

초등학교 및 학원 실내 공간 내 알데히드류 노출로 인한 건강위해성 평가

김호현 · 양지연 · 이청수 · 박주희 · 신동천¹⁾ · 임영욱*
연세대학교 의과대학 환경공해연구소, ¹⁾연세대학교 의과대학 예방의학교실

Health risk assessment for aldehydes exposure associated with elementary-schools and academies

Ho-Hyun Kim · Ji-Yeon Yang · Chung-Soo Lee · Ju-Hee Park · Dong-Chun Shin¹⁾ and
Young-Wook Lim*

Institute for Environmental Research, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea
¹⁾*Department of Preventive Medicine, Yonsei University College of Medicine, Seoul, Korea*

Abstract

The purpose of this study was to investigate the health risk and management of childhood exposure to indoor aldehydes in elementary-schools and academies. The samples were collected at children's facilities (50 elementary-schools and 46 academies) in summer (Aug ~ Sept, 2008), winter (Dec 2008 ~ Feb, 2009) and Spring (Mar ~ Apr, 2009) periods. The overall mean concentration of formaldehyde was 68.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ and 27.2% of exceeded the 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ by the school health guideline. The concentration ratio of Indoor air and outdoor air (I/O) of aldehydes exceeds 1.0. The level of indoor air contamination did appear to be high, and 24.6% of the academies evaluated had exceeded the formaldehyde level specified by the public health act (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$). We estimated the lifetime excess cancer risks (ECRs) of formaldehyde, and the hazard quotients (HQs) of non-carcinogens (acetaldehyde and benzaldehyde). 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) of the data of adults. The average ECRs of formaldehyde for young children were 1×10^{-6} ~ 1×10^{-5} level in all facilities. HQs of formaldehyde did exceed 0.1 for all subjects in elementary school.

Keywords : Aldehydes, Health risk assessment, Elementary-schools, Academies

* Corresponding author. Tel:+82-2-2228-1898, E-mail : envlim@yuhs.ac

Received 26 December, 2011 ; Revised 17 February, 2012 ; Accepted 22 February, 2012

1. 서론

초등학교는 어린이들이 많은 시간을 보내는 공공시설이며, 유해물질에 노출되어 어린이의 건강을 위협할 수 있는 대표시설이다 (Aprea et al., 2000). 또한 학교 내의 대부분의 시간을 실내공간인 교실, 음악실, 과학실, 컴퓨터실 및 실내체육시설 등의 특수실에서 다양한 실내 오염원에 의해 다양한 농도의 유해물질에 노출된다. 기존의 어린이를 대상으로 한 연구들의 주요결과를 살펴보면 Hwang et al.(2006) 과 McConnell et al.(2003)은 학교 외부 공기 또는 외부 오염원에 의한 유해영향을 주장하였고, Brunekreef et al.(1997)과 Nitschke et al.(2006)은 실내 노출에 의한 영향으로 분석하였다. 이러한 선행연구들은 대상물질의 차이, 연구설계 및 기간 등의 차이로 인한 결과이다. 더불어 실내외의 복합적인 독성학적 관련성을 주장하는 연구도 있었다 (Mi et al., 2006; Zhao et al., 2008). 또한, 최근 높아진 교육열로 인한 방과 후 각종 학원 즉, 학습(영어, 산술 등)학원, 미술 및 음악 등 예체능 학원을 통한 어린이 교육문화의 확대 보급을 통해 이용 빈도가 높아지고 있는 어린이의 제 2의 교육공간이기도 하다.

