

## 대기오염과 실내 거주자의 활동도가 교실 내부의 입자 크기별 먼지 농도에 미치는 영향

최상준\*

원진직업병관리재단부설 노동환경건강연구소  
(2008. 3. 10. 접수/2008. 4. 7. 채택)

### The Effect of Outdoor Air and Indoor Human Activity on Mass Concentrations of Size-Selective Particulate in Classrooms

Sang-Jun Choi\*

Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health, 568-1, Myunmok-3dong, Jungnang-gu, Seoul, Korea  
(Received March 10, 2008/Accepted April 7, 2008)

#### ABSTRACT

This study evaluated the effects of the human activity and outdoor air on concentrations of size-selective particulate matters (PM) by conducting a realtime measurement in classrooms and on roofs at 4 elementary schools, 3 middle schools and 3 high schools in Incheon City. PM concentrations featured repetitive pattern of increasing during break time (including lunch hours) and cleaning time while decreasing during class hours. This trend was more prominent with inhalable PM and PM10 than fine PMs (PM2.5, PM1.0). The indoor/outdoor (I/O) ratio of inhalable PM and PM10 exceeded 1 while that of fine PMs was close to or below 1. The PM2.5 (out)/PM10 (out) ratio stood at 0.59 ( $\pm 0.16$ ) and the PM2.5 (in)/PM10 (in) ratio was 0.29 ( $\pm 0.09$ ), suggesting that occupant activity had a greater effect upon coarse particles (PM10-PM2.5) than upon fine particles (PM2.5, PM1.0). The correlations between the indoor and the outdoor PM concentrations showed a stronger positive correlation for fine particles than that of coarse particles. The linear regression analysis of PM concentrations indoor and outdoor indicated a higher determinant coefficient ( $r^2 > 0.9$ ), and consistency for fine particles than in case of coarse particles. In conclusion, the results of this study suggest that the indoor coarse particle concentration is more attributed to occupant activity and the indoor fine particle concentration is more influenced by outdoor air pollution.

**Keywords:** size-selective particulate, PM10, PM2.5, human activity, school, indoor air quality, surrounding environment

#### I. 서 론

현대인들이 실내에서 보내는 시간은 하루 24시간 중 3분의 2 이상인 80%를 차지한다.<sup>1)</sup> 특히 청소년기의 학생들에게 학교는 하루 중 많은 시간을 보내는 주요 공간이라고 할 수 있다.<sup>2)</sup> 학교 환경에 대한 많은 연구에서 교실 내부 실내 환경은 소음, 이산화질소, 일산화탄소, 휘발성 유기화합물, 포름알데히드, 에어로졸 등의

발생원이 될 수 있음을 밝혀 왔으며, 특히 에어로졸은 잠재적 독성을 지닌 다양한 유기 및 무기물질의 혼합 형태로 오염도를 대표하기 때문에 실내 공기질을 평가 하는데 중요한 지표라고 할 수 있다.<sup>3,9)</sup>

특히 에어로졸에 의한 독성 영향은 입자 크기에 따른 농도와 성분에 따라 다르다고 알려져 있는데, Dockery 등의 연구에서는 흡연과 같은 혼란변수를 통제하였을 때 사망률과 미세먼지 간의 관련성을 보고한 바 있다.<sup>10)</sup> Samet 등의 연구에서는 미국 20개 대도시의 대기오염 물질과 건강영향을 평가한 결과 미세먼지 농도의 증가와 일별 총 사망 및 심폐질환에 의한 일별 사망 증가 사이에 유의한 관련성이 있다고 하였으며,<sup>11)</sup> McConnell

\*Corresponding author : Wonjin Institute for Occupational and Environmental Health  
Tel: 82-2-490-2089, Fax: 82-2-490-2099  
E-mail : sjchoi1970@hotmail.com

등은 천식이 있는 아동들에게서 PM10이 증가함에 따라 정상 아동들에 비해 기관지염 및 가래 등의 증상이 증가한다고 보고하고 있다.<sup>12)</sup>

미국 환경청(Environmental Protection Agency, EPA)에서는 1997년부터 국가 대기 질 기준(National Ambient Air Quality Standards, NAAQS)을 개정하여 공기역학적 직경(aerodynamic diameter)이 10 µm 이하인 PM10 뿐만 아니라 2.5 µm 이하인 PM2.5에 대해 24시간 평균과 연평균 농도기준을 각각 65 µg/m<sup>3</sup>와 15 µg/m<sup>3</sup>로 설정하여 관리해 오고 있다.<sup>13)</sup>

일반적으로 실내 공기 중 미세먼지의 농도는 실내 오염원과 실외 오염원에 의해 발생한다고 할 수 있다. 그러나 실내 미세먼지의 오염도에 미치는 기여도는 환기를, 대기 오염도, 실내 거주자의 활동 형태, 입자의 공기역학적 직경 등 다양한 변수에 의해 결정된다고 알려져 있다.<sup>14-18)</sup> Monn 등의 연구<sup>19)</sup>와 Luoma and Batterman 연구<sup>20)</sup>에서는 실내에 특별한 발생원(흡연, 난방 기구 연소, 조리 등)이 없는 가정과 사무실의 경우 거주자의 활동과 관련하여 발생하는 먼지(옷 섬유, 머리카락, 토양 입자, 피부 각질 세포, 움직임에 의한 재 비산 먼지, 취급하는 물질로부터의 발생 먼지 등)가 실내 미세먼지의 주요 발생원이라고 하였다.

본 연구에서는 실내에 흡연이나 조리 및 난방 기구 등의 연소와 같은 미세먼지 발생원이 없고 활동이 활발한 학생들이 주로 생활하는 초·중·고등학교 교실을 대상으로 미세먼지의 입자 크기별 실내 농도에 미치는 실내 거주자의 활동과 대기 오염도의 영향을 평가하고자 하였다. 본 연구 결과는 학생들의 건강 증진을 위한 실내 미세먼지 오염도의 관리 방안을 모색하는데 기여할 것으로 기대한다.

## II. 연구방법

### 1. 연구대상 및 기간

인천광역시에 소재한 초등학교 4곳, 중학교 3곳, 그리고 고등학교 3곳을 대상으로 2005년 5월부터 6월까지 조사하였다. 대상 학교의 선정은 학교 주변의 대기 오염도에 차이가 있도록 도로(최소 2차선 이상의 통행량이 많은 곳) 인접지역, 주택밀집지역, 공단 인접지역, 기타 특수지역(매립지 주변, 항구 배후지역) 등 지역적 주변 특성을 고려하고 학교 설립년도를 고려하여 선정하였다. 조사 대상 학교의 기본 특성을 정리하면 Table 1과 같다.

