, Kumchon
Low	~10		Unpyong, Dongjak, Seocho, Songpa

(persons)* 20, 40, 60, 80 percentile from empirical distribution of estimated attributable number of cases in each districts

결국 앞서 추정된 위해도는 PM_{10} 오염도, PM_{10} 중 $PM_{2.5}$ 에 대한 분율, 바탕 위해도, 용량-반응 기울기, 노출 인구수에 영향을 받는다. 따라서 위해도에 대한 불확실성을 감소시키기 위해서는 이들 변수들에 대한 모수값에 대한 불확실성을 줄여나가야 한다. 이미 언급한 것처럼 $PM_{2.5}$ 에 대한 국가적 규모의 모니터링 사업을 통해 오염 분포를 규명하는 것이 우선적으로 중요하다. 이 연구에서는 PM_{10} 모니터링 자료에 PM_{10} 중 $PM_{2.5}$ 에 대한 분율을 적용하여 오염도를 가정하였기 때문에 불확실성이

Table 7. All-cause mortality and lung cancer mortality estimated from each scenario in the district (persons per year)

District	Scenario I (Cheju)		Scenario II (Seocho)	
	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)
Jongro	48.8 (8.1~120.7)	4.2 (0.5~10.8)	39.8 (12.2~137.1)	3.2 (0.8~11.1)
Chung	24.4 (0.2~71.2)	2.2 (0.1~6.7)	12.8 (2.2~79.7)	1.0 (0.1~6.3)
Yongsan	48.3 (1.0~138.0)	4.1 (0.1~12.5)	26.6 (5.5~145.9)	2.2 (0.4~12.6)
Sungdong	76.7 (8.7~203.2)	6.7 (0.6~18.7)	56.8 (15.1~230.5)	4.4 (1.1~18.3)
Kwangjin	85.4 (9.3~221.0)	7.5 (0.6~20.6)	64.7 (16.5~260.1)	5.0 (1.2~20.7)
Dongdaemun	89.3 (10.1~229.9)	7.7 (0.7~20.6)	47.5 (18.3~230.8)	3.8 (1.3~18.6)
Chungnang	86.0 (17.0~199.6)	7.6 (1.1~18.6)	64.9 (23.9~217.3)	5.2 (1.6~18.0)
Sungbuk	76.3 (0.5~213.3)	6.7 (0.1~19.9)	31.7 (8.5~229.2)	2.6 (0.7~18.5)
Kangbuk	92.1 (18.2~214.7)	8.1 (1.3~19.9)	74.5 (25.8~236.9)	6.0 (1.8~19.8)
Dobong	68.8 (1.5~196.2)	6.0 (0.1~17.7)	35.2 (8.1~207.9)	2.8 (0.6~17.2)
Nowon	101.1 (10.6~267.5)	8.9 (0.8~24.5)	62.5 (19.6~286.7)	5.0 (1.5~23.4)
Unpyong	50.9 (10.1~164.9)	4.5 (0.9~15.3)	7.3 (2.5~167.8)	0.5 (0.1~12.9)
Seodaemun	54.0 (3.2~146.8)	4.7 (0.2~13.6)	9.1 (8.6~129.6)	0.7 (0.6~10.5)
Mapo	82.9 (5.7~230.4)	7.1 (0.4~20.4)	50.1 (13.3~246.5)	3.9 (0.9~19.6)
Yangchun	94.9 (14.7~236.5)	8.3 (0.9~21.5)	58.2 (22.1~253.0)	4.4 (1.5~19.7)
Kangseo	85.8 (0.1~243.5)	7.4 (0.1~22.4)	32.1 (9.3~246.9)	2.5 (0.7~19.8)
Guro	63.3 (4.0~190.5)	5.5 (0.3~16.8)	9.1 (3.6~175.8)	0.7 (0.3~14.3)
Kumchon	63.6 (2.3~189.2)	5.7 (0.2~17.0)	14.8 (4.8~178.5)	1.2 (0.4~14.3)
Yongdungpo	98.4 (4.0~297.9)	8.4 (0.3~26.6)	36.4 (7.0~302.3)	3.2 (0.5~24.6)
Dongjak	57.4 (3.7~171.6)	5.1 (0.3~15.5)	4.1 (3.4~153.1)	0.1 (0.0~12.5)
Kwanak	70.2 (5.1~189.7)	6.0 (0.3~16.9)	34.6 (11.6~201.3)	2.6 (0.8~15.5)
Seocho	77.6 (24.0~179.2)	6.8 (1.9~24.4)	2.7 (0.0~244.8)	0.1 (0.0~21.2)
Kangnam	89.8 (15.1~224.8)	7.8 (1.0~19.6)	70.5 (22.4~242.9)	5.5 (1.6~19.9)
Songpa	46.8 (8.3~155.2)	4.1 (0.7~13.9)	4.9 (1.7~148.5)	0.5 (0.1~12.3)
Kangdong	55.5 (3.8~150.8)	4.8 (0.3~13.6)	38.7 (9.1~166.8)	2.9 (0.7~13.3)
Seoul	1,789 (527~3,244)	156 (32~298)	885 (143~2,040)	71 (10~170)

