

울산지역 학교의 실내공기질 평가

정종현* · 서보순** · 주동진*** · 박만철**** · 손병현***** · 피영규†

대구한의대학교 보건학부, *서라벌대학 보건의료행정과, **울산시교육청 평생교육체육과,
부산대학교 사회환경시스템공학과, *삼성테크윈(주) 환경안전그룹 보건환경연구센터,
*****한서대학교 환경공학과

(2010. 11. 2. 접수/2010. 12. 12. 수정/2010. 12. 28. 채택)

Assessment of the Indoor Air Quality at Schools in Ulsan

Jong-Hyeon Jung* · Bo-Sun Seo** · Dong-Jin Ju*** · Man-Chul Park**** ·

Byung-Hyun Shon***** · Young Gyu Phee†

Faculty of Health Science, Daegu Haany University

**Department of Health and Medical Administration, Sorabol College*

***Department of School Health & Mill, Ulsan Metropolitan Office of Education*

****Department of Environmental Engineering, Busan National University*

*****Research Center for Occupational Health & Environmental, Environmental & Safety Group,
Samsung Techwin Co., Ltd.*

******Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

(Received November 2, 2010/Revised December 12, 2010/Accepted December 28, 2010)

ABSTRACT

The purpose of this study was to investigate the concentration of indoor air pollutants at 63 elementary schools, 41 middle schools and 51 high schools in Ulsan from the beginning of May to the end of December, 2008. To assess the indoor air quality of the various classrooms, the 8 indoor air pollutants such as CO₂, CO, NO₂, O₃, PM₁₀, TVOCs, HCHO and TBC were measured and analyzed. The mean concentrations of PM₁₀ and TBC in the elementary schools were significantly higher than those of middle and high schools ($p < 0.01$). For the HCHO, the multi-use practice rooms showed an average 1.5 times higher than general classrooms. In schools located in urban areas, the concentrations of CO, O₃, PM₁₀, HCHO and TBC were lower than in the vicinity of industrial complexes. The exceeding rate of the school air quality maintenance limits in the 6 air pollutants by law were 6.7%, 3.5%, 1.7%, 18.2%, 13.0% and 18.4% for CO₂, NO₂, O₃, PM₁₀, HCHO and TBC, respectively. Based on these results PM₁₀ and TBC have to be in the order of priority of need to improve the classroom air quality in elementary school of Ulsan.

Keywords: school, indoor air pollutant, indoor air quality

I. 서 론

실내환경은 대기환경과는 달리 물리적, 화학적 및 생물학적으로 매우 다양한 오염물질 등이 존재하고 체류할 가능성이 있다는 점에서 대기환경과 차별성을 가진다. 이러한 오염물질들은 복합적인 배출원에서 기인되며 그 배출량은 물질에 따라 상당한 편차가 있을 뿐만 아니라, 오염물질의 농도분포 역시 시간적, 공간적 특

성에 따라 다양하게 나타날 수 있다.¹⁾ 학교의 실내공기 오염에 영향을 주는 물질로는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 포름알데히드(HCHO), 다환성방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 환경성담배연기(Environmental Tobacco Smoke, ETS), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO₂), 이산화질소(NO₂), 이산화황(SO₂), 오존(O₃), 미세먼지(PM₁₀)와 초미세먼지(PM_{2.5}) 등의 입자상 물질(Particulate matter), 라돈(Radon) 및 진드기 등이 있다.^{2,3)}

이러한 원인물질들은 학생들에게 기침, 천식 악화, 폐기능 감소 등을 유발할 수 있고, 이산화질소와 초미세먼지는 급성기관지염과 폐렴으로 병원 입원을 증가시

†Corresponding author : Faculty of Health Science, Daegu Haany University
Tel: 82-53-819-1590, Fax: 82-53-819-1412
E-mail : yphee@dhu.ac.kr

키며,^{4,5)} 곰팡이, 진드기, 먼지 및 포름알데히드는 아토피와 천식 유발도 가능하다.⁶⁾ 또한 휘발성유기화합물은 두통, 집중 저하 등의 신경학적 증상을 야기⁷⁾시키며 플라스틱 재질의 벽에서 방출되는 휘발성유기화합물로 알려진 페포염도 보고된 바 있고 특히, 환기량이 적은 교실의 경우 기침, 독감, 목의 통증 등의 기도 감염이 유발되는 등 학교 내 오염물질로 인해 다양한 건강상의 영향이 보고되고 있다.⁸⁾ 또한, 성장기에 있는 학생들의 경우 열악한 실내공기질은 질병뿐만 아니라 결석과 학업능률과도 연계되어 있다.⁹⁾ 따라서 학교 교실 내 적절한 환기량과 사용된 자재의 재질 등이 학생들의 건강에 상당한 영향을 미치고 있다는 것을 알 수 있다.