### 2. 측정 방법

각 학교별로 교실 실내(indoor) 한 곳과 교실이 위치한 건물 옥상(outdoor)에서 1분마다 데이터를 기록할 수 있는 Grimm aerosol monitor(model 1.108; Grimm Aerosol Technik, Ainring, Germany) 2대를 이용하여 동시에 측정하였다. Grimm aerosol monitor는 광산란 방식으로 미국정부산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH)의 입자크기별 체내 침착률을 고려하여 분류한<sup>21)</sup> 흡입성 먼지(inhalable particulate matter), 흉곽성 먼지(thoracic particulate matter), 호흡성 먼지(respirable particulate matter)와 PM10, PM2.5, 그리고 PM1.0의 농도를 동시에 연속적으로 측정이 가능하며, 입자 크기별 특성과 관련된 최근 여러 연구에 사용되어왔고, 정확도와 정밀도의 검증 결과 타당성이 입증된 바 있다.<sup>22-25)</sup>

교실 내부의 측정기는 칠판과 반대 방향인 교실 뒤쪽 중앙에 벽면으로부터 1 m 정도 이격시키고 학생들의 호

**Table 1.** General description of schools surveyed in this study

Academic grade	ID	Gender of students	Construction year	Material of floor	Ventilation	Surrounding environment	Average number of students per class
Elementary school	ES-1	Coeducation	1995	Wood	Natural	Landfills	31.6
	ES-2	Coeducation	1997	Urethane rubber	Natural	Residential street	35.4
	ES-3	Coeducation	2002	Patterned lumber	Natural	Eight-lane road	33.4
	ES-4	Coeducation	1979	Patterned lumber	Natural	Railroad	34.1
Middle school	MS-1	Female	1960	Wood	Natural	Industrial complex	41.5
	MS-2	Male	1983	Marble	Natural	Residential street	40.6
	MS-3	Male	1994	Marble	Natural	Residential street	41.3
High school	HS-1	Male	1997	Marble	Natural	Apartment complex	35.8
	HS-2	Male	1971	Marble	Natural	Residential street	39.1
	HS-3	Female	1945	Marble	Natural	Harbor	33.8

흡기 위치와 가깝도록 바닥으로부터 약 1.3 m 위치에 설치하였으며, 문과 창문으로부터 떨어뜨려서 직접적인 외부 기류의 영향을 최소화 하도록 하였다. 교실 외부에서는 건물 옥상의 중앙에 바닥으로부터 약 1.5 m 위치에 설치하였으며, 주변에 굴뚝이나 냉방장치의 실외기 등으로부터 직접적인 영향을 받지 않도록 충분히 이격시켰다. 측정시간 동안 건물 옥상에는 학생들 및 외부인의 출입을 금지하여 순수히 학교 주변의 대기오염도만을 측정할 수 있도록 하였다. 측정시간은 정상적인 수업이 진행되는 평일에 전체 수업시간이 포함되도록 08시부터 17시 사이에 실시하였다.

**3. 자료 분석**

측정 자료 중 흡입성(inhalable) 먼지와 PM10, PM2.5, 그리고 PM1.0을 분석 대상으로 하였으며, 각 교실과 옥상에서 1분마다 연속적으로 측정된 자료를 시간가중 평균 농도(time-weighted average)로 환산하여 각 측정 장소에 대한 대표 농도로 나타내었다. 총 10개 학교에서 측정된 먼지의 대표 농도를 입자 크기별로 실내와 실외 사이에 차이가 있는지 분산분석을 실시하였다. 또한 각 위치별로 측정된 먼지의 시간에 따른 농도 변화를 실내와 실외 사이에 비교함으로써 실내 학생들의 활동 형태에 따른 영향을 분석하였다. 실내와 실외에서 측정된 먼지의 입자 크기별 농도 사이에 상관성 여부

를 피어슨 상관계수(pearson correlation coefficient)로 나타내었으며, 회귀분석을 통해 입자크기별 먼지의 실내·외 농도 사이의 회귀 방정식을 구하였다.

**III. 연구결과**

**1. 입자 크기별 실내·외 먼지 농도 수준**

총 10개 학교에 대한 교실 실내·외 입자 크기별 평균 먼지 농도는 Table 2에 요약하였다. PM10의 경우 10개 학교 중 7개 학교에서 실내 미세먼지 농도가 환경부의 다중이용시설등의 실내공기질 유지기준<sup>26)</sup>인 150 µg/m<sup>3</sup>를 초과하는 수준이었고, 10개 학교 모두 학교보건법의 교사안에서의 공기의 질에 대한 유지기준<sup>27)</sup>인 100 µg/m<sup>3</sup>를 초과하였다(Fig. 1). 교실 외부의 대기 중 PM10 농도를 환경정책기본법의 24시간 평균 대기 환경기준(100 µg/m<sup>3</sup>)<sup>28)</sup>과 비교하면 Fig. 1에서와 같이 E-1과 M-1 학교 두 곳에서만 초과하는 수준이었으며, 연평균 대기 환경기준(50 µg/m<sup>3</sup>)과 비교하면 10개 중 7개 학교에서 기준을 초과하였다.

PM2.5에 대한 미국 EPA의 국가대기질 기준과 비교하면 실내 농도는 10개 학교 중 3개 학교에서, 실외 농도는 10개 학교 중 2개 학교에서 24시간 평균 기준(65 µg/m<sup>3</sup>)을 초과하였고, 모든 학교에서 실내·외 PM2.5 농도가 연평균 기준(15 µg/m<sup>3</sup>)보다 높은 농도를

**Table 2.** Levels of particulate matter in the indoor and outdoor air of classrooms

Academic grade	Fraction	N	Indoor (µg/m <sup>3</sup> )	Outdoor (µg/m <sup>3</sup> )	I/O ratio
			Mean(min-max)/RSD <sup>1)</sup>	Mean(min-max)/RSD	Mean(min-max)/RSD
Elementary school	Inhalable	4	598.5(405.1-783.5)/25.9	187.0(132.7-230.3)/25.0	3.2(2.7-3.6)/13.0
	PM10	4	199.4(120.9-287.1)/34.2	69.8( 43.3-103.1)/35.6	2.9(2.7-3.1)/ 6.3
	PM2.5	4	49.6( 25.5- 85.8)/51.5	37.2( 18.8- 65.9)/54.0	1.3(1.3-1.4)/ 4.1
	PM1.0	4	34.6( 16.4- 62.6)/56.8	30.0( 13.8- 53.8)/56.3	1.2(1.1-1.2)/ 3.6
Middle school	Inhalable	3	538.3(419.6-612.0)/19.3	194.7(126.5-304.2)/49.2	3.1(2.0-4.6)/43.0
	PM10	3	200.9(125.9-248.9)/32.7	94.2( 46.9-169.2)/69.8	2.5(1.5-3.4)/39.1
	PM2.5	3	77.4( 24.7-123.5)/64.2	66.2( 15.4-126.5)/84.8	1.4(1.0-1.6)/24.6
High school	PM1.0	3	59.5( 16.9- 98.1)/68.5	55.3( 11.6-105.6)/85.5	1.2(0.9-1.5)/22.0
	Inhalable	3	418.8(309.1-503.0)/23.7	145.7(101.0-181.6)/28.1	3.2(1.7-5.0)/52.1
	PM10	3	148.0(113.1-173.5)/21.1	59.2( 47.8- 67.4)/17.2	2.6(1.8-3.6)/36.1
	PM2.5	3	44.5( 33.6- 50.6)/21.2	38.1( 35.2- 40.8)/ 7.4	1.2(0.8-1.4)/26.6
Total	PM1.0	3	31.7( 23.3- 38.5)/24.3	31.8( 29.2- 34.5)/ 8.4	1.0(0.7-1.2)/28.9
	Inhalable**	10	526.6(309.1-783.5)/26.1	176.9(101.0-304.2)/34.0	3.2(1.7-5.0)/32.6
	PM10**	10	184.4(113.1-287.1)/31.4	74.0( 43.3-169.2)/50.7	2.7(1.5-3.6)/24.9
	PM2.5*	10	56.4( 24.7-123.5)/56.1	46.2( 15.4-126.5)/69.4	1.3(0.8-1.6)/17.9
	PM1.0*	10	41.2( 16.4- 98.1)/62.8	38.1( 11.6-105.6)/71.1	1.1(0.7-1.5)/18.5

