

PM₁₀이 소아천식 입원에 미치는 급성 영향 및 건강편익 평가 - 서울, 인천, 부산, 울산 4개 도시를 중심으로 -

배현주 · 김명현* · 이애경** · 박정임***†

한국환경정책평가연구원, *(주)리스크, **국민건강보험공단 건강보험연구원, ***순천향대학교 환경보건학과
(2009. 1. 8. 접수/2009. 1. 23. 수정/2009. 2. 9. 채택)

Acute Effects of PM₁₀ on Asthma Hospitalization Among Children and Benefit Analysis at Four Major Cities in Korea

Hyunjoo Bae · Myung-hyun Kim* · Ae Kyung Lee** · Jeongim Park***†

Korea Environment Institute, 613-2, Bulgwang-dong, Eunpyeong-gu, Seoul 122-706, Korea

*Riskcom, 1104 Gwanyang Doosan Venturedigm, 1307-37, Gwanyang-dong, Dongan-Gu, Anyang-si, Gyeonggi-do 431-060, Korea

**Institute for National Health Insurance, National Health Insurance Corporation, 168-9, Yeomni-dong, Mapo-gu, Seoul 121-470, Korea

***Department of Environmental Health Sciences, Soonchunhyang University, 646 Eupnae-ri, Shinchang-myeon, Asan-si, Chungcheongnam-do 336-745, Korea

(Received January 8, 2009/Revised January 23, 2009/Accepted February 9, 2009)

ABSTRACT

This study assessed the relationships between levels of PM₁₀ and hospitalization rates for asthma among children from 2003 to 2005 at four major cities in Korea. In addition, we estimated the reduced number of asthma hospitalization associated with an ambient PM₁₀ improvement to the acceptable levels as recommended by the World Health Organization (WHO). The Generalized Additive Model (GAM) was used to estimate the relative risks (RR) of asthma hospitalization associated with changes in PM₁₀. The RRs of children's asthma hospitalization for every 10 µg/m³ increment in PM₁₀ were 1.009(95% CI = 1.004-1.014) in Seoul, 1.013(95% CI = 1.006-1.021) in Incheon, 1.009(95% CI = 1.002-1.016) in Busan, and 1.021(95% CI = 1.005-1.037) in Ulsan. We assessed PM₁₀ related health benefits from implementing the WHO's guidelines (24-hour average 50 µg/m³) using the U.S. Environmental Protection Agency's Environmental Benefits Mapping and Analysis Program. The estimated benefits were 439(95% CI = 216-666) reduced asthma hospitalization in Seoul, 720(95% CI = 304-1,151) in Incheon, 260(95% CI = 66-459) in Busan, and 126(95% CI = 30-228) in Ulsan. It was concluded that improving PM₁₀ condition to the WHO guideline would make a significant contribution to the reduction in asthma hospitalization among children. Therefore, public health measures are still needed to improve air quality in Korea.

Keywords: asthma hospitalization, children, PM₁₀, Generalized Additive Model, health benefits, BenMAP

I. 서 론

세계 여러 나라의 도시를 대상으로 대기오염과 건강 영향에 관한 연구가 다양한 연구 설계와 통계적 방법을 적용하여 이루어지고 있다. 대기오염은 사망,^{1,4)} 호흡기계 및 심혈관계 질환으로 인한 입원,^{5,6)} 폐기능 변

화,¹⁰⁾ 응급실 방문,¹¹⁾ 저체중아^{12,13)} 등의 건강영향과 관련이 있는 것으로 보고되고 있다.

대기오염이 영아와 어린이 건강에 특별히 부정적인 영향을 미친다는 연구 결과들도 있다.¹⁴⁻¹⁶⁾ 어린이는 체중에 비해 성인보다 많은 공기를 호흡하며, 성장단계에서 폐 표면적이 작으며, 체중당 산소소모 대사가 높다. 또한 실외에서 많은 시간을 보내기 때문에 환경오염에 보다 많이 노출되며, 면역체계가 약하므로 어린이는 성인보다 대기오염으로 인한 건강위험이 크다.¹⁷⁾

†Corresponding author : Department of Environmental Health Sciences, Soonchunhyang University
Tel: 82-41-530-1269, Fax: 82-41-530-1272
E-mail : jeongim@sch.ac.kr

천식의 유병률은 세계적으로 증가추세에 있으며, 우리나라 역시 천식 유병률이 지속적으로 증가하고 있다. 우리나라의 천식환자수는 2002년 인구 만명당 421명에서 2007년 480명으로 증가하였으며, 전체 천식환자 중에서 어린이 천식환자가 약 50%를 차지하고 있다.¹⁸⁾ 세계보건기구(World Health Organization; WHO)에서는 천식발생의 약 44%가 환경오염 노출에 기인한 것으로 추정하였다.¹⁹⁾ 우리나라에서 대기오염과 어린이 천식에 관한 연구는 서울지역을 대상으로 주로 이루어졌으며,²⁰⁻²³⁾ 서울지역 이외의 다른 도시에 대한 연구는 미진한 실정이다.

많은 역학 연구에서는 대기오염 농도 변화에 따른 다양한 범위의 건강영향 간에 양-반응함수(dose-response function)를 도출하였다. 최근에는 이러한 역학 연구결과들을 활용하여 대기질 개선이 특정인구집단에 얼마나 건강영향을 미치는 지를 정량적으로 산정하는 연구들이 시도되고 있다.²⁴⁻²⁶⁾ 즉, 역학 연구결과에서 도출된 양-반응함수, 대기오염농도의 변화 수준, 건강악영향의 기본 발생율, 그리고 대기오염에 노출되는 인구 수 등 4개 요소를 가지고 건강편익을 산정하게 된다. 산정된 건강편익은 대기질 기준 선정 또는 환경오염의 예방과 관리에 관하여 의사결정자 또는 이해관계자들에게 중요한 자료를 제공한다. 또한 WHO에서는 기존의 독성자료 및 대기오염과 건강영향에 관하여 보고된 방대한 역학자료 등을 검토하여 과학적 증거를 기반으로 대기질 기준(Air Quality Guidelines; AQGs)을 설정하여, 이를 각 국가들에게 권고하고 있다.

본 연구에서는 서울, 인천, 부산, 울산 등 4개 도시에서 15세 미만의 어린이를 중심으로 미세먼지(Particulate Matter less than 10 μm in diameter; PM_{10})가 천식입원에 미치는 영향을 평가하고자, PM_{10} 농도 증가에 따른 일별 천식입원건수의 변화를 정량적으로 산출하였다. 그리고 정량적으로 산출한 PM_{10} 과 소아천식 입원간의 양-반응함수 결과를 이용하여, WHO에서 권고한 대기질 기준인 PM_{10} 24시간 평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 각 도시에서 달성한다고 가정하였을 때 기대되는 소아천식 입원의 건강편익을 추산하였다.²⁷⁾

II. 연구자료 및 방법

본 연구는 서울, 인천, 부산, 울산 지역을 대상으로 15세 미만의 어린이를 중심으로 PM_{10} 이 천식입원에 미치는 영향을 평가하였다. 또한 각 도시별로 PM_{10} 농도 수준이 WHO의 권고기준으로 개선되었을 때 기대되는 건강편익을 추산하였다.

