

발생원에 따른 일부 학교 교실의 실내공기질 평가 사례연구

양 원 호·변 재 철·김 영 희·김 대 원*·손 부 순**·이 정 은***
대구가톨릭대학교 산업보건학과, *대구가톨릭대학교 환경과학과,
순천향대학교 환경보건학과, *구월연세소아과
(2005년 2월 24일 접수; 2005년 9월 28일 채택)

Assessment of Indoor Air Quality of Classroom in School by Means of Source Generation - Case Study

Won-Ho Yang, Dae-Won Kim*, Bu-Soon Son**,
Jung-Eun Lee***, Jae-Cheol Byeon, Young-Hee Kim

Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyungsan 712-702, Korea

*Department of Environmental Science, Catholic University of Daegu, Gyungsan 714-702, Korea

**Department of Environmental Health Science, Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

***Kuwol-Yonsei Pediatric Clinic, Incheon 405-839, Korea

(Manuscript received 24 February, 2005; accepted 28 September, 2005)

Indoor air quality has been addressed as an important atmospheric environmental issue and has caught attention of the public in recent years in Korea. Good indoor air quality in classrooms favour student's learning ability, teacher and staff's productivity according to other studies. In this study, each classroom at four different schools was chosen for comparison of indoor and outdoor air quality by means of source generation types such as new constructed classroom, using of cleaning agents and purchased furniture. Temperature, relative humidity (RH), carbon dioxide (CO₂), formaldehyde (HCHO), total volatile organic compounds (TVOCs) and particulate matter with diameter less than 10 μ m (PM₁₀) were monitored at indoor and outdoor locations during lesson. HCHO was found to be the worst among parameters measured in new constructed classroom, HCHO and TVOCs was worst in classroom with new purchased furniture, and TVOCs was worst in classroom cleaned by cleaning agents. Indoor CO₂ concentrations often exceeded 1500 ppm indicating importance of ventilation. Active activity of students during break time made the PM₁₀ concentration higher than a lesson. Improvements and further researches should be carried out considering indoor air quality at schools is of special concern since children and students are susceptible to poor air quality.

Key Words : Classroom air quality, Carbon dioxide, Formaldehyde, Total volatile organic compounds

1. 서 론

인간은 성인의 경우 일반적으로 하루에 대략 1.5 kg의 음식을 섭취하고 2 kg 정도의 물을 마시며, 공기는 이보다 거의 10배에 달하는 약 13 kg 정도를 마셔야 살 수 있고 단 몇 분만 호흡을 멈추더라도 곧 사망하게 될 만큼 중요하다¹⁾. 특히, 자연적으

로 희석되는 실외 대기환경과는 달리 실내공기는 한정된 공간에서 오염된 공기가 지속적으로 순환하면서 실내공기 오염농도가 누적되어 실외 대기오염으로 인한 인체 영향보다 더 큰 건강영향을 유발할 수 있다²⁾. 실제로 실내오염으로 인한 장기간의 노출로 인하여 실내 거주자 또는 근로자들은 빌딩증후군(Sick Building Syndrome: SBS), 복합화학물질증후군(Multi-Chemical Sensitivity: MCS)이라는 건강영향 증상을 나타낼 수 있으며, 그 원인물질로는 포름알데히드(HCHO), 휘발성 유기화합물(VOCs), 분

Corresponding Author : Won-Ho Yang, Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu, Gyungsan 712-702, Korea
Phone: +82-51-850-3739
E-mail: whyang@cu.ac.kr

진, 이산화탄소(CO₂) 등과 같은 실내공기오염물질이 알려져 있다³⁾.

우리나라의 초등학교생부터 고등학생들은 신체와 정신의 성장발육이 왕성한 시기기 때문에 보건학적으로 중요한 인구집단이며 학교생활의 대부분을 교실의 실내환경에서 생활하고 있으므로 교실의 실내공기관리는 매우 중요한 문제이다⁴⁾. 학교의 실내공기 중 유해요인으로는 분진과 건축자재에서 발생하는 HCHO, VOCs, 석면 그리고 겨울철 난방기구에서 발생하는 연소 유해가스 등의 화학적 요인과 소음 및 조명 등의 물리적인 요인이 있으며 학생들의 결상과 책상에 관한 인간공학적 환경도 보건학적으로 중요하다⁵⁾.

