

신축 도서관 실내공간에서의 유해대기오염물질 오염수준

권혜옥¹ · 이윤세^{1,2} · 예진² · 손희식² · 김철수² · 최성득^{1,2†}

¹울산과학기술대학교 도시환경공학부, ²울산과학기술대학교 환경분석센터

Levels of Hazardous Air Pollutants (HAPs) in a New Library

Hye-Ok Kwon¹, Yun-Se Lee^{1,2}, Jin Ye², Hee-Sik Son², Chul-Su Kim², and Sung-Deuk Choi^{1,2†}

¹School of Urban and Environmental Engineering, Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 689-798, Korea

²UNIST Environmental Analysis Center (UEAC), Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Ulsan 689-798, Korea

Received February 6, 2012/Accepted March 16, 2012

Indoor air quality is an important environmental issue especially for multi-use buildings because many people can be readily exposed to air pollutants. In this study, we collected air samples at eight indoor sites in a new library completed in 2009. Our target compounds were hazardous air pollutants (HAPs) such as formaldehyde (HCHO), 48 volatile organic compounds (VOCs), and 16 US-EPA priority polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). Their concentrations were 17~124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mean: 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 41~90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (mean: 59 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), and 19.5~94.7 ng/m^3 (mean: 37.4 ng/m^3), respectively. The highest concentrations of HCHO and VOCs were measured at an auditorium, while the highest concentration of PAHs was measured at a supercomputer room. The main source of HCHO and VOCs in the auditorium seemed to be new furniture, and that of PAHs in the supercomputer room might be circuit boards and chips in computers. The spatial distribution of HAPs in this library suggested that ventilation was a key factor affecting the levels of HAPs in the building.

Key words: Indoor air pollution, VOCs, Formaldehyde, PAHs, Library

1. 서 론

건축기술의 발달로 건물이 밀폐화되고 두통, 알레르기성 질환, 어지러움 등의 증세가 보고되면서 실내공기 오염에 대한 관심이 증가하고 있다. 이러한 실내오염은 물리적 환경(온도, 습도, 기류, 복사열 등)과 대기오염 물질들이 복합적으로 작용하여 발생한다.¹⁾ 실내공기오염물질의 종류는 먼지, 포름알데히드, 휘발성유기화합물 등으로 매우 다양하며, 새집 증후군(Sick house syndrome: SHS), 병든 건물 증후군(Sick building syndrome: SBS), 화학물질 과민증(Multiple chemical sensitivity: MCS) 등을 유발한다.²⁾

세계보건기구(World health organization: WHO)는 실내공기오염에 의한 사망자가 연간 280만 명에 이르

고, 실내오염물질이 환경대기오염물질보다 폐에 전달될 확률이 1,000배 높다고 보고하였다.³⁾ 특히, 현대인들이 실내에서 생활하는 시간이 길어지면서 실내공기질에 따른 건강문제가 주목을 받고 있다. 미국인들은 하루 24 시간 중 95%를 실내에서 보내고 있으며,³⁾ 한국인의 경우에는 97%를 실내에서 보내는 것으로 보고되었다.⁴⁾ 미국환경청(US Environmental protection agency: US EPA)은 실내공기오염을 가장 시급히 해결할 다섯 가지 환경문제 중의 하나로 간주하여 다양한 연구를 수행하고 있다. 국내에서는 1980년대 이후부터 주택,^{5,6)} 학교,^{7,8)} 유아시설,⁹⁾ 사무실¹⁰⁾ 등을 대상으로 실내공기오염에 관한 연구가 진행되었다.

최근 국내에서 다중이용시설 실내공기오염에 대한 연구가 증가하고 있다.^{11,12)} 다중이용시설이란 지하역사,

[†]To whom correspondence should be addressed.

