

## 일부 다중이용시설의 휘발성유기화합물류 및 폼알데하이드 노출로 인한 건강 위해성 평가 : 호텔, 헬스장, 고시원, 독서실, 비디오방을 중심으로

김호현 · 양지연 · 박창수<sup>1)</sup> · 박주희 · 손종렬<sup>2)</sup> · 신동천<sup>3)</sup> · 임영욱\*

연세대학교 의과대학 환경공해연구소, <sup>1)</sup>한국환경공단 환경보건처 환경보건정책팀  
<sup>2)</sup>고려대학교 보건과학대학 환경보건학과, <sup>3)</sup>연세대학교 의과대학 예방의학교실

### Health risk assessment of VOCs and HCHO in the public facilities under uncontrolled Korean-IAQ regulation : focused on hotel, fitness center, gosiwon, reading-room and video-room

Ho-Hyun Kim · Ji-Yeon Yang · Chang-Su Park<sup>1)</sup> · Ju-Hee Park · Jong Ryeul Sohn<sup>2)</sup>

Dong-Chun Shin<sup>3)</sup> and Young-Wook Lim\*

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

<sup>1)</sup>*Department of Green Industry Promotion, Korea Environmental Corporation*

<sup>2)</sup>*Department of Environmental Health, College of Health Sciences, Korea University, Korea*

<sup>3)</sup>*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) and formaldehyde of worker and user at public facilities in Korea. We measured the concentrations of formaldehyde and VOCs in indoor air at 160 public buildings that 5 kinds of public facilities (30 hotel, 30 fitness center, 25 gosiwon, 30 reading-room and 45 video-room) all over the country. There were estimated the human exposure dose and risks with averages of the using-time and frequency for facility users and office workers, respectively. Carcinogens (benzene and formaldehyde) were estimated the lifetime excess cancer risks (ECRs). Non-carcinogens (toluene, ethylbenzene, xylene, and styrene) were estimated the hazard quotients (HQs). HQs of four non-carcinogens did not exceed 1.0 for all subjects in all facilities. Higher HQs of toluene were observed at the reading-room. The average ECRs of formaldehyde and benzene for facility worker and user were  $1 \times 10^{-4}$ ~ $1 \times 10^{-6}$  level in all facilities. The estimated ECRs for reading-room were the highest and the fitness center and gosiwon were the next higher facilities. Because lifetime ECRs of carcinogens exceeded  $1 \times 10^{-4}$  for facility worker in the most facilities, risk management of formaldehyde and benzene in the facilities was necessary. IAQ guidelines should be determined strictly to prevent occurrence of disease caused by poor IAQ beforehand.

*keywords* : VOCs, formaldehyde, health risk assessment, public facility

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

\* 투고일 : 2011.06.20 1차수정일 : 2011.08.26 게재확정일 : 2011.09.08

## 1. 서론

환경부에서는 “지하생활공간공기질관리법”의 전문개정을 추진하여 2003년 “다중이용시설등의 실내공기질관리법”을 공포하고 2004년 5월 30일부로 시행하였다. 적용대상은 지하역사, 지하도상가, 도서관, 의료기관, 찜질방, 대규모점포 등 17개 군이다. 최근 실내 공기질에 대한 관심과 중요성이 더욱 인식됨에 따라 점차적으로 대상시설을 확대할 필요성이 제기되고 있다. 현재 포함되어 있지 않은 미적용 다중이용시설에 대한 실태조사연구를 바탕으로 한 위해성평가 연구가 선행되었고 (김호현 등, 2007; 양지연 등, 2008), 현재까지 시행된 미적용 다중이용시설은 사회복지시설 및 소규모시설 등(1차년도 : 영화관, 사무실, 대형음식점, 학원, 영화관, PC방, 노래방, 주점, 2차년도 : 음식점, 실내체육관, 전시장 및 노인, 부녀자, 아동복지시설 등 사회복지시설)을 통합 평가하여 미적용 다중이용시설에 대한 법적관리대상 확대방안과 미적용 다중이용시설의 관리지침 및 관리방안 도출, 법으로 규제하기 어려운 소규모시설의 관리매뉴얼 등을 구체화하는 작업이 진행되고 있다.

건강유해영향을 유발하는 실내공기오염물질은 매우 다양하며, 대표적인 물질이 휘발성유기화합물류 (Volatile Organic compounds, VOCs) 및 폼알데하이드 (HCHO)이다. VOCs는 다양한 실내배출원으로 인해 대표적인 실내유해물질로 알려져 있다. 잠재적인 VOCs 배출원들은 소비제품, 페인트, 접착제, 가구, 전자제품 및 연소재 등 매우 다양하며 (Guo et al., 2000), 급성과 만성 건강영향을 일으킬 수 있다 (Maroni et al.,

1995). 카르보닐화합물류 (Carbonyl compounds) 중 대표적인 실내오염물질인 HCHO의 경우 인간에게서 건강유해영향을 일으키는 것으로 알려져 있으며 (Hauptmann et al., 2004), 가장 빈번히 발생하는 환경보건학적 유해영향은 안구와 폐에 자극을 일으킨다고 보고되고 있다 (WHO, 2000).

