

부산지역 일부 지하도 상가의 실내공기질 특성 평가

조은정[†] · 광진
대기보전과

Characterization of Indoor Air Quality in Underground Shopping Centers in Busan

Cho Eun-jeong[†] and Kwak Jin
Air Preservation Division

Abstracts

In this study, the hazard rate of the indoor environment of underground shopping center in Busan was conducted, in outdoor to determine how the indoor environments of these facilities, where workers and users spend the most time of their away from home day, can effect their health. The measurement and analysis of indoor air quality were done according to the Indoor Air Quality Standard Method, and the Risk Assessment was accomplished with several significant ways hazard Identification, Exposure Assessment, Dose-response Assessment, Risk Characterization, which are deighed by National Research Council (NRC). On each exposure factors, documentary and questionnaire research such as Epidemiological study and Toxicological study were conducted. The result of CTE (Central tendency exposure) of Formaldehyde and Benzene by Fixed point was 4.06×10^{-8} , 1.03×10^{-9} which in the case of Formaldehyde and Benzene did not exceed the permitted standard (1×10^{-6}) of the WHO. The hazard index results of non-cancer pollutants (Toluene, Ethylbenzene, Xylene, Styrene) did not exceed CTE and RME (Reasonable maximum exposure) state.

Key words : IAQ, Risk assessment

서 론

참살이(well-being)라는 신조어가 발생하는 등 건강에 대한 의식수준의 증가와 더불어 쾌적한 삶을 영위하기 위한 일환으로 대부분의 시간을 보내는 실내 환경(Indoor Environment : IE)의 중요성이 부각되었다. 실내 환경 문제는 인간 활동에 의해 발생하는 각종 오염물질들이 실내에 방출되어 실내 환경을 오염시키는 현상 즉, 실내공기오염(Indoor Air Pollution : IAP)에 의한 문제라 할 수 있다¹⁾. 실내 환경문제의 대표적인 실내공기질(Indoor Air Quality : IAQ)에 대한 문제의 발생 배경을 보면, 1970년대 이후 각종 산업분야에서 에너지 절감 및 효율

을 높이기 위한 노력의 일환으로 열효율 향상을 위한 건물의 밀폐화와 에너지 절감 장치를 설치하는 건물의 증가로 인하여 이들 건물의 실내공기질이 악화되면서 발생하였다²⁾. 또한 산업화와 도시화로 인한 도시의 인구집중 및 경제적 수준의 향상은 도시인의 생활양식과 직장인의 근무양식에 큰 변화를 가져오게 되었고 다양한 실내공간과 지하공간의 활용, 신 개념주택 증가, 대중 및 개인교통수단 증대 등으로 인해 실내 활동 시간이 급격히 증가되어 현대 도시인이 실내에서 생활하는 시간은 하루 중 80~90% 이상을 차지하고, 인체가 흡수하는 물질 중 실내공기 전체 물질 섭취량의 57%를 차지하고 있어 건강에 직접적으로 영향을 주는 쾌적한 실내 환경에 대한 중요성은

[†] Corresponding author, E-mail : cej1276@korea.kr
Tel : +82-51-309-2923, Fax : +82-51-309-2929

점점 커지고 있다³⁾. 실내공기는 일반 대기와는 다르게 자연적인 희석률이 낮아 실내에서 발생하는 오염물질과 외부로부터 유입되는 오염물질에 의해 오염될 경우 쉽게 정화되지 않으며, 부적절한 환기설비의 설치 및 운영은 쾌적한 실내공기질 저해 요인으로 작용하고 있다. 실내공기질은 거주자 또는 이용자의 건강, 쾌적, 생산성 등에 영향을 미치며, 실내의 한정된 공간에서 오염물질의 제거 또는 환기가 적절히 관리되지 않을 경우 오염된 공기가 계속적으로 순환되면서 그 농도가 증가되어 인체 위해성이 커지게 된다. 실내에서 발생하는 오염물질은 비록 저농도라 하더라도 실내에서 보내는 시간이 길기 때문에 실내 거주자들의 생명을 위협할 정도는 아니지만 장기적으로는 건강에 나쁜 영향을 미치고 있다⁴⁾.

지하공간의 개발은 과밀화된 도시공간의 입체적 활용을 위한 방안으로 도심 고층화, 지하화 등이 지속적으로 진행되고 있으며, 입체적 활용을 위하여 건설된 지하도 형태의 상가로서 지상 출입구를 제외하면 외부와 차단된 밀폐 공간으로 쾌적한 실내 환경 조성 및 안정성확보가 무엇보다 중요하다. 지하공간의 특성상 밀폐된 공간에서 다양한 업무와 관련되는 인간의 정상적인 활동에 적합한 조건을 유지하는 것은 매우 중요하면서도 용이하지 않은 과제라고 할 수 있다.

지하공간은 사용 용도에 따라 문화, 교육, 주거 및 상업 용으로 분류할 수 있으며, 지하도 상가는 일반적으로 상업용인 동시에 통행용으로 사용되기 때문에 시민이 가장 많이 이용하는 시설이라고 할 수 있다. 지하도 상가는 통행량이 빈번하고 입주상인의 경우 주간에 거주 형태의 체류 시간이 길어 내부 음식점, 의류, 잡화 등에서 발생하는

열 및 휘발성유기오염물질 이산화탄소 등 다양한 실내 오염물질의 안정적 배출 및 내부 발열의 원활한 배출을 통한 실내 환경의 확보가 중요하다⁵⁾.

부산지역의 경우에 지하 철도시설과 연계하여 역사 주변의 상권이 형성되어 활용하고 있다. 이러한 지하도 상가는 교통, 상업, 오락 등 다양한 기능을 단일 지역에서 해결할 수 있는 장점을 지니고 있으나, 지하공간이라는 측면과 불특정 다수가 이용하는 시설이라는 측면에서 공기의 오염과 유해가스의 체류 가능성이 큰 단점을 가지고 있다. 또한 지하도상가 등 지하생활공간의 경우 초기 건설 이후 공간적 구조 변경이 거의 불가능하고, 지하에 위치하여 자연환기에 의한 실내공기질 관리를 기대하기 어렵기 때문에 밀폐시설에서 효과적인 환기가 진행되지 않으면 실내공기 오염으로 인하여 건강상에 장애를 초래하여 정상적인 활동을 영위할 수 없는 경우가 발생될 수 있다. 세계보건기구(WHO) 연구결과에 따르면 연간 실내공기오염에 의한 사망자가 연간 280만명에 이르고, 실내오염물질이 실외오염물질 보다 폐에 전달될 확률이 1,000 배 높다고 추정하여 보고하였다⁶⁾. 최근에는 실내공기오염의 건강 영향을 보다 정확히 분석하기 위하여 하루 24시간 중 개인활동 형태에 따른 특정 오염물질 노출량을 측정하고 있으며, 단일 화학물질 뿐만 아니라 복합 화학물질의 영향에 의한 복합 화학물질민감증(Multiple Chemical Sensitivity : MCS) 관련 연구로 확대되고 있다.

실내공기오염에 따른 건강 위해성평가 분야는 1970년대 초 선진각국에서 빌딩증후군(Sick Building Syndrome : SBS)이라 하는 새로운 증상이 보고되면서부터 본격적으로 관심을 갖게 되었다^{7),8)}.

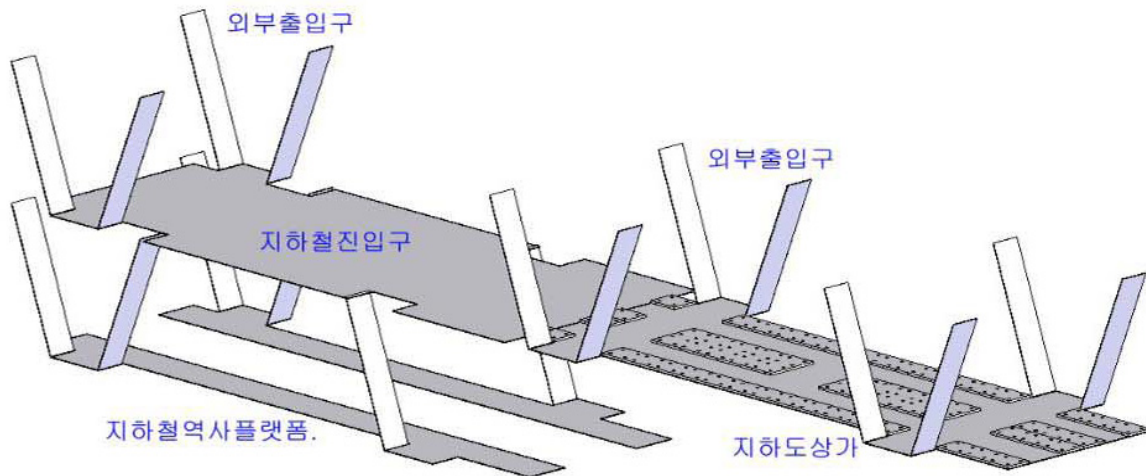


Fig. 1. Three dimensional view of subway station and underground shopping center.

또한 환경부에서 지하도 상가 근무자 및 이용자들을 대상으로 한 설문조사에 따르면, 상가내 근무자의 90 % 이상이 지하도상가 내 공기질이 좋지 않아 자신의 건강에 나쁜 영향을 준다고 생각하고 있으며, 이용자의 96 %가 실내공기질이 좋지 않다고 응답하였다.⁹⁾

이에 본 연구에서는 지하도상가 실내공기 유해오염물질 조사와 더불어 건강 위해성 평가를 실시하여 실내 환경적 문제와 건강상 문제를 파악하여 개선사항을 모색하고자 하였다.

재료 및 방법

연구대상

부산지역 주요 지하도 상가 현황

부산지역 지하도 상가들의 대부분은 지하철역과 연결되어 편리한 교통과 문화와 쇼핑이 공존하는 부산 중심상권으로 자리 잡고 있다(Table 1, Table 2).

