

신축학교 실내공기질이 초등학생들의 인지기능에 미치는 영향

영남대학교 부속병원 산업의학과¹⁾, 영남대학교 의과대학 예방의학교실²⁾,
고신대학교 의과대학 예방의학교실³⁾, 영남대학교 공과대학 건설환경공학부⁴⁾

김대섭¹⁾ · 김선주²⁾ · 박시영¹⁾ · 전만중³⁾ · 김규태²⁾
김창윤^{1),2)} · 정종학^{1),2)} · 백성옥⁴⁾ · 사공준^{1),2)}

— Abstract —

The Effects of Indoor Air Quality on the Neurobehavioral Performance of Elementary School Children

Dae-Seop Kim¹⁾, Sun-Ju Kim²⁾, Si-Young Park¹⁾, Man-Joong Jeon³⁾, Gyu-Tae Kim²⁾,
Chang-Yoon Kim^{1),2)}, Jong-Hak Chung^{1),2)}, Sung-Ok Baek⁴⁾, Joon Sakong^{1),2)}

Department of Occupational and Environmental Medicine, Yeungnam University Hospital¹⁾
Department of Preventive Medicine and Public Health, College of Medicine, Yeungnam University²⁾
Department of Preventive Medicine, College of Medicine, Kosin University³⁾
School of Civil, Urban, and Environmental Engineering, Yeungnam University⁴⁾

Objectives: Most studies on the indoor air quality of newly built schools have focused only on the number of schools exceeding a standard or on subjective symptoms, such as sneezing, irritated eyes and an irritated nose. However, there has been no report on how poor indoor air quality affects children's academic performance. This study evaluated the effects of indoor air quality on the neurobehavioral performance of elementary school children.

Methods: This study measured the indoor air pollutants and compared children's performance, using a computerized neurobehavioral test, between a newly built and a 12-year-old school. In addition, a questionnaire was administered regarding the indoor air quality related symptoms of children in a newly built and a 12-year-old school.

Results: In the newly built school, the formaldehyde levels in the 1st and 4th classes with an open window were 34.6 and 27.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. The levels in the 1st and 4th classes with the window closed were 80.2 and 127.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In the 12-year-old school, the formaldehyde levels in 1st and 4th class with open and closed window were 12.6 and 7.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 19.8 and 25.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. With respect to total volatile organic compounds, the levels in the 1st and 4th classes with the window open in the newly built school were 87.2 and 428.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In the 1st and 4th classes with the window closed, the total volatile organic compounds were 1,283.5 and 1,715.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, respectively. In the 12-year-old school, the total volatile organic compounds were 240.9 and 150.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 371.9 and 448.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ in the 1st and 4th classes, respectively. In the case of a newly built school, the performance of the students in the neurobehavioral test in the 4th class with the window closed was 8.3% lower than for those in the 1st class with the window closed, but was only 5.9% lower when the windows were open. There was a statistical significant difference in the total numbers of symptoms between the two schools.

〈접수일: 2006년 12월 4일, 채택일: 2007년 1월 2일〉

교신저자: 사 공 준 (Tel: 053-620-4614) E-mail: jsakong@med.yu.ac.kr

* 이 논문은 2005년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. R01-2005-000-11081-0)

Conclusions: These results suggest a proper evaluation of the indoor air quality within schools is required into both the level of contamination and the health effects of these contaminants toward children.

Key Words: Indoor air quality, Neurobehavioral performance test

서 론

학교 역시 빌딩의 한 형태이나, 주택이나 다중이용시설의 실내환경 및 산업장의 작업환경에 비해 학교의 실내환경에 대한 관심이 적었다. 그러나 학생들과 교사들은 하루 중 교실에서 지내는 시간이 많고, 특히 아이들은 신체적으로 성장하는 과정에 있으며, 어른들보다 호흡량이 상대적으로 많기 때문에 실내공기 오염물질에 대한 감수성이 높다(Landrigan, 1998; Faustman 등, 2000).

학교 외부로부터의 실내공기 오염원은 꽃가루, 중금속을 포함하는 운동장 표토, 학교주변 공장의 매연, 인근 도로의 차량매연 등이 있으며 내부의 오염원으로 교실 커튼, 책걸상, 석면을 포함한 내장재, 가구, 접착제, 절연재, 바닥과 벽면의 도료, 각종 플라스틱류, 먼지, 미생물 및 연소가스 등이 있다(Bayer 등, 2000).

실내공기오염과 업무 수행 능력(performance)에 대해서는 교실 내 환기의 부족으로 인한 이산화탄소 농도의 증가가 증상호소율을 높이고 집중력을 감소시켰다는 보고(Myhvoid 등, 1996; Bartlett 등, 1999)가 있으며, 성인을 대상으로 한 연구에서도 실내공기 오염원의 유무에 따라 타이핑, 계산력, 논리적 사고, 기억, 창의력 등의 업무 수행 능력에 차이를 보였다는 보고(Wargocki 등, 1999; 2000; 2004)도 있고, 나쁜 실내공기의 질이 집중을 필요로 하는 계산이나 기억 등 개인의 정신적 업무능력을 감소시킨다는 보고도 있다(Lagercrantz 등, 2000; Mendell 등, 2002).

