

## 보육시설 및 실내놀이터의 Aldehydes 노출 및 위해성 평가

김호현 · 양지연 · 이청수 · 김선덕 · 양수희 · 신동천<sup>1)</sup> · 임영욱\*  
연세대학교 환경공해연구소, <sup>1)</sup>연세대학교 의과대학 예방의학교실

### Health Risk and Exposure Assessment of Aldehydes in Children's Facilities

Ho-Hyun Kim · Ji-Yeon Yang · Chung-Soo Lee · Sun-Duk Kim · Su-Hee Yang  
Dong-Chun Shin<sup>1)</sup> · Young-Wook Lim\*

*The Institute for Environmental Research, Yonsei University*

<sup>1)</sup>*Department of preventive medicine, College of Medicine, Yonsei University*

#### Abstract

This study was performed to investigate the concentration of indoor aldehydes in children's facilities. The samples were collected from various children's facilities (40 playrooms, 42 day-care centers, 44 kindergartens, and 42 indoor playgrounds) in summer (Jul-Sep, 2007), winter (Jan-Feb, 2008) and spring (Mar-Apr, 2008). The ratio of Indoor and outdoor (I/O) of aldehydes exceeds 1.0 and the formaldehyde levels in each child-care facilities were significantly different. We evaluated the lifetime cancer and non-cancer risk of young children due to indoor aldehyde exposure. We estimated the lifetime excess cancer risks (ECRs) of formaldehyde, acetaldehyde and the hazard quotients (HQs) of non-carcinogens (benzaldehyde and formaldehyde). Formaldehyde was evaluated for both carcinogenic and non-carcinogenic risk. The average ECRs of formaldehyde for young children were  $1 \times 10^{-4}$ ~ $1 \times 10^{-5}$  level in all facilities. HQs of four non-carcinogens did not exceed 1.0 for all subjects in all facilities.

*Keywords* : Aldehydes, Health risk assessment, Indoor air, Children's facilities

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

\* 투고일 : 2010.03.25

1차수정일 : 2010.05.11

게재확정일 : 2010.05.12

## 1. 서론

어린이는 성인에 비해 동일한 오염수준에 노출 되었을 경우 더 큰 피해를 받으며, 영유아시기의 건강수준은 성인시기의 건강을 좌우할 수 있고 한번 훼손되면 복구할 수 없는 경우도 있으며, 어린이는 스스로 건강을 지킬 수 있는 능력이 부족하다 (Nafstad 등., 2004). 최근에는 아토피 피부질환, 천식 등 환경성 질환에 대한 문제가 지속적으로 제기되고 있다 (Peter, 2007). 놀이방, 어린이집, 유치원 및 실내놀이터 등 어린이 보육시설 및 실내 놀이시설의 경우 어린 이들이 장시간 머무르며 다양한 놀이 활동과 교육을 받는 제 2의 가정이라고 할 수 있다. 소위 민감 집단으로 분류할 수 있는 어린이들은 낮 시간의 대부분을 제 2의 가정인 보육시설(놀이방, 어린이집) 및 유치원에서 놀이, 식사, 취침 및 교육 등의 생활이 이루어지므로 더욱 실내 환경을 쾌적하게 만들어주고 유지해 주어야 한다. 특히, 미취학 아동들은 계속 발육상태에 있고 질병에 대한 저항력이 불충분한 연령층이기 때문에 보건학적으로 중요한 인구집단이다.

이러한 어린이 활동공간의 건강상의 유해영향 물질로는 포름알데하이드(Formaldehyde) 등 알데하이드류(Aldehydes), 톨루엔(Toluene) 등 휘발성유기화합물(VOCs: Volatile Organic Compounds), 납(Lead) 등 유해금속 (Metal) 등이 알려져 있다(Li, 2007). 일반적으로 알데하이드류의 실내 주요 오염원으로는 건축자재, 페인트, 접착제, 담배연기, 가스렌지 등이 있다(Dassonville 등., 2009). 어린이 보육시설 및 실내놀이터는 여러 가지 교육기자재나 놀이완구 등으로 인해 더 문제가 될 수 있다 (Bruinen 등., 2005). 또한, 이러한 화학물질들은 두통, 현기증, 메스꺼움, 졸음, 집중력 감퇴 등의 각

종 질병을 유발하는 것으로 알려져 있다. 알데하이드류(Aldehydes) 중 폼알데하이드 (Formaldehyde)의 경우 대표적인 발암물질이고, 낮은 농도에 지속적으로 노출될 경우 눈, 코, 인후, 피부 자극 영향을 주며, 천식, 호흡기관에 자극을 유발 시킨다 (Til 등., 1989). 또한, 기도 호흡기계의 점막이나 시신경 등을 자극하는 것으로 알려져 있다 (WHO, 2001).