실측자료를 바탕으로 한 건강위해성평가 (Health risk assessment, HRA)시 실내 공기질이 거주자의 거주기간 동안 같은 농도로 늘 노출되는 것은 아니다. 그러나 평생 동안의 노출농도를 모니터링 할 수는 없으므로 위해성 평가 방법론에서는 노출에 대한 가정, 즉 평균농도로 평생 동안 노출된다는 것을 가정하는 것이며, 실측자료가 많은 평균값일수록 그 가정에 대한 신뢰도는 높아진다고 할 수 있다 (환경부, 2001). 본 연구에서 전국단위의 실태조사를 실시하였으나, 모든 시설에 대한 전수조사 및 노출조건에 대한 각각의 조사는 현실적으로 불가능하므로 위해성평가 방법론을 이용한 호텔 등 미적용 다중이용시설 및 비디오방 등 소규모시설의 이용자(손님) 및 근무자의 위해도를 산출하였다.

따라서, 본 조사는 호텔, 헬스장, 고시원, 독서실, 비디오방의 미적용 전국적인 실태조사 결과를 바탕으로 다중이용시설에서 우려되는 HCHO 및 톨루엔 (Toluene) 등 VOCs로 인한 건강 유해 영향의 추정을 통해 미적용 다중이용시설에서의 우려되는 우선물질 및 시설을 파악하여 향후 다중이용시설 법적용 등 실내공기질 관련 정책의 기초자료 활용에 그 목적이 있다.

## 2. 연구 방법

### 2.1. 조사 시기 및 측정대상 시설의 선정

환경부 “다중 이용시설 등의 실내공기질관리법”의 대상시설에 포함되지 않은 시설을 대상으로 실태조사는 2007년 11월-2008년 6월 동안 실시하였다. 전국을 지역을 대상으로 다중이용시설법 미적용 시설인 호텔 30곳, 헬스장 30곳, 고시원 25곳, 독서실 30곳, 비디오방 45곳, 총 160개 시설에서 실내 공기 중 대상물질 농도를 측정하였다.

### 2.2. 평가 대상 물질

“다중이용시설 등의 실내공기질관리법”상의 시행규칙에서 제시하고 있는 폼알데히드 (Formaldehyde)와 벤젠 (Benzene), 톨루엔 (Toluene), 에틸벤젠 (Ethylbenzene), 자일렌 (Xylene) 및 스티렌 (Styrene)의 5종 VOCs를 주요 대상물질로 선정하였다.

## 3. 측정 및 분석

### 3.1. 시료채취 및 분석방법

실내공기 중 포름알데히드 및 5종 VOCs의 시료채취 및 분석방법은 환경부의 “다중이용시설 등의 실내공기질관리법”에서 규정하고 있는 실내공기질 공정시험방법에 준하여 실시하였다. 시료 채취는 대상 시설의 영업시간대에 실시하는 것을 원칙으로 하였으며, 채취장소 및 지점은 대상 시설의 구조, 특성, 발생원, 환기시설의 운영패턴 등을 고려하여 선정하였다.

공기 중 HCHO는 개인 공기 포집 채취기 (Personal Air Sampler, SIBATA)에 오존스크러버 (Ozone-Scrubber) 및 DNPH 카트리지 (Cartridges, Waters Corp, USA)를 장착하여 0.5 L/min의 유량으로 채취하였으며, 카트리지 내 DNPH (2, 4-dinitrophenylhydrazone)에 흡착된 HCHO를 유도체화하여 HPLC (High Performance Liquid Chromatography)로 분석하였다.

VOCs의 경우도 개인 공기 포집 채취기 (Personal Air Sampler, SIBATA)에 Tenax-TA (1/4"×20cm, Supelco, USA) 고체 흡착관을 장착하여 0.2 L/min 유량으로 채취하였으며, 흡착된 VOCs는 고체 열탈착 장치에 의해 1차 고온탈착시키고, 다시 저온농축관에서 농축시킨 후, GC (Gas Chromatography)내 컬럼 (Colume)에 자동 주입되는 열탈착장치가 장착된 GC/MSD (Mass Selective Detector)로 분석하였다. 모든 시료는 분석 전 밀봉 상태로 시료 분석 전 까지 -70℃에서 냉장 보관하였고, 냉장 보관 후 2~3일 내에 정량분석을 실시하였다.

### 3.2. 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 이력관리 및 RRT (Round Robin Test), 즉 임의의 농도의 측정시료의 상호비교시험을 3차에 걸쳐 실시하였다. 참여기관의 측정/분석에 대한 정도 관리를 위해

Table 1. RRT\* results by unknown sample for QA/QC of measured data by different laboratories.

Chemicals	Measured concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )			Average ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	Standard Deviation ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )
	A Lab.	B Lab.	C Lab.		
TVOC	212.8	227.9	199.2	213.3	19.5
Formaldehyde	15.6	11.9	11.6	13.0	1.6

\* RRT : Round robin test

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 각 참여 기관에서 20% 내외의 허용오차범위내의 오차비율을 나타냈고, 3차의 표준가스에 대한 분석기관별 농도는 표준편차는 15% 이내의 재현성을 나타냈다 (Table 1).

