

전국 초등학교 교실 내 유해 환경 평가

임영욱 · 이청수 · 김호현 · 양지연 · 이진우 · 손종렬¹⁾ · 박중원²⁾ · 신동천³⁾*

연세대학교 환경공해연구소, ¹⁾고려대학교 보건과학대학

²⁾세브란스병원 알레르기 내과, ³⁾연세대학교 의과대학 예방의학교실

A Study on the Indoor Air Pollution in the Classrooms of Elementary Schools in Korea - Focused on VOCs, Formaldehyde, PM₁₀ and Indoor Allergens in Dust

Young-Wook Lim · Chung-Soo Lee · Ho-Hyun Kim · Ji-Yeon Yang · Geon-Woo Lee

Jong Ryeul Sohn¹⁾ · Jung-Won Park²⁾ · Dong-Chun Shin³⁾*

The Institute for Environmental Research, Yonsei University, Seoul, Korea

¹⁾College of Health Sciences, Korea University, Seoul, Korea

²⁾Shincheon Severance hospital, Allergy and Respiratory Clinic, Seoul, Korea

³⁾Yonsei university college of medicine, preventive medicine department, Seoul, Korea

Abstract

This study was performed to investigate airborne volatile organic compounds(VOCs), formaldehyde, respiratory particulate for concentration in primary schools. The concentrations of major indoor air pollutants(VOCs ; benzene, toluene, ethylbenzene, xylene, styrene, formaldehyde, PM-10) were observed from November to December 2006. Sampling was undertaken at 81 primary schools. The sampling sites of air pollutants are classroom and hallway. VOCs with distribution of most of general environmental contamination material will be able to confirm that it shows the log-normal distribution which is similar exposure distribution. The exposure quality of VOCs and the place pollution level was indoor> hallway>outdoor, which whole is located in the metropolis and the industrial areas is higher than farm village area. It tried to observe the I/O ratio, it appeared highly from the interior of the material of most. The mean concentrations of formaldehyde, respiratory particulate were $22.07\mu\text{g}/\text{m}^3$, $88.06\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectively. Indoor and outdoor ratios(I/O) of formaldehyde and respiratory particulate were 3.6 and 1.4, respectively. The concentration of respiratory particulate is 27.2% higher than guideline for school hygiene($100\mu\text{g}/\text{m}^3$). From the comparison in the construction year, the highest concentration of formaldehyde is showed under one year. However, as time passed by the concentrations of formaldehyde become lower.

Keywords : Primary school, VOCs, Formaldehyde, PM-10, Allergen

* Corresponding author. Tel : +82-2-2228-1869, E-mail : dshin5@yuhs.ac

1. 서론

최근 국내에서도 국민들의 높아진 참삶이(Well-being)의 영향으로 실내오염으로부터 발생하는 새집증후군, 새빌딩증후군 등이 사회적 관심의 대상이 되었다. 이와 연관되게 어린이들의 낮시간의 대부분을 보내는 초등학교는 60~70m²의 일정 면적 내에 약 40여명의 학생들이 함께 생활하므로 실내공기질 측면에서는 악조건이라고 할 수 있다. 일반 성인들에 비해 어린이들은 질병에 대한 저항력이 약하므로 오염물질에 민감하게 반응한다. 특히 초등학생들은 계속 발육상태에 있고 질병에 대한 저항력이 불충분한 연령층이기 때문에 보건학적으로 중요한 인구집단이다. 또한, 실내공기의 경우 차량에서 배출되는 매연 등의 외부공기 유입과 가구, 접착제, 플라스틱류, 먼지, 페인트, 벽지 등의 실내 공기오염원, 흡연 등에 의해 외부 공기보다도 더욱 오염이 심각하기에 학교의 교실은 보건학적으로 중요한 인자이며 실내공기질 관리가 절실히 필요하다(Bayer et al., 2000). 이와 관련하여 교육인적자원부는 2006년 1월 학교실내공기질에 대한 학교보건법을 시행하여, 2006년을 기준으로 3년 이내 신축, 개축, 증축한 학교에 대해서 포름알데히드와 총휘발성유기화합물(TVOC)을 연 1회 측정하도록 하고 있다(학교보건법, 2006). 하지만 전국적인 실태조사가 부족한 실정이며, VOCs의 관리기준 역시 TVOC의 기준만 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 설정되어 있을 뿐, 각각의 VOCs의 관리기준은 존재하지 않는 것이 현실이다.

건강상의 영향을 주는 실내공기질 유해영향 물질로는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds : VOCs), 포름알데히드, 석면, 중금속 등의 다양한 화학물질이 제시되고 있다(Li, 2007). 휘발

