

학생들의 시간활동 양상 및 학교 실내공기질

Time-activity Pattern of Students and Indoor Air Quality of School



양 원 호 / 대구가톨릭대 산업보건학과 부교수
 Yang, Won-Ho / Associate Professor, Catholic University of Daegu
 whyang@cu.ac.kr

1. 서론

우리나라 학생들은 신체와 정신의 성장발육이 왕성한 시기이기 때문에 보건학적으로 중요한 인구집단이며, 하루 24시간 중 대부분의 시간을 집과 학교 실내에서 학습 및 생활하고 있기 때문에 공기오염물질 노출 측면에서 집과 학교의 실내공기질 관리는 매우 중요하다(Yang, 2009). 주택이 개인적(private) 실내환경이라고 한다면, 학교 교실은 공적인(public) 실내환경으로 주택보다 공기질의 관리가 더 중요하다.

노출(exposure)은 오염물질과 사람사이의 접촉으로 정의될 수 있으며, 노출평가는 오염 물질에 대한 개인이나 인구집단의 환경 중 노출강도, 빈도 및 기간을 측정 또는 평가하는 과정이다. 사람들의 대부분은 실내환경에서 평일 하루 중 대략 90% 이상의 시간을 보내기 때문에 실내환경의 공기오염물질 농도와 재질시간을 알면 노출을 추정할 수 있다(Klepeis 등, 2001). Yang 등(2009)의 연구에 의하면 한국인들이 평일 1일 중 주택실내에서 14.23시간, 기타실내(직장, 학교, 기타 실내환경) 6.80시간, 이동 1.75시간, 실외 1.26시간을 보내는 것으로 보고되었다. 시간활동 양상에 관한 연구는 다양한 환경 유해인자 특히 공기오염물질 노출을 평가하기 위한 위해도 관리 측면에서 핵심적 부분이며, 특히 노출모델에서 중요하게 적용될 수 있다(Chau 등, 2002).

학교 교실의 실내공기 중 유해요인으로는 분진과 건축자재에서 나오는 포름알데하이드(HCHO), 휘발성 유기화합물(VOCs), 석면 등의 화학적 요인과 조명 및 소음 등이 있으며, 학생들의 책, 결상에 대한 인간공학적 환경도 보건학적으로 중요하다(Paek, 1991). 미국 환경청에서는 어

린이들이 하루 중 대부분의 시간을 실내환경에서 보내며, 실내환경 중 많은 시간을 학교 교실에서 보내기 때문에 학교 교실의 실내공기질은 어린이의 건강과 출석률에 영향을 준다고 하였다. 실내공기질이 양호한 학교에서는 결석률이 15% 감소하며 시험성적이 5% 증가하는 것으로 보고하였다(US EPA).

학교 실내공기질의 중요성은 선진 외국에서 이미 인식되어 많은 연구가 수행되고 있다. Keilb 등(2014)은 교실의 유해인자 등이 부비강(sinus), 두통, 알레르기, 목통에 영향을 주는 것으로 보고하였다. 학교 교실에서 이산화탄소(CO₂)농도가 1000ppm 증가할 때 학생들의 결석률이 10~20% 증가했음을 보고하였고(Sundell, 2004), Rosen과 Richardson(1999)은 학교 교실에 전기집진기를 이용한 공기정화기를 설치하여 학생들의 결석률을 감소시켰다. Daisey 등(2003)은 학교교실에서 HCHO, VOCs, bioaerosol, 불충분한 환기가 천식 등의 호흡기 질환을 야기할 수 있다고 보고 하였다. 반면, 국내에서는 실외 대기오염 노출에 따른 학생들의 건강영향 연구는 일부 수행되었으나, 학교 교실의 실내공기질 연구는 다양한 학문분야에서 수행되고 있으나 대부분 공기질 평가에 국한되고 있는 실정이다. 학교 교실 실내외에서 동시에 측정된 미세먼지(PM₁₀) 농도 결과에 따르면 실외 대기로부터 유입보다는 실내 발생원에 의한 것으로 보고되기도 하였다(Alves 등, 2014).