특히 신축한지 얼마 되지 않은 학교의 경우 이른바 “새 집 증후군”의 원인으로 알려진 신축건물의 벽지, 바닥재, 페인트 등 각종 건축자재에서 나오는 포름알데히드, 휘발성 유기화합물(volatile organic compounds, 이하 VOCs) 등의 화학물질로 인한 교실 공기오염에 학생들과 교사들이 노출될 수 밖에 없다.

포름알데히드는 눈, 코, 기관지 등에 염증을 일으키고, 호흡이 곤란해지고 심하게 눈물이 나며 코와 목에 타는 듯한 자극이 오고 기침을 일으키고, 또한 직업성 피부질환의 가장 흔한 원인으로서는 자극성 접촉성 피부염 및 알러지성 접촉성 피부염을 유발하고, 급성 노출 시에는 얼굴을 직접 자극하여 눈 주변의 부종을 일으킨다(Daisey 등 2003; Mendell과 Heath, 2005). VOCs의 대부분은 눈, 피부 및 호흡기 점막에 대한 자극증상과 함께 중

추신경계 억제증상인 마취작용을 일으킬 수 있으며, 골수에 직접 작용하여 조혈작용을 방해하기도 한다. 대표적인 물질로는 벤젠, 톨루엔, 크실렌 등이 있다(Cho 등, 2003).

실내공기 오염물질이 학생들의 인지기능 즉, 주의집중력, 단기기억력, 시각적 탐색능력에 미치는 영향에 관한 연구는 아직 국내에 보고 된 바 없으며 학교 교실 내 공기오염에 관한 기존의 연구들은 오염수치가 기준을 초과한 학교 분율을 다루거나, 냄새나 눈, 코따가움 등 학생들의 자극증상만을 다루었다(Korea University, 2005; Sohn 등, 2005; Yang 등, 2005). 이 연구는 신축학교의 실내공기 오염원인 포름알데히드와 VOCs를 측정하고, 이들이 학생들의 인지기능에 미치는 영향을 평가하기 위하여 수행되었다.

대상 및 방법

1. 연구 대상

2005년 2월 18일 완공을 하고 3월 1일에 개교한 대구시 일개 초등학교 5학년 2학급 71명을 실내공기 오염물질 노출군으로 하여 2005년 3월 18일 실내공기 오염물질 농도 측정 및 컴퓨터 신경행동검사를 실시하였고, 2005년 3월 25일 개교한지 12년째인 대구시의 일개 초등학교 5학년 2학급 63명을 대조군으로 하여 검사를 실시하였다. 신축학교 및 대조학교 모두 일반 주택지역에 위치하고 있었으며, 신축학교의 경우 벽면페인트는 친환경소재를 사용하였으나 그 밖의 천정과 바닥 마감재 및 의자와 책상, 사물함, 창틀은 친환경소재가 아니었다.

신축학교의 5학년 2학급 중 1학급은 의도적으로 창문

Table 1. Distribution of study subjects Unit : No. (%)

Schools	5 th grade		Total
	Male	Female	
Newly built			
Strong ventilation	16 (51.6)	15 (48.4)	31 (100.0)
Normal ventilation	17 (53.1)	15 (46.9)	32 (100.0)
Control	26 (52.0)	24 (48.0)	50 (100.0)
Total	59 (52.2)	54 (47.8)	113 (100.0)

을 개방하면서 수업을 진행하도록 하고, 다른 학급은 평소대로 사람의 출입이 있는 경우를 제외하고는 닫힌 상태로 수업을 진행하도록 하였다. 대조학교는 2학급 모두 평소대로 수업을 진행하도록 하였다.

대상학생들 중 주의력결핍과잉행동장애로 진단받은 아동, 정신지체아, 검사방법에 대한 이해도가 현저히 낮은 아동 등을 제외한 후 노출군 63명, 대조군 50명을 분석하였다(Table 1).

2. 연구방법

1) 실내공기 오염물질농도 측정

(1) 측정대상물질

실내공기 오염물질 중 검출빈도가 높은 포름알데히드와 아세트알데히드를 포함하는 6종의 카보닐 화합물(아크롤레인, 아세톤, 프로피온알데하이드, 메틸 에틸 케톤, 부틸알데하이드, 벤즈알데하이드)을 측정하였다. 카보닐 화합물의 정성·정량을 위해 Carbonyl-DNPH 혼합물(Supelco Inc., USA, 포름알데하이드 약 1.075 µg/ml 기준)를 희석하여 0.27 µg/ml의 농도를 사용하였다.