어린이 시설의 대표적인 유해물질은 폼알데하이드 (Formaldehyde, 이하 HCHO)는 건설, 목재를 포함한 가구, 텍스타일 (Textile), 카펫 (Carpet) 등 생활 및 화학 산업에 중요한 물질이며, 비인강암 (Nasopharyngeal cancer) 및 백혈병 (Leukemia)을 유발하는 발암물질로도 확인되었고 (IARC, 2006), 비발암영향으로서 생

체조직의 손상에 대한 인체의 국소적인 방어보호반응인 병리학적 염증 (inflammation) 반응을 일으킬 수도 있다 (Kotzias et al., 2009). 또한 HCHO는 인체 내 자연대사산물로서 고농도 노출 시 급성 독성의 위해도가 증가하고, 저농도로 장기적으로 노출 시 만성독성을 일으킬 수 있다 (IARC, 2006). 최근에는 HCHO에 오염된 음식, 음용수 및 실내공기에 의해 알레르기, 천식 및 폐기능 장애 등의 유해영향도 보고되고 있다 (Tang et al., 2009). 특히, 어린이는 성인과 함께 노출 시 건강상의 유해영향이 더욱 악화될 수 있으므로 (Kulkarni and Grigg, 2008), 어린이의 환경노출로 인한 건강유해영향은 환경보건학적으로 매우 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 만 7-12세의 어린이가 주로 생활하는 초등학교 및 다양한 종류의 학습기관인 학원 즉, 가정이외의 어린이 주요활동 공간을 대상으로 알데하이드류 (Aldehydes)의 농도 분포 및 노출특성을 반영한 시나리오 구성을 통한 건강위해성평가를 통해 장기적인 어린이 시설의 위해도 관리에 그 목적이 있다.

2. 연구방법

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 46개 원을 최종 조사하였다. 초등학교의 경우 지역별 10개교씩 조사되었고, 학원의 경우도 지역별 10

개원씩 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 학원을 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 대표지점 즉, 초등학교의 경우 교실, 학원의 경우 미술실습실, 악기연습실, 체육주요활동 공간 등에서 시설별 1회 조사하였다.

2.2 측정, 분석 및 정도관리

측정 및 포집은 각각의 초등학교 및 학원에서 교실에서 벽으로부터 최소 1m이상 떨어진 위치에서 바닥면으로부터 1.0~1.5m 높이에 시

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

실내공간에서 알데하이드류 시료채취의 경우 aldehyde sampler $\Sigma 100H$ (SIBATA, Japan)를 사용하여 350mg의 DNPH-silica (1.0mg DNPH)를 충전한 1.0cm (i.d.) \times 2.0cm (o.d.) \times 4.3cm (total length)의 cartridge인 DNPH-silica cartridge (Supelco, USA)에 오존의 간섭을 제거하기 위한 0.46cm (I.D.) \times 10cm의 copper tube에 KI (Potassium iodide) 결정을 채운 오존 스크러버 카트리지를 (Ozone scrubber cartridge)를 DNPH-silica cartridge 앞에 장착하여 0.5 l/min의 유량으로 30분 동안 시료를 채취하였다 (다중이용시설 실내 공기질관리법의 공정시험방법에 준함). 채취된 시료에 대한 분석은 HPLC alliance separation module 2690/dual λ absorbance detector 2487 모델을 이용하였다.

본 연구는 전국 규모의 조사이기 때문에 시료 채취의 효율성을 고려하여 3개 기관이 참여하였고, 분석은 본 연구기관이 수행하였다. 그러나 동일 기관이 아닌 여러 기관에서의 측정에 대한 정도관리를 위해 공기채취 펌프의 보정, DNPH 카트리지의 청정도 평가를 실시하였다. 또한 임의의 농도의 측정시료의 비교시험을 3차에 걸쳐 실시하였다. 참여기관의 측정에 대한 정도 관리를 위해 1-2차는 동일 지점에서 동시에 시료 채취한 후 정량 분석하였으며, 3차는 분석 자료의 신뢰성 제고를 위해 알데하이드류 회수율을 평가하였다. 1-2차의 측정 결과는 20% 내외의 허용오차범위내의 오차비율을 나타

냈고, 3차의 회수율 평가에서는 85-110% 내의 양호한 회수율을 나타냈다. 물질별 검출한계 (LOD)는 알데하이드류중 HCHO 0.00003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 아세트알데하이드 (Acetaldehyde) 0.0003 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 벤질알데하이드 (Benzaldehyde) 0.00004 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 였다.