Tel: 82-52-217-2811, Fax: 82-52-2809, E-mail: sdchoi@unist.ac.kr

도서관, 찜질방 등 불특정 다수인이 이용하는 시설로서, 환경부가 『다중이용시설 등의 실내공기질 관리법』으로 관리하고 있다. 다중이용시설의 관리대상 오염물질은 10종의 기체상/입자상 물질(미세먼지, 이산화탄소, 포름알데히드, 총 부유세균, 일산화탄소, 이산화질소, 라돈, 휘발성유기화합물, 석면, 오존)을 포함하며, 17개 시설군에 대한 유지기준과 권고기준이 있다.¹³⁾

다중이용시설인 도서관에는 다양한 실내 오염원들이 있으며, 이용형태에 따라 인체에 노출되는 정도가 상이할 것으로 예상된다. 지금까지 도서관에서 수행된 실내공기오염 연구들 대부분은 신축 도서관이 아닌 기존 도서관을 대상으로 실내오염특성,¹⁴⁾ 실내공기질과 학습능률의 관계,¹⁵⁾ 실내오염 개선방안^{16,17)} 등이 연구되었으며, 리모델링 도서관의 실내공기질에 대한 연구도 수행되었다.¹⁸⁾ 새로 건축된 도서관에서는 시공과정에서 사용된 접착제 성분들이 다량으로 방출될 것으로 예상되지만, 신축 도서관에 대한 연구는 매우 미흡한 상황이다.

도서관 내부공간은 일반적으로 열람실, 휴게실, 자료실 등으로 구분되는데, 이 중에서 열람실은 가장 많은 사람들이 이용하며 장시간 머무르는 곳이다. 열람실의 1인당 점유 면적은 5 m² 이하로서 일반 사무실이나 가정주택이 9~10 m²인데 비하여 협소하다.¹⁰⁾ 이와 같이 도서관 열람실에는 단위면적당 많은 사람들이 모여 있으므로, 실내공기오염은 재실자의 건강과 학습능률에 큰 영향을 줄 수 있다. 따라서 본 연구에서는 신축 도서관 실내공간에서 휘발성유기화합물(Volatile organic compounds: VOCs), 포름알데히드(Formaldehyde), 다환방향족탄화수소(Polycyclic aromatic hydrocarbons: PAHs)의 오염수준을 조사하였다. 이를 통해 실내오염

의 원인을 파악하여 해결방안을 모색하고, 향후 신축건물의 실내공기오염 연구를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 분석항목 선정

본 연구에서는 대표적인 실내오염물질인 휘발성유기화합물 48종, 포름알데히드, 다환방향족탄화수소 16종을 분석항목으로 선정하였다(Table 1). 휘발성유기화합물은 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되고 건축자재와 마감재료에서 배출되며,¹⁹⁾ 실내에서는 건축자재, 접착제, 사무기기, 난방기구 등이 주요 배출원이다.²⁰⁾ 휘발성유기화합물은 단기적으로는 눈, 코, 목의 자극, 두통, 호흡곤란, 피로감을 유발하며, 장기적으로는 간과 신장 등에 영향을 줄 수 있다.¹⁾

포름알데히드는 자극성 냄새(냄새역치: 0.8 ppm)가 나는 가연성 무색기체로서 피혁제조와 멜라민계 합성수지를 만드는 공정에서 사용되며,¹¹⁾ 일반주택이나 공공건물에 사용되는 단열재와 접착제에서도 배출된다.¹⁹⁾

대표적인 유해대기오염물질(Hazardous air pollutants: HAPs)인 다환방향족탄화수소는 두 개 이상의 방향족고리가 융합된 유기화합물로서 유기물질이 고온에서 분해되거나 불완전 연소될 때 발생한다.²¹⁾ 다환방향족탄화수소는 주로 화석연료를 사용하는 산업공정과 이동오염원에서 배출되어 실내로 유입되며, 실내에서는 난방,²²⁾ 요리,²³⁾ 흡연²⁴⁾ 등이 주요 오염원이다. 다환방향족탄화수소는 증기압이 낮고 지용성이므로 환경매체와 생체에 축적되며, 일부는 발암물질로 알려졌다.²⁵⁾ 지금까지 다환방향족탄화수소에 대한 다중이용시설 오염 연