### 3.3. 연구대상물질의 평가 분류

평가대상물질은 US EPA (Environmental Protection Agency) 물질분류 범주(US EPA, 1997)에 따라 폼알데히드(probable human carcinogen, B1)와 벤젠 (human carcinogen, A)은 발암물질로 분류하였으며, D group (not classifiable as to human carcinogen)으로 분류된 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 및 스티렌은 비발암물질로 분류하여 평가하였다.

### 3.4. 대상 시설의 분류

전국 미적용 다중이용시설의 실내공기 농도는 지역별, 흡연, 지상/지하, 개업시기, 시설교체 및 공사여부, 방향제 사용, 환기여부 등의 변수가 모든 물질에 대해 통계적으로 유의하고 일관성 있는 농도 차이는 관찰되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 지역 구분 없이 호텔, 비디

오방을 흡연 시설로 감안하여 노출시나리오 평가 시 반영하였다. 참고적으로 호텔의 경우 일반적으로 금연실과 흡연실로 구분되어 일부 객실에서는 흡연이 허용되고 있고, 부대시설(예, 주점 등)에서 흡연이 가능하므로 보수적인 조건을 반영하여 흡연시설로 분류하였다.

### 3.5. 인체노출량 및 건강위해성 평가

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. 각 대상시설별 사용된 노출계수에 대한 자세한 정보는 표 2에 제시하였다.

일일호흡률은 시설 근무자 및 이용자의 특성에 따라 적용하였으며, 국내의 일반인에 대한 호흡률 평가 자료가 없기 때문에 미국환경보호청 (US EPA, 1997)의 'Exposure Factor Handbook'의 연령별 권고치를 적용하였다. 본 연구에서는 대상 시설의 이용 특성을 고려하여 다양한 호흡률을 적용하였다. 만성노출의 가정시 호흡 단일 노출의 경우  $13\text{m}^3/\text{day}$  (Median)로 가정한다. 단기노출 시 휴식 시  $0.4\text{m}^3/\text{hr}$ , 앉아서 하는 가벼운 운동 시  $0.5\text{m}^3/\text{hr}$ , 가벼운 운

Table 2. Exposure factors of workers and users for the facilities.

Exposure Factors		Hotel	Fitness center	Gosiwon	Reading -room	Video -room	
Inhalation*	Worker(m <sup>3</sup> /day)	13	13	13	13	13	
	User(m <sup>3</sup> /hr)	0.4	3.2	0.4	0.4	0.4	
Exposure time (hr/day)	Worker	8	8	8	8	8	
	User	Mean	10	2	23	12	2
		Max	8.2	1.1	7.9	6.7	1.8
Exposure frequency (days/yr)	Worker	300	264	360	360	288	
	User	Mean	60	312	360	360	96
		Max	9.6	74	108	282	46
Exposure duration (years)	Worker	40	40	40	40	40	
	User	60 (1-60)	45 (14-60)	40 (20-60)	45 (14-60)	40 (20-60)	
Body weight** (kg)	Worker	60	60	60	60	60	
	User	1-4 years 10, 5-13 years 30, >13 years 60					

\* U.S. EPA (1997)

\*\* KATS (2004) : Average body weight of 1-4 years old 12.1kg, Average body weight of 5-13 years old 32.3kg, Average body weight of 14-19 years old 58.6kg, Average body weight of >20 years old 62.8kg

동 시 1.0m<sup>3</sup>/hr, 중간활동 시 1.6m<sup>3</sup>/hr, 격렬한 운동 시 3.2m<sup>3</sup>/hr로 제안하고 있다. 본 논문에서는 미적용과제의 시설이용 특성에 따라 단기노출 시에 따른 시설별 이용에 따른 호흡률을 적용하였다. 호텔의 경우 0.4m<sup>3</sup>/hr, 헬스장의 경우 3.2m<sup>3</sup>/hr, 독서실은 0.4m<sup>3</sup>/hr, 고시원은 0.4m<sup>3</sup>/hr 마지막으로 비디오방의 경우 0.4m<sup>3</sup>/hr로 적용하였다.

체중은 설문 조사 자료에 의한 대상 시설별 이용자 연령 분포에 따라 2004년 한국기술표준원(KATS, 2004)의 연령별 평균 체중을 이용하였다. 평균수명의 경우 1997년 통계청자료인 한국인의 기대수명 70년을 적용한다. 노출 빈도(hr/day)의 경우 시설별 일간 노출 시간 산정 시 해당시설에 근무하는 근무자 및 이용자 손님)의 설문을 토대로 산정하였다. 설문을 통한 시설별 이용시간 평균치 및 최대이용시간을 살

펴보면 호텔 8.2hr 및 10hr/day, 헬스장 1.1hr 및 2hr/day, 고시원 7.9hr 및 23hr/day, 독서실 6.7hr 및 12hr/day, 비디오방 1.8hr 및 2hr/day로 조사되었다. 근무자의 경우 8hr/day 근무를 가정하여 시설별로 hrs/day 근무하는 것으로 가정하였다.

