

어린이 주요 활동 공간의 휘발성 유기화합물 노출로 인한 건강 위해성 평가 -보육시설 및 실내놀이터 중심으로-

양지연, 김호현, 양수희, 김선덕, 전준민¹, 신동천², 임영욱*

연세대학교 환경공해연구소, ¹순천제일대학 토목환경과,
²연세대학교 의과대학 예방의학교실

Health Risk Assessment of Aldehydes and VOCs in the Activities Space of Young Children -Focused on Child-care Facilities and Indoor Playgrounds-

Ji-Yeon Yang, Ho-Hyun Kim, Su-Hee Yang, Sun-Duk Kim,
Jun-Min Jeon¹, Dong-Chun Shin² and Young-Wook Lim*

The Institute for Environmental Research, Yonsei University, 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 assessed the lifetime cancer and non-cancer risk of aldehydes and volatile organic compounds exposure of young children at child-care facilities and indoor playgrounds in Korea. The samples were collected at various children's facilities (40 day-care houses, 42 child-care centers, 44 kindergartens, and 42 indoor playgrounds) in summer (Jul~Sep, 2007), winter (Jan~Feb, 2008) and Spring (Mar~Apr, 2008) periods, and analyzed by GC-MS. We estimated the lifetime excess cancer risks (ECRs) of formaldehyde, acetaldehyde, benzene, chloroform, CCl₄ and tetrachloroethylene, and the hazard quotients (HQs) of Non-carcinogens (toluene, xylene, benzaldehyde and formaldehyde). Formaldehyde evaluated both cancer and non-cancer risk. The average ECRs of formaldehyde for young children were $1 \times 10^{-4} \sim 1 \times 10^{-5}$ level in all facilities. HQs of four non-carcinogens did not exceed 1.0 for all subjects in all facilities.

Key words : child-care facilities, health risk assessment, VOCs, aldehydes

서 론

최근 점차적으로 실내공기질 관리를 위한 법적용 다중이용시설을 확대할 필요성을 제기하고 있으며, 현재 포함되어 있지 않은 미적용 다중이용시설에 대

※ To whom correspondence should be addressed.

Tel: +82-2-2228-1898, Fax: +82-2-392-0239

E-mail: envlim@yuhs.ac

한 실태조사연구를 바탕으로 한 알데하이드(Aldehydes) 및 휘발성유기화합물류(Volatile Organic Compounds, VOCs)의 건강위해성평가(Health risk assessment, HRA) 연구가 선행된 바 있다(양지연 등, 2008). 더불어, 현재까지 시행된 미적용 다중이용시설, 사회복지시설 및 소규모시설 등(영화관, 사무실, 대형음식점, 학원, 영화관, PC방, 노래방, 주점, 예식장, 실내체육관, 전시장 및 사회복지시설)을 통합 평가하여 미적용 다중이용시설에 대한 법적관리대상 확대방안과 미적용 다중이용시설의 관리지침 및 관리방안 도출, 법으로 규제하기 어려운 소규모시설을 관리하는 방안을 모색하고 있다(환경부, 2007).

그러나, 이상 언급된 다중이용시설들은 이용자의 특성 및 선호도에 따라 월 2~3회, 1~2시간 이용하는 시설도 있으나, 본 연구에서의 주요 평가 시설인 놀이방, 어린이집, 유치원 등 보육시설 및 실내놀이터의 경우 월 20일 이상, 1일 4~10시간 가량을 이용하고 있다(환경부, 2008). 이는 성인이용시설이 아닌 민감 집단인 유아 및 어린이들이 이용하는 곳이므로 더욱 관리가 필요하다. 최근 성행하고 있는 실내놀이터의 경우 어린이 놀이문화의 확대 보급을 통해 이용 빈도가 잦아지고 있는 어린이 놀이공간이기도 하다. 그럼에도 불구하고 현재 주요 보호 대상인 어린이들의 주요 활동공간인 보육시설 및 실내놀이터의 전국단위 조사는 이전까지 이루어지지 않았고, 주요 노출 물질로 인한 어린이 건강위해성평가 연구도 드물다.

일반적으로 알데하이드 중 폼알데하이드(Formaldehyde)의 경우 대표적인 발암물질로 노출 농도가 증가함에 따라 최대호기유속(Peak expiratory flow rate, PEFR)의 값은 통계적으로 유의하게 감소하며, 낮은 농도 폼알데하이드 노출 한 결과 눈, 코, 인후, 피부 영향을 주며, 천식, 호흡기관에 자극을 유발시킨다(Til *et al.*, 1989). VOCs는 알레르기 유발 물질로 확인되었다(Becher *et al.*, 1996). VOCs 중 대표적인 비발암물질인 톨루엔(Toluene)의 경우 유아, 어린이들의 영향은 성인들과 비슷하며, 선행 연구에서는 아기들에게 성인보다 민감하게 영향을 미칠 수 있다고 보고하고 있다(Foo, 1993). 이러한 VOCs 물질은 실외의 산업활동, 차량연소 뿐만 아니라 실내 전자제품, 일반 소비재, 접착제, 조리, 실내내장재 및 건축자재 등 매우 다양하다(Chan *et al.*, 2002). 이와 같이 VOCs는 실내 환경보건 문제에서 매우 중

Table 1. Description of the children facilities

	Indoor playground	Daycare home	Childcare center	Kinder-garten
Seoul	7	7	7	7
Anshan	7	7	7	7
Daejeon	7	5	8	8
Suwon	7	7	6	8
Busan	7	7	7	7
Yeosu	7	7	7	7
All locations	42	40	42	44

요한 의미를 가지는 유해 물질이다.

