미세먼지로 인한 인체 및 경제 위해도의 예비적 평가

-서울지역에서 이론적 사망 위해도를 중심으로-

Preliminary assessment for health and economic risk from exposure to fine particulates

김예신 · 이용진 · 신동천

연세대학교 환경공해연구소

Yeshin Kim, Yongjin Lee, Dongchun Shin

Institute for Environmental Research, Yonsei University(IERY), Seoul, Korea

1. 서론

20세기 중반에 발생한 여러 가지 대기오염 사건으로 인한 사망률과 유병률의 현저한 증가는 중공업과 가정에서 소비되는 화석연료로 인한 대기오염이 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 대기오염과 사망률 및 유병율 증가사이의 유의한 관련성을 보고하였다(Pope and Dockery 1999). 이러한 문제들이 제기되면서, 대기오염의 지표물질이라 할 수 있는 미세먼지와 만성사망간의 관련성에 대한 역학 연구들이 지속적으로 진행되어져 오고 있다.

HEI(Health Effects Institute, 2000)에서 발간한 보고서에 따르면, US-wide National Morbidity, Mortality and Air Pollution Study (NMMAPS)에서는 일일 평균 PM_{10}의 농도가 15~53$\mu g/m^3$ 정도인 90개의 도시에서 PM_{10}이 10$\mu g/m^3$ 증가하면 사고 외 만성 사망률이 0.5% 증가한다는 것을 보고하였다. 유럽의 APHEA(Air Pollution and Health : a European Approach)의 연구에서는 10$\mu g/m^3$당 0.6%, 최근에 조사된 유럽과 북, 남미 29개 도시에 대한 연구에서는 10$\mu g/m^3$당 0.7%로서 매우 비슷하다고(Levy et al., 2000) 언급하고 있다.

두 가지 전향적 코호트(cohort) 연구, 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 조사

되었다. 또한, Pope 등(2002)의 최근 연구에 따르면, 미세 먼지의 농도가 10㎍/㎥ 증가할 경우, 전체 사망(사망의 외인은 제외)은 약 0.4%, 심폐 질환으로 인한 사망은 약 0.6%, 폐암으로 인한 사망은 약 0.8% 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㎍/㎥ 증가할 때, 미세 먼지($PM_{2.5}$)의 상대 위해도(relative risk)는 1.14로 조대 입자(PM_{15})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.

그러나 우리나라는 미세 먼지($PM_{2.5}$)에 대한 위해성을 인식하지 못하고, 현재 오염수준에 대한 평가는 PM_{10}을 중심으로 이루어지고 있어, 앞으로 미세먼지에 대한 모니터링을 결과들을 생산해내는 것이 중요한 과제중의 하나이다.

또한, 앞에서 언급한 것처럼 선진국에서는 많은 비용을 들여, 미세먼지와 사망율 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 이루어지고 있지 않다. 그렇다고 인체 위해성이 높은 미세먼지에 대한 관리를 위해 많은 시간을 요하는 역학적 결과를 기다리고만 있을 수는 없다. 따라서, 현재 가용한 정보를 가지고 위해성을 평가하여, 위해도에 대한 수치적인 정보를 제공하고 정책의 우선순위를 정하기 위한 결과물을 도출하는 것이 중요하다고 판단된다.

따라서 이 연구에서는 현재까지 사용 가능한 자료들을 가지고 미세 먼지에 대한 이론적 사망 위해도를 중심으로 인체 위해도 및 그로 인한 손실비용에 대한 예비적인 위해성 평가를 실시하여, 위해도 관리의 기초적인 정보들을 제공하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

가. 미세먼지로 인한 인체 위해도 추정

미세 먼지로 인한 이론적 사망수를 추정하기 위해서, $PM_{2.5}$ 농도 자료를 이용해야 하나, 서울지역에서 대표성 있는 실측 자료를 얻기가 어려웠으므로, 자동 측정망에서 제공되는 PM_{10} 자료(환경부, 2000)를 이용하였고, 이 농도에 미세먼지에 대한 분율을 고려하여 PM2.5의 농도로 가정하였다. 여기에 노출 인구수, 역학연구에서 도출된 용량-반응 함수 기울기과 바탕 위해도를 고려하여 위해도를 추정하였다.