서면 지하도 상가는 지하철 부전동역에서 서면역에 이르는 지하도에 자리 잡고 있으며 11,910 m² 및 366개의 점포로 의류, 가방, 신발 가게 등으로 구성되어 있고, 부전시장 및 부전역이 인근에 있다. 자연환기가 가능한 출입구계단이 12개소가 있고, 상가 중간 중간에 분수대와 휴식공간이 있으며, 급기 펌 용량은 130 HP, 환기 펌 용량은 62.5 HP이다.

대현 지하도 상가는 지하철 서면역 즉 서면로터리에서 옛 태화쇼핑에 이르는 중앙대로 지하에 자리 잡고 있으

Table 1. The main present condition of underground shopping center in busan

Parameter	Store No.	Scale (m ²)	Main store	Store hours	Place
SEOMYEON	366	11,910	Clothing, Bag, Shoe	10:30~22:30	BUSABJIN-GU BUJEON-RO UNDER187
DAEHYUN	335	11,627	Clothing, Cosmetics, Shoe	10:30~22:30	BUSABJIN-GU JUNGANG - DAERO UNDER717
LOTTEWORLD	68	4,395	Clothing, Cosmetics, Shoe	10:30~22:30	BUSABJIN-GU BUJEONDONG 503-15
BUSAN STATION	33	1,625	Clothing, Household goods	10:00~22:00	DONGGU CHORYANG2 DONG 1206-1
KWANGBOK	216	15,997	Clothing, Shoe, Cosmetics	10:00~22:00	JUNGGU JUNGANGDONG 1GA 26BUNGE
NAMPO	287	17,747	Clothing, Accessory, Fashion goods	10:00~22:00	JUNGGU NAMPODONG 6GA 1BUNGE
KUKJAE	120	3,019	Accessory, Gallery, Curtain	10:00~21:00	JUNGGU SINCHANGDONG 4GA 56BUNGE

Table 2. Characteristics of Selected Facilities

Parameter	Air-conditioning system	Air supply and exhaust (height)	No. of Exit	Air supply Purification	Air supply fan capacity	Ventilation fan capacity	Fountain	Note (open)
SEOMYEON	Central	0.4	12	Filtration (Bag filter)	130 HP	62.5 HP	3	'85.9.24
DAEHYUN	"	0.6	16	"	160 Hp	120 HP	1	'82.12.22
LOTTEWORLD	Central+ Individual	0.5	5	"	75 HP	55 HP	2	'97.12.8
BUSAN STATION	Central	0.5	7	"	30 HP	20 HP	-	'94.2.7
KWANGBOK	"	1.2	11	"	180 HP	140 HP	3	'88.7.21
NAMPO	"	1.2	15	"	160 HP	130 HP	1	'88.7.21
KUKJAE	"	4	7	Washing	50 HP	30 HP	-	'02.9

며, 11,627 m² 및 335개의 점포로 의류, 귀금속 악세서리, 화장품, 가방점 등으로 구성되어 있고, 롯데백화점 부산점, 롯데월드 지하상가와 지하철 2호선 환승역과도 연결되어 있다. 자연환기가 가능한 출입구계단이 16개소가 있고, 상가 중간에 분수대와 휴식공간이 있으며, 급기 환용량은 160 HP, 환기 환용량은 120 HP이다.

중앙동, 영도, 광복동의 중심에 있는 광복 지하도 상가는 지하철 중앙동역에서 남포동역 사이의 지하도에 자리 잡고 있으며, 국제부두와 인접해 있어 국내의 관광객들의 즐겨 찾는 곳으로 유명하며, 특히 러시아 선원과 일본 관광객들이 발길이 끊이지 않는 곳이다. 의류뿐만 아니라 신발, 가방, 악세서리, 공방, 화장품, 라제리, 건강식품, 호프와 커피, 식당 등 다양한 업종의 216여 점포가 15,997 m²에 들어서 있으며, 자연환기가 가능한 출입구계단이 11개소가 있고, 급기 환용량은 180 HP, 환기 환용량은 140 HP이다.

남포 지하도 상가는 부산의 지하상가 중 규모가 가장 큰 곳으로써 지하철 남포동역에서 자갈치역에 이르는 지하도에 자리 잡고 있으며, 17,747 m² 및 287개의 의류나 패션잡화 점포들이 60~70%가 주를 이루어 들어서 있다. 자연환기가 가능한 출입구계단이 15개소가 있고, 급기 환용량은 160 HP, 환기 환용량은 130 HP이다. 자갈치시장, 국제시장이 인접해 있으며, 지상에 있는 많은 영화관으로 인해 다양한 연령층이 찾는 곳이며 또한 외국인 관광객들이 즐겨 찾는 상가이다.

국제지하도 상가는 부산 최초의 지하상가로서 부산국제시장아래에 자리 잡고 있다. 커튼, 의류, 신발 등의 유패선의 상가로 2002년 노후 시설물을 리모델링하였으며, 서양화, 동양화, 공예, 도예 등 다양한 장르의 예술 작품 판매는 물론 작품 시연 및 전시회를 개최하여 문화 예술의 공간으로 자리매김하고 있다. 자연환기가 가능한 출입구계단이 7개소가 있고, 급기 환용량은 50 HP, 환기 환용량은 30 HP이다.

시료채취 및 분석방법

휘발성유기화합물(VOCs)

휘발성유기화합물의 시료채취는 소용량펌프(MP-Σ 30H, Sibata, Japan)를 사용하여 100 mL/min 유량으로 30분간 2회 Tenax-TA 180 mg이 충전된 고체흡착관(6 mm × 17.8 cm, Gerstel)을 이용하여 채취하였다. 본 연구에 사용된 흡착관은 자동 전처리 장치인 Tube conditioner를 이용해 고순도 질소가스가 분당 100 mL

로 흐르는 조건 하에서 300 °C에서 2~3시간 전처리하여 사용하였다.

시료채취가 끝난 흡착관은 4 °C이하에서 보관하였다. 시료채취 시마다 현장 공시료(Field blank)와 실험실내 공시료(Lab blank)를 마련하여 시료채취 및 운반·보관기간 동안 발생할 수 있는 오염 정도를 확인하였다.

VOCs의 농도 정량을 위한 검량선(Calibration curve)은 액상표준물질(Custom VOC standards 9 compounds, Accu, USA)을 이용하여 5단계 농도 표준시료를 이용하였다. TVOCs는 액상표준물질을 이용한 외부보정법으로 톨루엔 검량식에 대입하여 농도를 구하였으며, 그 외 개별 VOC는 각 해당되는 표준물질에 감응계수를 이용하여 농도를 정량하였다. 이때 감응계수 및 검량식에 사용된 물질별 피크면적은 총 이온크로마토그램(TIC)을 이용하였다.

표준시료 및 현장시료에 함유된 VOCs 대상물질의 분석에는 자동열탈착장치(Gerstel, Germany)가 가스크로마토그래프(GC)칼럼(HP-5 60 m × 0.25 mm × 1.0 μm)으로 직접 연결된 가스크로마토그래프/질량분석기(Agilent HP6890/5973, USA) 시스템을 사용하였다. 흡착관에 채취된 분석대상 VOCs는 일차적으로 260 °C에서 운반가스 He에 의해 60 mL/min의 유량으로 5분간 열 탈착된다. 탈착된 시료는 다시 -30 °C의 저온응축트랩에서 농축 후 300 °C에서 2차 열 탈착되어 GC의 분석칼럼으로 주입되게 된다. VOCs시료 분석에 사용된 열탈착장치 운전조건은 Table 3에 나타내었으며, GC/MS의 운전조건은 Table 4와 같다.

폼알데하이드

폼알데하이드의 시료채취는 전단부에 Ozone scrubber(Waters, USA)를 장착한 2,4-DNPH 카트리지(Supelco, USA)를 소용량펌프(MP-Σ 100H, Sibata, Japan)에 연결하여 500 mL/min 유량으로 30분간 2회 실시하였다.

시료채취가 끝난 카트리지는 내부가 알루미늄으로 코팅된 저장용기에 개별 포장하여 4 °C이하에서 냉장 보관하였다. 시료채취 시마다 현장 공시료(Field blank)와 실험실 공시료(Lab blank)를 마련하여 시료채취 및 운반·보관기간 발생할 수 있는 오염도를 확인하였다.

DNPH와 반응하여 형성된 유도체는 일정한 유속으로 5 mL의 acetonitrile(Merck, Germany)로 추출하였다. 추출액은 갈색바이알에 담은 후 테프론 테이프로 밀봉하여 보관하였다. 추출된 DNPH 유도체의 분석은 고성능액

Table 3. Operating condition of thermal desorber for VOCs analysis(TDSG, Gerstel, Germany)

Parameter	Condition
Desorption time and flow	5 min, 60 mL/min
Desorption temperature	260 °C
Cold trap low temperature	- 30 °C
2nd desorption temperature	300 °C
Cold trap holding time	10 min
Cold trap packing	Tenax TA
Split/Splitless	Splitless
Valve temperature	260 °C
Transfer line temperature	260 °C

Table 4. Operating condition of GC/MS for VOCs analysis(HP6890/5973, Agilent, USA)

Parameter	Condition
GC Column	HP-5 (60 m×0.25 mm× 1.0 μ m)
Initial temperature	60 °C(3 min)
Oven rate 1	3 °C/min(60 ~ 150 °C)
Oven rate 2	7 °C/min(150 ~ 230 °C)
Final temperature	230 °C(7 min)
Column flow	1.2 mL/min
MS source temperature	230 °C
Detector type	EI(Quadrupole)
MS range	35 ~ 270 amu
Electron energy	70 eV

Table 5. Operating condition of HPLC for Formaldehyde analysis(Agilent 1100 series, USA)

Parameter	Condition
Injector	Autosampler
Column	<i>ODS-3 C-18 (5 μ m × 4.6 mm × 250 mm)</i>
Detector	UV-VIS
Mobile phase	A : Water, B : Acetonitrile
Gradient Elution	A/B = 60/40
Detection	Absorbance at 360 nm
Flow Rate	1.0 mL/min
Injection volume	20 μ L
Oven temperature	30 °C

체크로마토그래피(HPLC, Agilent 1100 series, USA)를 이용하였다. DNPH 유도체는 350~380 nm에서 최대 감도를 가지게 되므로 본 연구는 파장을 360 nm에 고정시켜 Formaldehyde를 분석하였다. 이때 이동상은 분당

1.0 mL로 하였다. 위와 같은 분석조건에서, CARB Carbonyl-DNPH Mix 1(Supelco, USA)을 희석하여 5개의 표준용액을 제조하여 검량선을 작성하였다. HPLC의 분석 조건은 Table 5에 나타내었다.