따라서, 본 연구에서는 놀이방, 어린이집, 유치원 등 보육시설과 실내놀이터 즉, 가정이외의 어린이 주요 활동공간의 6개 도시 실태조사 결과를 바탕으로 폼알데하이드 등 알데하이드류 및 톨루엔 등 VOCs로 인한 위해성평가를 통해 어린이 건강보호를 위한 기초자료에 그 목적이 있다.

연구 및 방법

어린이 주요 활동공간은 실내놀이터 및 보육시설(놀이방, 어린이집, 유치원)을 평가대상공간으로 지정하여 전국 6개 도시(서울, 수원, 대전, 부산, 안산, 여수)의 실내놀이터 42개 시설, 놀이방, 40개 시설, 어린이집 42개 시설, 유치원 44개 시설을 최종 조사하였다.

1. 조사 시기 및 측정대상 시설의 선정

여름(1차)조사는 2007년 7월~9월, 3개월 동안 대상 시설 섭외 및 측정이 동시에 수행하였고, 겨울(2차)조사는 2008년 1월~2월, 봄(3차)조사는 3~4월에 걸쳐 최종 시설별 3회 실시하였다. 시설 내 주 활동공간을 실내 대표지점으로 하여 측정하였고, 시설별 1회 조사하였다. 지역별 조사대상시설 수는 Table 1과 같다.

2. 평가 대상 물질

“다중이용시설 등의 실내공기질관리법” 상의 시행규칙에서 제시하고 있는 항목 폼알데하이드(Formaldehyde)와 벤젠(Benzene), 톨루엔(Toluene), 에틸벤젠(Ethylbenzene), 자일렌(Xylene) 및 스티렌

(Styrene) 을 포함하고, TO-14(USA, Supelco) 표준물질 27종 중 검출된 주요 구성 물질과 위해성평가를 위한 발암 및 비발암 독성자료가 존재하는 VOCs를 주요 대상물질로 선정하였다. 기타 물질은 VOCs 중 클로르포름(Chloroform), 사염화탄소(CCl₄), 트리클로로에틸렌(TCE) 및 알데하이드류 중 아세트알데하이드(Acetaldehyde), 벤질알데하이드(Benzaldehyde) 5종으로 총 평가 물질은 11종이다.

3. 시료채취 및 분석방법

실내공기 중 알데하이드류 및 VOCs의 시료채취 및 분석방법은 환경부의 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”에서 규정하고 있는 실내공기질 공정시험 방법에 준하여 실시하였다. 시료채취는 운영 시간에 실시하는 것을 원칙으로 하였으며, 채취장소 및 지점은 대상 시설의 구조, 특성, 발생원, 환기시설의 운영패턴 등을 고려하여 주요 놀이공간 등 대표적인 장소를 선정하였다.

공기 중 폼알데하이드는 오존스크러버가 장착된 DNPH (2, 4-dinitrophenylhydrazone) 카트리지를 사용하였으며, 흡착된 폼알데하이드를 유도체화하여 HPLC (High Performance Liquid Chromatography) 로 분석하였다. 공기 중 VOCs는 Tenax-TA 고체 흡착관을 이용하여 흡착한 후, 열탈착 장치가 연결된 GC/MSD (Gas Chromatography/Mass Selected Detector)로 분석하였다.

4. 분석의 정도관리

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 및 DNPH 카트리지의 청정도 평가, VOCs 흡착관 이력 관리 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 시료채취한 후 정량 분석하였으며, 3차는 분석자료의 신뢰성 제고를 위해 VOCs 물질만을 대상으로 표준가스 대비 허용오차를 평가하였다. 1~2차의 측정 결과는 20% 내

외의 허용오차범위 내의 오차비율을 나타냈고, 3차의 표준가스에 대한 분석기관별 농도는 표준편차는 15% 이내의 재현성을 나타냈다. 물질별 검출한계 (LOD)는 VOCs 중 벤젠 0.3 µg/m³, 톨루엔 0.25 µg/m³, 에틸벤젠 0.25 µg/m³, m,p-자이렌 0.35 µg/m³, o-자이렌 0.24 µg/m³ 및 스티렌 0.34 µg/m³, 클로르포름 0.23 µg/m³, 사염화탄소 0.14 µg/m³, 테트라클로르에틸렌 0.18 µg/m³ 및 알데하이드류 중 폼알데하이드 0.0003 µg/m³, 아세트알데하이드 0.0003 µg/m³, 벤질알데하이드 0.0004 µg/m³였다.

5. 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, 차세대 독성 중심으로 자료 수집 및 고찰하였다. 자료 고찰에 의해 인체 발암성 가능 물질은 발암성 물질로, 노출 시기에 상관없이 노출량에 의한 독성 유발 물질은 비발암독성 물질로 구분하였다.

평가 대상 중급속의 위험성 구분은 벤젠, 클로르포름, 사염화탄소, 테트라클로르에틸렌, 폼알데하이드 및 아세트알데하이드 6종은 발암성물질로 분류하였고, 톨루엔, 자일렌, 벤질알데하이드 스티렌, 에틸벤젠 및 폼알데하이드는 6종은 비발암물질로 최종 분류하였다. 폼알데하이드의 경우 발암 및 비발암성 독성이 공존하므로 중복 평가하였다.

대상물질의 건강위해성평가를 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 Table 2 와 같다.

