

# 울산 지역 학교의 휘발성유기화합물 평가

정종현 · 이사우 · 피영규

대구한의대학교 보건치료대학 보건학부

## The Assessment of Volatile Organic Compounds at Schools in the Ulsan Metropolitan Area

Jong-Hyeon Jung · Sa-Woo Lee · Young Gyu Phee

<sup>1</sup>Faculty of Health Science, College of Health & Therapy, Daegu Haany University

### ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of this study was to investigate the concentrations of volatile organic compounds at elementary, middle, and high schools in Ulsan and its surroundings.

**Methods:** To assess the hazardous chemicals of the 66 classrooms in the 22 schools, the 6 volatile organic compounds such as TVOCs (Total Volatile Organic Compounds), benzene, toluene, xylene, ethyl benzene and styrene were measured and analyzed from the beginning of May to the end of December, 2009.

**Results:** The mean concentrations of TVOCs in the elementary schools were higher than those of middle and high schools, and multi-purpose classrooms was higher than that in general ones. The benzene and toluene level in schools in Dong-Gu in the vicinity of assorted industrial complexes was higher than that of schools located in other districts around the Ulsan Metropolitan Area.

**Conclusion:** In case of schools in Ulsan Metropolitan Area, elementary school, schools in Dong-Gu, and multi-purpose classrooms over general classrooms should be given a high priority for the management of volatile organic compounds.

**Key Words:** TVOCs, Benzene, toluene, Xylene, school

## 서 론

우리나라는 전통적인 교육열로 인하여 하루 중 대부분의 시간을 학교 내에서 생활하고 있어 교실의 실내공기질 관리는 매우 중요한 문제이다(양원호, 2009). 교실의 실내공기오염에 영향을 주는 물질로는 휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds, VOCs), 포름알데히드(HCHO), 다환성방향족 탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 환경성담배연기(Environmental Tobacco Smoke, ETS), 일산화탄소(CO), 이산화탄소(CO<sub>2</sub>), 이산화질소(NO<sub>2</sub>), 이산화황(SO<sub>2</sub>), 오존(O<sub>3</sub>), 미세먼지(PM10)와 초미세먼지(PM2.5) 등

의 입자상 물질(Particulate matter), 라돈(Radon) 및 진드기 등이 있다(Franklin, 2007; Asmore & Dimitroulopoulou, 2009). 이에 우리나라 교육과학기술부에서는 학교보건법에 교사 안에서의 공기의 질에 대한 유지기준을 설정하여 미세먼지, 이산화탄소, 폼알데하이드, 총부유세균, 낙하세균, 일산화탄소, 이산화질소, 라돈, 총휘발성유기화합물, 석면, 오존, 진드기 11개 오염물질 항목에 대하여 관리하고 있다(교육과학기술부, 2012).

휘발성유기화합물은 새로 건축되었거나 리모델링된 학교 교실의 건축자재, 마감재, 책상 및 의자에서 공기 중으로 방출될 가능성이 높다. 이러한 실내공간에서 휘발성유기화합물로

Corresponding author: Young Gyu Phee

Faculty of Health Science, College of Health & Therapy, Daegu Haany University, 1 Haany-daero, Gyongsan 712-715, Korea.  
Tel: +82-53-819-1590, Fax: +82-53-819-1209, E-mail: yphee@dhu.ac.kr

투고일: 2012년 5월 27일 / 심사완료일: 2012년 6월 22일 / 게재확정일: 2012년 6월 25일

인한 대표적인 건강영향은 신경학적 증상으로 두통, 정신혼란, 사고력 저하 및 점막건조(Mø lhave et al., 1985, Mendell & Health, 2005)와 집중력 저하와 피로(Otto et al., 1992)이며, 코 부위의 비점막 비후, 비울혈 및 염증유발도 가능한 것으로 알려져 있다(Mø lhave et al., 1993). 또한, 유아에게는 면역계 발달에 영향을 줄 수 있으며 학령기 아동들에게는 천식 및 알레르기성질환의 위험이 증가되는 것으로 보고되고 있다(Rumchev et al., 2004; Jaakkola et al., 2004). 국내 연구에서도 신축한지 얼마 되지 않은 학교의 경우 신축 건물의 벽지, 바닥재, 페인트 등 각종 건축자재에서 나오는 휘발성유기화합물이 학생들의 중추신경계 기능인 인지기능을 저하시키는 것으로 확인된 바 있다(김대섭 등, 2007). 특히 휘발성유기화합물 중 벤젠의 경우 국제암연구기구(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 인체 암 확인물질인 1군으로 분류하고 있으며(IARC, 2012), 톨루엔은 두통, 졸음 및 사고력 저하와 자일렌은 눈과 피부자극, 호흡 저하 및 기억력에도 손상을 주는 것으로 알려져 있다(ATSDR, 2000; ATSDR, 2008).