우리나라 실내공기질 공정시험법에 의하면 총휘발성 유기화합물(total volatile organic compounds, 이하 TVOCs)은 GC 크로마토그램에서 헥산에서 헥사데칸까지 검출되는 모든 물질 농도의 총 합으로 정의된다. TVOCs의 농도는 검출되는 미지의 물질을 개별적으로 정량하여 합산하는 대신 이들 물질들의 피크 면적을 먼저 정량하고, 그 합하여진 면적 값을 톨루엔의 상응농도(equivalent concentration)로 환산하여 계산한다. 본 연구에서는 TVOC 이외에도 신축 공동주택에서 다량 발생되고 인체에 대한 유해성이 입증된 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌(m-, p-, o-), 1,4-디클로로벤젠, 스티렌을 대상으로 농도를 측정하였다.

(2) 시료채취장치 및 방법

시료 채취는 대기공정시험법 및 미국 EPA TO-17 분석방법의 근본 원리와 특성에 준하는 동일한 방법을 채택하여 휘발성 유기화합물 현장시료 채취를 수행하였다. 모든 흡착관은 시료를 채취하기 직전에 앞서 언급한 전처리 과정을 통하여 불순물을 깨끗하게 탈착 시킨 후 운송 중의 최소한의 인위적인 오염을 막기 위해서 최종적으로 50 ml Vial에 swagelok Cap을 씌워서 각 측정지점별 시료채취에 사용하였다. 휘발성 유기화합물 현장시료채취는 휴대용 펌프(Double take sampler, SKC, USA)를 이용하여 흡착관을 연결한 후 약 200~250 ml/min의 유량으로 각각 30~40분 동안 채취 하였다. 시료 채취 시

흡착관을 통과하는 유량은 전자식 초미량 유량계(Ultraflow Electronic Calibrator, SKC Inc., USA)를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다. 채취된 공기량의 산출은 시료 채취 전·후의 유량 측정치를 각각 4회 이상 실시한 후 평균하여 실제 현장시료의 농도 결정 시에 적용하였다. 전·후 유량에 대한 상대표준편차는 2% 이내의 높은 재현성을 보여 펌프의 흡인유량은 시료 채취기간 동안 거의 변화가 없었다.

시료채취 시간은 신축학교는 2005년 3월 18일 오전 8시 30분에서 오후 3시 사이에, 대조학교는 2005년 3월 25일 오전 9시에서 오후 3시 사이에 시료를 채취하였다.

2) 인지기능 측정

(1) 인지기능 측정 항목

컴퓨터 신경행동검사(한국형 컴퓨터 신경행동검사®, ZNC soft, 대한민국)를 이용하여 주의집중력, 단기기억력, 시각적 탐색능력을 반영하는 부호숫자 짝짓기 검사(Symbol Digit substitution)를 실시하였다.

오염된 학교 교실의 실내공기는 학생들의 집중력, 기억력, 학습능력을 감소시킨다고 보고되고 있다(Mendell과 Heath, 2005). 집중력과 기억력 등의 인지기능을 측정하는 방법은 다양하나 신경행동검사는(neurobehavioral tests)는 중추신경계 기능을 민감하게 평가하는 검사로서 집중력과 기억력, 반응속도 등의 다양한 인지기능을 측정할 수 있다. 신경행동검사는 면접식과 컴퓨터를 이용한 검사로 나뉘는데 컴퓨터를 이용한 신경행동검사의 가장 큰 장점은 검사과정 즉 자극의 제시와 반응과정을 표준화할 수 있어 검사자와 검사과정에서 발생할 수 있는 오차와 편견을 줄일 수 있다.

이 연구에서 이용된 컴퓨터 신경행동검사는 부호숫자 짝짓기(symbol digit substitution)로서 시각적 검색(visual search), 단기기억력(short term memory), 지각-운동속도(perception-motor speed)를 측정하는 것으로 알려져 있다(Chung 등, 2003).

(2) 측정 방법

컴퓨터 신경행동검사는 각 학교의 전산실에 비치된 개인용 컴퓨터를 이용하여 학생 당 10분 동안 실시하였다. 컴퓨터 키보드에 대한 친숙도의 차이가 검사결과에 미치는 영향을 최소화하기 위하여 검사에 이용되는 키만을 갖춘 컴퓨터 신경행동검사용 키보드를 사용하였고, 컴퓨터 신경행동검사의 수행방법에 매우 숙달된 검사자 4인이 검사를 수행하였으며, 검사결과는 컴퓨터 신경행동검사의 해석에 경험이 많은 의사가 검토하였다.

검사자들은 사전에 작성된 검사방법의 설명요령을 이용

하여 모든 학생에게 동일한 방법으로 검사과정과 자극의 형태 및 키보드를 이용하여 자극에 반응하는 방법을 설명하였으며, 검사방법을 충분히 이해하지 못하는 학생에 한하여 검사자가 추가적인 설명을 하도록 하여 검사자와 피검사 사이의 대화를 규격화, 최소화하였다.

