

어린이 주요활동공간의 휘발성유기화합물류 노출로 인한 건강위해성 평가 - 초등학교 및 학원을 중심으로

김호현 · 임영욱 · 이청수 · 김태훈 · 박주희 · 전준민¹⁾ · 신동천²⁾ · 양지연*
연세대학교 의과대학 환경공해연구소, ¹⁾순천제일대학 토목환경과, ²⁾연세대학교 의과대학 예방의학교실

Health risk assessment of VOCs in the activities space of children : Focused on elementary-schools and academies

Ho-Hyun Kim · Young-Wook Lim · Chung-Soo Lee · Tae-Hoon Kim · Ju-Hee Park · Jun-Min Jeon¹⁾ ·
Dong-Chun Shin²⁾ and Ji-Yeon Yang*

Institute for Environmental Research, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea

¹⁾*Department of Civil & Environmental Eng, Suncheon first College, Suncheon, Korea*

²⁾*Department of Preventive Medicine, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea*

Abstract

This study was to assess the lifetime cancer and non-cancer risk on exposure to volatile organic compounds (VOCs) in young children at elementary-schools and academies in Korea. The samples were collected at children's facilities (50 elementary-schools and 42 academies) in summer (Aug ~ Sept, 2008), winter (Dec 2008 ~ Feb, 2009) and Spring (Mar ~ Apr, 2009) periods, and analyzed by GC-MSD. We estimated the lifetime excess cancer risks (ECRs) of benzene and the hazard quotients (HQs) of non-carcinogens toluene, ethylbenzene, xylene and styrene. In addition, for carcinogens, the excess cancer risk (ECR) was calculated by considering the process of deciding cancer potency factor (CPF) and age dependent adjust Factor (ADAF) from the data in adults. The average ECRs of benzene for young children were $1 \times 10^{-7} \sim 1 \times 10^{-9}$ level in all facilities. HQs of four non-carcinogens did not exceed 1.0 for all subjects in all facilities.

keywords : Elementary-schools, Academies, VOCs, Risk assessment

* Corresponding author. Tel:+82-2-2228-1896, E-mail : jyyang67@yuhs.ac

* 투고일 : 2011.08.18 1차수정일 : 2011.11.30 게재확정일 : 2011.12.12

1. 서 론

학교 교실의 실내공기 문제는 이용자들의 건강 취약성으로 인해 민감할 수 있고, 언제나 쉽게 학교 관리자, 학부모 및 학생에게 제공 되는 정보가 아니므로 어린이 건강에 있어서 매우 중요하다. 특히, 초등학교는 가정과 함께 하루의 대부분의 시간을 보내는 어린이의 대표 공공시설이며, 유해물질에 노출되어 어린이의 건강을 위협할 수 있는 다양한 오염원이 포함된 실내공간이다(Aprea et al., 2000; Commission, 2004). 어린이는 성인에 비해 동일 조건 노출 시 건강상의 유해영향이 더욱 악화될 수 있으므로(Kulkarni and Grigg, 2008), 어린이 전용시설의 환경노출로 인한 건강유해영향은 보건학적으로 매우 의미있다고 할 수 있다.

Norback et al.(1990)의 연구에서는 6개 초등학교 어린이의 휘발성유기화합물류(Volatile organic compounds, VOCs)노출에 의한 새집증후군(Sick building syndrome, SBS)과의 관련성에 대한 연구가 있었고, Mukerjee et al.(2009)도 미국 내 25개 학교 환경의 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 등의 VOCs 평가를 수행하였다. 최근 Kim et al.(2010)의 전국단위 초등학교 실내외 공기질과 초등학교생의 알레르기질환과의 상관성 연구에서 일부 VOCs 물질과 미세먼지(PM-10)의 관련성을 언급하였고, 그 외 선행연구(Dockery et al., 1993; Pope et al., 1995; Laden et al., 2001)에서 VOCs 노출과 건강영향간에 관련성을 보고하였다. VOCs 중 톨루엔과 벤젠은 상호작용에 의해 비발암영향으로서 생체조직의 손상에 대한 인체의 국소적인 방어보

호반응인 병리학적 염증(inflammation) 반응을 유발할 수 있다(Kotzias et al., 2009).

또한, 최근 높아진 교육열로 인한 방과 후 각종 학원 즉, 학습(영어, 산술 등)학원, 미술, 체육 및 음악 등 예체능 학원은 어린이 교육 문화의 확대 보급으로 인해 이용 빈도가 높아 학교 다음인 제2의 교육공간이기도 하다.