우리나라는 전통적인 교육열로 인하여 하루 중 대부분의 시간을 학교 내에서 생활하고 있어 교실의 실내공기질 관리는 매우 중요한 문제이다.¹⁰⁾ 이에 우리나라 교육과학기술부에서는 학교보건법에 교사 안에서의 공기의 질에 대한 유지·관리기준을 설정하여 관리하고 있다.¹¹⁾ 이러한 이유로 학교 실내공기질 노출평가와 관련된 연구가 다양하게 이루어졌으나, 그 대상이 초등학교로 한정되었거나 또는 일부 학교만을 대상으로 하였고 특정 지역에 국한되어 수행된 바 있다.¹²⁻¹⁴⁾ 울산광역시에는 121개의 초등학교, 61개 중학교 및 51개의 고등학교가 있으며 학생 수는 각각 90,604명, 53,697명 및 52,219명으로 약 20만명에 육박한다. 특히, 초등학교, 중학교 및 고등학교로 올라갈수록 학교 등에서 보내는 시간이 유의하게 증가되며 이러한 활동양상은 유해인자 노출과 밀접한 연관성을 가지고 있다. 또한 울산은 강북권역에 자동차부품업종이 산업단지로 구성되어 있고 강남권역을 포함한 일부 지역은 울산, 미포 및 온산공단 등이 밀집되어 있는 등 지역적 특이성으로 교실의 공기오염에 간접적인 영향이 있을 수 있다.¹⁵⁻²⁰⁾ 따라서 본 연구는 울산지역에 위치한 학교의 교실에서 발생하는 실내공기오염물질을 학교 등급 및 지역적으로 구분하여 조사하고, 실내공기오염물질 농도에 영향을 미치는 요인을 파악함으로써 향후 학교 내 공기오염물질의 저감 및 공기질의 개선을 위한 방안을 마련할 수 있는 기초자료를 확보하고자 한다.

II. 연구방법

1. 연구대상

본 연구는 2008년 5월에서 12월까지 울산지역의 63개 초등학교, 41개 중학교 및 51개 고등학교 교실을 대상으로 물리적 환경인 온도 및 상대습도 수준과 교실 안에서의 공기의 질에 대한 유지·관리기준에 해당

하는 오염물질인 이산화탄소, 일산화탄소, 이산화질소, 오존, 미세먼지, 총휘발성유기화합물, 포름알데히드 및 총부유세균에 대한 농도를 측정하였다. 한편, 학교 내 일반교실과 과학실, 음악실 및 어학실 등과 같은 특별실의 실내오염 정도를 비교하기 위하여 다양한 특별활동실에 대한 측정도 수행하였다.

2. 연구방법

학교보건법에서 제시하고 있는 8가지 오염물질의 포집 및 분석은 환경부의 실내공기질 공정시험법을 가급적 준용하였다. 일산화탄소는 CO analyzer(API300, USA)를 활용하였고, 이산화탄소는 비분산 적외선분석법이 적용된 Airboxx(KD Engineering, Canada)를 이용하여 측정하였다. 이산화질소는 화학발광법을 이용한 NOx analyzer(API200, USA)를 활용하였고 오존은 Ozone analyzer(API450, USA)를 사용하였다. 미세먼지는 분진측정기(LD-3B, SIBATA, Japan)를 이용하였으며 매 측정 전 zero 필터로 보정하였고 환기를 실시하고 청소를 하는 등 먼지발생을 최소화하였다. 한편, 포름알데히드에 대한 공기 중 농도는 현장에서 측정이 가능한 Z300XP(Environmental sensor, USA)를 이용하였고 총휘발성유기화합물은 고체흡착관인 Tenax-Tube(Supelco, USA)로 포집하여 열탈착기와 가스크로마토그래피(GC/MS, HP 6890, USA)로 분석하였다. 총부유세균은 미생물 채취기인 Single Stage Air Cascade Sampler(Tisch Environmental Inv. TE-10-880)와 BAP(Blood Agar Plate) 배지를 이용하여 채취하였고 37°C에서 48시간 인큐베이터(Incubator)에서 배양 시킨 후 집락을 계산하여 정량적 평가를 실시하였다. 모든 실내오염물질은 2회 이상 측정을 원칙으로 하였고 각각의 결과는 Sapiro Wilk 검정결과 정규분포를 보이는 물질이 많아 대표 값으로 산술평균을 사용하였다.²¹⁻²³⁾

시료의 채취는 교실 및 특별실에서 수업이 진행되는 동안 실시하였으며, 오전과 오후 각 1시간 동안 시료를 채취하였다. 또한, Tenax-tube의 경우 현장마탕시료를 활용하여 보정하였고 정확도 확보를 위하여 표준물질을 3회 분석하여 회수율을 파악하였으며 그 범위는 87~109%로 양호하였다. 한편, 오존, 이산화탄소, 일산화탄소, 포름알데히드 및 이산화질소 측정을 위한 직독식 장비는 사용 전 제로가스(Zero gas)를 설정된 유량으로 흐르게 하고 표시값이 안정된 후에 제로 조정 후 사용하였다. 자료의 분석은 SAS 9.1 통계프로그램(SAS Institute Inc., Cary, NC, USA)을 사용하였으며 학교 등급 및 지역별 오염물질 농도의 비교는 기본적으로 일원분산분석을 수행하였고 통계량을 0.05의 유의수준으

로 Duncan의 사후검정도 실시하였다. 또한, 교실특성별 오염물질농도의 비교는 Student t-test를 사용하였고 실내오염물질별 상관성 여부를 파악하기 위하여 Pearson 상관분석을 실시하였으며, 각 실내오염물질에 영향을 미치는 인자를 파악하기 위하여 중회귀분석의 단계선택(Stepwise)을 활용하여 최적을 모델을 산출하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 학교 등급별 온·습도