울산광역시에는 122개의 초등학교, 61개 중학교 및 51개의 고등학교가 있으며 학생 수는 각각 90,604명, 53,697명 및 52,219명으로 약 20만 명에 육박한다(울산광역시, 2012). 특히, 초등학교, 중학교 및 고등학교로 올라갈수록 학교 등에서 보내는 시간이 유의하게 증가되며 이러한 활동양상은 휘발성유기화합물의 노출과 밀접한 연관성을 가지고 있다. 또한, 공업 지역은 호흡성분진 및 라돈의 평균 농도가 높다는 보고(김윤신 등 2003)가 있고, 울산의 경우 강북권역에 자동차부품업종이 산업단지로 구성되어 있고 강남권역을 포함한 일부 지역은 울산, 미포 및 온산공단 등이 밀집 되어 있는 등 지역적 특성으로 교실의 휘발성유기화합물에 대한 간접적인 영향이 있을 수 있다(정종현 등, 2010).

따라서 본 연구는 울산 지역에 위치한 학교의 교실에서 발생하는 휘발성유기화합물을 학교 등급, 지역별로 농도 분포 특성을 파악하고 설립연도별 농도차이를 분석하여, 향후 학교 내 휘발성유기화합물의 저감 및 공기질의 개선방안을 마련할 수 있는 기초자료를 확보하고자 하였다.

립된 울산 지역에 위치한 22개 초, 중, 고교 내 66개 교실을 대상으로 하였다. 화학물질로는 교실 안에서의 공기 질에 대한 유지기준이 마련되어 있는 총휘발성유기화합물과, 대표적인 휘발성유기화합물인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌에 대한 노출농도 파악을 위하여 2009년 5월에서 12월까지 실내환경 측정을 수행하였다. 한편, 학교 내 일반교실과 과학실, 음악실 및 어학실 등과 같은 특별교실의 휘발성유기화합물의 노출 정도를 비교하기 위하여 다양한 특별교실에 대한 측정도 병행하였다.

## 2. 연구방법

시료의 채취는 일반교실 및 특별교실에서 수업이 진행되는 동안 실시하였으며, 휘발성유기화합물의 측정은 스테인레스강 재질의 Tenax TA 흡착관(1/4"×20 cm, Supelco, USA)을 시료채취용 펌프(Gilian, LFS-114DC, USA)에 연결하였고, 유량은 150 mL/min으로 보정하여 30분씩 채취하였다. 시료는 분석 전까지 냉동 보관 후 Turbomatrix ATD (Perkinelmer, UK) 열탈착기와 GC/MSD (HP 6890, USA)를 이용하여 분석하였다. Tenax TA 흡착관의 경우 현장바탕시료를 활용하여 보정하였고, 정확도 확보를 위하여 표준물질을 3회 분석하여 회수율을 파악하였으며 그 범위는 88~108%로 양호하였다. 이후, 교실 내 환경에서 검출빈도가 높고 인체에 유해성이 높은 것으로 알려진 휘발성유기화합물인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌을 중점적으로 분석하였고, 현행 학교보건법에 유지기준이 마련되어 있는 총휘발성유기화합물에 대한 농도를 평가하였다.

자료의 분석은 SAS 9.1 통계 프로그램(SAS Institute Inc, Cary, NC, USA)을 사용하였다. 교실 특성별 두 군의 농도차이는 Students t-test를 사용하였으며 학교등급, 지역 및 설립연도별 휘발성유기화합물의 농도 비교는 기본적으로 일원분산분석을 수행하였고 통계량을 .05의 유의수준으로 하여 Duncan의 사후 검정도 실시하였다. 한편, 산출된 결과는 Sapiro Wilk 검정결과 정규분포를 보이는 물질이 많아 대표 값을 산술평균으로 제시하였다.

## 연구내용 및 방법

### 1. 연구대상

본 연구는 설립된 지 3년이 경과되지 않은 2006년 이후 설

## 연구결과

### 1. 학교의 휘발성유기화합물의 농도

울산 지역 22개 초, 중, 고등학교의 총휘발성유기화합물 평

균농도는  $288.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 학교보건법에 의한 유지기준( $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ )을 초과하는 교실은 12곳(초과율 18.2%)으로 나타났다(Table 1). 그러나 전체적인 노출률은 0.72%로 상당히 낮게 나타나 노출농도가 교실별로 확연한 차이를 보였다.

벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌에 대한 기준은 학교보건법에 마련되어 있지 않아 환경부의 신축 공동주택의 실내공기질 권고기준을 참고하여 평가하였으나 초과하는 경우는 없는 것으로 나타났다(환경부, 2012). 다만, 노출률이 가장 높은 물질은 톨루엔이었고, 평균농도는  $86.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 총휘발성 유기화합물 농도에 많은 영향을 미치고 있는 것으로 보인다.