학교 실내공기질의 중요성은 선진 외국에서 이미 인식되어 많은 연구가 수행되고 있다. Shendell 등은 학교 교실에서 CO₂ 농도가 1000 ppm 증가할 때 학생들의 결석률이 10~20% 증가했음을 보고하였고⁶⁾, Rosen과 Richardson은 학교 교실에 전기집진기를 이용한 공기정화기를 설치하여 학생들의 결석률을 감소시켰다⁷⁾. 프랑스 학교 교실에서 VOCs, 암모니아, 이산화황을 측정 한 Meininhaus 등은 실내공기오염물질이 학생들에게 감각 기능에 영향이 있음을 보고하였고⁸⁾, Daisey 등은 학교교실에서 HCHO, VOCs, bioaerosol, 불충분한 환기가 천식 등의 호흡기 질환을 야기할 수 있다고 하였다⁹⁾. 또한 홍콩, 이탈리아 등 세계 각국에서 학교교실의 실내 공기질을 평가하고 개선시키려는 노력을 하고 있다. 반면, 국내에서는 학교 교실의 실내공기질을 대상으로 일부 연구가 수행되었으나 부족한 형편이고¹⁰⁾, 최근 교육인적자원부 주관으로 전국 초·중·고등학교를 대상으로 학교 실내공기를 측정 평가하였다¹¹⁾.

본 연구는 학교 교실의 실내환경을 중심으로 주요 실내공기 오염물질의 발생원이 건축자재, 바닥 청소제, 새로 구입한 책상 등의 가구류임을 고려하여, 각 사례별로 공기오염물질을 측정 평가하였다. 이 결과는 학교 교실의 발생원에 따른 실내공기오염 정도를 제시할 수 있으며, 그 문제점과 개선대책에 기초자료를 제공 할 수 있을 것이다.

2. 연구방법

본 연구는 2004년 4월부터 5월까지 경북 및 대구 지역의 초등학교 2곳, 중학교 1곳, 유치원 1곳을 대상으로, 학교보건법의 교내환경위생 항목 중 CO₂(기준 1,000 ppm)와 미세먼지(PM₁₀, 기준 150 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 그리고 주요 실내 공기오염물질인 총휘발성 유기화합물(Total Volatile Organic Compounds; TVOCs), HCHO이었다. 그 밖에 물리적 영향 요인인 온도와 습도를 측정하였다. 대상 학교 선정은 학교 교실의

주요 실내발생원이 바닥 청소제, 신 책상 및 걸상 구입, 신축건물 등을 고려하여 지역 교육청의 자료를 바탕으로 선정하였다.

이산화탄소, 일산화탄소, 온도, 습도는 IAQ(Indoor Air Quality) 모니터(IAQ Calc 8762 meter, TSI, USA)를 이용하여 측정하였다. 입자상 물질 측정으로 PM₁₀은 검출범위가 0 to 4mg/m³의 직독기(Konomax, Model 3421, Japan)를 이용하여 10분 간격으로 측정하였고, 수업시작부터 종료까지 약 6시간 동안의 평균 미세먼지는 여과방식의 MiniVol air sampler(Airmetrics, PAS 201, USA)를 이용하여 포집하였다. 가스상 물질 측정으로 HCHO는 검출범위가 0.01~10 ppm의 전기화학적 방법인 Formalde-meter400 (TM-400, Walse, U.K.), TVOCs는 검출범위가 0.01~99 ppm의 광이온 방식의 IAQRAE (PGM-5210, USA)를 이용하였다. PM₁₀ 직독기와 가스상 물질은 수업시작 후 10분 간격으로 오전 수업 중 1교시 동안 측정하였고, 모든 측정기구는 모두 교실의 뒤쪽 공간 중앙에 위치하도록 하였다. 수업 시간 전에 모든 창문을 닫아 자연환기가 최대한 억제하여 실내 발생원에 의한 학교 교실의 실내공기질 평가를 하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 학교 교실의 주요 발생원을 고려하여, 그 대상 학교 교실의 실내공기질을 측정 평가하였다. 연구의 결과는 발생원 중심의 사례 연구로 자연환기를 최대한 감소시켜 실내발생원에 따른 실내공기질 영향을 연구하였고, 대상 주요 공기오염물질은 HCHO, TVOCs, PM₁₀, CO₂ 이었고, 측정 대상 학교 교실의 크기는 A 초등학교 210 m³, B 초등학교 220 m³ 이었고, 컴퓨터실은 350 m³ 이었다.