1) 노출 정보 분석

가) PM_{10} 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 1구에는 1개 동에 자동 측정망이 있으며, 1개동의 미세 먼지의 연평균 오염도를 해당 구의 대표 농도(Table 2)로 간주하였다.

나) PM_{10}중 $PM_{2.5}$의 분율

PM_{10} 농도로부터 미세 먼지($PM_{2.5}$)의 농도를 추정하기 위해서, 국내 연구결과(권호장 등, 2001)로부터 도출된 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 분율을 적용하였다. 국내에서 측정된 $PM_{2.5}$와 PM_{10}의 분율은 약 0.62로 국외 대도시지역의 비율이 비슷하였다(Table 1).

다) $PM_{2.5}$의 오염도 및 노출 인구수

앞에서 PM_{10}의 농도에 $PM_{2.5}/PM_{10}$의 분율을 적용한 결과, $PM_{2.5}$의 농도는 표 2와 같다. 또한 이 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.

Table 1. Ratio of $PM_{2.5}$ to PM_{10}

Area	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}/PM_{10}$	$PM_{2.5-10}/PM_{10}$
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: 권호장 등 (2002)
† source: US EPA (2001)

Table 2. PM_{10} and $PM_{2.5}$ levels, number of death and exposure population in each strict

District(Gu)	PM_{10} ($\mu g/m^3$)	$PM_{2.5}$ ($\mu g/m^3$)	Number of death	Exposure population
Jongro	74.0	45.9	917	103,898
Chung	69.0	42.8	603	71,197
Yongsan	82.9	51.4	1075	132,652
Sungdong	41.8	25.9	1226	179,919
Kwangjin	45.4	28.1	1295	197,092
Dongdaemun	64.6	40.0	1605	255,853
Chungnang	95.3	59.1	1682	198,804
Sungbuk	65.7	40.7	2074	252,789
Kangbuk	68.1	42.2	1436	196,827
Tobong	54.9	34.0	1332	204,920
Nowon	72.3	44.8	2301	270,632
Unpyong	49.7	30.8	1841	204,391
Sodaemun	74.9	46.4	1438	212,724
Mapo	69.8	43.2	1589	219,799
Yangchun	77.1	47.8	1589	264,419
Kangso	73.8	45.7	1850	285,959
Guro	76.1	47.2	1276	254,976
Kumchon	63.6	39.4	949	240,960
Yongdungpo	80.0	49.6	1594	325,485
Dongjak	59.1	36.6	1517	250,346
Kwanak	53.8	33.4	1864	209,100
Socho	60.8	37.7	1145	343,027
Kangnam	59.7	37.0	1684	198,784
Songpa	52.5	32.6	2034	188,616
Kangdong	74.5	46.2	1658	138,200

2) 위해도 추정

가) 바탕 위해도(baseline risk) 추정

미세 먼지로 인한 이론적 사망 위해도를 추정하기 위해서는 우선, 미세먼지로 인해 영향이 없을 것으로 기대되는 최저 농도에서의 사망율을 조사하여야 한다. 보통 10$\mu g/m^3$에서의 사망율을 바탕 위해도로 간주하나, 우리나라에서는 이들에 대한 정보가 없기 때문에, 두 가지를 가정하였다. 첫번째 가정(Scenarios I)은 서울지역 내에서 가장 낮은 농도($E0_1$) 지역, 성동구의 사망율을 바탕 위해도($P0_1$)로 간주하고, 두번째 가정(Scenarios II)은 서울 이외의 지역인 제주도의 제주시의 평균농도($E0_2$)와 이 때 사망율을 바탕 위해도($P0_2$)로 간주하였다(Fig. 1).

나) 위해도 추정

현재 미세먼지의 노출 수준(E)에서의 사망수를 추정하기 위하여, 바탕수준(E_0)에서의 사망률(P_0)을 구한 후, 미세 먼지의 용량-반응 함수에 대입하여 추정하였다(그림 1). 이를 위해서는 D_{10}(미세 먼지 농도가 10㎍/㎥ 증가하였을 때, 사망수의 증분)이 정확히 정의되어야 한다. 여기서 D_{10}을 구하기 위해서 용량-반응 함수의 기울기(slope, β 또는 상대위해도, Relative Risk)는 최근 Pope 등(2002)이 보고한 역학 연구 결과를 인용하였으며, 이 때, 미세 먼지 10㎍/㎥ 증가 당 전체 사망은 4%(RR, 1.04), 폐암사망은 8%(RR, 1.08)를 적용하였다.