Table 1. Target compounds in this study

Types	Compounds
VOCs (48)	Acetone, 2-Propanol, Methylene chloride, 1-Propanol, 2-Butanone, Ethyl acetate, Hexane, Chloroform, 2,4-Dimethylpentane, 1,1,1-Trichloroethane, n-Butanol, Benzene, Carbon tetrachloride, 1,2-Dichloropropane, Bromodichloromethane, Isooctane, Trichloroethylene, n-Heptane, 4-Methyl-2-Pentanone, Toluene, Dibromochloromethane, n-Butyl acetate, n-Octane, Tetrachloroethene, Ethylbenzene, mp-Xylene, Styrene, o-Xylene, n-Nonane, Alpha-pinene, mp-Ethyltoluene, Decanal, 1,3,5-Trimethylbenzene, 2-Ethyltoluene, β-Pinene, 1,2,4-Trimethylbenzene, n-Decane, 1,4-Dichlorobenzene, 1,2,3-Trimethylbenzene, (R)-(+)-Limonene, Nonanal, n-Undecane, 1,2,4,5-Etramethylbenzene, n-Dodecane, n-Tridecane, n-Tetradecane, n-Pentadecane, n-Hexadecane
HCHO	Formaldehyde
PAHs (16)	Naphtalene, Acenaphtalene, Acenaphtene, Fluorene, Phenanthrene, Anthracene, Fluoranthene, Pyrene, Benz[a]anthracene, Chrysene, Benzo[b]fluoranthene, Benzo[k]fluoranthene, Benzo[a]pyrene, Dibenz[a,h]anthracene, Indeno[1,2,3-cd]pyrene, Benzo[g,h,i]perylene

n-: normal-

구는 거의 이루어지지 않았으나, 국립환경과학원에서 2011년 “미규제 실내공기 오염물질 관리방안 마련 연구(III)”를 통해 다중이용시설 실내공기 중 다환방향족 탄화수소 오염현황을 조사하고 건강위해성 평가를 수행하였다.

2.2. 시료채취

연구대상으로 선정된 도서관은 2009년 지상 4층, 연면적 10,000 m³ 규모로 개관되었으며, 이용자와 근무자들로부터 두통과 냄새 등의 민원이 지속적으로 제기되었다. 본 연구진은 이러한 민원이 실내공기질과 관련 있을 것으로 판단하여, 2011년 4월에 시료를 채취하였다. 비록 도서관 개관과 동시에 시료를 채취하지 않고 개관 2년 후에 채취했지만, 도서관 내 각종 사무기와 도서 배치, 내부 칸막이 공사, 계단 카펫 공사 등이 개관 이후 2년 이상 지속되었기 때문에 새집 증후군이 충분히 의심되는 시점이었다. 시료채취는 도서

관 8개 지점(층별로 2개)에서 이루어졌다(Fig. 1). 1층에 위치한 대강의실(F1-1)과 슈퍼컴퓨터실(F1-2)은 밀폐공간으로서 사용빈도가 낮으며, 나머지 여섯 지점은 2~4층에 위치한다(2~3층: 열람실, 4층: 단행본 자료실). 2~4층 공간은 층별 구분은 있지만 전체적으로 개방된 공간으로서 하루에 두 번 중앙제어 방식으로 환기가 이루어진다(Table 2).

휘발성유기화합물과 포름알데히드의 시료채취는 실내공기질공정시험방법에 준하여 실시되었다. 휘발성유기화합물은 휴대용 펌프(MP-Σ30, Sibata, Japan)를 바닥으로부터 1.2~1.5 m 높이에 설치하고 흡착관을 연결하여 100 mL/min의 유량으로 30분 동안 연속 2회 채취하였다. 포름알데히드는 350 mg의 2,4-Dinitrophenylhydrazine(DNPH)로 코팅된 실리카가 충전된 카트리지(TS-300, Top Trading Eng, Korea)에 폴리프로필렌 튜브(1 cm × 4 cm)를 연결하여 채취하였다. 시료채취 시 펌프(MP-Σ100H, Sibata, Japan)는 바닥으로부터