3.1. A 초등학교 (신축학교 사례)

건축된지 1년 이내의 초등학교로 1 교실을 선택하여 3교시 수업 시작과 함께 모든 창문과 문을 닫고 대상 오염물질을 측정하였다. 재실 학생수는 29명이었고, 창문 등의 자연환기 방식이었다. 대상 오염물질의 측정 결과를 Table 1에 나타내었다. 그 결과를 분석하면, 온도의 경우 측정기간 동안 고온의 날씨로 대상 교실의 온도에 영향을 주었으며 학생들의 열방산 등으로 수업 종료 전은 수업 시간보다 높은 값을 나타내었다. 실내공기질 오염지표로 이용되는 이산화탄소(CO₂)는 수업 시작시 490 ppm 이었으나 수업 종료 전에는 2300 ppm까지 증가하는 것으로 나타났다. 또한 수업 종료 후 5분 후의 공기오염물질의 농도는 학생들의 이동 및 창문 개방으로 실외 농도만큼 감소함을 보이고 있다. 실외 공기

Table 1. Measured concentrations of indoor air pollutants in A elementary school

Item	Time							Outdoor
	Start	10 minute	20 minute	30 minute	40 minute	5 minute after finish		
Temperature (°C) (STD: 18~28°C)	29.1	29.4	32.7	32.7	32.8	31.6	29.0	
Relative humidity (%) (STD: 30~80°C)	71.3	71.5	74.7	74.1	74.1	74.5	71.4	
CO ₂ (ppm) (STD: 1000 ppm)	490	540	1204	2119	2300	1572	396	
TVOC _s (ppm)	0.01	0.03	0.03	0.1	0.12	0.03	0.0	
HCHO (ppm)	0.01	0.05	0.09	0.11	0.11	0.04	0.01	
PM ₁₀ (µg/m ³) (STD: 150 µg/m ³)	43	46	43	40	39	37	38	

- Illuminance: 355 Lux (STD: 300 Lux)
 - PM₁₀ (Average during 6 hours): 40.21 µg/m³

* STD: Standard for indoor air quality by Ministry of Education in Korea

가 청정하다면 환기가 필요성을 나타내고 있다. PM₁₀ 측정 결과의 경우 수업이 진행될수록 감소하는 것으로 나타났으며, 이것은 쉬는 시간에 초등학생들의 활발한 활동으로 미세분진의 재분산(re-suspension)되어 수업 시작 후에는 높은 값을 나타냈으나 시간이 지날수록 감소하는 것으로 생각하였다. 본 수업 3교시를 포함한 6시간 동안 미세분진(PM₁₀)의 농도는 40.21 µg/m³이었다. TVOCs의 농도는 저농도를 나타내었으나, HCHO의 경우 시간이 지날수록 높아졌으며 30분 후에는 0.11 ppm으로 환경부 다중이용시설등의 실내공기질관리법 유지기준(120 µg/m³) 및 일본 문부과학성의 학교 실내공기질 기준(0.08 ppm)을 초과하였다. 이 교실의 경우 바닥 청소에 왁스류나 광택제를 사용하지 않는 것을 고

려하면, 신축건물에서 마감재, 접착제 등이 원인일 것으로 생각할 수 있다¹²⁾. 특히 측정기간 동안 고온이 HCHO의 휘발을 높였을 것으로 고려된다.

3.2. B 초등학교 (바닥 광택(청소)제 사례)

건축된지 1년 정도의 초등학교로 1 교실을 선택하여 3교시 수업 시작과 함께 모든 창문과 문을 닫고 대상 오염물질들을 측정하였다. 재실 학생수는 32명이었고, 창문 등의 자연환기 방식이었다. 농도 측정 결과를 Table 2에 나타내었다. 그 결과를 분석하면 이산화탄소(CO₂)는 수업 시작시 787 ppm 이었으나 수업 종료 전에는 2248 ppm까지 증가하는 것으로 나타났다. PM₁₀의 경우 A 초등학교의 결과와 같이 수업이 진행될수록 감소하는 것으로 나타났으며, 본 수업 3교시를 포함한 6시간 동안의 미세먼지

Table 2. Measured concentrations of indoor air pollutants in B elementary school

Item	Time							Outdoor
	Start	10 minute	20 minute	30 minute	40 minute	5 minute after finish		
Temperature (°C) (STD: 18~28°C)	27.3	25.1	26.1	26.9	27.7	28.1	26.5	
Relative humidity (%) (STD: 30~80°C)	72.4	78.0	73.1	77.0	78.2	78.0	73.4	
CO ₂ (ppm) (STD: 1000 ppm)	787	1302	1750	2042	2248	1675	410	
TVOC _s (ppm)	0.01	0.09	0.22	0.37	0.41	0.09	0.0	
HCHO (ppm)	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.01	
PM ₁₀ (µg/m ³) (STD: 150 µg/m ³)	64	32	34	34	33	34	41	

