

## 학교 실내공기질 및 건강 영향

양원호†

대구카톨릭대학교  
(2009. 5. 6. 접수/2009. 5. 26. 수정/2009. 6. 8. 채택)

## School Indoor Air Quality and Health Effects

Won-Ho Yang†

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu  
(Received May 6, 2009/Revised May 26, 2009/Accepted June 8, 2009)

### ABSTRACT

Indoor air quality at classrooms is of special concern since students are susceptible and indoor air problems can be so subtle that it does not always produce easily recognizable health effects. The main objectives of the study were to investigate the time-activity pattern of school students, to determine the sources of poor indoor air quality in schools, and to demonstrate how indoor air quality in schools causes adverse health effects such as headache, upper airway irritation, fatigue, and lethargy. Recent articles ranging from 1987-2009 related to school indoor air quality were systematically reviewed. Building-associated health effects can increase student absences from school and degrade the performance of children while in school. The reduced ventilation rate was associated with a decreased ability to concentrate along with increased adverse health symptoms. There was an association between residential proximity to busy roads and a variety of adverse respiratory health outcomes in children. Consequently, the current findings suggest the need for control strategy for school indoor air pollutants with multidisciplinary approach methods because Korea has no other natural resources except manpower especially.

**Keywords:** school, classroom, indoor air quality, health effects

### I. 서 론

우리나라의 초등학생부터 고등학생들은 신체와 정신의 성장발육이 왕성한 시기이기 때문에 보건학적으로 중요한 민감 인구집단이며 하루 중 많은 시간을 학교의 실내환경에서 학습 및 생활하고 있으므로 교실의 실내공기질은 매우 중요한 문제이다.<sup>1)</sup> 학교의 실내공기질 중 유해오염인으로는 분진과 건축자재에서 발생하는 포름알데히드(HCHO), 휘발성 유기화합물(VOCs), 석면 그리고 겨울철 난방 기구에서 발생하는 연소 유해가스 등의 화학적 요인과 소음 및 조명 등의 물리적인 요인이 있으며 학생들의 걸상과 책상에 관한 인간공학적인 환경도 보건학적으로 중요하다.<sup>2)</sup>

학교 실내공기질의 중요성은 선진 외국에서 이미 인식되어 많은 연구가 수행되고 있다. Shendell 등은 학

교 교실에서 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 농도가 1000 ppm 증가할 때 학생들의 결석률이 10~20% 증가했음을 보고하였고,<sup>3)</sup> Rosen과 Richardson은 학교 교실에 전기집진기를 이용한 공기정화기를 설치하여 학생들의 결석률을 감소시켰다.<sup>4)</sup> 프랑스 학교 교실에서 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, VOCs), 암모니아, 이산화황(SO<sub>2</sub>)을 측정한 Meininhaus 등은 실내공기오염물질이 학생들에게 감각 기능에 영향이 있음을 보고하였고,<sup>5)</sup> Daisey 등은 학교교실에서 HCHO, VOCs, bioaerosol, 불충분한 환기가 천식 등의 호흡기 질환을 야기할 수 있다고 보고하였다.<sup>6)</sup> 반면, 국내에서는 실외 대기오염 노출에 따른 학생들의 건강영향 연구는 일부 수행되었으나,<sup>7)</sup> 학교 교실의 실내공기질 연구는 다양한 학문분야에서 수행되고 있으나 대부분 공기질 평가에 국한되고 있는 실정이다.<sup>8-12)</sup>

미국 환경청 보고서에 의하면 미국의 5개 학교 중 1곳에서 실내공기질 문제가 발생하고 있으며, 학교 실내공기질의 중요성으로 학생들은 신체적으로 계속 성장하는 과정이기 때문에 공기오염물질 노출에 따른 건

†Corresponding author : Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu  
Tel: 82-53-850-3739, Fax: 82-53-850-3739  
E-mail : whyang@cu.ac.kr

강영향이 높다고 하였다. 또한 1982년 이후 어린이 천식 환자가 49% 증가하였고, 10세까지의 어린이가 감기에 걸릴 가능성이 성인보다 3배 높으며 불량한 교실의 실내공기질은 졸음, 두통과 집중력 감소를 야기시킬 수 있다고 하였다.<sup>13)</sup>

지난 30년 동안 실내공기질 및 건강영향에 대한 관심이 증가되었다. 에너지 효율적인 건축기술이 실내환경을 더욱 밀폐화 시켰으며 다양한 합성 건축자재에서 유해물질의 배출이 높으며, 재실자의 실내공기 오염물질 노출에 따른 건강영향 가능성이 다양한 연구에서 발표되고 있다.<sup>14,15)</sup> 학교 교실의 실내공기질은 공공(public) 개념의 실내환경으로 한 국가의 미래를 책임지는 학생 집단이기 때문에 중요성이 크다고 할 수 있으며, 우리나라와 같이 인적자원이 중요한 곳에서는 학생 집단의 교실 공기질은 더욱 중요하다고 할 수 있다.

본 연구는 학교 교실 실내공기질에 초점을 두고 연령 10대 학생을 대상으로 하루 중 학교에서 보내는 시간을 분석하였고, 국내·외에서 보고된 연구논문을 고찰하여 학교 교실의 실내발생원, 실내공기질 노출에 따른 위해 및 건강영향, 학교 교실 실내공기질 개선을 중심으로 비교하였다.

## II. 연구방법

본 연구와 관련된 비교적 최근의 연구논문을 국내·외에서 고찰하였다. 우선 국내에서 통계청의 2004년 일일생활시간조사를 분석하여 학생층으로 구분될 수 있는 10대 연령의 시간활동양상을 분석하였다. 그리고 국내·외에서 보고된 학교 실내공기질 연구논문을

을 분석하였다.<sup>16)</sup> 연구논문은 ScienceDirect, EBSCO host, PubMed와 DBPIA를 이용하여 검색하였다. 주요 검색어는 ‘school(학교)’, ‘classroom(교실)’, ‘indoor air quality(실내공기질)’, ‘student(학생)’, ‘health(건강, 보건)’이었다.