건강 위해성 평가

위해성 평가는 ‘어떤 독성 물질이나 위험 상황에 노출되어 나타날 수 있는 개인 혹은 집단의 건강 피해 확률을 추정하는 과학적인 과정’ 이라고 정의된다. 즉 건강 위해성 평가는 알려진 독성자료를 이용하여 현재의 노출상황이 장기적으로 지속될 경우 발생할 수 있는 건강위해도를 추정하는 과정으로 미국 국가연구위원회(NRC : National Research Council)에 의해 고안된 유해성 확인, 용량-반응평가, 노출평가 및 위해성 결정의 주요 4단계로 구성된다.

위해성의 평가(Risk assessment)는 환경에 존재하는 유해 환경오염물질의 노출에 따라 발생할 수 있는 인간의 건강과 환경생태에 미치는 나쁜 영향의 정도를 확률적으로 추정하기 위한 목적으로 정책결정자, 위해관리자 및 기술관리자에게 환경관리의 다양한 측면에서 유해요인의 확인, 선택, 상호반응, 위해 등에 대해 관련 정보를 제공하여 가능한 최선의 결정을 하도록 하기 위해 수행된다.

위해도(Risk)란 유해물질의 특정 농도나 용량에 노출된 개인 혹은 집단에서 유해한 결과가 발생할 확률(Probability) 또는 가능성(Likelihood)을 말하며 OECD의 정의에 따르면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{위해도(Risk)} = \text{유해성(Hazard)} \times \text{노출량(Exposure)}$$

* 유해성(Hazard) : 인체나 환경에 해로운 작용을 야기할 수 있는 화학물질의 잠재적 능력

유해성 확인(Hazard Identification)

사람이 어떤 화학물질에 노출되었을 때 사람에게 대한 유해영향 유발에 대한 정성적 확인 단계로서 그 물질에 대한 모든 동물실험 자료 및 사람에게 대한 자료(역학연구)를 토대로 그 물질의 유해성 여부를 확인하는 단계이다

유해성 확인에 필요한 자료로는 역학자료(Epidemiological study), 독성자료(Toxicological study), 인체를 대상으로 한 인위적 실험자료(Controlled human experiments), 물리화학적 성질에 관한 자료 등으로 본 연구에서는 US EPA의 IRIS(Integrated Risk Information System)를 이용하였다¹⁰⁾.

용량-반응평가(Dose-response assessment)

오염물질의 단위노출 또는 체내 용량(노출량)에 대한 특정 인체 반응과의 상관관계를 정량화하는 과정이다. 인체가 유해물질의 특정용량에 노출되었을 경우, 유해한 영향이 발생할 확률이 어느 정도인가를 추정하는 과정으로, 유해인자(환경오염물질, 실내공기오염물질 등)에 대한 인체 영향을 역치(Threshold) 존재 유무에 기본 가정을 두고 발암물질 혹은 비발암물질로 구분한다.¹¹⁾

본 연구에서는 EPA에서 제공하는 IRIS의 데이터베이스를 이용하여 발암성 및 비발암성 용량-반응평가를 위한 발암성 독성자료인 단위위해도(Unit risk)와 만성흡입에 의한 노출계수인 RfC (Reference Concentration)의 자료를 사용하였다¹⁰⁾. US EPA의 분류체계인 발암증거의 가중에 따라 발암력을 분류하였고, 단위위해도, 외삽방법

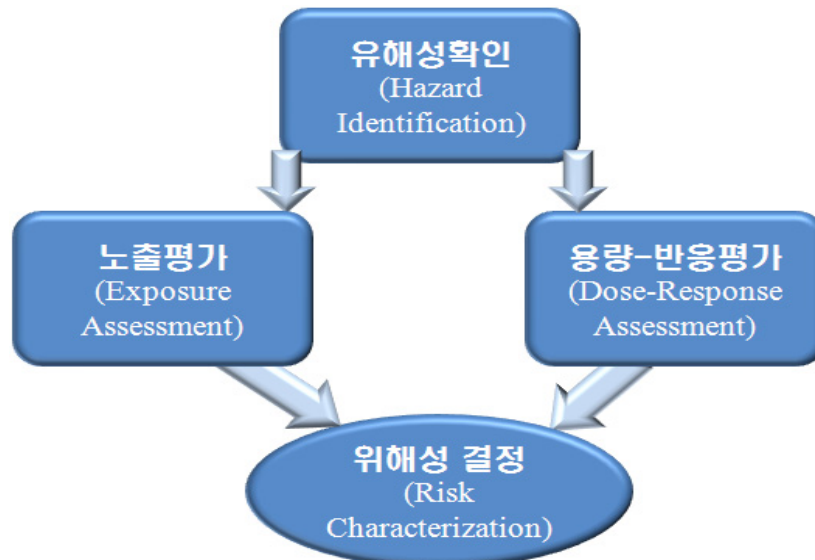


Fig. 2. Four step of risk assessment.

(Extrapolation method), 암의 형태 및 동물독성 실험으로부터 생물이 어떠한 독성 영향도 나타나지 않는 준위인 최대무영향용량(No Observed Adverse Effect Level : NOAEL)과 건강상에 독성 영향을 나타내는 한계치인 최소영향용량(Lowest Observed Adverse Effect Level : LOAEL) 값을 조사하였다. 또한 특정화학물에 이용될 수 있는 자료의 과학적 불확실성과 외삽할 때 발생하는 불확실성을 교정하기 위한 변형계수 (Modifying Factor : MF)와 불확실성계수 (Uncertainty Factor : UF) 등을 조사하였으며 아래 Table 6과 같다.

노출 평가(Exposure Assessment)

실내공기오염물질의 흡입에 의한 건강 위해성을 살펴 보기 위한 필수적인 조건으로 인구집단의 다양한 특성을 반영할 수 있는 노출 계수(체중, 호흡률, 기대수명, 노출 기간 및 노출빈도)를 활용하여 노출량 산정 및 노출시나리오를 작성하였다.

노출계수의 종류별 국내 자료의 검토 및 본 연구에서 활용된 노출계수 값의 선택 배경과 노출시나리오의 다음과 같다. 일일호흡률(Inhalation rate), 체중(Body weight), 노출빈도(Exposure frequency), 노출기간(Exposure duration) 및 기대수명(Lifetime)을 고려하여 산출하였다. 노출시간이 많은 근무자의 평균(CTE)과 최대(RME) 및 상가를 이용하는 이용자의 평균(CTE)과 최대(RME) 그룹으로 나눠 노출빈도를 적용하여 노출량을 평가하였다.

1) 체중(Body weight)

체중이 차이가 있으면 호흡률, 음식물섭취량, 피부표면적 등도 차이가 생기기 때문에 오염물질에 대한 노출량이 달라질 가능성이 높다. 또한 동일한 양의 오염물질을 흡수하더라도 체내농도가 달라질 수 있기 때문에 영향이 달라질 수 있다¹²⁾.

국민의 평균 체중은 개별연구자에 의한 연구가 아닌 광범위하고 체계적으로 진행되는 국가조사의 대표적인 것으로 국민체위조사가 있다. 본 연구에서는 지식경제부 기술표준원에서 2010년 3월부터 2010년 11월까지 실시한 7~69세 사이에 해당하는 14,016명을 대상으로 직접 측정한 제6차 조사 결과인, 18세 이상 한국성인의 평균 체중은 62.7 kg을 활용하였다¹³⁾. 남자 성인의 평균체중은 69.9 kg, 여자 55.6 kg이다. 또한 체중 분포역시 기술표준원에서 제공하는 자료를 바탕으로 삼각분포(Triangle distribution)로 가정하였으며, 수용체별 triangle 분포의 최대값은 18세 이상 전체 연령층 조사자료에서 가장 큰 95 % 체중값을, 최소값은 5 % 체중값을 그리고 최빈값은 평균 체중값으로 가정하였다.

2) 호흡률(Inhalation rate)

호흡률은 연령, 성, 체중, 키, 건강상태, 활동정도, 흡연유무 등에 의해서 영향을 받는 것으로 알려져 있다. US EPA의 IRIS에서는 건강위해성 평가시의 호흡률은 20 m³/day로 규정하고 있고, Table 7에 나타낸 국내 호흡률 조사 관련 자료인 2007년 한국노출계수핸드북에서 제시한 값을 본 연구에서는 사용하였다¹²⁾. 또한 확률론적 위

Table 6. Quantitative estimate of carcinogenic and non-carcinogenic risk from inhalation exposure

Parameter	EPA Classification	Unit Risk ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) ⁻¹	RfC (mg/m^3)	NOAEL LOAEL (mg/m^3)	UF	MF
HCHO	B1	1.3×10^{-5}	—	—	—	—
Benzene	A	2.2×10^{-6}	3×10^{-2}		300	1
Toluene	D		5	N : 46	10	1
Ethylbenzene	D		1	N : 434	300	1
m,p-Xylene	D		0.1	N : 39 L : 78	300	1
o-Xylene	D		0.1	N : 39 L : 78	300	1
Styrene	C		1	N : 34	30	1

RfC : Reference Concentration, N : NOAEL, L : LOAEL, UF : Uncertainty Factor, MF : Modifying Factor, A : Human carcinogen, B : Probable human carcinogen, C : Possible human carcinogen, D : Not classifiable as to human carcinogen, E : No evidence of non-carcinogen for human (US EPA, IRIS, 2005)

해성 평가를 위해 호흡률의 분포는 삼각분포를 가정하였다. 삼각분포의 최대 최소 및 최적값을 각각 한국노출계수 핸드북에서 제시한 연구결과인 휴식활동(Resting), 적절한 활동(Moderate), 및 가벼운 활동시(Light)의 호흡률로 가정하였다.