<sup>1)</sup>RSD: relative standard deviation (sd/mean×100)

\*\* : p<0.001, \* : p=0.48(PM2.5), p=0.80(PM1.0)

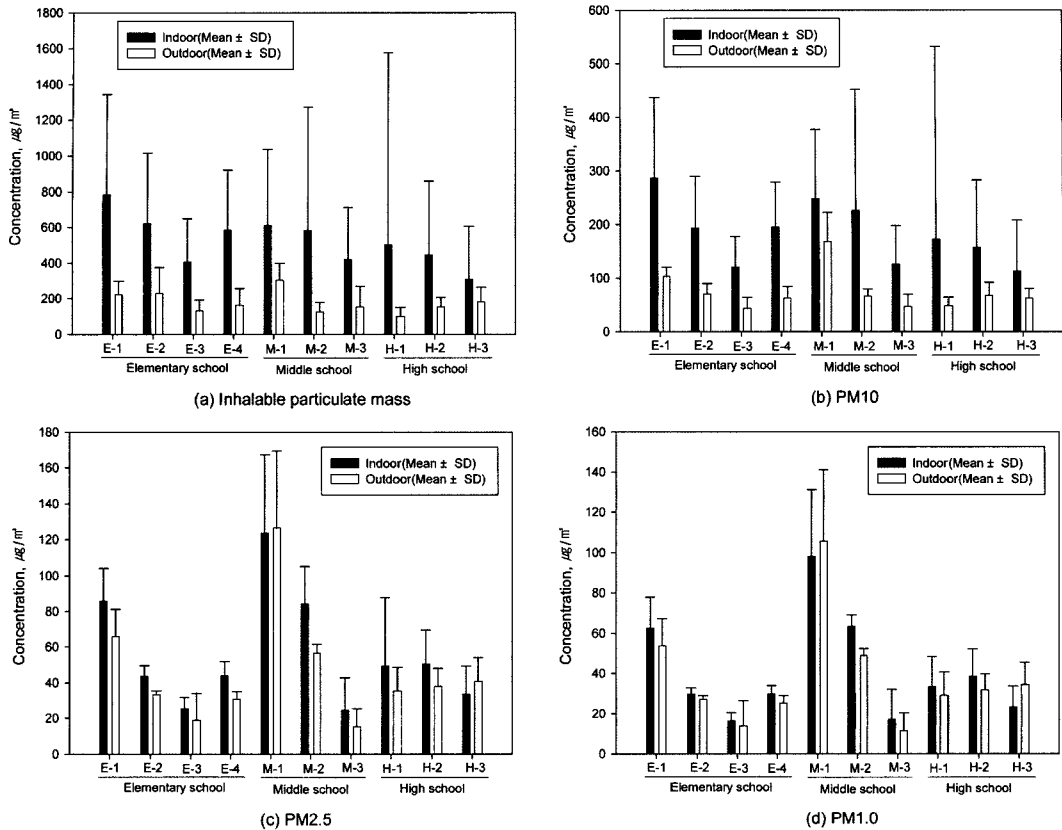


Fig. 1. Comparison of particulate mass concentrations between the indoor and outdoor air of classrooms by size-selective criteria.

나타내었다(Fig. 1).

2. 입자 크기별 실내·외 먼지 농도 비교

실내·외 먼지 농도의 비인 I/O ratio는 Table 2에서와 같이 흡입성 먼지의 경우 평균 3.2(1.7-5.0)로 실내 농도가 실외에 비해 모든 학교에서 높게 나타났으며 통계적으로 유의한 차이를 나타내었다(p<0.001). PM10도 평균 2.7(1.5-3.6)로 실내 농도가 실외에 비해 모두 높게 나타났으며 통계적으로 유의한 차이를 보였다(p<0.001). 그러나 PM2.5와 PM1.0은 실내·외 농도 사이에 통계적으로 유의한 차이를 나타내지 않았으며 I/O ratio는 각각 0.8-1.6, 0.7-1.5의 분포를 나타냈다.

3. 학교 주변 환경과 실내·외 먼지 농도

학교들 간에 입자 크기별 농도 분포를 상대표준편차(relative standard deviation, RSD)로 비교한 결과, 실내·외 모두 RSD의 크기는 흡입성 먼지<PM10<PM2.5<PM1.0으로 입자 크기가 작아질수록 학교 사이

의 농도 차이가 크게 나타났다(Table 2). 학교들 간에 농도 차이를 크게 나타나도록 기여하는 것은 Fig. 1에서와 같이 실내·외 모두 E-1과 M-1이 다른 학교에 비해 상대적으로 높은 농도를 나타내기 때문인데, E-1은 학교 주변에 매립지가 위치해 있는 곳이고 M-1은 공단 지역에 위치한 특성을 갖고 있다(Table 1). 특히 입자 크기가 작아질수록 E-1과 M-1의 농도는 다른 학교에 비해 격차가 더욱 크게 벌어지는 것을 볼 수 있어 학교 주변의 대기 오염원이 존재할 경우 교실 내부의 PM2.5 이하의 미세 먼지 농도에 많은 영향을 줄 수 있음을 시사한다.

학교 주변 환경을 크게 주거지역과 교통 밀집지역(4차선 도로, 지하철 선로, 항구 등), 그리고 공단 및 매립지 지역으로 구분하여 입자 크기별 먼지의 평균 농도를 비교한 결과 Fig. 2와 같이 공단 및 매립지 지역이 타 지역에 비해 뚜렷한 차이를 나타냄을 확인할 수 있으며, 흡입성 먼지를 제외한 PM10, PM2.5, 그리고 PM1.0 모두 지역 간에 통계적으로 유의한 차이를 보였다.

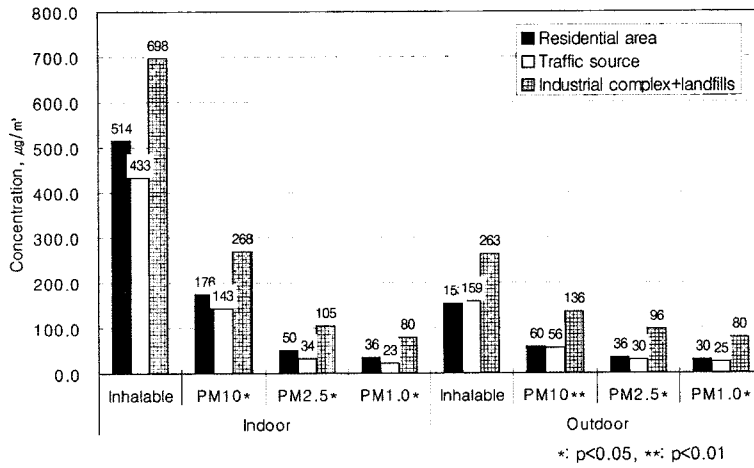


Fig. 2. Comparison of particulate mass concentrations by surrounding environments.