2.3 건강위해성 평가

2.3.1 평가 대상 물질

알데히드류 중 건강위해성 평가는 “다중이용 시설 등의 실내공기질관리법” 상의 시행규칙에서 제시하고 있는 항목인 HCHO와 위해성평가를 위한 발암 또는 비발암 독성자료가 존재하는 아세트알데하이드, 벤질알데하이드로 3종의 알데하이드류에 대해 평가하였다.

2.3.2 연구대상물질의 평가 분류 및 용량-반응 자료

위험성 분류는 어린 시기 노출로 인한 독성 영향 중심으로 자료를 조사하였고, 다음으로 발암성, 생식독성, 성장독성, 신경독성, 면역독성 중심으로 자료 수집 및 고찰하였다. 자료 고찰

에 의해 인체 발암성 가능 물질은 발암성 물질로, 노출 시기에 상관없이 노출량에 의한 독성 유발물질은 비발암독성 물질로 구분하였다. 평가 대상 물질의 위험성 구분은 HCHO와 아세트알데하이드는 발암성물질로 분류하였고, 벤질알데하이드와 HCHO는 비발암물질로 최종 분류하였다. 폼알데하이드의 경우 발암 및 비발암 독성이 공존하므로 중복 평가하였다.

대상물질의 건강위해성 평가를 위한 용량-반응 자료는 미국 환경보호청의 IRIS (Integrated Risk Information System) 및 세계보건기구 (World Health Organization)에서 공식적으로 제시하고 있는 독성 자료들을 수집, 고찰하여 결정하였다. 물질별 독성 정보 등은 Table 1에 제시하였다.

2.3.3 건강위해성 평가

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

Table 1. Dose-response assessment of materials.

Chemicals	Classification of material	Exposure route	Endpoint	N(L)OAE ¹⁾ (mg/kg-day) (mg/m ³)	UF ²⁾	RfC ³⁾ (mg/kg-day) (mg/m ³)	Reference
Formaldehyde	Carcinogenic Non carcinogenic	Oral	squamous cell carcinoma	15	100	0.2	Til et al. (1989)
Acetaldehyde	Carcinogenic	Inhalation	nasal squamous carcinoma	273	1000	0.009	Appleman et al. (1982)
Benzaldehyde	Non carcinogenic	Oral	kidney toxicity	400	1000	0.1	Kluwe et al. (1983)

1) No(Lowest) Observable adverse effect level
 2) Uncertainty Factor
 3) Reference Concentration

10세~12세로 구분하였다.

용량-반응 평가 시 발암성 및 비발암독성 물질의 정량적 독성 정보는 가능한 어린 시기 노출에 의한 독성 연구 자료를 일차적으로 선정하나, 부재 시에는 성인 자료를 활용하였다. 어린이 민감 영향물질은 반드시 어린 시기 노출에 의한 독성 연구 자료만을 이용하여 용량-반응 평가 실시하였고, 발암성 물질은 발암잠재력 (Cancer Potency Factor, CPF) 결정과정과 성인 자료 이용 시 ADAF (Age Dependent Adjust Factor) 적용도 동시 고려하여 평생초과발암위해도 (Excess Cancer Risk, ECR)를 산출하였다. 비발암독성 물질은 RfD (Reference dose) 결정 과정을 거쳐 독성 위험값 (Hazardous Quotient, HQ) 산출하였다.

시설별, 물질별, 연령별 평생평균일일노출량 (LADD)의 확률 분포값을 이용하여 인체 위해 확률분포값 산정하였다. 최종적으로 인체 위해 확률분포의 50th percentile값 및 95th percentile 값을 이용하였고, ECR는 $10^{-6} \sim 10^{-4}$ 수준, HQ는 0.1~1 초과 여부를 고려하여 위해 수준을 평가하였다.