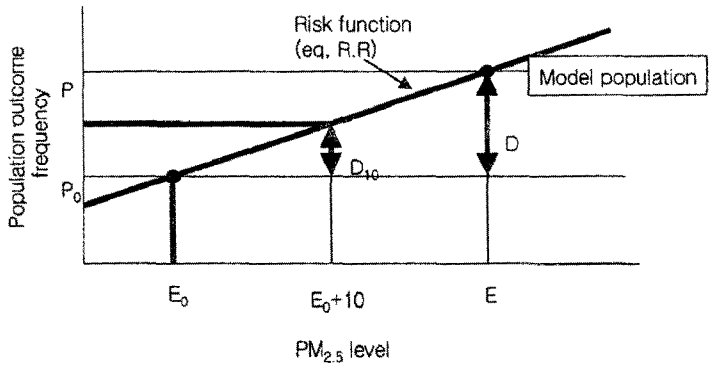


Fig. 1. Model to derive theoretical mortality risk

바탕수준(E_0)에서의 PM_{10} 농도와 전체 사망률(P_0_all-cause mortality)은 서울 성동구가 각각 41.8㎍/㎥과 4,546명(백만명당)이었고, 제주도가 각각 33.2㎍/㎥과 3,220명(백만명당)이었다. 폐암으로 인한 사망률(P_0_lung cancer mortality)은 서울 성동구가 174명(백만명당)이었고, 제주도가 150명(백만명당)이었다. 이 때, 지역의 사망자수(P_0)는 30세 이상만을 고려하였고, 통계청(2000)의 인구동태 자료를 사용하였다.

이들 자료들을 근거로 바탕 수준에서의 농도와 위해도, $PM_{2.5}$가 10㎍/㎥ 증가할 경우의 사망 기여발생률(D_{10})과 해당 지역에서의 오염도를 이용하여, 미세 먼지로 인한 만성 사망자수를 계산하였다(Kunzli et al., 2000).

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

where, R_{ij} = *참고지역 j에서 endpoint i에 대한 사망 수 추정치*

$P_{ij} = PM_{10}$ 농도 $\times$ $0.62(PM_{2.5}/PM_{10}$ 분율$) \times D_{10ij} \times 0.1 + \{P_{0ij} - (E_{0ij} \times D_{10ij} \times 0.1)\}$

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

RR = *relative risk (all-cause; 1.04, lung cancer; 1.08)*

P_{0ij} = *농도가* E_{0ij}*인 참고 지역 j에서 endpoint i에 대한 백만명당 사망률*

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 $PM_{2.5}$에 대한 분율, 바탕 위해도, 용량-반응 기울기, 노출 인구수이다. 그러나 여기서 자료의 확률분포를 감안할 수 있는 모수는 PM_{10} 오염도, PM_{10}중 $PM_{2.5}$에 대한 분율, 용량-반응 기울기 등이다. 이들 모수(input parameter)는 표 3에 제시한 확률 분포를 가정하여, *Equation 1*에 따라 최종 위해도(output parameter) 추정을 하였다. 그 외 나머지 모수 값은 하나의 값(point value)을 입력하였다.

Table 3. Probability distribution of input parameter for uncertainty analysis

Parameter	Distribution	Value
PM_{10} levels	Log-normal	mean ± S.D. *
$PM_{2.5}/PM_{10}$ ratio	Uniform distribution	0.57~0.68
Slope of dose-response function	Uniform distribution	
All cause		1.01~1.08
Lung cancer		1.01~1.16

* mean and standard deviation of PM_{10} in each strict

나. 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 WTP만 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 부분이외에 5개 세부 영역으로 분류하였다(Part A: 건강상태 및 삶의질 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 편의(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, 지불수단(vehicle payment)으로는 기부금을 선택하였다.

지불의사금액을 추정하기 위한 기본 모델로는 lower-bounded Turnbull method, Weibull model, Spike model을 사용하였다. 이들 추정모형에 설명변수로서 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 손실비용과 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).

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

$$\therefore \quad Damage\ cost\ (₩) = VSL \times Theoretical\ Mortality\ Incidence\ (from\ equation\ 1) \quad \ldots\ EQUATION\ 3$$

3) 불확실성 분석

건강 손실 비용에 대한 불확실성을 감안하기 위하여, 2-가)-3)과 동일한 방법을 적용하였고, 단지 손실비용 추정을 위해 WTP 분포(Weibull)를 추가하였다.