최종적으로, 발암성 물질에 의한 평생초과발암위해도 (Excess Cancer Risk: ECR)와 비발암 물질에 의한 독성위험값 (hazardous quotient: HQ)은 다음과 같은 수식이 이용되었고 (US EPA, 1989, 1997), 비발암 물질의 RfC값은 US EPA에서 미국 일반 성인의 일일호흡률 및 체중을 이용하여 단위를 mg/m³로 환산하였기에 본 연구에서는 이를 다시 고려하여 RfC의 단위를 인체일일노출량과 동일한 mg/kg/day로 보정하여 HQ를 산출하였다.

Table 2. Dose response assessment of chemicals

Chemicals	Classification of material	Exposure route	Endpoint	N(L)OAEI (mg/kg-day) (mg/m ³)	UF	RfD (C) (mg/kg-day) (mg/m ³)	Reference
Benzene	Carcinogenic	Inhalation	Decreased lymphocyte	1.2	300	2.2~7.8 × 10 ⁻⁶	Rinsky (1987)
Chloroform	Carcinogenic	Oral	Liver lesions	12.9	1000	0.01	Heywood (1979)
Carbon tetrachloride	Carcinogenic	Oral	Liver lesions	0.71	1000	0.0007	Bruckner (1986)
Trichloro ethylene	Carcinogenic	Inhalation	Liver lesions	135	100	-	Monster AC (1976)
Formaldehyde*	Carcinogenic Non carcinogenic	Oral	Squamous cell carcinoma	15	100	0.2	Til (1989)
Acetaldehyde	Carcinogenic	Inhalation	Nasal squamous carcinoma	273	1000	0.009	Appleman (1986)
Toluene	Non carcinogenic	Inhalation	Neurological effects	128	10	5	Foo SC (1993)
Xylene	Non carcinogenic	Inhalation	Neurologic	39	300	0.1	Korsak (1994)
Benzaldehyde	Non carcinogenic	Oral	Kidney toxicity	400	1000	0.1	Kluwe (1983)
Styrene	Non carcinogenic	Inhalation	CNS effects	94	30	1.0	Mutti (1984)
Ethylbenzene	Non carcinogenic	Inhalation	Liver, Lung	434	300	1.0	Andrew (1981)

*Carcinogenic and Non-carcinogenic

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

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

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

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)

6. 건강위해성평가

본 연구에서는 다음과 같이 대상 시설별 어린이

위해성 평가를 실시하였다. 대상 시설 및 연령은 놀이방(6개월~만 2세), 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, 부재시에는 성인 자료를 활용하였다. 어린이민감영향물질은 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.

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(Ginsberg *et al.*, 2003). 미국 EPA에서는 life-stage 중생애 초기 노출에 의해서는 시기별 민감성이 존재하기 때문에, life-stage 고려한 실험동물 자료에 근거

한 어린이 용량·반응 자료는 중간 불확실성만이 존재하나, life-stage를 고려하지 않은 실험동물 자료일 경우에는 중간 불확실성뿐만 아니라 중내 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 위해도와 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 물질에 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(US EPA, 2005).

어린이민감영향 물질은 TDI(Tolerable Daily Intake) 결정과정을 거쳤고, TDI 자료 부재시 RfD(Reference dose)값으로 대치하여 독성위험값(Hazardous Quotient: HQ)을 산출하였다. 마지막으로 비발암독성 물질은 RfD(Reference dose) 결정과정을 거쳐 독성위험값(Hazardous Quotient, HQ)을 산출하였다.

시설별, 물질별, 연령별 평생평균일일노출량(LADD)의 확률분포값을 이용하여 인체 위해 확률분포값을 산정하였다. 최종적으로 인체 위해 확률분포의 50th percentile값 및 95th percentile값을 이용하였고, ECR는 $10^6 \sim 10^4$ 수준, HI 및 HQ는 0.1~1 초

과 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.

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

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: Average time for lifetime (days)

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 설문문의 내용에는 어린이의 보육시설 및 실내놀이터 이용에 관한 일반적인 질문과 관련하여 아이들 놀이의 특성(놀이 시간, 횟수, 요일별, 시간대별 및 기타 외)과 어린이에 대한 정보 등을 포함하였다.

시설 운영자 설문조사를 통해 시설별 주요이용연령과 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. 어린이집은 1일 최소 8시간에서 최대 10시간을 이용하고 있었다. 유

Table 3. Exposure factor (1) Inhalation

Exposure factor	Symbol	Age (years)				Probability distribution	Source
		0.5~2	3~4	5~6	7~9		
Daily inhalation rate (m ³ /day)	BRm	5.7	8.3	9.2	12.0	Log-normal	US CEFH (2002)
Activity inhalation rate (m ³ /hr)	BRh	1.9	1.9	1.9	1.9	Triangle	US CEFH (2002)

Table 4. Exposure factor (2) Body weight

Exposure factor	Symbol	Age (years)				Probability distribution	Source
		0.5~2	3~4	5~6	7~9		
Body weight (kg)	BW	10	16	20	30	Log-normal	KEFH (2007)

Table 5. Exposure factor (3) Exposure period etc

Exposure factor	Symbol	Age (years)				Probability distribution	Source
		0.5~2	3~4	5~6	7~9		
Exposure period (year)	EDindoor	1.5	2.0	2.0	3.0	—	This study
Number of standard time exposure (days)	ATnc	547.5	730	730	1095	—	
Number of child life time exposure (days)	AT	25550	25550	25550	25550	—	KEFH (2007)
Number of year exposure (days/yr)	Location	Daycare home	Childcare center	Kindergarten	Indoor playground	Triangle	This study
	EFindoor	258	258	258	36		

Table 6. Exposure factor (4) Daily exposure and daily playing time

Exposure factor	Symbol	Daycare home	Childcare center	Kindergarten	Indoor playground	Probability distribution	Source
Daily exposure (hr)	ETindoor	10	10	5	2	Uniform	This study
Daily playing (hr)	ETj	7	7	5	2	Uniform	

치원은 만 6~7세의 어린이가 1일 5시간 이용하고 있었고, 수면시간은 없는 것으로 조사되었다. 실내놀이터의 경우 1주일에 1~2회 정도 이용하고 있었다.