1. 연구대상기간 및 지역

본 연구에서는 2003년 1월부터 2005년 12월까지를 연구기간으로 선정하였으며, 연구대상지역은 서울, 인천, 부산, 울산 지역이다. 대한민국 수도인 서울시는 976만명의 인구가 거주하며, 면적은 약 605 km^2 으로 행정구역은 25개 구로 구성되어 있다. 그리고 인천은 251만명, 부산은 351만명, 울산은 104만명이 거주하고 있어, 전체 인구의 약 35%를 차지하고 있으며, 4개 도시의 면적은 전국토 면적인 99,528 km^2 에서 3.44%만을 차지하고 있었다.

2. 대기오염자료

미세먼지(PM_{10}) 농도자료는 국립환경과학원으로 부터 제공받았다. 서울은 27개, 인천은 9개, 부산은 16개, 울산은 12개의 대기오염 자동 측정소를 운영하고 있다. 각 측정지점에서의 날짜에 따른 시간별 평균값을 산출하고, 각 시간별 평균값을 이용하여 PM_{10} 의 일별 대푯값인 24시간 평균값을 산출하였다.

3. 기상자료

기상청은 전국 76개 지점에 기상대를 운영하며, 서울(위도 37°34', 경도 126°58'), 인천(위도 37°28', 경도 126°38'), 부산(위도 35°06', 경도 129°02'), 울산(위도 35°33', 경도 129°19')은 각각 하나의 기상관측소에서 기상자료를 측정한다. 기상자료는 기상청에서 측정한 기온, 상대습도, 해수면기압 자료를 이용하였다. 기온과 상대습도는 한 시간 마다 측정되며, 해수면기압은 세 시간 마다 측정된다. 기상 변수들의 일별 대푯값은 일별 평균값을 사용하였다.

4. 천식 입원 자료

천식 입원 자료는 국민건강보험공단의 건강보험 청구자료를 이용하였다. 4개 도시의 거주자 기준은 주민등록상의 거주지가 각각 서울, 인천, 부산, 울산인 사람을 대상으로 하였다. 건강보험 청구자료 중에서 진료개시 일자를 기준으로 하여 2003년 1월 1일부터 2005년 12월 31일까지의 청구자료를 추출하였다. 최종 분석 대상은 주상병명 또는 부상병명으로 국제질병분류코드(ICD-10)가 J45(천식) 또는 J46(천식지속상태)이며, 진료형태가 입원인 건강보험 청구자료이다.

질병 에피소드는 '질병의 발생부터 종료(사망, 치료종료, 회복 등)까지 하나의 사건으로 측정하는 단위이다.²⁴⁾ 본 연구에서는 건강보험 청구자료를 천식 입원 청구건수가 아닌 천식입원 에피소드 건수로 가공하여 사용하였다. 즉, 1회 발생한 입원 청구건은 하나의 에

피소드로 정의하였으며, 2회 이상 발생한 입원 청구건의 경우에는 선행 입원 청구건의 입원종료일과 연이은 입원 청구건의 입원개시일의 기간 차이가 0 또는 1일 이면 동일 에피소드로 가공하였다.

5. 통계분석방법

대기오염물질 농도 증가에 따른 일별 천식입원건수의 변화를 정량적으로 산출하고자, 일반화 부가모형 (Generalized additive model; GAM)을 사용하였다.²⁸⁾ 일반화 부가모형은 분석에 영향을 미칠 수 있는 혼란 변수를 비모수적 평활함수로 통제하면서, 포아송 회귀 분석이 적합하도록 한다. 천식입원의 일일변동은 기온, 상대 습도, 요일 등의 변화와 밀접한 관련성이 있다는 여러 연구들⁷⁻⁹⁾에 따라 본 연구에서는 기상변수, 장기추세 및 계절변동 등은 비모수적 평활방법인 locally weighted regression smoothing(LOESS) function을 이용하여 통제하였다. 천식입원에 대한 장기추세, 계절변동, 기온, 습도, 해수면기압, 요일효과 등이 포함된 최종 모형은 다음 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} \ln(\text{Daily hospitalization count}) = & \beta_0 + \beta_1(\text{Pollutant}) \\ & + D(\text{Day of week}) + S_1(\text{Temperature}) \\ & + S_2(\text{Relative humidity}) + S_3(\text{Sea pressure}) \\ & + S_4(\text{Date}) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, S: LOESS 평활함수(smoothing function of loess)
D: 가변수(Dummy variable)

통계모형은 Akaike's information criterion(AIC)가 가장 작은 값을 가지는 모형을 선정하였고,²⁹⁾ 보다 정확한 계수를 추정하기 위하여 Dominici 등이 제시한 강화된 수렴기준(convergence criterion)을 적용하였다.²⁸⁾

그리고 PM₁₀이 천식 입원 발생에 미치는 영향을 평가하는 데 있어서 지연효과(lag effect)를 고려하였다. 천식 입원 당일에서부터 최고 6일 이전까지의 PM₁₀이 천식입원에 미치는 지연효과를 분석하고, 천식 입원과 연관성이 가장 높게 나타난 날을 지연효과 일로 선정하였다.

포아송 회귀분석의 회귀계수는 대기오염물질의 단위 농도 증가가 천식입원환자 발생에 미치는 정도를 나타낸다. 각 오염물질의 계수 β에 오염물질별 단위 농도를 곱한 뒤, 지수를 취해서 각 오염물질의 농도가 단위농도만큼 증가할 때 천식입원에 미치는 상대위해도(Relative Risk; RR)를 구하였다. 상대위해도와 95% 신뢰구간을 구하는 방법은 다음 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} RR(\text{Relative Risk}) &= \exp(AP \times \beta) \\ 95\% \text{Confidence Interval (CI)} &= \\ & \exp(AP \times \beta \pm 1.96 \times AP \times \text{Std.Error}) \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, β: 대기오염물질 농도 변화에 따른 건강 영향의 양-반응함수(Risk coefficient)

AP: 대기오염물질의 단위 농도 증가로 PM₁₀ 10 μg/m³

자료의 정리와 자료를 GAM에 적합시키는 것은 SAS 9.1 version과 S-Plus 6.1 version을 사용하였다.