## III. 결과 및 고찰

### 1. 한국 학생들의 시간활동 양상

우리나라 10대 연령 학생들의 시간활동 양상을 통계청의 2004년 ‘생활시간조사’에서 분석하여 Table 1에 나타내었다. 통계청에서 실시한 생활시간조사는 2004년 9월 2일~13일에 수행되었으며, 10대 연령은 평일 3,219명 주말 2,138명 이었다. 10대 연령의 학생집단은 평일 하루 중 대략 주택 52.2%, 기타 실내환경(학교, 학원 등) 39.6%, 차량 6%를 보내는 것으로 나타났다. 반면 주말의 경우 각각 70.8%, 20.9%, 5.8%로 평일과 다른 양상을 보였다. 편이계수를 고려할 때 학생집단에서도 초등, 중등, 고등학생들의 시간활동 양상은 상당한 차이가 있음을 알 수 있으며, 10대 연령의 학생들을 초등, 중등, 고등, 대학으로 구분하여 Table 2에 나타내었다. 학년이 증가할수록 주택에서 보내는 시간이 유의하게 감소하고 있음을 알 수 있으며, 기타 실내환경(학교, 학원 등)에서 보내는 시간이 유의하게 증가하였다. 한편 대학생으로 구분되는 만 19세는 중등, 고등학생과 다른 시간활동 양상을 나타내었다.

인간의 활동양상은 시간에 따라 계속 변하며 시간활동양상은 유해인자 노출과 밀접한 연관성을 갖고 있다.<sup>17)</sup> Ashmore와 Dimitroulopoulou(2009)는 공기오염

Table 1. Time activity pattern of teenagers by weekday and weekend

Micro-environment	Type	N	Mean (hr)	S.D.	95% Confi. interval		C.V.	
					Lower	Upper		
Indoor	House	Weekday	3219	12.52	3.14	12.41	12.63	25.50
		Weekend	2138	16.99	4.33	16.80	17.17	25.48
	Others	Weekday	3219	9.50	3.00	9.39	9.60	32.93
		Weekend	2138	5.02	3.61	4.86	5.17	71.87
Outdoor	House	Weekday	3219	0.01	0.06	0.01	0.01	676.24
		Weekend	2138	0.02	0.08	0.01	0.02	676.24
	Others	Weekday	3219	0.56	0.66	0.54	0.58	122.66
		Weekend	2138	0.62	0.74	0.59	0.65	122.66
Transport	Weekday	3219	1.44	0.80	1.41	1.47	57.86	
	Weekend	2138	1.39	1.14	1.34	1.43	57.86	

\*S.D.: standard deviation.

\*C.V.: coefficient of variation.

**Table 2.** Time-activity patterns of teenagers by weekday according to academic grades

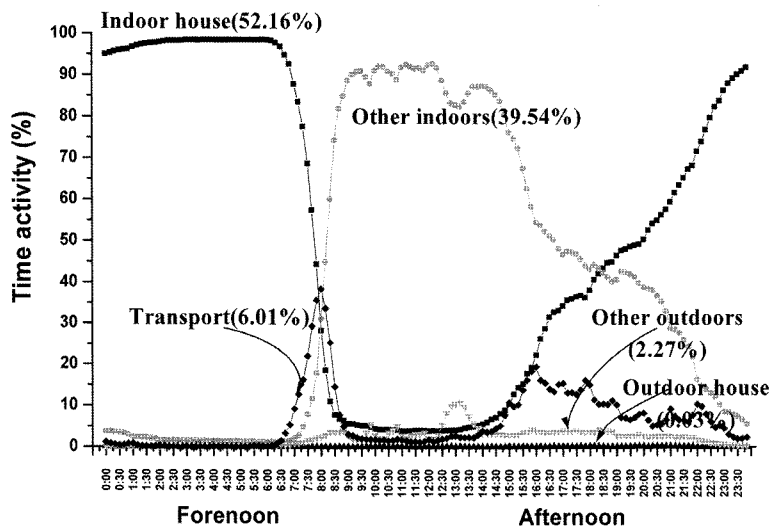
Micro-environment	Grade	Age	N	Mean	S.D.	95% Confi. interval		C.V.	Post hoc (<0.05)	
						Lower	Upper			
Indoor	House	Elementary (a)	10~12	1120	13.96	1.99	13.85	14.08	14.27	b,c
		Middle (b)	13~15	982	12.46	2.50	12.30	12.62	20.08	a,c,d
		High (c)	16~18	905	10.45	3.44	10.23	10.68	32.94	a,b,d
		University (d)	19	212	13.97	4.19	13.40	14.54	30.00	b,c,
	Others	Elementary (a)	10~12	1120	8.18	1.76	8.08	8.29	21.57	b,c,d
		Middle (b)	13~15	982	9.70	2.21	9.56	9.84	22.77	a,c,d
		High (c)	16~18	905	11.40	3.56	11.17	11.63	31.21	a,b,d
		University (d)	19	212	7.24	3.71	6.73	7.74	51.31	a,b,c
Outdoor	House	Elementary (a)	10~12	1120	0.01	0.06	0.00	0.01	891.42	d
		Middle (b)	13~15	982	0.01	0.05	0.00	0.01	830.79	d
		High (c)	16~18	905	0.01	0.05	0.00	0.01	819.12	d
		University (d)	19	212	0.02	0.07	0.01	0.03	407.52	a,b,c
	Others	Elementary (a)	10~12	1120	0.58	0.64	0.54	0.62	110.21	b
		Middle (b)	13~15	982	0.48	0.59	0.44	0.51	124.01	a,d
		High (c)	16~18	905	0.55	0.75	0.50	0.60	136.84	
		University (d)	19	212	0.65	0.69	0.56	0.75	106.16	b
Transport	Elementary (a)	10~12	1120	1.27	0.53	1.23	1.30	41.73	b,c,d	
	Middle (b)	13~15	982	1.36	0.61	1.32	1.40	45.28	a,c,d	
	High (c)	16~18	905	1.59	0.98	1.53	1.66	61.86	a,b,d	
	University (d)	19	212	2.12	1.29	1.95	2.30	60.90	a,b,c	

\*S.D.: standard deviation.

\*C.V.: coefficient of variation.