따라서, 본 연구에서는 만 7-12세의 어린이가 주로 생활하는 초등학교 및 다양한 종류의 학습기관인 학원 즉, 가정이외의 어린이 주요활동공간을 대상으로 VOCs 의 농도 분포 및 노출특성을 반영한 시나리오 구성을 통한 건강위해도를 산출하고 어린이 시설의 위해도 관리를 위한 기초자료 제공에 그 목적이 있다.

2. 연구 및 방법

2.1. 측정대상시설 및 조사 주요 내용

어린이 주요 활동공간은 초등학교 및 학원을 선정하고 전국 5개 도시(서울, 인천, 남양주, 천안 및 여수)의 초등학교 50개교 및 학원 46개원을 최종 조사하였다. 초등학교의 경우 지역별 10개교씩 조사되었고, 학원의 경우도 지역별 10개원씩 보습학원 및 예체능학원으로 구분하여 각각 조사하였으나, 4개 학원에서 3차(춘계)조사를 거부하여 최종 46개시설을 조사하였다. 참고적으로 '08년도 기준으로 전국단위 국·공립초등학교는 5,651곳, 사립학교 74곳으로 지역별로는 서울과 경기도에 가장 많이 위치하였다. 본 연구에서 사립초등학교는 장소 협조 등의 문제로 포함되지 않았다. 학원의 전국 현황을

살펴보면 보습학원이 20,575곳(약 40%)과 예체능 학원 중 음악학원이 14,116곳(약 30%)이 가장 많이 운영되고 있었고, 그 외 미술학원, 체육학원(태권도 등) 등이 분포하므로 4개 학원류를 중심으로 조사하였다. 초등학교 및 학원의 전국단위 분포를 감안할 때 모집단을 대표할만한 평가대상 시설수를 선정해서 조사하기에는 현실적인 제한점이 있었고, 대도시, 중소도시, 공단지역을 포함하고, 신축된 곳도 포함되도록 구성 하였다.

하계(1차)조사는 2008년 8월 - 9월, 2개월 동안 대상 시설 섭외 및 측정이 동시에 수행하였고, 동계(2차)조사는 2008년 12월 - 2009년 2월, 춘계(3차)조사는 3-4월에 걸쳐 최종 시설별 3회 실시하였다. 시설 내 주 활동공간을 실내 대표 지점 즉, 초등학교의 경우 교실, 학원의 경우 미술실습실, 악기연습실, 체육주요활동 공간 등에서 시설별 1회 조사하였다.

2.2. 평가 대상 물질

“다중이용시설 등의 실내공기질관리법” 상의 시행규칙에서 제시하고 있는 항목 및 선행 어린이 시설 관련 연구(Kim et al., 2010; 양지연 et al., 2010)에서 주로 평가되었던 주요 항목인 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene) 및 스티렌(Styrene) 5종을 주요 평가물질로 선정하였다.

2.3. 시료채취, 분석 및 정도관리

실내공기 중 VOCs의 시료채취 및 분석방법은 환경부의 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”에서 규정하고 있는 실내공기질 공정시험

방법에 준하여 실시하였다. 시료 채취는 운영 시간대에 실시하는 것을 원칙으로 하였으며, 채취장소 및 지점은 대상 시설의 구조, 특성, 발생원, 환기시설의 운영패턴 등을 고려하여 주요 놀이 공간 즉, 초등학교의 경우 교실, 학원의 경우 미술실습실, 악기연습실, 운동을 위한 활동 공간 등에서 장소를 선정하였다.

공기 중 VOCs는 Tenax-TA 고체 흡착관을 이용하여 흡착한 후, 열탈착 장치가 연결된 GC/MSD(Gas Chromatography/Mass Selected Detector)로 분석하였다.

본 연구는 전국 규모의 조사이기 때문에 측정 및 분석의 효율을 고려하여 3개 기관이 각각 샘플링 및 분석을 담당하였다. 그러나 동일 기관이 아닌 여러 기관에서의 측정 및 분석결과에 대한 정도관리를 위해 공기채취 펌프의 보정, VOCs 흡착관 청정도 평가, VOCs 흡착관 이력관리 및 RRT(Round Robin Test), 즉 임의의 농도의 측정시료의 상호비교시험을 3차에 걸쳐 실시하였다. 참여기관의 측정/분석에 대한 정도 관리를 위해 1-2차는 동일 지점에서 동시에 시료 채취한 후 정량 분석하였으며, 3차는 분석자료의 신뢰성 제고를 위해 VOCs 물질만을 대상으로 표준가스 대비 허용오차를 평가하였다. 1-2차의 측정 결과는 15% 내외의 허용 오차범위내의 오차비율을 나타냈고, 3차의 표준가스에 대한 분석기관별 농도는 표준편차는 10% 이내의 재현성을 나타냈다. 물질별 검출한계(Limit of detection : LOD)는 VOCs 중 벤젠 $0.3\mu\text{g}/\text{m}^3$, 톨루엔 $0.25\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠 $0.25\mu\text{g}/\text{m}^3$, m,p-자일렌 $0.35\mu\text{g}/\text{m}^3$, o-자일렌 $0.24\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 스티렌 $0.34\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

Table 1. Dose response assessment for carcinogen.

