

봄철 미세먼진이 북경시 아동 폐기능에 미치는 급성영향에 관한 연구

김대선 · 유승도 · 차정훈[†] · 안승철 · 차준석*

국립환경연구원 환경위해성연구부 환경역학과, *중국환경과학연구원 대기환경연구소

A Study on the Acute Effects of Fine Particles on Pulmonary Function of Schoolchildren in Beijing, China

Dae Seon Kim · Seung Do Yu · Jung Hoon Cha[†] · Seung Chul Ahn · Jun Seok Cha*

Environmental Epidemiology Division, Environmental Risk Research Department, National Institute of Environmental Research

*Atmospheric Environmental Institute, Chinese Research Academy of Environmental Sciences

(Received April 6, 2004; Accepted June 22, 2004)

ABSTRACT

To evaluate the acute effects of fine particles on pulmonary function, a longitudinal study was conducted. This study was carried out for the schoolchildren (3rd and 6th grades) living in Beijing, China. Each child was provided with a mini-Wright peak flow meter and a preformatted health symptom diary for 40 days, and was trained on their proper use. Participants were instructed to perform the peak flow test three times in standing position, three times a day (9 am, 12 pm, and 8 pm), and to record all the readings along with the symptoms (cold, cough, and asthmatic symptoms) experienced on that day. Daily measurement of fine particles (PM₁₀ and PM_{2.5}) was obtained in the corner of the playground of the participating elementary school for the same period of this longitudinal study. The relationship between daily peak expiratory flow rate (PEFR) and fine particle levels was analyzed using a mixed linear regression models including gender, height, the presence of respiratory symptoms, and daily average temperature and relative humidity as extraneous variables. The total number of students participating in this longitudinal study was 87. The range of daily measured PEFR was 253~501 l/min. In general, the PEFR measured in the morning was lower than the PEFR measured in the evening (or afternoon) on the same day. The daily mean concentrations of PM₁₀ and PM_{2.5} over the study period were 180.2 µg/m³ and 103.2 µg/m³, respectively. The IQR (inter-quartile range) of PM₁₀ and PM_{2.5} were 91.8 µg/m³ and 58.0 µg/m³. During the study period, the national ambient air quality standard of 150 µg/m³ (for PM₁₀) was exceeded in 23 days (57.5%). The analysis showed that an increase of 1 µg/m³ of PM₁₀ corresponded to 0.59 µg/m³ increment of PM_{2.5}. Daily mean PEFR was regressed with the 24-hour average PM₁₀ (or PM_{2.5}) levels, weather information such as air temperature and relative humidity, and individual characteristics including gender, height, and respiratory symptoms. The analysis showed that the increase of fine particle concentrations was negatively associated with the variability in PEFR. The IQR increments of PM₁₀ or PM_{2.5} (at 1-day time lag) were also shown to be related with 1.54 l/min (95% Confidence intervals: 0.94~2.14) and 1.56 l/min (95% CI: 0.95~2.16) decline in PEFR.

Keywords: PM₁₀, PM_{2.5}, health effect, peak expiratory flow rate

I. 서 론

대기오염은 국지적인 환경문제에 그치지 않고, 장거

리로 이동, 확산되기 때문에 더 이상 한 나라의 노력만으로 해결되기 어렵고, 국가간의 공동노력이 필요하다. 2002년 3, 4월에 걸쳐 중국에서 발생된 황사가 우리나라로 장거리 이동되어 많은 학교들이 휴교를 하지 않을 수 없었던 사건은 우리나라 국민들로 하여금 중국의 대기오염문제에 관심을 집중시키는 계기가 되었다.

중국의 대기질은 전반적으로 개선추세에 있으나, 도시의 2/3 정도는 중국대기환경기준 2등급을 만족시키지

[†]Corresponding author : Environmental Epidemiology Division, Environmental Risk Research Department, National Institute of Environmental Research
Tel: 82-32-560-7167, Fax: 82-017-258-7021
E-mail : indi96@hanmail.net

못하고 있다. 도시 대기질에 영향을 주는 주요오염물질은 입자상물질이며, 몇몇 도시에서는 SO₂에 의한 오염도 심각한 상황이다. 서부지역에서는 산성비에 의한 영향이 상대적으로 심하며, 산성비 관리지역(the acid rain control zones)의 90%에서 산성비가 관측되었다.¹⁾

중국에서 발생한 대기오염물질, 특히 황사와 부유분진이 우리나라 국민에게 어떠한 건강피해를 줄 것인가에 대한 우려와 함께 이들 대기오염물질의 건강영향을 평가하기 위한 연구가 시작되고 있다.

대기오염에 의한 건강영향을 평가하는 것은 보건학적으로 매우 중요하다. 이는 대기오염에 노출되는 인구규모가 크고, 자기 의사와 관계없이 노출되게 되며, 주로 노약자나 소아, 만성호흡기질환자(특히, 천식환자) 등 생물학적으로 약자에게 건강피해를 주고, 저 농도의 만성적 노출에 의해 건강영향이 파악되기 어려운 점 등 때문이다.^{2,3)}

대기오염에 의한 장기적인 노출은 주로 호흡기계에 영향을 미치는데,^{4,5)} 이는 대기오염물질이 우선적으로 호흡을 통하여 폐로 들어오고 몸 전체로 퍼지게 되며, 폐는 넓은 표면적을 가지고 있고 유해물질이나 자극성 물질에 손상 받기 쉽기 때문이다.