6. BenMAP을 이용한 건강편익추정

BenMAP(Environmental Benefits Mapping and Analysis Program)은 미국 EPA에서 대기질 변화에 따른 건강상의 편익분석을 수행하기 위하여 개발한 프로그램이다. BenMAP은 미국 국가적인 차원에서 대기질 관련 환경법 또는 규제를 만들 때 정책수립의 근거를 제공하기 위하여 활용되었고, 최근에는 이동/고정 오염원 관리를 위한 정책 개발에도 활용되고 있다.³⁰⁾ BenMAP은 연구대상 지리정보와 인구자료를 입력함으로써 환경오염에 노출되는 대상인구를 계산한다. 또한 대기질 측정자료 또는 대기질 모델링자료를 가지고 분석시나리오에 따라 대기오염 농도값을 시뮬레이션하여 대상인구가 노출되는 환경오염농도를 계산한다. 여기에 기준 발생율과 양-반응함수를 적용하여 환경오염으로 인한 건강피해 또는 건강편익을 산출하게 된다.

대기질 개선으로 기대되는 건강편익은 다음의 4개 요소에 의해서 추산하게 된다. 대기오염물질의 농도 변화에 따른 건강영향 정도의 변화를 평가한 양-반응(Concentration-Response) 함수, 대기오염농도 값의 변화, 건강영향의 기본 발생율 또는 유병률, 그리고 대기오염 농도변화에 노출되는 대상인구수 등의 요소를 다음 식 (3)과 같이 계산한다.^{30,31)}

$$\begin{aligned} \text{Health Impact Function} \\ = (\exp(\text{Beta} \times (\text{Delta Q}) - 1) \times \text{Incidence} \times \text{Pop}) \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, Beta: 대기오염물질 농도 변화에 따른 건강 영향의 양-반응함수

Delta Q: 대기오염물질 농도값의 변화

Incidence: 대상 질병(또는 사망)의 기준 발생률 또는 유병률 또는 발병률

Pop: 대기오염물질에 노출되는 인구수

대기오염 농도 변화와 건강영향 간의 양-반응함수인 Beta 값을 GAM을 이용하여 PM₁₀ 농도 증가에 따른

천식입원영향을 시계열 분석한 결과인 Risk coefficient 값이다.

대기오염물질의 농도변화값을 추정하기 위하여, 각 도시의 2006년 대기오염 측정망 농도값이 WHO의 권고 기준을 달성하도록 PM₁₀ 농도 값을 구별로 시뮬레이션 하였다. 즉, 대기질 개선 정책이 모든 지역에서 동일하게 효과를 나타낸다고 가정하고, 모든 측정값이 동일한 비율로 감소하도록 PM₁₀ 농도를 시뮬레이션하였다.

소아천식 입원 에피소드 발병률은 2003년부터 2005년까지 3년 동안 천식 입원 에피소드를 근거로 하여 평균 발병률을 산출하여 적용하였다. 각 도시의 발병률은 인구10만명당 서울은 599건, 인천은 716건, 부산은 886건, 울산은 595건이었다. PM₁₀ 농도 변화에 노출되는 인구수는 통계청의 2005년 주민등록상의 15세 미만 어린이 인구분포자료를 이용하였다.

III. 연구결과

1. 기술 통계 분석

대기오염변수, 기상변수 및 일별 천식 입원 에피소드

건수의 평균값, 표준편차 및 분포를 Table 1에 나타내었다. 연구기간동안 PM₁₀의 일평균 농도는 서울은 62.65 µg/m³이었으며, 인천, 부산, 울산은 각각 61.34 µg/m³, 57.73 µg/m³, 46.37 µg/m³이었다. 2003년부터 2005년 까지 서울시의 연평균 농도는 각각 70 µg/m³, 69 µg/m³, 58 µg/m³으로 감소하는 경향을 보였으며, 울산시의 연평균 농도는 39-50 µg/m³로 4개 도시 중에서 가장 낮은 농도 값을 나타내었다.

총 연구기간인 1,096일 중에서 대기환경기준인 PM₁₀ 24시간 평균 100 µg/m³을 초과한 일수는 서울이 128일(11.68%)이었다. 그리고 인천, 부산, 울산에서 PM₁₀ 24시간 평균 100 µg/m³을 초과한 일수는 각각 109일(9.95%), 63일(5.84%), 16일(1.46%)이었다.

2003년부터 2005년까지 15세 미만 어린이의 도시별 일별 평균 천식 입원 에피소드는 서울이 24건, 인천이 11건, 부산이 15건, 울산이 4건이었다.

연구기간 동안 연도별 지역별 천식 입원 에피소드 건수는 Table 2와 같다. 서울시 거주자에서 천식 입원 에피소드건수는 총 46,647건이 발생하였으며, 이중에서 15세 미만 연령군에서 25,962건으로 전체 천식 입원 에

Table 1. Daily distribution of PM₁₀, weather, and asthma hospitalization cases between 2003 and 2005 in Seoul, Incheon, Busan and Ulsan

Variable	City	Percentiles					Mean	SD
		Min	25%	Median	75%	Max		
Exposure measurement								
PM ₁₀ (µg/m ³)	Seoul	10.34	38.73	55.84	78.83	288.22	62.65	33.79
	Incheon	15.47	39.90	54.63	76.20	207.04	61.34	28.89
	Busan	16.97	40.77	52.30	70.08	175.98	57.73	23.24
	Ulsan	10.75	32.74	42.02	55.59	131.09	46.37	18.18
Weather								
Temperature (°C)	Seoul	-14.00	4.13	14.15	21.68	30.43	12.71	10.07
	Incheon	-12.64	4.41	13.82	21.32	30.03	12.56	9.62
	Busan	-6.71	7.80	15.55	21.03	28.91	14.40	8.09
	Ulsan	-6.75	6.70	15.63	21.56	30.60	14.50	8.68
Humidity (%)	Seoul	21.08	51.21	62.77	74.00	95.79	62.79	14.89
	Incheon	27.79	54.75	65.81	77.15	95.33	65.81	14.88
	Busan	16.38	45.98	63.82	77.23	97.00	61.63	18.84
	Ulsan	17.54	45.38	61.17	75.28	92.25	58.94	17.39
Pressure at sea level (hPa)	Seoul	994	1010	1016	1023	1036	1016	8
	Incheon	993	1010	1016	1023	1035	1016	8
	Busan	992	1010	1016	1021	1035	1016	7
	Ulsan	993	1010	1016	1021	1035.44	1016	7
Health outcome								
Asthma Hospitalization (episode cases)	Seoul	2	14	22	31	82	24	13
	Incheon	1	5	9	14	37	11	6
	Busan	0	8	14	20	54	15	9
	Ulsan	0	2	3	6	17	4	3

Table 2. Number of asthma hospitalization cases between 2003 and 2005 in Seoul, Incheon, Busan and Ulsan