본 연구에서는 근무자의 경우 만성노출로 가정하여 20 m³/day(90th값)을 평균값으로 적용하였으며, 이용자의 경우 단기노출로 가정하여 중간활동에 해당하는 1.13 m³/hr을 적용하였다.

3) 평균수명(Average lifetime)

기대 여명은 어느 연령에 도달한 사람이 그 이후 몇 년 동안 생존할 수 있는가를 계산한 생존 연수이다. 이 중에서 특히 0세, 즉 출생시의 평균 기대여명을 평균수명이라고 정의할 수 있다. 수명은 특히 발암 위해도를 평가할 때 중요한 계수이다. 발암물질에 대한 평생 기간의 추정된 노출량을 수명으로 나누어 평균 노출량을 계산하기 때문에 수명이 짧으면 잠재적인 발암 위해도는 높아지고, 반면 수명이 길면 잠재적인 발암 위해도는 낮아진다. 우리나라에서는 대부분 통계청 자료를 인용하고 있는 실정으로 본 연구에서는 통계청에서 2011년 제시한 0세의 기대 여명으로 전체 81.2년, 남자 77.6년, 여자 84.5년을 기

준으로 하였다¹⁴⁾.

4) 노출빈도(Exposure frequency) 및 노출기간(Exposure duration)

다양한 환경매체를 통해서 오염물질에 노출되는 양을 평가하기 위해서는 접촉하는 환경매체 중의 오염물질이 농도, 노출빈도, 노출기간 등이 주요한 변수가 된다. 이때 노출빈도와 노출기간은 각 개인들의 활동양상이나 각각의 활동이 이루어진 장소에서 머무르는 시간 등에 의해 좌우된다.

본 연구에서는 실내 장소별 이용시간을 환경부(2007)¹²⁾에서 조사한 결과를 활용하여 CTE (Central Tendency Exposure : mean or the 50th percentile) 상의 노출빈도 계수의 값은 실내공간에서 머무르는 시간의 평균값으로 선정하였으며, RME(Reasonable Maximum Exposure : high-end) 상의 노출빈도 계수의 값은 95% UCL(Upper Confidence Level)의 값을 활용하였으며, Table 8에 나타내었다. 확률분포는 정규분포를 가정하였다. 노출빈도는 상가 근무자의 경우 일 8시간, 월 25일 근무를 가정하여 연 300일 근무하는 것으로 가정하였다. 상가 이용자(손님)는 매일 Table 8에 있는 시간별로 이용하는 것으로 가정하여 노출량 계산에 활용하였다.

Table 7. Inhalation rate by activity

(unit : m³/hr)

Parameter	Activity				
	Resting	Light exercise	Medium exercise	Heavy exercise	Very heavy exercise
Mean	0.45	0.94	1.13	1.87	2.33
SD	0.13	0.23	0.27	0.43	0.53
Median	0.44	0.94	1.13	1.86	2.29

Source : Korean Exposure Factors Handbook Ministry of Environment, 2007, SD : Standard Deviation

Table 8. Staying time at indoor according to multi-use facility

(unit : min/day)

Parameter		Subway station	Underground store	Library	Medical centers	Indoor parking lots	Kindergarten	Large stores	Postpartum care
Worker	Mean	480	480	480	480	480	480	480	480
	SD	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0	48.0
User	Mean	18.0	7.6	14.7	8.3	1.4	490.0	12.7	1200.0
	SD	41.2	48.4	67.5	57.4	12.1	49.0	40.2	120

Source : Ministry of Environment, 2007, SD : Standard Deviation

노출기간 계수 값은 상가 근무자 및 이용자(손님)의 경우 10대 이하부터 60대 이상 전 연령층이 이용하는 것으로 고려하여 환경유해인자 위해성 평가지침에서 제시한 70년으로 노출기간을 활용하였다¹⁵⁾. 분포는 삼각분포로 가정하였다. 삼각분포의 최소값과 최대값 및 최적값은 통계청¹⁴⁾에서 제공하는 기대여명 산출표를 활용하여 근무자와 이용자의 최소값 및 최대값은 18세(전체 63.6세, 남자 60.1세, 여자 66.9세)와 100세(전체 2.5세, 남자 2.3세, 여자 2.7세)로 가정하였으며, 최적값은 평균수명으로 가정하였다.

비발암성물질의 경우, 위해도 결정에 이용되는 노출량은 일일평균용량(Average Daily Doses : ADDs)으로 나타낼 수 있으며, 아래의 식(1)로 계산할 수 있다¹⁶⁾¹⁷⁾.

발암성물질은 인간이 오염물질에 노출이 평생 동안 일어나지 않더라도 발암작용은 지속될 수 있으므로 평생노출로 가정하여 평생 일일 평균 용량(Lifetime Average Daily Doses : LADDs)으로 표시한다¹⁶⁾¹⁷⁾.

평생 일일 평균 용량은 일일평균용량 식을 취하고 평생(Lifetime : LT)이 평균시간(Average time : AT)을 대신한다.

위해도 결정(Risk Characterization)

특정 노출수준에서의 초과위해도(유해물질에 노출되지 않은 인구집단에서의 배경위해도 수준보다 큰 위해도)를

정량적으로 평가하는 것을 의미하는데, 용량-반응평가와 노출평가에서 도출된 정보를 종합하여 특정 유해물질에 특정농도로 노출되었을 경우 인체 유해영향이 유발된 확률을 결정하는 단계이다. 위해도 결정은 최대 노출농도를 이용하여 최악의 상황(Worst case scenario)과 합리적 노출농도(Reasonable exposure)를 같이 계산한다.¹⁸⁾

발암성물질의 경우 US EPA의 IRIS 자료들을 통해 산출된 발암잠재력(Cancer Potency Factor : CPF)과 노출평가를 통해 얻어진 LADDs 값과 곱하여 식(3)과 같이 초과 발암위해도(Excess lifetime cancer risk)를 산출한다.

비발암성물질의 경우, 노출평가를 통해 얻어진 일일평균용량(ADDs)과 IRIS 자료를 이용한 용량-반응평가를 통해 산출된 참고치(RfC)의 비를 통해 비발암 위해도지수를 식(4)와 같이 산출하였다. 이와 같이 산출된 초과발암위해도는 10⁻⁶~10⁻⁴ 수준, 독성지수(Hazardous Index : HI) 및 독성위험값(Hazardous Quotient : HQ)은 1의 초과여부를 고려하여 위해수준을 평가하였다. 그러나 위해도 지수의 크고 작음에 따라 위해도의 정도는 평가되지 않는다.

단일 평가치 분석(Point Estimate Analysis)

단일 평가치 분석은 입력 변수들의 불확실성과 가변성을 표현할 수 없다. 다만, 가변성을 표현하기 위해

$$Average\ Daily\ Dose\ (mg/kg \cdot day) = \frac{Intake\ Dose}{BW \times AT} \dots\dots\dots (1)$$

Intake Dose = CA × IR × EF × ED	
CA : Chemical concentration in Air (mg/m ³)	IR : Inhalation Rate (m ³ /day)
EF : Exposure Frequency (days/year)	ED : Exposure Duration (years)
BW : Body Weight (kg)	AT : Averaging Time (days)

$$LADDs\ (mg/kg \cdot day) = \frac{Intake\ Dose}{BW \times LT} \dots\dots\dots (2)$$

$$CR = LADDs\ (mg/kg/day) \times CPF\ (ug/kg/day)^{-1} \times 1000 \dots\dots\dots (3)$$

$$= Concentration\ (ug/m^3) \times Unit\ risk\ (ug/m^3)^{-1}$$

$$HI\ (Hazard\ Index) = \frac{ADD}{RfC} \dots\dots\dots (4)$$

ADD : Average dose (mg/kg-day)	RfC : Reference concentration (mg/m ³)
--------------------------------	--

CTE(Central Tendency Exposure : mean or the 50th percentile) 위해도와 RME(Reasonable Maximum Exposure : high-end) 위해도를 계산한다¹⁹⁾²⁰⁾. EPA¹⁹⁾는 입력자료의 초기값으로 RME 위해도의 평가시 체중은 평균값, 호흡량과 노출기간에 대해서는 high-end 값을 사용하고, CTE 위해도의 평가시에는 체중의 평균값 그리고 호흡량과 노출기간에 대해서도 중앙값을 사용하도록 권장하고 있어 본 연구에서는 환경부⁹⁾¹²⁾ 값을 사용하였다.

몬테카를로 분석(Monte-Carlo Analysis)

위해도 평가는 매우 복잡하고 모든 정보를 집대성하는 과정이기 때문에 모든 단계에서 불확실성이 발생할 수 있다. 위해성 평가를 수행하면서 발생하는 불확실성과 가변성에 대한 이해가 부족한 상태에서 연구결과를 단순하게 받아들이는 경우 많은 오해가 발생되어질 수 있다²¹⁾. 정량적인 면이 수치로 간편하게 나타나지만 평가에 오류를 범할 가능성이 높아 결론에 대한 불확실성을 강조할 필요가 있다.

EPA에서는 이러한 불확실성과 가변성을 확인하는 수학적 모델을 적용한 불확실성 분석으로 Monte-Carlo Analysis를 권장하고 있다. 위해성 평가의 각 단계에서 발생할 수 있는 불확실성 및 다양성을 감소시키기 위한 확률론적 위해성 평가(Probabilistic Risk Assessment)와 확률분포로 가정된 각 위해인자들이 위해성 평가의 결과에 미치는 영향과 기여도 산출을 위한 Monte-Carlo simulation을 이용하여 수행하였다. 각각의 노출계수에 자료의 특성을 고려하여 적용된 확률분포를 이용하여 확률론적 발암위해도 및 위해도지수의 평균값(mean), 최대값(max), 최소값(min)과 20%, 40%, 60%, 80%, 100% 값을 산출하여 발암 및 비발암 위해도의 분포수준을 파악하였다.