최근 국내에서도 국민들의 높아진 참살이 (Well-being)의 영향으로 실내오염에 대한 사회적 관심의 대상이 되었으며, 이제 환경부에서는 지하역사, 대규모점포, 산후조리원, 의료기관 등의 다중이용시설군과 신축공동주택을 포함한 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법(2004)”을 제정하였다. 현재 보육시설에 대한 실내공기질 유지기준은 폼알데하이드(HCHO)  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하이며, 참고적으로 미세먼지(PM-10)  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 1,000 ppm, 총부유세균(TBC)  $800 \text{CFU}/\text{m}^3$ , 일산화탄소(CO) 10 ppm으로 설정되어 있다.

따라서, 본 연구에서는 놀이방, 어린이집, 유치원 등 보육시설과 실내놀이터 즉, 가정이외의 어린이 주요활동공간을 대상으로 알데하이드류의 농도 분포 특성을 조사하고, 이를 바탕으로 건강위해성평가를 통해 장기적인 어린이 건강보호를 위한 기초자료 제공에 그 목적이 있다.

## 2. 연구방법

### 2.1 연구내용

본 연구는 주요 활동공간은 보육시설(놀이방, 어린이집), 유치원 및 실내놀이터를 평가 대상으로 선정하여 전국 6개 도시(서울, 수원, 대전,

부산, 안산, 여수)의 놀이방 40곳, 어린이집 42곳, 유치원 44곳, 실내놀이터 42곳을 대상으로 여름(2007년 7월~9월)과 겨울(2008년 1월~2월), 봄(2008년 3월~4월)에 최종 시설별 3회 반복 측정을 통해 실내 공간의 알데하이드류를 조사하였다. 여름 조사의 경우 대상 시설 섭외 및 측정이 동시에 진행되었고, 연속조사를 거부하는 2개 시설은 누락되었다.

## 2.2 실내공기질 측정 및 분석방법

측정 및 포집은 각각의 보육시설 및 실내놀이터에서 교실에서 벽으로부터 최소 1m 이상 떨어진 위치에서 바닥면으로부터 1.2~1.5m 높이에 시료채취 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 cartridge 인 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 카트리지(Ozone scrubber cartridge)를 DNPH-silica cartridge 앞에 장착하여 0.5 l/min의 유량으로 30분 동안 시료를 채취하였다(다중이용시설 실내공기질관리법의 공정시험방법에 준함). 채취된 시료에 대한 분석은 HPLC alliance separation module 2690/dual  $\lambda$  absorbance detector 2487 모델을 이용하였다.

## 2.3 분석의 정도관리

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 정도관리를 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 나타냈고, 3차의 회수율 평가에서는 90-115% 내의 양호한 회수율을 나타냈다. 물질별 검출한계(LOD)는 알데하이드류중 폼알데하이드(Formaldehyde) 0.00003 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 아세트알데하이드(Acetaldehyde) 0.0003 $\mu$ g/m<sup>3</sup>, 벤질알데하이드(Benzaldehyde) 0.00004 $\mu$ g/m<sup>3</sup>였다.

## 2.4 건강위해성 평가

### 2.4.1 평가 대상 물질

알데하이드류 중 건강위해성 평가는 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”상의 시행규칙에서 제시하고 있는 항목인 폼알데하이드(Formaldehyde)와 위해성평가를 위한 발암 또는 비발암 독성자료가 존재하는 아세트알데하이드(Acetaldehyde), 벤질알데하이드 (Benzaldehyde)로 3종의 알데하이드류에 대해 평가하였다.

### 2.4.2 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, 면역

독성, 차세대 독성 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 물질의 위험성 구분은 폼알데하이드와 아세트알데하이드는 발암성물질로 분류하였고, 벤질알데하이드와 폼알데하이드는 비발암물질로 최종 분류하였다. 폼알데하이드의 경우 발암 및 비발암성 독성이 공존하므로 중복 평가하였다.