존재하지만, 다른 연구 결과와 비교해 볼 때, 이 연구에서 추정된 평균 농도는 약 $41 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (범위: $25.9 \sim 59.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 이었고, 박 등(2001)의 연구에서는 평균 $68 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 평가되었다. 그러나 이 농도는 서울시 1개 지역에 대한 농도이기 때문에 서울 전체 지역에 대한 대표 값으로는 간주하기에는 어렵지만, 이 연구에서 사용한 평균 농도 보다는 다소 높다.

그 다음으로서는 국내 고유의 용량-반응 함수를 도출하는 것과 저농도의 미세먼지에서의 바탕 위해도 수준을 결정하는 것이 중요하다고 할 수 있다. 특히 바탕 위해도의 경우, 이 연구에서는 다소 높게 설정되어 연구 결과들이 과소 평가될 여지가 있었으므로, 미세먼지 $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도의 노출수준에서 바탕 위해도 수준을 결정하는 과정이 좀 더 보완될 필요성이 있다.

2. 손실 비용 추정 결과

각 모델에 따른 지불의사금액과 통계적 생명가치는 표 8과 같다. 지불의사금액 추정결과 Weibull 모형이 모델의 적합도가 가장 양호하였다. Weibull 모델을 기준으로 할 때, 대기오염으로 인한 지불의사금액은 12,000원으로 추정되었다. 그리고 통계적 생명가치액은 1인당 약 2.9억으로 추정되었고, 각 모델에서 도출된 값의 범위는 약 2.3~3.1억 정도였다.

앞의 3.1에서 추정된 이론적 사망수와 Weibull 모델에서 도출된 통계적 생명가치액을 고려하여 손실비용을 추정한 결과, 미세먼지로 인한 사망 손실비용은 약 4~5천억으로 추정되었고, 폐암 사망으로 인한 손실 비용은 약 3.9~4.7백억으로 추정되었다 (Table 9, 11). 또한 손실 비용의 규모가 200

Table 8. Median WTPs and VSLs for environmental problems (unit : ₩)

Estimating model	WTP ¹	VSL ²
Lower-bounded Turnbull	12,900	311,000,000
Dichotomous Weibull	12,000	287,000,000
Spike model	9,700	233,000,000

¹ willingness-to-pay, ² value of statistical life

Table 9. All-cause mortality and lung cancer mortality from each scenario in Seoul

Scenario	Estimated damage cost (billion₩ per year)	
	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)
Scenario I (Reference area; Cheju)	580.7 (117.8~1,434.6)	50.7 (7.6~134.4)
Scenario II (Reference area; Seocho)	288.9 (31.6~831.0)	23.1 (2.1~67.3)

Table 10. Categorical classification by estimated damage costs of the districts

Category*	Estimated per year	Scenario I	Scenario II
High	20~	17 other districts	Kwangjin, Chungnang, Kangbuk, Nowon, Kangnam
Medium-High	15~20	Jongro, Yongsan, Unpyong, Seodaemun, Dongjak, Songpa, Kangdong	Jongro, Sungdong, Dongdaemun, Mapo, Yangchun
Medium	10~15	-	Sungbuk, Dobong, Yongdungpo, Kangseo, Kwanak, Kangdong
Low-Medium	5~10	Chung	Yongsan, Kunchon, Chung
Low	~5	-	Unpyong, Seodaemun, Guro, Dongjak, Seocho, Songpa