관찰조사방법은 40분간의 비디오 촬영 및 판독분석을 실시하였다. 어린이 노출형태조사를 통한 인자값의 결정 및 특이적 노출형태를 살펴보기 위해 보육시설의 경우 해당시설의 협조를 통해 자율놀이기 40분을 관찰과 동시에 비디오촬영을 진행하였다. 연령별로 차이는 있지만 자율놀이기 시간에 어린이들의 활동력이 가장 왕성하고 다양한 놀이형태를 보인다는 보육시설의 조언을 바탕으로 오전 자율놀이기 시간을 주 관찰 및 비디오 촬영시간으로 진행하였

다. 관찰 및 비디오판독 중 주요 관찰내용은 보육시설 및 실내놀이터에서의 주요 놀이 및 학습형태 관찰을 통한 특이적 노출 형태가 있는지를 판단하였고, 놀이형태에서 서서 있기, 앉아 있기, 걷기, 뛰기, 뒹굴기 등의 형태를 조사하였다. 따라서, 관찰 및 비디오판독을 통해 놀이방의 경우 누워있기, 앉아있기, 기어다니기의 놀이형태를 반영하고, 어린이집의 경우 누워있기, 앉아있기 등을 반영, 유치원의 경우 누워있기 및 기어다니기의 놀이형태는 빠지고, 실내놀이터의 경우 뒹굴기를 포함한 모든 놀이형태를 적용하였다.

관찰조사 및 자료 조사를 통한 노출변수에 대한

Table 7. Summary of quantitative estimates of VOCs aldehydes (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Substance	Location							
	Indoor playground		Daycare home		Childcare center		Kindergarten	
	Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max
Formaldehyde	42.7	3.6 ~ 217.2	34.1	5.5 ~ 277.4	41.7	4.2 ~ 196.0	28.4	3.8 ~ 114.4
Acetaldehyde	20.1	<LOD ¹⁾ ~ 95.8	21.8	<LOD ~ 128.2	25.0	<LOD ~ 133.5	19.5	<LOD ~ 101.9
Benzaldehyde	1.1	<LOD ~ 2.8	1.1	<LOD ~ 24.7	0.6	<LOD ~ 4.3	1.5	<LOD ~ 44.0

¹⁾LOD: Limit of detection

Table 8. Summary of quantitative estimates of VOCs (unit: $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Substance	Location							
	Indoor playground		Daycare home		Childcare center		Kindergarten	
	Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max	Mean	Min ~ Max
Benzene	7.0	1.7 ~ 27.3	6.1	1.2 ~ 23.5	5.5	1.1 ~ 27.6	6.1	1.5 ~ 43.7
Trichloroethylene	2.5	<LOD ¹⁾ ~ 22.4	2.0	<LOD ~ 55.3	1.2	<LOD ~ 9.5	1.5	<LOD ~ 15.3
Toluene	83.5	7.8 ~ 455.0	73.4	2.0 ~ 324.7	67.8	3.5 ~ 325.9	73.6	5.6 ~ 247.2
Ethylbenzene	15.4	<LOD ~ 71.7	9.6	0.2 ~ 57.1	8.5	<LOD ~ 62.7	10.2	0.2 ~ 134.5
m,p-Xylene	76.6	0.4 ~ 2,550.8	16.5	<LOD ~ 97.1	17.2	0.5 ~ 125.8	37.6	0.3 ~ 745.6
Styrene	5.3	0.1 ~ 33.2	5.7	0.1 ~ 140.3	4.2	0.1 ~ 27.1	4.7	<LOD ~ 71.5
o-Xylene	9.7	<LOD ~ 61.1	5.2	0.2 ~ 38.0	5.5	0.3 ~ 29.6	7.8	0.1 ~ 219.3
Carbonte trachloride	0.4	<LOD ~ 1.7	0.3	<LOD ~ 1.6	0.3	<LOD ~ 1.8	0.3	<LOD ~ 4.5
Chloroform	1.1	<LOD ~ 6.7	1.6	<LOD ~ 13.0	0.9	<LOD ~ 8.5	1.1	<LOD ~ 24.0

¹⁾LOD: Limit of detection

정보는 다음의 Table 3~6과 같다. 아래 세부 노출 변수를 활용한 흡입, 섭취 및 피부접촉을 통한 노출량 산정 계산식은 제시하지 않는다.

결 과

1. 대상 시설의 실내 유해 물질 농도 분포

어린이시설 실내공기 중 알데하이드의 분포를 알아보기 위해 3계절 측정된 결과, Table 7에 제시한 바와 같이 폼알데하이드의 실내 평균 농도는 실내 놀이터 ($42.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 어린이집 ($41.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 놀이방 ($34.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$), 유치원 ($28.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 순으로 측정되었다. 보육시설의 실내기준비교치가 없으므로, 교육인적자원부 교사내 공기의 질에 대한 유지·관리기준($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$)으로 비교하면 실내놀이터 7.5%, 어린이집 4.2% 초과되는 것으로 나타났다.