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 중요하다 할 수 있다.

2. 연구방법

본 연구와 관련된 비교적 최근의 연구논문을 국·내외에서 고찰하였다. 우선 국내에서 통계청의 2009년 일일생활시간조사를 분석하여 학생층으로 구분될 수 있는 10대 연령의 시간활동양상을 분석하였다. 그리고 국내·외에서 보고된 학교 실내공기질 연구논문을 분석하였다. 연구논문은 ScienceDirect, EBSCO host, PubMed와 DBPIA를 이용하여 검색하였다. 주요 검색어는 ‘school(학교)’, ‘classroom(교실)’, ‘indoor air quality(실내공기질)’, ‘student(학생)’, ‘health(건강, 보건)’ 이었다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 한국 학생들의 시간활동 양상

우리나라 학생들의 시간활동 양상을 통계청의 2009년 ‘생활시간조사’에서 분석하여 Table 1에 나타내었다(통계청, 2010). 통계청에서 실시한 생활시간조사는 만 10세 이상으로 조사되어 초등학생은 3학년~6학년 이었다. 초등학교 1,100명은 평일 하루 중 14.03±1.63시간을 주택실내에서 생활하였으며, 주택실내 이외 다른 실내환경(기타 실내 환경)에서 평균 8.06±1.63시간을 보내는 것으로 나타났다. 주말은 상대적으로 주택실내에서 머무르는 시간이 높았으며(18.00±4.18시간), 기타 실내환경에서 머무르는 시간은

Table 1. Time-activity patterns of students according to academic grades

Grade	Type	N	Mean(hr)±S.D.				
			Indoors		Outdoors		Transport
			Residential indoor	Other indoors	Residential outdoor	Other outdoors	
Elementary	Weekday	1,100	14.03±1.63	8.06±1.41	0.003±0.03	0.60±0.44	1.31±0.54
	Weekend	726	18.00±4.18	3.89±3.16	0.02±0.09	0.87±0.91	1.33±1.23
Middle	Weekday	1,472	12.53±2.19	9.50±1.93	0.003±0.02	0.54±0.36	1.42±0.65
	Weekend	1,012	18.32±3.93	3.78±3.11	0.01±0.06	0.66±0.85	1.23±0.97
High	Weekday	1,345	9.84±2.53	12.11±2.55	0.002±0.02	0.68±0.41	1.36±0.69
	Weekend	891	16.66±4.68	5.30±3.98	0.02±0.11	0.60±0.79	1.42±1.02
University	Weekday	1,057	13.04±3.68	7.69±3.19	0.02±0.06	0.89±0.72	2.36±1.36
	Weekend	643	16.10±4.83	5.02±3.89	0.04±0.10	1.04±1.10	1.81±1.36