최종적으로, 발암성 물질에 의한 평생초과발암위해도 (Excess Cancer Risk; ECR)와 비발암 물질에 의한 위험지수 (Hazard quotient; HQ)는 아래의 같은 수식을 이용하였고 (US EPA, 1989; 1997), 비발암물질의 RfC 값은 미국 환경보호청에서 미국 일반 성인의 일일호흡률 및 체중을 이용하여 단위를 mg/m^3 로 환산하였기에 이를 다시 고려하여 RfC의 단위를 인체 일일노출량과 동일한 $mg/kg/day$ 로 보정하여 HQ를 산

출하였다.

$$LADD (mg/kg/day) = C_{IA} \times \frac{IR_{kj} \times ET_{kj} \times EF_{kj} \times ED_{kj}}{BW_i \times AT}$$

- Where LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)
 C_{IA} : Concentration of chemicals in indoor air at facility (mg/m³)
 IR_{kj} : Inhalation rate for exposure scenario, k and facility, j (m³/day)
 ET_{kj} : Exposure time for exposure scenario, k and facility, j (hrs/day)
 EF_{kj} : Exposure frequency for exposure scenario, k and facility, j (days/yr)
 ED_{kj} : Exposure durations for exposure scenario, k and facility, j (yrs)
 BW_i : Body weight at age, i (kg)
 AT : Averaging time for lifetime (days)

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

- Where ECR : Excess cancer risk
 LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)
 Slope factor : Concentration of chemicals in indoor air at facility (mg/m³)

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

- Where HQ : Hazard Quotient
 LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)
 RfC : Reference concentration (mg/m³)
 BW : Body weight at age (kg)
 IR : Inhalation rate for exposure scenario, k and facility (m³/day)

2.3.4 시설별 노출 시나리오 및 인자 평가

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 및 쉬는 시간 등 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 촬영 및 판독분석을 실시하였다. 인자값의 결정 및 특이적 노출형태를 살펴보기 위해 초등학교의 경우 수업시간 50분을 관찰과 동시에 비디오촬영을 진행하였다. 또한 활동성이 좋은 점심시간 후 쉬

는 시간 등을 추가적으로 조사하였다. 학원의 경우도 학원형태별 주요 시간을 원장 및 교사의 자문을 바탕으로 학습형태 관찰을 통한 특이적 노출 형태가 있는지를 판단하였고, 놀이형태에서 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 예체능학원의 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, 학원시설의 경우 연간 수업일수에서 법정공휴일을 제외한 136일을 사용하였다. 기타 비디오 판독 등 관찰 및 자료 조사를 통한 노출변수에 대한 정보는 Table 2 및 Table 3에 구체적으로 제시하였다.

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

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

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

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

2.4 통계분석

측정 된 실내공기 결과는 평균, 표준편차를 제시하였고, 실내공기 자료에 대한 통계분석은 SPSS 17.0 (Statistical package for the social science) 통계 package를 사용하였고, Kruskal-Wallis test를 사용하여 시설별 통계적 유의성을 보았다.

94.63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대값 433.66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 학원시설의 평균이 다소 높게 측정되었다 (검출율 100%). 학교시설의 경우 교육인적자원부의 교사내 공기의 질에 대한 유지·관리기준 (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 27.2 % 초과하였다. 특히, 교실과 과학실, 컴퓨터실 등 특수실과 구분해서 살펴보면 특수실이 교실에 비해 실내기준 초과율이 다소 높은 것으로 나타났다 (특수실 31.5% > 교실 22.8%).

3. 연구결과

학원시설은 보건복지부의 공중위생관리법 (120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 24.6% 초과하였고, 참고적으로 학교시설의 기준 (100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 초과율을 살펴보면 33.8 % 초과되는 것으로 나타났다. 이는 본 연구의 실태조사 대상시설 대부분의 학원들이 협소한 공간에 비해, 다양한 학습 자료 등이 실내 공간을 차지하고 있었고, HCHO 및

3.1 어린이 활동공간의 실내공기질 평가

초등학교 및 학원에 대한 알데하이드류의 실내외 공기 중의 농도분포를 비교하였다 (Table 4). HCHO의 시설별로 평균검출량은 학교시설 68.30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (최대값 501.72 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 학원시설