물질에 대한 노출에서 청소년의 주된 국소환경이 집, 학교, 차량이며 이것은 성인과 같지 않기 때문에 노출 양상의 유의한 차이를 언급하며 각 국소환경에서 보낸 시간의 중요성을 강조하였다.<sup>18)</sup> 영국의 Briggs 등(2003)

이 만 9~13세 447명 학생들의 시간활동조사 결과에서는 평균 주택실내 14.8 hr(61.7%), 기타실내 7.5 hr(31.3%), 이동 1.3 hr(5.42%)를 나타내어 우리나라 학생들과 시간활동 양상이 같지 않을 것을 알 수 있으며,



**Fig. 1.** Weekday time activity patterns according to the hour of day.

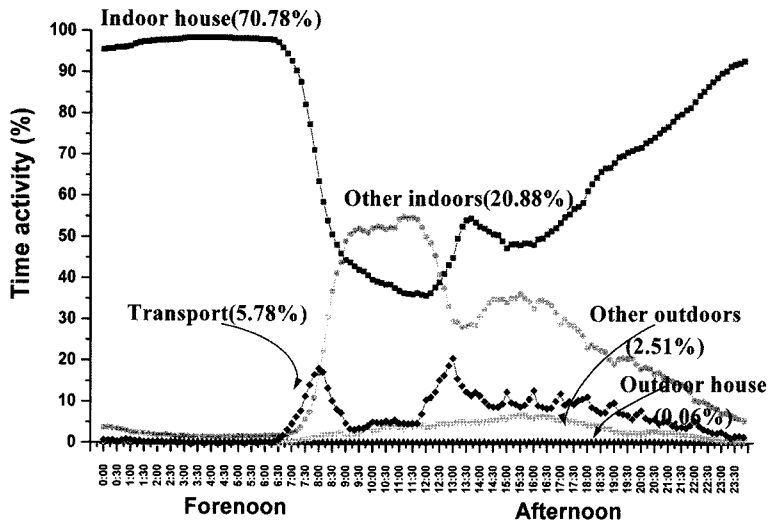


Fig. 2. Weekend time activity patterns according to the hour of day.

우리나라의 중학생이 상대적으로 학교 및 기타실내(학원 등) 공기오염물질의 노출기간이 대략 2.2 hr 높다고 할 수 있다.<sup>19)</sup> 시간대별 양상을 분석하면 학교에서 수업을 받는 오전 9시~오후 5시경까지는 학교 등의 기타 실내환경에서 대부분 시간을 보내는 것으로 나타났으며, 학교 후 학원 등의 기타 실내환경 시간이 나타나고 있음을 알 수 있다(Fig. 1 및 Fig. 2).

## 2. 학교 실내공기 오염물질 발생원

학교 교실의 실내 발생원은 우선적으로 학생들의 호흡에 의한 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 발생을 고려할 수 있다. CO<sub>2</sub>는 유해한 공기오염물질이라기 보다는 환기정도를 나타내는 지표로 Yang 등(2005)은 소음 때문에 창문을 닫고 수업하는 교실에서 CO<sub>2</sub> 농도가 1,675 ppm까지 도달하고 있음을 보고하였다.<sup>20)</sup> 그리스 아테네에서 자연환기를 이용한 27 학교 62 교실에서 대략 52%의 교실이 실내환경 CO<sub>2</sub> 기준인 1,000 ppm를 초과하였으며 1인당 8 l/sec 공기유량으로 교실의 CO<sub>2</sub> 농도를 1,000 ppm 수준으로 감소시킬 수 있다고 하였다.<sup>21)</sup> 폴란드 바르샤바에서 수행한 연구에서도 28 교실의 CO<sub>2</sub> 농도가 모두 1,000 ppm을 초과하였다.<sup>22)</sup> 학교 교실의 창문을 이용한 자연환기는 일정한 공기를 유입·유출시킬 수 없기 때문에 환기가 항상 부족할 가능성을 나타낸다고 할 수 있다. 국내 연구 결과에서도 대부분의 교실에서 1,000 ppm을 초과하는 양상을 보였다. 반면 홍콩에서 수행된 연구에서는 공조장치와 천장 송풍기 있는 5개 교실에서도 자주 CO<sub>2</sub> 농도가 1,000 ppm을 초과하였으며, PM<sub>10</sub>의 농도가 최대 1,000 µg/m<sup>3</sup>을 초

과하였다.<sup>23)</sup>

독일 뮌헨의 64 학교에서 측정된 교실의 PM<sub>2.5</sub>와 PM<sub>10</sub> 농도는 여름과 겨울에 각각 12.7 µg/m<sup>3</sup>, 64.9 µg/m<sup>3</sup>과 19.8 µg/m<sup>3</sup>, 91.5 µg/m<sup>3</sup>을 나타내었으며, CO<sub>2</sub> 농도는 각각 405 ppm과 1,603 ppm을 나타내었다. 그리고 상대습도가 10% 증가할 때마다 PM<sub>2.5</sub>가 1.7 µg/m<sup>3</sup>씩 증가하며, CO<sub>2</sub> 농도가 100 ppm 증가할 때마다 2.8 µg/m<sup>3</sup>씩 증가하였다.<sup>24)</sup> 이것은 재실자가 공기오염물질의 발생원일 가능성을 나타낸다고 생각한다. 반면 국내에서 보고된 결과에서는 교실의 PM<sub>10</sub> 농도가 여름(103.50±116.00 µg/m<sup>3</sup>)이 겨울(101.25±70.61 µg/m<sup>3</sup>)과 비슷한 수준을 나타내었다.<sup>25)</sup> Son 등(2008)의 연구에서도 여름과 겨울의 PM<sub>10</sub> 농도는 비슷한 수준을 나타내었다. 국외 결과와 차이는 환기 등 각 국가의 교실 특성이 다르기 때문일 것으로 생각한다.<sup>26)</sup>

학교 교실의 부족한 환기를 고려할 때 반드시 유의할 점은 유입된 공기가 오염된 상태일 수 있다는 점이다. Roosbroeck 등(2007)은 고속도로 근처에 위치한 학교와 도로변에서 멀리 떨어진 곳에 위치한 학교 학생들을 대상으로 PM<sub>2.5</sub>, soot, NO<sub>x</sub>, NO<sub>2</sub>의 개인노출평가를 수행하였다. 그 결과에 의하면 도로변에 위치한 학교 실외의 농도는 soot가 74%, NO<sub>x</sub> 52% 높았으며, 개인노출 농도는 도로변에 위치한 학교의 학생들이 soot 37%, NO<sub>x</sub> 37% 높은 값을 나타내었다.<sup>27)</sup> 이 결과는 학교가 도로변 또는 유해물질 배출 사업단지에 위치하는 경우 실외 공기오염물질이 환기를 통해 교실 실내로 유입되어 학생들에게 노출될 수 있음을 나타내며 학교 위치가 노출에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