3. 연구결과 및 고찰

가. 오염도 비교

PM_{10}으로부터 추정한 $PM_{2.5}$ 자료의 타당성을 조사하기 위해서 다른 지역의 실측 농도와 비교한 결과 평균이 거의 수원에서 측정된 결과와 유사하였다. 따라서 분율을 이용한 추정치가 정상 범위를 크게 벗어나지 않을 것으로 판단된다.

Table 4. $PM_{2.5}$ Level in other cities

City	$PM_{2.5}$ level, $\mu g/m^3$ (mean)	Year	Reference
Seoul	68	2001	Park et al. (2001)
Busan	23.7	1998	Kim et al. (1999)
Suwon	46.3	1997	Kim et al. (1999)
Kwanghwa	17.7~35.1	1996~1999	Choi et al. (2000)
Seoul	41.1 (25.9~59.1)	1999	Estimates in this study

가. 인체 위해도 추정 결과

25개구 각각에서 사망수를 추정하여 합산한 결과, 포함하는 서울지역의 미세 먼지 오염으로 인한 이론적 사망수를 추정한 결과, 바탕 수준에서의 위해도를 제주도로 한 경우, 전체 사망자는 연간 약 1,600명, 폐암 사망자는 약 143명으로 추정되었으며, 성동구를 바탕 수준에서의 위해도로 한 경우, 전체 사망자는 연간 약 1,300명, 폐암 사망자는 약 120명으로 추정되었다(Table 5, 8). 두 비교 집단간에 큰 차이를 보이지는 않았다. 또한 선행 연구(김예신 등, 2003)에서 바탕 수준을 고려하지 않고, 영점에서 용량-반응 함수가 linear하다고 가정하고 추정한 전체 사망자는 6,212명이며, 폐암 사망자는 350명으로 바탕 수준의 위해도를 결정하고 추정하였을 때 보다 과대 평가 되었다. 따라서 위해도 수치에 대한 신뢰성을 확보하기 위해서는 우리나라 고유의 용량-반응 관계를 규명하기 위한 장기간의 역학 연구뿐 만 아니라 바탕 수준에서의 위해도를 결정하는 연구가 뒷받침되어야 할 것으로 판단된다.

각 구의 평균 농도를 적용하여 추정된 이론적 사망수의 불확실성을 고려하여 결과치를 범주화한 결과(Table 7), 두 시나리오 모두 중랑구와 영등포구가 우선 순위가 높은 지역(high)으로 선택되어, 우선 관리가 필요한 지역으로 판단된다. 여기서 low는 우선 순위의 절대적인 크기를 말하는 것이 아니라 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)	1,619 (481 ~ 2,852)	144 (29 ~ 264)
Scenario II (Reference area; Sungdong)	1,323 (385 ~ 2,369)	121 (24 ~ 230)
Previous study	6,212 (3,913 ~ 9,176)	350 (221 ~ 519)

Table 6. Frequency distribution for mortality in each scenario

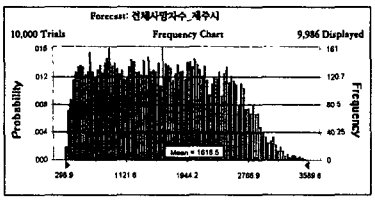
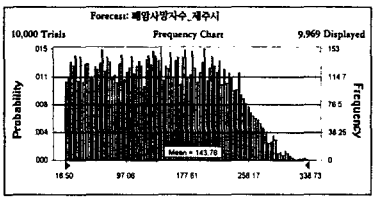
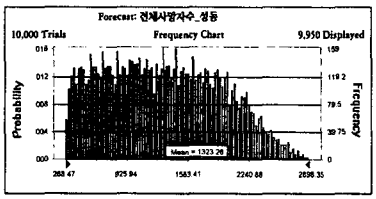
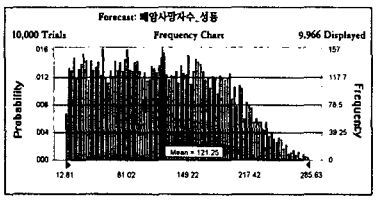
Scenario	All-cause mortality	Lung cancer mortality
Scenario I (Baseline area; Cheju)		
Scenario II (Baseline area; Sungdong)		