## 2. 학교 등급별 휘발성유기화합물의 농도

Table 2는 울산 지역 초등학교, 중학교 및 고등학교 교실의 휘발성유기화합물의 농도를 비교한 것이다. 총휘발성유기화합물의 경우 초등학교가 평균  $329\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중학교( $265\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

및 고등학교( $266\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비해 다소 높게 나타났지만 통계적 유의성은 없었다. 한편, 벤젠의 경우 고등학교가 평균  $1.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 Duncan의 사후 검정결과 초등학교 및 중학교에 비해 통계적으로 유의하게 높았다( $p < .05$ ). 톨루엔, 에틸벤젠 및 자일렌은 초등학교가 각각  $95.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $28.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $28.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중학교 및 고등학교에 비해 높은 농도를 보였으나 통계적으로 유의한 차이는 없었다.

## 3. 교실 사용용도에 따른 휘발성유기화합물의 농도

울산 지역 학교를 일반교실과 과학실, 도서실 등의 특별교실로 구분하여 휘발성유기화합물의 농도를 비교하였다(Table 3). 총휘발성유기화합물은 특별교실의 평균농도가  $305.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 일반교실( $28.03\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비하여 높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다.

특별교실의 평균농도가 높게 나온 화학물 질로는 벤젠( $0.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 에틸벤젠( $24.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 스티렌( $10.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ )이었고, 일

**Table 1.** The Total Mean of VOCs Concentrations

(N=66)

Contents	M±SD	Min ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Max ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Exposure rate <sup>3)</sup> (%)	Exceed rate <sup>4)</sup> (%)	Recommended limit ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
TVOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	288.68±115.76	108.5	559.5	0.72	18.2	400 <sup>1)</sup>
Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.67±0.81	0.0	4.6	2.23	0.0	30 <sup>2)</sup>
Toluene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	86.36±86.30	14.4	406.4	8.64	0.0	1,000 <sup>2)</sup>
Ethyl benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	22.03±36.24	4.4	244.6	6.12	0.0	360 <sup>2)</sup>
Xylene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	25.36±17.27	8.0	101.6	3.62	0.0	700 <sup>2)</sup>
Styrene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	8.60±4.60	3.2	31.3	2.87	0.0	300 <sup>2)</sup>

<sup>1)</sup>Recommended limit of TVOCs: IAQ recommended limit of School Health Law by Ministry of Education & Science & Technology;

<sup>2)</sup>Recommended limit of other organic chemicals: IAQ recommended limits of IAQ management Law by Ministry of Environment;

<sup>3)</sup>Exposure rate: (Mean/recommended limit) × 100;

<sup>4)</sup>Exceed rate: (No. of classrooms over recommended limit/No. of classrooms) × 100.

**Table 2.** Concentrations of VOCs by Academic Grade

Contents	Elementary school (n=24)		Middle school (n=30)		High school (n=12)	
	M±SD	Range	M±SD	Range	M±SD	Range
TVOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	329.0±120.5	125.9~559.5	265.5±121.4	108.5~532.5	266.0±66.4	166.9~374.7
Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.55±0.50 <sup>b</sup>	0.1~2.4	0.58±0.71 <sup>b</sup>	0.0~3.5	1.13±1.34 <sup>a</sup>	0.1~4.6
Toluene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	95.13±77.58	26.1~242.6	80.66±101.24	14.4~406.4	66.58±61.38	14.7~231.7
Ethyl benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	28.48±47.92	4.4~244.6	19.98±32.31	4.5~184.1	14.23±6.12	9.0~30.1
Xylene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	28.60±20.50	9.1~101.6	24.00±16.45	8.0~79.3	22.26±11.49	15.2~57.5
Styrene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	8.42±5.03	6.6~31.0	8.64±3.99	3.2~25.9	8.84±5.48	6.6~25.7

<sup>a, b</sup>: Groups with the same letter were not significantly different by Duncan test ( $\alpha = .05$ ).

반교실은 톨루엔과 자일렌이 특별교실에 비하여 조금 높은 농도를 보였지만 모두 통계적으로 유의하지는 않았다.

#### 4. 울산 지역구분에 따른 휘발성유기화합물의 농도

울산 지역을 5개의 지역구로 구분하였을 때 총휘발성유기화합물의 경우 주변에 석유화학산업이 위치한 울주군의 학교가 평균 333.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났지만 통계적 유의성은 없었다<Table 4>. 한편, 노출농도가 낮은 수준이었지만 인체 발암성 확인물질로 알려진 벤젠은 동구 지역 학교가 평균 1.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 중구(0.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비하여 통계적으로 유의하게 높았고, 톨루엔의 경우도 동구 지역 학교 평균농도(136.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )가 남구(83.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )에 비하여 통계적으로 높은 농도를 보였다( $p < .05$ ).