Chemicals	Classification of material	Exposure route	Endpoint	Cancer potency factor ((mg/kg/day) ⁻¹)	Unit risk ((μg/m ³) ⁻¹)	Reference
Benzene	Carcinogenic	Inhalation	Decreased lymphocyte	3.60×10 ⁻²	6.00×10 ⁻⁶	Rinsky(1987)

2.4. 연구대상물질의 평가 분류 및 용량-반응 자료

위험성 분류는 영유아 및 어린 시기 노출로 인한 독성 영향 중심으로 자료를 조사하였고, 다음으로 발암성, 생식독성, 성장독성, 신경독성, 면역독성 중심으로 자료 수집 및 고찰하였다. 자료 고찰에 의해 인체 발암성 가능 물질은 발암성 물질로, 노출 시기에 상관없이 노출량에 의한 독성 유발물질은 비발암독성 물질로 구분하였다.

평가 대상 VOCs의 위험성 구분은 벤젠은 발암성물질로 분류하였고, 톨루엔, 자일렌, 스티렌 및 에틸벤젠 4종은 비발암물질로 최종 분류하였다. 대상물질의 건강위해성 평가를 위한 용량-반응 자료는 US EPA의 IRIS(Integrated Risk Information System) 및 WHO(World Health Organization)에서 공식적으로 제시하고 있는 독성 자료들을 수집, 고찰하여 결정하였다. 물질별 독성 정보 등은 표 1, 2와 같다.

2.5. 노출 형태 조사

초등학교 및 학원의 이용시간 등의 일반적인 내용은 교사를 통한 면접식 설문조사를 실시하였고, 노출량 계산을 위한 인자 값 도출 및 노출 형태분석을 위한 조사는 초등학교의 경우 2개 연령그룹(저학년 및 고학년)으로 분류하여 일반교실과 과학실, 컴퓨터실 등의 특수실에서 수업 시간 및 쉬는 시간 등을 구분하여 총 35명을 관찰 조사하였다. 학원의 경우 교사 및 원장을 통해 면접식 설문을 실시하였고, 학원 이용하는 일반적인 질문 및 학원 형태별(보습학원, 예체능학원) 특이적 노출이 있는지를 조사하였다. 학원시설의 노출량 계산을 위한 인자 값 도출 및 노출 형태분석을 위한 조사는 학원별로 4-5명씩 총 14명을 관찰 조사하였다.

관찰조사방법은 50분간의 비디오 촬영을 통한 관독분석을 실시하였다. 인자값의 결정 및 특이적 노출형태를 살펴보기 위해 초등학교의 경우 수업시간 50분을 관찰과 동시에 비디오촬영

Table 2. Dose response assessment for non-carcinogen.

Chemicals	Classification of material	Exposure route	Endpoint	N(L)OAEL (mg/kg-day) (mg/m ³)	UF	RfC(D) (mg/kg-day) (mg/m ³)	Reference
Toluene	Non Carcinogenic	Inhalation	Neurological effects	128	10	5	Foo(1993)
Xylene	Non carcinogenic	Inhalation	neurologic	39	300	0.1	Korsak(1994)
Styrene	Non Carcinogenic	Inhalation	CNS effects	94	30	1.0	Mutti(1981)
Ethylbenzene	Non Carcinogenic	Inhalation	Lung	434	300	1.0	Andrew (1981)

Table 2. Exposure Factor(1) – inhalation, body weight and exposure period.

Exposure Factor	Symbol	Age(years)		Probability distribution	Source
		7-9	10-12		
Daily Inhalation rate(m ³ /day)	BRm	12.0	13.5	Log-normal	US EPA CEFH(2002)
Activity Inhalation ate(m ³ /hr)	BRh	1.9	1.9	Triangle	US EPA CEFH(2002)
Body Weight(kg)	BW	28	40	Log-normal	ME KEHF(2007)
Exposure period(year)	EDindoor	3.0	3.0	-	
Number of standard time exposure(days)	ATnc	1095	1095	-	This study
Number of child life time exposure(days)	AT	25550	25550	-	ME KEHF(2007)

영을 진행하였다. 또한 활동성이 좋은 점심시간 후 쉬는 시간 등을 추가적으로 조사하였다. 학원의 경우도 학원형태별 주요 시간을 원장 및 교사의 자문을 바탕으로 학습형태 관찰을 통한 특이적 노출 형태가 있는지를 판단하였고, 놀이 형태에서 서서 있기, 앉아 있기, 걷기, 뛰기, 뒹굴기 등의 형태를 조사하였다. 결과적으로 관찰 및 비디오관독을 통해 초등학교 공간의 경우 누워있기, 앉아있기, 기어다니기, 서서있기 및 뛰기의 형태를 반영하고, 학원의 경우 보습학원 및 예능학원의 경우 누워있기, 앉아있기, 걷기 및 뛰기 등을 반영하고, 체육학원의 경우 뒹굴기를 포함한 학원의 일반적인 놀이형태를 적용하였다.