인구집단에 대한 직접적 조사를 통하여 대기오염의 호흡기계 영향을 평가하기 위한 역학적 연구방법으로는 설문지에 의한 호흡기 증상 조사방법, 폐활량 검사방법, 흉부 X-선 검사방법 등이 있다.⁶⁾ 이중 폐활량측정법(spirometry)을 이용한 폐기능 검사는 검사기구가 비교적 저렴하며 측정이 간편하기 때문에 대기오염역학 분야에서 많이 사용되고 있는 방법이다.^{7,8)}

대기오염에 의한 호흡기영향은 급성 및 만성 영향으로 구분할 때, 이 폐활량의 단면연구는 만성적인 영향을 분석할 수 있는 장점을 가진 반면, 대기오염과 건강피해의 관계를 평가하는 데 영향을 줄 수 있는 혼란요인을 적절히 통제하기 어렵다는 제한점이 있다.⁹⁾

폐 기능의 지표 중 휴대용 측정기구를 사용하여 피검자가 스스로 측정할 수 있는 최고호기유량(Peak Expiratory Flow Rate, 이하 PEFR)에 대한 경시적 조사는 대기오염의 급성영향 평가를 위하여 주로 사용하는 방법이다.

이 시계열 분석방법은 동일집단에 대한 연구이기 때문에 집단의 차이에서 오는 혼란변수를 배제할 수 있고, 단지 대기오염과 건강에 동시에 영향을 미치는 기온, 습도 등 기상요인만 보정해 주면 되는 장점이 있기 때문에 대기오염에 의한 급성영향을 연구하는데 적합하다고 할 수 있다.⁹⁾

세계적으로 특히, 소아를 대상으로 하는 폐기능과 대

기분진 농도간의 관련성에 대한 연구결과들은 많이 보고되고 있으나, 우리나라와 중국에서는 이러한 연구결과들이 매우 극소수이므로 앞으로 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 연구는 2001년 3월 22일 한·중 양국 정부간 환경협력위원회 제 7차 회의에서 한·중 공동연구 과제로 채택된 '환경오염의 건강위해성평가 연구'의 일환으로,¹⁰⁾ 중국 현지 기관(중국환경과학연구원 대기환경연구소)을 활용하여, 중국의 초등학교생을 대상으로 대기분진이 폐활량에 미치는 급성적 건강영향 평가를 위하여 폐활량(PEFR)과 대기중 미세먼진(PM₁₀, PM_{2.5})의 농도에 대한 경시적 조사를 실시하였다.

중국 현지에서 대기오염도 및 폐활량을 직접 조사한 이 연구는 국내에서는 최초로 시도된 것으로, 앞으로 자료가 축적되면 중국의 부유분진 및 황사가 호흡기 건강에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가가 가능할 것이고, 이들 평가 자료는 중국, 우리나라, 더 나아가 동북아 대기질 관리의 중요한 근거자료가 될 수 있을 것이다.

II. 연구방법

1. 조사대상 및 기간

중국 북경시(北京市) 소재 옹화궁소학(雍和宮小學) 3, 6학년 학생 100명을 대상으로, 2003년 3월 25일~5월 3일까지 40일간 PEFR 조사를 실시하였다.

2. 개인특성조사

초등학생들의 인적사항 및 천식 등과 같은 질병력에 대한 설문조사를 실시하였으며, PEFR 측정에 앞서 체중, 신장 등을 측정하였다. 한편 설문서의 중국어로의 번역 및 설문서의 배포·회수는 중국환경과학연구원(中國環境科學研究院)의 협조하에 이루어졌으며, 설문서의 작성은 학생들의 학부모가 작성하는 것을 원칙으로 하였다.

3. 기상자료

PEFR 측정기간 동안의 조사대상지역의 기상자료(기온, 상대습도 및 해면기압)는 중국환경과학연구원으로부터 제공받았다.

4. PEFR 측정

PEFR의 측정은 영국 Clement Clarke Int. LTD의 휴대용 peak flow meter를 사용하였으며, 제작회사에서 제공하는 측정방법을 따랐다.¹¹⁾ 오전(9시), 정오(12시),

저녁(8시 이후)에 각 3회씩 측정하였으며, 오전과 정오의 측정은 담임교사의 관리하에 학생 스스로 측정하도록 하고, 휴일의 측정과 평일 저녁때의 측정은 학부모의 관리하에 학생 스스로 측정하도록 하여, 일별 호흡기증상(감기증상, 잦은 기침, 천식증상)을 함께 기록하도록 하였다.