#### 5. 설립연도 별 휘발성유기화합물의 농도

총휘발성유기화합물의 농도를 학교 설립연도 별로 구분했을 때 가장 최근에 설립된 학교가 평균 246.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 낮게 나타났고 전반적으로 설립연도가 오래될수록 총휘발성유기화합물의 농도가 높아지는 경향을 보였다. 톨루엔 역시 2006년부터 2009년까지 설립된 학교의 평균농도가 점진적으로 감소되는 추세를 보였지만 년도 별로는 통계적 차이를 보이지 않았다<Table 5>.

### 고찰

울산 지역 22개 초, 중, 고등학교의 66개 교실에서 측정된 총휘발성유기화합물 평균농도는 288.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 이종대 등

**Table 3.** Concentrations of VOCs by Type Of Classroom

Contents	General classroom (n=44)		Multi-purpose classroom (n=22)		p
	M±SD	Range	M±SD	Range	
TVOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	280.27±116.68	108.5~549.5	305.50±114.69	118.6~559.5	.408
Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.66±0.83	0.0~4.6	0.81±0.10	0.1~3.5	.932
Toluene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	86.37±87.58	14.4~406.4	77.35±85.37	21.1~352.6	.692
Ethyl benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	20.80±27.84	4.4~184.1	24.48±49.67	4.5~244.6	.690
Xylene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	25.61±15.53	8.0~79.3	24.85±20.71	9.2~101.6	.867
Styrene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	7.86±3.27	3.2~25.7	10.07±6.35	6.6~31.3	.066

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

**Table 4.** Concentrations of VOCs by Different Area Unit

Contents	Nam-gu (n=6)	Dong-gu (n=6)	Buk-gu (n=21)	Jung-gu (n=18)	Ulju-gun (n=15)
	M±SD (Range)	M±SD (Range)	M±SD (Range)	M±SD (Range)	M±SD (Range)
TVOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	258.8±100.9 (180.7~460.6)	306.7±126.8 (209.2~531.1)	267.8±112.8 (108.5~532.5)	279.76±112.24 (118.6~430.2)	333.36±126.20 (129.5~559.5)
Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.77±0.91 <sup>a,b</sup> (0.1~2.4)	1.27±0.44 <sup>a</sup> (0.8~2.1)	0.73±1.07 <sup>a,b</sup> (0.1~4.6)	0.40±0.33 <sup>b</sup> (0.1~1.1)	0.67±0.83 <sup>a,b</sup> (0.0~3.5)
Toluene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	38.15±9.51 <sup>a,b</sup> (26.1~51.6)	136.78±153.65 <sup>a</sup> (21.2~406.4)	83.47±69.45 <sup>b</sup> (14.6~233.0)	106.46±99.96 <sup>a,b</sup> (19.4~352.6)	52.21±57.13 <sup>a,b</sup> (14.4~242.6)
Ethyl benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	12.95±10.83 (4.4~26.7)	21.02±9.16 (9.5~37.5)	17.81±11.13 (7.8~46.1)	27.09±41.14 (4.8~184.1)	25.89±60.67 (5.0~244.6)
Xylene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	23.70±18.45 (9.1~47.7)	28.55±14.31 (16.3~56.3)	23.73±12.02 (12.8~57.5)	28.62±18.79 (9.7~79.3)	23.10±22.94 (8.0~101.6)
Styrene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	7.25±0.48 (6.6~8.0)	8.03±3.03 (6.6~14.2)	10.72±7.31 (6.6~31.0)	7.61±1.72 (6.6~12.8)	7.57±2.23 (3.2~12.2)

<sup>a,b</sup>: Groups with the same letter were not significantly different by Duncan test ( $\alpha=.05$ ).

**Table 5.** Concentrations of VOCs by Construction Year

Year of construction	2006 (n=9)	2007 (n=24)	2008 (n=27)	2009 (n=6)
	M±SD (Range)	M±SD (Range)	M±SD (Range)	M±SD (Range)
TVOCs ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	362.02±73.88 (273.3~485.7)	284.84±132.96 (118.6~559.5)	278.90±109.21 (128.2~532.5)	246.62±113.47 (108.5~406.8)
Benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	0.70±0.33 (0.4~1.0)	0.62±0.60 (0.0~2.4)	0.84±1.11 (0.1~4.6)	0.25±0.14 (0.1~0.4)
Toluene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	128.07±88.44 (29.3~233.0)	84.28±92.38 (19.4~406.4)	72.64±81.66 (14.4~352.6)	48.12±37.88 (14.6~118.1)
Ethyl benzene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	27.45±13.58 (16.5~46.1)	26.53±48.06 (4.4~244.6)	12.72±6.57 (4.5~27.3)	14.43±8.27 (7.8~30.1)
Xylene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	34.95±9.22 (23.7~49.4)	27.23±21.50 (8.0~101.6)	19.94±9.77 (9.7~47.7)	24.30±16.51 (13.7~57.5)
Stylene ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	10.76±9.92 <sup>a,b</sup> (6.6~31.0)	7.28±1.97 <sup>b</sup> (3.2~14.2)	8.42±3.86 <sup>a,b</sup> (6.6~25.9)	11.93±7.06 <sup>a</sup> (6.7~25.7)

<sup>a,b</sup>: Groups with the same letter were not significantly different by Duncan test ( $\alpha=0.05$ ).