연간노출횟수는 본 연구의 설문조사를 토대로 학교시설의 경우 설문조사를 토대로 초등학교 평균 연간 수업일수(205일)를 사용하였고, 학

원시설의 경우 연간 수업일수에서 법정공휴일을 제외한 136일을 사용하였다. 기타 비디오관독 등 관찰 및 자료 조사를 통한 노출변수에 대한 정보는 표 2 및 3에 구체적으로 제시하였다.

2.6. 건강위해성 평가

본 연구에서는 다음과 같이 대상 시설별 어린이 위해성 평가를 실시하였다. 대상 시설 및 연령은 저학년군인 만 7~9세 및 고학년군인 만 10세~12세로 구분하였다.

시설별, 물질별, 연령별 평생평균일일노출량(LADD)의 확률분포값을 이용하여 인체 위해 확률분포값 산정하였다. 최종적으로 인체 위해 확률분포의 50 percentile값 및 95 percentile값을 이용하였고, ECR는 10⁻⁶~10⁻⁴ 수준, HI 및 HQ는 0.1~1 초과 여부를 고려하여 위해 수준을 평가하였다.

Table 3. Exposure Factor(2) – daily exposure and playing time

Exposure Factor	Symbol	Elementary School	Academy	Probability distribution	Source
daily exposure (hr)	ETindoor	4.9	1.1	Uniform	This study
Number of year exposure (days/yr)	EFindoor	205	136	Triangle	
daily playing (hr)	ETj	4.9	1.1	Uniform	

Table 4. Concentration of the target compounds and indoor/outdoor ratio unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$

Substance	Location					
	Elementary school			Academy		
	Mean	Min~Max	I/O ratio	Mean	Min~Max	I/O ratio
Benzene	4.89	0.33~16.60	0.96	5.05	0.47~20.04	1.06
Toluene	42.63	0.88~273.29	1.16	39.02	1.08~116.91	1.21
Ethylbenzene	7.35	0.24~64.55	1.31	7.99	0.70~67.76	1.44
Xylene	17.27	0.17~125.99	1.34	17.45	0.30~93.33	1.52
Styrene	3.76	0.10~62.54	1.67	4.94	0.13~78.60	3.55

입의 농도로 오염된 실내공기에 평생 노출되며 생활할 경우의 인체 노출량은 오염농도, 일일 호흡률(inhalation rate), 체중(body weight), 노출빈도(exposure frequency), 노출기간(exposure duration), 기대수명(lifetime) 등을 고려하여 산출하였다.

최종적으로, 발암성 물질에 의한 평생초과발암위해도(Excess Cancer Risk; ECR)와 비발암 물질에 의한 독성위험값(hazardous quotient; HQ)은 다음과 같은 수식을 이용되었고, 비발암물질의 RfC 값은 US EPA에서 미국 일반 성인의 일일호흡률 및 체중을 이용하여 단위를 mg/m^3 로 환산하였기에 본 연구에서는 이를 다시 고려하여 RfC의 단위를

인체일일노출량과 동일한 $\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$ 로 보정하여 HQ를 산출하였다.

3. 결 과

3.1. 대상 시설의 실내 유해 물질 농도 분포

초등학교 및 학원 내 실내공기 중 알데히드류를 측정된 결과를 표 4에 제시하였다. VOCs 중 톨루엔의 평균 검출량이 가장 높았고, 자일렌 > 에틸벤젠 > 벤젠 > 스틸렌의 순으로 나타났다. 톨루엔의 경우 초등학교 $42.63\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대값 273.29), 학원 $39.02\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대값 116.91) 순으로 나타났고, m,p-Xylene의 경우 학교시설

$$ECR = LADD(\text{mg}/\text{kg}/\text{day}) \times Slop \ factor((\text{mg}/\text{kg}/\text{day})^{-1})$$

Where ECR : Excess cancer risk
 LADD : Lifetime average daily dose ($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)
 Slop factor : Concentration of chemicals in indoor air at facility (mg/m^3)

$$HQ = \frac{LADD(\text{mg}/\text{kg}/\text{day})}{RfC(\text{mg}/\text{m}^3) \times BW(\text{kg}) \times IR(\text{m}^3/\text{day})}$$

Where HQ : Hazard Quotient
 LADD : Lifetime average daily dose ($\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$)
 RfC : Reference concentration (mg/m^3)
 BW : Body weight at age (kg)
 IR : Inhalation rate for exposure scenario, k and facility (m^3/day)

12.97 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대값 125.99), 학원시설 13.01 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대값 93.33)의 평균 검출농도는 유사하였다.