* (billion₩) 20, 40, 60, 80 percentile from empirical distribution of estimated damage cost in each district

Table 11. Damage cost estimated from each scenario in the districts (billion won per year)

District	Scenario I (Cheju)		Scenario II (Seocho)	
	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)
Jongro	16.0 (1.9~46.8)	1.3 (0.1~4.2)	13.2 (2.9~51.2)	1.0 (0.2~4.1)
Chung	7.9 (0.0~26.8)	0.7 (0.0~2.5)	4.2 (0.5~27.2)	0.3 (0.0~2.1)
Yongsan	15.7 (0.3~51.7)	1.3 (0.0~4.5)	8.6 (1.3~50.9)	0.7 (0.1~4.3)
Sungdong	24.9 (2.0~76.2)	2.2 (0.1~6.9)	18.4 (3.6~80.9)	1.4 (0.3~6.5)
Kwangjin	27.7 (2.2~84.8)	2.4 (0.1~7.9)	21.5 (4.0~92.8)	1.7 (0.3~7.2)
Dongdaemun	29.1 (2.5~88.7)	2.5 (0.2~8.0)	15.6 (4.3~81.9)	1.3 (0.3~6.7)
Chungnang	27.9 (3.8~79.6)	2.5 (0.2~7.3)	21.1 (5.8~77.8)	1.7 (0.4~6.6)
Sungbuk	24.7 (0.1~80.5)	2.2 (0.0~7.5)	10.3 (2.1~77.9)	0.9 (0.2~6.4)
Kangbuk	30.0 (4.1~86.5)	2.7 (0.3~7.9)	24.4 (6.0~86.0)	2.0 (0.4~7.2)
Dobong	22.3 (0.4~72.3)	1.9 (0.0~6.6)	11.4 (1.9~71.2)	0.9 (0.1~5.9)
Nowon	32.6 (2.5~99.4)	2.9 (0.2~8.9)	20.6 (4.7~102.6)	1.7 (0.4~8.2)
Unpyong	16.5 (2.8~59.5)	1.5 (0.2~5.5)	2.4 (0.6~55.7)	0.1 (0.0~4.2)
Seodaemun	17.5 (0.7~54.7)	1.5 (0.0~5.1)	3.0 (2.0~43.7)	0.2 (0.1~3.5)
Mapo	26.8 (1.4~84.5)	2.3 (0.0~7.7)	16.3 (3.2~86.4)	1.3 (0.2~7.0)
Yangchun	30.8 (3.4~89.6)	2.7 (0.2~8.3)	19.1 (5.4~87.9)	1.5 (0.4~6.9)
Kangseo	28.1 (0.0~91.7)	2.4 (0.0~8.1)	10.6 (2.2~84.0)	0.8 (0.2~6.7)
Guro	20.6 (1.2~69.7)	1.8 (0.1~6.2)	2.9 (1.0~58.5)	0.2 (0.1~4.7)
Kumchon	20.8 (0.5~68.8)	1.8 (0.0~8.3)	4.8 (1.2~61.9)	0.4 (0.1~4.7)
Yongdungpo	31.5 (1.0~105.2)	2.7 (0.1~9.4)	11.7 (1.7~101.8)	1.0 (0.1~8.4)
Dongjak	18.7 (1.0~62.3)	1.6 (0.1~5.7)	1.3 (0.8~53.0)	0.1 (0.0~4.2)
Kwanak	22.9 (1.3~72.5)	1.9 (0.1~6.3)	11.1 (2.8~67.3)	0.9 (0.2~5.4)
Seocho	25.5 (6.8~96.2)	2.2 (0.6~8.7)	0.9 (0.0~81.5)	0.1 (0.0~6.9)
Kangnam	29.1 (3.6~85.3)	2.5 (0.2~7.6)	23.1 (5.4~86.9)	1.8 (0.4~7.0)
Songpa	15.1 (2.4~54.9)	1.3 (0.2~5.0)	1.6 (0.4~48.8)	0.2 (0.0~4.1)
Kangdong	17.9 (0.9~56.4)	1.6 (0.1~5.1)	12.8 (2.2~59.4)	0.9 (0.2~4.7)
Seoul	580.7 (117.8~1,434.6)	50.7 (7.6~134.4)	288.9 (31.6~831.0)	23.1 (2.1~67.3)

역 이상인 지역은 광진구, 중랑구, 강북구, 노원구, 강남구였다(Table 10).