(2010)의 연구결과인  $268.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과 유사한 경향을 보였고, 김대섭 등(2007)이 신축학교에서 수행한 연구결과( $223\sim 307\mu\text{g}/\text{m}^3$ )와도 유사한 수준으로 나타났다. 한편, 외국의 경우 미국 워싱턴에 위치한 학교의 총휘발성유기화합물 평균은  $200\sim 450\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하여 본 연구결과와 유사한 수준이었고 (Black & Worthan, 1995), Laurent et al.,(1993)이 조사한 프랑스의 10개 학교에서 측정된 총휘발성유기화합물의 농도는  $980\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상당히 높은 수준이었으나, 스웨덴 학교의 경우 중앙값이  $190\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과에 비해 낮게 나타나 국가별로 다소 차이를 보였다(Norback, 1995).

최근 수행된 전진민 등(2010)의 연구결과 벤젠의 평균농도는  $5.8\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과인  $0.67\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 다소 높은 수준이었다. 다만, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌의 경우 각각의 평균농도가  $33.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $5.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $14.3\mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $4.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과인  $86.36\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $22.03\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,  $25.36\mu\text{g}/\text{m}^3$  및  $8.60\mu\text{g}/\text{m}^3$ 에 비해 전반적으로 낮은 수준을 보여 울산 지역에 위치한 학교가 충청권에 소재한 학교에 비해 4개 화학물질의 농도가 높게 나타났다. 이는 중공업도시인 울산 지역에 국가산업단지과 각종 중공업 및 조선업 등이 위치하기 때문에 오염된 대기의 간접영향으로 사료된다. 한편, Sofuoglu et al., (2011)이 수행한 터키의 3개 초등학교에서 측정된 벤젠과 톨루엔의 농도는 각각  $10.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ 과  $18.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과와 다소의 차이는 있으나 이는 국가, 교통량, 인근 공단 지역의 위치 및 건축자재의 오염물질 방출정도에 따라 다르게 나타날 수 있다고 판단된다. Scheepers et al.,(2010)은 터키의

학생들에게 노출되는 벤젠의 측정결과 중앙값의 범위를  $1.83\sim 16.4\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 톨루엔  $8.1\sim 14.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 자일렌  $0.02\sim 2.12\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하였다. 물론 시료채취방법의 차이는 있지만 울산 지역의 교실 내 벤젠의 노출수준은 외국에 비하여 낮은 수준이고 톨루엔과 자일렌의 노출수준은 높은 수준을 보이는데 이러한 차이에 대한 원인은 보다 세부적인 조사가 필요한 것으로 보인다.

이종대 등(2010)은 총휘발성유기화합물에 대한 학교 등급별 측정결과, 초등학교의 평균농도가 중학교 및 고등학교에 비해 높은 수준을 보인다고 하여 본 연구과 동일한 경향을 보였다. 이는 학교를 등급별로 구분하였을 때 초등학교의 휘발성유기화합물에 대한 관리가 우선순위가 되어야 한다는 것을 의미할 수 있다. 또한 임영옥 등(2008)이 초등학교를 대상으로 수행한 연구를 보면 벤젠의 평균농도가  $14.0\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 톨루엔  $81.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 에틸벤젠  $28.3\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 자일렌  $50.2\mu\text{g}/\text{m}^3$  스티렌  $9.9\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구결과와 다소 유사한 결과를 보였으나, 중학교 및 고등학교에 대한 연구는 수행되지 않아 그 결과를 비교하기는 어려웠다. 외국의 경우 Stranger et al., (2008)이 연구한 벨기에 27개의 초등학교에서 휘발성유기화합물의 측정결과 그 평균이 벤젠  $0.41\sim 1.54\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 톨루엔  $3.6\sim 5.2\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 에틸벤젠  $0.7\sim 1.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ , o, m, p-자일렌  $0.6\sim 3.6\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 보고하였다. 본 연구결과와 비교 시 벤젠만 유사한 수준의 농도를 보였고 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌은 훨씬 낮은 수준을 보였는데 이는 Stranger 등(2008)의 경우 확산포집기를 사용하여 본 연구의 시료포집의 방법과의 차이와 주변 환경의 영향



에 기인된 것으로 판단된다.