City	2003 yr		2004 yr		2005 yr		2003-2005 yr	
	All age	0-14 age	All age	0-14 age	All age	0-14 age	All age	0-14 age
Seoul	14,741	8,110	15,091	8,158	16,815	9,694	46,647	25,962
Incheon	5,284	3,266	6,063	3,998	6,039	3,651	17,386	10,915
Busan	9,764	6,160	8,212	4,768	9,220	5,457	27,196	16,385
Ulsan	2,451	1,512	2,431	1,369	2,534	1,440	7,416	4,321

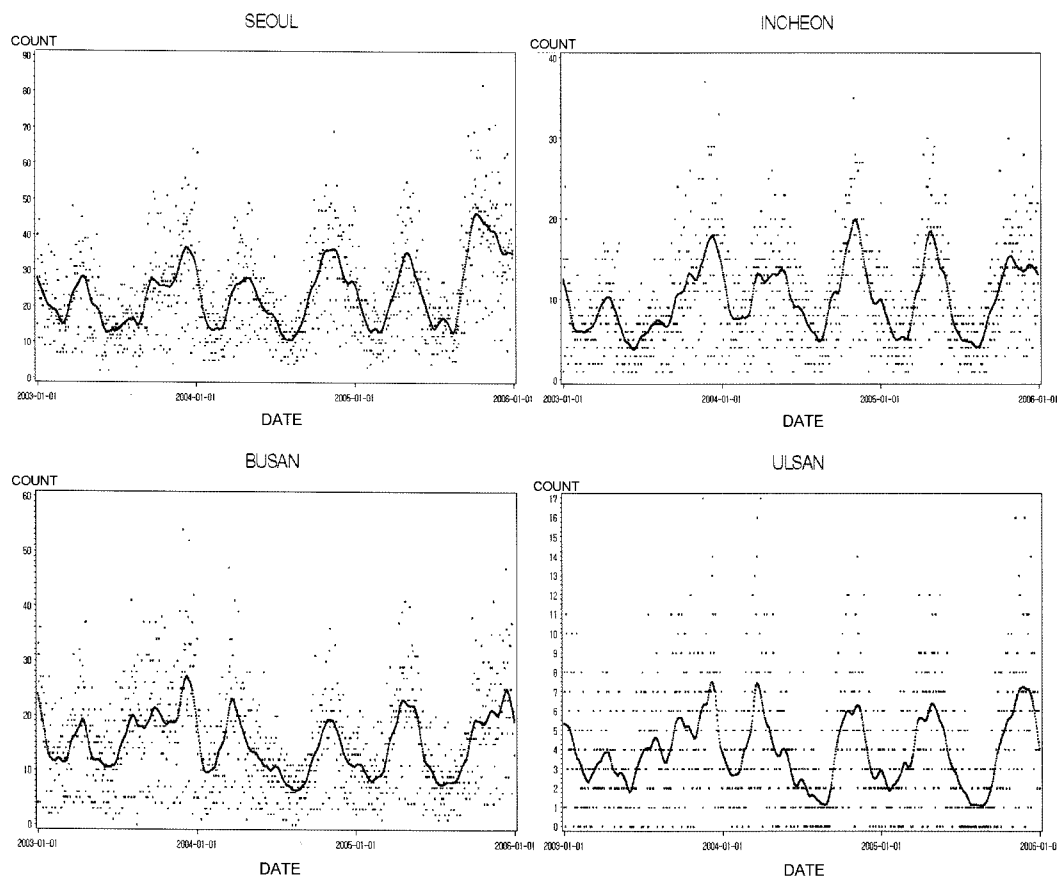


Fig. 1. Daily distribution of asthma hospitalization cases among children between 2003 and 2005 in Seoul, Incheon, Busan and Ulsan.

피소드건수의 55.66%를 차지하였다. 또한 인천시, 부산시, 울산시 거주자에서 전체 연령에서 천식 입원 에피소드는 중 15세 미만 연령군이 각각 62.75%, 60.25%, 58.27%를 차지하였다. 4개 도시에서 전체 천식 입원 에피소드건수에서 15세 미만 연령군의 천식입원이 55.66-62.75%를 차지하고 있으며, 이는 소아천식의 심각성을 보여주는 것이다.

4개 도시의 소아천식 입원 에피소드 건수에 대한 일별 분포를 Fig. 1에 나타내었다. 천식 입원 에피소드의 일별 추세를 관찰한 결과 뚜렷한 계절적 변동 추세를

보였으나, 장기적인 추세 변동은 관찰할 수 없었다. 다만 서울시의 경우 15세 미만 연령군에서 연도별 천식 입원 에피소드는 2003년과 2005년에 각각 8,110건과 9,694건으로, 2003년 대비 2005년에 19.53%가 증가하였다.

2. PM₁₀이 소아천식 입원에 미치는 영향 분석

PM₁₀ 농도 증가에 따른 소아천식 입원의 상대 위해도(Relative Risks, RR)를 분석하였다. 대기오염의 건강 영향을 평가하는 데 있어 지연효과를 고려하였으며, 천