Table 4. Summary of quantitative of aldehydes in children's facilities. (unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Substance	Children's facilities							
	Elementary School				Academy			
	Mean Min~Max	I/O ratio	Excess rate	Guideline	Mean±SD Min~Max	I/O ratio	Excess rate	Guideline
Formaldehyde	68.30 4.90~501.72	22.8	0.27	100	94.63 2.05~433.66	3.6	0.25	120
Acetaldehyde	13.23 0.04~351.82	1.8	-	-	12.53 0.04~57.24	1.5	-	-
Benzaldehyde	- -	-	-	-	0.07 <LOD~11.05	-	-	-

1) LOD : Limit of detection
2) IAQ guideline of Multiplex use facility

Table 5. Lifetime Excess Cancer Risk estimates for 50 and 95 percentile value of Carcinogens application ADAF.

Facility	Age	ADAF Lifetime Excess Cancer Risk			
		Formaldehyde		Acetaldehyde	
		50 th	95 th	50 th	95 th
Inhalation cancer risk					
Elementary School	7-9 age	1.36×10 ⁻⁵	5.39×10 ⁻⁵	2.69×10 ⁻⁷	2.18×10 ⁻⁶
	10-12 age	1.12×10 ⁻⁵	4.27×10 ⁻⁵	2.30×10 ⁻⁷	1.85×10 ⁻⁶
Academy	7-9 age	2.12×10 ⁻⁶	9.93×10 ⁻⁶	4.96×10 ⁻⁸	2.05×10 ⁻⁷
	10-12 age	1.70×10 ⁻⁶	7.72×10 ⁻⁶	4.12×10 ⁻⁸	1.58×10 ⁻⁷

아세트알데하이드 실내외농도비 (I/O ratio)가 1.3 ~ 22.8의 범위로서 실내오염원이 명확하게 존재하는 것으로 평가되었다. 결과표에는 제시하지 않았지만 HCHO의 경우 하계, 동계 및 춘계 각각 100 %의 검출율을 보여주어 계절에 관계없이 어린이 주요 환경에서 꾸준히 노출되고 있는 것으로 나타났다. 또한, 계절에 따른 HCHO 검출량은 통계적으로 유의하게 하절기가 높게 관찰되었다 (p<0.01). 기타 변수들에 의해서는 통계적으로 의미있는 결과는 도출되지 않았다. 참고적으로 결과표에는 제시하지 않았으나 아크로레인 초등학교 평균 0.80 µg/m³, 학원 평균 1.13 µg/m³, 아세톤 초등학교 평균 0.69 µg/m³, 학원 평균 1.57 µg/m³ 및 뷰틸알데하이드 초등학교 평균 0.09 µg/m³, 학원 <LOD 로 낮은 수준으로 검출되었다.

3.2 건강위해성 평가 결과

3.2.1 발암성 평가

ADAF를 보정한 초과발암위해도 50 percentile 해당값은 총 노출경로에 의해서는 10⁻⁸~10⁻⁵ 범위로 산출되었다. 대상 발암 물질 HCHO

의 총 발암위해도는 10⁻⁵의 관리가 요구되는 초과발암위해도를 나타냈고, 아세트알데하이드는 1×10⁻⁶ 미만의 낮은 초과발암위해도를 보였다. HCHO의 50 percentile 해당값의 발암위해도는 초등학교와 학원이 유사한 수준의 위해도를 나타냈고, 95% 해당값에서는 학원에 비해 초등학교가 다소 높은 위해도로 산출되었다.

95 percentile 해당값 흡입 노출 초과발암위해도는 10⁻⁷~10⁻⁵ 범위로 산출되었다. 대상 발암 물질 중 HCHO의 총 발암위해도는 10⁻⁵의 위해도 수준, 아세트알데하이드는 1×10⁻⁶ 미만의 범위를 나타냈다 (Table 5).

3.2.2 비발암성 평가

비발암성 물질로 인한 위해지수, HQ 50 percentile 해당값은 <0.001~0.01 범위로 산출되었으며, 대상 발암 물질 중 HCHO가 총비발암독성 위험값이 0.01~0.08 범위의 위해 수준을 보였다.