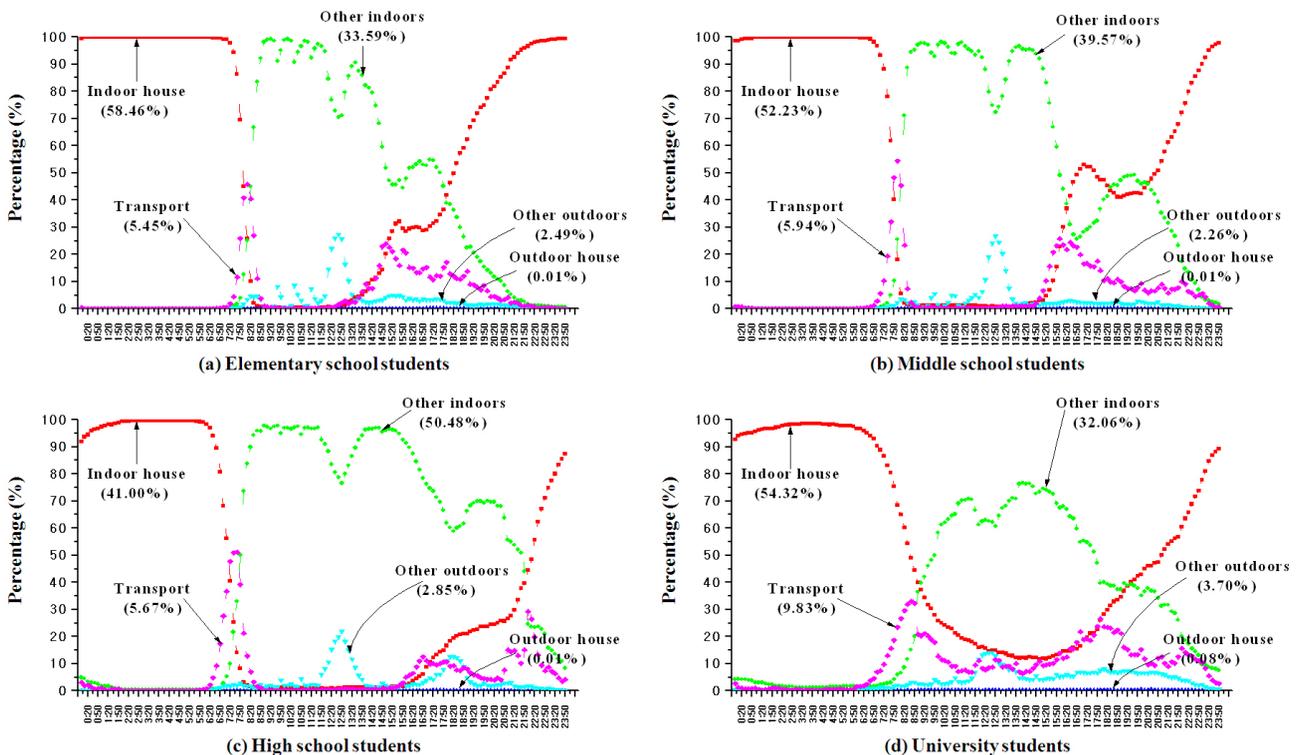


Figure 1. Percentage of school students in microenvironments by the time of day in weekday

낮았다. 중학생 1,472명은 평일 하루 중 주택 실내에서 12.53±2.19시간, 기타 실내에서 9.50±1.93시간이었으며, 주말에 실내에서 머무르는 시간은 초등학생과 비슷한 양상을 나타내었다. Ashmore와 Dimitroulopoulou(2009)는 공기오염물질에 대한 노출에서 어린이의 주된 시간활동 양상이 집, 학교, 차량이며 이것은 성인과 같지 않기 때문에 노출양상의 유의한 차이를 언급하며 각 국소환경에서 보낸 시간의 중요성을 강조하였다. Briggs 등(2003)이 만 9~13세 447명 영국 학생들의 시간활동 양상 결과에서는 평균 주택실내 머무름 시간은 14.8시간(61.7%), 기타실내 7.5 시간(31.3%), 이동수단 1.3 시간(5.42%)을 나타내어 우리나라 학생들과 시간활동 양상이 같지 않을 것을 알 수 있으며, 본 연구와 비교하면 우리나라의 초등학생이 상대적으로 하루 중 학교 및 기타실내(학원 등) 공기오염물질의 노출기간이 대략 0.5~0.8시간 많았다고 할 수 있다.

고등학생 1,345명은 평일 하루 중 주택실내에서 머무르는 시간이 9.84±2.53시간, 기타실내 12.11±2.55시간으로 초등학생, 중학생, 대학생에 비해서 주택실내에서 머무르는 시간이 가장 적었으며, 기타실내에서 머무르는 시간이 가장 높았다. 기타 실내에서 머무르는 시간은 정규 수업 후 자율학습 및 학원 등의 수업으로 머무르는 시간이 높았을

것으로 추정할 수 있다. 대학생의 주택실내 머무름 시간은 평일 13.04±3.68시간, 주말 16.10±4.83시간 이었다. 대학생 1,057명은 이동 시간의 비율이 가장 높았으며(2.36±1.36시간), 주말 주택재실 시간이 가장 낮았다.