성유기화합물질은 물질의 구조, 노출 농도와 기간, 다른 휘발성유기화합물질과의 복합노출, 개인의 감수성, 표적장기의 분포 등에 따라 다르게 나타난다(US EPA, 2004). VOCs에 의한 독성작용으로 가장 보편적이면서 중요한 것은 중추신경계를 억제하는 마취작용으로, 증상은 지남력상실(시간, 장소, 사람들을 알아보는 정신기능의 장애), 도취감, 현기증에 이어 노출 농도가 점차 심해지면서 의식상실, 마비, 그리고 사망에 이르게 된다. 이 외에 눈, 피부, 호흡기 점막의 자극 증상이 나타나기도 한다(Daisey et al., 2003). VOCs 중 벤젠(Benzene)의 경우 인체 암 유발물질(Richard et al., 1983; NAS, 1993;)로 확인되었으며, 톨루엔, 자일렌은 잠재적 독성물질(Schroeder et al., 1987; WHO, 2002))로 알려져 있다. 또한, 신축건물에 사용하는 건축자재는 복합화학물질로 구성되어, 포름알데히드(Formaldehyde) 등의 다양한 유해화학물질은 방출하고 실내 공기질을 악화시키는 것으로 알려져 있다. 이러한 유해화학물질들은 두통, 현기증, 메스꺼움, 졸음, 집중력 감퇴 등의 각종 질병을 유발하는 것으로 알려져 있으며, 포름알데히드의 경우 반응성이 커서 상기도 호흡기계의 점막이나 시신경, 피부 등을 자극한다(Rosen and Richardson, 1999; Roost et al., 2004). 실내향원 즉, 집먼지진드기, 애완동물, 바퀴벌레 및 진균 향원의 경우 가정에서 학생의 의복에 부착되어 학교로 옮겨져 동급생에게 알레르기 질환을 잘 유발시키는 것으로 알려져 있으며, 집먼지진드기, 바퀴 알레르겐도 침구류뿐만 아니라 의복의 먼지에서도 높은 농도가 검출된다(Ingram et al., 1995).

학교의 실내공간에서 방출되는 오염물질은 그 종류가 매우 다양하다. 따라서, 본 연구에서는 초등학교를 교실을 대상으로 휘발성유기화합물

(VOCs), 포름알데히드(Formaldehyde), 미세먼지 (PM-10) 및 먼지 내 알레르겐에 대한 교실 내 농도를 조사하여 합리적인 초등학교의 환경 관리방안을 수립하기 위한 기초자료 제공에 그 목적이 있다.

2. 연구방법

2.1 연구내용

2.1.1 실내환경 실태조사 학교 선정기준

본 연구는 대상 학교 선정을 위해 가장 먼저 전국 초등학교 6,279개교 중 2006년 기준 [폐교] 혹은 [휴교]한 유치원/초교 및 제주지역과 도서벽지를 제외한 학교를 대상으로하며, 학교 소재지 [광역도시]-[중소도시]-[그 외 군·면·읍 지역] 비율에 따라 샘플링하여 최종 설문 대상 학교를 선정하였고, 자세한 표본수 선정 기준은 다음과 같다. 1) 학교 규모가 최소 100명이상인(즉, 3개 학급 이상인)곳, 2) 대부분 국·공립학교이므로 사립학교는 무조건 포함, 3) [대도시]-[중소도시]-[군·면·읍 지역] 소재 비율을 고려, 4) 샘플링 후 다음 두 조건의 적절성을 평가하여 불충분시 재샘플링, 5) 전국 주요 공

단근처 초교를 70개 이상 포함, 6) 학교 설립연도를 고려하여, [당해 연도 신축학교] [2-5년], [6-10년], [11-20년], [21년 이상] 등의 비율을 고려하여, 1차적으로 438개 초등학교를 선정하여, 본 연구와 별개로 환경성 질환 설문조사를 실시하였다. 추후 전국단위 438개의 초등학교 실내환경을 전수 조사할 수 없으므로, 82개 초등학교를 최종 선정하였다. 실내환경 실태조사에 참여한 82개 초등학교 표본수 선정 기준은 다음과 같다. 1) 학교규모가 최소 100명이상인 (즉, 3개 학급 이상인)곳, 2) 대부분 국·공립학교이므로 사립학교도 포함, 3) [대도시]-[중소도시]-[군·면·읍 지역] 소재 비율을 고려, 4) 1차 선정 후 다음 두 조건의 적절성을 평가하여 불충분시 재샘플링, 5) 전국 주요 공단근처 초교를 적어도 10개교 이상 포함, 6) 학교 설립연도를 고려하여, [당해 연도 신축학교] [2-5년], [6-10년], [11-20년], [21년 이상] 등의 비율을 고려한다.

2.2 측정 및 분석방법

측정 및 포집은 각각의 초등학교에서 수업 중인 교실에서 벽으로부터 최소 1m이상 떨어진 위치에서 바닥면으로부터 1.2~1.5m 높이에 시료채

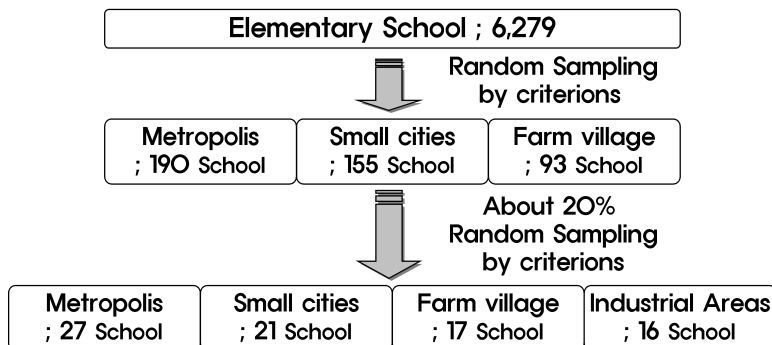


Fig. 1. Investigation objective selecting.

취 장치를 설치하여 시료를 채취하였으며, 주변 시설 및 건물 등의 영향으로 측정 장애가 없는 곳을 선정하는 것을 원칙으로 하였다.