HQ 95 percentile 해당값은 1을 초과하는 시설은 없었으나, 초등학교의 경우 7-9세, 10-12세 연령군 모두 관리가 요구되는 위해수준인 0.1을 초과한 0.3 및 0.2의 위해수준으로 산출되었다. 학원의 경우 초등학교에 비해 낮은

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

Facility	Age	Total Hazard Quotient	
		Formaldehyde	
		50 th	95 th
Inhalation non-cancer risk			
Elementary School	7-9 age	0.081	0.334
	10-12 age	0.066	0.263
Academy	7-9 age	0.013	0.059
	10-12 age	0.010	0.046

0.04 ~ 0.05의 안전역 수준의 위해도로 산출되었다 (Table 6). 벤질알데하이드의 경우 0.001이하의 낮은 위해도로 산출되어 본 결과표에서는 제시하지 않았다.

4. 고찰

초등학교 및 학원 이용 어린이에 대한 유해물질의 위해성 평가 수행 결과, 발암 및 비발암 위해도에서 폼알데하이드는 관리가 요구되는 수준 (ADAF 적용 발암 10^{-5} , 어린이 민감도를 고려해 비발암 0.1)으로 산출되었다. 이는 김호현 등(2010)의 알데하이드류 대상물질로 보육시설 등의 위해도 평가 결과 ($10^{-7} \sim 10^{-4}$) 보다 낮은 수준이다. Kim et al.(2011)의 국내 다중이용시설(영화관, 대형음식점, 전시장 등) 내 HCHO 위해성평가 결과 이용자는 10^{-6} 의 위해, 근무자는 10^{-4} 로 산출되어, 노출시간이 많은 근무자의 HCHO의 노출의 문제점을 보고하였다. 본 연구에서도 상대적으로 노출시간이 낮은 학원의 경우 초등학교에 비해 노출시간이 현저히 낮으므로(학교 4-6시간, 학원 1-3시간) 그 위해도 낮을

수 있다. 그럼에도 불구하고 발암 및 비발암위해도 (위해지수) 평가 결과 HCHO에서 비발암 위해도 (위해지수) 0.1 초과 수준으로 나타나 화학물질에 민감한 어린이 대상시설임을 감안할 때 관리가 요구된다.

참고적으로 발암평가의 경우 Ginsberg (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. 미국 환경보호청에서는 생애단계 (life-stage) 중 생애 초기 노출에 의해서는 시기별 민감성이 존재하기 때문에, 이러한 단계를 고려한 실험동물 자료에 근거한 어린이 용량-반응 자료는 중간 불확실성만이 존재하나, 생애단계를 고려하지 않은 실험동물 자료일 경우에는 중간 불확실성뿐만 아니라 종내 민감성으로 인한 불확실성이 추가적으로 존재한다고 제안하고 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. 즉, 대상군 중 만 2세 이하인 영아의 발암물질에 대한 ADAF는 10, 만 3~9세 인 유아, 미취학어린이 및 취학어린이의 ADAF는 3을 적용하였다 (US EPA, 2005).

학교시설의 경우 HCHO의 교실 등 실내농도 분포를 살펴본 바 교육인적자원부의 교사내 공기의 질에 대한 유지 및 관리기준 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 27.2%를 초과하였다. 특히, HCHO의 경우 교실에 비해 컴퓨터실 등 특수실의 농도가 높았고 (I/O ratio 1을 상회), 신축 학교이거나 최근에 교실 및 특수실의 내부공사 및 책결상, 사물함 등을 교체한 초등학교에서 높게 조사되었다. 참고적으로 건축시기별 실내공기 농도의 특성을 보기 위해 신축, 2~10년, 11년 이후의 건물로 구분하여 비교 분석한 결과, 학교와 학원 시설에서 통계적으로 유의한 차이가 나타나지 않았다. 학원의 구분(보습, 예능 및 체육학원)에 따른 Aldehydes의 뚜렷한 농도차이는 없었고, 시설의 건축년수별 비교한 결과 신축시설이 높게 측정되었고, 실내외 농도비 (I/O ratio)가 1을 상회하여 실내오염원이 존재함을 확인하였다 (Ilgen et al., 2001). 임영옥 등(2008)의 전국단위 초등학교 교실 내 유해환경평가연구에 의하면 HCHO 평균농도 $22.07 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서 본 연구의 결과보다 낮게 측정되었으나, 또한 실내외 농도비가 3.6으로 1을 초과하고 있어 연구결과와 동일하게 명확하게 학교 내 오염원이 존재