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

### 2.4.3 건강위해성 평가

본 연구에서는 대상 시설별 어린이 위해성 평

가를 실시하기 위해 대상 시설 및 연령은 놀이방(6개월~만2세), 어린이집(만 2~5세), 유치원(만 5~6세), 실내놀이터(만 3~9세)로 구분하였다.

용량-반응 평가시 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 이용시 ADAF(Age Dependent Adjust Factor) 적용도 동시 고려하여 평생초과발암위해도 (Excess Cancer Risk, ECR)를 산출하였다.

어린이 민감 영향 물질은 TDI(Tolerable Daily Intake) 결정과정을 거쳤고, TDI 자료 부재시 RfD(Reference dose)값으로 대체하여 독성 위험값(Hazardous Quotient, HQ)을 산출하였다. 마지막으로 비발암독성 물질은 RfD(Reference dose) 결정

Table 1. Dose response assessment of chemicals.

Chemicals	Classification of material	Exposure route	Endpoint	N(L)OAEL <sup>1)</sup> (mg/kg-day) (mg/m <sup>3</sup> )	UF <sup>2)</sup>	RfC <sup>3)</sup> (mg/kg-day) (mg/m <sup>3</sup> )	Reference
Form aldehyde <sup>4)</sup>	Carcinogenic Non carcinogenic	Oral	squamous cell carcinoma	15	100	0.2	Til (1989)
Acet aldehyde	Carcinogenic	Inhalation	nasal squamous carcinoma	273	1000	0.009	Appleman (1986)
Benz aldehyde	Non carcinogenic	Oral	kidney toxicity	400	1000	0.1	Kluwe (1983)

1) No(Lowest) Observable adverse effect level

2) Uncertainty Factor

3) Reference Concentration

4) Carcinogenic and Non-carcinogenic

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 percentile값을 이용하였고, ECR는  $10^{-6}$ ~ $10^{-4}$  수준, HI 및 HQ는 0.1~1 초과 여부를 고려하여 위해 수준을 평가하였다.

임의의 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 산출할 수 있다. 노출량의 산정시 유치원 7세의 경우 놀이방과 어린이의 노출기간과 체중을 적용 및 보정하여 최종 노출량을 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 산출하였다.

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

Where ECR : Excess cancer risk

Where LADD : Lifetime average daily dose  
( $mg/kg/day$ )

Where Slope factor : Concentration of chemicals in indoor air at facility ( $mg/m^3$ )

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

Where HQ : Hazard Quotient

Where LADD : Lifetime average daily dose

( $mg/kg/day$ )

Where RfC : Reference concentration ( $mg/m^3$ )

Where BW : Body weight at age (kg)

Where IR : Inhalation rate for exposure scenario, k and facility ( $m^3/day$ )

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

Where LADD : Lifetime average daily dose  
( $mg/kg/day$ )

Where  $C_{IA}$  : Concentration of chemicals in indoor air at facility ( $mg/m^3$ )

Where  $IR_{kj}$  : Inhalation rate for exposure scenario, k and facility, j ( $m^3/day$ )

Where  $ET_{kj}$  : Exposure time for exposure scenario, k and facility, j (hrs/day)

Where  $EF_{kj}$  : Exposure frequency for exposure scenario, k and facility, j (days/yr)

Where  $ED_{kj}$  : Exposure durations for exposure scenario, k and facility, j (yrs)

Where  $BW_i$  : Body weight at age, i (kg)

Where AT : Averaging time for lifetime (days)

#### 2.4.4 시설별 노출 시나리오 및 인자 평가

일반적인 시설별 이용시간 등의 일반적인 내용은 보육교사를 통한 면접식 설문조사를 실시하였고, 노출량 계산을 위한 인자 값 도출 및 노출 형태분석을 위한 조사는 4개 연령그룹으로 분류하여 각 4인씩 총 16명을 관찰 조사하였다. 보육시설의 경우 보육교사 및 원장을 통해 면접식 설문을 실시하였고, 실내놀이터의 경우 시설 관리실장 또는 업주를 통해 면접식 설문조사를 하였다. 면접 설문지의 내용에는 어린이의 보육시설 및 실내놀이터 이용에 관한 일반적인 질문과 관련하여 아이

들 놀이의 특성 (놀이 시간, 횟수, 요일별, 시간대 별 및 기타 외)과 어린이에 대한 정보 등을 포함 하였다.