5. PM₁₀ 및 PM_{2.5} 측정

중국환경과학연구원의 협조하에, PEFR측정기간(40일) 동안 매 24시간 간격으로 북경 옹화공소학의 실외(운동장 부근)에서 PM₁₀ 및 PM_{2.5}를 측정하였다. PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 포집에는 중국 Beijing Dike Electromechanical Company의 TSP-PM10-PM2.5-2-type Medium Flow Rate Particulate Matters Sampler 2대가 이용되었으며, 유량은 각각 78.37 l/min(PM₁₀)과 77.07 l/min(PM_{2.5})이었다. 이 sampler는 유량의 조정이 불가능한 고정식으로서(제조시에 일정유량이 유지되도록 만들어졌음), 유량계 펌프의 압력이 일정한 수준으로 계속 유지되면 자동으로 유량도 일정한 수준으로 유지되므로, 측정기간 40일 동안 매일 유량계 펌프의 압력이 일정하게 유지되는지 확인하였다. 필터는 일본 Toyo Roshi Kaisha, Ltd의 테플론필터(PF-020, Teflon, pore size 0.3 µm, diameter 90 mm, thickness 2 mm)를 이용하였으며, 매 24시간마다 교체를 하였다. 테플론 필터의 경우 입자(PM_{2.5} 및 PM₁₀)의 농도를 측정하기 위해서 측정 전 · 후에 여지를 항온(21±1°C) · 항습(45±5%) 상태에 48시간씩 보관하여 항량이 되게 한 후 일본 SHIMADZU사의 Direct Reading Balance(L-200 SM, readability 0.01 mg)로 칭량하였다. 대기중 PM₁₀과 PM_{2.5}의 농도는 포집 전 · 후의 여지의 무게 차이를 총 포집 유량으로 나눠 산출하였다.

6. 자료의 선정

자료의 분석에 앞서 개인별로 전체 측정기간의 일별 PEFR 그래프를 작성하여 개인별 PEFR자료의 적정성을 검토하였다. 우선, PEFR의 증가경향을 나타낸 측정시작 일로부터 3일간의 자료와 그래프 상에서 보았을 때 증가경향을 보이는 기간이 극단적으로 길다고 판단되는 자료를 적용기간으로 보고 제거하였다. 다음으로 각 개인별 측정 자료의 극단치와 이상치를 제거한 상태에서 평균값으로부터 100 이상의 차이를 나타내는 자료를 제거하였고, 100 이내의 차이를 보이는 경우라도 표준편차가 10 이내로 변동폭이 거의 없고 규칙적인 자료는 신뢰성이 떨어지는 것으로 생각하여 제거하였다. 또한, 동일한 측정값이 6회 이상 반복되는 경우와 전혀

측정값과 100 이상의 차이를 나타내는 자료 역시 신뢰성이 떨어지는 것으로 생각해 제거하였다. 그 다음으로 전체 기간의 측정값이 장기적으로 증가 또는 감소 추세가 확인되는 경우와 전체적인 측정값의 변화에 반복적인 규칙성이 있다고 확인되는 경우 역시 제거하였다. 최종적으로 남은 자료가 전체 측정일수의 1/3 이하인 개인은 모든 측정값을 제거하였다.

7. 자료 분석

모든 자료에 대한 기초통계량의 산출과 조사대상 초등학생들의 개인특성 및 PEFR 측정결과에 대한 χ^2 -test, t-test 등은 SAS(Statistical analysis system, version 8.1, SAS Institute, USA) program을 이용하여 수행하였으며, 미세분진 농도와 기상상태간의 상관성을 파악하기 위하여 상관분석(correlation analysis)을 수행하였다. PEFR과 미세분진의 경시적 관련성은 일 평균 PEFR을 종속변수(dependent variable)로 하고, 성별, 신장, 일별 호흡기증상여부, 일 평균 기온 및 상대습도, 일별 PM₁₀ 또는 PM_{2.5} 농도를 독립변수(independent variable)로 하는 혼합선형회귀모형(mixed linear regression model)¹²⁾에 의하여 분석하였다.

III. 결 과

1. 조사대상 초등학생들의 개인특성

조사에 참여하였던 학생들의 수는 총 100명이었으나, 이중 13명의 자료를 자료의 적정성 등의 문제로 제거하였으며, 최종적인 자료분석에는 총 87명의 자료만을 이용하였다.

자료분석에 이용된 87명의 학생들에 대한 개인특성은 Table 1과 같으며, 학년별로는 3학년이 47명(남아-24명, 여아-23명), 6학년이 40명(남아-15명, 여아-25명)이었다. 3학년 학생의 경우, 연령 및 신장은 남학생에 비해 여학생에게서 높게 나타났으나, 체중은 남학생에게서 다소 높게 나타났다. 한편 6학년 학생의 경우에는 연령, 신장, 체중 등 모든 항목에서 여학생이 남학생보다 높게 나타났다.

2. PEFR 측정결과

PEFR 측정결과는 Table 2와 같으며, 최소 253 l/min에서 최대 501 l/min까지의 분포를 나타내었다. 3학년의 경우에는 남학생들이 여학생들보다 높게 나타났고, 6학년의 경우에는 이와는 반대로 여학생들이 남학생들에 비해 높게 나타났으나 통계적인 유의성은 없었다($p>0.05$). 측정시점별로는 3, 6학년 남학생과 여학생 모

Table 1. Individual characteristics of participants

Contents	Grade	Gender			p-value
		Boys	Girls	Total	
No. of subjects	3	24 (61.5)	23 (47.9)	47 (54.0)	0.205
	6	15 (38.5)	25 (52.1)	40 (46.0)	
	total	39 (100)	48 (100)	87 (100)	
Age (years)	3	9.00 ± 0.72	9.17 ± 0.89	9.09 ± 0.80	0.464
	6	11.67 ± 0.49	11.80 ± 0.50	11.75 ± 0.49	0.415
	total	10.03 ± 1.46	10.54 ± 1.50	10.31 ± 1.50	0.110
Height (cm)	3	136.77 ± 6.27	137.86 ± 8.12	137.30 ± 7.18	0.607
	6	148.00 ± 7.57	154.82 ± 6.61	152.26 ± 7.66	0.005
	total	141.09 ± 8.69	146.69 ± 11.25	144.18 ± 10.51	0.012
Weight (kg)	3	34.78 ± 7.04	32.84 ± 7.46	33.83 ± 7.23	0.365
	6	45.44 ± 11.24	50.38 ± 10.83	48.53 ± 11.11	0.177
	total	38.88 ± 10.21	41.97 ± 12.82	40.59 ± 11.76	0.224

Note) Values are mean ± S.D.