총 155개 울산지역 학교의 평균 온도는 23.4°C으로 학교보건법에서 규정하고 있는 18~28°C의 조절기준을 대부분 만족하였고 초, 중, 고등학교별 평균온도의 차이는 통계적으로 유의하지 않았으며, Table 1에 자세한 학교 등급별 온도 및 습도 측정치를 나타내었다. 전체 평균습도는 47.6%로 나타났으며 학교 등급별로는 중학교가 초등학교와 고등학교에 비하여 통계적으로 유의하게 높게 평균습도를 보였지만 학교보건법의 30~80%

의 습도 조절기준은 충족하고 있었다.¹¹⁾ 이는 Jung 등¹⁸⁾의 연구결과 19.1~21.5°C에 비해 다소 높은 수준이었으나, 조사대상이 평균온도가 울산보다 낮은 서울 및 충청권의 학교이기 때문인 것으로 판단된다.

2. 학교등급별 실내오염물질의 농도

Table 2에서는 울산지역 초등학교, 중학교 및 고등학교 교실의 실내 오염물질의 농도를 나타내었다. 이산화탄소의 평균농도는 각각 645.5, 628.4 및 704.3 ppm으로 초등학교 및 중학교에 비해 고등학교 교실이 통계적으로 유의하게 높은 수준을 보였다($p < 0.05$). Sohn 등¹⁰⁾의 연구에서는 초, 중, 고교 중에서 중학교의 이산화탄소 농도가 가장 높은 것으로 조사된 결과와는 다소 다른 양상을 보이고 있으나 이는 지역적 특성 등에 따라 차이가 발생된 것으로 추측된다. 학교보건법에 의한 이산화탄소의 유지기준은 1,000 ppm이며 초등학교 3.7%, 중학교는 4.9%의 유지기준 초과율을 보였으나 고등학교의 경우 18개 교실에서 기준이 초과되어

Table 1. Levels of temperature and humidity by academic grade

School	N*	Temperature (°C)		Relative humidity (%)	
		Mean ± S.D.*	Range	Mean ± S.D.	Range
Elementary	187	23.08 ± 3.30	15.69~28.88	47.47 ± 9.70 ^b	19.72~68.01
Middle	123	23.82 ± 3.17	15.94~29.83	50.93 ± 11.56 ^a	28.95~71.25
High	151	23.51 ± 3.18	14.13~29.71	45.16 ± 11.87 ^b	20.63~71.45
Total	461	23.41 ± 3.23	14.13~29.83	47.64 ± 11.15	19.72~71.45

*N : Number of samples.

*S.D : Standard deviation.

*a, b : Group with the same letters were not significantly different by Duncan test ($\alpha = 0.05$).

Table 2. Concentrations of indoor air pollutants by academic grade

Contents	Elementary (N [*] = 187)			Middle (N = 123)			High (N = 151)			p-value
	Mean ± S.D.*	Range	ER (%)	Mean±S.D	Range	ER (%)	Mean±S.D	Range	ER (%)	
CO ₂ (ppm)	645.5±183.3 ^b	380.0~1460.0	3.7	628.4±192.4 ^b	350.0~1266.8	4.9	704.3±284.0 ^a	323.0~2499.4	11.9	0.011*
CO (ppm)	1.44±1.58 ^a	0.05~9.23	0.0	1.04±1.32 ^b	0.05~7.97	0.0	1.3±1.3 ^{ab}	0.05~5.6	0.0	0.058
NO ₂ (ppm)	0.003±0.01 ^b	0.0~0.08	2.1	0.01±0.2 ^{ab}	0.0~0.16	3.3	0.01±0.1 ^a	0.0~0.7	5.3	0.050*
O ₃ (ppm)	0.01±0.01 ^b	0.001~0.10	1.6	0.01±0.1 ^{ab}	0.001~0.12	2.4	0.02±0.1 ^a	0.001~0.1	1.3	0.062
PM ₁₀ (µg/m ³)	69.1±37.5	0.17~170.0	21.9	67.0±39.2	8.5~219.1	14.6	62.8±36.2	7.1~191.3	16.6	0.299
TVOCs (µg/m ³)	248.8±107.7	81.0~370.0	0.0	265.2±75.7	156.3~344.9	0.0	241.0±75.5	128.3~370.5	0.0	0.770
HCHO (µg/m ³)	60.3±52.8 ^{ab}	0.0~301.7	12.8	77.0±142.1 ^a	0.0~1208.0	17.9	44.9±87.7 ^b	0.0~998.5	9.3	0.023*
TBC ^c (CFU/m ³)	678.4±549.7 ^a	10.0~2628.0	28.9	481.0±432.2 ^b	20.0~1752.0	13.0	333.9±311.4 ^c	19.0~1448.5	9.9	0.001**

*N : Number of samples.

*a, b, c : Group with the same letters were not significantly different by Duncan test ($\alpha = 0.05$).

*ER(Exceed rate) : (No. of classroom over maintenance limit/No. of classroom)×100.

*p-value<0.05, **p-value<0.01.