4. 실내·외 먼지 농도의 시간에 따른 변이

10개 학교의 교실 내부와 옥상에서 1분 간격으로 측정된 농도의 시간에 따른 변이를 입자 크기별 농도의 시간가중평균값과 표준편차로 비교한 결과는 Fig. 1과 같다. 실내 농도의 시간에 따른 변이가 실외 농도보다 크다는 것을 알 수 있으며, 입자의 크기가 작아질수록

실내 농도의 변이는 줄어드는 경향을 보이는 반면에 실외 농도의 변이는 큰 차이를 나타내지 않고 있다. 시간에 따른 농도 변이를 보다 자세히 분석하기 위해 Fig. 1에서 표준편차가 가장 크게 나타난 H-1 학교의 실내·외 먼지 농도를 실시간 모니터링 한 결과를 비교한 결과 Fig. 3과 같았다. 실내 농도의 시간별 변이를 보면

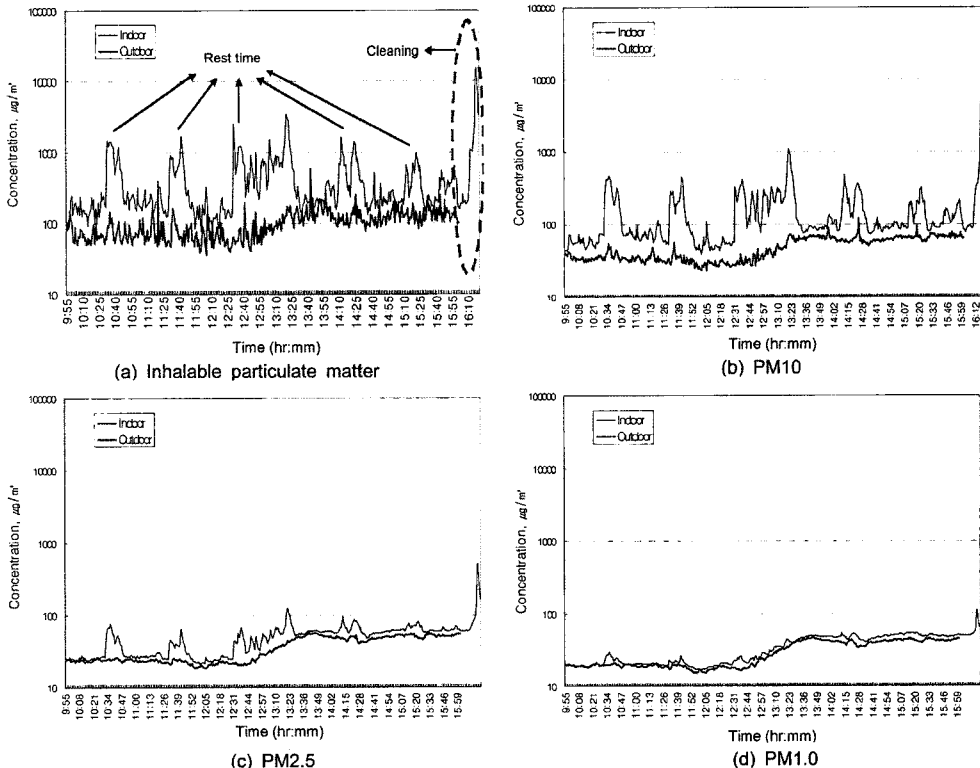


Fig. 3. An example of particulate mass concentration with time variation of high school classroom, H-1.

학생들의 활동이 활발한 쉬는 시간과 청소 시간에 실내 먼지 농도가 높아졌다가 활동이 적은 수업시간에는 다시 낮아지는 반복적인 패턴을 나타내고 있다. 특히 이러한 패턴은 흡입성 먼지에서 보다 뚜렷이 나타나고 있다. 반면에 실외 먼지 농도는 실내 농도의 반복적인

패턴과는 무관하게 나타나며, 오전보다 오후에 점차 먼지 농도가 높아지는 패턴을 보이고 있다. 흥미로운 점은 시간에 따른 먼지 농도의 변화 패턴이 흡입성 먼지보다는 입자 크기가 점차 작아질 수록 실내·외 농도 변화 패턴이 일치해 간다는 점이다.

Table 3. Correlations among particulate matters monitored in the indoor and outdoor air of classrooms

	Indoor				Outdoor			
	Inhalable	PM10	PM2.5	PM1.0	Inhalable	PM10	PM2.5	PM1.0
<i>Indoor</i>								
Inhalable	1							
PM10	0.948**	1						
PM2.5	0.655*	0.846**	1					
PM1.0	0.618	0.816**	0.998**	1				
<i>Outdoor</i>								
Inhalable	0.461	0.518	0.619	0.632	1			
PM10	0.529	0.689*	0.891**	0.903**	0.879**	1		
PM2.5	0.483	0.695*	0.950**	0.959**	0.750*	0.965**	1	
PM1.0	0.475	0.693*	0.952**	0.961**	0.738*	0.958**	0.999**	1

\*, p<0.05, \*\*: p<0.01.

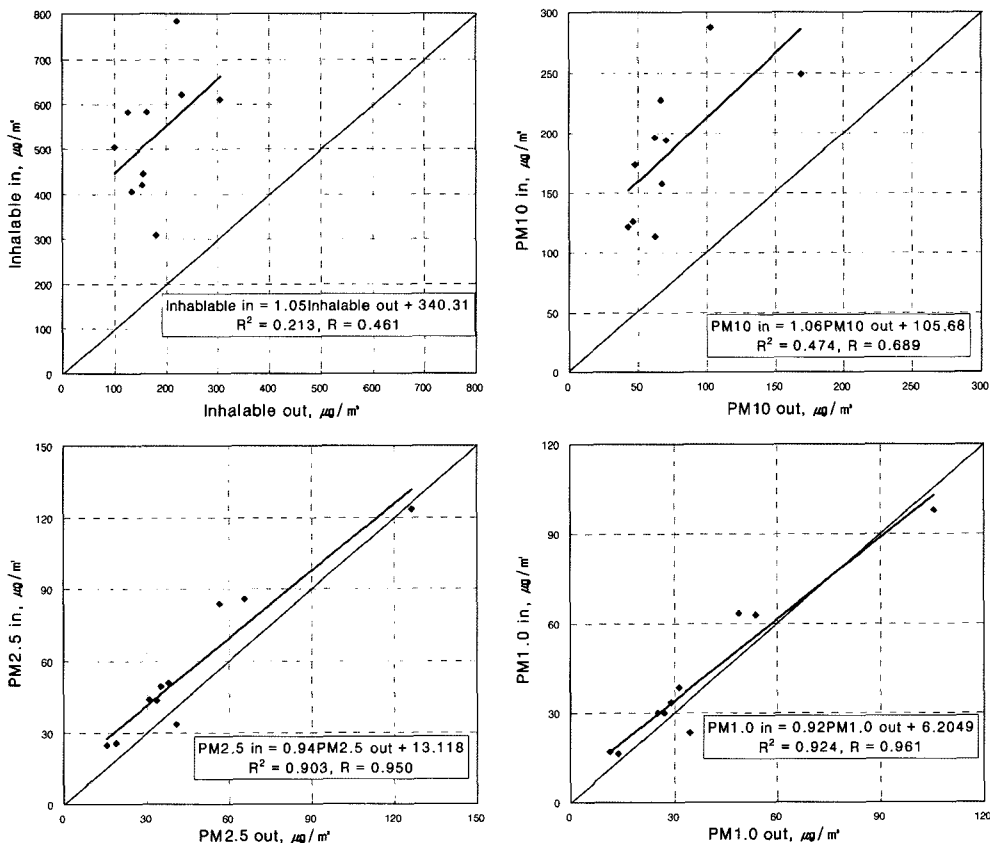


Fig. 4. Correlation between particulate mass concentrations of the indoor air and that of outdoor air by particle size.