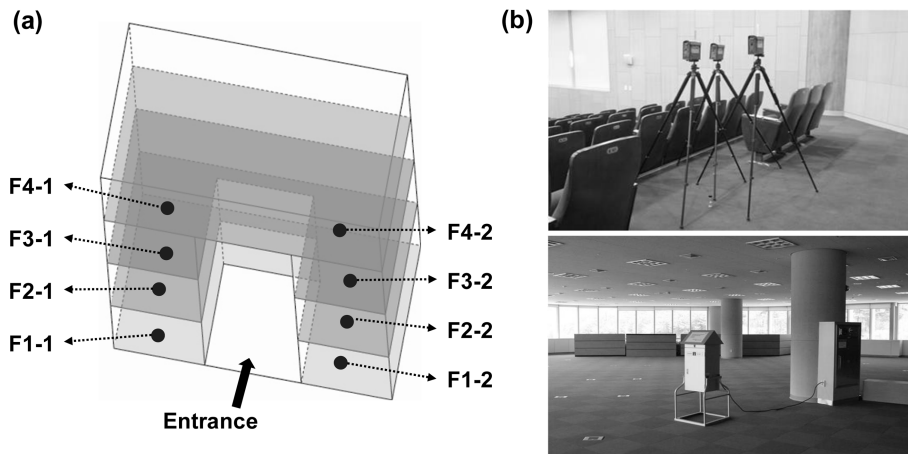


Fig. 1. Locations of sampling sites in a new library (a) and sampling photos (b).

Table 2. Description of the sampling sites

Sites	Utilization	Ventilation	Furniture and Equipment	Bottom material
F1-1	Auditorium	Irregularly	Table, Chair, Rostrum	Concrete, Carpet, Plywood
F1-2	Supercomputer room	Irregularly	Supercomputer, Thermo-hygrostat	Concrete
F2-1	Learning commons	2 times/day	Table, Chair	Concrete, Carpet
F2-2	Learning commons	2 times/day	Table, Chair, Computer	Concrete, Carpet
F3-1	Learning commons	2 times/day	Table, Chair, Computer	Concrete, Carpet
F3-2	Learning commons	2 times/day	Table, Chair, Computer	Concrete, Carpet
F4-1	Monograph and multimedia collection room	2 times/day	Table, Chair	Concrete, Carpet
F4-2	Monograph and multimedia collection room	2 times/day	Table, Chair, Computer, Bookshelf, Books	Concrete, Carpet

터 1.2~1.5 m 높이에 설치하였고, 500 mL/min의 유량으로 30분 동안 채취하였다.

다환방향족탄화수소는 고용량대기채취기(HV-700F, Sibata, Japan)를 이용하여 24시간 동안 700 L/min의 유량으로 채취하였다. 실내공기를 채취할 때, 시료부피가 실내공간의 부피보다 크다면 공기가 희석되어 오염물질 농도가 과소평가될 가능성이 있다. 그러나 본 연구의 시료채취 지점은 시료부피(1,008 m³)보다 충분히 큰 공간에 위치했으므로, 이러한 문제는 발생하지 않았다. 폴리우레탄폼(Polyurethane foam: PUF) 디스크는 사용 전 아세톤과 헥산으로 각각 30분 동안 초음파 세척하였으며, 유리섬유필터(Glass fiber filter: GFF)는 130°C에서 4시간 이상 건조 후 사용하였다.

2.3. 시료분석

본 연구에서는 실내공기질공정시험방법에 준하여 휘발성유기화합물과 포름알데히드를 분석하였으며, 다환방향족탄화수소의 분석을 위해서는 대기오염공정시험방법을 따랐다(정제조건 일부변경).

휘발성유기화합물의 분석을 위해 자동열탈착장치(Ultra/Unity Series 2, Markes, UK)가 모세관 컬럼(Rtx-1: 60 m×0.32 mm×3.0 μm, Restek, USA)에 연결된 가스크로마토그래프/질량분석기(GC/MS: Agilent 6890N/5973i, USA)를 사용하였다. 정량을 위해 액상표준물질(Supelco 47537-U, USA)을 흡착관에 함침하여 표준물질시료를 만들어 기기분석 후 검량선을 작성하였다. 이동기체(He)는 1.4 mL/min 속도로 흘려주었으며, 오븐온도 프로그램은 다음과 같았다: 40°C (5 min) → 120°C (4°C/min) → 170°C (3°C/min) → 250°C (20°C/min, 18 min). 질량분석기는 이온충격(70 eV) 모드를 사용하였으며, 이온소스의 온도는 230°C였고 스캔모드(Scan mode)로 분석하였다.