- Illuminance: 850 Lux (STD: 300 Lux 이상)
 - PM₁₀ (Average during 6 hours): 51.5 µg/m³

* STD: Standard for indoor air quality by Ministry of Education in Korea

Table 3. Measured concentrations of indoor air pollutants of computer schoolroom in C middle school

Item	Time	Time						Outdoor
		Start	10 minute	20 minute	30 minute	40 minute	5 minute after finish	
Temperature (°C) (STD: 18~28°C)		26.8	27.1	27.7	28.5	29.0	28.3	27.8
Relative humidity (%) (STD: 30~80°C)		72.0	73.0	75.1	79.2	78.3	77.5	74.4
CO ₂ (ppm) (STD: 1000 ppm)		488	688	922	1184	1432	584	400
TVOC _s (ppm)	With computer table	0.22	0.25	0.30	0.23	0.24	0.09	0.0
	Without computer table	0.02	0.03	0.02	0.03	0.02	0.01	0.01
HCHO (ppm)	With computer table	0.24	0.20	0.34	0.32	0.30	0.09	0.01
	Without computer table	0.03	0.02	0.01	0.02	0.01	0.01	0.01
PM ₁₀ (µg/m ³) (STD: 150 µg/m ³)		49	40	24	26	24	34	40

- Illuminance: 970 Lux (STD: 300 Lux 이상)

- PM₁₀ (Average during 6 hours): 38.98 µg/m³

* STD: Standard for indoor air quality by Ministry of Education in Korea

Table 4. Measured concentrations of indoor air pollutants in kindergarten

Item	Time	Time		
		1 floor	2 floor	Storehouse of playthings and furniture
Temperature (°C)		28.1	27.1	30.1
Relative humidity (%)		76.0	71.0	75.4
CO ₂ (ppm)		720	1420	568
TVOC _s (ppm)		0.01	0.09	0.34 (Max)
HCHO (ppm)		0.04	0.12	0.52 (Max)
PM ₁₀ (µg/m ³)		210	201	130

(PM₁₀)의 평균 농도는 51.5 µg/m³이었다. HCHO는 background 수준의 0.01 ppm를 나타내었다. TVOCs는 환경부 다중이용시설등의 실내공기질관리법 권고기준(500 ug/m³)을 초과하지는 않았지만, 시간이 지날수록 높아졌다. 그것은 비교적 신건축물, 실외 공기 유입 등의 영향 가능성이 있지만, 대부분 1일 전에 바닥 광택(청소)제로 이용된 용액에 의한 것으로 고려되었다. 대부분의 초등학교의 교실은 바닥은 나무 계통으로 청소시에 사용하는 바닥 광택(청소)제를 사용한다. 광택제에서 휘발된 유기화합물이 온도상승과 함께 학생들에게 영향을 줄 정도로 휘발될 수 있음을 나타내고 있다¹³⁾. TVOCs 측정기를 사용된 바닥 청소 및 광택제 통 입구에 근접하여 직접 측정하였을 때는 0.6~0.9 ppm 정도를 나타내어 교실 바닥 청소용 유해성 청소제 사용 금지 등 근원적인 개선이 있어야 할 것으로 생각한다.

3.3. C 중학교 (새로 구입한 컴퓨터 책상 사례)
 건축된지 3년 정도의 중학교의 컴퓨터 교실을 선택하여 수업 시작과 함께 모든 창문과 문을 닫고 대상 오염물질을 측정하였다. 수업 학생수는 30명이었고, 창문 등의 자연환기 방식이었다. 농도측정 결과 (Table 3)를 분석하면, 이산화탄소(CO₂) 농도는 앞의 결과와 비슷하게 증가하였으나, 컴퓨터 교실의 체적이 교실에 비해 크기 때문에 증가속도는 교실의 CO₂ 농도 증가보다는 다소 적게 증가하였다. 특히 관심의 사항은 고농도의 HCHO와 TVOCs 이었다. 이것은 주로 새로 구입된 컴퓨터 책상인 것으로, 같은 크기의 컴퓨터 교실과 비교할 때 체적, 바닥재, 창문 크기 등이 모두 같았고 단지 차이가 있는 것은 컴퓨터 책상의 유·무 이었다. 이 결과는 학교 실내 환경의 학습 가구용품에서 HCHO 및 TVOCs가 유해할 정도로 발생될 수 있음을 알 수 있으며, 가구

류 등의 생활용품에서 유해한 공기오염물질이 실내 공기질을 악화시킬 수 있음을 나타내고 있다¹⁴⁾.