Table 7. Categorical classification by estimated attributable number of cases in districts

Category	Scenario I	Scenario II
Low (~10)	-	-
Medium (10~100)*	20 other districts except 4 district allocated by 'High'	22 other districts except 2 district allocated by 'High'
High (100~)	Chungnang, Yangchun Kangso, Yongdungpo	Chungnang, Yongdungpo

(persons)* 5 percentile and 95 percentile from emprical distribution of estimated attributable number of cases in each districts

Table 8. All-cause mortality and lung cancer mortality estimated from each scenario in district (persons per year)

District	Scenario I (Cheju)		Scenario II (Sungdong)	
	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)
Jongro	38.3 (8.5~85.1)	3.4 (0.5~8.0)	33.0 (5.0~80.2)	3.0 (0.3~7.8)
Chung	23.1 (4.3~55.7)	2.1 (0.3~5.1)	19.2 (1.0~51.1)	1.8 (0.1~4.9)
Yongsan	59.6 (15.9~122.3)	5.3 (1.0~11.1)	54.4 (13.2~117.1)	5.0 (0.9~11.1)
Sungdong	13.8 (3.6~42.6)	1.2 (0.3~3.9)	0.0 (0.0~0.0)	0.0 (0.0~0.0)
Kwangjin	21.6 (0.4~58.2)	1.9 (0.1~5.3)	7.1 (1.5~40.7)	0.7 (0.1~3.9)
Dongdaemun	72.5 (14.3~169.8)	6.5 (1.0~15.6)	58.0 (4.0~150.2)	5.3 (0.3~14.5)
Chungnang	111.3 (29.5~228.1)	9.9 (1.8~21.1)	105.7 (26.3~225.3)	9.6 (1.7~21.4)
Sungbuk	74.0 (20.4~145.5)	6.5 (1.3~13.4)	59.9 (14.4~126.5)	5.5 (0.9~12.4)
Kangbuk	61.7 (11.4~146.1)	5.5 (0.8~13.4)	51.5 (3.2~134.5)	4.7 (0.3~12.9)
Tobong	39.8 (0.9~114.5)	3.6 (0.1~10.3)	26.4 (1.9~97.4)	2.4 (0.6~9.2)
Nowon	94.4 (17.2~225.9)	8.5 (1.1~21.3)	82.3 (5.2~220.3)	7.5 (0.4~21.0)
Unpyong	29.8 (1.1~84.9)	2.7 (0.1~7.7)	16.4 (1.9~70.1)	1.4 (0.1~6.4)
Sodaemun	80.1 (21.5~160.9)	7.1 (1.4~14.9)	69.6 (17.0~146.4)	6.4 (1.1~14.3)
Mapo	72.2 (14.1~168.1)	6.5 (1.0~15.8)	61.0 (5.9~157.2)	5.6 (0.4~15.1)
Yangchun	104.7 (25.0~225.8)	9.2 (1.6~20.4)	92.2 (18.8~209.4)	8.5 (1.2~20.6)
Kangso	104.7 (24.6~229.0)	9.3 (1.5~21.3)	90.9 (16.3~215.7)	8.3 (1.1~20.6)
Guro	97.9 (26.0~200.9)	8.7 (1.6~18.7)	86.4 (20.1~187.8)	8.0 (1.3~18.4)
Kumchon	65.9 (10.8~158.2)	6.0 (0.8~14.8)	52.2 (0.6~147.2)	4.8 (0.0~13.8)
Yongdungpo	136.7 (34.5~288.3)	12.2 (2.2~26.5)	124.4 (27.7~279.5)	11.4 (1.8~26.2)
Dongjak	58.8 (7.7~147.5)	5.2 (0.5~13.1)	42.7 (6.8~129.2)	3.9 (0.6~12.3)
Kwanak	38.9 (9.1~85.0)	3.4 (0.6~7.7)	25.0 (0.5~65.3)	2.3 (0.0~6.3)
Socho	86.0 (20.6~185.6)	7.6 (1.3~17.0)	65.1 (7.9~162.1)	5.9 (0.6~15.2)
Kangnam	47.2 (5.7~119.0)	4.2 (0.4~11.0)	35.5 (5.1~107.0)	3.2 (0.5~10.4)
Songpa	33.2 (4.1~82.4)	2.9 (0.3~7.5)	19.9 (9.1~67.0)	1.8 (0.8~6.4)
Kangdong	52.2 (9.3~125.8)	4.6 (0.6~11.3)	44.5 (3.1~119.2)	4.2 (0.3~11.4)

나. 손실 비용 추정 결과

각 모델에 따른 지불의사금액과 통계적 생명가치는 표 5와 같다. 지불의사금액 추정 결과 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 2.3억~3.1억 정도였다.