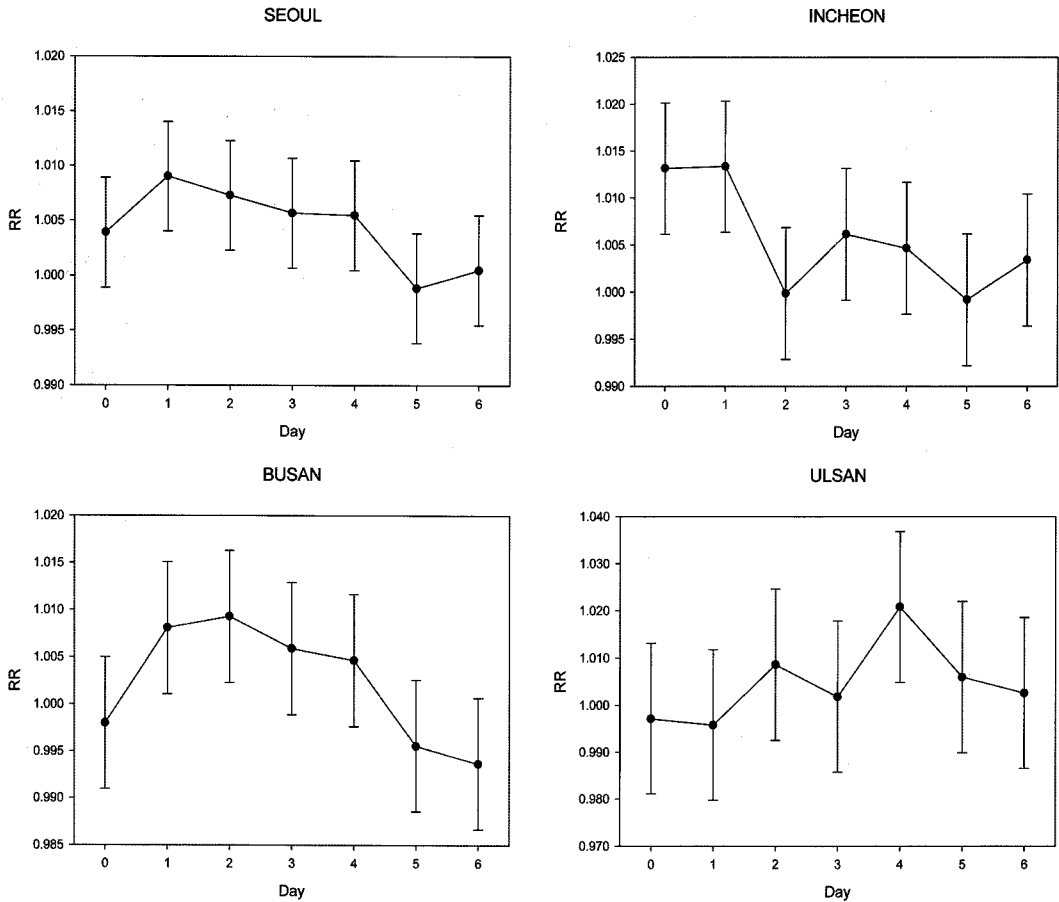


Fig. 2. Lag effects on the relative risks (RR) and 95% confidence intervals (CI) for asthma hospitalization among children for every 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in PM_{10} in Seoul, Incheon, Busan, and Ulsan.

Table 3. Relative risks and 95% confidence intervals for asthma hospitalization among children for every 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ increase in PM_{10}

City	Risk Coefficient	Standard Error	Relative Risk	95% Confidence Interval
Seoul	0.000897921	0.000230276	1.009	1.004 - 1.014
Incheon	0.001305587	0.000377403	1.013	1.006 - 1.021
Busan	0.000923633	0.000348852	1.009	1.002 - 1.016
Ulsan	0.002058694	0.000797960	1.021	1.005 - 1.037

식 입원과 가장 높은 관련성을 보이는 날을 지연효과 일로 선정하였다(Fig. 2). 서울과 인천의 경우 1일전(lag1)의 PM_{10} 농도와 소아천식 입원간의 관련성이 높은 것으로 평가되었다. 또한 부산의 경우 2일전(lag2)의 PM_{10} 농도가 천식입원에 가장 크게 영향을 나타내는 것으로 평가되었다. 다른 도시들과 달리 울산의 경우는 4일전(lag4)의 PM_{10} 농도와 소아천식 입원간의 관련성이 높은 것으로 나타났다.

PM_{10} 농도 증가가 소아천식 입원 위험에 미치는 영

향을 살펴보면, 4개 도시에서 모두 PM_{10} 농도의 증가는 통계적으로 유의하게 소아천식 입원 위험을 높였다(Table 3). PM_{10} 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 서울의 소아천식 입원 위험은 0.9%(RR=1.009, 95% Confidence Interval(CI)=1.004-1.014) 증가하였고, 인천의 소아천식 입원 위험은 1.3%(RR=1.013, 95% CI=1.006-1.021) 증가하였다. 부산과 울산에서는 PM_{10} 농도 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가시 소아천식 입원 위험이 각각 0.9%(RR=1.009, 95% CI=1.002-1.016)과 2.1%(RR=1.021, 95% CI=

1.005-1.037) 증가하였다.

3. PM₁₀ 농도의 시뮬레이션

소아천식 입원의 건강편익을 추정하기 위하여, 서울, 인천, 부산, 울산의 2006년도 PM₁₀ 농도 수준이 WHO AQGs인 PM₁₀ 24시간 평균 농도 50 µg/m³을 달성하도록 각 도시의 구별 PM₁₀ 농도값을 시뮬레이션 하였다(Table 4). 즉, WHO의 권고기준을 달성하도록 2006년 대기오염 측정망의 PM₁₀ 매시간별 측정값들을 각각 일정한 비율로 감소시켜 시간별 목표 농도값을 산출하였다. 그리고 PM₁₀의 2006년의 기준 농도값과 목표 농도 사이의 차이를 계산하였으며, 이 농도 차이값이 연구대상인구들이 노출되는 PM₁₀ 농도값의 변화이다.

서울의 경우 2006년 PM₁₀ 연평균 농도의 구별분포는 53.23-63.92 µg/m³이었다. PM₁₀ 24시간 평균 농도 50 µg/m³를 달성하도록 PM₁₀ 농도값을 시뮬레이션 시키면 PM₁₀의 연평균 농도의 구별 분포는 5.34-9.10 µg/m³이 된다. 따라서 2006년 PM₁₀ 농도값과 WHO의 AQGs를 달성하였을 때의 PM₁₀ 농도 차이값의 연평균 구별 분포는 46.23-55.56 µg/m³이다. 2006년 PM₁₀ 농도 수준이 가장 높았던 인천의 경우 PM₁₀ 농도 차이값의 연평균 구별 분포는 57.72-67.30 µg/m³이었으며, 2006년 PM₁₀ 농도 수준이 가장 낮았던 울산의 경우 PM₁₀ 농도 차이값의 연평균 구별 분포는 37.90-45.83 µg/m³이었다.

4. PM₁₀ 농도 개선에 따른 소아천식 입원의 건강편익추정
대기질 개선으로 기대되는 건강편익은 대기오염에 노

출되는 인구크기, 기준 발병률, 대기오염의 농도변화에 따른 건강영향간의 양-반응함수, PM₁₀의 목표농도와 현재농도와의 차이 등 4가지 요소에 의해 결정된다. 본 연구에서 양-반응함수는 PM₁₀과 천식입원간의 시계열 분석 결과(Risk Coefficient)를 적용하였고, PM₁₀ 농도 차이값은 2006년 농도를 WHO AQGs를 달성하도록 시뮬레이션하여 추산한 값을 적용하였다.

서울, 인천, 부산, 울산의 2006년도 PM₁₀ 농도 수준이 WHO의 AQGs인 PM₁₀ 24시간 평균 농도 50 µg/m³으로 대기질이 개선되었을 경우, PM₁₀ 농도와 소아천식 입원간의 양-반응함수를 적용하여 산출한 소아천식 입원의 건강편익 추정 결과는 Table 5와 같다.