학생들이 교실에서 수업 및 쉬는 시간 활동에 의해 입자상 물질의 농도가 높아질 수 있다. Branis 등(2005)의 연구에 의하면 교실내 학생 수와 PM<sub>10,2.5</sub>의 농도는 유의한 상관관계( $r=0.68$ ,  $p<0.0009$ )를 보여 교실의 실내 발생원이 있음을 보고하였다.<sup>28)</sup> 반면에 PM<sub>10</sub>의 경우 실외 공기와 유의한 상관관계를 나타내어, 학교 교실의 입자상 물질은 실내 발생원 및 실외 발생원의 영향이 있는 것으로 보고하였다. 이 결과는 학교 교실의 청소상태, 학생들의 활동에 따른 2차 먼지를 고려할 수 있으며, 교실 입구에 신발 dust mat를 설치하여 총부유물질(TSP)의 농도가 48%, PM<sub>10</sub>의 농도가 51% 감소한 연구를 고려하면 학생들이 쉬는 시간 활동에서 실외 공기오염물질을 함유하여 교실 실내로 유입시킬 수 있음을 알 수 있다.<sup>29)</sup> Stranger 등(2008)도 PM<sub>2.5</sub> 농도의 실내/실외 농도비가 1이상이며 급속 성분 분석에 의하면 실내와 실외 PM<sub>2.5</sub>의 성분이 서로 같지 않았으며 학생들에 의해 재부유하는 2차 먼지 가능성을 제시하였다. 또한 NO<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>과 오존은 주로 실외 대기의 유입으로 보고하였다.<sup>30)</sup> 비슷한 결과로 재실 학생들에 따라 교실의 입경에 따른 입자상 물질의 농도가 결정되는 것으로 Poupard(2005)는 보고하였다.<sup>31)</sup> 그리고

오존의 경우 학교 교실 실내환경에서 화학적 반응이 일어날 수 있을 것으로 추정하였다.

새로 건축되었거나 리모델링된 학교 교실에서 건축자재, 마감재, 책상, 의자에서 HCHO 및 VOCs의 농도 증가를 나타낼 수 있다. Yang 등(2009)은 국내 55개 학교의 교실, 컴퓨터실, 실험실에서 실내공기질을 측정하여 신축 학교 교실의 HCHO의 실내/실외 농도비가 최고 6.32이었으며, 1년 이내 건축된 학교 건물이 유의하게 높은 농도를 보였다.<sup>25)</sup> 주된 발생원은 마감재, 건축자재 그리고 새로 구입된 책상과 의자이었다. VOCs는 특히 휘발성에 의해 여름철에 높은 농도를 나타내었다. Yura 등(2005) 신축된 학교에서 측정된 물질에서 특히 HCHO의 농도가 유의하게 높았으며, 리모델링 교실에서는 톨루엔의 농도가 높았다. 또한 4층의 콘크리트 학교 건물에서 1층과 2층 보다는 3층과 4층이 HCHO와 VOCs의 농도가 높은 경향을 나타내었으며, 3층 건물에서는 3층이 2층보다 높은 농도를 나타내었다. 이런 신축 및 리모델링 학교 교실 재학생들이 건물 증후군(sick building syndrome, SBS)을 보이는 것으로 보고하였다.<sup>32)</sup> Yang 등(2005)은 국내 학교 교실에서 주요 발생원으로 신축학교의 건자재, 마감재, 책상에 의

**Table 3.** Indoor air quality standards

	Korea			Japan		Singapore
	Ministry of education, science and technology (school)	Ministry of Environment	Ministry for Health, welfare and family affairs	Ministry of Labor	Ministry of education, culture, sports, science and technology (school)	Ministry of Environment
PM <sub>10</sub> (µg/m <sup>3</sup> )	100	100~200	150	150	150	150
CO (ppm)	10	10~25	25	10	10	-
CO <sub>2</sub> (ppm)	1,000	1,000	1,000	1,000	1,500	1,000
NO <sub>2</sub> (ppm)	0.05	0.05~0.3	-	0.05	0.06	-
HCHO (µg/m <sup>3</sup> )	100	120	-	0.1	100	120
Total microbial count (CFU/m <sup>3</sup> )	800	800	-	800	-	600
Airborne microorganism (CFU/m <sup>3</sup> )	10	-	-	-	10	9
Radon (pCi/L)	4	4	-	-	-	-
VOC s(µg/m <sup>3</sup> )	400	400~1000	-	500	Toluene: 260 Ethylbenzene: 3,800 Xylene: 870 Styrene: 220 Paradichlorobenzene: 240	3 (ppm)
Asbestos (f/cc)	0.01	0.01	-	0.01	-	-
Mite (CFU/m <sup>3</sup> )	100	-	-	-	100	0.05 (ppb)
O <sub>3</sub> (ppm)	0.06	0.06~0.08	-	0.06	-	-

해 HCHO의 최고 농도 0.11 ppm, 왁스(wax) 등에 의한 바닥청소제 사용에 의해 TVOCs가 0.41 ppm, 컴퓨터 교실의 책상 등의 신가구류 구입에 의해 HCHO의 최고 농도가 0.30 ppm로 재실 학생들에게 건강영향을 야기할 가능성을 보고하였다.<sup>20)</sup>

### 3. 학교 실내공기질 법규

국내의 실내공기질 관련 법규를 살펴보면 교육인적자원부의 학교 교실에 대한 학교보건법, 환경부의 다중이용시설(지하역사, 의료기관, 찜질방 등 17개 시설군)과 다중이용시설등의 실내공기질관리법, 보건복지가족부의 공중이용시설(학원, 공연장, 업무시설 등) 공중위생관리법, 사무실 관련 산업보건기준에 관한 규칙이 있다(Table 3). 외국의 대부분의 국가에서 실내공기질 기준이 지침(guideline)로 제시되고 있는 반면 국내는 법(standard)으로 규정되어 있으며, 특히 학교 실내공기질 법규는 일본과 한국 뿐인 것으로 조사되었다. 우리나라의 경우 학교 실내공기질 기준이 환경부, 보건복지부, 노동부에 비해 엄격함을 알 수 있으며, 일본에 비해서도 강화된 기준임을 알 수 있다. 학교 보건법 시행규칙에 의하면 자연 및 기계환기를 이용하여 1인당 환기량이 21.6 m<sup>3</sup>/hr 이상, 오염물질 방출 건축자재 및 책상·의자 사용 제한, 교실내 소음은 55 dB(A)이다. 학교 교실내 공기질 기준을 설정하는 것은 긍정적이지만 무엇보다 적절하게 준수되고 시행되는 것이 중요하며, 학교 보건법 시행규칙에서 환경위생관리자가 지정 범위가 '소속직원'에서 '소속교직원'으로 변경됨에 따라 대부분의 학교에서는 교직원 중에서 보건교사가 학교 실내공기질 담당하고 있지만 보건교사에 대해 적절한 실내공기질 정보와 지식이 부족한 실정이다.