Table에는 제시하지 않았지만 놀이방의 실내/실외 농도비(I/O ratio)가 폼알데하이드 1.5, 아세트알

데하이드 1.1로 나타나는 등 대부분의 시설에서 알데하이드류 물질들의 I/O ratio가 1.1~5.0의 범위로써 실외보다 실내 농도가 높게 나타났다.

Table 8에 제시한 바와 같이 VOCs의 국내 보육 시설 기준치가 없으므로, 기준치 초과율을 산출할 수 없으며, 전체적으로 일반적인 농도 수준으로 측정되었다. 물질별 평균농도를 보면, 톨루엔 > m,p-자일렌 > 에틸벤젠 순으로 나타났으며, 특히, 실내놀이터에서는 m,p-자일렌 성분이 다른 시설에 비해 높게 조사되었고, 다른 성분들은 시설별 차이를 나타내지 않았다.

2. 건강위해성평가

1) 발암성 물질의 평가

ADAF를 보정한 초과발암위해도 50% 해당값은 총 노출경로에 의해서는 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ 범위로 산출되었으며, 흡입 노출 초과발암위해도는 $10^{-10} \sim 10^{-2}$ 범위로 산출되었다. 대상 발암 물질 폼알데하이드의

Table 9. Lifetime Excess Cancer Risk estimates for 50th percentile value of Carcinogens application ADAP

Facility	Age (years)	ADAP_Lifetime Excess Cancer Risk_ 50th percentile value					
		Benzene	Chloroform	CCl ₄	TCE	Formaldehyde	Acetaldehyde
Inhalation Total Excess Cancer Risk							
Playroom	0.5~2	2.84×10^{-5}	2.06×10^{-6}	4.21×10^{-7}	2.34×10^{-8}	2.26×10^{-4}	2.56×10^{-6}
Day-care center	2	3.02×10^{-5}	1.62×10^{-6}	4.44×10^{-7}	3.08×10^{-8}	4.24×10^{-4}	3.56×10^{-6}
	3~4	1.10×10^{-5}	5.72×10^{-7}	1.55×10^{-7}	1.14×10^{-8}	1.53×10^{-4}	1.27×10^{-6}
Kindergarten	5	9.57×10^{-6}	5.09×10^{-7}	1.39×10^{-7}	1.01×10^{-8}	1.37×10^{-4}	1.15×10^{-6}
	5~6	5.50×10^{-6}	1.98×10^{-7}	7.37×10^{-8}	6.44×10^{-9}	4.43×10^{-5}	4.66×10^{-7}
Indoor playground	3~4	1.38×10^{-7}	6.65×10^{-9}	2.05×10^{-9}	2.03×10^{-10}	1.23×10^{-7}	9.08×10^{-9}
	5~6	1.12×10^{-7}	5.41×10^{-9}	1.68×10^{-9}	1.68×10^{-10}	1.00×10^{-7}	7.62×10^{-9}
	7~9	1.12×10^{-7}	5.38×10^{-9}	1.69×10^{-9}	1.70×10^{-10}	1.00×10^{-7}	7.55×10^{-9}

Table 10. Lifetime Excess Cancer Risk estimates for 95th percentile value of Carcinogens application ADAP

Facility	Age (years)	ADAP_Lifetime Excess Cancer Risk_ 95th percentile value					
		Benzene	Chloroform	CCl ₄	TCE	Formaldehyde	Acetaldehyde
Inhalation Total Excess Cancer Risk							
Daycare home	0.5~2	8.57×10^{-5}	1.25×10^{-5}	1.36×10^{-6}	3.01×10^{-7}	1.32×10^{-3}	1.38×10^{-5}
Childcare center	2	9.11×10^{-5}	8.02×10^{-6}	1.46×10^{-6}	1.98×10^{-7}	1.70×10^{-3}	1.88×10^{-5}
	3~4	3.35×10^{-5}	2.85×10^{-6}	5.38×10^{-7}	7.00×10^{-8}	6.26×10^{-4}	6.96×10^{-6}
Kindergarten	5	3.12×10^{-5}	2.72×10^{-6}	4.93×10^{-7}	6.57×10^{-8}	5.61×10^{-4}	6.17×10^{-6}
	5~6	2.18×10^{-5}	2.12×10^{-6}	4.27×10^{-7}	4.68×10^{-8}	1.94×10^{-4}	2.55×10^{-6}
Indoor playground	3~4	4.17×10^{-7}	3.24×10^{-8}	6.90×10^{-9}	1.59×10^{-9}	6.06×10^{-7}	4.88×10^{-8}
	5~6	3.40×10^{-7}	2.74×10^{-8}	5.58×10^{-9}	1.25×10^{-9}	5.21×10^{-7}	4.19×10^{-8}
	7~9	3.54×10^{-7}	2.75×10^{-8}	5.65×10^{-9}	1.35×10^{-9}	4.95×10^{-7}	4.16×10^{-8}

총 발암위해도는 $10^{-7} \sim 10^{-4}$ 범위, 벤젠의 총 초과발암위해도는 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 범위로 산출되었으며, 그 외 비소, 사염화탄소, 아세트알데하이드 물질은 1×10^{-6} 미만의 낮은 초과발암위해도를 보였다(Table 9).

95% 해당값 흡입 노출 초과발암위해도는 $10^{-9} \sim 10^{-3}$ 범위로 산출되었다. 대상 발암 물질 중 폼알데하이드의 총 발암위해도는 $10^{-7} \sim 10^{-3}$ 범위, 벤젠의 총 초과발암위해도는 $10^{-7} \sim 10^{-5}$ 범위로 산출되었으며, 그 외 사염화탄소, 아세트알데하이드, 트리클로로에틸렌 물질은 1×10^{-6} 미만의 미미한 수치를 보였다(Table 10).