시설 운영자 설문조사를 통해 시설별 주요이용 연령과 이용시간의 조사를 수행하였다. 놀이방은 1일 최소 5시간에서 최대 10시간을 이용하고 있는 것으로 조사되었다. 어린이집의 경우 이용 연령이 만 2세, 만 3~4세, 만 5세로 구분되었고 연령에 따라 이용형태도 조금씩 다르게 나타났다. 어린이집 은 1일 최소 8시간에서 최대 10시간을 이용하고 있었다. 유치원은 만 6~7세의 어린이가 1일 5시간 이용하고 있었고, 수면시간은 없는 것으로 조사되 었다. 실내놀이터의 경우 1주일에 1~2회 정도 이 용하고 있었다.

관찰조사방법은 40분간의 비디오 촬영 및 판독 분석을 실시하여, 어린이 노출형태조사를 통한 인 자 값의 결정 및 특이적 노출형태를 살펴보기 위 해 보육시설의 경우 해당시설의 협조를 통해 자율 놀이시간 40분을 관찰과 동시에 비디오촬영을 진 행하였다. 연령별로 차이는 있지만 자율놀이시간

에 어린이들의 활동력이 가장 왕성하고 다양한 놀 이형태를 보인다는 보육시설의 조연을 바탕으로 오전 자율놀이시간을 주 관찰 및 비디오 촬영시간 으로 진행하였다. 관찰 및 비디오판독 중 주요 관 찰내용은 보육시설 및 실내놀이터에서의 주요 놀 이 및 학습형태 관찰을 통한 특이적 노출 형태가 있는지를 판단하였고, 놀이형태에서 서서 있기, 앉아 있기, 걷기, 뛰기, 뒹굴기 등의 형태를 조사 하였다. 관찰 및 비디오판독을 통해 놀이방의 경 우 누워있기, 앉아있기, 기어다니기의 놀이형태를 반영하고, 어린이집의 경우 누워있기, 앉아있기 등을 반영, 유치원의 경우 누워있기 및 기어다니 기의 놀이형태는 빠지고, 실내놀이터의 경우 뒹굴 기를 포함한 모든 놀이형태를 적용하였다.

관찰조사 및 자료 조사를 통한 노출변수에 대한 정보는 아래의 Table 2, 3과 같다.

2.5 통계분석

측정 된 실내공기 결과는 평균, 표준편차를 제 시하였고, 실내공기 자료에 대한 통계분석은 SPSS

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

Exposure Factor	Symbol	Age (years)				Probability distribution	Source
		0.5-2	3-4	5-6	7-9		
Daily Inhalation rate(m <sup>3</sup> /day)	BRm	5.7	8.3	9.2	12.0	Log-normal	US EPA CEFH(2002)
Activity Inhalation rate(m <sup>3</sup> /hr)	BRh	1.9	1.9	1.9	1.9	Triangle	US EPA CEFH(2002)
Body Weight(kg)	BW	10	16	20	30	Log-normal	ME(2007)
Exposure period(year)	EDindoor	1.5	2.0	2.0	3.0	-	
Number of standard time exposure(days)	ATnc	547.5	730	730	1095	-	This study
Number of child life time exposure (days)	AT	25550	25550	25550	25550	-	ME(2007)

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

Exposure Factor	Symbol	Day-care home	Child-care center	Kinder-garten	Indoor playground	Probability distribution	Source
daily exposure (hr)	ETindoor	10	10	5	2	Uniform	
Number of year exposure (days/yr)	EFindoor	258	258	258	36	Triangle	This study
daily playing (hr)	ETj	7	7	5	2	Uniform	

17.0 (Statistical package for the social science) 통계 package를 사용하였고, Kruskal-Wallis test를 사용하여 시설별 통계적 유의성을 보았다.

대한 알데하이드류에 대한 기준치는 없지만, 폼알데하이드의 경우 교육인적자원부의 기준치를 참고치로 설정하여 초과율을 나타내었다. 폼알데하이드는 다중이용시설 등의 실내공기질관리법 실내공기질 유지기준  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 4.4% 초과하였고, 실내외 농도비는 모두 1.0을 넘고 있어 실내의 오염발생원이 존재하는 것으로 나타났다.