### 4. 학교 실내공기질에 대한 건강영향

학생은 작은 성인인 아니며 성장이 급격히 진행되기 때문에 환경 유해물질 노출에 상대적으로 민감하며, 학교에서 많은 시간을 보내는 학생들은 어른들 보다 호흡량이 상대적으로 많기 때문에 실내 공기 오염물질에 대한 감수성이 상대적으로 높다.<sup>33,34)</sup> 국내·외에서 보고된 연구논문에서 학생들의 학교 교실 실내공기 오염물질 노출에 따른 발암 등의 질병발생은 보고되고 있지 않지만 다양한 위해 및 건강영향이 나타나고 있다.

비교적 많이 보고된 것은 환기부족에 따른 CO<sub>2</sub> 농도 증가이다. 교실 실내와 실외의 CO<sub>2</sub> 농도를 측정하여 실내농도-실외농도(dCO<sub>2</sub>)와 학생들의 결석률을 비교했을 때 dCO<sub>2</sub>가 1000 ppm 이상일 때 결석율이 0.5~0.9% 증가(p<0.05)하였다.<sup>35)</sup> 대상 교실은 22 학교의 409 교

실이었으며 대부분은 공조시설(heating, ventilation, and air conditioning, HVAC)을 갖추고 있었다. 그리고 환기율의 저하로 자극 증상증가와 학생들의 집중력 저하를 증가시켰다. 교실 내 평균 CO<sub>2</sub> 농도는 집중력 검사 성적과 유의한 상관관계를 보였으며, CO<sub>2</sub> 농도가 0~999, 1,000~1,499, 1,500~4,000 ppm로 증가할수록 학업수행 능력 평균 지표는 감소하였다.<sup>36)</sup> 한편 미국 연구에서는 54 초등학교에서 5학년생을 대상으로 조사한 결과 불량한 실내공기질이 결석률을 증가시키고, 학습능력을 저하시키는 것으로 나타났다. 특히 교실의 환기율과 수학(math) 시험 성적에서 유의한 양의 상관성을 나타내었다(p<0.10).<sup>37)</sup>

NO<sub>2</sub>에 대한 어린이 노출을 연구한 Pilotto(1997)는 실외 대기의 배경농도가 20 ppb인 곳에서 최고 농도가 80 ppb 이상에 노출된 어린이는 인후통, 감기, 학교 결석이 유의하게 증가한다고 하였다.<sup>38)</sup> 그리고 겨울철 난방 기구로 비배기(unflued) 가스 히터(heater)를 사용하는 곳을 전기 히터로 교체했을 경우 유의하게 천식 증상이 감소하였다. 천식(asthma)을 앓고 있는 학생들의 개인 노출평가에서 주택실내, 실내 흡연자 존재와 학교 교실 실외의 차량 수가 주요 영향인자로 보고되었으며,<sup>40)</sup> 프랑스의 비 산업지구인 학교의 80명 학생들이 각각 자극 물질인 알데히드, 유기산, VOCs, SO<sub>2</sub>, NH<sub>3</sub> 노출에 따른 학생들의 증상을 조사한 결과 눈의 따가움, 상기도 자극증상, 두통, 햇바늘로 인한 학생들이 불평을 보고하고 있다.<sup>41)</sup> 이 연구에서는 습도, 환기부족, 그리고 정신사회적(psychosocial)인 면도 영향을 주었을 가능성을 제시하였다. Kim 등(2006)의 연구에서는 신축 학교의 미생물 VOCs와 가스제인 TMPD-MIB(2,2,4-trimethyl-1,3-pentandiol) 및 TMPD-DIB(2,2,4-trimethyl-1,3-diisobutyrate)이 학생들의 천식과 유의한 상관성을 나타내었다.<sup>42)</sup> 측정된 가스제는 주로 수용성 페인트 성분이었으며 실내 냄새와 자극제로 알려져 있다. 이 결과를 한국의 학생들과 비교 연구를 수행하여, 수면시 호흡곤란 증세가 한국 학생들이 높아 그 원인 중 하나가 분진 중 알레르겐 때문일 것으로 추정하였다.<sup>43)</sup> Putus 등(2004)은 학교 실내공기질과 건강영향의 단면연구를 통해서 연관성을 조사하였다. 학생 수는 274명으로 교실의 천장에서 누수가 있었으며 바닥은 습한 상태였고 하수구에서 발생하는 탄화수소 및 2-ethylhexanol이 교실내로 유입되고 있는 교실의 학생은 건강상태에 대한 설문조사한 결과에서 호흡기 자극, 천식 증상, 안구 증상과 바이러스 호흡기계 감염 등을 증가시키는 건강의 악영향 사이의 상관성이 있는 것으로 나타났다.<sup>44)</sup>

산업화의 진행이 왕성한 중국에서 학생 1,993명을 대상으로 학교 실내·외 공기질과 건강영향을 조사한 결과에서는 1.8%의 학생들은 천식 증상이 있었으며, 8.4%는 숨이 가쁨, 29.8%는 호흡곤란을 나타내었다. 특히 SO<sub>2</sub>, NO<sub>2</sub>, HCHO 농도는 호흡곤란과 양의 상관관계를 나타내었다. 실외공기 오염물질 농도는 교실 실내 공기 오염물질 농도에 비해 2배 또는 3배 높았기 때문에 주로 실외공기 유입에 의한 것이었다.<sup>45)</sup> 그리고, 중국 상하이시의 학교 교실에서 환기, NO<sub>2</sub>, 오존, HCHO를 측정하고 천식과 호흡기 증상을 조사한 연구에서 주된 실내공기질 영향 요인은 도로변 차량 배기 가스의 유입이었으며 창문의 개폐에 의한 자연환기가 외기 공기오염물질을 정화 없이 유입시켜 학생들의 천식과 호흡기 질환을 증가시켰다.<sup>46)</sup>

스웨덴의 12 초등학교에서 279명의 학생들을 대상으로 교실 공기오염물질인 HCHO, NO<sub>2</sub>와 *Aspergillus* spp.는 비개존성(nasal patency)과 비염증에 영향을 주었으며, 그 원인으로 불충분한 환기를 지적하였다.<sup>47)</sup> 습기가 많은 학교 교실에서는 공기중 균류(fungi)의 증가된 농도가 호흡기 질병을 야기시키는 것으로 보고되었다.<sup>48)</sup> 한편, Daisey 등(2003)은 1999년까지 보고된 학교 교실 공기질과 건강영향 논문을 고찰하면서 주된 공기 유해인자가 환기와 연관된 CO<sub>2</sub> 그리고 HCHO 및 미생물이며 특히 HCHO는 알레르기 민감도, 만성 자극에 위해 요인을 증가시킨다고 하였다.<sup>49)</sup> 또한 천식과 빌딩 증후군 증상은 VOCs, 곰팡이, 미생물 VOCs 및 알레르겐의 노출과 연관성이 있었다.