2) 비발암성 물질의 평가

비발암성 물질로 인한 비발암독성위험값, HQ 50% 해당값은 $<0.0001 \sim 0.15$ 범위로 산출되었으며, 흡입 노출 비발암독성위험값은 $<0.0001 \sim 0.15$ 범위로 산출되었다. 대상 발암 물질 중 폼알데하이드가 총비

발암독성위험값이 $0.001 \sim 0.15$ 범위로 가장 높은 위해 수준을 보였다. 대상 비발암성독성물질, 8종의 총 비발암독성위험값에 대한 물질별 독성위험기여율은 폼알데하이드 > 벤질알데하이드의 순으로 나타났다(Table 11).

비발암성 물질로 인한 비발암독성위험값, HQ 95% 해당값은 1을 초과하는 시설은 없었으나, 보육시설 즉, 놀이방 및 어린이집의 비발암위해도가 0.1을 초과하였다(Table 12).

고 찰

보육시설 및 실내놀이터 이용 어린이에 대한 유해물질의 위해성 평가 수행 결과, 시설 이용 시간 및 횟수가 적은 실내놀이터를 제외한 놀이방, 어린이집 및 유치원에서 일부 물질로 인한 위해 가능성

Table 11. Total Hazard Quotient value estimates for 50th% value of non-carcinogenic

Facility	Age (years)	Total Hazard Quotient _ 50th percentile value (person)					
		Xylene	Benzaldehyde	Formaldehyde	Toluene	Styrene	Ethylbenzene
		50th	50th	50th	50th	50th	50th
Inhalation Total Excess Cancer Risk							
Playroom	0.5~2	0.0562	<0.0001	0.0812	0.0862	0.0029	0.0025
Day-care center	2	0.0759	<0.0001	0.1563	0.0998	0.0051	0.0028
	3~4	0.0695	<0.0001	0.1356	0.0913	0.0046	0.0025
	5	0.0621	<0.0001	0.1216	0.0808	0.0042	0.0023
Kindergarten	5~6	0.0320	<0.0001	0.0396	0.0490	0.0017	0.0012
Indoor playground	3~4	0.0011	<0.0001	0.0011	0.0011	0.0001	0.0001
	5~6	0.0009	<0.0001	0.0009	0.0009	0.0001	0.0000
	7~9	0.0006	<0.0001	0.0006	0.0006	<0.0001	0.0000

Table 12. Total Hazard Quotient value estimates for 95th% value of non-carcinogenic

Facility	Age (years)	Total Hazard Quotient _ 95th percentile value (person)					
		Xylene	Benzaldehyde	Formaldehyde	Toluene	Styrene	Ethylbenzene
		95th	95th	95th	95th	95th	95th
Inhalation Total Excess Cancer Risk							
Daycare home	0.5~2	0.3207	<0.0001	0.4610	0.3598	0.0354	0.0138
Childcare center	2	0.3649	<0.0001	0.6044	0.3853	0.0285	0.0139
	3~4	0.3543	<0.0001	0.5440	0.3581	0.0260	0.0136
	5	0.0621	<0.0001	0.1216	0.0808	0.0042	0.0023
Kindergarten	5~6	0.4414	<0.0001	0.1712	0.1992	0.0175	0.0089
Indoor playground	3~4	0.0166	<0.0001	0.0055	0.0041	0.0003	0.0002
	5~6	0.0130	<0.0001	0.0045	0.0034	0.0002	0.0002
	7~9	0.0087	<0.0001	0.0031	0.0023	0.0002	0.0001

이 있는 것으로 평가되었다. 이는 놀이방, 어린이집 및 유치원 시설은 제 2의 가정과 유사할만큼 이용 시간과 횟수가 많기 때문으로 추정된다.

대상 시설에서의 폼알데하이드 노출로 인한 어린이 초과발암위해도는 1×10^{-5} 을 초과하고 있었다. 폼알데하이드의 주요 노출 경로는 실내 공기 오염으로 인한 흡입 노출이었으며, 통계적인 유의성은 없었으나, 2년 이내 신축 건물이거나 1년 이내에 실내 개보수 작업을 실시하였던 시설에서의 초과발암위해도가 그렇지 않은 시설에 비해 다소 높게 예측되었다. 따라서 폼알데하이드는 현재 평가 대상 어린이 보육 시설에서의 적절한 실내 환기와 친환경 실내 소재 사용 권고 등의 대책이 시급히 필요한 물질로 선정되었다. 또한, 폼알데하이드 뿐만 아니라 조사대상 대부분의 물질이 I/O ratio이 1을 초과하

고 있어 실내오염원이 존재 (Ilegn *et al.*, 2001; 김호현, 2007)하고 있으므로, 이에 대한 관심과 대책도 필요하다.