Monte-Carlo simulation은 Crystal ball 2000(Decicioneering, Inc.)을 이용하여 모든 노출변수와 결과 값을 각각 1,000,000번씩 모의실험을 수행하였다²²⁾.

결과 및 고찰

실내공기 중 유해오염물질의 농도분포 특성

부산지역 일부 지하도상가의 유해오염물질 농도분포

본 연구대상시설에서 조사된 발암물질과 비발암물질에 대한 농도분포조사 결과를 Table 9와 Fig. 3에 나타내었

다. 주로 Toluene > Formaldehyde > m,p-Xylene > Ethyl benzene 농도 순으로 조사되었다.

다중이용시설 등의 실내공기질 관리법에는 개별 VOCs 성분들에 대한 기준은 아직 없으며, 단지 신축 공동주택의 경우 개별 권고기준이 Benzene 30 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, Toluene 1,000 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, Ethyl benzene 360 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, Xylene 700 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하, Styrene 300 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 규정되어 있다.

이번 조사 결과에서는 평균 농도로써 Benzene 2.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene 115.2 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethyl benzene 6.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Xylene 16.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Styrene 3.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 권고기준 이내로 나타났다. 또한 TVOCs 평균농도는 431.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 환경부 다중이용시설 실내공기질 관리법 상 지하도상가 TVOC 권고기준 500 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였으며, Formaldehyde의 평균농도도 63.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되어 지하도상가 유지기준 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.

지하도상가의 물질별 실내외 농도비(I/O ratio)를 비교해 보았을 때, 이번조사 물질들은 실내가 실외보다 다소 높게 나타났다. 발암성 유해화학물질인 Benzene 및 Formaldehyde의 경우 이번 연구결과에서의 I/O ratio는 각각 3.7 및 6.8로 실내가 높게 나타났다. 비발암성 유해화학물질의 I/O ratio는 Styrene이 26.9로 가장 높게 나타났으며, m,p-Xylene(19.0) > Toluene(7.4) > o-Xylene(6.0) > Ethyl benzene(4.7)순으로 본 연구에서는 나타났다. 이러한 결과는 기존에 국내에서 수행되었던 여러 연구에서 나타난 결과와 동일하게 실내에서의 오염물질 농도가 실외보다 높은 수준으로 나타났다²³⁾²⁴⁾. 이는 Formaldehyde는 건축물에 많이 사용되는 단열재, 바닥재, 실내가구의 칠, 접착제, 섬유제품 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있고²⁵⁾, Benzene 등 휘발성유기화합물은 페인트, 윤활제, 코팅제, 합성수지, 플라스틱 등에 의해 발생하는 것으로 알려져 있다. Formaldehyde 및 휘발성유기화합물이 실외보다 실내에서 높게 나타난 이유는 체계적인 환기가 이루어지지 않았기 때문에 상가 내 진열상품, 리모델링 및 증개축 시 많이 발생하는 물질들이 방출된 것으로 사료된다.

서울시 지하도상가를 대상으로 조사한 선행 연구결과에서는 발암성 유해화학물질인 Benzene의 평균 실내농도는 4.27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Formaldehyde의 평균 실내농도는 29.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었으며, 비발암성 유해화학물질의 실내평균농도는 Toluene 230.95 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethyl benzene 16.42 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, m,p-Xylene 20.59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,

Styrene 6.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o-Xylene 4.43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다¹¹⁾. 이번 연구결과에서는 서울시 지하도상가 내의 휘발성유기화합물의 연구결과보다 낮은 경향을 보였다. 이는 지하도상가내의 진열상품 종류, 사용된 건축자재, 환기조건 등에 따라 농도차가 발생할 수 있음을 시사한다.

지하도상가는 각 상점별 오염물질 농도가 다르며 냉난방 시설과 함께 공조설비가 연계되어 있고, 냉난방 시설과 별개로 공조설비만 On/Off 제어를 할 수 없는 시설의 특성으로 인하여 실내오염물질의 농도에 따른 제어가 다소 곤란한 시설의 구조적 특성이 있으므로, 실내공기질 관리를 위한 상가 근무자들의 주기적 청소 실시 및 실내

공기질 관리교육 등을 통하여 실내공기질에 대한 인식을 높이고 환기시설변경 또는 추가를 통하여 시설관리를 강화가 필요한 것으로 판단되었다.

Fig. 4.는 이번 연구대상인 지하도상가에서 휘발성유기화합물의 농도 구성비로 나타내었다. Toluene이 26.7%로 가장 높은 것으로 조사되었으며, m,p-Xylene(3.1%), Ethyl benzene(1.6%), o-Xylene(0.8%), Styrene(0.8%), Benzene(0.5%)순으로 나타났다. 또한 이번 연구에서 확인하지 않은 미확인 VOC가 66.4%로 다수를 차지하였다. 지하도상가를 대상으로 한 선행 연구결과에서는 미지의 성분이 66.8 %로 대부분을 차지하였고, 다음으로는

Table 9. An overall summary of VOCs & Formaldehyde concentrations

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Parameter	INdoor			OUTdoor			I/O
	Mean	S,D	Range	Mean	S,D	Range	
Benzene	2.32	1.27	0.93 ~ 5.51	0.63	0.62	0.01 ~ 2.26	3.7
Toluene	115.20	75.68	9.02 ~ 257.98	15.58	15.49	0.47 ~ 59.99	7.4
Ethyl benzene	6.78	5.10	1.40 ~ 25.66	1.43	1.52	0.00 ~ 4.45	4.7
m,p-Xylene	13.51	9.84	2.23 ~ 38.54	0.71	0.94	0.00 ~ 2.85	19.0
Styrene	3.55	5.16	0.04 ~ 30.17	0.13	0.23	0.00 ~ 0.78	26.9
o-Xylene	3.24	2.44	0.75 ~ 12.04	0.54	0.81	0.00 ~ 2.97	6.0
TVOC	430.97	144.16	147.76 ~ 768.39	47.58	41.16	9.83 ~ 177.23	9.1
Formaldehyde	63.89	35.80	11.88 ~ 195.90	9.39	8.43	0.18 ~ 36.54	6.8

I/O = Indoor concentration / Outdoor concentration

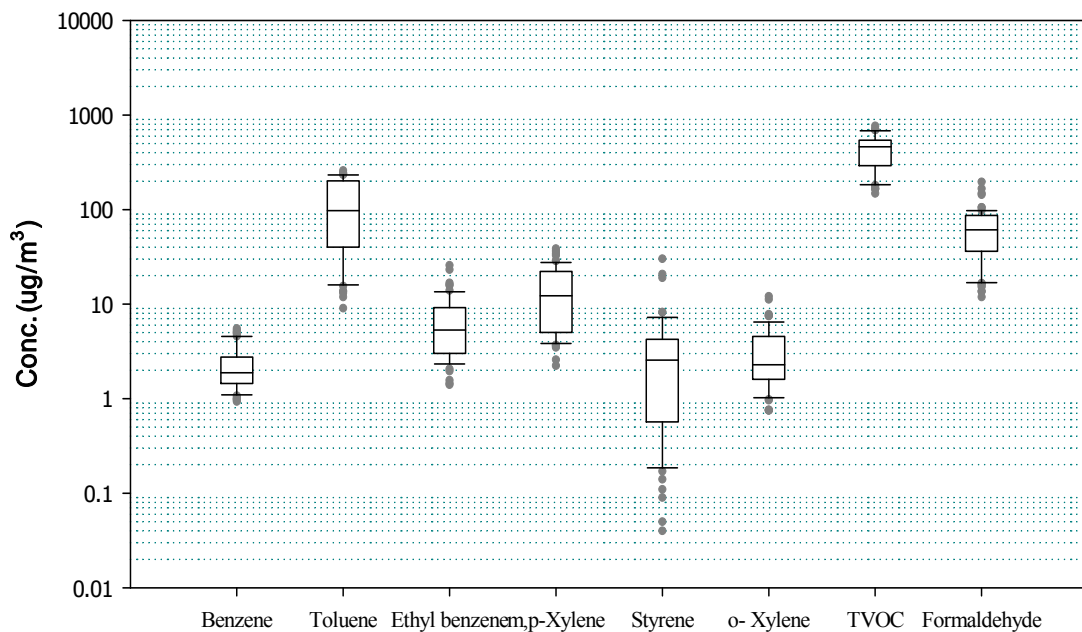


Fig. 3. Concentration of Volatile organic compounds & Formaldehyde in indoor.

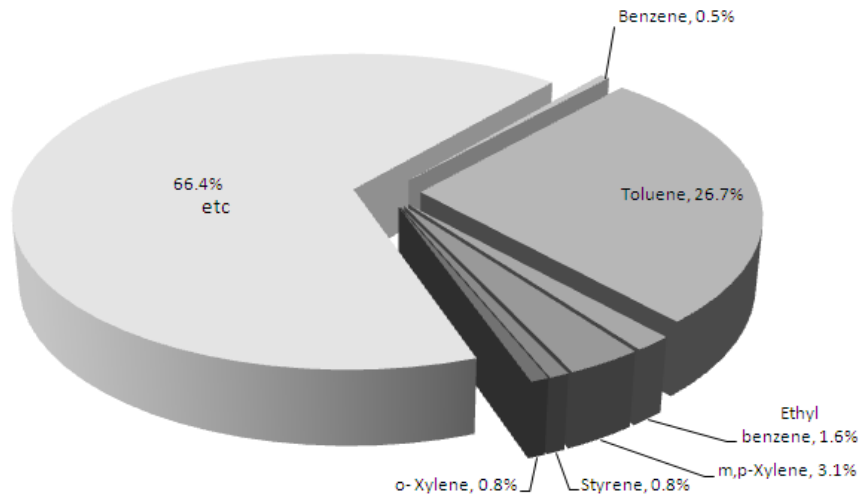


Fig. 4. Composition ratio of Volatile organic compounds in indoor air.

Toluene(26.7%), m,p-Xylene(8.4%), Ethyl benzene(1.9%), o-Xylene (1.0%), Styrene(0.7%), Benzene(0.5%)로 조사되었다¹¹⁾.