국내 연구에서는 신축건지 얼마 되지 않는 학교의 경우 신축 건물의 벽지, 바닥재, 페인트 등 각종 건축자재에서 나오는 포름알데히드, 휘발성 유기화합물질로 인해 교실 공기오염에 학생들이 노출되며, 학교 실내공기질은 학생들의 건강에 악영향을 미치는 것으로 보고되고 있다.<sup>50)</sup> 이 연구에서는 의도적으로 개방한 학급의 주의 집중력, 단기기억력 및 시각적 탐색능력을 반영하는 부호 숫자 짝짓기의 반응시간이 1교시에 비해 4교시에 5.9% 증가하였고, 평소대로 수업한 학급은 8.3% 증가하여 포름알데히드와 VOCs가 학생들의 중추신경계 기능, 즉 인지기능을 저하시키는 것으로 확인되었다. 또한 신축학교 및 대조학교의 학생들의 비교에서 신축학교의 경우 '코파가움'을 호소하는 학생이 71명 중 8명인 반면에 대조학교의 경우는 63명 중 0명으로 두 학교간의 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 실내 공기오염으로 나타날 수 있는 자각 증상으로는 상기도 자극증상, 점막 자극증상, 하기도 자극증상, 신경학적 증상, 피부자극 증상 등 이었다. 이들 증상은 눈따가움,

코파가움, 목따가움, 코막힘, 머리아픔, 기침, 피부가려움, 메스꺼움 등으로 나타나는 것으로 보고되고 있다.<sup>51)</sup>

석면의 경우 학교 교실의 천장 등에서 배출되어 공기 중 노출 가능성이 있지만 국내외 적으로 학생들에게 폐암 및 중피종에 대한 보고는 없었다. 이것은 석면 사용 금지 뿐만 아니라 석면 노출에 따른 건강영향의 잠복기가 장기적이기 때문이다.<sup>52)</sup> 학교 교실의 석면 노출은 학생 보다는 학교 선생님에 대한 영향이 직업병으로 고려되고 있고 있으며, 최근 영국에서는 학교 선생님이 장기간 석면 노출에 따른 폐암 발병이 사회적으로 문제가 되고 있다.<sup>53,54)</sup> 또한 건축된지 오래된 학교에서는 건물의 부식과 함께 석면 노출 가능성이 높으며, 보수 및 리모델링으로 학생들에게 석면 노출이 심각하게 문제가 될 수 있기 때문에 관리가 시급할 것으로 생각한다.

## 5. 실내공기질 개선 방법

일반 실내환경의 공기질 개선의 주요 방법은 실내발생원 감소, 환기, 공기청정 등으로 이미 알려져 있다. 학교 실내공기질의 경우도 비슷한 방법으로 개선할 수 있다. 첫번째는 실내 발생원을 감소 또는 제거하는 것을 생각할 수 있다. 특히 신축건물의 경우 건축자재, 마감재 및 책상 및 의자 등의 가구류에서 공기오염물질을 배출하지 않거나 저배출 재료를 사용해야 한다. 둘째로는 교실 실내·외 환기율을 증가시키는 것이다. 이미 언급했듯이 청정한 공기 유입이 중요하며, 정화장치가 구비된 공조시설을 효율적인 환기는 실내공기질 개선을 할 수 있다.<sup>55)</sup> 그리고 공기청정기를 교실에 설치하는 것이다. Rosen과 Richardson(1999)의 연구에 의하면 실내용으로 새로 개발된 전기집진식 공기 청정기를 어린이 집(day-care center)에 설치했을 때 실외공기의 미세 입자상물질을 78% 그리고 실내 발생의 입자상 물질을 45% 감소시키는 것으로 나타났으며, 이전보다 결석률을 55% 감소시키는 것으로 보고하였다.<sup>4)</sup> 공기청정기 유량과 제거 효율을 반드시 고려해야 하며 동시에 필터 교환 등의 적절한 유지보수가 중요하다. 학교 교실의 효율적인 실내공기질 관리를 위해서는 다양한 연구자 및 관계자가 협력하여 문제점을 확인하고 해결해야 한다. 예를 들면 실내공기질 전문가뿐만 아니라 공학자, 미생물학자, 역학자 및 학교 관계자와 지역 공무원들이 종합적으로 접근해야 효과적인 개선 대책을 마련할 수 있다.<sup>56)</sup>

## IV. 결 론

본 연구는 학교 교실 실내공기질에 초점을 두고 연령

10대 학생들의 시간활동 양상과 국내·외에서 보고된 연구논문을 고찰하여 학교 교실의 실내발생원, 실내공기질 노출에 따른 위해 및 건강영향을 비교하였다. 한국의 10대 연령 학생집단은 평일 하루 중 대략 주택 52.2%, 기타 실내환경(학교, 학원 등) 39.6%, 차량 6%를 보내는 것으로 나타났다. 주택실내 시간을 제외하면 많은 시간을 학교 및 학원 등에서 학습 및 생활하며, 따라서 학교 교실에서 공기오염물질에 노출될 가능성이 높다. 학교 실내공기 오염물질의 주요 발생원은 호흡 및 환기부족에 의한 CO<sub>2</sub>, 신축건물의 마감재 및 책상에서 배출되는 VOCs와 HCHO, 습기에 의한 미생물인 것으로 파악되었으며, 도로변 인접 학교에서는 실외 대기오염물질(NO<sub>2</sub>, VOCs, soot 오존 등)의 유입이 주요 노출인자이었다. 학교 교실 실내공기질 노출에 따른 건강영향은 주로 천식 등의 호흡기 질환을 야기할 수 있는 것으로 파악되었으며, 불량한 공기질은 결석률의 증가, 학습능력 저하, 집중력 감소를 야기하였다. 특히 서구에서는 화학적 유해인자 보다는 균류, 곰팡이 등의 미생학적 인자 영향 연구가 상대적으로 많이 수행되었다.