실내공간에서 발생될 수 있는 VOCs 시료채취는 VOCs 샘플러(Sampler) Σ -30(SIBATA, Japan)를 사용하였으며 스테인레스 스틸(Stainless steel) 재질의 Tenex 흡착관(1/4"×20Cm, Supelco, USA)으로 채취하였고, 샘플링 유량과 시간은 0.2 l/min의 유량으로 30분 동안 시료를 채취하였다. 시료는 분석 전까지 -70℃에서 냉동 보관한 후 2~3일 내에 흡착물질을 이용하여 대기를 채취한 후 탈착하여 GC/MSD(Gas Chromatograph/Mass Selective Detector)로 분석하였다. 조사대상물질의 정성·정량을 위해 표준물질 분석결과 대부분의 물질에서 $R^2=0.98$ 이상의 검량선을 나타냈다. 포름알데히드(Formaldehyde)의 경우도 채취용 전용샘플러(Sampler) Σ 100H(SIBATA, Japan)를 사용하여 350mg의 DNPH-silica(1.0mg DNPH)를 충전한 1.0cm(i.d.)×2.0cm(o.d.)×4.3cm(total length)의 cartridge인 DNPH-silica cartridge(Supelco, USA)에 오존의 간섭을 제거하기 위한 0.46cm(I.D.)×10cm의 copper tube에 KI(Potassium iodide) 결정을 채운 오존 스크러버 카트리지를(scrubber cartridge)를 DNPH-silica cartridge 앞에 장착하여 시료를 채취하였다(다중이용시설 실내공기질관리법의 공정시험방법에 준함). 지점은 다른 측정항목과 동일한 지점을 선택하였으며, 0.5 l/min의 유량으로 30분 동안 채취하였다. 분석은 HPLC(High Performance Liquid Chromatography, alliance separation module 2690/dual λ absorbance detector) 2487 모델을 이용하였다. 시료가 HPLC 분석에 의한 오차 발생 정도를 평가하기 위해 체류 시간과 피크 면적으로 재현성을 평가하였다. VOCs 및 알데히드류의 분석 정확성 실험은 동일한

방법으로 표준물질을 반복 분석하였고, 평균, 표준편차, 기기검출한계(IDL : Instrument Detection Limit)를 평가하였다. 기기검출한계이하는 불검출(N.D : Not Detect)처리하였다. VOCs 및 알데히드류의 회수율 실험결과 5회 반복 측정된 회수율을 각각 산출하였고 85~110% 범위내의 양호한 회수율을 나타냈다.

실내 알레르겐인 집먼지진드기 중에서 *Dermatophagoides farinae*의 그룹(Group) 1 주 알레르겐인 Der f 1, *Blattella germanica*의 그룹(Group) 1 주 알레르겐인 Bla g 1, 개의 그룹(Group) 1 주알레르겐인 Can f 1, 마지막으로 *Aspergillus*의 주 알레르겐인 Asp f 1을 선정하였다. 시료의 채취는 먼지 채취용으로 특수 제작된 진공청소기를 사용하였으며, 진공청소기 홀더에 필터(Whatman, 125mm)를 장착하여 먼지를 포집하였다. 먼지가 포집된 필터는 노출이 되지 않도록 호일로 보관하여 실험실로 운반, 상온에서 보관하였다. 주알레르겐은 모두 실내 바이오테크놀로지시(Indoor biotechnologies, Manchester, UK)의 2-site ELISA kit를 이용하여 측정하였다. 먼지 채집한 고은 먼지의 무게를 달아 일정량의 borate buffer를 넣어 18시간 동안 상온에서 알레르겐을 추출하였다. 이를 원심분리 후 상층액만을 모아 실험 검체로 사용하였고, 전처리과정을 거쳐 UV 405 nm에서 흡광도를 스펙트로메터(Spectrophotometer, VERSAMAX, molecular Devices)로 측정하였다.

2.3 통계분석

측정된 모든 결과는 평균, 표준편차를 제시하였고, 모든 자료의 통계분석은 SPSS 12.0(Statistical package for the social science) 통계 패키지(package)를 사용하였고, 크루스칼 월리스(Kruskall-

Wallis) 분석을 사용하여 통계적 유의성을 보았다.

3. 연구결과

3.1 교실 내 실내공기질 평가

Table 1은 오염물질들의 교실 내와 교실 외 즉 실내/실외공기 중의 농도분포를 비교하였다. 휘발성유기화합물질(VOCs)의 경우 교육인적자원부의 기준치가 없어 환경부 미적용 다중이용시설 및 소규모 다중이용시설 기준을 참고치로 설정하여 초과율을 나타내었다. 휘발성유기화합물질 중 Styrene은 실내외 농도비가 2.6으로 가장 크게 나타났고,

모두 1.0을 넘었으며, 환경부 미적용 다중이용시설 및 소규모 다중이용시설 기준을 근거로 초과율을 비교해 보면 자일렌(Xylene), 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene)의 경우 각각 21.1%, 17.1%, 2.6%가 초과하였다. 에틸벤젠(Ethylbenzene)과 스티렌(Styrene)의 경우는 초과하지 않았다. 포름알데히드(Formaldehyde)는 기준치 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 경우는 거의 없었으며, 실내외 농도비는 3.6으로 나타났다. 미세먼지(PM-10)의 경우 실내공기의 농도변화가 조금 더 크게 나타났으며, 실내외 농도비는 1.4로 큰 차이를 보이지는 않았지만 역시 기준치인 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 27.2% 초과하였다. 모든 결과에서 실내의 오염 발생원이 존재하는 것으로 나타났다.