하는 것으로 보고하였다. 참고적으로 실내외 농도비 (I/O ratio)가 1이상이면 실내오염원이 존재하는 것을 의미한다 (Ilgen et al., 2001).

본 연구에서는 5개 도시지역의 초등학교 및 학원을 대상으로 연구수행하였으므로 전국을 대표한다고 할 수 없으며, 노출량 산정을 위한 변수 및 시나리오 도출시 제한된 시간의 관찰로 인한 대표성 보완이 필요하다. 또한, 시설별 계절별 1회 측정으로 인한 제한점도 존재하므로 본 위해성평가 결과는 불확실성을 가진 확정적인 위해도 산출값은 아니다.

그럼에도 불구하고 HCHO의 경우 발암과 비발암 위해도가 현 수준에서는 관리가 필요한 것으로 판단된다. 앞으로 해당시설에 대한 지속적인 관심과 적극적인 개선 정책이 요구된다. 참고적으로 폼알데하이드의 경우 그 중요성이 미리 인식되어 환경부 「다중이용시설실내공기질 관리법」에 의해 병원, 대규모 대기실 등과 같은 다중이용시설에 대한 실내 공기 중 HCHO 권고 기준 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)과 교육부의 「학교보건법」에 교사 내 실내공기 중 HCHO 권고 농도 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)를 적용, 시행되고 있는 것이 고무적인 일이나, 이는 어린이의 민감성을 고려한 기준이 아니므로, 기준 적정성 검토도 필요하다.

5. 결론

본 연구에서는 초등학교 및 학원의 실내 공기 중 알데히드류의 노출평가를 통해 저학년

군인 만 7~9세 및 고학년군인 만 10세~12세로 구분하여 어린이 위해성 평가를 실시하였다. 어린이 민감도를 반영하기 위해 발암물질인 경우 보수적인 평가인 ADAF를 적용하였고, 비발암 물질의 경우 그 위해수준을 0.1로 판단하였으며, 주요 결과는 다음과 같다.

학교시설의 경우 HCHO의 교실 등 실내농도 분포를 살펴본 바 교육인적자원부의 교사내 공기의 질에 대한 유지 및 관리기준 ($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 27.2%를 초과하였다. 학원시설의 경우 HCHO의 보습학원의 학습실 등의 주요 실내 공간에 대한 실내농도분포를 살펴본 바 보건복지부의 공중위생관리법 ($120 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 24.6% 초과하였다. 학원 종류별 (보습학원, 예체능학원 등) 뚜렷한 오염원에 의한 시설 특성별 경향성은 보이지 않았다. 마지막으로 초등학교 HCHO의 초과발암위해도 95 percentile 값에서 10^{-5} 의 위해도를 나타내어 관리가 필요하였고, 50 percentile값에서는 10^{-6} 의 안전역 수준이었다. 초등학교 HCHO 비발암위해도 95 percentile값에서 관리가 요구되는 위해수준인 0.1을 초과한 0.2 ~ 0.3의 위해수준으로 산출되었고, 학원의 경우 초등학교에 비해 낮은 0.04 ~ 0.05의 안전역 수준의 위해도로 산출되었다.

Acknowledgments

This Study was a part of project supported by Korean Ministry of Environment (Environmental Health Policy Division Office of Environmental

Health), "Risk Assessment in Facilities for Child" ('09~'10) and we appreciate the support.