노출시나리오별로 노출시간이 가장 많은 근무자 (Worst Inhalation exposure scenario ; WIES), 설문조사 된 값의 최대값을 사용한 최빈이용자 (Moderate Inhalation exposure scenario ; MIES), 다소 노출이 적은 것으로 판단되는 평균값을 사용한 평균이용자 (Lowest Inhalation exposure scenario ; LIES), 3그룹으로 나눠 노출빈도를 적용하였다.

본 연구에서는 최악 노출 시나리오(Worst Inhalation exposure scenario ; WIES)를 위해서는 노출 기간과 시간이 가장 긴 근로자 자료를 이용하였

Table 3. Dose response assessment for carcinogen.

Carcinogens	Dose-response model	Cancer potency factor ((mg/kg/day) <sup>-1</sup> )	Unit risk ((μg/m <sup>3</sup> ) <sup>-1</sup> )
Formaldehyde	Linearized multistage model	4.60×10 <sup>-2</sup>	1.30×10 <sup>-5</sup>
Benzene	Linearized multistage model	3.60×10 <sup>-2</sup>	6.00×10 <sup>-6</sup>

으며, 최빈 이용자에 대한 노출 패턴에 의해서 최빈 노출 시나리오 (Reasonable Maximum Inhalation exposure scenario ; RMIES), 그리고 이용자의 평균 노출 패턴에 의해서는 평균 노출 시나리오 (Average Inhalation exposure scenario; AIES)의 3가지 조건에 의한 인체 노출량 및 위해도를 산출하였다. 대상 시설의 노출 시나리오별 인체 노출량은 노출 시기별 노출 조건을 고려할 수 있도록 수식을 일부 변형하여 적용하였다.

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

Where LADD : Lifetime average daily dose (mg/kg/day)  
 CIA : Concentration of chemicals in indoor air at facility (mg/m<sup>3</sup>)  
 IRkj : Inhalation rate for exposure scenario, k and facility, j (m<sup>3</sup>/hr)

ETkj : Exposure time for exposure scenario, k and facility, j (hrs/day)  
 EFkj : Exposure frequency for exposure scenario, k and facility, j (days/yr)  
 EDkj : Exposure durations for exposure scenario, k and facility, j (yrs)  
 BWi : Body weight at age, I (kg)  
 AT : Average time for lifetime (days)

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. HCHO는 Kerns et al.(1983) 연구의 용량-반응 자료를 바탕으로 선형화 다단계 모델 (Linearized multistage model)에 의해 발암잠재력이 4.6×10<sup>-2</sup>(mg/kg/day)<sup>-1</sup>으로 산출되었다. 벤젠의 발암잠재력은 벤젠 노출 산업 근로자의 역학자료에 의한 단위위해도의 기하평균값인 3.6×10<sup>-2</sup>(mg/kg/day)<sup>-1</sup>으로 산출되었다(Table 3).

Table 4. Dose response assessment for non-carcinogen.

Chemicals	Toxicity data (mg/m <sup>3</sup> )	RfC (mg/m <sup>3</sup> )
Toluene	LOAEL (HEC) = 119	0.4
Ethylbenzene	NOAEL = 434	1
Xylene	NOAEL = 39	0.1
Styrene	NOAEL(HEC) = 39	0.1

L(N)OAEL : Lowest(No) Observed Adverse Effect Level  
 HEC : Human Equivalent Concentration  
 RfC : Reference concentration for inhalation

Table 5. Distribution of concentrations for VOCs in indoor air at all subject's facilities.

VOCs	Concentration ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )				
	5th%	25th%	50th%	75th%	95th%
Formaldehyde	16.80	35.61	55.90	82.39	153.58
Benzene	0.67	1.15	1.50	3.25	6.40
Toluene	3.58	7.06	17.80	32.74	133.22
Ethylbenzene	1.42	2.59	3.77	5.81	10.61
Xylene	0.66	3.40	6.10	10.94	22.50
Styrene	0.00	0.23	0.86	2.98	9.04

비발암성 물질의 호흡 노출에 대한 노출참고치, RfC (reference concentration)의 경우 톨루엔은 역학 자료에 의해 독성 영향이 유발되지 않을 가장 낮은 농도, NOAEL이  $119\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 결정되었으며 (Foo 등, 1988), 이를 바탕으로 독성 결과의 불확실성 상수를 고려하여 호흡 노출 참고치, RfC를  $0.4\text{mg}/\text{m}^3$ 으로 산출된 자료를 이용하였다. 또한, 에틸벤젠, 자일렌, 스티렌의 RfC값은 Hardin et al. (1981), Korsak et al. (1994), Mutti et al. (1984)에서 각각 참고하였다.