### 5. 실내·외 먼지 농도 사이의 상관관계

교실 내부의 입자 크기별 먼지 농도 사이의 상관관계를 분석한 결과 PM2.5(in)과 PM1.0(in)의 상관성이 가장 크게 나타났으며( $r=0.998$ ,  $p<0.01$ ), 다음으로 흡입성 먼지(in)와 PM10(in), 그리고 PM10(in)과 PM2.5(in)순이었으며, 흡입성 먼지와 PM1.0 사이의 상관관계만 통계적인 유의성이 나타나지 않았다(Table 3). 실외 먼지 농도 사이에는 PM2.5(out)과 PM1.0(out), PM10(out)과 PM2.5(out), 그리고 PM10(out)과 PM1.0(out) 순으로 상관성이 나타났으며, 다른 입자크기별 상관성도 모두 통계적 유의성이 있는 것으로 나타났다(Table 3).

입자크기별 실내·외 사이의 상관관계를 분석한 결과 가장 상관성이 크게 나타난 것은 PM1.0(in)과 PM1.0(out) 이었고( $r=0.961$ ,  $p<0.01$ ), 다음으로 PM1.0(in)과 PM2.5(out), PM2.5(in)과 PM1.0(out), 그리고 PM2.5(in)과 PM2.5(out) 순이었다(Table 3). 또한 실내 흡입성 먼지와 실외 PM10, PM2.5, PM1.0, 그리고 실외 흡입성 먼지와 실내 PM10, PM2.5, PM1.0과는 모두 양의 상관계수를 나타냈으나 통계적 유의성은 없었다.

입자 크기별 실내·외 농도사이의 선형 회귀분석 결과 Fig. 4와 같이 흡입성 먼지와 PM10 농도보다 PM2.5와 PM1.0에 대한 실내·외 농도사이에 결정계수( $r^2$ )가 각각 0.903, 0.924로 나타나 회귀모델로 잘 설명할 수 있음을 알 수 있다. 또한 흡입성 먼지나 PM10 농도 보다 입자 크기가 작은 PM2.5와 PM1.0의 경우 실내·외 농도간 차이가 거의 없는 것으로 나타나 교실 내부의 PM2.5 및 PM1.0 농도는 교실 내부의 오염원 보다는 대부분 학교 주변 대기의 오염도에 의해 기인한다고 할 수 있다.

## IV. 고 찰

본 연구는 실내 미세먼지의 오염도는 실내 발생원과 실외 발생원에 의해 기여하며, 실내에 흡연, 난방 기구 연소, 조리과 같은 특별한 발생원(화학적 메커니즘에 기인)이 없는 가정과 사무실의 경우 거주자의 활동과 관련하여 발생하는 먼지(주로 물리적 메커니즘에 기인)가 실내 미세먼지의 주요 발생원이라고 한 Monn 등의 연구<sup>19)</sup>와 Luoma and Batterman 연구<sup>20)</sup>를 배경으로 하고 있다. 초·중·고등학교 교실내부는 금연으로 지정되어 있기 때문에 흡연에 의한 미세먼지 발생원이 없고 여름과 겨울철을 제외하고는 냉난방 설비 및 조리 등과 같은 화학적 메커니즘에 기인한 미세먼지 발생원이 없기 때문에 실내 미세먼지의 주요 발생 메커니즘은 학

생과 교사의 활동일 것이라 판단하였고 이러한 실내 거주자의 활동에 의한 미세먼지 발생이 입자 크기별 농도에 어떻게 영향을 주며, 학교 주변 대기 오염도에 의한 영향과 비교하고자 하였다.

본 연구의 조사 시기는 5월-6월 사이로 계절적으로 초 여름이었으나 조사 기간 동안 대상 학교 내부의 냉방설비는 가동하지 않았다. 이 시기에는 황사의 영향이 없고, 냉·난방 시설 등의 사용으로 인한 실내 미세먼지 발생원이 없으며, 기후가 온화하여 비교적 실내 학생들의 활동이 활발한 특징이 있다. 따라서 흡연이나 냉난방 설비 가동 등 별도의 실내 미세먼지 발생원이 없는 상태에서 실내 학생 및 교사의 활동과 미세먼지 농도와의 관계를 조사하는데 적절하다고 판단된다.

그러나 조사시기가 한 계절로 국한되었기 때문에 계절적 변이를 반영한 연중 대표 농도로 평가 하는 데는 한계가 있다. 국내에서 수행된 대기 중 미세먼지(PM10, PM2.5) 농도의 계절적 변이에 대한 연구<sup>29,30)</sup>에서는 계절에 따른 유의한 차이가 있음을 보고하고 있으며, 특히 강우량이 감소되고 기온 역전층 형성이 일어나는 겨울과 황사 영향이 있는 봄에 상대적으로 높게 나타난다고 분석하고 있다. 반면에 여름은 강우량의 영향으로 대기 중 미세먼지가 제거되는 wash-out 현상에 의해 다른 계절에 비해 가장 낮은 수준을 나타내고 있다.

또한 국내 초·중·고등학교 55개교를 대상으로 실내 공기 질 평가를 수행한 손종렬 등의 연구<sup>7)</sup>에 의하면 교실 내 PM10 농도는 계절적으로 유의한 차이를 보였으며( $p<0.01$ ), 여름이 가을( $95\pm 58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )과 겨울( $90\pm 43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 가장 낮은 농도( $62\pm 29 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )를 나타낸다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서 측정이 이루어지지 않은 다른 계절에는 보다 높은 농도 수준이 나타날 것으로 예상된다.

실외 PM10 농도는 평균  $74.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 측정되었는데, 같은 시기인 2005년 5월과 6월에 인천시 지역대기 측정망에서 측정된 PM10 월평균 농도는 각각  $63 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $69 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과보다 약간 낮은 수준을 나타내었다.<sup>31)</sup> 이는 본 연구 대상 학교 중 공단 주변에 위치한 M-1 학교가  $169 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 다른 학교에 비해 최고 약 4배 높게 나타난 점을 고려하면 지역대기 측정망 결과와 유사한 결과라고 할 수 있다. 2005년 대기환경연보<sup>31)</sup>에 의하면 인천시는 주요 대도시 중 2005년 연평균 PM10 농도가  $61 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높은 것으로 나타나고 있어 특히 학교 실내 환경에 미치는 대기 오염도의 중요성이 더욱 크다고 할 수 있다.