Table 1. Comparison of indoor concentration with outdoor concentration for air pollutants.

unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Compound	Indoor	Outdoor	I/O ratio	Excess rate	Guideline
	Mean \pm S.D (min ~Max)	Mean \pm S.D (min ~Max)			
Benzene (n=76)	14.03 \pm 19.38 (N.D ~96.64)	11.59 \pm 15.58 (N.D ~68.28)	1.2	17.1	¹⁾ 30
Toluene (n=76)	81.17 \pm 110.61 (N.D ~816.47)	52.99 \pm 66.99 (N.D ~261.53)	1.5	2.6	¹⁾ 260
Ethylbenzene (n=76)	28.33 \pm 38.51 (N.D ~158.58)	19.27 \pm 30.14 (N.D ~116.79)	1.4	0.0	¹⁾ 1,000
Xylene (n=76)	50.15 \pm 70.74 (N.D ~268.74)	30.94 \pm 50.39 (N.D ~191.94)	1.6	21.1	¹⁾ 100
Styrene (n=76)	9.95 \pm 25.14 (N.D ~150.58)	3.86 \pm 9.80 (N.D ~61.40)	2.6	0.0	¹⁾ 260
Formaldehyde (n=81)	22.07 \pm 15.62 (1.12 ~107.14)	10.52 \pm 7.11 (N.D ~37.21)	3.6	1.2	²⁾ 100
PM ₁₀ (n=81)	88.06 \pm 54.47 (9.70 ~358.33)	84.32 \pm 53.66 (N.D ~280.15)	1.4	27.2	²⁾ 100

1) IAQ guideline of multiplex use facility,

2) IAQ guideline of Ministry of Education & Human Resources Development

N.D : Not Detect

3.2 지역별 구분에 의한 교실 내 공기오염물질 평가

초등학교에서의 VOCs 노출 분포를 조사 대상 초등학교의 도시 유형별로 살펴보면, 벤젠(Benzene)의 경우 대도시 지역의 실내에서 $20.93\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 농촌지역 $5.33\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다 약 4배 높게 나타났다. 에틸벤젠(Ethylbenzene)의 경우도 가장 높게 나타난 대도시지역은 농촌지역에 비해 약 5배 이상 높게 나타났으며, 자일렌(Xylene), 스티렌(Styrene)의 경우도 대도시, 중소도시, 공단지역, 농촌지역의 순으로 나타났고, 공단지역을 제외한 대부분의 지역에서 교실이 복도보다 높은 농도를 보였다. 톨루엔(Toluene)의 경우 대도시 $94.22\mu\text{g}/\text{m}^3$, 공단지역 $125.14\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 공단 및 농촌지역에 비해 비교적 높게 나타나는 경향을 보였다. 조사 대상별 VOCs와 관련하여 통계적으로는 자일렌(Xylene)측정지점 중 복도를 제외하고 모두 통계적으로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다($p < 0.05$).

포름알데히드의 경우, 중소도시에서 $27.07\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났고 공단지역에서는 $15.28\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮게 나타났다. 교실 내 농도가 복도보다 더 높았으며, 교육인적자원부 학교보건법에서 제시하는 기준치인 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 모두 초과하지 않았다. 통계적으로 교실 내 포름알데히드의 경우 지역별로 유의한 차이가 있었다($p < 0.05$).

실내, 복도의 미세먼지(PM-10) 농도분포를 살펴보면 전체 실내평균 $88.06\mu\text{g}/\text{m}^3$, 복도 $84.32\mu\text{g}/\text{m}^3$ 정도로 학교보건법상 실내 환경기준($100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하) 및 대기일평균환경기준($150\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 초과하지 않았지만, 일부 학교가 학교보건법상 실내 환경기준($100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 초과하는 경우도 있었다. 전체적으로 복도에 비해 실내에서 조금 높았고, 교실 내 미세먼지(PM10)은 중소도시, 공단지

역, 대도시, 농촌지역 순으로 나타났다. 공단지역의 복도의 경우는 $110.90\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 가장 높은 평균값을 보였으나, 각 지역별로 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Table 2).

3.3 건축연수 및 공사유무에 의한 교실 내 공기오염물질 평가

Table 3은 건물의 건축 완공 후의 경과 연도 즉 건물의 노후화에 따른 실내공기오염물질의 농도를 비교하였다. 교실 내 VOCs의 경우 건축 후 11~20년이 지난 학교에서 벤젠(Benzene) $24.40\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠(Ethylbenzene) $43.22\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌(Xylene) $75.10\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 높게 나타났고, 스티렌(Styrene)의 경우는 신축 초등학교에서 $25.53\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조금 더 높게 나타났다. 복도의 경우 벤젠(Benzene)의 제외하고 신축 초등학교에서 높게 나타났으며, 통계적으로는 스티렌(Styrene) 경우만 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 포름알데히드의 경우 건축 후 1~10년이 지난 학교의 교실에서 $27.83\mu\text{g}/\text{m}^3$ 가장 높았으며, 또한 건축 완공 후의 경과 연도가 지날수록 될수록 실내공기중의 농도가 감소하였고, 통계적으로도 유의한 차이가 있었다. 미세먼지(PM10)의 경우는 전체적으로 건축 완공 후의 경과 연도가 증가할수록 감소하는 경향을 보였으며, 통계적으로 복도의 경우는 유의한 차이가 있었다.