일반교실과 특별교실의 총휘발성유기화합물의 농도를 비교하였을 때 일반교실에 비해 특별교실에서 농도가 높게 나타났으나 통계적 유의성은 없었다. 손종렬 등(2006), 노영만 등(2007), 이종대 등(2010) 및 정중현 등(2010)의 연구에서도 일반교실에 비해 특별교실의 농도가 높게 나타난다는 결과와 동일한 경향을 보였다. 특히 본 연구의 수행시기에 1개 특별교실에서 시설개선을 위한 부분적 공사로 새로운 건축자재가 배치됨에 따라 총휘발성유기화합물의 유지기준이 1.4배 초과된 것으로 나타났다. 따라서 가급적 외부에서 휘발성유기화합물을 방출시킨 후 교실 내로 배치시키는 등의 노력이 필요한 것으로 보인다. Yang 등(2009)에 의하면 교실 내 화학물질의 주요 노출원은 건축자재, 마감재, 책상 및 의자이며 휘발성유기화합물의 방출이 적은 자재를 선택의 중요성을 강조하였다. 따라서 책상, 의자 및 교육기자재와 비품 등은 가능하다면 구입 시 휘발성유기화합물 저감 처리된 자재이거나 또는 친환경 재료를 구입하여 학교에 설치하고, 외부에서 휘발성유기화합물 및 기타 오염물질 등을 충분히 방출시킨 후 교실 내에 설치하는 것이 바람직한 것으로 보인다.

울산 지역을 5개 지역구로 구분하여 휘발성유기화합물의 농도를 비교하였을 때 노출수준은 낮았으나 동구 지역의 학교에서 벤젠과 톨루엔의 농도가 가장 높게 나타났다. 이는 대상 물질의 차이는 있지만 Jung 등 (2012)의 울산 지역에 위치한 학교 내 미세먼지(PM10)의 농도를 비교하였을 때 다른 지역구에 비해 동구의 농도가 높다는 연구결과와 일치한다. 동구의 경우 대규모의 중공업, 조선소, 자동차공장이 밀집된 지역으로 주변 대기에서 발생하는 화학물질에 대한 영향이 어느 정도 기여할 것으로 추정된다. 다만, 교실의 휘발성유기화합물의 측정결과는 측정시기, 건축물의 특성 및 설립연도 등 다양한 요인이 작용하여 본 조사결과 대규모 공장이 밀집되어 있는 동구 내 학교의 휘발성유기화합물이 상대적으로 심각하다고 단정하는 것은 무리가 있다. 따라서 공장과 학교간의 물리적 거리, 학교 주변 도로의 특성, 인근 공단의 발생원 확인, 오염원 배출여부 및 배출원별 기여도 조사 등이 종합적으로 고려된 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

총휘발성유기화합물의 농도를 학교설립 연도별로 구분하여 비교하였을 때 설립연도가 오래될수록 총휘발성유기화합물의 농도가 높아지는 경향을 보였는데, 이는 임영욱 등(2008)이 초등학교를 대상으로 수행한 연구에서 최근 신축한 학교의 벤젠, 톨루엔 등의 농도가 건축 완공 연도가 그 이전인 경우에 비해 낮게 나타난다는 결과와 유사함을 보였다. 이러

한 결과가 의미하는 것은 2005년 교육과학기술부가 학교보건법에 휘발성유기화합물에 대한 유지기준을 마련하고 이를 관리해야 한다는 규정개정 이후 그 효력이 어느 정도 발휘되고 있는 것으로 보인다. 또한, 학교 실내공기질에 대한 언론의 지속적인 보도 등으로 인하여 학교 및 학부모의 지속적인 관심의 결과로도 해석될 수 있다.

휘발성유기화합물은 두통, 집중저하 등의 신경학적 증상을 야기 시키며 플라스틱 재질의 벽에서 방출되는 휘발성유기화합물로 알려지성 폐포염도 보고된 바 있다(Otto et al., 1992). 특히, 신축학교의 경우 건물의 벽지, 바닥재, 페인트 등 각종 건축자재에서 나오는 유기화합물이 학생들에게 노출되면 학생들의 건강에 악영향을 미치는 것으로도 발표되었다(김대섭 등, 2007).

학교보건법의 관련규정에 의하면 증축 또는 개축을 포함하여 건축한 때로부터 3년이 경과되지 않은 학교에 대하여는 총 휘발성유기화합물에 대한 유지기준을  $400\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 규정하고 있으나, 학생들의 인지기능에 영향을 줄 수 있는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌에 대한 기준은 별도로 마련되어 있지 않다(교육과학기술부, 2012). 이런 이유로, 그동안 학교 내 발생될 수 있는 화학물질에 대한 노출평가는 총휘발성유기화합물만을 중심으로 연구가 진행되거나(손종렬 등, 2006; 정중현 등 2010), 또는 그 대상이 초등학교로 한정되어 있었다(노영만 등, 2007; 임영욱 등, 2008). 또한, 대표적인 휘발성유기화합물인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌에 대한 노출평가도 일부 수행되었으나 그 대상이 지하주차장(하덕호 등, 2008)이거나 병원(이철민 등, 2008) 또는 다중이용시설(김호현 등, 2011)이었다.

학교의 환경적인 보건지표로서 실내공기오염에 영향을 주는 총휘발성유기화합물에 대한 유지기준 뿐 아니라 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 농도에 대한 세부적인 조사와 연구를 통해 유지기준을 마련해야 하며 체계적인 관리와 규제 또한 마련되어야 할 것이다.