3.2 교실 실내 발생원 및 공기질

학교 교실의 실내 발생원은 우선적으로 학생들의 호흡에 의한 이산화탄소(CO₂) 발생을 고려할 수 있다. CO₂는 유해한 공기오염물질이라기 보다는 환기정도를 나타내는 지표로 Yang 등(2005)은 소음 때문에 창문을 닫고 수업하는 교실에서 CO₂ 농도가 1,675ppm까지 도달하고 있음을 보고하였다. 폴란드 바르샤바에서 수행한 연구에서도 28교실의 CO₂ 농도가 모두 1,000ppm을 초과하였다(Sowa, 2002). 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 1,000ppm을 초과하는 양상을 보였다. 반면 홍콩에서 수행된 연구에서는 공조장치와 천장 송풍기 있는 5개 교실에서도 자주 CO₂ 농도가 1,000ppm을 초과하였으며, PM₁₀의 농도가 최대 1,000µg/m³을 초과하였다(Lee 등, 2000).

Table 2. Concentrations of indoor air pollutants measured in classrooms according to season

	Season	Mean±S.D. (GM)	Min	Max	I/O	p-value
CO (ppm)	Summer (n= 48)	2.64±1.60 (2.18)	0.90	5.40	0.63	0.00
	Autumn (n= 47)	0.32±0.27 (0.29)	0.10	1.00	0.65	
	Winter (n= 51)	0±1.22 (0.89)	0.10	3.90	0.84	
	Total	1.32±1.51 (1.18)	0.10	5.40	0.71	
CO ₂ (ppm)	Summer (n= 55)	1347.42±1218.67 (1243.49)	434.0	2980.0	2.79	0.69
	Autumn (n= 55)	1068.25±595.04 (997.31)	365.0	2252.0	3.09	
	Winter (n= 55)	1270.75±886.60 (1153.54)	268.0	3000.0	3.47	
	Total	1228.81±798.65 (1154.39)	268.0	3000.0	3.12	
PM ₁₀ (µg/m ³)	Summer (n= 55)	103.50±116.00 (91.42)	8.00	403.00	1.98	0.92
	Autumn (n= 55)	115.25±86.97 (108.87)	14.00	294.00	2.25	
	Winter (n= 55)	101.25±70.61 (96.45)	21.00	216.00	2.07	
	Total	106.67±90.62 (95.34)	8.00	403.00	2.06	
TBC (CFU/m ³)	Summer (n= 52)	1713.50±1290.80 (1502)	144.00	4038.00	6.26	0.15
	Autumn (n= 53)	1797.75±1571.20 (1694.54)	188.00	5525.00	6.56	
	Winter (n= 51)	878.92±658.47 (807.32)	97.00	1875.00	4.52	
	Total	1463.39±1269.92 (1379.21)	97.00	5525.00	5.41	
TVOCs (µg/m ³)	Summer (n= 55)	577.25±415.52 (455.21)	64.00	1501.00	1.19	0.02
	Autumn (n= 55)	325.75±219.35 (297.97)	42.00	865.00	0.64	
	Winter (n= 55)	219.17±258.64 (198.71)	20.00	972.00	1.38	
	Total	374.06±337.03 (296.76)	20.00	1501.00	1.08	
HCHO (ppm)	Summer (n= 52)	0.09 ± 0.11 (0.07)	0.01	0.40	4.58	0.72
	Autumn (n= 48)	0.12 ± 0.21 (0.09)	0.03	0.80	6.32	
	Winter (n= 46)	0.07 ± 0.11 (0.06)	0.01	0.41	3.51	
	Total	0.10 ± 0.15 (0.08)	0.01	0.80	4.80	