대상 시설 이용자 특성에 따른 건강 위해성 평가를 위해서 노출 시나리오에 의한 시설별 인체노출량과 대상 물질의 용량-반응 평가 결과를 이용하였다. 발암성 물질에 의한 평생초과발암위해도(excess cancer risk; ECR)와 비발암 물질에 의한 독성위험값 (hazardous quotient; HQ)은 다음과 같은 수식을 이용하였다 (US EPA, 1989, 1997). 비발암물질의 RfC값은 US EPA에서 미국 일반 성인의 일일호흡률 및 체중을 이용하여 단위를  $\text{mg}/\text{m}^3$ 로 환산하였기에 본 연구에서는 이를 다시 고려하여 RfC의 단위를 인체일일노출량과 동일한  $\text{mg}/\text{kg}/\text{day}$ 로 보정하여 HQ를 산출하였다.

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

$$HQ = \frac{LADD(\text{mg}/\text{kg}/\text{day})}{RfC(\text{mg}/\text{m}^3) \times 20(\text{m}^3/\text{day})/70(\text{kg})}$$

## 4. 결 과

### 4.1. 대상 시설의 실내 유해 물질 농도 분포

각 전체시설의 VOCs 및 HCHO의 농도 분포는 표 5에 제시하였다.

HCHO의 50th% 값은  $55.90\mu\text{g}/\text{m}^3$  였고, 대표적인 VOCs 물질인 톨루엔의 경우  $17.80\mu\text{g}/\text{m}^3$  (50 percentile), 발암물질인 벤젠의 경우  $1.50\mu\text{g}/\text{m}^3$  (50 percentile)의 농도분포를 나타냈다. 표에는 제시하지 않았지만 HCHO의 경우 현행 다중이용시설 실내공기질 권고 기준을 14%가 초과 (헬스장 17곳, 독서실 10곳, 비디오방 13곳)하였다.

Table 6. Excess cancer risks (ECRs) of HCHO in indoor air for the subject's facilities.

Facilities		Exposure scenarios		
		WIES	RMIES	AIES
Hotel	Mean	$7.19 \times 10^{-5}$	$5.53 \times 10^{-7}$	$7.26 \times 10^{-8}$
	Min	$1.73 \times 10^{-5}$	$1.33 \times 10^{-7}$	$1.74 \times 10^{-8}$
	Max	$1.65 \times 10^{-4}$	$1.27 \times 10^{-6}$	$1.67 \times 10^{-7}$
Fitness center	Mean	$9.79 \times 10^{-5}$	$1.96 \times 10^{-4}$	$2.56 \times 10^{-5}$
	Min	$1.56 \times 10^{-5}$	$3.12 \times 10^{-5}$	$4.07 \times 10^{-6}$
	Max	$2.33 \times 10^{-4}$	$4.68 \times 10^{-4}$	$6.10 \times 10^{-5}$
Gosiwon	Mean	$7.79 \times 10^{-5}$	$1.79 \times 10^{-4}$	$1.70 \times 10^{-5}$
	Min	$2.51 \times 10^{-5}$	$5.77 \times 10^{-5}$	$5.49 \times 10^{-6}$
	Max	$1.85 \times 10^{-4}$	$4.25 \times 10^{-4}$	$4.05 \times 10^{-5}$
Reading-room	Mean	$1.14 \times 10^{-4}$	$1.45 \times 10^{-4}$	$6.34 \times 10^{-5}$
	Min	$2.23 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-5}$	$1.24 \times 10^{-5}$
	Max	$5.82 \times 10^{-4}$	$7.41 \times 10^{-4}$	$3.24 \times 10^{-4}$
Video-room	Mean	$8.13 \times 10^{-5}$	$1.56 \times 10^{-7}$	$6.75 \times 10^{-8}$
	Min	$1.57 \times 10^{-5}$	$3.02 \times 10^{-8}$	$1.30 \times 10^{-8}$
	Max	$2.48 \times 10^{-4}$	$4.77 \times 10^{-7}$	$2.06 \times 10^{-7}$

## 4.2. 건강 위해성평가

### 4.2.1. 발암성 물질의 평가

연구대상시설 노출시나리오별 폼알데하이드의 평생 초과발암위해도는 호텔 및 비디오방의 경우에는 상시근로자가 가장 높은 초과발암위해도를 보였으며, 독서실, 고시원 및 헬스장은 최빈 이용자의 초과발암위해도가 가장 높게 산출되었다 (Table 6).

시설 내 흡연이 가능한 호텔 및 비디오방의 경우에는 상시근무자에서만 각각 십만명당 7.19명 ( $7.19 \times 10^{-5}$ ) 및 8.13명 ( $8.13 \times 10^{-5}$ )으로 산출되었으며, 이용자는 백만명당 1명 미만의 낮은 초과발암위해도로 산출되었다. 상대적으로 최빈 이용자의 이용 기간 및 시간이 많을 수 있는

헬스장, 독서실 및 고시원의 경우에는 최빈 이용자의 초과발암위해도가 만명당 1~2명 수준으로 상시근로자보다 약간 높았으나, 평균이용자의 경우에는 십만명당 2~6명 수준으로 평가되었다.

상시근무자의 초과발암위해도가 모든 대상 시설에서 만명당 1명 근접하거나 약간 초과하는 것으로 평가되고 있어 근무자들의 근무여건 개선을 위한 저감 조치가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 격렬한 활동이 필요하거나 장시간 이용할 수 있는 헬스장, 고시원 및 독서실의 이용자의 초과발암위해도가 모두 십만명당 1명을 초과하고 있어 이에 대한 관리가 필요할 것으로 판단된다.