11.9%의 가장 높은 초과율을 보였다. Lee와 Chang¹⁶⁾의 연구결과에 의하면 홍콩 교실의 이산화탄소가 공조장치와 천장 송풍기가 있는 경우에도 1,000 ppm을 초과한다는 보고를 감안할 때 고등학교의 경우 환기를 자주하고 적절한 공조장치의 설치도 고려할 필요가 있다.²¹⁻²³⁾

일산화탄소는 모든 학교에서 유지기준이 초과되지 않았으며, 이산화질소의 경우 Duncan의 사후 검정결과 중학교(0.01 ppm)에 비해서 초등학교(0.003 ppm)는 낮은 수준을 보였고, 고등학교(0.01 ppm)는 통계적으로 유의하게 높은 결과를 보였다($p < 0.05$). 이산화질소의 최고농도는 0.7 ppm으로 학교보건법의 유지기준 0.05 ppm의 14배 초과하는 경우도 있었고 총 16개의 교실에서 기준이 초과되었다. Roosbroeck 등¹⁷⁾에 의하면 이산화질소의 경우 학교가 도로변에 있거나 주변에 유해물질 배출 사업단지가 있는 경우 영향을 받을 수 있어 보다 세부적인 조사가 필요한 것으로 보인다. 오존은 유지기준이 0.06 ppm이며 초등학교 및 중학교는 평균 0.01 ppm이었고 고등학교의 경우 중학교에 비하여 통계적으로 유의하게 높은 0.02 ppm의 농도를 보였으나, 유지기준 초과율은 중학교 교실이 2.4%로 가장 높게 나타났다.

미세먼지의 평균농도는 초등학교 69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 중학교 67.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 고등학교 62.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 활동량이 많은 초등학교에서 가장 높은 농도를 보였으나 통계적인 유의성은 없었다. 이는 Cho 등²⁴⁾의 연구에서 미세먼지 평균농도가 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Sohn 등¹⁰⁾은 평균 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하여 울산지역은 이의 중간수준에 해당한다. 또한 유지기준 초과율도 초등학교가 21.9%로 중학교(14.6%)와 고등학교(16.6%)에 비해서 상당히 높게 나타났다. 미세먼지는 학생들에게 호흡기 장애, 천식 등의 질환을 유발할 수 있으며 특히, 활동량이 많은 초등학교는 유지기준을 초과하는 경우가 가장 많아 자주 물청소를 실시하고 환기 횟수를 늘이는 방안이 필요하다고 판단된다.

유지기준이 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 설정된 포름알데히드는 중학교 교실의 평균농도가 77.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 고등학교(44.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 초등학교(60.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높게 나타났다. 이는 Jung 등¹⁸⁾이 학원시설을 대상으로 연구한 결과 28.3~66.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 다소 높은 수준을 보였다. 특히, 포름알데히드의 경우 총 460개의 학급 중 60개의 학급에서 유지기준을 초과하고 있었고 유지기준을 2배 초과하는 학급도 13곳으로 나타나 대책마련이 시급한 것으로 생각된다. 포름알데히드의 경우 측정기 Z300XP는 온도 및 습도에 민감하기 때문에 현장에서

과대평가할 가능성이 있다. 그러나 본 연구에서 온도 및 습도는 측정 계절에 따른 차이는 있을 수 있으나 측정기에 대한 영향은 그다지 크지 않은 것으로 판단된다. 선행 연구결과인 Yang 등¹⁹⁾에 의하면 포름알데히드의 주요 노출원은 건축자재, 마감재, 책상 및 의자이며 포름알데히드의 방출이 적은 자재를 선택하는 것도 중요한 요인으로 작용된다. 특히, 울산지역 교육기관에서 포름알데히드의 조사결과, 의자 및 비품을 다량 구매한 학교에서 포름알데히드의 농도가 일부 초과되었으며 1개 학교는 유지기준을 10배 초과하는 것으로 나타났다. 따라서 책·걸상 및 교육기자재와 비품 등은 가능하다면 구입 시 포름알데히드 및 휘발성유기화합물 저감처리가 되었거나 또는 친환경 재료를 구입하여 교육기관에 설치하는 것이 바람직 할 것으로 판단된다. 또한, 외부에서 휘발성유기화합물 및 기타 오염물질 등을 충분히 방출시킨 후 교육기관에 설치하는 등 대책마련도 필요한 것으로 보인다. 반면, 본 조사결과 총휘발성유기화합물은 학교 등급별로 약 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 평균농도를 보이며 유지기준인 400 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하는 학교도 없어 큰 문제는 없는 것으로 판단되었다.

이와 함께 총부유세균의 농도는 초등학교 교실에서 평균 678.4 CFU/ m^3 로 고등학교(333.9 CFU/ m^3)에 비해 통계적으로 유의하게 높은 수준을 보였다($p < 0.05$). 이는 초등학교의 총부유세균의 농도가 가장 높은 수준이라는 Cho 등²⁴⁾의 연구결과와 유사하였다. 또한, 총 461개의 학급 중 85개 학급에서 총부유세균의 유지기준인 800 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하여 오염물질 중 가장 높은 기준 초과율을 보였으며, 학교 등급별로는 초등학교 교실의 28.9%가 유지기준을 초과하여 중학교 13.0%, 고등학교 9.9%에 비해 상당히 높은 초과율을 보였다. 부유세균의 경우 아이들의 활동성과 의복 등에 의한 것으로 초등학교 학생들의 활동성과 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있다.¹⁰⁾