## 결론 및 제언

2009년 5월에서 12월까지 설립된지 3년이 경과되지 않은 울산 지역 22개 학교의 66개 교실을 대상으로 휘발성유기화합물의 농도를 학교 등급, 교실, 지역 및 설립연도 별로 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

총휘발성유기화합물 평균농도는  $288.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 학교보건법에 의한 유지기준 초과율은 18.2%로 나타났다. 다

만, 대표적인 휘발성유기화합물인 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌의 경우 모두 유지기준 이내로 평가되었다. 학교등급별로는 초등학교 총휘발성유기화합물의 농도가 높은 경향을 보였고, 특별교실이 일반교실에 비하여 높게 나타났다.

한편, 울산을 지역별로 구분하였을 때 중공업, 조선소 등이 다수 밀집되어 있는 동구에서 벤젠 및 톨루엔의 농도가 다른 지역구에 비해 높게 나타났지만 우려할 수준은 아니었다. 휘발성유기화합물을 학교 설립연도 별로 구분했을 때 최근에 신축된 학교건물의 총휘발성유기화합물, 벤젠, 톨루엔의 농도가 그 이전에 건립된 학교에 비해 낮게 나타나는 경향을 보였다.

따라서 울산 지역에 위치한 학교의 경우 학교 등급별로는 초등학교, 교실은 일반교실보다 특별교실, 지역별로는 동구에 위치한 학교의 휘발성유기화합물의 관리가 우선 시 되어야 할 필요가 있다. 또한, 개교 후 3년 이내의 학교는 휘발성유기화합물이 유지기준에 적합하도록 반드시 관리할 필요가 있으며, 이를 위하여 휘발성유기화합물 저감처리가 되었거나 또는 친환경 재료를 사용하여 마감 처리된 제품의 구입 및 설치가 바람직 할 것으로 보인다. 특히, 부분적인 공사로 새로운 건축자재 등이 교실 내 배치될 경우 외부에서 휘발성유기화합물 등을 충분히 방출시킨 후 설치할 것을 권장한다.

교사 안에서의 휘발성유기화합물의 원인물질에 대한 추후 연구가 필요하며 성장기 학생들이 오랜 시간 동안 생활하고 있는 학교의 실내공기질에 대한 사회적 관심 역시 지속적으로 요구된다.

## 참고문헌

- 교육과학기술부(2012). **학교보건법 시행규칙 별표 4의2, 교사 안에서의 공기의 질에 대한 유지·관리기준**. [Online]. Available: <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=88324#J3921290> [2012, May 8].
- 김대섭, 김선주, 박시영, 전만중, 김규태, 김창윤(2007). 신축학교 실내공기질이 초등학생들의 인지기능에 미치는 영향. **대한산업의학회지**, 19(1), 73-80.
- 김윤신, 이철민, 문정숙, 김상욱(2003). 서울·경기 지역 초·중·고등학교 교실의 실내공기오염에 관한 연구. **한국학교보건학회지**, 16(1), 81-90.
- 김호현, 양지연, 박창수, 박주희, 손종렬, 신동천 등(2011). 일부 다중이용시설의 휘발성유기화합물류 및 폼알데하이드 노출로 인한 건강 위해성 평가: 호텔, 헬스장, 고시원, 독서실, 비디오방을 중심으로. **한국실내환경학회지**, 8(3), 157-169.
- 노영만, 김종철, 이철민(2007). 일부 초등학교 교실의 실내공기오염물질 분포 조사에 관한 연구. **한국실내환경학회지**, 4(4), 204-213.
- 손종렬, 윤승욱, 김윤신, 노영만, 이철민, 손부순 등(2006). 국내 일부 학교 교실의 실내공기질 평가. **한국실내환경학회지**, 3(1), 54-63.
- 양원호(2009). 학교 실내공기질 및 건강 영향. **한국환경보건학회지**, 35(3), 143-152.
- 울산광역시(2012). **학교 종합안내 서비스, 울산광역시 교육청**[Online]. Available: [http://old-use.use.go.kr/nhtml/map\\_gis/map\\_in dex.php](http://old-use.use.go.kr/nhtml/map_gis/map_in dex.php)[2012, May 8].
- 이종대, 손부순, 김윤신(2010). 학교 실내공기질에 관한 연구. **한국실내환경학회지**, 7(2), 127-134.
- 이철민, 김윤신, 송민경, 심인숙, 심상효(2008). 병원 내 실내공기 중 휘발성유기화합물의 농도분포에 관한 연구. **한국실내환경학회지**, 5(3), 273-289.
- 임영욱, 이청수, 김호현, 양지영, 이근우, 손종렬, 박중원, 신동천(2008). 전국 초등학교 교실 내 유해환경 평가. **한국실내환경학회지**, 5(2), 37-49.
- 전준민, 정만호, 이학성, 강병욱(2010). 학교 교실내 실내유해오염물질 분포 특성. **한국실내환경학회지**, 7(1), 47-61.
- 정종현, 서보순, 주동진, 박만철, 손병현, 피영규(2010). 울산 지역 학교의 실내공기질 평가. **한국환경보건학회지**, 36(6), 472-479.
- 하덕호, 편무권, 이봉우, 김중현, 김선태(2008). 대전 지역 지하주차장의 휘발성유기화합물 농도분포 연구. **한국실내환경학회지**, 5(1), 1-11.
- 환경부(2012). **실내공기질관리법 시행규칙 별표4의2, 신축 공동주택의 실내공기질 권고기준**. [Online]. Available: <http://www.law.go.kr/lsInfoP.do?lsiSeq=126651#J4213695> [2012, May 8].
- Asmore, M. R., & Dimitroulopoulou, C. (2009). Personal exposure of children to air pollution. *Atmospheric Environment*, 43, 128-141.
- ATSDR. (2000). *Toxicological profile for toluene*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Center for Disease Control, U.S. Department of Health and Human Services [Online]. Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp56.pdf>[2012, May 21].
- ATSDR. (2008). *Toxicological profile for xylene*. Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Center for Disease Control, U.S. Department of Health and Human Services [Online]. Available: <http://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp71.pdf>[2012, May 21].
- Black, M. S., & Worthan, A. (1995). Development of a school re-occupancy plan following evacuation due to IAQ complaints-a case study. *Proceeding of the ASHRAE IAQ's 95 Conference*, 25-28.
- Franklin, P. J. (2007). Indoor air quality and respiratory health of children. *Pediatric Respiratory Reviews*, 8, 281-286.
- IARC. (2012). *Agency Classified the IARC Monographs, Volume 1-104*. World Health Organization, International Agency for Research on Cancer [Online]. Available: <http://mono graphs.iarc.fr/ENG/Classification/index.php>[2012, May 21].
- Jaakkola, J. J., Parise, H., Kislitsin, V., Lebedeva, N. I., & Spengler, J. D. (2004). Asthma, wheezing, and allergies in Ru-