### 3. 연구결과

#### 3.1 어린이 활동공간의 실내공기질 평가

어린이 활동공간에 대한 알데하이드류의 실내 공간과 실외 공간 즉 실내/외 공기 중의 농도분포를 비교하였다(Table 4). 현재 어린이 활동공간에

어린이 활동공간을 놀이방, 어린이집, 유치원, 실내놀이터로 구분하여 실내 알데하이드류의 농도를 살펴보면, 폼알데하이드의 경우 어린이집에서  $40.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났으며 다음으로 실

Table 4. Concentration of the target compounds in indoor and outdoor air.

Compound	Indoor (N=454)	Outdoor (N=96)	I/O ratio	Excess rate	Guideline
	Mean ± S.D (Min ~Max)	Mean ± S.D (Min ~Max)			
Formaldehyde	$35.4 \pm 34.6$ ( $<\text{LOD}^1$ ~277.4)	$20.4 \pm 21.2$ (3.5~100.3)	1.7	4.4	100 <sup>1)</sup>
Acetaldehyde	$21.6 \pm 23.7$ ( $<\text{LOD}$ ~133.4)	$16.7 \pm 18.7$ ( $<\text{LOD}$ ~83.6)	1.2	-	-
Benzaldehyde	$1.0 \pm 4.4$ ( $<\text{LOD}$ ~45.9)	$0.7 \pm 4.6$ ( $<\text{LOD}$ ~45.8)	1.4	-	-

1) LOD : Limit of detection

2) IAQ guideline of Multiplex use facility

Table 5. Concentrations of aldehydes indoor air pollutions by child activity facility.

Compound	Child activity facility	Indoor		
		N	Mean ± S.D	p-value*
Formaldehyde	Day-care home	112	33.5 ± 39.9	0.008**
	Child-care center	120	40.6 ± 33.3	
	Kindergarten	113	26.9 ± 21.6	
	Indoor playground	109	39.8 ± 39.2	
Acetaldehyde	Day-care home	112	22.0 ± 24.2	0.958
	Child-care center	120	24.2 ± 27.7	
	Kindergarten	113	19.5 ± 19.6	
	Indoor playground	109	20.2 ± 21.6	
Benzaldehyde	Day-care home	112	1.0 ± 3.2	0.243
	Child-care center	120	0.5 ± 1.0	
	Kindergarten	113	1.4 ± 7.1	
	Indoor playground	109	1.0 ± 4.6	

\* Kruskal-Wallis, \*\* <0.01

내놀이터, 놀이방, 유치원 순으로 나타났다. 또한 통계적으로 폼알데하이드의 경우 어린이 활동공간별로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ( $p < 0.01$ ).

아세트알데하이드도 폼알데하이드와 마찬가지로 어린이집에서  $24.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 가장 높게 나타났고 다음으로 실내놀이터, 놀이방, 유치원 순으로 나타났다. 부틸알데하이드와 벤질알데하이드는 전체적으로 낮은 농도로 나타났다. 폼알데하이드를 제외하고 어린이 활동공간별로 통계적으로 유의한 차이가 없었다(Table 5).

### 3.2 건강위해성 평가 결과

#### 3.2.1 발암성 평가

ADAF를 보정한 초과발암위해도 50% 해당값은 총 노출경로에 의해서는  $10^{-9} \sim 10^{-4}$  범위로 산출되

었다. 대상 발암 물질 폼알데하이드의 총 발암위해도는  $10^{-7} \sim 10^{-4}$  범위, 아세트알데하이드는  $1 \times 10^{-6}$  미만의 낮은 초과발암위해도를 보였다. 95% 해당값 흡입 노출 초과발암위해도는  $10^{-8} \sim 10^{-3}$  범위로 산출되었다. 대상 발암 물질 중 폼알데하이드의 총 발암위해도는  $10^{-7} \sim 10^{-3}$  범위, 아세트알데하이드는  $1 \times 10^{-6}$  미만의 범위를 나타냈다(Table 6).