포름알데히드 분석을 위해 포름알데히드-DNPH 유도체를 아세트나이트릴 5 mL로 추출하여 고성능액체크로마토그래프(HPLC: Shimadzu LC-20AD, Japan)에 주입하였다. DNPH 유도체는 자외선 영역에서 흡광성이 있으며 350~380 nm에서 최대의 감도를 가지므로, 자외선 검출기의 파장을 360 nm에 고정시켜 분석하였다. 고정상으로 C18 컬럼(Symmetry C18: 4.6 mm×150 mm, Waters, USA)을 사용하였고, 이동상으로는 1 mL/min의 유량으로 아세트나이트릴:물(60:40) 혼합용매를 사용하였다. 포름알데히드 정량을 위해 액상표준시료(Formaldehyde-DNPH, Supelco 47177)를 시료농

도에 맞게 희석하여 검량선을 작성하였으며, 시료 주입량은 20 μL였다.

다환방향족탄화수소 추출을 위해 PUF와 GFF를 속실렛에 넣고 헥산:아세톤(9:1) 혼합용매로 16시간 동안 추출하였다. 추출 전에 대체표준물질(Surrogate standards: Naphthalene-d₈, Acenaphthene-d₁₀, Phenanthrene-d₁₀, Chrysene-d₁₂, and Perylene-d₁₂)을 시료에 주입하였다. 추출용매는 회전증발농축기(Hei-VAP Advantage, Heidolph, Germany)를 이용하여 150 mL까지 농축시킨 후, 질소농축기(MGS-2200, Eyla, Japan)를 이용하여 10 mL로 농축하였다. 600°C에서 2시간 활성화시킨 실리카겔 5g과 무수황산나트륨 1g을 컬럼에 충전시킨 후, 농축된 시료(10 mL 중 2 mL)를 주입하였다. 1차 분획으로 헥산 10 mL를 용출하여 버리고, 2차 분획으로 10% 다이클로로메탄/헥산(1:9) 혼합용매 70 mL를 용출시켰다. 이 용출액을 질소농축기를 이용하여 1 mL로 농축하고 내부표준물질(Internal standard: *p*-Terphenyl-d₁₄)을 주입한 후 GC/MS(Agilent 7890N/5975i, USA)를 이용하여 분석하였다. 이동기체(He)는 1.0 mL/min 속도로 흘려주었으며 컬럼은 DB-5MS (30 m×0.25 mm×0.25 μm, Agilent, USA)를 사용하였다. 오븐온도 프로그램은 다음과 같았다: 50°C (1 min, 10°C/min) → 300°C (5 min). 질량분석기는 이온충격(70 eV) 모드를 사용하였으며, 이온소스 온도는 200°C였고 선택이온모니터링(SIM) 방법으로 분석하였다.

실험과정 중의 오염을 최소화하기 위해 모든 유리기구는 헥산과 아세톤으로 세척한 후 60°C에서 건조하여 사용하였으며, 유리기구와 추출액은 공기 노출을 최소화하였다. 다환방향족탄화수소의 기체상 시료(PUF)와 입자상 시료(GFF) 회수율은 각각 66.9~94.7%, 81.0~101.2%였으며, 개별물질 농도는 회수율로 보정되었다. 실험과정에서 발생할 수 있는 오염을 확인하기 위하여 바탕시료를 분석하였고, 바탕시료에서 검출된 일부 물질에 대해서는 분석값을 보정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 설문조사 결과

시료채취 당일에 도서관 열람실 이용자들에게 실내공기질에 대한 의견과 증상 등에 대한 설문지를 배포하였다. 설문 대상자 42명의 평균 연령은 21세로 남녀 응답자 비율은 각각 64%, 36%였다. 이용빈도는 주 3