Table 4는 최근 2년간 초등학교 건물에 대한 보수 공사 유무에 따른 실내공기오염물질의 농도를 나타낸 것으로, VOCs의 경우 벤젠(Benzene)과 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene), 스티렌(Styrene)에서 최근 공사가 이루어진 경우에 다소 높게 나타나는 경향을 보였다. 톨루엔(Toluene)의 경우도 교실을 제외한 복도에서는 공사가 이루어진

Table 2. Concentration of indoor air pollutants at each area

unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Compound	Location	Indoor			Hallway		
		N	Mean \pm S.D	p-value	N	Mean \pm S.D	p-value
Benzene	Metropolis	27	20.93 \pm 19.89	.001**	26	20.22 \pm 17.03	.006**
	Small cities	20	15.05 \pm 25.49		20	15.07 \pm 21.32	
	Farm village	16	5.44 \pm 10.40		17	5.26 \pm 6.05	
	Industrial Areas	13	8.69 \pm 9.32		13	4.81 \pm 4.40	
Toluene	Metropolis	27	94.22 \pm 72.47	.009**	26	103.69 \pm 72.37	.035*
	Small cities	20	66.89 \pm 71.94		20	65.60 \pm 68.29	
	Farm village	16	41.29 \pm 57.46		17	48.31 \pm 67.08	
	Industrial Areas	13	125.14 \pm 218.70		13	65.90 \pm 142.65	
Ethylbenzene	Metropolis	27	46.15 \pm 41.36	.005**	26	40.09 \pm 36.70	.007**
	Small cities	20	27.70 \pm 44.05		20	23.71 \pm 34.37	
	Farm village	16	7.38 \pm 16.82		17	8.48 \pm 12.92	
	Industrial Areas	13	18.07 \pm 26.83		13	13.79 \pm 23.62	
Xylene	Metropolis	28	80.80 \pm 77.31	.005**	28	69.11 \pm 68.25	.130
	Small cities	23	43.57 \pm 67.59		21	38.47 \pm 53.53	
	Farm village	17	15.31 \pm 31.75		17	19.48 \pm 30.00	
	Industrial Areas	13	40.31 \pm 77.64		13	43.28 \pm 104.35	
Styrene	Metropolis	27	13.93 \pm 21.33	.043*	26	10.58 \pm 17.93	.048*
	Small cities	20	15.79 \pm 41.08		20	6.72 \pm 17.33	
	Farm village	16	1.31 \pm 2.50		17	3.78 \pm 12.78	
	Industrial Areas	13	3.34 \pm 6.65		13	0.81 \pm 1.34	
HCHO	Metropolis	27	21.42 \pm 14.21	.012*	27	10.19 \pm 5.58	.120
	Small cities	21	27.07 \pm 20.11		21	10.40 \pm 4.37	
	Farm village	17	23.32 \pm 14.31		17	12.70 \pm 11.28	
	Industrial Areas	16	15.28 \pm 10.31		16	8.93 \pm 6.79	
PM ₁₀	Metropolis	27	87.31 \pm 60.56	.717	27	85.83 \pm 49.44	.111
	Small cities	21	93.39 \pm 73.89		21	94.11 \pm 56.82	
	Farm village	17	78.48 \pm 28.45		17	52.18 \pm 14.72	
	Industrial Areas	16	85.93 \pm 32.60		16	110.90 \pm 85.45	

*:p<0.05, **:p<0.01

경우가 다소 높았으며, 통계적으로는 벤젠(Benzene)의 경우 복도에서는 최근 2년간 공사 유무에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 미세먼지와 포름알데히드(Formaldehyde)는 공사를 했던 학교의 교실에서 높게 나타났으나, 모두 통계적으로는 유의한 차이가 없었다.

3.4 물질간 상관성 분석

초등학교의 교실 내에서 측정된 공기오염물질인 VOCs 중 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene), 스티렌(Styrene)의 농도간의 상관분석결과를 Table 5에 나타내었다. VOCs의 농도간의 상관분석은 모두 양의 관계를 나타내어 같은 발생원에서 배출되고 있음을 알 수 있었다. 톨루엔(Toluene)을 제외한 벤젠(Benzene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene), 스티렌(Styrene)의 농도는 비교적 높은 상관관계를 보였다.

3.5 먼지내 주 알레르겐 측정 결과

먼지내 주 알레르겐의 특성을 확인하고자 학교 규모, 학교 설립연도 등을 고려하여 81개 초등학교 중 19개를 선정하여 교실과 보건실의 먼지내 주 알레르겐을 측정하였다. 각 학교의 교실과 보건실에서 채집된 먼지의 양은 각각 111.1 ± 51.2 (14~210)mg과 102.1 ± 32.1 (18.8~156.0)mg 이었으며 이는 학교선정기준을 포함한 어떠한 분류에서도 의미 있는 차이가 없었다. 알레르기 질환을 일으킬 수 있는 역치보다 높았던 경우는 집먼지진드기 주알레르겐인 Der f 1 기준($2 \mu\text{g/g dust}$)으로 볼 때 전체 교실의 5.9%, 전체 보건실의 11.8%로 측정되었다. 바퀴의 주알레르겐인 Bla g 1의 경우 역치 (8 IU/g dust)보다 높게 나온 학교는 한 곳도 없

었으며, 개털 주알레르겐인 Can f 1의 경우도 보건실의 5.9%에서 역치($2 \mu\text{g/g dust}$)보다 높았다. Asp f 1은 모든 먼지에서 검출되지 않았다(Table 6). 건축 후 20년 이상 된 건물의 교실에서 신축교실에 비해 Der f 1이 유의하게 높게 검출되었지만 (0.28 ± 0.19 vs. $0.05 \pm 0.049 \mu\text{g/g dust}$, $p=0.044$), 측정된 Der f 1치가 알레르기 질환을 유발하는 역치($2 \mu\text{g}$ 먼지 1 g)이하였다.

4. 고찰

실내 환경은 건물의 용도, 거주자의 행동 특성, 건축자재 및 생활용품, 건물의 위치 등 다양한 환경에 의해 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다 (Daisey et al, 2003). 다양한 실내 환경에서 조사되는 휘발성유기화합물(VOCs)의 경우 새집증후군 및 복합화학민감증을 유발하는 오염물질로 알려져 있으며, 또한 거주자들의 건강상 큰 악영향을 줄 수 있는 물질로 알려져 있다(US EPA, 2004). 학교 실내공기질의 중요성은 선진 외국에서 이미 많은 연구가 수행되고 있으며(Clarisse et al, 2003; Daisey et al, 2003), 그 중 Meininhaus(2003) 등은 프랑스 학교 교실에서 VOCs, 암모니아, 이산화황을 측정하여 실내공기오염물질이 학생들에게 감각 기능에 영향을 있음을 보고하였다.