서울시의 2006년 PM₁₀ 연평균 농도는 60 µg/m³이며, 24시간 일평균 농도가 50 µg/m³을 초과하는 일수가 193일(52.88%)이었다. WHO의 PM₁₀ 권고기준 농도 달성시, 서울시 구별로 PM₁₀ 연평균 농도는 46.23-55.56 µg/m³ 감소하게 되며, 이에 따라 연간 총 439건(95% CI = 216-666)의 천식입원 에피소드 건수가 감소하는 것으로 추산되었다. 인천시의 2006년 PM₁₀ 연평균 농도는 67 µg/m³으로 4개 도시 중에서 가장 높았으며, PM₁₀ 24시간 일평균 농도가 50 µg/m³을 초과하는 일수가 223일로 1년 중 61.10%가 WHO AQGs를 초과하였다. PM₁₀ 농도개선으로 인하여 연간 총 720건(95% CI = 304-1,151)의 소아천식 입원이 감소하는 건강편익이 발생할 것으로 추정되었다.

부산시의 PM₁₀ 연평균 농도는 59 µg/m³이며, 24시간 일평균 농도가 50 µg/m³을 초과 일수는 190일(52.05%)이었다. WHO AQGs를 달성하여 PM₁₀ 연평균 농도가

Table 4. Ranges of current annual average of PM₁₀, control PM₁₀ conditions with rollback to the WHO Air Quality Guidelines (50 µg/m³ 24-h average), and the changes in population exposure (unit : µg/m³)

City	Annual average of PM ₁₀ in 2006	Annual average of PM ₁₀ from attaining the WHO guideline	Decrement in annual average of PM ₁₀
Seoul	53.23 - 63.92	5.34 - 9.10	46.23 - 55.56
Incheon	64.27 - 72.62	5.32 - 7.18	57.72 - 67.30
Busan	52.21 - 71.88	5.95 - 9.41	43.90 - 62.47
Ulsan	45.47 - 53.67	6.98 - 8.12	37.90 - 45.83

Table 5. Estimated reduction by cities in asthma hospitalization among children from reduction in PM₁₀ to the WHO AQGs (50 µg/m³ 24-h average) (unit : cases/year)

City	Number of children	Asthma hospitalization avoided	95% Confidence Interval	Asthma hospitalization avoided per 100,000
Seoul	1,619,296	439	216 - 666	28 (14 - 42)
Incheon	510,197	720	304 - 1,151	142 (60 - 226)
Busan	581,111	260	66 - 459	45 (12 - 79)
Ulsan	231,322	126	30 - 228	55 (13 - 99)

구별로 43.90-62.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 감소하게 되면, 연간 총 260건(95% CI = 66-469)의 천식입원 에피소드 건수가 감소하는 것으로 추산되었다. 울산시의 2006년 PM_{10} 연평균 농도는 52 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며, 24시간 일평균 농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 일수가 145일(40.00%)으로 PM_{10} 오염농도수준이 4개 도시 가운데 가장 낮은 것으로 나타났다. PM_{10} 농도개선에 따른 소아천식 입원의 건강 편익은 연간 총 126건(95% CI = 30-228)으로 추정되었다.

그리고 건강편익의 결과를 15세 미만 어린이 인구 10만명으로 환산한 경우 천식 입원 에피소드 감소의 결과는 서울 28건(95% CI 14-42), 인천 142건(95% CI 14-42), 부산 45건(95% CI 12-79), 울산 55건 (95% CI 13-99)으로 나타났다.

IV. 고찰 및 결론

우리는 서울, 인천, 부산, 울산 등 4개 도시에서 PM_{10} 이 어린이의 천식입원에 미치는 영향을 평가하였다. PM_{10} 농도 증가에 따른 어린이 천식입원의 변화를 각 도시별로 정량적으로 산출하였다. 도출된 양-반응 함수를 이용하여 각 도시별로 PM_{10} 농도수준이 WHO AQGs인 PM_{10} 24시간 평균 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 개선된다고 가정했을 때 어린이 천식입원이 얼마나 줄어들 것인지를 예측하였다.

시계열 분석 결과, 4개 도시에서 모두 PM_{10} 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가함에 따라 소아천식 입원위험이 0.9~2.1% 통계적으로 유의하게 증가하였다. 4개 도시 가운데 인천과 울산지역에서 PM_{10} 농도가 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 소아천식 입원위험이 각각 1.3%와 2.1% 증가하여 서울과 부산 지역에 비하여 높게 나타났다. 이는 현행 대기오염수준이 우리나라 대기환경기준을 충족하고 있더라도 여전히 PM_{10} 농도 수준은 소아천식 입원에 심각한 영향을 미치고 있음을 보여준다. 1997년부터 1999년까지 서울지역 15세 미만 소아천식 입원을 시계열 분석한 이종태 등의 연구 결과에서는 PM_{10} 농도가 40.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 소아천식 입원위험이 7.0%(95% CI = 4.0-11%) 높아진다고 보고하였다.²⁰⁾ 이는 본 연구 결과 값보다는 다소 높은 값을 보였으나 일관된 결과를 나타내었다. 캐나다 토론토의 6-12세 어린이를 대상으로 한 연구에서는 PM_{10} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 남자 어린이의 천식 입원 위험이 0.7%, 여자 어린이의 천식 입원 위험이 4.7% 증가하였으나, 통계적으로 유의하지는 않았다.³²⁾ 또한 APHEA 2 project(Air Pollution and Health : a European Approach)는 유럽 8개 도시에서 PM_{10} 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가 시 0-14세 소아천식 입원 위험이

1.2% 증가한다고 보고한 바 있다.⁷⁾

대기질 개선에 따른 건강편익을 분석하기 위해서는 대기오염물질의 단위 농도 증가에 따른 건강영향의 변화인 양-반응함수가 필요하다. 양-반응함수는 대기오염물질의 농도수준, 대기오염물질의 조성과 특성, 기상이나 지형조건, 대기오염에 노출되는 인구집단의 민감도 등에 따라 달라진다. 그러므로 다른 국가 또는 다른 도시에서 개발된 양-반응함수를 적용하여 건강편익을 분석하는 것에 대해서는 타당성에 의문이 제기되고 있다.³³⁾ 따라서 본 연구에서는 서울, 인천, 부산, 울산 4개 도시 지역에 대해 각각의 PM_{10} 농도변화에 따른 소아천식 입원의 양-반응함수를 개발하였고, 각 도시의 양-반응함수를 적용하여 PM_{10} 농도 개선에 따른 건강편익을 산출하였다.