벤젠, 톨루엔 및 자일렌은 실내 건축자재 및 실내 가구 등에 의해 발생 가능한 대표적인 실내 공기 오염물질이다. 벤젠은 자동차 연료 연소에 의한 대표적인 도심 실외 공기 오염물질이기도 하며, 실내 건축자재 및 실내 가구 등에 의해 발생 가능한 실내 오염물질이다. 벤젠의 경우 태아에 벤젠이 노출되면, 엄마의 혈액으로부터 영향을 받아, 기형아, 태아의 성장발육이 늦으며, 골수에 영향을 준다는 보고가 되었다(Adgae *et al.*, 2004). 대상 시설에서의 벤젠 노출로 인한 어린이 초과발암위해도는 50% 해당값에서는 문제시되지 않았고, 95% 해당값에서 어린이집 3~4세, 5세에서 1×10^{-5} 을 다소 초과하였다. 톨루

엔은 어린 시기에 노출로 인해 신경 및 생식 독성 유발 가능한 물질로 분류되어 있으며, 대상 시설에서의 툴루엔 노출로 인한 어린이 민감독성위험값은 50% 해당값은 0.1 이하수준이나, 95% 해당값은 놀이방, 어린이집 대상노출군에서 0.3 내외로 예측되어 잠재적인 유해 가능성이 있는 물질로 평가되었다. 자일렌은 대상 시설에서의 50% 해당값 HQ는 0.01 이하수준이나, 95% 해당값이 놀이방, 어린이집 대상노출군에서 0.3 내외수준으로 예측되어 시설별 노출편차가 크고, 이로 인해 특정 요인에 의해 잠재적인 유해 가능성이 있는 물질로 평가되었다. 자일렌의 경우 임신 중에 자일렌 노출 시 태아독성, 태아의 기형이 보고되었으나, 뚜렷한 기형독성 영향에 대한 증거는 명확하지 않다(Korsak *et al.*, 1993). 성인과 어린이의 약물동력학상의 차이에 관한 연구에서 수년 동안 같은 공기의 자일렌에 노출된 성인에 비하여 어린이는 더 높은 유해성을 보이며, 폐 속의 자일렌의 농도도 더 높았다(Korsak *et al.*, 1993).

VOCs 는 페인트, 접착제, 합성수지, 타일, 각종 전자제품, 마루바닥재, 벽지 등과 각종 놀이기구, 도서, 가구, 학습자료에 기인하며, 본 연구의 경우 시설별로 외기의 영향 및 단독건물에 비해 복합건물 및 상가건물 내 공존하는 영업시설(미용실, 현상소, 화장용품샵, 사진샵 등)에서의 다양한 오염원이 이동하여 복합건물내에 위치한 시설에서 높게 조사되었다. 추가적으로 공간이 협소하고, 환기시설이 미비한 경우 높게 나타났다. VOCs 주요 노출 경로는 실내 공기 오염으로 인한 흡입 노출이었으며, 유치원을 제외하고는 통계적인 유의성은 없었으나, 2년 이내 신축 건물이거나 1년 이내에 실내 개보수 작업을 실시하였던 시설에서의 초과발암위해도가 그렇지 않은 시설에 비해 다소 높게 예측되었다. 따라서 벤젠, 툴루엔 및 자일렌은 현재 평가 대상 어린이 보육 시설에서의 지속적인 모니터링을 통한 노출 수준 및 위해 수준 감시 활동이 필요한 것으로 조사되었다.

본 연구에서 6개 도시의 보육시설, 유치원 및 실내놀이터의 실태조사를 실시하였으나, 전체 시설을 대표하는 시설이라고는 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 대표성도 보완이 필요하다.

이러한 제한점에도 불구하고 VOCs 물질로 인한 어린이 이용시설의 위해도는 존재하므로, 위해도 감소를 위해 장기적으로 「대기환경보전법」 및 「다중이용시설 등의 실내공기질관리법」내 어린이 건강보호 기준(안) 도입 추진이 필요하다.

결 론

보육시설 및 실내놀이터에서 가장 높은 위해 요인으로 평가된 물질은 실내공기 중 폼알데하이드에 의한 인체 발암 및 비발암독성 위해 가능성이 있는 것으로 평가되었다. 실내놀이터를 제외한 시설에서 ADAF를 보정하지 않은 50th percentile값이 10^{-5} 을 초과하였으며, 놀이방과 어린이집의 ADAF 보정하지 않은 95th percentile값이 10^{-4} 을 초과하고 있었다. 폼알데하이드의 단기 노출에 의한 인체 자극 영향에 대한 비발암독성위험값은 어린이집에서 50th percentile값이 0.1을 초과하였으며, 95th percentile값이 1.0을 초과하는 시설은 없었다. 발암성 물질 중 벤젠의 경우 매우 보수적 위해성 평가 조건인 ADAF 보정할 경우, 일부 시설에서 10^{-5} 을 초과하는 것으로 관찰되어 잠재적인 위해 가능성이 있을 수 있는 것으로 평가되었다. 아세트알데하이드와 클로로포름은 보수적 위해성 평가인 ADAF 보정한 95th percentile값의 경우에만 다소 10^{-6} 을 초과하는 것으로 나타났다. 툴루엔, 자일렌은 놀이방, 어린이집 및 유치원의 실내공기 오염에 의한 흡입 독성 지수 또는 비발암독성위험값의 95th percentile값이 0.1을 초과하여 잠재적인 위해 가능 물질로 평가되었다.

감사의 글

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

참 고 문 헌

김호현, 임영욱, 양지연, 이용진, 서 일, 김창수, 신동천.