1986년 중학교 학생들의 실내 먼지 노출정도를 평가한 이영길과 백남원의 연구에서는 여름철 창문을 모두

열고 나일론 싸이클론을 이용한 호흡성 먼지 측정 결과, 평균  $870 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 매우 높은 수준을 나타내고 있다<sup>3)</sup>. 호흡성 먼지 농도는 PM10 농도보다 입자 크기별 채취효율의 차이 때문에 낮게 나타나는데, 이를 고려하더라도 본 연구에서의 교실 내 PM10 평균 농도는  $184 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 큰 차이를 보였다. 이는 약 20년 전, 후의 학교 환경에 대한 비교의 의미가 있다고 판단되는데 가장 큰 차이는 교실 내 학생 밀집도라고 할 수 있다. 이영길과 백남원의 연구에서는 조사 대상 교실 내부 학생수는 65-70명으로 본 연구의 32-42명과 비교할 때 약 2배 정도 많은 수이며, 학생들의 활동에 의한 실내 먼지 농도의 증가 비율이 더욱 컸을 것으로 판단된다. 본 연구와 수행시기가 비슷한 2004년부터 2005년까지 학교 교실에 대한 PM10 농도를 조사한 손종렬 등의 연구<sup>7)</sup>에서는 PM10 농도를  $82 \pm 47 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하고 있으며, 본 연구 결과의 절반 수준이다. 이렇게 차이가 나는 이유는 본 연구의 대상 지역이 전국 주요 도시 중 연평균 PM10 오염도가 가장 높은 인천시에 국한되었다는 점과 측정동안 교실 내 창문을 청소할 때와 점심시간을 제외하고는 거의 개방하지 않아 환기가 잘 되지 않았다는 점, 그리고 실외 오염도와 실내 오염도 사이의 관계를 평가하기 위해 의도적으로 실외 오염도가 높을 것으로 예상되는 매립지 주변, 공단 주변, 교통 밀집 지역 주변 학교를 포함하여 선정함 때문으로 판단된다.

입자크기별 먼지 농도의 I/O ratio는 PM10의 경우 평균 2.7로 손 등<sup>7)</sup>의 연구 결과(2.4)와 비슷하였다. 본 연구에서는 PM10 뿐만 아니라 PM2.5와 PM1.0에 대한 I/O ratio를 비교한 결과 입자 크기가 작아짐에 따라 1에 가까워지거나 1 미만으로 낮아짐을 확인하였는데, 이는 입자 크기가 작을수록 실내 거주자(학생과 교직원)의 활동도에 의한 기여도가 낮기 때문이라고 판단된다(Table 1). Branis 등<sup>32)</sup>은 대학 강의실 한 곳을 대상으로 수업이 많아 실내 거주자의 활동도가 높은 주간과 주말로 나누어 실내 PM10, PM2.5, PM1.0의 농도를 측정하고 조사 대상 지역의 대기 측정망 자료에 의한 PM10 농도와의 I/O ratio를 비교하였는데, 수업이 많은 주간은 낮 시간동안 측정 결과만이 PM10(in)/PM10(out) ratio가  $1.07(\pm 0.32)$ 로 1을 넘었고 주말에는  $0.5-0.56$ 으로 1 미만임을 확인하였다. 또한 실내에서 측정한 먼지의 입자 크기별 비율을 비교한 결과 PM2.5(in)/PM10(in)은 실내 학생들의 활동도가 많은 시기에는  $0.51(\pm 0.32)$ 인데 비해 활동도가 거의 없는 주말과 야간에는  $0.74-0.87$ 로 높아졌으며 이는 일반적인 대기 중 ratio와 유사하였다. 국내 서울을 비롯한

수도권 대도시의 대기 중 PM2.5(out)/PM10(out) ratio를 조사한 연구<sup>30,33)</sup>에 의하면 평균값은 0.71-0.73으로 보고하고 있다. 본 연구 결과 실외 농도를 이용한 PM2.5(out)/PM10(out) ratio를 계산해 보면  $0.59(\pm 0.16)$ 이며, 교실 내부 농도를 이용한 PM2.5(in)/PM10(in) ratio는  $0.29(\pm 0.09)$ 로 Branis 등의 연구와 유사하게 실내 활동도에 의해 농도 영향을 많이 받는 실내가 실외보다 PM10 농도 중 PM2.5가 차지하는 비율이 낮게 나타났다. 이는 실내 활동도가 실내 미세먼지 오염도에 미치는 영향은 입자 크기별로 다르다는 것을 증명해 주는 것이다. 즉 실내 활동도는 PM2.5와 같은 미세입자(fine particle) 보다는 거대입자(coarse particle, PM10-PM2.5)의 농도 증가에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

실내 학생 및 교직원의 활동도가 실내 먼지 오염도에 어떻게 영향을 주는지를 보다 분명히 확인하기 위해 본 연구에서는 등교시간부터 하교시간까지(청소시간 포함) 1분 간격으로 데이터를 저장하여 시간에 따른 분포도를 분석하였다. 총 10개 학교의 자료 중 가장 시간에 따른 변이가 크게 나타난 H-1 학교에 대한 입자 크기별 분포도를 분석한 결과 Fig. 3과 같이 입자 크기가 큰 흡입성 먼지와 PM10의 경우는 쉬는 시간과 점심시간 및 청소시간에 수업시간과 비교하여 높은 농도의 피크를 반복적으로 나타냄을 확인 할 수 있었다. 그러나 PM2.5와 PM1.0의 농도 변화에서는 흡입성 먼지와 PM10과 비교하여 활동도에 의한 피크 변화가 뚜렷하지 않았으며, PM1.0은 대기 중 농도 분포와 거의 일치함을 보였다. 이러한 결과는 앞서 입자 크기별 I/O ratio와 Branis 등의 연구 결과와 같이 입자 크기가 작을수록 실내 활동도에 의한 영향보다는 실외 대기 오염도의 영향을 많이 받는다는 것을 더욱 확실히 증명해 주는 것이다.

학교 주변 환경을 특별한 점오염원이 없는 일반 거주 지역과 교통 혼잡지역, 그리고 공단 및 매립지 지역으로 구분하여 실내·외 먼지 농도에 미치는 영향을 비교한 결과 Fig. 2에서와 같이 흡입성 먼지를 제외한 PM10, PM2.5, PM1.0에 대해서 주변 환경에 따른 유의한 차이를 보였다. 그러나 거주지역과 교통혼잡 지역 사이의 농도 차이는 크게 나타나지 않았으며, 매립지 및 공단 주변지역과의 차이가 뚜렷하였다. 이는 본 연구에서 분류한 교통 혼잡 지역의 구분은 도로 차선이 4차선 이상인 지역과 지하철 선로 주변, 그리고 항구 주변 지역이었으며, 일반 거주지역은 다세대 주택가와 아파트 단지였다. 일반 거주지역도 2차선 이하의 도로가 학교 주변에 위치하고 있어 차량 통행량의 차이가



크지 않았을 것으로 판단된다. 그러나 매립지나 공단과 같은 미세먼지의 점(혹은 면) 오염원이 주변에 있는 경우에는 학교 교실 내 미세먼지의 농도 증가에 분명히 영향을 준다고 할 수 있다.

실내·외 입자 크기별 먼지 농도 사이의 상관관계를 분석한 결과 흡입성 먼지와 PM10에 비해 PM2.5와 PM1.0 농도 사이의 양의 상관성이 보다 뚜렷이 나타나고 있어, 미세입자(PM2.5, PM1.0) 농도와 거대입자(PM10-PM2.5) 농도에 미치는 요인과 기여도가 다르다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있다. 이는 실내·외 농도 사이의 회귀분석 결과에서 보다 분명히 나타나는데, 흡입성 먼지보다 미세입자일 수록 실내·외 농도 사이의 선형 회귀 모델에 의한 설명력( $r^2$ )도 높아지고, 일치도도 높아짐을 알 수 있다. 이는 '실내 농도=실내 활동도에 의한 발생량+대기 오염물질의 유입량'이라고 할 때, 실내 농도와 대기 오염물질 농도와 일치도가 높아지기 위해서는 환기율이 일정하다고 가정 할 때 실내 활동도에 의한 발생량이 거의 '0'에 가까워야 가능해진다. 따라서 회귀모델의 설명력( $r^2$ )이 흡입성 먼지 → PM10 → PM2.5 → PM1.0으로 갈수록 높아지며 일치도가 높아지는 것은 실내 활동도에 의한 실내 농도에 대한 기여도가 PM2.5나 PM1.0과 같은 미세입자에는 별 영향을 미치지 않는다고 할 수 있으며 대기 오염도에 의한 영향이 지배적이라고 할 수 있다. 이러한 특성을 고려할 때 대기 중의 미세먼지 농도와 학생들의 건강에 대한 역학 연구를 수행할 때 PM10 농도 보다는 PM2.5 농도를 활용하는 것이 보다 명확한 인과관계를 파악하는데 도움이 될 것으로 판단된다.