국내에서 보고된 연구는 대부분 학교 실내공기질 평가에 국한되어 있기 때문에 향후에는 종합적 평가 및 개선대책 연구가 필요한 것으로 생각한다. 개선대책으로는 주로 공기 청정과 관련된 환기개선이 주로 연구되었으며, 신축건물에서 유해물질 저배출 건자재, 마감재, 가구류 사용이었다. 학교 교실의 실내공기질은 주택의 사적(private)인 면 보다는 공공(public) 개념의 실내환경으로 한 국가의 미래를 책임지울 수 있는 학생 집단이기 때문에 중요성이 크다고 할 수 있으며, 우리나라와 같이 지하자원이 부족하고 인적자원이 중요한 곳에서는 학생 집단의 교실 공기질은 더욱 중요하다고 할 수 있다. 특히 우리나라의 높은 교육열과 학생들의 대학입시로 인한 과중한 학습량을 갖고 있는 특수한 상황을 고려할 때 학교 교실의 실내공기질은 국가적으로 관심을 갖고 지속적으로 평가 및 관리를 해야 할 것으로 생각한다.

### 참고문헌

- Sohn, J. R., Roh, Y. M., Son, B. S. : The assessment of survey on the indoor air quality at schools in Korea. *Journal of Environmental Health Sciences*, **32**(2), 140-148, 2006.
- Paek, N. W. : School environment. *Journal of Korean Society of School Health*, **4**(2), 31-38, 1991.
- Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., Faulkner, D. : Association between CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, **14**, 333-341, 2004.
- Rosen, K. G., Richardson, G. : Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism - A hypothesis. *Science of Total Environment*, **234**, 87-93, 1999.
- Meininghaus, R., Kouniali, A., Mandin, C., Ciolella, A. : Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school. *Environment International*, **28**, 553-557, 2003.
- Daisey, F. M., Angell, W. J., Apte, M. G. : Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools : an analysis of existing information. *Indoor Air*, **13**(1), 53-64, 2003.
- Moon, J. S., Kim, Y. S., Kim, J. H., Son, B. S., Kim, D. S., Yang, W. : Respiratory health effects among schoolchildren and their relationship to air pollutants in Korea. *International Journal of Environmental Health Research*, **19**(1), 31-48, 2009.
- Yang, W. H., Son, B. S., Kin, D. W., Kim, Y. H., Byeon, J. C., Kwon, Y. D. : Evaluation of indoor air quality improvement by formaldehyde emission rate in school indoor environment using mass balance. *Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene*, **15**(3), 160-165, 2005.
- Bae, Y. J., Kim, K. H., Chon, H. T., Ahn, J. S. : Heavy metal concentrations of indoor and outdoor dusts - in middle schools in the Kangseoku and Yangchonku areas, Seoul -. *Journal of Korean Earth Science Society*, **19**(5), 449-460, 1998.
- Kang, S. A., Choi, S. J., Kim, Y. S. : The relativity analysis between indoor air quality and building construction conditions in Incheon area's schools - focused on completion time of building and construction materials. *Journal of Korean Society Living Environmental System*, **15**(2), 277-286, 2008.
- Kim, Y. D. : Measurement of classroom air quality in large cities in summer. *Journal of the Korean Solar Energy Society*, **27**(1), 63-74, 2007.
- Sohn, J. R., Yoon, S. W., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., Son, B. S., Yang, W. H., Lee, Y. G., Choi, H. Y., Lee, J. S. : A survey on the indoor air quality of some school classrooms in Korea. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, **3**(1), 54-63, 2006.
- U.S. Department of Energy : Causes of indoor air quality problems in schools. 2000.
- Jones, A. P. : Indoor air quality and health. *Atmospheric Environment*, **33**, 4535-4564, 1999.
- Kotzia, D. : Indoor air and human exposure assessment - needs and approaches. *Experimental and Toxicology Pathology*, **57**, 5-7, 2005.
- Korean National Statistical Office : Time use survey. 2004.
- Klepeis, N. E., Nelson, W. C., Ott, W. R., Robinson, J. P., Tsang, A. M., Switzer, P., Behar, J. V., Hern, S. C., Engelmann, W. H. : The national human activity