대상시설별 실내, 외 농도비(I/O ratio)를 살펴보면, 학교(1.16)와 학원(1.21)시설에서 ratio비율이 1을 초과하여 실내오염원이 존재하는 것으로 나타났다. 조사 대상 물질 중 초등학교 내 벤젠만이 1을 초과하지 않고 근접한 수준이었고(0.96), 그 외 시설 및 물질에서는 실내외 농도비가 1-3의 수준으로 나타나 위해성평가 대부분의 물질이 초등학교 및 학원에서 실내오염원이 명확하게 존재하는 것으로 조사되었다.

3.2. 건강 위해성평가

3.2.1. 발암성 물질의 평가

어린이 민감도를 고려하여 ADAF를 보정한 초과발암위해도 50% 해당값은 총 노출경로 즉, 흡입에 의한 벤젠의 총 발암위해도는 초등학교 및 학원에서 10^{-9} ~ 10^{-8} 범위로 낮은 초과발암위해도로 산출되었다.

95% 해당값 흡입 노출 초과발암위해도에서도 벤젠의 총 초과발암위해도는 10^{-8} ~ 10^{-7} 범위

로 산출되어 안전역 수준이었다(표 5).

3.2.2. 비발암성 물질의 평가

비발암성 물질로 인한 비발암독성위험값, HQ 50~95 percentile 해당값은 <0.001~0.1 범위로 산출되었으며, 대상 발암 물질 중 초등학교에서 자일렌이 비발암독성위험값이 0.1로 가장 높은 위해 수준을 보였다. 대상 비발암독성물질, 4종의 총비발암독성위험값에 대한 물질별 독성 위험기여율은 자일렌 > 톨루엔 > 에틸벤젠 > 스틸렌 순으로 나타났다(표 6).

결과적으로 비발암성 물질로 인한 비발암독성위험값, HQ 50 ~ 95 percentile값에서 위해수준 1을 초과하는 시설은 없었다.

4. 고 찰

초등학교 및 학원 이용 어린이에 대한 유해 물질의 위해성 평가 수행 결과, 발암 및 비발암 위해도에서 모두 안전역 수준으로 산출되었다. 저학년과 고학년의 연령별 평균위해도에 따른

Table 5. Lifetime excess cancer risk estimates for 50th and 95th percentile value of carcinogens application ADAF.

Facility	Age	ADAF_Lifetime Excess Cancer Risk	
		Benzene	
		50 th	95 th
Total(Inhalation) Cancer Risk			
Elementary school	7-9 age	2.26 $\times 10^{-8}$	4.59 $\times 10^{-7}$
	10-12 age	1.79 $\times 10^{-8}$	3.60 $\times 10^{-7}$
	Average	2.03 $\times 10^{-8}$	4.10 $\times 10^{-8}$
Academy	7-9 age	7.49 $\times 10^{-9}$	1.30 $\times 10^{-7}$
	10-12 age	6.28 $\times 10^{-9}$	9.88 $\times 10^{-8}$
	Average	6.89 $\times 10^{-9}$	1.14 $\times 10^{-7}$

차이는 없었다. 이는 호흡 노출만을 반영한 결과로 인해, 연령대별 특성이 명확히 반영되지 않은 결과 및 세부 연령대별 호흡률에 대한 정보가 없는 제한점으로 인한 결과이기도 하다. 이는 양지연 et al.(2010)의 VOCs 대상물질로 보육시설 등의 위해도 평가 결과($10^{-7} \sim 10^{-5}$) 보다 낮은 수준이며, 상대적으로 보육시설 등에 비해 이용 시간에 따른 노출시간이 작고, 보육시설에 비해 대상평가 물질이 낮은 농도분포를 나타냈기 때문으로 추정된다. 특히 학원의 경우 초등학교에 비해 노출시간이 현저히 낮으므로 (학교 4-6시간, 학원 1-3시간) 위해성평가의 노출시나리오에 의한 위해 산출 시 그 위하는 낮을 수 있다. 참고적으로 담배체/다경로 인체 노출 평가 모형을 보정하기 위해 모형에 이용된 수많은 인자들 중 예측 결과에 유의한 영향을 미치는 인자들을 도출하는 민감도 분석을 실시하는데, VOCs의 경우 흡입 노출로 인한 단일경로로 위해도를 산출하였고, 노출시간 및 오염도가 전체 위해도에 지배적인 인자로 작용하므로 별도의 민감도 분석은 실시하지 않았다.