## V. 결 론

본 연구는 2005년 5월부터 6월까지 인천광역시 소재 초·중·고등학교 10개에 대해 교실내부와 건물 옥상에서 같은 시간동안 동시에 흡입성 먼지, PM10, PM2.5, 그리고 PM1.0에 대해 실시간 측정함으로써 실내 거주자의 활동도와 대기오염도가 실내 미세먼지의 입자 크기별 농도에 미치는 영향을 평가하였다.

1. 실내·외 입자 크기별 농도의 시간에 따른 변이를 분석한 결과 교실 내부의 먼지 농도는 학생들의 활동도가 높은 휴식 시간과 점심시간, 그리고 청소 시간 때 매우 높은 피크를 나타낸 후 수업시간에는 다시 낮아지는 반복적인 패턴을 나타내었으며, 이러한 패턴은 PM2.5와 PM1.0과 같은 미세입자보다는 흡입성 먼지와 PM10에서 보다 뚜렷이 나타났다.

2. 입자크기별 먼지 농도의 I/O ratio는 흡입성 먼지

는 3.2(1.7-5.0), PM10의 경우 2.7(1.5-3.6)로 모두 실내 농도가 실외 농도보다 높게 나타났으나, PM2.5는 1.3(0.8-1.6), PM1.0은 1.1(0.7-1.5)로 미세입자일 수록 실외와 실외 농도가 비슷하거나 실외 농도가 높게 나타났다.

3. 실외 농도를 이용한 PM2.5(out)/PM10(out) ratio를 계산해 보면 0.59( $\pm 0.16$ )이며, 교실 내부 농도를 이용한 PM2.5(in)/PM10(in) ratio는 0.29( $\pm 0.09$ )로 실외가 실외보다 PM10 농도 중 미세입자(PM2.5)가 차지하는 비율이 낮게 나타났다. 이는 거주자의 활동도가 PM2.5와 같은 미세입자(fine particle) 보다는 거대입자(coarse particle, PM10-PM2.5)의 농도 증가에 미치는 영향이 크다고 할 수 있다.

4. 학교 주변에 매립지나 공단과 같은 특별한 오염원이 있는 경우 흡입성 먼지를 제외한 실내·외 PM10, PM2.5, PM1.0에 대해서 주변 환경에 따른 유의한 농도 차이를 보였다( $p < 0.05$ ).

4. 실내·외 입자 크기별 먼지 농도 사이의 상관관계를 분석한 결과 흡입성 먼지와 PM10에 비해 PM2.5와 PM1.0 농도 사이의 양의 상관성이 보다 뚜렷이 나타나고( $r > 0.9$ ), 실내·외 농도 사이의 회귀분석 결과 흡입성 먼지보다 미세입자일 수록 회귀 모델에 의한 설명력( $r^2$ )도 높아지고( $r^2 > 0.9$ ), 일치도도 높아졌다. 따라서 실내 활동도에 의한 실내 농도에 대한 기여도가 PM2.5나 PM1.0과 같은 미세입자에는 별 영향을 미치지 않는다고 할 수 있으며 대기 오염도에 의한 영향이 지배적이라고 할 수 있다.

이상의 연구 결과에 기초해 볼 때, 교실 내 입자크기별 먼지 농도는 미세입자와 거대입자로 나누어 발생 메커니즘을 이해해야 하며, 연소에 의한 특별한 실내 발생원이 없을 경우에는 거주자의 활동도에 의해 거대입자의 농도가 증가하는 반면, 미세입자의 농도는 학교 주변 대기 오염도에 의해 영향을 받는다고 할 수 있다. PM2.5 이하의 미세입자들은 거대입자에 비해 작은 창문과 벽의 틈을 통해서도 실내로 유입이 잘 된다고 알려져 있어<sup>34-36</sup> 건물이 노후화 되었거나 교실 내 틈이 많을 경우 실내 미세입자의 농도는 주변 대기 오염도의 영향을 더욱 많이 받게 될 것이다.

따라서 교실 내 미세먼지 농도를 저감하기 위해서는 두 가지의 접근 방법이 고려되어야 한다. 거대입자에 대한 먼지 농도를 저감하기 위해서는 실내 활동도에 의한 기여도가 크므로 실내 활동도에 의한 발생원인 백묵 사용(먼지 발생이 적은 고밀도 백묵 혹은 물백묵 사용), 칠판 지우개의 청소 방법(전동 흡입식 청소기 사용), 바닥 청소 상태(청결상태 유지), 청소 방법(습식 혹은

은 진공 청소 방법) 등의 개선과 교실 당 학생 수를 점차적으로 줄여야 한다. 최근 연구에서는 미세입자 뿐만 아니라 교실 내 거대입자는 학생들에게 알려지나 염증을 반응을 일으키는 주요 요인이라고 밝히고 있어<sup>37,41)</sup> 거대입자에 대한 관리는 매우 중요하다고 할 수 있다. 미세입자의 농도를 저감하기 위해서는 노후화된 건물의 remodeling, 실내 공기정화 장치의 활용과 함께 무엇보다도 학교의 위치 선정에 있어 주변 대기오염원의 적절한 이격 거리 등에 대한 고려가 필요하다.