- pattern survey (NHAPS): a resource for assessing exposure to environmental pollutants. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology*, **11**, 231-252, 2001.
18. Ashmore, M. R. : Dimitroulopoulou : Personal exposure of children to air pollution. *Atmospheric Environment*, **43**, 126-141, 2009.
  19. Briggs, D. J., Denman, A. R., Gulliver, J., Marley, R. F., Kennedy, C. A., Philips, P. S., Field, K., Crockett, R. M. : Time activity modelling of domestic exposures to radon. *Journal of Environmental Management*, **67**, 107-120, 2003.
  20. Yang, W. H., Byeon, J. C., Kim, Y. H., Kim, D. W., Son, B. S., Lee, J. E. : Assessment of indoor air quality of classroom in school by means of source generation - case study. *Journal of the Environmental Science*, **14**(10), 979-983, 2005.
  21. Santamouris, M., Synnefa, A., Assimakopoulos, M., Livada, I., Pavlou, K., Papaglastra, M., Gaitani, N., Kolokotsa, D., Assimakopoulos, V. : Experimental investigation of the air flow and indoor carbon dioxide concentration in classrooms with intermittent natural ventilation. *Energy and Buildings*, **40**, 1833-1843, 2008.
  22. Sowa, J. : Air quality and ventilation rates in schools in Poland - requirements, reality and possible improvements. *Indoor Air*, International Society of Indoor Air Quality and Climate, 68-73, 2002.
  23. Lee, S. C., Chang, M. : Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemoshpere*, **41**, 109-113, 2000.
  24. Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B., Ruden, H. : Particulate matter in the indoor air of classrooms - exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment*, **41**, 854-866, 2007.
  25. Yang, W., Sohn, J., Kim, J., Son, B., Park, J. : Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *Journal of Environmental Management*, **90**, 348-354, 2009.
  26. Son, B. S., Song, M. R., Kim, J. D., Cho, T. J., Yang, W. H., Chung, T. W. : The study on concentration of PM10 and heavy metal in public schools at Chunag-Nam area. *Journal of the Environmental Sciences*, **17**(9), 1005-1013, 2008.
  27. Roosbroeck, S. V., Jacobs, J., Janssen, N. A. H., Oldenwening, M., Hoek, G., Brunekreef, B. : Long-term personal exposure to PM<sub>2.5</sub>, soot and NO<sub>x</sub> in children attending schools located near busy roads, a validation study. *Atmospheric Environment*, **41**, 3381-3394, 2007.
  28. Branis, M., Rezacova, P., Domasova, M. : The effect of outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub>, and PM<sub>1</sub> in a classroom. *Environmental Research*, **99**, 143-149, 2005.
  29. Jung, J. W., Lee, H. K. : Improvement strategies for classroom IAQ in elementary schools. *Proceeding of the 39th Meeting of KOSAE*, 172-173, 2005.
  30. Stranger, M., Potgieter-Vermaak, S. S., Van Grieken, R. : Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indoor Air*, **18**, 454-463, 2008.
  31. Poupard, O., Blondeau, P., Iordache, V., Allard F. : Statistical analysis of parameters influencing the relationship between outdoor and indoor air quality in schools. *Atmospheric Environment*, **39**, 2071-2080, 2005.
  32. Yura, A., Iki, M., Shimizu, T. : Indoor air pollution in newly built or renovated elementary schools and its effects on health in children. *Nippon Koshu Eisei Zasshi*, **52**(8), 715-726, 2006.
  33. Landrigan, P. J. : Environmental hazards for children in USA. *International Journal of Occupational Medicine & Environmental*, **11**(2), 189-94, 1998.
  34. Faustman, E. M., Silbernagel, S. M., Fenske R. A., Burbacher T. M., Ponce, R. A. : Mechanisms underlying children susceptibility to environmental toxicants. *Environmental Health Perspective*, **108**, 13-21, 2000.
  35. Shendell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D., Faulkner, D. : Association between classroom CO<sub>2</sub> concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, **14**, 333-341, 2004.
  36. Myhrvold, A. N., Olsen, E., Lauridsen, O. : Indoor environment in schools-pupils health and performance in regard to CO<sub>2</sub> concentrations. *Indoor Air*, **4**, 369-74, 1996.
  37. Shaughnessy, R. J., Shaughnessy, U. H., Nevalainen, A., Moschandreas, D. : A preliminary study on the association between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*, **16**, 465-468, 2006.
  38. Pilotto, L. S., Douglas, R. M., Attewell, R. G., Wilson, R. G. : Respiratory effects associated with indoor nitrogen dioxide exposure in children. *International Journal of Epidemiology*, **26**, 788-796, 1997.
  39. Pilotto, L. S., Nitschke, M., Smith, B. J., Pisaniello, D., Ruffin, R. E., McElroy, H. E., Martin, J., Hiller, J. E. : Randomized controlled trial of unflued gas heater replacement on respiratory health of asthmatic schoolchildren. *International Journal of Epidemiology*, **33**(1), 208-211, 2004.
  40. Zhao, W., Hopke, P. K., Gelfand, E. W., Rabinovitch, N. : Use of an expanded receptor model for personal exposure analysis in schoolchildren with asthma. *Atmospheric Environment*, **41**, 4084-4096, 2007.
  41. Meininghaus, R., Kouniali, A., Mandin, C., Cicolella, A. : Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school. *Environment International*, **28**, 553-557, 2003.
  42. Kim, J. L., Elfman, L., Mi, Y., Weislander, G., Smedje, G., Norback, D. : Indoor molds, bacteria, microbial volatile organic compounds and plasticizers in schools - associations with asthma and respira-

- tory symptoms in pupils. *Indoor Air*, **17**, 153-163, 2007.
43. Kim, J. L., Elfman, L., Norback, D. : Respiratory symptoms, asthma and allergen levels in schools - comparison between Korea and Sweden. *Indoor Air* **17**, 122-129, 2006.
  44. Putus, T., Tuomainen, A., Rautiala, S. : Chemical and microbial exposures in a school building : adverse health effects in children. *Archives of Environmental Health*, **59**, 194-201, 2004.
  45. Zhao, Z., Zhang, Z., Wang, Z., Ferm, M., Liang, Y., Norback, D. : Asthmatic symptoms among pupils in relation to winter indoor and outdoor air pollution in schools in Taiyuan, China. *Environmental Health Perspectives*, **116**(1), 90-97, 2008.
  46. Mi, Y.-H., Norback, D., Tao, J., Mi, Y.-L., Ferm, M. : Current asthma and respiratory symptoms among pupils in Shanghai, China: influence of building ventilation, nitrogen dioxide, ozone, and formaldehyde in classrooms. *Indoor Air*, **16**, 454-464, 2006.
  47. Norback, D., Walinder, R., Wieslander, G., Smedje, G., Erwall, C., Venge, P. : Indoor air pollutants in schools : nasal patency and biomarkers in nasal lavage. *Allergy*, **55**, 163-170, 2000.
  48. Meklin, T., Husman, T., Vepsäläinen, A., Vahteristo, M., Koivisto, J., Halla-Aho, J., Hyvärinen, A., Moschandreas, D., Nevalainen, A. : Indoor air microbes and respiratory symptoms of children in moisture damaged and reference schools. *Indoor Air*, **12**, 175-183, 2002.
  49. Daisey, J. M., Angell, W. J., Apte, M. G. : Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air*, **13**, 53-64, 2003.
  50. Kim, D. S., Kim, S. J., Park, S. Y., Jeon, M. J., Kim, G. T., Kim, C. Y., Chung, J. H., Beak, S. O., Sakong, J. : The effects of indoor air quality on the neurobehavioral performance of elementary school children. *Korean Journal Occupational and Environmental Medicine*, **19**(1), 73-80, 2007.
  51. Apte, M. G., Fisk, W. J., Daisey J. M. : Associations between indoor CO<sub>2</sub> concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: an analysis of the 1994-1996 BASE study data. *Indoor Air*, **10**(4), 246-57, 2000.
  52. Committee on Environmental Hazards : Asbestos exposure in schools. *Pediatrics*, **79**(2), 301-305, 1987.
  53. Environmental Law Institute : School district liability for indoor air quality conditions. 2005.
  54. <http://www.guardian.co.uk/education/2009/apr/16/asbestos-teacher-cancer>. Accessed June 2, 2009.
  55. Guo, H., Morawska, L., He, C., Gilbert, D. : Impact of ventilation scenario on air exchange rates and on indoor particle number concentrations in an air-conditioned classroom. *Atmospheric Environment*, **42**, 757-768, 2008.
  56. Haverinen, U., Husman, T., Toivola, M., Suonketo, J., Pentti, M., Lindberg, R., Leinonen, J., Hyvärinen, A., Meklin, T., Nevalainen, A. : An approach to management of critical indoor air problems in school buildings. *Environmental Health Perspectives*, **107**, Supplement 3, 509-514, 1999.