그럼에도 불구하고 비발암위해도(위해지수) 평가 결과 자일렌에서 비발암위해도(위해지수) 0.1 초과 수준으로 나타나 화학물질에 민감한 어린이 대상시설임을 감안할 때 관리가 요구된다. 참고적으로 Ginsberg et al.(2003)은 어린이에 대한 유해물질의 약물동력학적 과정이 어른과 다르기 때문에 용량-반응 평가 시 노출 시기에 따른 민감도를 고려할 수 있는 과정이 필요하다고 보고하였다. 그 예로서 독성물질의 체내 반감기도 연령군에 따라 성인에 비해 약 5배 이상 지연된다고 발표한 바 있다. 더불어, 동일한 농도로 성인 시기에 노출됨으로 인해 발생하는 암 비율보다 어린 시기 노출로 인한 암 발생률이 평균 10배 정도 높다는 것이 관찰되었다. 즉 생애 초기 노출로 인한 위해도는 평생 노출로 인한 위해도와 비교할 수 있으며, 이후 동일한 기간 동안 노출되어 발생할 수 있는 위해도보다 약 10배 정도 큰 위해를 갖는다고 주장하였다. 미국 환경보호청에서는 이를 근거로 하여 성인 발암성 자료를 이용하여 어린이 발암 위해성을 평가할 경우에는 노출 연령에 따

Table 6. Total Hazard Quotient(HQ) estimates for 50th and 95th percentile value of non-carcinogenic.

Facility	Age	Total hazard quotient							
		Styrene		Ethylbenzene		Toluene		Xylene	
		50 th	95 th	50 th	95 th	50 th	95 th	50 th	95 th
Total(Inhalation) cancer risk									
Elementary school	7-9 age	<0.001	0.002	0.001	0.004	0.020	0.077	0.016	0.101
	10-12 age	<0.001	0.002	0.001	0.003	0.017	0.057	0.012	0.078
	Average	<0.001	0.002	0.001	0.004	0.019	0.067	0.014	0.090
Academy	7-9 age	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.001	0.002	0.002	0.011
	10-12 age	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.002	0.009
	Average	<0.001	<0.001	<0.001	<0.001	0.001	0.002	0.002	0.010

라 독성값의 민감성을 보정할 수 있는 ADAF를 제안하고 있다. 즉, 대상군 중 만 2세 이하인 영아의 발암물질에 대한 ADAF는 10, 만 3~9세인 유아, 미취학어린이 및 취학어린이의 ADAF는 3을 적용하였다(US EPA 2005).

VOCs의 경우 교실에 비해 컴퓨터실 등 특수실의 농도가 높았고(I/O ratio 1을 상회), 신축 학교이거나 최근에 교실 및 특수실의 내부공사 및 책걸상, 사물함 등을 교체한 초등학교에서 높게 조사되었다. 일부 학교에서는 바닥코팅재, 액상왁스 등을 교실에 방치하고 있어 VOCs 물질의 추가노출 오염원이 존재하였다. 이러한 오염원은 창고 등 주요 관리자에 의해 보관 필요 후, 코팅제 및 왁스 작업 시 방학 및 학기 중 작업 시 주말 작업을 원칙으로 하고 작업 후 일정기간 환기가 이루어질 수 있도록 지도 교육이 요구된다. 임영욱 et al.(2008)의 전국단위 초등학교 교실 내 유해환경평가연구에 의하면 벤젠 $14.03\mu\text{g}/\text{m}^3$, 톨루엔 $81.17\mu\text{g}/\text{m}^3$, 에틸벤젠 $28.33\mu\text{g}/\text{m}^3$, 자일렌 $50.15\mu\text{g}/\text{m}^3$ 및 스티렌 $9.95\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 본 연구의 결과보다 높게 측정되었다. 또한 실내의 농도비가 모든 물질에서 1을 초과하고 있어(벤젠 1.2, 톨루엔 1.5, 에틸벤젠 1.4, 자일렌 1.6 및 스티렌 2.6), 본 연구결과와 유사한 경향성을 선행 보고하였다. 참고적으로 실내외 농도비(I/O ratio)가 1이상이면 실내오염원이 존재하는 것을 의미한다(Ilgen et al., 2001). 또한, 김호현 et al.(2008)의 천식발생률에 따른 초등학교 내 유해환경평가 연구에서 천식질환 발생률이 높은 학교에서 실내외 농도비(I/O ratio)가 더욱 높게 나타나, 천식질환발생률이 낮은 학교에 비해 높은 학교에서 실내외

오염원이 더욱 다양하게 존재함을 유추하였다.