신축공동주택에서 발생하는 TVOCs의 경우 표준물질로 미확인 분석된 물질이 57.5%이고, 확인된 휘발성 유기화합물 중에서는 Toluene이 18.5%, m,p-Xylene 6.7%, Ethyl benzene 3.4%, o-Xylene 2.6%의 순으로 조사된 적도 있다²⁶⁾.

이러한 결과로 볼 때 시설을 부분적으로 개보수 할 때 실내에 사용되는 건축자재가 환경부에서 고시하고 있는 “오염물질 다량 방출자재”에 포함되어 있는지 확인하고, 이를 사용하지 않도록 한다. 휘발성유기화합물 및 폼알데하이드 등의 오염물질을 적게 방출하는 친환경 건축

자재(환경마크나 가급적 KS규격의 폼알데하이드 방출량 시험성적서 또는 MSDS(물질안전보건자료)가 있는 용품)를 사용한다. 지하도 상가 내 점포에서 판매하는 물품 중에서도 플라스틱류 등 화학물질이 원료인 제품이나 의류 등과 같이 화학물질을 포함하는 제품이 다수 있고, 매장 신상품은 오염물질 방출이 저감되도록 실외에서의 충분한 환기 등 가능한 전처리를 한 후 진열하는 등의 조치를 취할 필요가 있다.

계절별 유해오염물질 농도분포

지하도상가내의 계절별 유해오염물질 방출농도 비교를 위하여 봄과 가을에 시료를 채취하여 분석한 결과를 Table 10에 나타내었다.

Table 10. The seasonal variation of VOCs & Formaldehyde concentrations

(Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Parameter	Spring				Fall			
	Mean	S.D	Range	I/O	Mean	S.D	Range	I/O
Benzene	1.94	0.83	0.96 ~ 5.07	3.3	2.70	1.42	0.93 ~ 5.51	8.0
Toluene	106.43	81.63	9.02 ~ 242.79	6.3	123.98	79.87	11.88 ~ 294.05	8.8
Ethyl benzene	6.20	3.88	1.45 ~ 15.72	3.0	7.36	5.90	1.40 ~ 25.66	10.6
m,p-Xylene	12.47	10.22	2.23 ~ 38.54	11.8	14.55	8.81	2.57 ~ 34.31	43.0
Styrene	3.52	4.86	0.04 ~ 20.74	23.7	3.58	5.31	0.17 ~ 30.17	31.6
o-Xylene	3.00	1.97	0.75 ~ 7.78	3.3	3.49	2.74	0.75 ~ 12.04	23.9
TVOC	419.78	144.49	147.46 ~ 768.39	21.1	442.16	141.69	166.23 ~ 696.32	17.6
Formaldehyde	65.45	43.42	11.88 ~ 195.90	7.5	62.26	25.97	13.59 ~ 105.31	6.0

이번 연구에서는 휘발성유기화합물은 가을철에 채취한 시료에서 Benzene $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene $124.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethyl benzene $7.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC $442.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 등의 농도 수준으로 높은 경향을 나타내었으며, Formaldehyde는 $65.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄철에 높은 경향으로 조사되었다. 계절에 따른 실내외 농도비는 가을철에 Benzene(8.0), Toluene(8.8), m,p-Xylene(43.0), Styrene(31.6) 등의 성분이 봄철에 비해 높게 나타났는데, 외기 유입에 의한 영향보다는 실내의 오염물질 방출량에 기인한 것으로서, 봄철보다는 가을철 실내공기 온도 상승에 따른 오염물질 방출량 증가와 함께 에어컨 가동 등 냉방에 따른 환기부족의 영향이 일부 반영된 것으로 추측된다.

지하도상가의 대부분은 강제 급기/배기 방식으로 1층 환기(기계 환기, 공조 및 환기된 공기 공급, 약 70 % 회수)이며, 나머지는 상가 내부로부터 주요 통행로 및 출입구를 통하여 외부로 방출되는 자연 환기 방식이다. 지하도상가는 주로 지하 1,2층에 위치하므로 자연환기의 효과는 거의 없다. 기류, 온도, 습도, 환기상태에 따라 방출량이 달라지는 것으로 선행연구결과에서도 보고된 바 있다²⁷⁾.

시설별 유해오염물질 농도분포

이번 연구 대상인 부산시내 일부 지하도 상가의 시설별 유해오염물질 평균농도 조사결과를 Table 11에 나타내었다.

이번 조사결과에서 시설별 평균 농도는 Benzene $1.4\sim 2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene $15.6\sim 199.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethyl benzene $3.5\sim 9.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, m,p-Xylene $8.0\sim 18.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Styrene $1.2\sim 6.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, o-Xylene $1.4\sim 4.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$,

$\mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC $194.4\sim 601.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Formaldehyde $15.2\sim 111.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 나타났다.

다중이용시설 실내공기질 유지기준 항목인 Formaldehyde의 기준($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 대부분의 시설에서 만족하였으나, 1개 시설에서 평균 $111.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 이번 조사결과에서는 기준을 초과하였다. 권고 기준항목인 TVOC의 기준($500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 만족하는 시설이 3곳, 기준을 초과한 것으로 조사된 시설이 3곳이다. 서울시 지하도상가¹¹⁾의 TVOC 기준 초과율은 30.5 %로 조사 발표하였으며, 전국 4개 도시지역 및 2개 공단지역 보육시설을 대상으로 조사한 신혜수²³⁾(2012)는 TVOC 평균농도가 $985 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (n=175)으로 조사하여 발표한 바도 있다.

이는 지하도상가 내부에 있는 의류점, 잡화, 화장품, 향수류, 신발, 커튼 등 일상용품에서 발생된 유기화합물이 실내공기농도의 증가에 일부 기여한 것으로 판단되므로 휘발성유기화합물(VOC) 오염원이 많은 지하도상가들은 환기시설 관리 강화가 필요한 것으로 사료된다.

건강위해성 평가

노출시나리오 작성

실내 유해오염물질의 노출에 의한 건강위해도 평가에 있어 신뢰성 있는 결과를 산출하기 위해 Table 12와 같은 노출시나리오를 작성하고 이를 이용하여 노출량 평가를 수행하였다.

노출량 평가는 결정론적 평가와 확률론적 평가를 수행하기 위하여 각 노출인자별 단일값과 이들 인자가 가지는 확률분포를 조사하여 제시하였다. 또한 단일값은 평균값만을 제시하지 않고 이들 인자가 가질 수 있는 범위나 표준편차(산포성)를 이용한 상위값 또는 95% 상위 값 등을

Table 11. The concentrations of VOCs & Formaldehyde in underground shopping center (Unit : $\mu\text{g}/\text{m}^3$)

	Benzene	Toluene	Ethyl benzene	m,p-Xylene	Styrene	o-Xylene	TVOC	Formaldehyde
A	2.2	165.3	7.5	18.9	4.7	3.6	520.5	89.7
B	2.5	70.3	6.0	9.6	2.5	3.8	389.3	50.6
C	1.6	91.7	3.5	15.5	1.7	1.4	350.1	51.4
D	2.7	144.8	7.0	12.4	4.8	3.1	505.3	52.9
E	3.6	199.8	9.3	17.6	6.2	4.8	601.5	111.4
F	1.4	15.6	4.7	8.0	1.2	2.1	194.4	15.2

같이 조사하여 제시함으로써 단일값의 노출량의 산출이 아닌 CTE(Central Tendency Exposure) 및 RME(Reasonable Maximum Exposure)의 노출상태의 노출량을 제시하고자 노출시나리오를 작성하였다.

발암성물질 위해성평가

지하도상가의 실내 환경에 분포하는 유해오염물질 중 발암성물질인 Formaldehyde와 Benzene의 호흡으로 인한 발암 위험도를 노출에 의한 위해성 평가를 18세 이상 인 성인의 근무자(Worker)에 대하여 위해성 평가를 수행

하였다. 발암성물질의 위험도는 평생발암위해도(Lifetime cancer risk)를 추정하여 평가하였으며, 발암 위험도 추정은 단일평가치 분석(Point estimate analysis)과 확률론적 분석(Probabilistic analysis)을 함께 실시하여 Table 13에 나타내었다.

일반적으로 발암물질의 경우 허용위해도(Acceptable risk)를 약 $1.0 \times 10^{-6} \sim 1.0 \times 10^{-4}$ (인구 백만명당 1명~만명당 1명)정도의 범위로 제안하고 있다. 백만명당 1명(1.0×10^{-6})의 “de minimis risk”로서 1980년대 수준에서의 자연발생적 사망률에 상응하는 매우 낮은 위험확

Table 12. Fixed assumptions and probability densities used as inputs to risk estimates for this study

Parameter		Unit	CTE	RME	Distribution type	Distribution parameter	
Pollutants	Formaldehyde	$\mu \text{ g/m}^3$	63.9	70.8	NM	Mean : 62.5, S.D : 36.7	
	Benzene	$\mu \text{ g/m}^3$	2.3	2.6	NM	Mean : 1.59, S.D : 0.46	
	Toluene	$\mu \text{ g/m}^3$	115.2	135.3	NM	Mean : 62.86, S.D : 77.22	
	Ethyl benzene	$\mu \text{ g/m}^3$	6.9	8.0	NM	Mean : 4.32, S.D : 2.47	
	m,p-Xylene	$\mu \text{ g/m}^3$	15.9	15.9	NM	Mean : 8.08, S.D : 7.12	
	Styrene	$\mu \text{ g/m}^3$	3.6	4.8	NM	Mean : 2.48, S.D : 4.86	
	o- Xylene	$\mu \text{ g/m}^3$	3.2	3.8	NM	Mean : 3.28, S.D : 2.38	
	TVOC	$\mu \text{ g/m}^3$	431	472.9	NM	Mean : 430.97, S.D : 167.97	
Inhalation	IR	Worker	m^3/day	20	30	TR	Max : 44.88, Min :10.80 Likeliest : 27.12
		User	m^3/day	27.12	27.12	TR	Max : 44.88, Min :10.80 Likeliest : 27.12
Exposure time	ET	Worker	min/day	480	480	NM	Mean : 480, S.D : 48.0
		User	min/day	7.6	102.46	NM	Mean : 7.6, S.D : 48.4
Exposure frequency	EF	Worker	day/year	300	300	point	
		User	day/year	365	365	point	
Exposure duration	ED	Worker	year	25	25	TR	Max : 100, Min :18, Likeliest : 25
		User	year	70	92	TR	Max : 100, Min :18, Likeliest : 81
Body weight	BW	Worker	kg	62.7	62.7	TR	Max : 81.9, Min :47.2, Likeliest : 62.7
		User	kg	62.7	62.7	TR	Max : 81.9, Min :47.2, Likeliest : 62.7
Lifetime	LT	Common	year	70	15.2	point	

를이다. 이에 1990년대 후반부터는 환경오염으로 인한 허용위해도는 1.0×10^{-5} (인구 십만명당 1명) 수준을 권고하고 있으며, 1.0×10^{-4} (인구 만명당 1명)의 위해일 경우, 적극적인 저감활동이 필요한 정도로 제안하고 있다. 세계보건기구에서는 인체발암성물질의 경우, 인체보호권고치를 1.0×10^{-5} (인구 십만명당 1명)의 평생초과발암위해도에 해당하는 농도로 제안하고 있다.