#### 3.2.2 비발암성 평가

비발암성 물질로 인한 비발암독성위험값, HQ 50% 해당값은 <0.0001~0.15 범위로 산출되었으며, 대상 발암 물질 중 폼알데하이드가 총비발암독성위험값이 0.001~0.15 범위로 높은 위해 수준을 보였다. 비발암성 물질로 인한 비발암독성위험값, HQ 95% 해당값은 1을 초과하는 시설은 없었으나, 보육시설 즉, 놀이방과 어린이집, 유치원의 비발암위해도가 0.1을 초과하였다(Table 7).

Table 6. Lifetime Excess Cancer Risk estimates for 50th and 95th percentile value of Carcinogens application ADA.

Facility	Age (years)	ADAF_Lifetime Excess Cancer Risk			
		Formaldehyde		Acetaldehyde	
Inhalation Total Excess Cancer Risk		50th	95th	50th	95th
Playroom	0.5-2	$2.26 \times 10^{-4}$	$1.32 \times 10^{-3}$	$2.56 \times 10^{-6}$	$1.38 \times 10^{-5}$
Day-care center	2	$4.24 \times 10^{-4}$	$1.70 \times 10^{-3}$	$3.56 \times 10^{-6}$	$1.88 \times 10^{-5}$
	3-4	$1.53 \times 10^{-4}$	$6.26 \times 10^{-4}$	$1.27 \times 10^{-6}$	$6.96 \times 10^{-6}$
	5	$1.37 \times 10^{-4}$	$5.61 \times 10^{-4}$	$1.15 \times 10^{-6}$	$6.17 \times 10^{-6}$
Kindergarten	5-6	$4.43 \times 10^{-5}$	$1.94 \times 10^{-4}$	$4.66 \times 10^{-7}$	$2.55 \times 10^{-6}$
Indoor playground	3-4	$1.23 \times 10^{-7}$	$6.06 \times 10^{-7}$	$9.08 \times 10^{-9}$	$4.88 \times 10^{-8}$
	5-6	$1.00 \times 10^{-7}$	$5.21 \times 10^{-7}$	$7.62 \times 10^{-9}$	$4.19 \times 10^{-8}$
	7-9	$1.00 \times 10^{-7}$	$4.95 \times 10^{-7}$	$7.55 \times 10^{-9}$	$4.16 \times 10^{-8}$

Table 7. Total Hazard Quotient estimates for 50th and 95th percentile value of non-carcinogenic.

Facility	Age (years)	Total Hazard Quotient			
		Benzaldehyde		Formaldehyde	
Inhalation Total Hazard Quotient		50th	95th	50th	95th
Playroom	0.5-2	<0.0001	<0.0001	0.0812	0.4610
Day-care center	2	<0.0001	<0.0001	0.1563	0.6044
	3-4	<0.0001	<0.0001	0.1356	0.5440
	5	<0.0001	<0.0001	0.1216	0.1216
Kindergarten	5-6	<0.0001	<0.0001	0.0396	0.1712
Indoor playground	3-4	<0.0001	<0.0001	0.0011	0.0055
	5-6	<0.0001	<0.0001	0.0009	0.0045
	7-9	<0.0001	<0.0001	0.0006	0.0031

#### 4. 고 찰

보육시설 및 실내놀이터의 실내 공간에 알데히드류에 대한 실내/실외 농도비(I/O ratio)를 통해 실내 오염 발생원에 존재를 살펴보면 (Ilgen 등, 2001), 대부분의 물질의 실내/실외 농도비가 1보다 크게 나타나 이는 실내 오염 발생원이 틀림없이

존재한다고 볼 수 있다(Elke 등, 2001). 폼알데하이드의 경우 어린이집에서 가장 높게 나타났으며 어린이 활동공간별로 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다 ( $p < 0.01$ ). 이는 평가 대상 어린이 보육시설 중 어린이집에 건설에 사용된 건축자재 및 새 가구 등과 여러 가지의 교육기자재나 놀이완구 등에서 방출되는 것으로 판단된다.