3. 교실 사용용도에 따른 유해물질의 농도

Table 3에서는 울산지역의 초, 중, 고등학교를 일반교실과 과학실, 음악실, 도서실 등의 특별교실로 구분하여 오염물질 농도를 비교하여 나타내었다. 이산화탄소는 학생들이 상시 상주하는 교실의 평균농도가 704.5 ppm으로 특별실(571.3 ppm)보다 통계적으로 유의하게 높게 나타났으며 유지기준 초과율도 일반교실이 8.5%로 특별실에 비해 높게 나타났다($p < 0.01$). 일산화탄소의 경우 역시 일반교실에서 평균 1.39 ppm으로 특별실(1.1 ppm) 보다 유의하게 높은 수준을 보였으나 유지기준을 초과하는 교실은 없었다. 이산화질소 및 오존

Table 3. Concentrations of indoor air pollutants by classroom

Contents	General classroom (N ^a = 308)			Specific classroom (N = 153)			p-value
	Mean±S.D	Range	ER (%)	Mean±S.D	Range	ER (%)	
CO ₂ (ppm)	704.5±215.6	323.0~1,700.0	8.50	571.3±218.4	350.0~2,499.4	3.27	0.001**
CO (ppm)	1.39±1.5	0.05~8.59	0.00	1.1±1.2	0.05~9.2	0.00	0.016*
NO ₂ (ppm)	0.006±0.02	0.001~0.1	3.26	0.01±0.06	0.001~0.7	3.92	0.289
O ₃ (ppm)	0.01±0.02	0.001~0.1	1.95	0.02±0.01	0.001~0.1	1.31	0.502
PM ₁₀ (μg/m ³)	71.4±38.8	0.4~219.1	23.1	56.5±33.0	0.2~149.7	8.50	0.001**
TVOCs (μg/m ³)	256.6±80.7	81.0~370.0	0.00	225.4±83.8	128.3~370.5	0.00	0.401
HCHO (μg/m ³)	50.7±69.1	0.0~748.7	10.4	77.1±131.8	0.0~1208.0	18.3	0.023*
TBC (CFU/m ³)	593.9±489.7	10.0~2628.0	23.8	346.5±392.5	21.0~2628.0	7.8	0.001**

*N : Number of samples.

*Comparisons between group by student's t-test.

*p-value < 0.05, **p-value < 0.01.

은 특별실이 각각 평균 0.01과 0.02 ppm으로 일반교실에 비하여 높은 수준을 보였고 이산화질소는 약 3% 이상, 오존의 경우 약 2%의 유지기준 초과율을 보였다. 이는 Sohn 등¹⁰⁾과 Cho 등²⁴⁾의 연구결과 이산화탄소, 일산화탄소 등의 농도가 일반교실에 비해 특별교실이 더 높다는 결과와 유사하였다.

미세먼지 역시 학생들의 활동이 상시 이루어지는 일반교실이 평균 71.4 μg/m³로 평균 56.5 μg/m³의 특별실에 비해서 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보였다 (p < 0.01). 유지기준 초과율은 일반교실이 23.1%로 높게 나타나 학생들의 호흡기 보호를 위하여 수시로 물청소를 하거나 교실입구에 dust mat를 설치하는 등 감소시킬 수 있는 방안이 요구된다. 한편, 총휘발성유기화합물의 경우 두 교실이 평균 250 ppm 수준을 보였으나 포름알데히드의 경우 특별실이 평균 77.1 μg/m³로 일반교실 50.7 μg/m³에 비해 통계적으로 유의하게 높은

결과를 보였다(p < 0.05). 특히, 새로운 가구 등이 배치될 수 있는 특별실의 경우 유지기준 초과율이 18.3%로 나타나 적절한 관리가 필요한 것으로 보인다. 이는 Jeung과 Choi²⁴⁾의 연구결과 특별실이 일반교실보다 2.8배 높다는 수준까지는 아니었으나 호흡곤란 등의 영향을 줄 수 있는 포름알데히드 농도를 낮추기 위해서 포름알데히드 방출이 적은 건축내장재와 가구를 사용하는 것이 권장된다. 총부유세균도 미세먼지와 이산화탄소와 같이 활동이 많은 일반교실에서 평균 593.9 CFU/m³로 특별실 346.5 CFU/m³에 비해 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보였고 일반교실의 경우 유지기준 초과율이 23.8%로 나타났다.

4. 울산 지역구분에 따른 실내오염물질의 농도비교
울산지역의 학교를 대화강의 중심으로 강남권역 및 강북권역으로 분류하고 도심지역에 위치한 학교를 중