본 연구에서 추정된 건강편익의 결과는 몇 가지 불확실성을 지니고 있다. 첫째, 건강편익은 PM_{10} 과 어린이 천식입원 발생 사이의 관계를 보여주는 양-반응 함수를 얼마나 정확하게 만들어내느냐가 결과의 불확실도에 영향을 미친다. 또한 PM_{10} 의 조성이 지역에 상관없이 모두 동일하다고 가정한 점이 지역별 건강영향의 차이에 불확실도를 증가시켰을 것이다. 둘째, WHO AQGs를 도달했을 때 농도를 시뮬레이션하는 과정에서 모든 지역에 동일한 비율로 PM_{10} 농도를 줄어든게 한 것과 현재 농도를 2006년 한 해에 국한하여 적용한 점 역시 건강편익 예측 결과의 불확실성에 기여하였다. 이러한 불확실성은 건강편익 연구에서 불가피한 것으로 연구 결과를 해석하고 활용할 때 유의해야 할 것이다.

서울, 인천, 부산, 울산의 4개 도시에서 2006년도 PM_{10} 농도수준이 WHO의 AQGs인 PM_{10} 24시간 평균 농도 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성한다고 가정하였을 때의 건강편익결과를 산출하였다. 15세 미만 어린이 인구 10만명으로 환산하면, 천식 입원 에피소드 감소의 결과는 인천에서 142건(95% CI 14-42), 울산 55건(95% CI 13-99), 부산 45건(95% CI 12-79), 서울 28건(95% CI 14-42) 순으로 나타났다. 인천에서 건강편익이 가장 높게 나타난 것은 기준연도인 2006년의 PM_{10} 농도가 다른 도시에 비하여 상당히 높았으며, 천식 입원 발병률과 양-반응함수가 높은 것에 기인한 것으로 판단된다. 울산에서는 PM_{10} 농도수준이 가장 낮았음에도 불구하고 PM_{10} 단위 농도 증가에 따른 천식입원간의 양-반응함수가 다른 도시보다 높아 대기질 개선으로 인한 편익이 높은 것으로 나타났다. 공단이 위치하고 있는 울산과 인천지역에서 PM_{10} 과 천식입원의 양-반응함수가 높은 것을 고려할 때 향후 이들 지역에 대한 PM_{10} 조성 및 특성에 대한 고찰이 필요하다.

Ostro 등은 미국의 1994-1996년 PM₁₀ 농도 수준이 연평균 25 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 달성하도록 PM₁₀ 농도가 개선되면, 이로 인하여 조기사망 7200건, 호흡기계 입원 3300건, 심혈관계 입원 1200건이 감소한다고 건강편익을 추산하였다.³⁵⁾ 그리고 미국의 2010년 목표 대기질 기준 목표달성에 따른 어린이의 건강편익을 산출한 연구에서는, 대기질 개선으로 조산아 사망 200명, 소아천식 입원 10,000명, 소아 병원 응급실 방문 40,000명, 저체중아 10,000명을 줄일 수 있다고 추산하였다.³³⁾ 본 연구에서는 PM₁₀으로 인한 소아천식 입원에 한정하여 건강편익을 산출하였다. 대기질 개선으로 인한 총체적인 건강편익을 평가하기 위해서는, 대기오염물질과의 관련성이 규명된 사망, 호흡기계 입원, 심혈관계 입원, 병원응급실 방문, 결석 등의 관련 건강영향을 고려하여야 한다. 다양한 건강영향을 평가하기 위해서는 대기오염물질과 각 건강영향에 관한 양-반응함수가 필요하다. 따라서 우리나라에서 대기질 개선에 따른 건강영향을 포괄적으로 분석하기 위해서는 향후에 대기오염물질과 다양한 범위의 건강영향간의 양-반응 함수가 개발되어야 한다.

미국의 대기청정법(Clean Air Act)에서는 국가 대기질 기준이 어린이, 노약자, 호흡기질환자 등과 같은 취약한 인구집단을 보호할 수 있는 수준으로 설정되어야 한다고 규정하고 있다. 또한 대기질 기준을 개정할 경우 규제영향평가(Regulatory Impact Assessment)를 수행하도록 하고 있으며, 규제영향평가에서는 대기질 기준 개정에 따른 건강 측면에서의 비용편익분석을 실시하도록 하고 있다.³⁴⁾ 이에 비하여 우리나라 환경정책기본법에서는 환경기준 설정시 고려해야 할 기준이나, 기준을 설정하는 절차에 관하여 별도의 규정을 두고 있지 않다. 환경보건 종합계획의 기본 원칙중의 하나인 환경오염에 민감하거나 취약한 계층을 우선 보호하기 위해서는, 민감 또는 취약계층을 고려한 환경기준 마련과 대기관리가 필요하다. 배현주 등의 연구³⁶⁾에서는 대기오염과 천식 입원간의 상관성을 연령군별로 살펴보았으며, 연구결과 15세 미만 연령군과 65세 이상 연령군에서 대기오염농도 증가에 따른 천식 입원 위험이 다른 연령군에 비해 상대적으로 더 높은 것으로 보고하였다.³⁶⁾

본 연구 결과는 대기오염농도 개선에 따른 절대적인 건강편익 결과값을 제공한다기 보다는 건강편익 규모 수준에 근거하여 PM₁₀으로 인한 어린이 건강영향의 중요성에 대한 정보를 제시한다. 대기오염에 의한 건강위해성에 대한 관심이 높아짐에 따라 대기오염으로 인한 건강영향과 건강편익에 대한 정량적인 평가는 환경보

건학적으로 필요할 뿐만 아니라, 대기환경기준의 적합성 평가 또는 보다 효과적인 환경개선 정책의 선정 등 사회적 정책적 필요를 충족시키는데 매우 유용한 토대가 될 수 있다.

참고문헌

1. Katsouyanni, K., Touloumi, G., Spix, C., Schwarte, J., Balducci, F., Medina, S., Rossi, G., Wojtyniak, B., Sunyer, J., Bacharova, L., Schouten, J. P., Ponka, A. and Anderson, H. R. : Short-term effects of ambient sulphur dioxide and particulate matter on mortality in 12 European cities: results from time series data from the APHEA project. *British Medical Journal*, **314**(7095), 1658-1663, 1997.
2. Dominici, F., McDermott, A., Daniels, M., Zeger, S. L. and Samet, J. M. : Revised analyses of the National Morbidity, Mortality, and Air Pollution Study: mortality among residents of 90 cities. *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, **68**(13-14), 1071-1092, 2005.
3. Peng, R. D., Dominici, F., Pastor-Barriuso, R., Zeger, S. L. and Samet, J. M. : Seasonal analyses of air pollution and mortality in 100 US cities. *American Journal of Epidemiology*, **161**(6), 585-594, 2005.
4. Cho, Y. S., Lee, J. T., Son, J. Y. and Kim, Y. S. : A Meta-analysis of air pollution in relation to daily mortality in seven major cities of Korea, 1998-2001. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(4), 304-315, 2006.
5. Schwartz, J. : Air pollution and hospital admissions for heart disease in eight U.S. counties. *Epidemiology*, **10**(1), 17-22, 1999.
6. Anderson, H. R., Ponce de Leon, A., Bland, J. M., Bower, J. S., Emberlin, J. and Strachan, D. P. : Air pollution, pollens, and daily admissions for asthma in London 1987-92. *Thorax*, **53**(10), 842-848, 1998.
7. Atkinson, R. W., Anderson, H. R., Sunyer, J., Ayres, J., Baccini, M., Vonk, J. M., Boumghar, A., Forastiere, F., Forsberg, B., Touloumi, G., Schwartz, J. and Katsouyanni, K. : Acute effects of particulate air pollution on respiratory admissions: results from APHEA 2 project. Air Pollution and Health: a European Approach. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **164**(10), 1860-1866, 2001.
8. Zanobetti, A., Schwartz, J. and Dockery, D. W. : Airborne particles are a risk factor for hospital admissions for heart and lung disease. *Environmental Health Perspectives*, **108**(11), 1071-1077, 2000.
9. Dominici, F., Peng, R. D., Bell, M. L., Pham, L., McDermott, A., Zeger, S. L. and Samet, J. M. : Fine particulate air pollution and hospital admission for cardiovascular and respiratory diseases. *Journal of the American Medical Association*, **295**(10), 1127-1134, 2006.
10. Yu, S. D., Cha, J. H., Kim, D. S. and Lee, J. T. :