Table 9. Median WTPs and VSLs for environmental problems

(unit : ₩)

Environmental problems	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

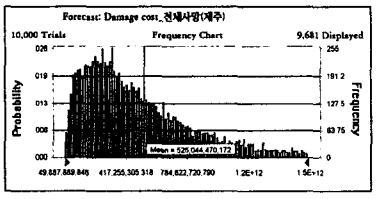
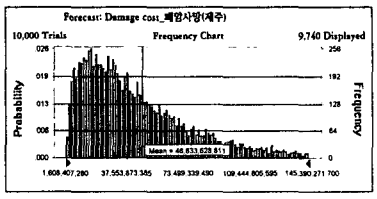
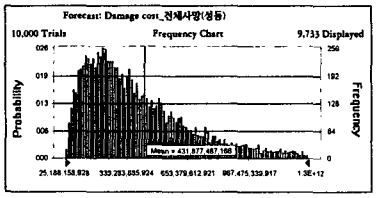
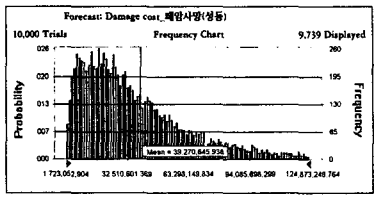
[1] willingness-to-pay, [2] value of statistical life

앞의 3-가에서 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 10). 또한 손실 비용의 규모가 400억 이상인 지역은 두 시나리오에서 모두 영등포구 였다(Table 12).

Table 10. 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)	525.0 (106.3 ~ 1,313.7)	46.8 (7.0 ~ 122.6)
Scenario II (Reference area; Sungdong)	431.9 (85.8 ~ 1,091.5)	39.3 (5.8 ~ 102.6)

Table 11. Frequency distribution for damage cost in each scenario

Scenario	All-cause mortality	Lung cancer mortality
Scenario I (Baseline area; Cheju)		
Scenario II (Baseline area; Sungdong)		

또한, 동일한 방법으로 다른 환경물질에 대한 암 사망으로 인한 손실비용을 추정한 결과(김예신등, 2003)를 비교하면 Table 14와 같다. 미세먼지로 인한 손실액이 다른 환경오염물질보다 우선 순위에 있음을 알 수 있다.

Table 12. Categorical classification by estimated damage costs of districts

Category (billion₩)	Scenario I	Scenario II
~ 5	Sungdong	Kwangjin, Sungdong
5 ~ 20	Yongsan, Dongjak, Kangdong, Kangnam, Tobong, Kwanak, Jongro, Songpa, Unpyong, Chung, Kwangjin	Mapo, Sungbuk, Dongdaemun, Yongsan, Kunchon, Kangbuk, Kangdong, Dongjak, Kangnam, Jongro, Tobong, Kwanak, Songpa, Chung, Unpyong
20 ~ 40	Chungnang, Yangchun, Kangso, Guro, Nowon, Socho, Sodaemun, Sungbuk, Dongdaemun, Mapo, Kumchon, Kangbuk	Chungnang, Yangchun, Kangso, Guro, Nowon, Sodaemun, Socho
40 ~	Yongdungpo	Yongdungpo

*(billion₩) 5 percentile, 50 percentile and 95 percentile from emprical distribution of estimated damage cost in each district

Table 13. Damage cost estimated from each scenario in district (billion won per year)