본 연구에서 조사한 VOCs 중 벤젠(Benzene)의 경우 일부 대도시에 위치한 초등학교에서 높았으며, 주로 학교 실내보다 실외 대기 중 자동차 매연 등에 의한 영향이 높은 것으로 조사되고 있어 (Kim et al, 2004), 추가적인 오염원 추적을 통한 관리가 필요하다고 할 수 있다. 또한, 톨루엔(Toluene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene)

Table 3. Concentrations of indoor air pollutions by construction year.

unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Compound	Construction year	Indoor			Hallway		
		N	Mean \pm S.D	p-value	N	Mean \pm S.D	p-value
Benzene	new	4	13.48 \pm 15.88	.548	5	12.49 \pm 14.24	.561
	1~10 yr	14	11.03 \pm 17.62		15	9.08 \pm 13.17	
	11~20 yr	14	24.50 \pm 30.68		14	17.33 \pm 23.65	
	21~40 yr	19	15.44 \pm 19.18		17	14.48 \pm 18.59	
	40 yr over	25	8.85 \pm 9.43		25	11.66 \pm 11.93	
Toluene	new	4	69.90 \pm 92.43	.975	5	81.05 \pm 75.27	.153
	1~10 yr	14	59.97 \pm 55.15		15	57.29 \pm 68.44	
	11~20 yr	14	99.54 \pm 91.11		14	76.08 \pm 64.42	
	21~40 yr	19	71.76 \pm 68.97		17	59.59 \pm 75.16	
	40 yr over	25	91.72 \pm 163.67		25	93.73 \pm 115.79	
Ethylbenzene	new	4	25.39 \pm 45.60	.421	5	27.82 \pm 38.15	.754
	1~10 yr	14	21.44 \pm 30.45		15	18.28 \pm 24.40	
	11~20 yr	14	43.22 \pm 54.17		14	27.95 \pm 38.71	
	21~40 yr	19	36.09 \pm 42.15		17	31.73 \pm 37.82	
	40 yr over	25	18.42 \pm 25.32		25	20.68 \pm 28.70	
Xylene	new	5	47.54 \pm 98.36	.384	5	60.32 \pm 97.78	.973
	1~10 yr	15	33.60 \pm 46.10		15	35.53 \pm 44.23	
	11~20 yr	14	75.10 \pm 93.31		14	45.88 \pm 61.48	
	21~40 yr	20	60.78 \pm 73.82		20	47.02 \pm 64.49	
	40 yr over	25	38.12 \pm 60.00		25	48.79 \pm 81.56	
Styrene	new	4	25.53 \pm 50.63	.014*	5	18.77 \pm 38.62	.015*
	1~10 yr	14	6.48 \pm 12.18		15	6.44 \pm 13.79	
	11~20 yr	14	23.37 \pm 47.89		14	10.02 \pm 20.30	
	21~40 yr	19	8.65 \pm 11.41		17	6.22 \pm 10.00	
	40 yr over	25	2.88 \pm 5.29		25	1.91 \pm 3.66	
HCHO	new	n7	25.09 \pm 14.17	.005*	7	11.89 \pm 4.81	.017*
	1~10 yr	16	27.83 \pm 9.67		16	12.32 \pm 68.9	
	11~20 yr	14	26.14 \pm 27.20		14	10.33 \pm 5.60	
	21~40 yr	20	23.13 \pm 12.89		20	11.67 \pm 6.86	
	40 yr over	24	14.09 \pm 8.74		24	8.08 \pm 8.49	
PM ₁₀	new	7	81.70 \pm 22.44	.648	7	45.52 \pm 14.15	.022*
	1~10 yr	16	94.99 \pm 75.57		16	83.62 \pm 54.20	
	11~20 yr	14	100.22 \pm 48.77		14	117.51 \pm 45.53	
	21~40 yr	20	98.22 \pm 62.90		20	89.65 \pm 57.00	
	40 yr over	24	69.73 \pm 35.70		24	61.10 \pm 50.45	

*:p<0.05, **:p<0.01

Table 4. Concentrations of indoor air pollutants by repair works(≤2 yr).

unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Compound	Repair works (≤2yr)	Indoor			Hallway		
		N	Mean ± S.D	p-value	N	Mean ± S.D	p-value
Benzene	Yes	40	18.68±23.94	.115	40	17.37±19.82	.047*
	No	36	8.86±10.66		36	7.89±9.28	
Toluene	Yes	40	81.09±74.73	.744	40	77.77±70.52	.357
	No	36	81.27±141.40		36	71.54±103.83	
Ethylbenzene	Yes	40	36.44±45.19	.588	40	29.70±35.58	.599
	No	36	19.31±27.25		36	18.70±27.62	
Xylene	Yes	41	63.86±74.66	.183	41	53.59±60.03	.254
	No	38	35.36±63.96		38	37.88±74.86	
Styrene	Yes	40	13.23±30.28	.408	40	7.17±13.79	.398
	No	36	6.31±17.51		36	5.49±16.81	
HCHO	Yes	40	23.65±17.88	.435	40	11.28±8.07	.360
	No	40	20.53±13.08		40	9.78±6.04	
PM ₁₀	Yes	41	1512.16±1132.33	.687	41	588.04±139.76	.885
	No	40	1294.03±780.39		40	514.00±110.10	

*:p<0.05, **:p<0.01

Table 5. Correlations matrix among measured indoor air pollutants.