학습효과를 최소화하기 위해 충분한 연습을 시켰으며, 1 교시에 컴퓨터 신경행동검사를 실시하고 4 교시에 동일한 검사를 반복하여 실내공기오염물질에 노출 전후를 비교하였다. 학습효과와 피로효과의 영향을 보정하기 위해 대조학교를 선정하여 동일한 검사를 실시하고 동일한 방법으로 인지기능을 측정하였다. 검사가 이루어진 두 학교의 전산실은 학생들이 등교 전에 환기를 충분히 시켜 밤사이 배출된 실내공기 오염물질을 최대한 제거한 후 검사를 실시하였다.

컴퓨터 신경행동검사 중 부호숫자 짝짓기(Symbol Digit)는 화면의 상단에 임의로 짝지어진 부호와 1에서 9까지의 숫자가 나타나며 하단에는 상단과 다른 순서로 배열된 부호와 9 개의 빈 칸이 나타난다. 피검자는 상단에 예시된 부호와 숫자의 짝과 일치되게 숫자 키를 이용하여 하단의 빈칸에 숫자를 입력한다. 컴퓨터는 정답의 개수와 오답의 개수를 기록하고 각각의 부호와 숫자를 짝지어 입력하는 시간(reaction time, msec)을 천분의 일 초 단위로 측정한다. 처음 9회의 연습수행 후 90 회의 본 검사를 수행하였다. 신축학교와 대조학교의 컴퓨터 신경행동검사 상 1교시와 4교시의 반응시간의 차이는 paired t-test로 검정하였으며, 자료의 분석은 SPSS-PC+ (Ver 12.0)를 이용하였다.

3) 자각증상 조사

실내공기오염으로 나타날 수 있는 자각증상으로는 상기도자극증상, 점막자극증상, 하기도자극증상, 신경학적 증상, 피부자극증상 등이 있다. 이들 증상은 눈따가움, 코따가움, 목따가움, 코막힘, 머리아픔, 기침, 피부가려움, 메스꺼움 등으로 나타난다(Apte 등, 2000). 신축학교 및 대조학교의 학생들에게 위의 자극증상 유무를 조사하였으며 각 증상군과의 차이는 Chi-square test로 검정하였으며, 자료의 분석은 SPSS-PC+ (Ver 12.0)를 이용하였다.

결 과

1. 교실 내 포름알데히드농도와 TVOCs

신축학교에서 의도적으로 창문을 개방한 학급의 1교시 포름알데히드 농도는 $34.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에는 $27.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 창문을 개방하지 않은 학급에서는 1교시 $80.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교

시 $127.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 4교시에 학교보건법 시행규칙상 유지기준 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 대조학교의 포름알데히드 농도는 2학급 각각 1교시에 $12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 $19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

TVOC의 경우 신축학교의 의도적으로 창문을 개방한 학급에서는 1교시 농도는 $487.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 $428.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 창문을 개방하지 않은 학급에서는 1교시에 농도는 $1,283.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 $1,715.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 학교보건법 시행규칙상 TVOC 유지기준 $400 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 대조학교의 경우 2학급에서 각각 1교시에 농도는 $240.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $150.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 농도는 $371.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $448.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다(Table 2).

2. 인지기능의 변화

대조학급, 신축학교에서 창문을 의도적으로 개방한 학급과, 평소대로 수업한 학급 아동들의 주의집중력, 단기 기억력 및 시각적 탐색능력을 부호숫자 짝짓기의 반응시간(reaction time, msec, 천분의 일초)을 이용하여 비교하였다(Table 3).

부호숫자 짝짓기의 평균반응시간은 대조학급이 1교시에 2,585 msec에서 4교시에 2,459 msec으로 감소한 반면 신축학교에서 창문을 의도적으로 개방한 학급은 2,343 msec에서 2,510 msec으로, 평소대로 수업한 학급은 2,340 msec에서 2,563 msec으로 반응시간이 각각 167 msec, 223 msec 증가하였다. 1교시의 부호숫자 짝짓기의 반응시간을 100%로 했을 때 신축학교의 창문을 의도적으로 개방한 학급은 반응시간이 4교시에 5.9% 증가하였고($p < 0.01$), 평소대로 수업한 학급은 8.3% 증가하였다($p < 0.01$). 반면에 대조학급의 반응시간은 4교시에 5.0% 감소하였다($p < 0.01$). 부호숫자 짝짓기의 정답 수는 대조학급이 1교시에 87.9개 였으며 4교시에 88.0개였다. 신축학교에서 창문을 의도적으로 개방한 학급의 정답 수는 1교시에서 88.3개 4교시에 88.7개, 평소대로 수업한 학급은 1교시에 88.6개 4교시에 88.3개 로 3학급 모두에서 유의한 차이가 없었다.