- BTEX and MTBE concentrations in residential indoor air near industrial complex, Korea, *한국환경독성학회지* 2007; 22(2): 103-109.
- 양지연, 김호현, 신동진, 김윤신, 손종렬, 임준환, 임영욱. 일부 미적용 다중이용시설의 실내 공기 중 알데히드류 및 휘발성유기화합물 노출로 인한 건강위해성평가, *한국환경과학회지* 2008; 17(1): 45-56.
- 장재연, 조수남, 리선자, 윤민정, 정해관, 김소연, 김은혜, 최경호, 김영희, 김조일. 한국형 노출지수 개발 및 운용체계 구축연구, 2007.
- 환경부. 다중이용시설 실내공기질 실태조사(I) 2007.
- 환경부. 어린이 위해성평가·관리를 위한 어린이 시설 유해물질 오염 실태 조사 사업 2008.
- Adaget JL and Church TR. Outdoor, indoor and personal exposure to VOCs in children, *Environ Health Perspect* 2004; 112(14): 1386-1392.
- Andrew FD, Buschbom RL, Cannon WC, Miller RA, Montgomery LF, Phelps DW. Teratologic assessment of ethylbenzene and 2-ethoxyethanol Battelle Pacific Northwest Laboratory, Richland, WA. PB 1981; 83-208074-108.
- Appleman LM, Woutersen RA, Feron VJ, Hooftman RN and Notten WRF. Effect of variable versus fixed exposure levels on the toxicity of acetaldehyde in rats. *J Appl Toxicol* 1989; 6(5): 331-336.
- Appleman LM, Woutersen RA and Feron VJ. Inhalation toxicity of acetaldehyde in rats. I. Acute and subacute studies. *Toxicology* 1982; 23: 293-297.
- Becher R, Hongslo JK, Jantunen, MJ and Dybing E. Environmental chemicals relevant from respiratory hypersensitivity: the indoor environment, *Toxicol Lett* 1996; 86: 155-162.
- Bruckner JV, MacKenzie WF, Muralidhara S, Luthra R, Kyle GM and Acosta D. Oral toxicity of carbon tetrachloride: Acute, subacute and subchronic studies in rats. *Fund Appl Toxicol* 1986; 6(1): 16-34.
- Chan CY, Chan LY, Wang XM, Liu YM, Lee SC, Zou SC, Sheng GY and Fu JM. Volatile organic compounds in road side microenvironments of metropolitan Hong-Kong. *Atmospheric Environment* 2002; 36(12): 2039-2047.
- Foo SC, Jeyaratnam J and Koh D. Chronic neurobehavioural effects of toluene, *British Journal of Industrial Medicine* 1993; 46: 783-495.
- Ginsberg GL. Assessing cancer risks from short-term exposures in children. *Risk Anal* 2003; 23: 19-34.
- Heywood R, Sortwell RJ and Noel PRB. Safety evaluation of toothpaste containing chloroform: III. Long-term study in beagle dogs. *J Environ Pathol Toxicol* 1979; 2: 835-851.
- Ilggen E, Karfich N, Levsen K, Angerer J, Schneider P, Heinrich J, Wichmann H, Dunemann L and Begerow J. Aromatic hydrocarbons in the atmospheric environment: Indoor versus outdoor sources, the influence of traffic. *Atmos Environ* 2001; 35: 1235-1252.
- Kluwe WM, Montgomery CA, Giles HD and Prejeau JD. Encephalopathy in rats and nephropathy in rats and mice after subchronic oral exposure to benzaldehyde. *Food Chem. Toxicol* 1983; 21(3): 245-250.
- Korsak Z, Wisniewska-Knypl J and Swiercz R. Toxic effects of subchronic combined exposure to n-butyl alcohol and m-xylene in rats. *Int J Occup Med Environ Health* 1994; 7: 155-166.
- Monster AC, Ciliberti A, Pinto C, Soffritti M, Belpoggi F and Menari L. Results of long-term experimental carcinogenicity studies of the effects of gasoline, correlated fuels, and major gasoline aromatics on rats. *Ann NY Acad Sci* 1997; 837: 15-52.
- Mutti A, Mazzucchi A, Rusticelli P, Frigeri G, Arfini G and Franchini I. Exposure-effect and exposure-response relationships between occupational exposure to styrene and neuropsychological functions. *Am J Ind Med* 1981; 5: 275-286.
- National Toxicology Program (NTP) technical report on the toxicology and carcinogenesis of xylenes (mixed) (60% m-xylene, 13.6% p-xylene, 17.0% ethylbenzene, and 9.1% o-xylene) in F344/N rats and B6C3F1 mice (gavage studies), Research Triangle Park, NC. NTP TR 327, NIH Publ 1986; 86-2583.
- Rinsky RA, Smith AB and Horning R. Benzene and leukemia: an epidemiologic risk assessment. *N Engl J Med* 1987; 316: 1044-1050.
- Sherwood RJ. Pharmacokinetics of benzene in a human after exposure at about the permissible limit. *Ann N Y Acad Sci* 1988; 534: 635-647.
- Til HP, Woutersen RA, Feron VJ, Hollanders VHM, Falke HE and Clary JJ. Two-year drinking water study of formaldehyde in rats. *Food Chem Toxicol* 1989; 27(2): 77-87.
- US EPA Supplement guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens 1989.
- US EPA Supplement guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens 1997.
- US EPA Supplemental guidance for assessing susceptibility from early-life exposure to carcinogens 2005.
- U.S. Environmental Protection Agency (EPA) Child-specific exposure factors handbook.
- Vega E, Mugica V, Carmona R and Valencia E. Hydrocarbon sources apportionment in Mexico City using the chemical

mass balance receptor model. Atmospheric Environment 2000;34:4121-4129.

Zartarian VG, Xue J, Ozkaynak HA, Dang W, Glen G, Smith L and Stallings C. A probabilistic Exposure Asses-

ment for Children Who Contact CCA-Treated Playsets and Decks Using the Stochastic Human Exposure and Dose Simulation Model for the Wood Preservative Exposure Scenario (SHEDS-Wood) 2005.