## 감사의 글

본 연구는 인천광역시 전국교직원노동조합협의회 지원으로 이루어졌으며, 연구에 협조해 주신 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- Levy, J. I., Lee, K., Spengler, J. D. and Yanagisawa, Y. : Impact of residential nitrogen dioxide exposure on personal exposure: An international study. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **48**, 553-60, 1998.
- Silvers, A., Florence, B. T., Rourke, D. L. and Lorimor, R. J. : How children spend their time a sample survey for use in exposure and risk assessment. *Risk Analysis* **14**, 931-944, 1994.
- Lee, Y. and Paik, N. : Student exposure to airborne dusts in classroom of middle schools. *Korean Journal of Environmental Health Society*, **13**(2), 25-33, 1987.
- Maroni, M., Seifert, B. and Lindvall, T. (Eds.) : Indoor air quality, a comprehensive reference book. air quality monographs, Vol. 3. elsevier, amsterdam. 1995.
- Jones, A. P. : Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, **33**, 4535-4564, 1999.
- Kim, Y., Lee, C., Moon, J. and Kim, S. : A study on the indoor air pollution in the classrooms of primary middle and high schools in Seoul and Gyeonggi-do. *Journal of Korean Society of School Health*, **16**(1), 81-90, 2003.
- Sohn, J., Roh, Y. and Son, B. : The assessment of survey on the indoor air quality at schools in Korea. *Korean Journal of Environmental Health*, **32**(2), 140-148, 2006.
- Yu, S., Cha, J., Kim, D. and Lee, J. : Effects of fine particles on pulmonary function of elementary school children in Ulsan. *Korean Journal of Environmental Health*, **33**(5), 365-371, 2007.
- Jeung, Y. and Choi, S. : Assessment of formaldehyde concentration in indoor and outdoor environments of schools in Incheon. *Korean Journal of Environmental Health*, **33**(5), 372-378, 2007.
- Dockery, D. W., Pope, C. A. 3rd, Xu, X., Spengler, J. D., Ware, J. H., Fay, M. E., Ferris, B. G. Jr and Speizer, F. E. : An association between air pollution and mortality in six U.S. cities. *The New England Journal of Medicine*, **329**, 1753-1759, 1993.
- Samet, J. M., Dominici, F., Curriero, F. C., Coursac, I. and Zeger, S. L. : Fine particulate air pollution and mortality in 20 U.S. cities: 1987-1994. *The New England Journal of Medicine*, **343**, 1742-1749, 2000.
- McConnell, R., Berhane, K., Gilliland, F., London, S. J., Vora, H., Avol, E., Gauderman, W. J., Margolis, H. G., Lurmann, F., Thomas, D. C. and Peters, J. M. : Air pollution and bronchitic symptoms in Southern California children with asthma. *Environmental Health Perspectives*, **107**, 757-760, 1999.
- U.S. Environmental Protection Agency, "National Ambient Air Quality Standards for Particulate Matter - Final Rule", 40 CFR part 50, *Federal Register*, 62(138):38651-38760, July 18 1997.
- Yocom, J. E. : Indoor/outdoor air quality relationships; a critical review. *Journal of Air Pollution Control Association*, **32**, 500-520, 1982.
- Owen, M. K., Ensor, D. S. and Sparks, L. E. : Airborne particle sizes and sources found in indoor air. *Atmospheric Environment*, **26**, 2149-2162, 1992.
- Wallace, L. : Indoor particles: a review. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **46**, 98-126, 1996.
- Long, C. M., Suh, H. H. and Koutrakis, P. : Characterization of indoor particle sources using continuous mass and size monitors. *Journal of the Air & Waste Management Association*, **50**, 1236-1250, 2000.
- Monn, C. : Exposure assessment of air pollutants; a review on spatial heterogeneity and indoor/outdoor/personal exposure to suspended particulate matter, nitrogen dioxide and ozone. *Atmospheric Environment*, **35**, 1-32, 2001.
- Monn, C., Fuchs, A., Hogger, D., Junker, M., Kogelschatz, D., Roth, N. and Wanner, H.-U. : Particulate matter less than 10 mm(PM10) and fine particles less than 2.5 mm (PM2.5); relationships between indoor, outdoor and personal concentrations. *Science of the Total Environment*, **208**, 15-21, 1997.
- Luoma, M. and Batterman, A. : Characterization of particulate emissions from occupant activities in offices. *Indoor Air*, **11**, 35-48, 2001.
- American Conference of Governmental Industrial Hygienists: Particle size-selective sampling for particulate air contaminants. JH Vincent, ed. ACGIH, Cincinnati, OH, 1999.
- Teikari, M., Linnainmaa, M. and Laitinen, J., Kallio-koski, P., Vincent, J., Tiitta, P. and Raunemaa, T. : Laboratory and field testing of particle size-selective sampling methods for mineral dusts. *American Industrial Hygiene Association Journal*, **64**, 312-318, 2003.
- Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B. and Rüden, H. : Particulate

- matter in the indoor air of classrooms-exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment*, **41**, 854-866, 2007.
24. Heudorf, U., Neitzert, V. and Spark, J. : Particulate matter and carbon dioxide in classrooms-The impact of cleaning and ventilation. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*. 2007. doi:10.1016/j.ijheh.2007.09.011
  25. Linnainmaa, M., Laitinen, J., Leskinen, A., Sippula, O. and Kalliokoski, P. : Laboratory and field testing of sampling methods for inhalable and respirable dust. *Journal of Occupational and Environmental Hygiene*, **5**, 28-35, 2008.
  26. Ministry of Environment: Enforcement Ordinance of Indoor Air Quality Management Act in the Public Using Facility. Article 3. Table 2. Mandatory standard of the indoor air quality management. Ordinance of Ministry of Environment 201, 2006.
  27. Ministry of Education and Human Resources: Enforcement Ordinance of the School Health Act. Article 3. Table 4-2. Air quality standard in classroom. Ordinance of Ministry of Education and Human Resources 905, 2007.
  28. Ministry of Environment: Enforcement Decree of the Framework Act on Environmental Policy Article 2. Table 1. Environmental standards. Presidential Decree 20680, 2008.
  29. Shin, E., Choi, M., Sunwoo, Y. and Chung, Y. : Trace elements characterization of PM10 in Seoul area. *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, **16**, 23-35, 2000.
  30. Kim, S., Chung, M., Son, B., Yang, W. and Choi, K. : A study on airborne particulate matter of a local area in Seoul. *Korean Journal of Environmental Health*, **31**(4), 301-308, 2005.
  31. Ministry of Environment: Annual report of ambient air quality in Korea, 2005. 2006.
  32. Branis, M., Rezacova, P. and Domasova, M. : The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM10, PM2.5, and PM1 in a classroom. *Environmental Research*, **99**, 143-149, 2005.
  33. Choi, G., Kim, J., Kim, T., Gang, G., Gang, C. and Kim, S. : Evaluation of monitoring data on fine particles. KOSAE Spring conference. *Korean Society for Atmospheric Environment*, 2003.
  34. Mosley, R. B., Greenwell, D. J., Sparks, L. E., Guo, Z., Tucker, W. G., Fortman, R. and Whitfield, C. : Penetration of ambient fine particles into the indoor environment. *Aerosol Science and Technology*, **34**, 127-136, 2001.
  35. Thornburg, J., Ensor, D. S., Rodes, C. E., Lawless, P. A., Sparks, L. E. and Mosley, R. B. : Penetration of particles into buildings and associated physical factors. Part I: model development and computer simulations. *Aerosol Science and Technology*, **34**, 284-296, 2001.
  36. Liu, D.-L. and Nazaroff, W. W. : Particle penetration through building cracks. *Aerosol Science and Technology*, **37**, 565-573, 2003.
  37. Gravesen, S., Larsen, L., Gyntelberg, F. and Skov, P. : Demonstration of microorganisms and dust in schools and offices. an observational study of non-industrial buildings. *Allergy*, **41**, 520-525, 1986.
  38. Einarsson, R., Munir, A. K. M. and Dreborg, S. K. G. : Allergens in school dust. 2. Major mite (DER-P-1, DER-F-1) allergens in dust from Swedish schools. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, **95**, 1049-1053, 1995.
  39. Wheeler, A. J., Williams, I., Beaumont, R. A. and Hamilton, R. S. : Characterisation of particulate matter sampled during a study of children's personal exposure to airborne particulate matter in a UK urban environment. *Environmental Monitoring and Assessment*, **65**, 69-77, 2000.
  40. Nordback, D., Walinder, R., Wieslander, G., Smedje, G., Erwall, C. and Venge, P. : Indoor air pollutants in schools: nasal patency and biomarkers in nasal lavage. *Allergy*, **55**, 163-170, 2000.
  41. Tortolero, S. R., Bartholomew, L. K., Tyrrell, S., Abramson, S. L., Sockrider, M. M., Markham, C. M., Whitehead, L. W. and Parcel, G. S. : Environmental allergens and irritants in schools: a focus on asthma. *Journal of School Health* **72**, 33-38, 2002.