회 이상이 74%였으며, 1회 평균이용시간은 한 시간 이상이 98%였다. 도서관 이용자들은 오랜 시간 실내에 머무르므로 오염물질 농도가 낮을지라도 장기 노출될 가능성이 있다. 응답자의 52%가 설문지 주관식 의견란에 “환기가 잘 되지 않는다”라고 답하여 1일 2회 이루어지는 중앙식 환기가 충분하지 않음을 알 수 있었다. 이 외에도 “실내온도가 적절하지 않다(13%), 건조하다(12%)” 등의 의견도 있었으며, “두통이 유발된다(10%), 눈과 목이 따갑다(16%)” 등의 의견도 있었다(중복의견 포함). 이러한 설문을 통해, 도서관 실내에서 환기가 충분하지 못하여 이용자들이 불편을 겪고 있으며, 새집 증후군과 관련된 증상이 나타나는 것을 확인하였다.

3.2. 농도수준

3.2.1. 휘발성유기화합물과 포름알데히드

휘발성유기화합물은 0.2 mg/m³ 이상의 농도에서 자극이나 불쾌감을 유발하며, 25 mg/m³ 이상에서는 인체 독성이 있을 수 있다.²⁾ 국내 다중이용시설 실내공기질 권고기준은 500 µg/m³으로,¹³⁾ 기존 다중이용시설과 신축시설 모두 동일하게 적용된다. 따라서 신축건물의 경우에는 보다 강화된 기준치가 필요한 것으로 판단된다. 또한 환경부에서는 신축 공동주택에 대하여 새집 증후군 원인물질 6종의 권고기준(벤젠: 30 µg/m³, 톨루엔: 1,000 µg/m³, 에틸벤젠: 360 µg/m³, 자일렌: 700 µg/m³, 스티렌: 300 µg/m³ 이하)을 정하였다.¹³⁾ 본 연구에서 휘발성유기화합물의 농도수준은 41~90 µg/m³ (평균 59 µg/m³)으로 다중이용시설 실내공기질 기준과 신축 공동주택 실내공기질 권고기준 모두를 만족하였다(Table 3). 또한 국내 다른 다중이용시설에서의 휘발성유기화합물 개별농도와 비교할 때, 비슷하거나 낮은

Table 3. Concentrations of VOCs and HCHO at each sampling site (µg/m³)

Compounds	F1-1	F1-2	F2-1	F2-2	F3-1	F3-2	F4-1	F4-2
Acetone	9.14	7.12	5.40	7.36	4.10	5.10	5.08	5.48
2-Propanol	2.01	N.D	N.D	0.81	N.D	N.D	N.D	N.D
2-Butanone	N.D	1.30	3.35	2.43	2.14	1.14	0.90	1.98
Ethyl acetate	N.D	N.D	N.D	0.81	N.D	N.D	N.D	N.D
Hexane	4.58	1.05	1.10	1.57	1.58	0.82	0.82	1.69
n-Butanol	N.D	8.66	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Benzene	3.17	2.13	2.26	1.77	1.82	1.90	1.86	1.62
4-Methyl-2-Pentanone	N.D	N.D	1.62	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Toluene	10.8	17.4	15.3	9.36	31.8	24.1	17.3	26.9
Ethylbenzene	2.87	12.7	1.46	1.15	1.43	1.35	1.57	2.54
mp-Xylene	3.24	15.0	2.43	1.80	2.03	1.97	1.68	2.52
Styrene	1.26	1.97	2.15	0.59	1.33	0.55	0.75	1.64
o-Xylene	0.91	6.13	0.99	0.76	0.93	0.85	0.67	1.04
mp-Ethyltoluene	N.D	1.49	0.25	N.D	N.D	0.64	N.D	0.27
1,3,5-Trimethylbenzene	N.D	0.69	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
2-Ethyltoluene	N.D	0.26	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
1,2,4-Trimethylbenzene	N.D	1.84	0.48	N.D	0.75	0.77	0.28	0.77
1,2,3-Trimethylbenzene	N.D	0.29	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Nonanal	40.9	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-Undecane	4.23	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
Decanal	4.14	3.29	6.17	10.5	6.93	5.41	3.10	5.15
n-Dodecane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	0.71	2.16	N.D
n-Tridecane	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-Tetradecane	N.D	1.07	2.24	2.13	2.64	2.36	1.91	2.61
n-Pentadecane	2.40	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
n-Hexadecane	N.D	3.80	N.D	1.33	1.65	2.27	3.13	4.37
Total VOCs (Σ ₄₈ VOCs)	89.6	86.2	45.2	42.4	59.1	49.9	41.2	58.5
HCHO	124	21	30	17	23	31	19	34

*Twenty two compounds are not reported in this table because they were not detected at all the sampling sites.