Table 4. Concentrations of indoor air pollutants by different area

Contents	Center (N ^a = 39/14)			South of a river (N = 205/68)			North of a river (N = 217/73)			p-value
	Mean±S.D	Range	ER (%)	Mean±S.D	Range	ER (%)	Mean±S.D	Range	ER (%)	
CO ₂ (ppm)	596.9±243.5 ^b	350.0~1460.0	10.3	699.6±263.0 ^a	323.0~2499.4	3.9	634.3±171.2 ^{a,b}	388.7~1512.0	8.8	0.002
CO (ppm)	0.2±0.5 ^c	0.05~2.2	0.0	0.1±1.1 ^b	0.05~7.22	0.0	1.8±1.6 ^a	0.05~9.2	0.0	0.001
NO ₂ (ppm)	0.002±0.01	0.001~0.08	2.6	0.01±0.0	0.001~0.66	5.4	0.005±0.02	0.001~0.16	5.1	0.162
O ₃ (ppm)	0.001±0.0 ^b	0.001~0.001	0.0	0.01±0.02 ^a	0.001~0.1	2.0	0.02±0.02 ^a	0.001~0.1	1.8	0.001
PM ₁₀ (μg/m ³)	52.7±7.8 ^b	38.5~65.0	0.0	65.3±38.0 ^a	3.85~193.0	16.6	70.0±39.9 ^a	0.2~219.1	23.0	0.024
TVOCs (μg/m ³)	240.0±118.4	207.1~323.7	0.0	278.3±69.9	156.3~370.5	0.0	233.8±84.1	81.0~370.0	0.0	0.131
HCHO (μg/m ³)	86.7±35.5 ^a	19.5~234.4	25.6	37.8±37.0 ^b	0.0~170.5	5.9	73.8±128.9 ^a	0.0~1208.0	17.5	0.001
TBC (CFU/m ³)	67.5±86.3 ^b	10.0~504.0	0.0	583.3±450.5 ^a	19.0~1865.0	20.5	520.1±494.6 ^a	22.0~628.0	19.8	0.001

*a, b, c : Group with the same letters were not significantly different by Duncan test (α = 0.05).

*N : Number of samples/schools.

앙권역으로 구분하여 교실 내 공기오염물질의 농도를 Table 4에 나타내었다. 울산지역은 지역특성상 공단 및 공장 등이 많이 산재한 도시로 지속적인 공업 발달과 함께 우리나라 제일의 공업도시로서 다른 지역에 비해 많은 대기오염물질을 배출하고 있다. 공단 및 각종 산업공정 배출원으로부터 배출되는 대기오염물질은 대기 중에서 확산되어 주변지역의 생활환경과 토양 등에 악영향을 미치므로 울산지역은 1986년 3월 18일부터 대기 특별대책지역으로 지정되어 보다 엄격한 대기환경 기준을 적용하고 있다. 지역특성상 공단 및 산업공정 등이 많이 산재한 해당지역에 위치한 학교의 경우 지역의 토지 사용형태에 따라 실내오염물질의 농도가 다르게 나타날 것으로 추측되며, 특히 울주군 지역은 대규모 공업단지로서 석유화학산업, 비철금속공업, 정유 및 유류비축, 화학펠프 공정이 위치하고 있다.

본 연구결과 이산화탄소의 경우 중앙권역이 평균 596.9 ppm으로 강북권역(634.3 ppm)보다 낮게 나타났고 강남권역은 699.6 ppm으로 강북권역에 비해 통계적으로 유의하게 높은 수준을 보였다($p < 0.01$). 그러나 이산화탄소의 유지기준 초과율은 오히려 중앙권역이 10.3%로 가장 높게 나타났다. 일산화탄소는 강북권역이 평균 1.8 ppm으로 강남권역 0.1 ppm과 중앙권역 0.2 ppm에 비하여 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보였으나 유지기준이 초과되는 교실은 없었다. 이산화질소는 강남권역이 평균 0.01 ppm으로 가장 높았으며, 오존은 강북권역이 평균 0.02 ppm으로 강남권역(0.01 ppm)보다 통계적으로 유의하게 높은 수준($p < 0.01$)을 보였고, 실내외 오존의 I/O ratio도 강북권역이 0.8로 강남권역 0.44에 비해 높게 나타났다. 미세먼지는 강북권역이 평균 70.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중앙권역 평균 52.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보였고 유지기준 초과율도 23.0%로 가장 높게 나타나 주변 공단의 영향을 간

접적으로 받는 것으로 추측된다. 또한, 실내외 미세먼지의 I/O ratio는 강남권역 1.19, 강북권역 1.25로 실내 농도가 실외에 비해 모두 높게 나타났다. 포름알데히드의 경우 중앙권역에 위치한 학교가 평균 86.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강남권역 37.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 통계적으로 유의하게 높은 농도를 보였고 유지기준 초과율도 25.6%로 가장 높게 나타났다($p < 0.01$). 한편, 총휘발성유기화합물은 중앙권역이 67.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 강북 및 강남권역 평균인 약 250 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비하여 통계적으로 유의하게 낮은 농도를 보여 강남권역 및 강북권역에 위치한 학교의 경우 주변 공단의 영향을 직·간접적으로 받는 것으로 판단되었다. 총부유세균의 경우도 미세먼지와 총휘발성유기화합물과 마찬가지로 중앙권역 평균이 67.5 CFU/ m^3 로 강북권역과 강남권역 평균 550 CFU/ m^3 에 비하여 통계적으로 유의하게 낮은 수준을 보였다($p < 0.01$). 교실의 실내오염물질의 측정결과는 측정시기, 건축물의 특성 및 설립년도 등 다양한 요인이 작용하여 본 조사결과 공단지역에 밀집 가능성이 있는 학교의 실내 공기오염이 상대적으로 심각하다고 단정하는 것은 무리가 있다. 따라서 공단과 학교간의 물리적 거리, 학교 주변 도로의 특성, 인근 공단의 발생원 확인, 오염원 배출여부 및 배출원별 기여도 조사 등을 종합적으로 고려된 추가 연구가 필요할 것으로 판단된다.