Ginsberg 등(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, 생애단계(life-stage)를 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 위해도도는 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 따라 독성값의 민감성을 보정할 수 있는 ADAF를 제안하고 있다. 이와 같은 독성 자료 고찰 결과를 근거로 하여 미국 환경청에서는 발암 위해도 평가 시 연령별 민감도를 고려할 것을 권고하였으며, 이에 발암성물질에 대한 생애초기 노출의 민감도를 평가하기 위한 방법을 제안하였다. 생애초기 노출은 이후 동일한 기간 동안 노출로 인한 위해도보다 돌연변이원성의 작용 기작을 통해 작용하므로, 발암 위해성이 더 높다는 것이 결론을 도출하였다. 이에 해당 물

질에 대한 생애초기 노출에 대한 구체적인 자료가 없는 경우에는, 생애초기 노출에 대한 민감도를 고려하기 위하여 본 연구에서는 보통 성인 노출 결과에 기초하여 도출되는 발암잠재력을 평가 연령별로, 유아 및 어린이시기의 노출을 반영하였다. 즉, 대상군 중 만 2세 이하인 영아의 발암물질에 대한 ADAF는 10, 만 3~9세인 유아, 미취학어린이 및 취학어린이의 ADAF는 3을 적용하였다(EPA, 2005).

어린이 주요 활동 공간인 보육시설 및 실내놀이터 이용 어린이에 대한 실내공기질 측정 결과를 바탕으로 알데히드류의 위해성 평가 수행 결과, 폼알데하이드 노출로 인한 어린이 초과발암위해도는  $1 \times 10^5$ 을 초과하고 있었다. 폼알데하이드는 자극성 냄새를 갖는 가연성 무색 기체로 주요 노출 경로는 실내 공기 오염으로 인한 흡입 노출로, 실내 환경은 건물의 용도, 거주자의 행동 특성, 건축자재 및 생활용품, 건물의 위치 등 다양한 환경에 의해 영향을 받고 있는 것으로 알려져 있다(Daisey 등, 2003). 다양한 실내 환경에서 조사되는 오염물질의 경우 새집증후군 및 복합화학민감증을 유발하는 오염물질로 알려져 있으며, 또한 거주자들의 건강상 큰 악영향을 줄 수 있는 물질로 알려져 있고(EPA, 2005), 특히 건축자재에서 발생된 폼알데하이드는 건축자재의 수명, 실내온도 및 습도 그리고 환기율에 따라 그 방출량이 영향을 받으며, 일반적으로 방출되는 기간은 4.4년으로 추정되고 있다(환경부, 2007).

본 연구에서는 6개 도시지역 보육시설, 유치원 및 실내놀이터의 결과가 전국을 대표한다고 할 수 없으며, 특히 실내놀이터의 경우 유료 실내놀이터만 측정을 실시하여 개별적으로 관리되고 있는 무료 실내놀이터의 자료가 포함되지 못한 제한점이

있다. 또한 노출량 산정을 위한 변수 및 시나리오 도출시 제한된 시간의 관찰로 인한 대표성 보완이 필요하다.

이러한 제한점에서도 불구하고 어린이 이용시설에는 위해도가 존재하므로, 위해도 감소를 위해 장기적으로 어린이 건강보호 기준(안) 도입 추진이 필요하다.

## 5. 결 론

다중이용시설 등의 실내공기질관리법 실내공기질 유지기준을 적용하면 폼알데하이드의 경우 4.4% 정도가 기준치를 초과하는 것으로 조사되어 추가적인 오염원 추적을 통한 관리 필요하다. 실내공기질 측정을 통해 보육시설 및 실내놀이터에서 알데하이드류의 위해성 평가 결과 폼알데하이드에 의한 인체 발암 및 비발암독성 위해 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 실내놀이터를 제외한 시설에서 ADAF를 보정하지 않은 50th percentile값이  $1 \times 10^5$ 를 초과하였으며, 놀이방과 어린이집의 ADAF 보정하지 않은 95th percentile값이  $1 \times 10^4$ 를 초과하고 있었다. ADAF를 보정할 경우 그 위해도는 더 높아졌다. 폼알데하이드의 단기 노출에 의한 인체 자극 영향에 대한 비발암독성위험값은 어린이집에서 50th percentile값이 0.1을 초과하였으며, 95th percentile값이 1.0을 초과하는 시설은 없었다.

본 연구에서 평가된 물질 이외에 어린이 활동공간에서 노출되고 있는 잠재적 유해물질 및 인자는 매우 다양하게 존재한다. 또한 시설별 계절별 1회 측정으로 인한 제한점도 존재하므로 본 위해성평가 결과는 불확실성을 가진 확정적인 값은 아니

다. 그러나, 폼알데하이드의 경우 발암과 비발암 위해도가 현 수준에서는 관리가 필요한 것으로 판단된다. 앞으로 해당시설에 대한 지속적인 관심과 적극적인 개선 정책이 요구된다.