Table 2. Daily measured PEFR (2003.3.25~5.3) of participants

(Unit : l/min)

Contents	Grade	Gender			p-value
		Boys	Girls	Total	
PEFR (Morning)	3	339 ± 38.45(253~437)	332 ± 39.95(259~417)	335 ± 38.92(253~437)	0.552
	6	387 ± 44.37(316~467)	401 ± 50.75(299~475)	396 ± 48.34(299~475)	0.391
	total	357 ± 46.76(253~467)	368 ± 57.19(259~475)	363 ± 52.73(253~475)	0.361
PEFR (Noon)	3	346 ± 37.33(267~438)	341 ± 39.62(270~425)	344 ± 38.14(267~438)	0.634
	6	399 ± 49.92(321~501)	412 ± 54.73(315~485)	407 ± 52.74(315~501)	0.441
	total	367 ± 49.28(267~501)	378 ± 59.66(270~485)	373 ± 55.24(267~501)	0.333
PEFR (Evening)	3	342 ± 38.26(262~437)	340 ± 39.36(267~423)	341 ± 38.39(262~437)	0.851
	6	397 ± 44.52(322~496)	406 ± 53.19(297~480)	403 ± 49.70(297~496)	0.607
	total	363 ± 48.59(262~496)	374 ± 57.27(267~480)	369 ± 53.53(262~496)	0.346

Note) Values are mean ± S.D. (Min.~Max.)

두 정오시간대(noon)의 측정결과가 아침이나 저녁시간대에 비해 상대적으로 높게 측정되는 경향을 나타내었다.

3. 미세먼진 농도와 기상상태

PEFR 측정기간 동안의 미세먼진 농도와 기상상태는 Table 3과 같다. 측정기간 동안의 평균 기온은 15.4°C 이었으며, 상대습도는 49.6%, 해면기압은 1013.2 hpa이었다. 조사대상초등학교에서의 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 평균농도는 각각 180.2 µg/m³ 및 103.2 µg/m³이었으며, PM₁₀ 농도의 경우 총 측정일인 40일 중 57.5%에 해당하는 23일이 우리나라의 대기환경기준 및 중국 국가대기질기준(National Ambient Air Quality Standard, NAAQS)

의 일평균농도인 150 µg/m³을 초과하여, 측정기간동안 조사지역의 PM₁₀ 오염수준은 매우 높은 수준인 것으로 나타났다. 한편, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 IQR(Interquartile Range)는 각각 91.8 µg/m³ 및 58.0 µg/m³ 이었다.

PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 일별 변화는 Fig. 1과 같다. PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도의 일별 변화는 유사한 양상을 나타내었지만, PM_{2.5}에 비하여 PM₁₀ 농도의 변동폭이 큰 것으로 나타났다. PM₁₀중에서의 PM_{2.5}의 비율은 평균 57.30%(44.09%~77.04%)로 나타나, 조사지역 대기중 PM₁₀의 상당부분이 PM_{2.5}로 구성되어 있음을 나타내었다.

PM₁₀과 PM_{2.5}와의 상관성은 Fig. 2와 같으며, PM₁₀

Table 3. Meteorological conditions and fine particle concentrations during PEFR measurement days (2003.3.25-5.3)

Contents	Mean	S.D.	Min	25th	50th	75th	Max
Ambient air particles							
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	180.2	80.5	55.0	116.0	164.5	207.8	330.7
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	103.2	49.5	31.3	64.1	92.6	122.1	217.8
Meteorological variables							
Air temperature($^{\circ}\text{C}$)	15.4	4.2	6.9	12.5	14.8	18.8	23.7
Relative humidity(%)	49.6	14.6	21.0	38.5	51.0	57.5	83.0
Sea level air pressure(hpa)	1013.2	5.9	1002.6	1009.6	1012.6	1017.8	1024.3

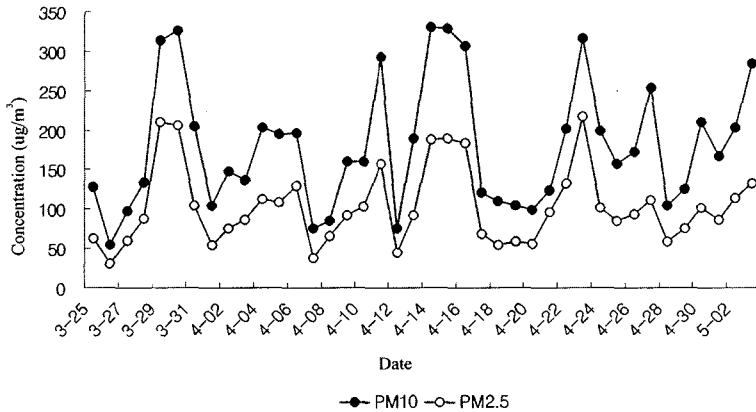


Fig. 1. Daily variation of PM₁₀ and PM_{2.5}.