- Effects of fine particles on pulmonary function of elementary school children in Ulsan. *Korean Journal of Environmental Health*, **33**(5), 365-371, 2007.
11. Wilson, A. M., Wake, C. P., Kelly, T. and Salloway, J. C. : Air pollution, weather, and respiratory emergency room visits in two northern New England cities: an ecological time-series study. *Environmental Research*, **97**(3), 312-321, 2005.
 12. Bell, M. L., Ebisu, K. and Belanger, K. : Ambient air pollution and low birth weight in Connecticut and Massachusetts. *Environmental Health Perspectives*, **115**(7), 1118-1124, 2007.
 13. Cho, Y. S., Son, J. Y. and Lee, J. T. : Air pollution exposure and low birth weight of firstborn fetus: A birth cohort study in Seoul, 1999-2003. *Korean Journal of Environmental Health*, **33**(4), 227-234, 2007.
 14. Bobak, M. and Leon, D. A. : The effect of air pollution on infant mortality appears specific for respiratory causes in the postneonatal period. *Epidemiology*, **10**(6), 666-670, 1999.
 15. Schwartz, J. : Air pollution and children's health. *Pediatrics*, **113**(4 Suppl), 1037-1043, 2004.
 16. Lin, M., Stieb, D. M. and Chen, Y. : Coarse particulate matter and hospitalization for respiratory infections in children younger than 15 years in Toronto: a case-crossover analysis. *Pediatrics*, **116**(2), 235-240, 2005.
 17. Salvi, S. : Health effects of ambient air pollution in children. *Paediatric Respiratory Reviews*, **8**(4), 275-280, 2007.
 18. National Health Insurance Corporation : Statistical analysis in health insurance, 2008.
 19. World Health Organization : Preventing disease through healthy environments, 2006.
 20. Lee, J. T., Kim, H., Song, H., Hong, Y. C., Cho, Y. S., Shin, S. Y., Hyun, Y. J. and Kim, Y. S. : Air pollution and asthma among children in Seoul, Korea. *Epidemiology*, **13**(4), 481-484, 2002.
 21. Lee, J. T. : Association between air pollution and asthma-related hospital admissions in children in Seoul, Korea: A Case-crossover study. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, **36**(1), 47-53, 2003.
 22. Kim, S. Y., Kim, H. and Kim, J. : Effects of air pollution on asthma in Seoul : Comparisons across subject characteristics. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, **39**(4), 309-316, 2006.
 23. Son, J. Y., Kim, H., Lee, J. T. and Kim, S. Y. : Relationship between the exposure to ozone in Seoul and the childhood asthma-related hospital admissions according to the socioeconomic status. *Journal of Preventive Medicine and Public Health*, **39**(1), 81-86, 2006.
 24. Hubbell, B. J., Hallberg, A., McCubbin, D. R. and Post, E. : Health-related benefits of attaining the 8-hr ozone standard. *Environmental Health Perspectives*, **113**(1), 73-82, 2005.
 25. Ostro, B. and Chestnut, L. : Assessing the health benefits of reducing particulate matter air pollution in the United States. *Environmental Research*, **76**(2), 94-106, 1998.
 26. Bell, M. L., Davis, D. L., Gouveia, N., Borja-Aburto, V. H. and Cifuentes, L. A. : The avoidable health effects of air pollution in three Latin American cities: Santiago, São Paulo, and Mexico City. *Environmental Research*, **100**(3), 431-440, 2006.
 27. World Health Organization : WHO air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen, dioxide and sulfur dioxide, 2005.
 28. Dominici, F., McDermott, A., Zeger, S. L. and Samet, J. M. : On the use of generalized additive models in time-series studies of air pollution and health. *American Journal of Epidemiology*, **156**(3), 193-203, 2002.
 29. Akaike, K. : Information theory and an extension of the maximum likelihood principle, 1973.
 30. Davidson, K., Hallberg, A., McCubbin, D. and Hubbell, B. : Analysis of PM_{2.5} using the Environmental Benefits Mapping and Analysis Program (BenMAP). *Journal of Toxicology and Environmental Health. Part A*, **70**(3-4), 332-346, 2007.
 31. Park, J. I. and Bae, H. J. : Assessing the health benefits of the seoul air quality management plan using BenMAP. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(6), 571-577, 2006.
 32. Lin, M., Chen, Y., Burnett, R. T., Villeneuve, P. J. and Krewski, D. : The influence of ambient coarse particulate matter on asthma hospitalization in children: case-crossover and time-series analyses. *Environmental Health Perspectives*, **110**(6), 575-581, 2002.
 33. Bell, M. L., Davis, D., Cifuentes, L., Cohen, A., Gouveia, N., Grant, L., Green, C., Johnson, T., Rogat, J., Spengler, J. and Thurston, G. : International expert workshop on the analysis of the economic and public health impacts of air pollution: workshop summary. *Environmental Health Perspectives*, **110**(11), 1163-1168, 2002.
 34. Wong, E. Y., Gohlke, J., Griffith, W. C., Farrow, S. and Faustman, E. M. : Assessing the health benefits of air pollution reduction for children. *Environmental Health Perspectives*, **112**(2), 226-232, 2004.
 35. Environmental Protection Agency : The Benefits and Costs of the Clean Air Act Amendments of 1990-2010, 1999.
 36. Bae, H. J., Ha, J. S., Lee, A. K. and Park, J. I. : Age dependencies in air pollution-associated asthma hospitalization. *Korean Journal of Environmental Health*, **34**(2), 124-130, 2008.