이번 연구의 실내공기 중 흡입에 의한 Formaldehyde 및 Benzene의 단일평가치 분석에 의한 근무자의 초과발암위해도 산출결과, CTE 및 RME 노출 상태에서 1.0×10^{-6} 을 초과하는 물질은 없는 것으로 조사되어 부산지역 일부 지하도상가 내 흡입 노출에 의한 초과발암위해의 발생 가능성은 거의 없는 것으로 판단된다.

확률론적 위해성 평가를 실시한 몬테카를로 분석 결과에서 초과발암위해도분포가 Formaldehyde는 정규분포를 나타내고, benzene은 왼쪽으로 치우친 분포를 보이고 있으며(Fig 5), 허용초과발암위해도인 1.0×10^{-6} 을 초과하지 않는 분포를 나타내고 있는 것으로 조사되어 근무자의 실내공기 중 Formaldehyde 및 Benzene의 흡입에 의한 위해도는 거의 없는 것으로 평가되었다. 발암등급 B1(EPA)으로 인간에게 암을 유발할 가능성이 있는 Formaldehyde의 위해성 평가 결과, 위해도 기준을 이내이며, 저농도의 Formaldehyde 흡입노출로 인한 종양 발생 가능성은 매우 낮은 것으로 조사되어 있다²⁸⁾.

본 연구에서 추정한 발암성물질인 Formaldehyde 및 Benzene의 근무자 건강에 미치는 영향은 적은 것으로 조사되었으나, 지하도상가내 공기가 좋지 않은 것으로 인식하고 있는 근무자 및 이용자가 많이 있고⁹⁾, 실내에는 미확인 VOCs 물질이 약 66%나 있으므로 실내공기흡입에 의한 유해오염물질관리는 더 많은 연구와 종합적 판단이

필요하다.

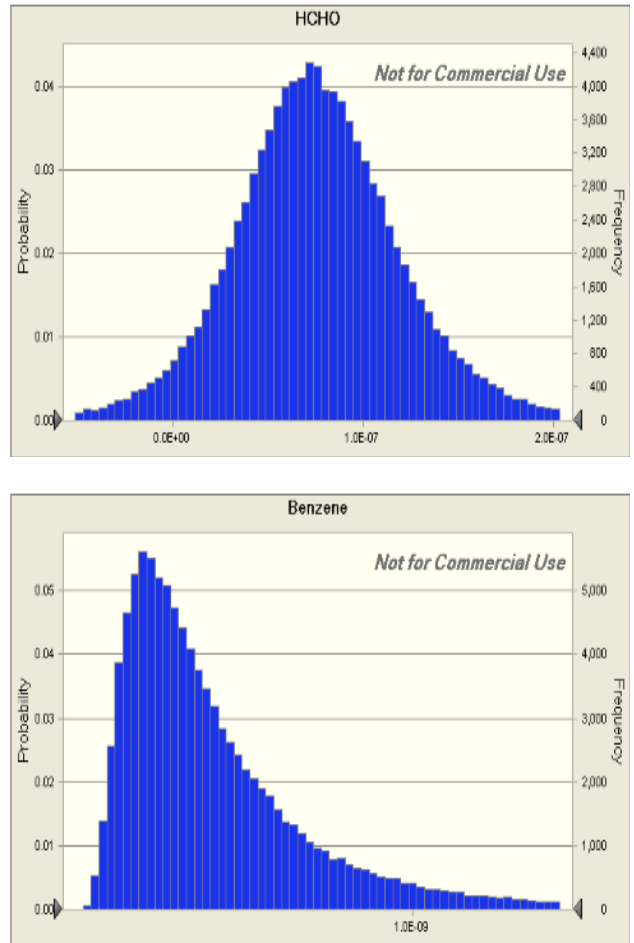


Fig. 5. Excess cancer risk of HCHO and Benzene in underground stores facility.

Table 13. Comparison of Fixed-point(CTE, RME) and Monte Carlo hazard index estimates on carcinogenic formaldehyde and benzene in underground store

Pollutants	Dweller	Cancer risk									
		Fixed point		Monte-Carlo							
		CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles				
							20	40	60	80	100
HCHO	Worker	4.15E-08	3.17E-07	7.60E-08	3.92E-07	1.11E-08	4.13E-08	6.47E-08	8.50E-08	1.10E-07	3.92E-07
Benzene	Worker	1.51E-09	1.99E-09	4.90E-10	1.34E-08	9.72E-11	2.73E-10	3.53E-10	4.57E-10	6.39E-10	1.34E-08

비발암성물질 위해성평가

실내 환경에 분포하는 휘발성유기화합물 중 본 연구의 대상오염물질인 Toluene, Ethyl benzene, m,p-Xylene, o-Xylene, Styrene의 5개 비발암성물질에 대해 호흡으로 인한 비발암위해도와 노출에 의한 위해성 평가를 18세 이상의 성인인 대상으로 근무자(Worker)를 대상으로 위해성 평가를 수행하여 Table 14에 나타내었다.

비발암성 물질의 노출에 따른 위해도 결정은 용량-반응 평가를 통해 산출된 흡입 참고치와의 비교를 통해 현 오염수준을 평생 동안의 일일 허용 가능량과 비교함으로써 산출된 HQ가 1.0을 초과하면 현재 노출수준이 독성을 고려한 참고수준을 초과하는 것이므로 유해 영향이 유발될 가능성이 있음을 의미하며, HQ가 1.0보다 작게 산출될수록 유해 영향 유발 확률이 낮아지는 것이다. 그러나 HQ를 산출하는데 이용된 다양한 자료들에 대한 불확실성이 항상 존재하므로 “위해도가 없다” 또는 “안전하다”와 같이 단정적인 표현은 삼가해야 한다. 미국 EPA에서는 비발암물질의 경우 근무자는 1을 초과하지 않는 범위에서 권고기준을 제안하고 있으며, 유해물질관리를 위한 목적으로는, 안전력을 확보하기 위해 10배 낮은 수준을 권고안으로 제안하였다.

본 연구에서의 개별 물질별 실내공기흡입 노출과 단일 평가치분석에 의한 HQ 산출 결과, 1을 초과하는 물질이 없는 것으로 조사되었으며, 유해물질 관리를 위한 위해도 지수 0.1을 기준으로 하여 평가한 결과에서도 CTE 및

RME 상태에서 이번 연구에서는 초과하는 물질이 없는 것으로 나타났다.

확률론적 분석에서 HQ의 분포가 Ethyl benzene, Styrene o-Xylene은 왼쪽으로 치우쳐 있고(Fig. 5), Toluene, m,p-Xylene 및 TVOC는 정규분포를 보이고 있으며, 1을 초과하지 않는 분포를 나타내고 있는 것으로 조사되었으며, 100%에서도 HQ가 0.1을 초과하지 않는 것으로 나타나 근무자가 일생동안 건강상에 유해한 영향을 유발할 수 있는 수준이 아닌 양호한 상태를 보였다.

본 연구 결과에서 나타난 위해성은 노출변수의 가정에 의한 불확실성이 존재하고 있으며, 장기간 동안의 농도를 측정할 것이 아니기 때문에 위해성 평가의 결과가 다소 과대 또는 과소평가 되었을 가능성을 무시할 수 없다. 시설에 대한 개별 유해오염물질에 대한 관리방안의 마련보다는 미확인 유해오염물질이 다수 존재하므로 종합적 관리방안의 수립이 이루어져야 할 것으로 판단된다.