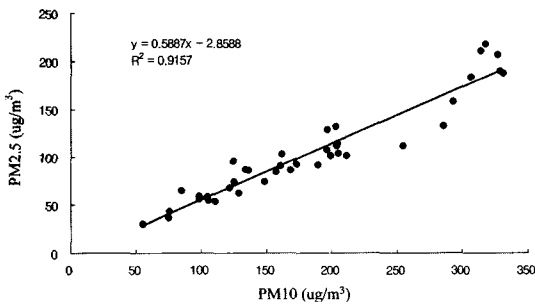


Fig. 2. Regression relationships between PM₁₀ and PM_{2.5}.

농도가 $1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가할 때 PM_{2.5} 농도는 $0.59 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 증가하는 것으로 나타났다($p < 0.05$).

미세분진 농도와 기상요인간의 상관분석 결과는 Table 4와 같다. PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 상대습도와는 유의한 정상관 관계를 나타내었고, 해면기압과는 유의한 역상관 관계를 나타내었다.

4. 미세분진과 PEFR의 경시적 관련성 분석

중국 북경시 옹화공소학의 학생들을 대상으로 한 PEFR과 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도간의 경시적 관련성 분석

Table 4. Correlation coefficients among fine particles and meteorological factors

	PM ₁₀	PM _{2.5}	Air temperature	Relative humidity	Sea level air pressure
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	1.00000				
PM _{2.5} ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.95693**	1.00000			
Air Temp.($^{\circ}\text{C}$)	0.26769	0.14076	1.00000		
R. humidity(%)	0.48111**	0.46397**	-0.04396	1.00000	
S.L.A.Press.(hpa)	-0.58546**	-0.51435**	-0.063493**	-0.20886	1.00000

Note) * : $p < 0.05$, ** : $P < 0.01$.

에 앞서, PEFR과 개인요인(성별, 신장, 체중, 연령, 일별 호흡기증상여부)의 관련성을 검토하여 최종적으로 선택한 혼합회귀모형은 Table 5와 같다. 신장 1cm 증가시 PEFR이 3.91 l/min 커지는 것으로 나타났으며, 호흡기증상이 있을 경우 PEFR이 2.25 l/min 적어지는 것으로 나타났다. 한편 성별의 경우 유의한 결과를 나타내지는 않았으나, 많은 선행연구에서 그 영향이 이미 밝혀진바,¹³⁻¹⁵⁾ 본 모형에서 제외시키지 않았다.

혼합회귀모형을 이용하여 PEFR에 영향을 줄 수 있

Table 5. Estimates of the regression coefficients for predicting PEFR by individual characteristics using a mixed model

PEFR = $\beta_0 + \beta_1(\text{Gender})^* + \beta_2(\text{Height}) + \beta_3(\text{Symptom})^{**}$			
Fixed effect variable	Estimate	S.E.	p-value
β_0	-200.12	57.00	.
β_1	10.88	8.13	0.1809
β_2	3.91	0.39	<.0001
β_3	-2.25	0.78	0.0039

Note) * : Gender (boys=1, girls=0), ** : Symptom (yes=1, no=0)

Table 6. Estimates of the regression coefficients for PM₁₀ and PM_{2.5} using a mixed model

PEFR = $\beta_0 + \beta_1(\text{Gender})^* + \beta_2(\text{Height}) + \beta_3(\text{Symptom})^{**} + \beta_4(\text{PM}_{10} \text{ or } \text{PM}_{2.5}) + \beta_5(\text{Air temperature}) + \beta_6(\text{Relative humidity})$		
Fixed effect variable	Time lag	Changes of PEFR (95% C.I.)
β_4 (PM ₁₀) IQR = 91.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	0 day	-0.81 l/min (-1.46, -0.15)
	1 day	-1.54 l/min (-2.14, -0.94)
	2 day	-0.65 l/min (-1.23, -0.08)
	3 day	-0.29 l/min (-0.88, 0.29)
	0 day	-1.06 l/min (-1.70, -0.41)
β_4 (PM _{2.5}) IQR = 58.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$	1 day	-1.56 l/min (-2.16, -0.95)
	2 day	-0.67 l/min (-1.25, -0.09)
	3 day	-0.08 l/min (-0.67, 0.51)

Note) * : Gender (boys=1, girls=0), ** : Symptom (yes=1, no=0), IQR : Inter-quartile range (75% - 25%)

는 개인요인(성별, 신장, 일별 호흡기증상여부)과, PEFR과 오염도의 관련성에 혼란요인으로 작용할 수 있는 기상요인(일별 기온, 상대습도)을 통제하고, 시계열 자료의 자기상관성을 고려하여 일별 PEFR과 미세먼진(PM₁₀, PM_{2.5}) 농도의 관련성을 분석한 결과를 요약하면 Table 6과 같다. 이때 기상요인 중 해면기압은 유의한 결과를 나타내지 못하여 모형에서 제외하였다.

PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 3일 전(at 3-day time lag)의 농도를 제외하고는 미세먼지 농도의 증가에 따른 PEFR의 유의한 감소경향을 나타내었다(p<0.05). 특히 하루 전날의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 증가할 때 PEFR의 감소경향이 가장 큰 것으로 나타났으며, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 IQR 증가에 따른 PEFR 감소량은 각각 1.54 l/min (95% C.I. : 0.94~2.14), 1.56 l/min(95% C.I. : 0.95~2.16)이었다.

IV. 고 찰

세계적으로 폐기능과 대기분진 농도간의 관련성에 대한 연구결과들이 많이 보고되어 있고, 특히 소아의 폐기능에 대한 대기분진의 영향을 분석한 연구들이 많으며, 대기분진이 폐기능에 미치는 급성영향을 평가하기 위하여 대기분진 농도와 폐기능의 경시적 관련성을 분석한 연구들도 많다.¹⁶⁾

대기오염의 급성효과를 평가하는 최근의 연구들은 주로 시계열 분석방법을 적용하는데, 대조군 혹은 비교집단이 연구대상자 본인이 된다는 점이 장점이다. 따라서 성별이나 유전적 소인 등과 같이 시기적으로 변화가 없는 요인의 경우 짝짓기 표본추출의 효과에 따라 혼란 변수로서의 가능성을 자동적으로 통제할 수 있게 된다. 또한 흡연이나 식이습관과 같은 개인내 변이의 경우도 대기오염의 급성효과를 평가하는데 있어서 혼란 변수로서 작용할 가능성이 거의 없게 되고,¹⁷⁾ 단지 일별로 변화하면서 대기오염 농도와 건강에 동시에 영향을 미치는 기온, 습도 등의 기상 요인만 보정하면 된다.¹⁸⁾

대기에 부유하고있는 총부유분진(Total Suspended Particles; TSP) 중 직경이 10 μm 이하인 미세먼진(particulate matter less than 10 μm in diameter; PM₁₀)은 호흡을 통하여 폐포에 침착될 가능성이 크고, PM₁₀ 중에서도 직경이 2.5 μm 이하인 미세먼진(particulate matter less than 2.5 μm in diameter; PM_{2.5})이 실질적으로 인체에 영향을 미치는 것으로 알려져 최근 이에 대한 측정 및 건강영향이 환경보건 분야에서 관심의 대상이 되고 있다. PM₁₀은 단일물질 혹은 SO₂와 함께

어린이 호흡기 증상 및 질환을 증가시키고, 폐기능을 감소시키는 것으로 보고되고 있다.¹⁹⁾

본 연구는 중국 북경시 옹화공소학의 학생 100명을 대상으로 한, 일별 PEFR과 미세먼진농도간의 경시적 관련성에 관한 연구였으며, 혼합모형(Mixed Model)에 의한 시계열 분석결과 PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 3일 전의 농도를 제외하고는 미세먼진 농도의 증가에 따른 PEFR의 유의한 감소경향을 나타내었다(p<0.05). 특히 하루 전날의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 증가할 때 PEFR의 감소경향이 가장 큰 것으로 나타났으며, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 IQR(각각 91.8 µg/m³, 58.0 µg/m³) 증가에 따른 PEFR 감소량은 각각 1.54 l/min(95% C.I. : 0.94~2.14), 1.56 l/min(95% C.I. : 0.95~2.16)이었다.

이러한 결과는 미세먼진 농도의 증가에 따른 폐기능의 감소현상을 보고한 선행연구결과들과 일치한다. Pope 등²⁰⁾은 PM₁₀ 150 µg/m³ 증가시 약 3~6%의 PEF가 감소한다고 하였으며, Dockery와 Pope²¹⁾는 기존 역학연구 결과를 통하여 분진의 급성호흡기 영향을 검토한 결과 폐기능의 미세한 변화를 관찰하였으며 PM₁₀ 10 µg/m³ 증가시 FVC는 0.15%, PEFR은 0.08% 감소하였다고 보고하였고, 기존 5개의 패널연구(panel studies)에서 얻어진 자료를 재분석한 Hoek 등²²⁾의 연구에서는 PM₁₀ 10 µg/m³ 증가에 따라 PEFR은 0.07% 감소한다고 보고하였다. Vedal 등⁴⁾은 Canada의 Vancouver Island에 거주하는 초등학생들을 대상으로 조사한 결과 농도가 낮은 수준에서도 PM₁₀의 증가는 PEFR 및 기침, 가래 등의 호흡기 증상에 영향을 초래하며, 특히 소아천식환자는 다른 아이들에 비하여 대기분진의 영향에 보다 민감하다는 것을 밝혔으며, Aekplakom 등²³⁾의 연구에서는 소아천식환자의 경우 PM₁₀ 10 µg/m³ 증가에 따라 FVC는 6.3 ml, FEV1은 6.0 ml, PEFR은 18.9 ml/sec, FEF25-75%는 3.7 ml 감소한다고 보고하였다. 또한 우리나라 초등학교 3·6학년 학생을 대상으로 한 유승도 등²⁴⁾의 연구에서는, 비록 통계적으로 유의한 수준은 아니었지만(p>0.05), PM₁₀ 및 PM_{2.5}의 IQR(각각 50.1 µg/m³, 23.1 µg/m³) 증가에 따른 PEFR의 감소경향(각각 1.5 l/min, 0.8 l/min)을 보고한 바 있다.