	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	Xylene	Styrene
Benzene	1.000				
Toluene	.418**	1.000			
Ethylbenzene	.877**	.402**	1.000		
Xylene	.799**	.382**	.932**	1.000	
Styrene	.709**	.282**	.632**	.482**	1.000

*:p<0.05, **:p<0.01

Table 6. Detection of dust mite allergen.

		Detection rate(%)	Threshold value* over-rate(%)	Mean ± S.D	Unit
Der f 1	Classroom	17(100)	1(5.9)	0.40 ± 0.67	$\mu\text{g}/\text{g}$ dust
	Infirmary	17(100)	2(11.8)	1.09 ± 1.02	
Bla g 1	Classroom	3(17.6)	-	0.12 ± 0.002	IU/g dust
	Infirmary	3(17.6)	-	0.05 ± 0.0002	
Can f 1	Classroom	17(100)	-	0.44 ± 0.43	$\mu\text{g}/\text{g}$ dust
	Infirmary	17(100)	1(5.9)	0.95 ± 0.69	
Asp f 1	Classroom	-	-	-	$\mu\text{g}/\text{g}$ dust
	Infirmary	-	-	-	

* Der f 1; 2 $\mu\text{g}/\text{g}$ dust, Bla g 1; 8 IU/g dust, Can f 1; 2 $\mu\text{g}/\text{g}$ dust

등은 아직 기준안이 마련되어 있지 않았지만, 전체적으로 높지 않은 수준으로 나타났다. VOCs의 노출 특성을 보면 장소별 오염도 순은 교실 내>복도>실외의 농도 순이며, 전체적으로 대도시 및 공단지역에 위치한 초등학교가 농촌지역보다 높은 것으로 조사되었다. 실내/실외 농도비(I/O ratio)를 통해 실내 오염 발생원에 존재를 살펴보면 (Ilgen E et al., 2001), 대부분의 물질의 실내/실외 농도비가 1보다 크게 나타나 이는 실내 오염 발생원이 틀림없이 존재한다고 볼 수 있다. EPA의 노출평가 보고에서도 실내의 VOCs 농도가 실외보다 2~5배 높다고 보고되었고, 이는 실내에 존재하는 건물 내벽 페인트, 접착제, 물감, 각종 학습우드제품, 마감재료 등으로부터 VOCs가 배출되기 때문에 실내 오염원 관리가 매우 중요하다 (Wolkoff P and Nielsen GD, 2001). 학교의 건축 년수에 따라 VOCs 중 벤젠(Benzene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene)은 11~20년이 지난 학교에서 가장 높게 조사되었고, 학교의 건축 구조물 및 주변지역 등 구체적인 학교 환경에 대한 평가를 통해 학교 건축물과 실내공기질에 대한 정확한 평가가 필요하다고 할 수 있다. 최근 2년간 공사를 진행한 초등학교에서도 VOCs의 농도가 높게 나타났고, 벤젠(Benzene)의 경우 복도에서만 최근 2년간 공사 유무에 따라 통계적으로 유의한 차이가 있었다. 미세먼지의 경우 기준치를 초과하는 경우가 27.2%였고, 이는 교실에서 학생들의 움직임, 분필 사용·실내화 작용 여부 및 학생들의 등교 시 외부로부터의 교실내로의 유입 등으로 발생할 수 있다. 미세먼지의 경우 언제라도 기준치를 초과할 가능성이 매우 높기 때문에 적절한 환기시스템 구축 및 교실 내 실내 환경 관리가 적극적으로 이루어져야 된다. 포름알데히드(Formal-

dehyde)의 경우 건축 완공 이후 경과연도가 1년 미만의 교실에서 가장 높은 농도를 나타냈으며 건축 완공 이후의 연도가 증가할수록 즉 건물이 노후화 될수록 감소하는 경향을 보였다. 이는 신축 학교 건설에 사용된 건축자재 및 새 가구 등에서 방출되는 것으로 간주할 수 있다.

먼지 중 알레르겐의 경우 한국에서 가장 흔한 실내 알레르겐인 집먼지진드기 중에서 우점종인 *Dermatophagoides farinae*의 그룹(Group) 1 주 알레르겐인 Der f 1과 주거환경이 좋지 않은 지역에서 호흡기 알레르기의 중요 원인 알레르겐으로 잘 알려진 바퀴 중에서 우리나라에 가장 많은 종류인 *Blattella germanica*의 그룹(Group) 1 주 알레르겐인 Bla g 1, 그리고 최근 서식밀도가 급증하고 있는 개의 그룹(Group) 1 주알레르겐인 Can f 1, 마지막으로 잘 알려진 실내 진균류인 *Aspergillus*의 주 알레르겐인 Asp f 1을 선정하였다(박중원, 2000). 본 연구에서는 질병발생률과 실내환경조사 결과를 통하여 학교를 선정하여 먼지 중 집먼지 진드기 등 알레르겐을 측정하였으며, 검출율에 비해 농도는 낮은 것으로 조사되었다.

본 연구는 연구 설계에 있어 연구기간이 한정되어 초겨울기간에 연구대상 학교의 교실 내 환경 실태조사를 수행하여 계절적인 영향에 의한 교실 내 공기오염의 수준을 확인하지 못하였다. 전국의 82개의 초등학교를 통해 일반적인 현황을 파악할 수 있었으나, 단번의 측정결과로 모든 것을 해석하는 것에는 제한점이 있으므로, 집중적으로 다양한 학교 공간의 측정 및 분석을 통한 실내공기오염과 관련된 원인을 추적 조사하는 데에는 한계점이 있었다.