초등학생 대상의 주요 학원의 구분(보습, 예능 및 체육학원)에 따른 VOCs의 통계적으로 유의한 농도차이는 없었고, 시설의 건축년수별 비교한 결과 신축시설이 높게 측정되었으나, 통계적으로 유의한 차이는 아니었다. 학원형태로 살펴보면 미술학원의 경우 각종 출입문 및 책상 페인트작업 및 협소한 공간 내 각종 학습자료 및 환기장치 부족으로 인한 문제점이 존재하였다.

벤젠 노출의 경우 학원시설 내의 제품 등에 의한 기여도도 있지만 학교시설과 다른 점은 학원의 경우 단독건물 내 다양한 업종의 여러 점포가 입점하여 있는 곳이 많음에 따라 직간접적인 흡연에 의한 영향에 기인하는 것으로 판단된다. 본 연구결과표에는 제시하지 않았으나, 학교시설의 경우 측정 장소에 따라 과학실 등 특수실($5.12\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 교실($4.93\mu\text{g}/\text{m}^3$) > 컴퓨터실($4.12\mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 높게 조사되었고, 최근 2년 이내 공사유무로 구분하여 비교한 결과 공사를 한 경우가 높게 나타났다. 이는 환기량 부족, 실내 건축자재, 페인트 및 접착제 등의 제품 방출과 실내 기온 상승에 의해 배출된 영향으로 판단된다. 또한 주변지역의 교통량에 영향에 따라 검출량의 차이가 없어 실내 오염원이 존재하는 것으로 보여진다. 톨루엔 및 자일렌의 경우 초등학교 및 학원시설 내의 책상, 걸상, 책꽂이, 수납장 등 가구류 및 모니터, TV, 컴퓨터 등 전기, 전자제품, 건축자재, 페인트 및 접착제, 학교 및 학원 내 각종 학습자료 등 종합적으로 기인하는 것으로 알려져 있다(임영욱 등, 2008).

본 연구에서 6개 도시의 초등학교 및 초등학생들이 주로 이용하는 학원을 중심으로 실태조사를 실시하였으나, 전체 시설을 대표하는 시설이라고는 할 수 없으며, 노출량 산정을 위한 변수 및 시나리오 도출시 제한된 시간의 관찰로 인한 한계점도 존재한다.

5. 결 론

본 연구에서는 초등학교 및 학원의 실내 공기 중 VOCs 노출평가를 통해 저학년군인 만 7~9세 및 고학년군인 만 10세~12세로 구분하여 어린이 위해성 평가를 실시하였다. 어린이 민감도를 반영하기 위해 보수적인 평가인 ADAF를 적용하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

학교 및 학원에서 실내공기 중 벤젠노출로 인한 초과발암위해도가 1×10^{-7} 미만의 낮은 위해도를 나타내고 있어 적극적인 관리가 필요하지는 않았다. 그러나, 각 시설 1회 측정으로 인한 제한점을 존재하고, 초과사례도 있으므로 지속적인 관심과 관리가 요구된다. 비발암위해도 평가 시 대상 발암 물질 중 초등학교에서 자일렌이 HQ 0.1로 산출되어 어린이 민감도를 고려할 때 관리가 요구된다. 결과적으로 7~12세가 주로 이용하는 초등학교 및 학원의 경우 VOCs 물질로 인한 위해도는 전반적으로 안전한 수준이다. 그러나, 초등학교의 특수실과 일부 보습학원 및 예능학원 등에서 높은 농도로 분포하는 시설이 존재하므로 예방차원에서의 지속적인 모니터링과 유지 및 관리가 요구된다.

감사의 글

이 연구는 환경부(환경정책실 환경보건정책과)의 “어린이활동 공간 위해성평가” 사업 지원(’09~’10)으로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 김호현, 임영옥, 김창수, 김진용, 이청수, 양지연, 박중원, 신동천(2008) 천식발생율에 따른 초등학교 내 유해환경평가, 한국실내환경학회지, 5(1), 59-73.
- 양지연, 김호현, 양수희, 김선덕, 전준민, 신동천, 임영옥 (2010) 어린이 주요 활동 공간의 휘발성 유기화합물 노출로 인한 건강위해성 평가, 한국환경독성학회지, 25(1), 57-68.
- 임영옥, 이청수, 김호현, 양지연, 이건우, 손종렬, 박중원, 신동천 (2008) 전국 초등학교 교실 내 유해 환경 평가, 한국실내환경학회지, 5(1), 37-49.
- 환경부 (2007) 한국형 노출지수 개발 및 운용체계 구축 (KEHF), 차세대 핵심환경기술개발사업
- Andrew, F.D., Buschbom, R.L., Cannon, W.C., Miller, R.A., Montgomery, L.F., Phelps, D.W. and Sikov, M.R. (1981) Teratologic assessment of ethylbenzene and 2-ethoxyethanol, Battelle Pacific Northwest