한편, 본 연구기간(2003. 3. 25~5.3) 동안 중국에서는 “중증급성호흡기중후군(Severe Acute Respiratory Syndrome, SARS)”이 발생하였으며, 이로 인하여 북경 지역의 초등학교들이 2003년 4월 24일부터 휴교에 들어가, 전체 조사기간인 40일 중 10일간은 교사의 지도 없이 학생들이 집에서 스스로 PEFR을 측정하게 되었다. 이에 휴교기간 중에 측정된 PEFR 자료는 다른 기

간에 측정된 자료와 비교하여 자료의 신뢰성에 대한 문제가 제기될 수 있다. 따라서 개인별 PEFR 측정자료를 검토하여(II. 연구방법 참조) 신뢰도가 의심되는 자료는 모두 제거한 후에 분석을 실시하였다. 또한 초등학생들의 거주지는 초등학교 인근이므로, 미세먼진 농도의 측정이 이루어진 초등학교와 학생들의 거주지역간에 미세먼진 농도수준에는 큰 차이가 없었을 것으로 생각된다.

본 연구는 우리나라 연구진이 중국 현지의 연구진과 공동으로 중국 현지의 대기오염도 및 초등학생들에 대한 폐활량 등의 건강상태를 직접 조사한 최초의 것으로, 앞으로 이와 같은 자료가 계속 축적되면 중국의 부유분진 및 황사가 호흡기 건강에 미치는 영향에 대한 정량적인 평가가 가능할 것이고, 이들 평가 자료의 축적을 통하여 중국, 우리나라, 더 나아가 동북아 대기질 관리에 기여할 수 있을 것으로 기대한다.

V. 결 론

본 연구는 한·중간 공동연구의 일환으로, 대기오염에 의한 호흡기계 영향을 평가하기 위하여 중국 초등학생 100명을 대상으로 PEFR에 대한 경시조사를 실시하였다. 대기오염에 대한 반응의 개인차를 고려할 수 있는 혼합모형(mixed model)에 시계열자료의 자기상관성을 고려할 수 있는 행렬을 추가하고, 성별, 신장, 호흡기증상유무, 기상요인(온도 및 습도)을 통제된 상태에서 미세먼진 농도와 PEFR의 경시적 관련성을 분석하였다.

결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 북경지역 초등학생들에 대한 40일간의 PEFR 측정 결과, 3학년은 253 l/min~438 l/min까지의 분포를 나타내었으며, 6학년은 297 l/min~501 l/min까지의 분포를 나타내었다. 성별로는 3학년의 경우에는 남학생들이 여학생들보다 높게 나타났으나, 6학년의 경우에는 이와는 반대로 여학생들이 남학생들에 비해 높게 나타났다. 측정시점별로는 3, 6학년 남학생과 여학생 모두 정오시간대(noon)의 측정결과가 가장 높게 나타났다.

2. PEFR 측정기간 동안의 평균 PM₁₀ 및 PM_{2.5} 농도는 각각 180.2 µg/m³ 및 103.2 µg/m³로 나타났고, PM₁₀ 농도의 경우 총 측정일인 40일중 57.5%에 해당하는 23일이 우리나라 대기환경기준 및 NAAQS의 일평균농도인 150 µg/m³을 초과하였다. PM₁₀중 PM_{2.5}가 차지하는 비율은 평균 57.30%(44.09%~77.04%)이었다.

3. PEFR과 개인요인(성별, 신장, 체중, 연령, 일별 호흡기증상여부)간의 관련성을 분석한 결과, 신장 1 cm

증가시 PEFR이 3.91 l/min 커지는 것으로 나타났으며, 호흡기증상이 있을 경우 PEFR이 2.25 l/min 적어지는 것으로 나타났다. 성별로는 남학생이 여학생에 비해 10.88 l/min 큰 것으로 나타났으나 유의하지는 않았다 ($p>0.05$).

4. 개인요인(성별, 신장, 일별 호흡기증상여부)과 기상요인(일별 기온 및 상대습도)을 통제하고, 시계열 자료의 자기상관성 및 개인차를 고려하여 일별 PEFR과 미세먼진(PM₁₀ 또는 PM_{2.5}) 농도간의 관련성을 분석한 결과, PM₁₀과 PM_{2.5} 모두 3일 전의 농도를 제외하고는 미세먼지 농도의 증가에 따른 PEFR의 유의한 감소경향을 나타내었다($p<0.05$). 특히 하루전날의 PM₁₀과 PM_{2.5} 농도가 증가할 때 PEFR의 감소 경향이 가장 큰 것으로 나타났으며, PM₁₀과 PM_{2.5} 농도의 IQR(각각 91.8 µg/m³, 58.0 µg/m³) 증가에 따른 PEFR 감소량은 각각 1.54 l/min(95% C.I. : 0.94~2.14), 1.56 l/min(95% C.I. : 0.95~2.16)이었다.

이상의 결과 미세먼진 농도의 증가에 따른 PEFR의 유의한 감소경향을 확인할 수 있었으나, 본 연구는 매우 소규모의 초등학교(총 100명)를 대상으로 실시한 연구이므로 PEFR과 미세먼진 농도간의 관련성을 제시하는데 한계가 있다. 앞으로의 연구에서 더 많은 학생들을 대상으로 한 추가적인 연구를 통하여, 황사 및 분진에 의한 호흡기 건강영향을 제시할 수 있을 것으로 생각되며, 본 연구는 대기환경기준의 검토, 대기환경정책의 수립 및 평가 등에 참고자료로 활용될 수 있을 것이며, 궁극적으로 대기오염에 의한 건강피해를 예방하는데 기여할 수 있을 것이다.