District	Scenario I (Cheju)		Scenario II (Sungdong)	
	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)	All-cause (5~95 percentile)	Lung cancer (5~95 percentile)
Jongro	12.4 (1.9~34.6)	1.1 (0.1~3.2)	10.8 (1.1~31.4)	1.0 (0.1~3.0)
Chung	7.5 (1.0~21.6)	0.7 (0.1~2.0)	6.3 (0.3~19.2)	0.6 (0.0~1.9)
Yongsan	19.3 (3.4~50.3)	1.7 (0.2~4.7)	17.7 (2.9~47.9)	1.6 (0.2~4.5)
Sungdong	4.4 (1.0~15.7)	0.4 (0.1~1.4)	0.0 (0.0~0.0)	0.0 (0.0~0.0)
Kwangjin	7.0 (0.1~22.4)	0.6 (0.0~2.1)	2.3 (0.1~13.8)	0.2 (0.0~1.3)
Dongdaemun	23.6 (3.2~67.0)	2.1 (0.2~6.1)	19.0 (0.9~59.1)	1.7 (0.1~5.4)
Chungnang	36.1 (6.4~95.9)	3.2 (0.4~8.9)	34.4 (5.7~94.3)	3.1 (0.4~8.6)
Sungbuk	24.0 (4.4~62.1)	2.1 (0.3~5.8)	19.6 (3.1~52.3)	1.8 (0.2~4.9)
Kangbuk	20.0 (2.6~58.0)	1.8 (0.2~5.2)	16.7 (0.8~51.7)	1.5 (0.1~4.8)
Tobong	12.8 (0.2~40.5)	1.2 (0.0~3.9)	8.7 (0.5~35.1)	0.8 (0.5~3.2)
Nowon	30.6 (3.9~88.3)	2.8 (0.3~8.3)	26.9 (1.3~83.2)	2.4 (0.1~7.6)
Unpyong	9.6 (0.3~31.0)	0.9 (0.0~3.0)	5.5 (2.1~25.7)	0.4 (0.1~2.2)
Sodaemun	26.0 (4.8~68.0)	2.3 (0.3~6.3)	22.7 (3.7~60.5)	2.1 (0.3~5.8)
Mapo	23.4 (3.2~65.5)	2.1 (0.2~6.2)	19.9 (1.4~61.6)	1.8 (0.1~5.5)
Yangchun	34.0 (5.6~94.2)	3.0 (0.4~8.5)	30.0 (4.2~84.2)	2.8 (0.3~8.1)
Kangso	34.0 (5.5~92.7)	3.0 (0.4~8.6)	29.8 (3.5~85.2)	2.7 (0.3~8.3)
Guro	31.8 (5.6~86.1)	2.9 (0.4~7.9)	28.2 (4.4~77.1)	2.6 (0.3~7.3)
Kumchon	21.3 (2.4~61.2)	1.9 (0.2~5.8)	17.0 (0.2~54.1)	1.6 (0.0~5.2)
Yongdungpo	44.4 (7.6~118.3)	4.0 (0.5~11.2)	40.4 (6.2~114.0)	3.7 (0.4~10.7)
Dongjak	19.0 (1.9~56.8)	1.7 (0.1~5.2)	13.9 (1.8~48.1)	1.3 (0.2~4.5)
Kwanak	12.6 (2.0~34.6)	1.1 (0.1~3.1)	8.2 (0.1~25.7)	0.7 (0.0~2.4)
Socho	27.8 (4.5~75.6)	2.5 (0.3~7.0)	21.2 (1.9~62.3)	1.9 (0.1~5.9)
Kangnam	15.3 (1.3~46.6)	1.4 (0.1~4.2)	11.7 (1.4~40.6)	1.1 (0.1~3.8)
Songpa	10.8 (0.9~32.0)	0.9 (0.1~2.9)	6.5 (2.8~24.3)	0.6 (0.2~2.3)
Kangdong	16.9 (2.1~48.9)	1.5 (0.1~4.5)	14.6 (0.7~45.2)	1.4 (0.1~4.4)

Table 14. The health damage costs in environmental sub-problems

	Sub-problem	Health damage cost (billion ₩)		
		Point	50%tile	95%tile
Air pollution	HAPs	16	11	43
	Regulated pollutant(PM_{10}) [@]	***40~47***	-	***103~123***
	Dioxins (PCDDs/PCDFs)	2	2	6
Indoor air pollution [†]	IAPs	88	63	243
	Radon	408	215	1,384
Drinking water contamination	DWPs	3	2	7
	DBPs	1>	1>	2
	Radionuclides (groundwater)	1>	1>	2