Table 3. Indoor air quality standard in Korea

	Ministry of education, science and technology (school)	Ministry of Environment	Ministry of Labor
PM ₁₀ (μg/m ³)	100	100~200	150
CO (ppm)	10	10~25	10
CO ₂ (ppm)	1,000	1,000	1,000
NO ₂ (ppm)	0.05	0.05~0.3	0.05
HCHO (μg/m ³)	100	120	0.1
Total microbial count (CFU/m ³)	800	800	800
Airborne microorganism (CFU/m ³)	10	-	-
Radon (pCi/L)	4	4	-
VOCs (μg/m ³)	400	400~1000	500
Asbestos (f/cc)	0.01	0.01	0.01
Mite (CFU/m ³)	100	-	-
O ₃ (ppm)	0.06	0.06~0.08	0.06

독일 뮌헨의 64 학교에서 측정된 교실의 PM_{2.5}와 PM₁₀ 농도는 여름과 겨울에 각각 12.7μg/m³, 64.9μg/m³과 19.8 μg/m³, 91.5μg/m³을 나타내었으며, CO₂ 농도는 각각 405 ppm과 1,603ppm을 나타내었다. 그리고 상대습도가 10% 증가할 때마다 PM_{2.5}가 1.7μg/m³씩 증가하며, CO₂ 농도가 100ppm 증가할 때마다 2.8μg/m³씩 증가하였다(Fromme 등, 2007). 이것은 재실자가 공기오염물질의 발생원일 가능성을 나타낸다고 생각한다.

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_{2.5}, soot, NO_x, NO₂의 개인노출평가를 수행하였다. 그 결과에 의하면 도로변에 위치한 학교 실외의 농도는 soot가 74%, NO_x 52% 높았으며, 개인노출 농도는 도로변에 위치한 학교의 학생들이 soot 37%, NO_x 37% 높은 값을 나타내었다. 이 결과는 학교가 도로변 또는 유해물질 배출 사업단지에 위치하는 경우 실외의 공기오염물질이 환기를 통해 교실 실내로 유입되어 학생들에게 노출될 수 있음을 나타내며 학교 위치가 노출에 영향을 줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

새로 건축되었거나 리모델링된 학교 교실에서 건축자재, 마감재, 책상, 의자에서 HCHO 및 VOCs의 농도 증가를 나타낼 수 있다. Yura 등(2005) 신축된 학교에서 측정된 물질에서 특히 HCHO의 농도가 유의하게 높았으며, 리모델링 교실에서는 톨루엔의 농도가 높았다. Yang 등(2005)은 국내 학교 교실에서 주요 발생원으로 신축학교의 전자재, 마감재, 책상에 의해 HCHO의 최고 농도 0.11ppm, 왁스(wax) 등에 의한 바닥청소제 사용에 의해 TVOCs가

0.41ppm, 컴퓨터 교실의 책상 등의 신가구류 구입에 의해 HCHO의 최고 농도가 0.30ppm로 재실 학생들에게 건강영향을 야기할 가능성을 보고하였다. 2009년 보고된 국내 55개 학교의 교실, 컴퓨터실, 실험실에서 실내공기질을 측정된 결과를 Table 2에 나타내었다(Sohn 등, 2009). 이 결과에 따르면 건축연수, 계절에 따라 공기오염물질의 농도 차이가 있음을 나타내며, 특히 신축건물에서는 VOCs와 HCHO의 농도가 높으며 전체적으로는 PM₁₀, TBC(total microbial count)와 환기 지표인 CO₂의 농도가 높음을 알 수 있다. 신축 학교 교실의 HCHO의 실내/실외 농도비가 최고 6.32이었으며, 1년 이내 건축된 학교 건물이 유의하게 높은 농도를 보였다. 주된 발생원은 마감재, 건축자재 그리고 새로 구입된 책상과 의자 이었다. VOCs는 특히 휘발성에 의해 여름철에 높은 농도를 나타내었다.

한편 국내의 실내공기질 관련 법규를 살펴보면 교육인적자원부의 학교 교실에 대한 학교보건법, 환경부의 다중이용시설(지하역사, 의료기관, 찜질방 등 17개 시설군)과 다중이용시설등의 실내공기질관리법, 보건복지부의 공중이용시설(학원, 공연장, 업무시설 등) 공중위생관리법, 사무실 관련 산업보건기준에 관한규칙이 있다. 외국의 대부분의 국가에서 실내공기질 기준이 지침치(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 21.6m³/hr 이상, 오염물질 방출 건축자재 및 책상·의자 사용 제한, 교실내 소음은 55dB(A)이다.