참고문헌

1. Report on the state of the environment in China 2002, <http://www.zhb.gov.cn/english/SOE/soechina2002/air.htm>
2. 권호장, 조수현, 김선민, 하미나, 한상환 : 설문지에 의한 대기오염의 호흡기계 증상 발현에 관한 조사연구. 예방의학회지, **27**(2), 313-325, 1994.
3. Vedal, S., Petkau, J., White, R. and Blair, J. : Acute effects of ambient inhalable particles in asthmatic and nonasthmatic children. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **157**, 1034-1043, 1998.
4. 조수현 : 대기오염이 인체에 미치는 영향. 대한의학협회지, **32**(12), 1272-1278, 1989.
5. 주영수, 김대성, 강종원, 성주현, 강대회, 조수현, 백도명 : 대기오염과 관련된 건강영향을 평가하기 위한 설문 개발. 예방의학회지, **30**(4), 852-863, 1997.
6. 안옥윤, 박병주, 권이혁 : 호흡기계 질환의 역학적 조

- 사방법 개발에 관한 연구(I) - 번역설문서 응답양상에 대한 비교평가. 예방의학회지, **15**(1), 47-56, 1982.
7. 한용철 : 임상호흡기학. 2판, 일조각, 서울, 69-83, 1997.
8. 최광수, 유승도, 김종민, 이길철, 강미영, 김태엽, 박인승, 차정훈, 박재성, 오수태, 고원중 : 주민건강조사방법의 표준화 연구. 국립환경연구원보, **21**, 15-32, 1999.
9. Lee, J. T. and Schwartz, J. : Reanalysis of the effects of air pollution on daily mortality in Seoul, Korea - a case-crossover design. *Environmental Health Perspectives*, **107**(8), 633-636, 1999.
10. 김대선, 차정훈, 유승도 박경렬 : 한·중 아동 폐활량과 그 영향요인 비교 연구. 한국환경위생학회지, **29**(5), 52-60, 2003.
11. Mini-Wright Standard, Instructions for use, <http://www.clement-clarke.com>
12. Littell, R. C., Milliken, G. A., Stroup, W. W. and Wolfinger, R. D. : SAS System for Mixed Models. SAS Publishing, 491-503, 1996.
13. American Thoracic Society : Lung function testing - selection of reference values and interpretative strategies. *American Review of Respiratory Disease*, **144**, 1202-1218, 1991.
14. Peters, J. M., Avol, E., Gauderman, W. J., Linn, W. S., Navidi, W., London, S. J., Margolis, H., Rappaport, E., Vora, H., Gong, H. Jr. and Thomas, D. C. : A study of twelve Southern California communities with differing levels and types of air pollution - II. effects on pulmonary function. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **159**, 768-775, 1999.
15. Künzli, N., Stutz, E. Z., Perruchoud, A. P., Brändli, O., Tschopp, J. M., Bolognini, G., Karrer, W., Schindler, C., Ackermann-Liebrich, U. and Leuenberger, P. : Peak flow variability in the SAPALDIA study and its validity in screening for asthma-related conditions. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **160**, 427-434, 1999.
16. 홍운철, 조수현 : 대기분진에 의한 건강영향. 예방의학회지, **34**(2), 103-108, 2001.
17. 이종태, 김 호 : 대기오염의 건강 영향 평가를 위한 역학연구 설계 및 방법론. 예방의학회지, **34**(2), 119-126, 2001.
18. Pope, C. A. III. and Schwartz, J. : Time series for the analysis of pulmonary health data. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **154**(6 Pt 2), s229-s233, 1996.
19. Bascom, R., Bromberg, P. A., Costa, D. A., Devlin, R., Dockery, D. W., Framptom, M. W., Lambert, W., Samet, J. M., Speizer, F. E. and Utell, M. : Health effects of outdoor air pollution. *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, **153**, 3-50, 1996.
20. Pope, C. A. III., Dockery, D. W., Spengler, J. D. and Raizenne, M. E. : Respiratory health and PM10 pollution - a daily time series analysis. *American Review of Respiratory Disease*, **144**, 668-674, 1991.
21. Dockery, D. W. and Pope, C. A. III. : Acute respiratory effects of particulate air pollution. *Annual Review of*

- Public Health*, **15**, 107-132, 1994.
22. Hoek, G., Dockery D. W., Pope, A., Neas, L., Roemer, W. and Brunekreef B. : Association between PM10 and decrements in peak expiratory flow rates in children - reanalysis of data from five panel studies. *European Respiratory Journal*, **11**, 1307-1311, 1998.
23. Aekplakorn, W., Loomis, D., Vichit-Vadakan, N., Shy, C., Wongtim, S. and Vitayanon, P. : Acute effect of sulphur dioxide from a power plant on pulmonary function of children, Thailand. *International Journal of Epidemiology*, **32**, 854-861, 2003.
24. 유승도, 김대선, 김정현, 박재성, 차정훈, 김필재, 박상희, 김희갑, 이종태, 이충렬 : 환경오염 노출 및 건강 영향 실태조사 - 울산공단, 국립환경연구원보, **23**, 27-43, 2001.