여기서 손실비용의 크기는 추정된 위해도, 감소시킬 위해도의 크기에 따른 지불의사금액에 의해 영향을 받게 되므로, 추정된 위해도와 지불의사금액 자체의 수치에 의해 불확실성이 발생할 수 있으므로, 이들 모수에 대한 불확실성을 감소 시켜야 한다. 위해도 추정치의 불확실성을 감소시키는 방안은 앞서 기술한 바와 같고, 지불의사금액은 조사 대상자수를 충분히 늘리고, 내적 및 외적 척도 검증(internal and external scope test) 통해, 수치를 검증·보완해야 할 것이다.

이 연구 결과들을 통해 위해도에 근거한 우선 관리가 필요한 지역(risk_based priority area)을 선정하였다. 물론 오염도를 이용하여 우선 관리 지역을 설정할 수 있지만, 농도만으로는 위해도나 손실비용의 크기를 알 수 없기 때문에 정책의 범위나 목표를 설정하기 용이하지 않다.

단, 앞에서 추정된 사망수나 손실 비용의 수치적 결과물들에는 불확실성을 포함하고 있으므로, 절대값에 대한 고려보다, 문제의 위해도와 손실 규모를 파악하고, 다른 지역 또는 다른 물질과의 상대적 비교를 통해 우선 순위를 결정하는 지수로서 간주하면 될 것 같다. 또한 지역 자치 단체에서 감축을만 설정한다면 대기오염 정책을 실행하는데 드는 예산의 규모를 책정하는데 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다. 역으로 말하면, 제한된 예산 투자 금액으로 인한 오염도나 위해도 감축 정도를 예측할 수 있다.

마지막으로 인체 위해성을 평가하는 과정에서 발생할 수 있는 불확실성 때문에 추정된 수치에 비중을 두기는 어려울 것으로 판단되고, 이들 수치는 계속적으로 불확실성을 감소시키면서 보완·수정해나가는 작업이 필요하다. 그러나 상대적인 우선 순위는 크게 변화하지 않을 것으로 예측되고, 또한 범주화(categorization)를 통해 순위에 대한 불확실성을 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

결 론

미세 먼지에 대한 인체 위해성에 대해서는 이미 인식하고 있지만, 미세 먼지의 관리를 위해서 무엇

을 해야하는지는 어떤 자료를 생산해내고 더 깊이 연구를 해야하는지를 인식하지 못하고 있다. 우선 현 상황에서 가용한 논리와 과학적인 자료들을 모두 활용하여 불확실성이 존재하더라도 미세 먼지의 위해성이나 손실비용에 대한 정량적인 크기를 가능하고 결과들을 생산해야 한다. 이러한 자료들은 정책의 우선 순위를 정하고, 위해도에 입각한 감축 수준을 결정하거나, 감소 전략에 드는 비용의 범위를 결정하는데 중요한 하나의 판단 자료로 이용될 수 있다.

이 연구에서도 위해성이나 손실비용을 추정하는 과정에서 몇 가지 모수값에 대한 불확실성이 여전히 문제로 남지만, 신뢰성 있고 정확한 모수값을 생산해내기까지는 장기적인 시간을 요하는 문제이기 때문에, 현실적인 자료들이 불확실성이 존재하더라도 현안에 대한 대안을 만들어 내고 위해도를 관리하기 위해서는 도출된 결과물을 정책에 반영하는 것이 매우 중요하다. 불확실성을 줄일 수 있는 결과물들이 계속 도출된다면, 언제든지 정책에 반영하고 새로운 대안을 제안할 수 있는 탄력적인 사고를 지녀야 할 것으로 생각된다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 환경부의 차세대 핵심환경 기술개발사업의 일환으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 권호장, 조수현, 장재연, 임종환, 하은희, 하미나, 황사의 건강 위해성 평가연구. 2002; 34-38pp. 환경부.
- 김병화, 김동술. 수원지역 PM_{2.5}와 PM₁₀의 화학적 특성. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집. 1999; 21-22.
- 김예신, 임영욱, 남정모, 장재연, 이동수, 신동천. 환경 문제의 우선 순위 도출을 위한 비교 위해도 분석에 관한 연구. 한국환경독성학회지. 2002; 17(4): 285-298.
- 김예신, 박화성, 이용진, 임영욱, 신동천. 서울 지역에서 인체 위해도에 입각한 대기오염물질의 관리 우선 순위 선정에 관한 연구. 한국대기환경학회지. 2003; 19(2): 205-216.
- 김예신, 이용진, 박화성, 남정모, 김진흠, 신동천. 환경 오염