4. 결론

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 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 CO₂, 신축건물의 마감재 및 책상에서 배출되는 VOCs와 HCHO, 습기에 의한 미생물인 것으로 파악되었으며, 도로변 인접 학교에서는 실외 대기오염물질(NO₂, 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 감소 가능성을 나타내었다. 학교 교실의 실내공기질은 공공(public) 개념의 실내환경으로 한 국가의 미래를 책임질 수 있는 학생 집단이기 때문에 중요성이 크다고 할 수 있다. 따라서 학교 교실의 실내공기질은 국가적으로 관심을 갖고 지속적으로 평가 및 관리를 해야 할 것으로 생각한다.

참고문헌

1. Yang, W. : School indoor air quality and health effects. *Journal of Environmental Health Sciences*, 35(3), 143-152, 2009.
2. Klepeis, N.E., Nelson, W.C., Ott, W.R., Robinson, J.P., Tsang, A.M., Switzer, P., Behar, J.V., Hern, S.C., and 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.
3. Yang, W., Lee, K., Yoon, C., Yu, S., Park, K., Choi, W. : Determinants of residential indoor and transportation activity times in Korea. *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology*, 21, 310-316, 2011
4. Chau, C.K., Tu, E.Y., Chan, D.W.T., and Burnett, J. : Estimating the total exposure to air pollutants for different population age groups in Hong Kong. *Environment International*, 27, 617-630, 2002.
5. Paek, N. W. : School environment. *Journal of Korean Society of School Health*, 4(2), 31-38, 1991.
6. <http://www.epa.gov/school>
7. Keilb, S., Muscatiello, N., Hord, W., Rogers-Harrington, J., Healy, J. Building-related health symptoms and classroom indoor air quality: a survey of school teachers in New York State. *Indoor Air*, 1-10, 2014.
8. Shundell, D. G., Prill, R., Fisk, W. J., Apte, M. G., Blake, D. and Faulkner, D. : Association between CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air*, 14, 333-341, 2004.
9. Rosen, K. G. and 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.
10. 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.
11. Alves, C.A., Urban, R.C., Pegas, P.N., Nunes, T. Indoor/outdoor relationships between PM10 and associated organic compounds in a primary school. *Aerosol and Air Quality Research*, 14, 86-98, 2014.
12. 통계청: 생활시간조사(2009), 2010.
13. Ashmore, M. R. and Dimitroulopoulou : Personal exposure of children to air pollution. *Atmospheric Environment*, 43, 126-141, 2009.
14. Briggs, D. J., Denman, A. R., Gulliver, J., Marley, R. F., Kennedy, C. A., Philips, P. S., Field, K. and Crockett, R. M. : Time activity modelling of domestic exposures to radon. *Journal of Environmental Management*, 67, 107-120, 2003.
15. Yang, W. H., Son, B. S., Kin, D. W., Kim, Y. H., Byeon, J. C. and 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.
16. 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.
17. Lee, S. C., and Chang, M. : Indoor and outdoor air quality

- investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*. 41, 109-113, 2000.
18. Fromme, H., Twardella, D., Dietrich, S., Heitmann, D., Schierl, R., Liebl, B. and Ruden, H. : Particulate matter in the indoor air of classrooms - exploratory results from Munich and surrounding area. *Atmospheric Environment* 41, 854-866, 2007.
 19. Roosbroeck, S. V., Jacobs, J., Janssen, N. A. H., Oldenwening, M., Hoek, G. and Brunekreef, B. : Long-term personal exposure to PM_{2.5}, soot and NO_x in children attending schools located near busy roads, a validation study. *Atmospheric Environment*, 41, 3381-3394, 2007.
 20. Yura, A., Iki, M. and 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.
 21. Sohn, J., Yang, W., Kim, J., Son, B. and Park, J. : Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *Journal of Environmental Management*, 90, 348-354, 2009.