결 론

본 연구는 지하도상가의 근무자 및 이용자의 환경영향 관리를 위해 부산지역 지하도상가를 대상으로 실내오염물질을 측정·분석하여 흡입에 의한 Formaldehyde, Benzene 발암위해도와 Toluene, Ethyl benzene, m,p-Xylene, o-Xylene, Styrene의 비발암위해도를

Table 14. Comparison of Fixed-point(CTE, RME) and Monte Carlo hazard index estimates on non-carcinogenic hazardous air pollutants in underground store

Pollutants	Dweller	Cancer risk									
		Fixed point		Monte-Carlo							
		CTE	RME	Mean	Max	Min	Percentiles				
						20	40	60	80	100	
Toluene	Worker	1.03E-03	9.33E-03	7.53E-04	3.90E-03	1.00E-04	2.96E-04	5.85E-04	8.54E-04	1.179E-03	3.90E-03
Ethyl Benzene	Worker	6.50E-04	2.77E-03	6.54E-04	5.51E-03	8.62E-05	2.67E-04	4.21E-04	6.27E-04	9.67E-04	5.51E-03
m,p-Xylene	Worker	6.82E-03	5.48E-02	1.28E-03	2.63E-02	5.76E-03	1.09E-02	1.20E-02	1.31E-02	1.45E-02	2.63E-02
Styrene	Worker	1.73E-03	1.66E-02	4.00E-04	1.05E-01	4.91E-05	1.12E-04	2.26E-04	8.69E-05	4.95E-04	1.05E-01
o-Xylene	Worker	1.64E-04	1.32E-03	3.17E-03	6.71E-02	2.84E-04	1.29E-03	1.91E-03	2.78E-03	4.37E-03	6.71E-02
TVOCs	Worker	4.30E-03	3.26E-02	8.20E-03	2.82E-02	2.46E-03	5.27E-03	7.22E-03	8.97E-03	1.10E-02	2.82E-02

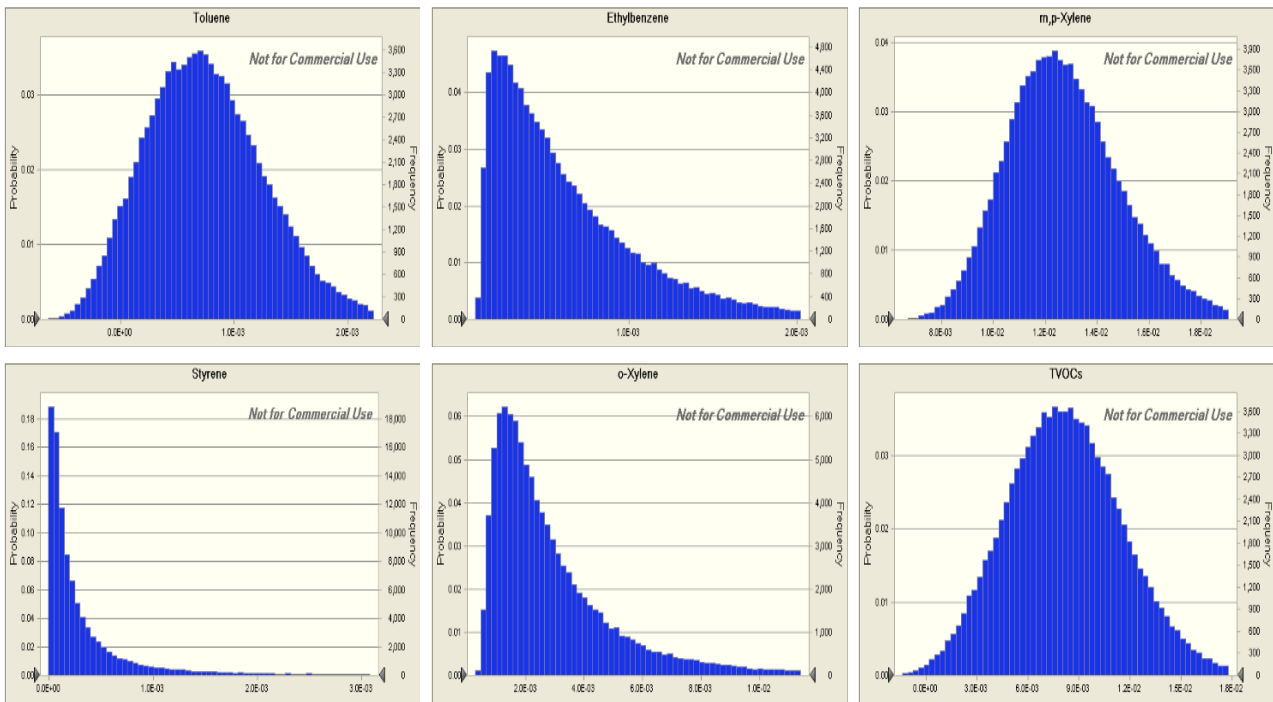


Fig. 6. Excess hazard index of VOCs in underground stores facility.

산출하였다.

이번 조사 결과에서는 평균 농도로써 Benzene $2.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene $115.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethyl benzene $6.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Xylene $16.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Styrene $3.6 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 권고기준 이내로 나타났다. 또한 TVOC 평균농도는 $431.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되어 환경부 다중이용시설 실내공기질 관리법 상 지하도상가 TVOC 권고기준 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였으며, Formaldehyde의 평균농도도 $63.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 조사되어 지하도상가 유지기준 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 만족하였다.

지하도상가의 물질별 실내외 농도비(I/O ratio)를 비교해 보았을 때, 이번조사 물질들은 실내가 실외보다 다소 높게 나타났다. 발암성 유해화학물질인 Benzene 및 Formaldehyde의 경우 이번 연구결과에서의 I/O ratio는 3.7 및 6.8로 실내가 높게 나타났다.

이번 연구에서는 휘발성유기화합물은 가을철에 채취한 시료에서 Benzene $2.7 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Toluene $124.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$, Ethyl benzene $7.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$, TVOC $442.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 등의 농도 수준으로 높은 경향을 나타내었으며, Formaldehyde는 $65.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 봄철에 높은 경향으로 조사되었다.

다중이용시설 실내공기질 유지기준 항목인 Formaldehyde의 기준($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하)을 대부분의 시

설에서 만족하였으나, 1개 시설에서 평균 $111.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타나 이번 조사결과에서는 기준을 초과하였다.

발암물질 중 Formaldehyde 및 Benzene의 흡입에 의한 CTE 및 RME에서 단일 평가치 및 확률론적 분석에 의한 발암위해도 평가 결과 근무자는 인구 백만명당 1명 (10^{-6})의 위해도 기준이내로 조사되었다.

비발암성물질의 위해도 평가 결과에서도 CTE 및 RME의 단일 평가치 및 확률론적 분석 결과 근무자의 비발암 위해도지수는 1보다 낮으며, 유해물질 관리를 위한 0.1보다 낮은 결과를 나타내었다.

위해성 평가는 발암물질에서의 위해도만을 중점적으로 논하여 평가하는 것보다는 비발암물질의 위해도를 포함하여 종합적으로 통합평가를 하는 것이 바람직하며, 여러 가지의 경제적 손익, 공학적 처리기술, 분석기술에 대한 조건들이 감안되어야 한다.

참고문헌

1. Woods, J. E., "An engineering approach to controlling indoor air quality", Environment Health perspectives, pp.15~21(1991).
2. National Academy of Sciences(NAS), "Human

- exposure assement for airborne pollutants”, Washington DC.(1993).
3. Wade, W.A., and W.A., Cote and J.E.Yocom, “A study of indoor air quality”, Journal of the Air Pollution Control Association, 25(9). pp.933~939(1975).
 4. Lee, S. C. and M. Chang “Indoor and outdoor air quality investigation at schools in Hong Kong”, Chemophere. 40, pp.109~113(2000).
 5. 이홍철, 황인주, “지하도상가 천장 매립식 냉난방유닛 적용에 따른 실내 환경특성에 관한 수치적 연구”
 6. WHO, Europe exposure assessment in studies on the chronic effects of long-term exposure to air pollution(2002).
 7. 김윤신, 이철민, 문정숙, 김상욱, “서울·경기지역 초·중·고등학교 교실의 실내공기오염에 관한 연구”, 한국학교보건학회지, 16(1), pp.81~90(2003).
 8. Molbare, L., “Indoor air pollution due organic gases and vapors of solvents in building materials”, Environ. Int.(1982).
 9. 환경부, “다중이용시설의 저탄소형 실내공기질 관리지침 -지하도상가-.(2011).
 10. U.S. EPA, IRIS(Litegrated Risk Information System), <http://www.epa.gov/iris/>
 11. 류인철, “다중이용시설 실내공기질 특성 및 건강위해성 평가에 대한 연구”, 부경대학교박사학위논문(2010).
 12. 환경부, 한국 노출지수 개발 및 운영체계 구축(2007).
 13. 지식경제부 기술표준원(<http://www.sizekorea.kats.go.kr>), “6차 인체치수조사보고서”(2011).
 14. 통계청(<http://kostat.go.kr>), “2011년 생명표 보도자료”(2012).
 15. 환경부, 환경유해인자의 위해성 평가를 위한 절차와 방법 등에 관한 지침(2010).
 16. US EPA, “Exposure Factors Handbook:1989 edition”, Washington, DC : Office of Research and Development, Office of health and Environmental Assessment.(1989).
 17. US EPA, “Exposure Factors Handbook:1997 edition”, Washington, DC : Office of Research and Development, Office of health and Environmental Assessment.(1997).
 18. Hoddinott, K. B., Lee, A. P., “Evaluation of total volatile organic compound emissions from adhesives based on chamber tests”. J. Air Waste manage. Assoc. 50, pp.199~206(2000).
 19. US EPA, “Final guidelines for exposure assessment”, EPA/600Z-92/001(1992).
 20. US EPA, “Guidelines for exposure assessment” : notive, federal Tegoster 57(104) : pp.22888~22938(1992).
 21. 박재성, 김대선, 정해원, “국내환경역학조사 및 위해성평가에서 나타나는 불확실성의 종류와 대응 방안 연구”, 한국환경위생학회지, 제29권 제5호, pp.101~109(2003).
 22. US EPA, “Guiding principles for monte carlo analysis”, EPA/630/R-97/001, pp.1~35(1997).
 23. 신혜수, “보육시설의 실내공기 중 휘발성유기화합물 분포특성 및 건강위해성 평가”, 한양대학교박사학위논문(2012).
 24. 고연정, 김신도, 박숙영, 장성기, “유아교육시설 내 실내공기유해오염물질에 대한 어린이건강위해성 평가”, 한국환경보건학회지 제35권 제2호, pp 78~85(2009).
 25. ToxFAQs, ASTDR, “Agency for Toxic Substances and Disease Registry Formaldehyde”(1999).
 26. 장성기, 천재영, 이태형, 임수길, 류정민, 서수연, 임정연, “신축공동주택에서 실내공기오염 물질(휘발성 유기화합물 및 카보닐화합물) 농도분포 특성”, 분석학회지 Vol. 20, No.1, 2007.
 27. Marutzky,R., “Release of formaldehyde by wood products”, wood adhesives, Vol II, p.11(1989).
 28. Kerns, W. D., Pavkov, K. L., and Donofrio, D. J. etal, “Carcinogenicity of formaldehyde in rats and mice after long-term inhalation exposure”, Cancer Res, 43, pp.4382~4392(1983).