5. 실내오염물질별 상관성 분석

울산지역 초·중·고등학교의 실내오염물질들의 상관관계를 분석한 결과를 Table 5에 나타내었다. 이산화탄소 경우 미세먼지 및 총부유세균과 통계적으로 유의한 양의 상관성을 보였다. 이산화탄소의 농도가 높다는 것은 학생들의 호흡량에 비해 환기가 잘 되고 있지 않다는 것을 의미하며 이는 미세먼지와 총부유세균의 농도가 상승되는 원인으로 해석될 수 있다. Fromme 등²⁴⁾

Table 5. Correlations among indoor air pollutants measured in classrooms

Contents	CO ₂ (ppm)	CO (ppm)	NO ₂ (ppm)	O ₃ (ppm)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TVOCs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	TBC (CFU/ m^3)
CO ₂ (ppm)	1.00							
CO (ppm)	0.04	1.00						
NO ₂ (ppm)	-0.10*	0.09	1.00					
O ₃ (ppm)	-0.01	0.15**	-0.02	1.00				
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.12*	0.15**	-0.01	-0.08	1.00			
TVOCs ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	0.08	-0.11	-0.05	-0.33	-0.33	1.00		
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	-0.05	0.03	-0.02	-0.15**	0.02	0.16	1.00	
TBC (CFU/ m^3)	0.17**	0.06	0.01	-0.02	0.19**	0.14	-0.03	1.00

*p-value < 0.05, **p-value < 0.01 by Pearson correlation.

Table 6. Multiple regression analysis of indoor air pollutants

Dependent variable	Independent variable	β (S.E)	t-value	p-value	Model R-square
CO (ppm)	Temperature	0.0221	-8.25	0.001	0.154*
	Temperature	0.0002	-8.26	0.001	
O ₃ (ppm)	Relative humidity	0.0001	-2.03	0.043	0.236*
	No. of Students	0.0001	3.91	0.001	
	Construction year	0.0001	4.14	0.001	
PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Temperature	0.619	-2.28	0.023	0.052*
	Relative humidity	0.182	4.69	0.001	
HCHO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Relative humidity	0.464	5.69	0.001	0.078*
TBC (CFU/ m^3)	Temperature	7.696	2.60	0.010	0.094*
	No. of Students	0.173	-4.78	0.001	
	Construction year	1.094	3.54	0.001	

*p-value < 0.01.

의 연구에서도 이산화탄소 농도가 증가함에 따라 미세 먼지의 농도가 상승된다는 본 결과와 유사한 경향을 보고 하였다. 또한 미세먼지와 총부유세균과도 양의 상관 관계를 보였는데 이는 미세먼지 중 부유하고 있는 미생물과 흡착되어 있는 오염물에 기인되어 다소 증가하는 것으로 판단되며, 조 등²⁵⁾ 및 Shaughnessy 등²⁶⁾의 연구결과에서도 동일한 경향을 볼 수 있었다.

6. 실내오염물질 농도에 영향을 미치는 요인

교실에서 발생하는 8가지의 오염물질의 농도를 종속 변수로 설정하고 이에 영향을 줄 수 있는 온도, 습도, 학생 수, 학급 수 및 설립년도를 독립변수로 선택하여 단계선택 중회귀분석을 수행한 결과를 Table 6에 나타내었다. 이산화탄소는 온도가 영향을 미치는 요인으로 나타났으며 설명력은 15.4%이었다. 오존 및 미세먼지의 경우 온도, 습도가 통계적으로 유의하게 영향을 미치는 것으로 나타났다($p < 0.01$). 또한, 총부유세균에 영향을 미치는 요인으로는 온도, 학생 수 및 학교 설립년도이었다($p < 0.01$). 한편, 이산화탄소, 이산화질소 및 총 휘발성유기화합물의 농도에 영향을 주는 요인의 경우 그 모델이 통계적으로 유의하게 나타나지 않았다.

IV. 결 론

본 연구는 2008년 5월에서 12월까지 울산지역 155개 초, 중, 고등학교를 대상으로 8가지 실내공기오염물질의 농도를 평가한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

미세먼지의 평균농도는 초등학교 69.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중학교(67.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 고등학교(62.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높게 나

타났고, 유지기준 초과율도 21.9%로 가장 높았다. 총부유세균의 경우 초등학교 교실이 평균 678.4 CFU/ m^3 (초과율 28.9%)으로 가장 높았고 이산화탄소는 고등학교가 평균농도 704.3 ppm을 보여 초등학교 및 중학교에 비해 높은 수준을 보였다. 교실별로는 일반교실에서 이산화탄소(704.5 ppm), 미세먼지(71.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) 및 총부유세균(593.9 CFU/ m^3)의 평균농도가 특별실에 비해 높게 나타났으나, 포름알데히드의 경우 특별실이 평균농도 77.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반교실(50.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)에 비해 높게 나타났다.