References

- Appleman, L.M., Woutersen, R.A. and Feron V.J. (1982) Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats(I) Acute and subacute studies, *Toxicology*, 23, 293-297.
- 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.
- Brunekreef, B., Janssen, N.A.H., de Hartog, J., Harssema, H., Knape, M. and van Vliet, P. (1997) Air pollution from truck traffic and lung function in children living near motorways, *Epidemiology* 8, 298-303.
- Ginsberg, GL. (2003) Assessing cancer risks from short-term exposures in children, *Risk Analysis*, 23, 19-34.
- Hwang, B.F., Jaakkola, J., Lee, Y.L., Lin, Y.C. and Guo, Y.L.L. (2006) Relation between air pollution and allergic rhinitis in Taiwanese schoolchildren, *Respiratory Research*, 7, 23.
- International Agency for Research on Cancer (IARC) (2006) IARC monographs on the

- evaluation of the carcinogenic risk of chemicals to humans, In: Formaldehyde, vol. 88, IARC, Lyon, France.
- Ilgen, E., Karfich, N., Levsen, K., Angerer, J., Schneider, P., Heinrich, J., Wichmann, H., 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.
- Jang, J.Y., Jo, S.N., Kim, S.Y., Kim, S.J. and Cheong, H.K. (2007) Korean exposure factors handbook (KEFH). Gwacheon: Ministry of Environment
- 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.
- Kim, H.H., Yang, J.Y., Lee, C.S., Kim, S.D., Yang, S.H., Shin, D.C. and Lim, Y.W. (2010) Health Risk and Exposure Assessment of Aldehydes in Children's Facilities, Journal of Korean Society for indoor Environment, 7(2), 89-100.
- Kluwe, W.M., Montgomery, C.A., Giles H.D. and Prejeau, J.D. (1983) Encephalopathy in rats and nephropathy in rats and mice after subchronic oral exposure to benzaldehyde, Food Chem. Toxicol, 21(3), 245-250.
- 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.
- 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. (2008) A Study on the Indoor Air Pollution in the Classrooms of Elementary Schools in Korea Focused on VOCs, Formaldehyde, PM₁₀ and Indoor Allergens in Dust, Journal of Korean Society for indoor Environment, 5(1), 37-49.
- McConnell, R., Berhane, K., Gilliland, F., Molitor, J., Thomas, D., Lurmann, F., Avol, E., Gauderman, W.J. and Peters, J.M. (2003) Prospective study of air pollution and bronchitis symptoms in children with asthma, American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 169, 790-797.
- Mi, Y.H., Norback, D., Tao, J., Mi, Y.L. and Ferm, M., (2006) Current asthma and respiratory symptoms among pupils in

- Shanghai, China: influence of building ventilation, nitrogen dioxide, ozone, and formaldehyde in classrooms, *Indoor Air*, 16, 454-464.
- Nitschke, M., Pilotto, L.S., Attewell, R.G., Smith, B.J., Pisanello, D., Martin, J., Ruffin, R.E. and Hiller, J.E. (2006) A cohort study of indoor nitrogen dioxide and house dust mite exposure in asthmatic children, *Journal of Occupational and Environmental Medicine*, 48, 462-469.
- Tang, X., Bai, Y., Duong, A., Smith, M.T., Li, L. and Zhang, L. (2009), Formaldehyde in China: Production, consumption, exposure levels, and health effects, *Environment International*, 35, 1210-1224.
- Til, H.P., Woutersen, R.A., Feron, V.J., Hollanders, V.H.M., Falke H.E. and Clary, J.J. (1989) Two-year drinking water study of formaldehyde in rats, *Food Chemical Toxicology*, 27(2), 77-87.
- US EPA (1989) Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens.
- US EPA (1997) Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens.
- US EPA (2002) CEFH(Child-specific exposure factors handbook).
- US EPA (2005) Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens.
- Zhao, Z., Zhang, Z., Wa, Z., Ferm, M., Liang, Y. and Norback, D. (2008) Asthmatic symptoms among pupils in relation to winter indoor and outdoor air pollution in schools in Taiyuan, China, *Environmental Health Perspectives*, 116, 90-97.