3. 자각증상

눈따가움, 코따가움, 목따가움, 코막힘, 머리아픔, 기침, 피부가려움, 메스꺼움등에 관련된 자각증상 조사에서 신축학교의 경우 '코따가움'을 호소하는 학생이 71명 중 8명이었으며 대조학교에서는 63명 중 증상호소하는 학생은 없었다. 코막힘의 경우 신축학교는 29명이 '그렇다'고 응답하였으며 대조학교는 14명이 '그렇다'고 응답하여 코증상의 경우 두 학교 간에 유의한 차이가 있었다($p <$

Table 2. Concentration level of carbony compounds and VOCs between 1st class and 4th class in newly built and control schools Unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Schools		1 st class	4 th class	1 st class	4 th class
Newly built		Strong ventilation		Normal ventilation	
VOCs	Benzene	2.8	2.0	2.9	3.2
	Toluene	144.6	128.1	313.9	345.9
	Ethylbenzene	45.7	38.6	123.3	145.4
	m,p-Xylenes	121.6	102.3	319.7	357.5
	Styrene	5.9	4.0	11.9	18.5
	o-Xylene	24.7	20.5	68.1	80.7
	TVOC	487.2	428.2	1283.5	1715.4
Carbony compounds	Formaldehyde	34.6	27.3	80.2	127.1
	Acetaldehyde	17.9	6.5	19.9	19.6
	Acetone+Acrolein	33.6	18.9	43.0	54.1
	Propionaldehyde	19.0	4.4	16.6	10.2
	Methylethylketone	38.9	22.7	84.2	137.4
Control		Normal ventilation		Normal ventilation	
VOCs	Benzene	1.9	3.1	1.6	2.2
	Toluene	37.7	57.7	35.0	62.9
	Ethylbenzene	2.7	2.8	2.1	4.2
	m,p-Xylenes	4.3	5.3	3.5	7.8
	Styrene	0.4	0.9	0.8	1.1
	o-Xylene	1.4	1.9	1.2	3.1
	TVOC	240.9	371.9	150.8	448.0
Carbony compounds	Formaldehyde	12.6	19.8	7.5	25.2
	Acetaldehyde	5.7	13.3	6.5	13.9
	Acetone+Acrolein	17.8	30.8	15.2	36.0
	Propionaldehyde	7.7	25.3	9.5	24.2
	Methylethylketone	3.0	7.4	4.8	10.8

Note: 1,4-dichlorobenzene, butyraldehyde, and benzaldehyde were not detected in any samples.

Table 3. Neurobehavioral performance change of students between 1st and 4th classes in newly built and control school children

Schools	Reaction time (ms)		% change	p-value*	No. of correct answer		p-value*
	1 st class	4 th class			1 st class	4 th class	
Newly built							
Strong ventilation	2,343 ± 326	2,510 ± 391	5.9	0.000	88.3 ± 1.9	88.7 ± 1.4	0.385
Normal ventilation	2,340 ± 434	2,563 ± 462	8.3	0.004	88.6 ± 2.2	88.3 ± 2.0	0.644
Control	2,585 ± 494	2,459 ± 458	-5.0	0.001	87.9 ± 3.1	88.0 ± 3.3	0.924

Data were expressed in mean ± SD.

*paired t-test.

0.05). 눈따가움, 머리아픔, 기침, 피부가려움, 메스꺼움은 두 학교 간에 유의한 차이는 없었다(Table 4).

고 찰

최근 교육인적자원부 주관으로 전국 55개 유치원, 초·중·고교를 대상으로 학교 실내공기를 측정 평가한 자료

에 의하면 전체의 56.4%인 31곳에서 VOCs평균이 환경부 기준 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과한 것으로 나타났으며, 포름알데히드의 경우 환경부 기준 0.1 ppm을 초과하는 학교가 27.3%인 15곳이었다(Korea University, 2005). 전국의 11개 학교를 대상으로 실내공기질을 측정, 분석한 연구에서는 포름알데히드의 경우 11개 학교 중 4개 학교가 환경부 기준치 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였으며, TVOCs의

Table 4. Indoor air quality related symptom of students in newly built and control schools

Unit: No. (%)

Symptoms	Newly built school			Control school	p-value*
	Strong ventilation (n=31)	Normal ventilation (n=32)	Total (n=63)	Total (n=50)	
Irritated eye	2 (6.5)	7 (21.9)	9 (14.3)	3 (6.0)	0.132
Irritated nose	4 (12.9)	4 (12.5)	8 (12.7)	0 (-)	0.007
Sneezing	17 (54.8)	12 (37.5)	29 (46.0)	14 (28.0)	0.025
Sore throat	10 (32.2)	7 (21.9)	17 (27.0)	8 (16.0)	0.119
Headache	8 (25.8)	2 (6.3)	10 (15.9)	9 (18.0)	1.000
Coughing	10 (32.2)	9 (28.1)	19 (30.2)	13 (26.0)	0.314
Itchy skin	4 (12.9)	6 (18.8)	10 (15.9)	13 (26.0)	0.491
Nausea	3 (9.7)	6 (18.8)	9 (14.3)	6 (12.0)	0.587

Statistical significance were tested between total no. of symptom of two schools.