- 으로 인한 위험도 감소에 대한 지불의사금액 추정에 관한 연구. *한국환경독성학회지*. 2003; 18(1): 1-13.
- 김예신, 이윤진, 박화성, 신동찬. 환경 오염으로 인한 인체 위험도에 입각한 사망 손실 비용에 관한 연구. *대한여방의학회지*. 2003; 36(3): 230-238.
- 김창환, 이윤산, 조정규, 최금찬 부산지역 PM_{2.5}와 PM₁₀ 입자의 비교에 관한 연구. *한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집*. 1999; 270-271pp.
- 최민규, 여현구, 임종억, 조기철, 김희강 강화에서의 PM_{2.5} 특성. *한국대기환경학회지*. 2000; 16(6): 573-583.
- 통계청 인구동태통계연보 '01. 2002.
- 환경부 대기환경연보 '99. 2000.
- 환경부 대기환경연보 '00. 2001.
- 환경부 대기환경연보 '01. 2002.
- Brunekreef B. Air pollution and Life expectancy: Is there a relation? *Occup Environ Med* 1997; 54: 781-784.
- Brimblecombe P. Urban air pollution. In: *The Urban Atmosphere and Its Effects* (P Brimblecombe and R Maynard, eds). Vol. 1, *Air Pollution Reviews*. Imperial College Press, London, UK. 2001.
- Dockery DW and Pope CA III. Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annu Rev Public Health*. 1994; 15:107-132.
- Dockery DW, Pope CA III, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG Jr and Speizer FE. An association between air pollution and mortality in six US cities. *New Engl J Med*. 1993; 329: 1753-1759.
- European Commission. Ambient air pollution by particulate matter. Position Paper. Final version. 1997.
- Krewski D, Burnett RT, Goldberg MS, Hoover K, Siemiatycki J, Jerrett M and Abrahamowicz M. White WH Reanalysis of the Harvard Six Cities study and the American Cancer Society study of particulate air pollution and mortality. A special report of the Institute's Particle Epidemiology Reanalysis Project. Cambridge, MA: Health Effects Institute. 2000.
- Kunzli N, Kaiser R, Medina S, Studnicka M and Chanel O. Filliger P Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. *Lancet*. 2000; 356: 795-801.
- Levy JI, Hammitt JK and Spengler JD. Estimating the mortality impacts of particulate matter: What can be learned from between-study variability? *Environ Health Perspect*. 2000; 108(2): 109-117.
- Pope CA III, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K and Thurston GD. Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. *JAMA* 2002; 287: 1132-1141.
- Pope CA III, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE and Heath CW. Particulate air pollution as a predictor of mortality in a Prospective study of US adults. *Am J Respir Crit Care Med*. 1995; 151: 669-674.
- Schwartz J. What are people dying of on high air pollution days? *Environ Res*. 1994; 64: 26-35.
- US Environmental Protection Agency. Air Quality Criteria for Particulate Matter. National Center for Environmental Assessment PTP Reports EPA/600/P-95/001a F-cF.3v. US EPA, Research Triangle Park NC. Also available as PB96-168224 from NTIS, Springfield VA. 1996.
- US Environmental Protection Agency. The Benefits and Costs of the Clean Air Act; 1990 to 2010. EPA 410-R-99-001. US EPA Office of Air and Radiation, Washington DC. 1999.
- US Environmental Protection Agency. Guideline for preparing economic analysis. Office of the Administrator, September, EPA-240-R-00-003. 2000.
- US Environmental Protection Agency. Air quality criteria for particulate matter. EPA 600/P-99/002bB. US EPA Office of Research and Development, Washington DC. 2001.