- ssian schoolchildren in relation to new surface materials in the home. *American Journal of Public Health*, 94, 560-562.
- Jung, J. H., Shon, B. H., & Phee, Y. G. (2012). Concentration and distribution characteristics of PM10 in high schools in the Ulsan Metropolitan Area. *Korean Journal of Environmental Health*, 38(1), 42-50.
- Laurent, A. M., Person, A., Petit-Coviaux, F., Le Moullec, Y., & Festy, B. (1993). *Chemical characterization of indoor air quality inside schools in Paris*. In: Proceedings of Indoor Air '93: The 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate, Helsinki, Finland, 3, 23-28.
- Mendell, M. J., Health, G. A. (2005) Do indoor pollutants and thermal conditions in schools influence student performance? A critical review of the literature. *Indoor Air*, 15, 27-52.
- Mølhave, L., Bach, B., & Federsen, O. F. (1985). Human reactions to low concentrations of volatile organic compounds. *Environment International*, 12, 167-175.
- Mølhave, L., Liu, Z., Jorgensen, A. H., Pederson, O. F., & Kjaergaard, S. K. (1993). Sensory and physiological effects on humans of combined exposure to air temperatures and volatile organic compounds. *Indoor Air*, 3, 155-169.
- Norback, D. (1995). Subjective indoor air quality in schools the influence of high room temperature, carpeting, fleecy wall materials and volatile organic compounds. *Indoor Air*, 5, 237-246.
- Otto, D. A., Hundnell, H. K., House, D. E., Mølhave, L., & Count, W. (1992). Exposure of humans to a volatile organic mixture. I. Behavioral assessment. *Archives of Environmental Health*, 47, 23-30.
- Rumchev, K., Spickett, J., Bulsara, M., Phillips, M., & Stick, S. (2004). Association of domestic exposure to volatile organic compounds with asthma in young children. *Thorax*, 59, 746-751.
- Scheepers, P., Konings, J., Denireal, G., Gaga, E. O., Anizion, R., Peer, P., et al. (2010). Determination of exposure to benzene, toluene and xylene in Turkish primary school children by analysis of breath and by environmental passive sampling. *Science of the Total Environment*, 408, 4863-4870.
- Sofuoglu, S. C., Aslan, G., Inal, F., & Sofuoglu, A. (2011). An Assessment of indoor air concentrations and health risks of volatile organic compounds in three primary schools. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 214(1), 36-46.
- Stranger, M., Potgieter-Vermaak S., & Grieken, R. V. (2008). Characterization of indoor air quality in primary schools in Antwerp, Belgium. *Indoor Air*, 18, 454-463.
- Yang, W., Sohn, J., Kim, J., Son, B., & Park, J. (2009). Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea. *Journal of Environmental Management*, 90, 348-354.