3.4. D 유치원 (놀이기구, 가구류 등 사례)

D 유치원은 시에서 운영하는 어린이 집으로 건축된지 1년 정도로 초등학교 입학 전의 어린이들의 교육 및 놀이 공간이다. 농도 측정결과는 앞서의 비슷한 결과를 나타내었으나, HCHO와 TVOCs의 경우 비교적 고농도를 나타낸 것은 신축건물 뿐만 아니라 유치원생들의 놀이기구 및 가구류 일 것으로 생각되었다. 놀이기구 및 가구류를 보관하는 2층 창고의 HCHO의 농도는 최고 0.52 ppm, TVOCs는 0.34 ppm을 나타내어 그 결과를 간접적으로 추정할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 학교 교실에서 주요 실내공기 오염물질의 발생원이 건축자재, 바닥 청소류, 책상 등의 가구류임을 고려하여, 각 사례별로 미세먼지, HCHO, TVOCs, CO₂ 등을 측정·분석하여 실내공기질을 평가하였다. 학교 환경관리는 그 범위가 매우 넓고 대상도 많으나 우선적으로 고려할 것은 학교의 실내공기질이 신체와 정신의 성장발육이 왕성한 시기의 학생들에게 때문에 학생들은 보건학적으로 중요한 인구집단이며 학교생활의 대부분을 교실의 실내환경에서 생활하고 있으므로 교실의 실내환경관리는 매우 중요한 문제이다.

본 사례별 연구결과에서 신축학교(HCHO의 최고 농도 0.11 ppm), 바닥청소제의 사용(TVOCs의 최고 농도 0.41 ppm), 책상 등의 신가구류 구입(HCHO의 최고 농도 0.30 ppm)이 학생들에게 건강영향을 야기할 정도로 교실 실내공기질에 큰 영향을 줄 수 있음을 나타냈으며, 또한 학생들의 활동성은 쉬는 시간에 미세먼지의 증가를 야기 시켰다. 우리나라의 교육열과 전체적인 교육수준은 매우 높으나 학교 교실 등의 교육 여건은 상대적으로 열악함을 고려하여 교육정책과 교육행정에서 교실 실내공기질 연구 및 개선에 관한 노력과 관심을 기울여 적절한 대책 및 개선이 선행되어야 할 것이다.

참 고 문 헌

- 1) 양원호, 2003, 실내공기 오염물질의 노출 및 위험성평가, 대한주택공사 주택도시, 79, 102-117.
- 2) Yang, W., K. Lee and M. Chung, 2004, Characterization of indoor air quality using mul-

- 3) Jones, A. P., 1999, Indoor air quality and health, Atmospheric Environment, 33, 4535-4564.
- 4) 손종렬, 변상훈, 김영환, 김종혁, 조운수, 이재영, 박윤주, 2003, 서울시 일부 학교의 실내 공기질 조사 및 인식도 평가, 대한위생학회지, 18(3), 101-110.
- 5) 백남원, 1991, 학교환경, 한국학교보건학회지, 4, 31-38.
- 6) Shendell, D. G., R. Prill, W. J. Fisk, M. G. Apte, D. Blake and D. Faulkner, 2004, Association between CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho, Indoor Air, 14, 333-341.
- 7) Rosen, K. G. and G. Richardson, 1999, Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism - A hypothesis, the Science of Total Environment, 234, 87-93.
- 8) Meininghaus, R., A. Kouniali, C. Mandin and A. Cicolella, 2003, Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school, Environment International, 28, 553-557.
- 9) Daisey, J. M., W. J. Angell and M. G. Apte, 2003, Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information, Indoor Air, 13, 53-64.
- 10) 배운진, 김규환, 전효택, 안주성, 1998, 실내외 환경의 분진 중 중금속 농도 -서울시 강서구, 양천구, 소재의 중학교를 중심으로-, 한국지구과학회지, 19(5), 449-460.
- 11) 고려대 보건과학연구소, 2005, 학교 교사내 환경위생 실태조사 중간보고서.
- 12) Huang, H. and F. Haghghat, 2003, Building materials VOC emissions -a systematic parametric study, Building and Environment, 38, 995-1005.
- 13) Guo, Z., 2002, Review of indoor emission source models, Part 1. Overview, Environmental Pollution, 120, 533-549.
- 14) Salthammer, T., 1997, Emission of volatile organic compounds from furniture coatings, Indoor Air, 7, 189-197.