수준이었다.^{9,10,12)}

분석대상 휘발성유기화합물 48종(Table 1) 중에서 26종이 검출되었다(Table 3). 실내공기질 연구에서 주로 검출되는 9종(아세톤, 헥산, 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, meta-, para-자일렌, 스티렌, ortho-자일렌, 데카날)이 모든 지점에서 검출되었다. F1-1 지점에서 가장 높은 휘발성유기화합물 농도를 나타냈으며(89.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 주요 9종보다 노나날(Nonanal) 성분이 최고농도(40.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 검출되었다. 노나날은 합판과 같은 실내 건축물 재료에서 배출되는 것으로 알려졌다.²⁶⁾ 다른 지점의 바닥 전체는 카펫으로 깔려져 있으나, F1-1 지점에는 코팅된 나무재질의 단상과 합판재질의 책걸상이 있으며, 여기에서 노나날이 배출된 것으로 판단된다. F2-2 지점에서는 데카날(Decanal)이 다른 지점에 비해 두 배 정도 높은 농도로 검출되었다. 데카날 역시 건축재료와 페인트 생산에 사용된다.¹¹⁾ 나머지 지점에서는 톨루엔이 가장 높은 농도로 검출되었다.

포름알데히드는 1 ppm 이하에서 코, 눈, 목의 자극 증상을 유발하고, 50 ppm 이상에서 폐렴과 구토 등을 유발하며 심하면 사망에 이르게 한다.²⁾ 국내 다중이용 시설 실내공기질 권고기준은 100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이며 신축 공동주택 실내공기질 권고기준은 210 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이다.¹³⁾ 휘발성 유기화합물의 반감기는 수 시간에서 수 일 정도이지만, 포름알데히드의 반감기는 4.2년이므로¹²⁾ 신축건물의 경

우에는 포름알데히드에 대해서 특별히 관심을 가져야 한다. 국내 다중이용시설에서의 포름알데히드 농도를 살펴보면, 리모델링 후 도서관에서의 농도가 7.5~25.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,¹⁸⁾ 고등학교 교실에서 11 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로서⁷⁾ 본 연구와 비슷한 수준을 보였으나, 일부 도서관에서는 120 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하였다.¹⁴⁾ 본 연구의 포름알데히드 농도수준은 17~124 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (평균 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)로 나타났으며, F1-1 지점에서 다중이용시설 실내공기질 권고기준(100 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)을 초과하였다(Table 3). F1-1 지점은 심포지엄 등이 개최되는 대강의실로서 사용빈도가 낮고 사용 직전에 환기를 한다. 또한 의자와 소음벽 등 실내자재들이 다른 지점들과 매우 다르므로, 노나날과 마찬가지로 포름알데히드가 가장 고농도로 검출된 것으로 판단된다.

3.2.2. 다환방향족탄화수소

본 연구에서는 EPA 우선관리 대상물질 16종 중에서 15종이 검출되었으며, 나프탈렌, 페난트렌, 플루오렌, 아세나프테인이 가장 고농도로 검출되었다(Table 4). 이러한 물질들 대부분은 기체상으로 존재하였다(기체상: 17~94 ng/m^3 , 입자상: 0.4~2.1 ng/m^3). 즉, 신축 도서관에서는 대부분의 다환방향족탄화수소가 기체상으로 배출되어, 일부가 입자상으로 분배되는 것으로 보인다. F1-2 지점에서 가장 고농도 다환방향족탄화수소가 검출되었는데 (94.7 ng/m^3), 99% 이상이 기체상에서 검출되었다(Fig.