* Chi-square test.

경우 9개 학교가 기준치 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 것으로 나타났다(Sohn 등, 2005). 다른 전국의 초등학교 31개와 보육시설 13개의 건강영향평가 결과에서는 TVOCs에 대한 실내공기질관리법 상 기준(의료기관 및 보육시설 대상)인 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 곳은 조사대상 중 25%인 11곳이었으며, 알레르기피부염(아토피성 피부염)은 10년간 130% 증가하였다고 보고하였다(Inha University Hospital, 2005)

이 연구에서는 신축학교에서 창문을 개방하지 않은 학급에서 4교시 포름알데히드 농도가 127.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 학교보건법 시행규칙상 유지기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였으며, 신축학교의 의도적으로 창문을 개방한 학급에서는 1교시 TVOCs 농도는 487.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 428.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 창문을 개방하지 않은 학급에서는 1교시에 1,283.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 1,715.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 두 학급 모두 1교시부터 학교보건법 시행규칙상 TVOC 권고기준 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다. 신축학교의 경우 접착제를 사용한 건축 자재의 사용, 합판과 판지 및 페인트의 사용으로 인한 오염물이 다량 배출되었으리라 사료되며, 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌류의 경우 신축학교에서 TVOCs를 다량 방출하는 건축 자재, 실내가구의 칠, 코팅제 및 페인트의 사용에 의한 것으로 추정된다(Hodgson 등, 2002).

포름알데히드는 4~5년 이상 된 건물에서는 단열재인 건축 자재를 사용한 건물 자체에서의 발생이 거의 없다고 보고되고 있는데(Meyer와 Hermanns, 1985), 이 연구에서도 대조학교의 경우 2학급에서 각각 1교시에 농도는 240.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 150.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 농도는 371.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 448.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 4교시에 한 학급만이 초과하였다.

환기율의 저하, 공기 오염원의 발생 등의 실내공기질의 저하로 인한 학생들의 학업수행능력에 미치는 영향은 질병으로 인한 수업결손 및 학교 내에서 집중력, 계산, 기억 등을 필요로 하는 학습능력의 저하를 가져올 수

있다(Pilotto 등 1997; Myhrvold 등 1996; Rosen과 Richardson 1999; U.S. EPA 2003; Shendell 등, 2004; Wyon, 2004; Mendell과 Heath 2005). 실내공기 오염원 중의 하나인 NO₂에 노출된 388명의 아이들을 조사한 연구에서는 6시간동안 평균 40 ppb의 고노출군에서 목따가움, 상기도감염 등이 유의하게 증가하였으며, 결석률도 1.4%에서 2.4%로 유의하게 증가하였다(Pilotto 등, 1997). 5개 학교 22개 학급의 550명의 학생들을 대상으로 한 유럽의 연구에서는 환기율의 저하로 인한 교실 내 이산화탄소의 증가가 자극증상증가와 학생들의 집중력의 저하를 증가시켰는데, 교실 내 평균 CO₂ 농도는 집중력검사성과 유의한 음의 상관관계를 보였으며, CO₂ 농도가 0~999, 1,000~1,499, 1,500~4,000 ppm 으로 증가할수록 학업수행능력 평균지표는 감소하고, 또한 CO₂ 농도가 높을수록 신경증상 및 상기도 자극증상도 유의하게 증가한다고 보고하였다(Myhrvold 등, 1996).

이 연구에서도 창문을 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. 대조학교 학생들의 부호숫자 짝짓기 반응시간이 반복측정에 의한 학습효과 때문에 5% 빨라진 것을 고려하면 신축학교 학생들의 인지기능은 최대 13.3% 까지 감소할 수도 있다.

특히 오염원의 농도가 학교보건법 시행규칙상 유지기준을 초과하지 않는 신축학교의 창문을 개방한 학급 아동들에서도 주의집중력, 단기기억력 및 시각적 탐색능력이 대조군에 비해 유의하게 낮게 나타난 것은 기준치 이하의 오염수준에서도 건강영향이 충분히 나타날 수 있음을 의미한다.