· HAPs : Hazardous Air Pollutants
· PM_{10} : Particulate Matter (size : $\leq 10\mu m$)
· PCDDs : Polychlorinated dibenzo-p-dioxins
· PCDFs : Polychlorinated dibenzofurans
· IAPs : Indoor Air Pollutants
· DWPs : Drinking Water Pollutants
· DBPs : Disinfection by-products
* $p < 0.05$ (comparison among health damage costs of sub-problems), ANOVA
† $p < 0.05$ (comparison among health damage costs of problems), ANOVA
@ estimates from this study

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 감축율만 설정한다면 대기오염 정책을 실행하는데 드는 예산의 규모를 책정하는데 도움이 될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결론

미세 먼지에 대한 인체 위해성에 대해서는 이미 인식하고 있지만, 미세 먼지의 관리를 위해서 무엇을 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 가늠하고 결과들을 생산해야한다. 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 생산해내기 까지는 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.

참고문헌

권호장, 조수헌, 장재연, 임종한, 하은희, 하미나 (2002) 황사의 건강 위해성 평가연구. 34-38pp. 환경부

김병화, 김동술. (1999) 수원지역 PM2.5와 PM10의 화학적 특성. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집. 21-22

김예신, 박화성, 이용진, 임영욱, 신동천 (2003) 서울 지역에서 인체 위해도에 입각한 대기오염물질의 관리 우선 순위 선정에 관한 연구. 한국대기환경학회지 19(2)호 게재 예정

김예신, 이용진, 박화성, 신동천. 환경 오염으로 인한 인체 위해도에 입각한 사망 손실 비용에 관한 연구. 대한예방의학회지 36(3)호 게재 예정

김예신, 이용진, 박화성, 남정모, 김진홈, 신동천. (2003) 환경 오염으로 인한 위해도 감소에 대한 지불의사금액 추정에 관한 연구. 한국환경독성학회지 18(1)호 게재 예정

김창환, 이윤신, 조정구, 최금찬 (1999) 부산지역 PM2.5와 PM10 입자의 비교에 관한 연구. 한국대기환경학회 춘계학술대회 논문집. 270-271

최민규, 여현구, 임종억, 조기철, 김희강 (2000) 강화에서의 PM2.5 특성. 한국대기환경학회지 16(6); 573-583

통계청 인구동태통계연보 '99. (2000)

환경부 대기환경연보 '99. (2000)

Brunekreef B. (1997) Air pollution and Life expectancy: Is there a relation? Occup Environ Med 54: 781-784.

Dockery DW, Pope CA III, Xu X, Spengler JD, Ware JH, Fay ME, Ferris BG Jr, Speizer FE. (1993) An association between air pollution and mortality in six US cities. New Engl J Med. 329: 1753-1759

Dockery DW, Pope CA III (1994) Acute respiratory effects of particulate air pollution. Annu Rev Public Health 15:107-132.

Krewski D, Burnett RT, Goldberg MS, Hoover K, Siemiatycki J, Jerrett M, Abrahamowicz M, White WH (2000) 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

Kunzli N, Kaiser R, Medina S, Studnicka M, Chanel O, Filliger P (2000) Public-health impact of outdoor and traffic-related air pollution: a European assessment. Lancet. 356: 795-801

Levy JI, Hammitt JK, Spengler JD (2000) Estimating the mortality impacts of particulate matter: What can be learned from between-study variability? Environ Health Perspect 108(2):109-117

Pope CA III, Thun MJ, Namboodiri MM, Dockery DW, Evans JS, Speizer FE, Heath CW. (1995) Particulate air pollution as a predictor of mortality in a Prospective study of US adults. Am J Respir Crit Care Med 151: 669-674.

Pope CA III, Burnett RT, Thun MJ, Calle EE, Krewski D, Ito K, Thurston GD (2002) Lung cancer, cardiopulmonary mortality, and long-term exposure to fine particulate air pollution. JAMA 287: 1132-1141

Schwartz J (1994) What are people dying of on high air pollution days? Environ Res 64:26-35.

US Environmental Protection Agency. (1996) Air Quality Criteria for Particulate Matter. National Center for Environmental Assessment PTP Reports EPA/600/P-95/001aF-cF.3v. US EPA, Research Triangle Park NC. Also available as PB96-168224 from NTIS, Springfield VA.

US Environmental Protection Agency. (1999) 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.

US Environmental Protection Agency. (2001) Air quality criteria for particulate matter. EPA 600/P-99/002bB. US EPA Office of Research and Development, Washington DC.