연구대상시설 노출시나리오별 벤젠의 평생 초과 발암위해도는 고시원 및 비디오방의 경우에는 상시근로자가 가장 높은 초과 발암위해도를 보였



Table 7. Excess cancer risks (ECRs) of benzene in indoor air for the subject's facilities.

Facilities		Exposure scenarios		
		WIES	RMIES	AIES
Hotel	Mean	$1.87 \times 10^{-6}$	$1.44 \times 10^{-8}$	$1.89 \times 10^{-9}$
	Min	$6.11 \times 10^{-7}$	$4.70 \times 10^{-8}$	$6.16 \times 10^{-10}$
	Max	$7.82 \times 10^{-6}$	$6.01 \times 10^{-8}$	$7.89 \times 10^{-9}$
Fitness center	Mean	$1.26 \times 10^{-6}$	$2.53 \times 10^{-6}$	$3.30 \times 10^{-7}$
	Min	$2.26 \times 10^{-7}$	$4.53 \times 10^{-7}$	$5.91 \times 10^{-8}$
	Max	$6.34 \times 10^{-6}$	$1.27 \times 10^{-5}$	$1.66 \times 10^{-6}$
Gosiwon	Mean	$3.71 \times 10^{-6}$	$8.53 \times 10^{-6}$	$8.11 \times 10^{-7}$
	Min	$1.54 \times 10^{-6}$	$3.54 \times 10^{-6}$	$3.37 \times 10^{-7}$
	Max	$1.24 \times 10^{-5}$	$2.84 \times 10^{-5}$	$2.71 \times 10^{-6}$
Reading-room	Mean	$1.96 \times 10^{-6}$	$2.50 \times 10^{-6}$	$1.09 \times 10^{-6}$
	Min	$9.94 \times 10^{-7}$	$1.27 \times 10^{-6}$	$5.54 \times 10^{-7}$
	Max	$5.57 \times 10^{-6}$	$7.10 \times 10^{-6}$	$3.11 \times 10^{-6}$
Video-room	Mean	$3.81 \times 10^{-6}$	$7.32 \times 10^{-6}$	$3.16 \times 10^{-9}$
	Min	$1.17 \times 10^{-6}$	$2.25 \times 10^{-9}$	$9.72 \times 10^{-10}$
	Max	$1.47 \times 10^{-5}$	$2.82 \times 10^{-8}$	$1.22 \times 10^{-8}$

으며, 고시원, 독서실이 최빈이용자의 초과발암위해도가 가장 높았다 (Table 7). 시설 내 흡연이 가능한 호텔 및 비디오방의 경우에는 상시근무자에서만 각각 백만명당 1.87명 ( $1.87 \times 10^{-6}$ ) 및 비디오방은 3.81명 ( $3.81 \times 10^{-6}$ )으로 산출되었으며, 이용자는 독서실 시설이 백만명당 1명 미만의 낮은 초과발암위해도로 산출되었다. 상대적으로 헬스장, 고시원 및 독서실의 경우에는 최빈이용자의 초과발암위해도가 위해도가 백만명당 2~8명 수준으로 상시근로자보다 다소 높았으나, 독서실 평균 이용자의 경우에는 백만명당 1명 수준으로 평가되었다.

상시근무자의 초과발암위해도가 모든 대상 시설에서 백만명당 1명 근접하거나, 다소 초과하는 것으로 평가되고 있어서 근무자들의 근무여건 개선을 위한 저감 조치가 필요할 것으로 판단된다. 또한 격렬한 활동이 이루어지는 헬스

장 및 실내 장시간 이용하는 고시원 및 독서실에 대한 집중적인 관리가 필요할 것으로 판단된다.

#### 4.2.2. 비발암성 물질의 평가

연구대상시설 노출시나리오별 톨루엔의 독성 위험값은 독서실 근무자의 경우 평균 0.012, 최빈이용자 0.015, 평균이용자 0.007로 산출되었고, 모든 시설의 톨루엔의 독성위험값이 대부분 1 이하로 산출되어 위해도가 낮은 것으로 평가되었다 (Table 8). 다만, 장시간 이용 가능한 독서실의 경우 최빈이용자의 최대 독성위험값이 0.15로 나타나 관리가 요구된다.

Table 8. Hazardous quotients (HQs) of toluene in indoor air for the subject's facilities.