향후 본 연구결과를 기초로 하여, 환경오염물질에 대한 면적이 약한 초등학생들의 경우 장시간

생활하는 초등학교에 대한 추적정밀조사 및 관리 방안 확립 등 적절한 조치가 시급히 이루어져야 할 것으로 여겨진다. 또한, 현재 스쿨존은 교통안전이나 소음에 대한 것을 주로 관리하기 위해 운영되고 있으나 이번 연구 결과가 보여주듯이 외부 대기질의 영향으로 실내 공기질이 악화되는 현상이 있으므로, 외기의 오염으로부터 학교 내 공기질을 보호할 수 있는 방안으로 스쿨존의 환경보전학적 규정 또는 관리방안이 연구되어야 한다. 좀 더 나아가서는 학교를 새로 신축할 때 학교부지의 위치선정에 있어 이 같은 조건들이 반영되도록 할 수 있어야 한다.

5. 결론

전국 단위 초등학교 약 80개교의 교실 VOCs 분포를 조사한 결과 전체적으로 높지 않은 수준이었으나, 벤젠(Benzene)의 경우 일부 초등학교에서 높게 조사되어, 추가적인 오염원 추적을 통한 관리 필요하다. 포름알데히드(Formaldehyde)의 경우 교실 내 평균 농도 $22.07\mu\text{g}/\text{m}^3$, 전체적으로 낮은 오염도로 조사되었고, 미세먼지(PM-10)의 학교보건법상 실내환경 기준($100\mu\text{g}/\text{m}^3$) 27.2% 초과하는 것으로 조사되어 조치가 시급하다. 전체적으로 대도시 및 공단지역에 위치한 초등학교가 농촌지역보다 높았고, 최근(2006년도) 공사를 진행한 초등학교에서 높았다. 학교 먼지 중 알레르겐 검출 시험 결과 집먼지 진드기 알레르겐과 개(Dog) 알레르겐의 경우 교실, 양호실에서 모두 검출, 바퀴 알레르겐은 일부 검출, 실내 곰팡이 알레르겐 검출되지 않았다.

감사의 글

이 연구는 교육인적자원부 “학교 실내공기 질과 환경성 질환의 연관성조사 및 예방대책에 관한 연구('06~'07)”의 일부 결과이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

- 박중원 (2000) 한국 가정에서의 실내 알레르겐, 4th 연세대학교 의과대학 알레르기 심포지엄
학교보건법 (법률 제7396호, 2005. 3. 24 공포, 2006. 1. 1 시행).
- Bayer, C.W., Crow, S.A., Fischer, J. (2000) Causes of indoor air quality problems in schools: summary of science research, SEMCO Inc., Columbia., 1-41.
- Clarisse, B., Laurent, A.M., Seta, N., Le Moullec, Y., El Hasnaoui, A., Momas, I. (2003) Indoor aldehydes: measurement of contamination levels and identification of their determinants in Paris dwellings, *Environmental Research*, 92, 245-253.
- Daisey, J.M., Angell, W.J., Apte, M.G. (2003) Indoor air quality, ventilation and health symptoms in school: an analysis of existing information, *Indoor Air*, 13, 53-64.
- Ilgen, E., Karfich, N., Levsen, K., Angerer, J., Schneider, P., Heinrich, J., Wichmann, H., Duneemann, L., Begerow, J. (2001) Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment: part I. Indoor versus outdoor sources, the influence of traffic, *Atmospheric Environment*, 35, 1235-1252.

- Ingram, J.M., Sporik, R., Rose, G., Honsinger, R., Chapman, M.D., Platts-Mills, T.A.E. (1995) Quantitative assessment of exposure to dog (Can f 1) and cat (Fel d 1) allergens: relation to sensitization and asthma among children living in Los Alamos, New Mexico, *J. Allergy. Clin Immunol*, 96, 449-456.
- Kim, J.J., Smorodinsky, S., Lipsett, M. (2004) Traffic-related air pollution near busy roads: the East Bay Children's Respiratory Health Study. *Am J Respir Crit Care Med*, 170, 520-526.
- Meininghaus, R., Kouniali, A., Mandin, C., Cicolella, A. (2003) Risk assessment of sensory irritants in indoor air - a case study in a French school, *Environment International*, 28, 553-557.
- National Academy of Sciences(NAS) (1993), *Human Exposure Assessment for airborne Pollutants*, Washington D.C.
- Schroeder, W.H., Dobson, M., Kane, D.M., Johnson, N.D. (1987) Toxic trace element associated with airborne particulate matter, *A Riview, JAPCA*, 37(11).
- Richard, A.W., Peter, A.S. (1983) *Indoor Air Pollution*, A Wiley-Interscience Publication.
- Roost, H.P., Gassner, M., Grize, L., Wuthrich, B., Sennhauser, F.H., Varonier, H.S. (2004) Influence of MMR-vaccinations and diseases on atopic sensitization and allergic symptoms in Swiss schoolchildren, *Pediatr. Allergy. Immunol*, 15, 401-407.
- Rosen, K.G., Richardson, G. (1999) Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism-A hypothesis, *The Science of Total Environment*, 234, 87-93.
- US EPA (2004) *Sources of Indoor Air Pollution-Organic Gases Volatile Organic Compounds-VOCs*.
- WHO (2002) *Europe Exposure Assessment in Studies on the Chronic Effects of Long-Term Exposure to Air Pollution*.
- Wolkoff, P., Nielsen, G.D. (2001) Organic compounds in indoor air-their relevance for perceived indoor air quality, *Atmospheric. Environment*, 35, 4407- 4417.