## 감사의 글

이 연구는 환경부 (환경정책실 환경보건정책과)의 “어린이 활동 공간 위해성평가” 사업 지원 (2008년)으로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 양지연, 김호현, 이청수, 김선덕, 신동천, 임영욱 (2009), 실내 먼지 중 프탈레이트류 평가-보육시설 및 실내놀이터 중심-, 한국실내환경학회지, 6(1), 15-26.
- 임영욱, 이청수, 김호현, 양지연, 이진우, 손종렬, 박중원, 신동천 (2008), 전국 초등학교 교실 내 유해환경 평가, 한국실내환경학회지, 5(1), 37-47.
- 환경부, 실내환경정보센터, <http://iaqinfo.org/intro>.
- 환경부 (2007), Korean Exposure Factors Handbook.
- 환경부 (2008), 어린이 위해성평가관리를 위한 어린이 시설 유해물질 오염 실태 조사 사업.
- Appleman, L.M., R.A. Woutersen, and V.J. Feron (1982) Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats(I) Acute and subacute studies, Toxicology, 23, 293-297.
- Bruinen de Bruin, Y., Kotzias, D. and Kephelopoulos, S. (2005) Characterization of Indoor Sources

- (COSI), Emissions of Chemical Substances From Materials and Products, Ispra (VA), Italy, European Commission. Joint Research Centre (JRC), Physical and Chemical Exposure Unit.
- Dassonville, C. Demattei, A.-M. Laurent, Y. Le Moullec, N. Seta, I. (2009) Momas Assessment and predictor determination of indoor aldehyde levels in Paris newborn babies homes, *Indoor Air*, 19, 314-323.
- Daisey, J. M., Angell, W. J., Apte, M. G. (2003) Indoor air quality, ventilation and health symptoms in school: an analysis of existing information, *Indoor Air*, 13, 53-64.
- Ginsberg, GL. (2003) Assessing cancer risks from short-term exposures in children. *Risk Analysis*, 23, 19-34.
- Ilgel, E., Karfich, N., Levsen, K., Angerer, J., Schneider, P., Heinrich, J., Wichmann, H., Dunemann, L., Begerow, J. (2001) Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment: part I. Indoor versus outdoor sources, the influence of traffic, *Atmospheric environment*, 35, 1235-1252.
- Kluwe, W.M., C.A. Montgomery, H.D. Giles and J.D. Prejeau. Encephalopathy in rats and nephropathy in rats and mice after subchronic oral exposure to benzaldehyde. *Food Chem. Toxicol* 1983; 21(3): 245-250.
- Marsha K. Morgana,, Linda S. Sheldona, Carry W. Croghana, Paul A. Jonesa, Jane C. Chuangb, Nancy K. Wilson (2007), An observational study of 127 preschool children at their homes and daycare centers in Ohio: Environmental pathways to cis- and trans-permethrin exposure, *Environmental Research*, 104, 266-274.
- Nafstad, J. J. K. Jaakkola, A. Skrondal, P. Magnus (2004), Day care center characteristics and children's respiratory health, *Indoor Air*, 15, 69-75.
- Peter J. F(2007), Indoor air quality and respiratory health of children, *Paediatric respiratory reviews*, 8, 281-286.
- Antova T, Pattenden S, Brunekreef B, J Heinrich, P Rudnai, F Forastiere, H Luttmann-Gibson, L Grize, B Katsnelson, H Moshammer, B Nikiforov, H Slachtova, K Slotova, R Zlotkowska and T Fletcher (2008), Exposure to indoor mould and children's respiratory health in the PATY study, *Journal of Epidemiology & Community Health*, 62, 708-714.
- Til, H.P., R.A. Woutersen, V.J. Feron, V.H.M. Hollanders, H.E. Falke and J.J. Clary. (1989), Two-year drinking water study of formaldehyde in rats, *Food Chemical Toxicology*, 27(2), 77-87.
- US EPA (1989; 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.
- US EPA, Office of Children's Health Protection, <http://yosemite.epa.gov/ochnp/ochpWeb.nsf>.
- WHO (2001) Regional Office for Europe, Copenhagen, Denmark, Air Quality Guidelines - Second Edition Chapter 5.8 Formaldehyde.