Facilities		Exposure scenarios		
		WIES	RMIES	AIES
Hotel	Mean	0.003	0.000	0.000
	Min	0.001	0.000	0.000
	Max	0.109	0.001	0.000
Fitness center	Mean	0.002	0.004	0.000
	Min	0.001	0.001	0.000
	Max	0.015	0.030	0.004
Gosiwon	Mean	0.010	0.001	0.000
	Min	0.003	0.000	0.000
	Max	0.049	0.005	0.000
Reading-room	Mean	0.012	0.015	0.007
	Min	0.000	0.000	0.000
	Max	0.119	0.152	0.067
Video-room	Mean	0.009	0.000	0.000
	Min	0.002	0.000	0.000
	Max	0.121	0.000	0.000

## 5. 고찰

현행 다중이용시설 실내공기질 관리법에 포함되어 있지 않은 호텔, 헬스장, 고시원, 독서실 및 비디오방을 대상으로 HCHO 및 VOCs에 대한 건강 위해성 평가를 실시한 결과, 헬스장, 고시원, 독서실의 최빈이용자의 발암위해도가  $10^{-4}$  수준으로 산출되었다. 이는 헬스장, 고시원, 독서실의 이용특성상 근무자 보다 이용자(손님)의 실내 노출 빈도가 높은 결과에 기인한다. 특히 헬스장의 경우 시설 이용 특성상 유산소 운동 등으로 인한 호흡률이 높아, 위해도 수준이 이용시간에 비해서는 다소 높은 것으로 산출되었다.

비발암물질의 경우, 모든 물질에 대해 모든 시설에서 현재의 오염수준이 허용 가능한 수준(위험값 1)을 초과하지는 않았다. 그러나 비발암물질

중 톨루엔의 경우 근무자에서 관리가 필요한 수준(위험값 0.1초과)으로 호텔, 독서실, 비디오방이 우선순위로 도출되었다. 추가적으로, 선행 연구된 양지연 등(2008)의 미적용 다중이용시설 및 소규모시설을 대상으로 한 결과에서는 톨루엔과 자일렌의 경우 HQ가 위해성 여부 판단기준인 '1'에 근접하게 평가된 바 있어 일부시설에서는 톨루엔 및 자일렌의 상시 모니터링의 필요성이 제안된 바 있다.

선행연구를 살펴본 바 유사시설에 대한 사례를 찾을 수 없었으므로, 유사 다중이용시설과 비교하면 Guo 등(2004)의 벤젠의 경우 레스토랑에서의 평균농도가  $1.10\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 쇼핑몰  $1.18\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 본 연구대상시설과 유사한 농도분포를 나타냈다. Weng 등(2009)의 연구에서 쇼핑센터에서의 HCHO 평균농도가  $61.0\sim 245.7\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 슈퍼마켓  $52.7\sim 165.4\mu\text{g}/\text{m}^3$  및 영화관  $65.2\sim 114.6$

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어, 본 연구의 대상시설에 비해 높은 농도 분포를 나타냈다. 일반적으로 빌딩 및 시설에서의 오염원은 부적절한 난방, 환기, 에어컨 시스템 및 스토브 등의 연소시설이 될 수 있으며, 담배연기 또한 VOCs 노출원이다 (US EPA, 1989). 또한 포름알데히드는 생산량의 절반정도는 결합제, 합판, 직물코팅제를 만드는데 사용하는 요소-포름알데히드와 페놀-알데히드를 만드는데 사용된다 (환경부, 2001). 본 연구에서 시설별 내부 특성 등 이들 변수에 의한 내용을 분석한 결과 뚜렷한 경향성은 관찰되지 않았다. 추가적인 대규모 실태조사 뿐만 아니라 건축자재 및 주요변수를 감안한 추가적인 연구를 통해 시설별 관리방안 도출 등이 필요하다.

시설별 실태조사를 바탕으로 한 평가의 경우 대표적인 시설의 시료 채취 및 정확한 현장 측정으로 인한 신뢰성 있는 분석이 무엇보다도 중요하다. 그러나, 본 연구에서 가장 큰 현실적인 제한점으로 정상적인 영업 방해 등의 사유로 인해 측정을 꺼려하는 등의 제한으로 인해 비영업시간 및 이용자 (손님)가 적은 시간대 등을 측정할 즉, 업체의 특성을 반영한 대표성 있는 자료를 도출할 수 없었던 점 및 장소 협조 등의 문제로 시설별 대표지점을 측정하지 못한 제한점은 존재한다.

본 연구에서 실시한 미적용 다중이용시설의 실내 공기 오염으로 인한 건강 위해성평가는 현재 운영 중인 시설의 실내 오염도 자료를 이용하여, 같은 조건으로 평생 (70년) 동안 노출될 경우를 가정하여 (worst condition) 인체 위해 수준을 평가함으로써 이에 따른 불확실성이 존재할 것이다. 인체 위해성 평가를 바탕으로

환경 중 유해화학물질을 관리하고 있는 미국, 유럽 및 세계보건기구에서는 건강 보호를 위한 건강 목표치 설정에 위해성 평가 기법을 활용하고 있다. 원칙적으로는 ALARA (As Low As Reasonably Achievable)에 의해 인체 위해성 평가에 근거한 건강 목표치는 발암물질의 경우 목표치는 '0 (zero)'이어야 하지만, 실질적으로는 도달할 수 없는 이상치이므로, 실질적인 건강 목표치로서 미국 환경보호청에서는  $10^{-6}$ ~ $10^{-4}$ 의 위해도 범위 내에서 기술·사회·경제적인 부분을 고려하여 설정하고 있으며, 세계보건기구에서는  $10^{-5}$ 의 인체 위해도에 해당하는 농도를 근거로 권고 기준을 제안하고 있다. 비발암물질의 경우에는 비발암 독성 참고치를 기준으로 안전수준을 고려하여 평생노출이 되어도 유해영향이 나타나지 않을 농도를 산출하고, 이를 건강 목표치로서 활용하게 된다. 우리나라의 경우도 이러한 시설별 노출패턴을 고려한 위해도에 바탕을 둔 HRA 기법을 활용하고, 각 영업시설별 준수가능성 등의 현실적인 상황을 반영한 다중이용시설의 건강보호기준제안 및 규제가 요구된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 현재의 법미적용 다중이용시설 중 호텔, 헬스장, 고시원, 독서실 및 비디오방을 대상으로 HCHO 및 VOCs에 대한 건강 위해성 평가를 실시하여, 관리가 필요한 대상물질 및 시설을 도출하고자 하였다. 주요 결과는 다음과 같다.