신축학교의 실내공기 오염으로부터 아동들을 보호하기 위한 가장 근본적인 대책은 친환경소재를 사용하는 학교 시설과 장비를 갖추는 것이나 현실적인 어려움이 있으므로 신축학교를 준공한 후 충분한 시간이 경과한 다음 오염물질의 농도가 충분히 낮아졌을 때 개교하는 방안을 고려할 필요가 있다. 소아들은 성인에 비해 단위체중당 호흡량이 많고, 활동량이 많아 호흡이 깊으며, 키가 작아 공기보다 무거운 오염물질에 노출될 위험이 더 크고 아직 신경계 등 신체주요기관이 발달단계에 있어 오염물질의 생물학적 효과가 더 크므로(Landrigan, 1998; Faustman 등, 2000), 학교 및 유아원에 관한 실내공기질 권고기준은 성인에 비해 낮아야 한다.

이 연구에서는 최소한 2개 이상의 학교를 대상으로 하여 실험군과 대조군의 개체수를 충분히 확보하여야 하나 학교관계자들의 이해, 학부모의 우려, 학교수업의 손실 등 현실적으로 연구에 협조를 구하기가 매우 어려웠으며, 연구 수행 당시 주변 환경에 따른 영향을 배제하고 외기의 상태를 측정을 하지 않은 제한점이 있다. 하지만 본 연구로 새학교증후군에 대한 사람들의 관심과 문제 제기를 할 수 있다는데 의의를 둘 수 있으며 단순히 오염수치만을 측정하는 것이 아니라 학생들의 인지기능에 대한 객관적인 평가를 할 수 있었다.

향후 학교의 실내공기질의 안전성 평가는 샘플링 된 공기의 오염수준의 측정뿐만 아니라 학생들의 건강영향도 함께 고려되는 것이 바람직할 것이다. 건강영향은 자각증상과 주의집중력 등 인지기능으로 평가 할 수 있으나, 어린 아동들의 경우 자각증상 표현 능력이 한계가 있으므로 보다 객관적인 검사를 이용하는 것이 바람직할 것이다.

요 약

목적: 신축초등학교와 대조학교를 선정하여 교실 내 포름알데히드와 TVOCs를 측정하고 컴퓨터 신경행동검사를 이용하여 실내공기 오염물질이 학생들의 인지기능에 미치는 영향을 평가하였다.

방법: 신축초등학교 5학년 71명을 실내공기 오염물질 노출군으로 하고, 개교한지 12년째인 대구시의 일개 초등학교 5학년 2학년 63명을 대조군으로 하여 실내공기 오염물질농도 측정 및 컴퓨터 신경행동검사를 실시하였다.

결과: 신축학교에서 의도적으로 창문을 개방한 학급에서 1교시 포름알데히드 농도는 $34.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에는 $27.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 창문을 개방하지 않은 학급에서 1교시 $80.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시 $127.1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대조학교에서는 2학년 각각 1교시에 $12.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $7.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 $19.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $25.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다. TVOCs의 경우 신축학교의 의도적으로 창문을 개방한 학급에서 1교시에 농도는 $487.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4

교시에 $428.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 창문을 개방하지 않은 학급에서 1교시에 농도는 $1,283.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 $1,715.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 대조학교의 경우 2학년에서 각각 1교시에 농도는 $240.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $150.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 4교시에 농도는 $371.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $448.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

부호숫자 짝짓기의 평균반응시간은 대조학급이 1교시에 2,585 msec에서 4교시에 2,459 msec으로 감소한 반면 신축학교의 창문을 의도적으로 개방한 학급은 2,343 msec에서 2,510 msec으로, 평소대로 수업한 학급은 2,340 msec에서 2,563 msec으로 반응시간이 각각 167 msec, 223 msec 증가하였다. 1교시의 부호숫자 짝짓기의 반응시간을 100%로 했을 때 창문을 의도적으로 개방한 학급은 4교시에 5.9% 증가하였고($p < 0.01$), 평소대로 수업한 학급은 8.3% 증가하였다($p < 0.01$). 반면에 대조학급은 4교시에 5.0% 감소하였다($p < 0.01$).

결론: 향후 학교의 실내공기질의 안전성 평가는 샘플링 된 공기의 오염수준의 측정뿐만 아니라 학생들의 건강영향도 함께 고려되는 것이 바람직할 것이다.