이러한 결과들로 볼 때 울산지역 초등학교 교실은 미세먼지 및 총부유세균에 대한 보다 적극적 관리가 필요하고 고등학교는 환기횟수의 증가 또는 적절한 공조장치를 설치하여 이산화탄소의 농도를 감소시킬 필요가 있다. 특별실의 경우 포름알데히드 농도를 낮추기 위해서 포름알데히드 및 휘발성 유기화합물 저감처리가 되었거나 또는 친환경 재료를 사용하여 마감 처리된 제품을 구입하여 설치하는 것이 바람직 할 것으로 판단되며, 외부에서 휘발성유기화합물 및 기타 오염물질 등을 충분히 방출시킨 후 설치할 것을 권장한다. 한편, 주변 울산주변 일반산업단지외 울산 및 온산공단 등 국가산업단지에서 배출되는 환경오염물질로 인한 학교 교실 내 공기오염 여부는 향후 보다 과학적이고 체계적인 연구가 추가적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 울산시교육청의 2009년도 지원사업(환경성질환 컨텐츠 개발)으로 일부 수행되었고, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Stolwijk, J. A. : Risk assessment of acute health and comfort effects of indoor air pollution. *Annals of the New York Academy of Science*, **641**, 56-62, 1992.
2. Franklin, P. J. : Indoor air quality and respiratory health of children. *Pediatric Respiratory Reviews*, **8**, 281-286, 2007.
3. Asmore, M. R. and Dimitroulopoulou, C. : Personal exposure of children to air pollution. *Atmospheric Environment*, **43**, 128-141, 2009.
4. World Health Organization : Effects of air pollution on children's health and development-a review of the evidence. Geneva; WHO, 2005.
5. Barnett, A. G., Williams, G. M. and Schwartz, J. : Air pollution and child respiratory health: a case-cross-over study in Australia and New Zealand. *American Journal of Respiratory Critical Care Medicine*, **171**, 1271-1278, 2005.
6. Mendell, M. J. and Health, G. A. : Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, **15**, 27-52, 2005.
7. Otto, D. A., Hundnell, H. K., House, D. E., Molhave, L. and Count, W. : Exposure of humans to a volatile organic mixture. I. Behavioral assessment. *Archives of Environmental Health*, **47**, 23-30, 1992.
8. Fisk, W. J. : Estimates of potential nationwide productivity and health benefits from better indoor environments: an update. In Spengler, J., Samet, J. M. and McCarthy, J. F. *Indoor Air Quality Handbook*, New York, McGraw Hill **4.1-4.36**, 2000.
9. Jones, S. E., Smith, L. M., Wheeler, L. S. and McManus, T. : School policies and practices that improve indoor air quality. *Journal of School Health*, **80**(6), 280-286, 2010.
10. Sohn, J. R., Yoon, S. W., Kim, Y. S., Roh, Y. M., Lee, C. M., Son, B. S. and Yang, W. H. : 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.
11. Ministry of Education, Science and Technology : School Law. 2010.
12. Lee, J. D., Son, B. S. and Kim, Y. S. : A study on indoor air quality in school. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, **7**(2), 127-134, 2010.
13. Lim, Y. W., Lee, C. S., Kim, H. H., Yang, J. Y., Lee, G. W., Sohn, J. R., Park, J. W. and Shin, D. C. : A study on the indoor air pollution in the classrooms of elementary schools in Korea. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, **5**(2), 37-49, 2008.
14. Choi, T. J. : The effect on outdoor air and indoor human activity on mass concentrations of size-selective particulate in classrooms. *Journal of Environmental Health Science*, **34**(2), 137-147, 2008.
15. Ulsan Metropolitan Office of Education : URL ; http://www.use.go.kr/index_org.htm
16. Lee, S. C. and Chang, M. : Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong. *Chemosphere*, **41**, 109-113, 2000.
17. 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.
18. Jung, K. S., Kim, N. S., Lee, J. D., Hwangbo, Y., Son, B. S. and Lee, B. K. : The association of subjective symptoms of students and indoor air quality in private academic facilities. *Journal of Environmental Health Science*, **35**(6), 468-477, 2009.
19. Yang, W., Sohn, J., 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.
20. Jeung, Y. H. and Choi, S. J. : Assessment of Formaldehyde Concentrations in Indoor and Outdoor Environments of Schools in Incheon. *Journal of Environmental Health Science*, **33**(5), 372-378, 2007.
21. Jung, J. H., Moon, G. N. and Ju, D. J. : Content of environmental disease. *Ulsan Metropolitan Office of Education*, 1-150, 2010.
22. Jung, J. H., Seo, B. Su., Ju, D. J., Shon, B. H. and Lim, H. S. : The assessment of survey on the indoor air quality at school in Ulsan and its vicinities. Korea. *Korean Journal of Environmental Health, International Conference 2010*, 269-271, 2010.
23. Jung, J. H., Seo, B. Su., Ju, D. J., Park, M. C., Phee, Y. G. and Shon, B. H. : A study on the assessment of the indoor air quality at elementary, middle and high schools in Ulsan, Korea. *Korean Journal of Environmental Health*, Seoul National University, Fall Conference 2010, 263-265, 2010.
24. 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.
25. Cho, T. J., Chio, H. S., Jeon Y. T., Lee, C. W., Lee, J. D., Jou, H. M. and Son, B. S. : The Study of indoor air quality at schools in chung-nam area. *Journal of the Environmental Sciences*, **17**(5), 501-507, 2008.
26. Shaughnessy, R. J., Shaughnessy, U. H., Nevalainen, A. and Moschandreas, D. : A preliminary study on the associations between ventilation rates in classrooms and student performance. *Indoor Air*, **16**, 465-468, 2006.