- Laboratory, Richland, WA. PB, 83-2080, 74-108.
- Apra, C., Strambi, M., Novelli, M.T., Lunghini, L. and Bozzi, N. (2000) Biologic monitoring of exposure to organophosphorus pesticides in 195 Italian children, *Environmental Health Perspectives*, 108, 521-525.
- Commission of the European Communities (2004) Communication from the Commission to the Council, the European Parliament, the European Economic and Social Committee The European Speizer, F.E. (1993) An association between air pollution and mortality in six US cities, *New England Journal of Medicine*, 329, 1753-1759. *Environment & Health Action Plan 2004-2010*, (COM/2004/416).
- Dockery, D.W., Pope III, C.A., Xu, X., Spengler, J.D., Ware, J.H., Fay, M.E., Ferris Jr., B.G. and Speizer, F.E (1993) An Association between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities, *N Engl J Med*, 329, 1753-1759
- Foo, S.C., Jeyaratnam, J. and Koh, D. (1993) Chronic neurobehavioural effects of toluene, *British journal of industrial medicine*, 46, 783-495.
- Ginsberg, G.L. (2003) Assessing cancer risks from short-term exposures in children, *Risk Anal*, 23, 19-34.
- Ilgen, E., Karfich, N., Levsen K., Angerer, J., Schneider, P., Heinrich, J., Wichmann, H.E., Dunemann, L. and Begerow, J. (2001) Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment Part I. Indoor versus outdoor sources, the influence of traffic, *Atmospheric Environment*, 35, 1235-1252.
- Kim, H.H., Kim, C.S., Lim, Y.W., Suh, M.A. and Shin, D.C. (2010) Indoor and outdoor air quality and its relation to allergic diseases among children: A case study at a primary school in Korea, *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 4(3), 157-165.
- Korsak, Z., Wisniewska-Knypl, J. and Swiercz, R. (1994) Toxic effects of subchronic combined exposure to n-butyl alcohol and m-xylene in rats, *Int J Occup Med Environ Health*, 7, 155-166.
- Kotzias, D., Geiss, O., Tirendi, S., Barrero-Moreno, J., Reina, V., Gotti, A., Cimino-Reale, B., Marafante, E. and Sarigiannis, D. (2009) Exposure to multiple air contaminants in public buildings, schools and kindergartens the European indoor air monitoring and exposure assessment (AIRMEX) study, *Fresenius Environmental Bulletin*, 18(6), 1-12.
- Kulkarni, N. and Grigg, J. (2008) Effect of air pollution on children. *Paediatrics and Child Health* 18, 238-243.
- Laden, F., Schwartz, J., Speizer, F.E. and

- Dockery, D.W. (2001) Air pollution and mortality: a continued follow-up in the Harvard six cities study, *Epidemiology*, 12, S81.
- Mukerjee, S., Smith, L.A., Johnson, M.M., Neas, L.M. and Stallings, C.A. (2009) Spatial analysis and land use regression of VOCs and NO₂ from school-based urban air monitoring in Detroit/Dearborn, USA, 407, 4642-4651.
- Mutti, A., Mazzucchi, A., Rusticelli, P., Frigeri, G., Arfini, G. and Franchini, I. (1981) Exposure-effect and exposure-response relationships between occupational exposure to styrene and neuropsychological functions, *Am. J. Ind. Med.*, 5, 275-286.
- Norback, D., Torgen, M. and Edling, C. (1990) Volatile organic compounds, respirable dust and personal factors related to prevalence and incidence of sick building syndrome in primary schools, *Bri. J. Ind. Med.*, 47, 733-741.
- Pope III, C.A., Thun, M.J., Namboodiri, M.M., Dockery, D.W., Evans, J.S. and Speizer, F.E. (1995) Particulate pollution as a predictor of mortality in a prospective study of US adults, *American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine*, 151, 1743-1753.
- Rinsky, R.A., Smith, A.B. and Horning, R. (1987) Benzene and leukemia: an epidemiologic risk assessment, *N Engl J Med*, 316, 1044-1050.
- US EPA (2002) CEFH(Child-specific exposure factors handbook).
- US EPA (2005) Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens.
- Yang, W.H., Sohn, J.R., Kim, J.H., Son, B.S. and Park, J.C. (2009) Indoor air quality investigation according to age of the school buildings in Korea, *Journal of Environmental Management*, 90, 348-354.