첫째, 대상 시설의 물질별 실태 조사를 바탕으로 한 인체 위해성 평가 결과, 물질별로는 포름알데히드의 경우 숙식을 모두 해결하는 형태 즉, 고시원 및 독서실의 이용자를 위한 농도 저감 조치가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 헬스장의 경우 이용 특성상 호흡으로 인한 노출이 크고, 최빈이용자의 이용횟수가 많은 만큼 실내 공기 질의 유지 관리가 필요할 것으로 판단된다.

둘째, 비발암물질 중 톨루엔 및 자일렌의 경우 독서실 최빈이용자에서 0.1을 초과하고 있어 관리가 요구되나, 평균이용자의 호텔, 헬스장, 고시원 및 비디오방 이용으로 인한 위해도는 안전역 수준이었다.

### 감사의 글

이 연구는 환경부의 “미적용 다중이용시설 실내공기질 실태조사(III)” 사업(2008) 지원으로 수행된 연구결과의 일부이며, 이에 감사드립니다.

### 참고 문헌

김호현, 양지연, 박창수, 신동천, 손종렬, 임영욱 (2007) 일부 미적용 다중이용시설 및 사회복지시설의 휘발성유기화합물 노출로 인한 건강위해성평가, 한국실내환경학회지, 4(1), 42-52.

양지연, 김호현, 신동천, 김윤신, 손종렬, 임준

환, 임영욱 (2008) 일부 미적용 다중이용시설의 실내 공기 중 알데히드류 및 휘발성 유기화합물 노출로 인한 건강위해성평가, 한국환경과학회지, 17(1), 45-56.

환경부 (2001), 실내공기오염물질의 위해성 평가 지침서.

환경부 (2006), 미적용 다중이용시설 및 소규모 시설 실태조사( I )

Foo, S.C., Phoon, W.O. and KHOO, N.Y. (1988) Toluene in blood after exposure to toluene, American Industrial Hygiene Association journal, 49, 255-258.

Guo, H. and Murray, F.(2000) Characterisation of total volatile organic compound emissions from paints, Clean Prod. Process, 2(1), 28-36.

Guo, H., Lee, S.C., Chan, L.Y. and Li, W.M. (2004) Risk assessment of exposure to volatile organic compounds in different indoor environments, Environ. Res, 94, 57-66.

Hardin B.D., Bond G.P., Sikov M.R., Andrew, F.D., Beliles R.P. and Niemeier R.W. (1981) Testing of selected workplace chemicals for teratogenic potential, Scand. J. Work Environ. Health, 7, 66-75.

Hauptmann, H., Lubin, J.H., Stewart, P.A., Hayes, R.B. and Blair, A. (2004) Mortality from solid cancers among workers in formaldehyde industries, Am. J. Epidemiol, 159, 1117-1130.

- KATS 2004, Korean Agency for Technology and Standards.
- Kerns, W.D., Pavkov, K.L., Donofrio, D.J., Gralla, E.J. and Swenberg, J.A. (1983) Carcinogenicity of formaldehyde in rats and mice after long-term inhalation exposure, *Cancer Res*, 43, 4382-4392.
- 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.
- Maroni, M., Seifert, B. and Lindvall, T. (Eds.) (1995) *Indoor Air Quality-A Comprehensive Reference Book*, Elsevier Publishers, Amsterdam.
- Mutti, A., Mazzucchi, A., Rustichelli, P., Frigeri, G., Arfini G. and Franchini I. (1984) Exposure- effect and exposure-response relationships between occupational exposure to styrene and neuropsychological functions, *Am. J. Ind. Med*, 5, 275-286.
- US Environmental Protection Agency (1989) Risk assessment guidance for superfund: volume I, Human health evaluation manual, Office of emergency and remedial response, EPA/540/1-89/002.
- US Environmental Protection Agency (1997) NCEA (National Center For Environmental Assessment), *Exposure Factors Handbook I*, Washington, D.C.
- Weng, M., Zhu, L., Yang, K. and Chen, S. (2009) Levels and health risks of carbonyl compounds in selected public places in Hangzhou, China. *J. Hazardous Materials*, 164, 700-706.
- WHO (2000) *Air Quality Guidelines for Europe*, 2nd Ed., WHO Regional Publications, European Series, Copenhagen, Denmark.