참고문헌

- Apte MG, Fisk WJ, Daisey JM. Associations between indoor CO₂ concentrations and sick building syndrome symptoms in U.S. office buildings: an analysis of the 1994-1996 BASE study data. *Indoor Air* 2000;10(4):246-57.
- Bartlett KH, Kennedy SM, Brauer M, Dill B, van Netten C. Predictors of exposure to indoor CO₂ and bioaerosols in elementary school classrooms. *Indoor Air* 1999;1:252-7.
- Bayer CW, Crow SA, Fischer J. Causes of indoor air quality problems in schools: summary of science research. SEMCO Inc. Columbia. 2000. pp 1-41.
- Cho KS, Gu JW, Kim KA, Kim HW, Kim HA, Noh YM, Maeng KW, Park JI, Lee KS, Lee SH, Lee SH, Lee WC, Lim Y, Lim HW, Jung MH, Jung CK. *The Occupational Environmental Health*, 3rd edition. Institute of Industrial Medicine Catholic Industrial Medical Center. Seoul. 2003. pp 277-92.
- Chung JH, Sakong J, Kang PS, Kim CY, Lee KS, Jeon MJ, Sung NJ, Ahn SH, Won KC. Cross-cultural comparison of neurobehavioral performance in Asian workers. *Neurotoxicology* 2003;24(4-5):533-40.
- Daisey JM, Angell WJ, Apte MG. Indoor air quality, ventilation and health symptoms in schools: an analysis of existing information. *Indoor Air* 2003;13(1):53-64.
- Faustman EM, Silbernagel SM, Fenske RA, Burbacher TM, Ponce RA. Mechanisms underlying children susceptibility to environmental toxicants. *Environ Health Perspect* 2000;108(Suppl.1):13-21.
- Hodgson AT, Beal D, McIlvaine JE. Source of formaldehyde,

- other aldehyde and terpenes in a new manufactured house. *Indoor Air* 2002;12(4):235-42.
- Inha University Hospital. The Association between Asthma and Allergy Related Disease and VOC Level of Elementary Schools and Daycare Centers. Korea Democratic Labor Party. Seoul. 2005. pp 1-180. (translated by Kim DS)
- Korea University. Midterm Report on Environmental Assessment of School Buildings. Research Center for Environmental Health. Seoul. 2005. pp 1-110. (translated by Kim DS)
- Lagercrantz L, Wistrand M, Willen U, Wargocki P, Witterseh T, Sundell J. Negative impact of air pollution on productivity: previous Danish findings repeated in new Swedish test room. *Proceedings of Healthy Buildings 2000*;1:653-8.
- Landrigan PJ. Environmental hazards for children in USA. *Int J Occup Med Environ Health* 1998;11(2):189-94.
- Mendell MJ, Fisk WJ, Petersen MR, Hines CJ, Dong M, Faulkner D, Deddens JA, Ruder AM, Sullivan D, Boeniger MF. Indoor particles and symptoms among office workers: results from a double-blind cross-over study. *Epidemiology* 2002;13(3):296-304.
- Mendell MJ, Heath GA. Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air* 2005;15(1):27-52.
- Meyer B, Hermanns K. Reducing indoor air formaldehyde concentrations. *J Air Pollut Control Assoc* 1985;35(8):816-21.
- Myhrvold AN, Olsen E, Lauridsen O. Indoor environment in schools-pupils health and performance in regard to CO₂ concentrations. *Indoor Air* 1996;4:369-74.
- Pilotto LS, Douglas RM, Attewell RG, Wilson SR. Respiratory effects associated with indoor nitrogen dioxide exposure in children. *Int J Epidemiol* 1997;26(4):788-96.
- Rosen KG, Richardson G. Would removing indoor air particulates in children's environments reduce rate of absenteeism a hypothesis. *Sci Total Environ* 1999;234(1-3):87-93.
- Shendell DG, Prill R, Fisk WJ, Apte MG, Blake D, Faulkner D. Associations between classroom CO₂ concentrations and student attendance in Washington and Idaho. *Indoor Air* 2004;14(5):333-41.
- Sohn JR, Byeon SH, Kim YW, Kim JH, Cho YS, Lee JY, Park YJ. Assessment of conscious cognition degree and survey on the indoor air quality at a public at a public school in Seoul. *Korean J Sanitation* 2003;18(3):101-10. (Korean)
- Sohn JR, Yoon SU, Kim JH, Lee YS, Choi HY, Kim YS, Son BS, Yang WH, Kim MH. The assessment and recognition on indoor air quality at schools in Korea. *Korean J Sanitation* 2005;20(3):1-9. (Korean)
- U.S EPA. Indoor Air Quality and student performance. Available: http://www.epa.gov/iaq/schools/pdfs/publications/iaq_and_student_performance.pdf[cited August 2003].
- Wargocki P, Wyon DP, Baik YK, Clausen G, Fanger PO. Perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity in an office with two different pollution loads. *Indoor Air* 1999;9(3):165-79.
- Wargocki P, Wyon DP, Sundell J, Clausen G, Fanger PO. The effects of outdoor air supply rate in an office on perceived air quality, sick building syndrome (SBS) symptoms and productivity. *Indoor Air* 2000;10(4):222-36.
- Wargocki P, Wyon DP, Fanger PO. The performance and subjective responses of call-center operators with new and used supply air filters at two outdoor air supply rates. *Indoor Air* 2004;14:7-16.
- Wyon DP. The effects of indoor air quality on performance and productivity. *Indoor Air* 2004;14:92-101.
- Yang WH, Byeon JC, Kim YH, Kim DW, Son BS, Lee JE. Assessment of indoor air quality of classroom in school by means of source generation-case study. *Journal of the Environmental Sciences* 2005;14(10):979-83. (Korean)