Table 4. Total (gas + particle) concentrations of PAHs at each sampling site (ng/m^3)

Compounds	F1-1	F1-2	F2-1	F2-2*	F3-1	F3-2	F4-1	F4-2
Naphthalene	11.1	26.3	9.96	-	4.04	12.6	5.12	5.90
Acenaphthalene	0.54	1.53	0.31	-	0.22	0.30	0.26	0.19
Acenaphthene	4.53	6.49	4.93	-	2.55	2.54	2.09	2.36
Fluorene	9.48	23.4	6.23	-	4.78	4.45	3.91	4.04
Phenanthrene	11.0	28.4	6.77	-	5.24	6.55	3.87	5.01
Anthracene	0.57	2.69	0.43	-	0.44	0.64	0.44	0.59
Fluoranthene	2.61	3.78	1.51	-	1.90	1.72	1.60	1.41
Pyrene	1.84	2.20	1.08	-	1.62	1.35	1.35	1.32
Benz[a]anthracene	0.10	0.03	0.05	-	0.06	0.05	0.07	0.04
Chrysene	0.18	N.D	0.14	-	0.10	0.11	0.22	0.08
Benzo[b]fluoranthene	0.30	N.D	0.18	-	0.11	0.15	0.27	0.10
Benzo[k]fluoranthene	0.09	N.D	0.06	-	N.D	N.D	0.08	N.D
Benzo[a]pyrene	0.12	N.D	0.06	-	0.04	0.06	0.09	0.03
Indeno[1,2,3-cd]pyrene	0.14	N.D	0.04	-	N.D	0.06	N.D	N.D
Dibenz[a,h]anthracene	N.D	N.D	N.D	-	N.D	N.D	N.D	N.D
Benzo[g,h,i]perylene	0.17	0.02	0.10	-	0.05	0.07	0.10	0.05
Total PAHs (Σ_{16} PAHs)	42.8	94.7	31.8	-	21.1	30.7	19.5	21.1

*The sample at F2-2 was not collected because of complaint about the noise of high volume air sampling.

2). 이 지점은 평소 일반인에게는 개방되지 않는 슈퍼 컴퓨터실로서 향온습습시설이 설치되어 있으며, 밀폐공간에서 지속적인 향온습습시설 가동으로 인해 기체상 물질의 농도가 높게 나타난 것으로 판단된다. 또한 슈퍼 컴퓨터 자체가 배출원일 가능성이 크다. 컴퓨터에 장착된 플라스틱 회로기판이 가열되면서 다환방향족탄화수소가 배출될 수 있기 때문이다.²⁷⁾ 3~4층 지점에서는 20~31 ng/m³ 수준으로 비슷하게 나타났으나, F4-1 지점에서 가장 고농도의 입자상 농도(2.1 ng/m³)가 검출되었다. F4-1 지점은 단행본 열람실로서 책 보관에 사용되는 기자재, 자동 대출장치, 컴퓨터 등이 오염원일 가능성이 있다. 향후, 실내 사무용품과 각종 장비들이 실제로 다환방향족탄화수소를 배출하는지 확인할 필요가 있다.

그동안 국내 다중이용시설에서 다환방향족탄화수소 오염연구는 매우 미흡하며, 실내공기질 기준이 마련되지 않았으므로 기존 국내 연구들과 본 연구의 농도수준을 비교·평가하기 어려웠다. 향후 다중이용시설에서 다환방향족탄화수소에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

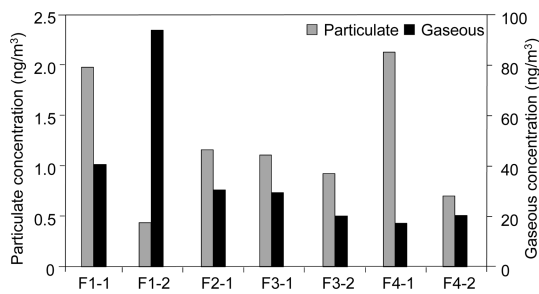


Fig. 2. Concentrations of particulate and gaseous Σ₁₆ PAHs at each sampling site.

3.3. 공간적 분포

신축 도서관의 실내공기오염물질 분포를 파악하기 위해 물질별 총농도 분포도를 작성하였다(Fig. 3). 위에서 언급한 바와 같이, 환기가 잘 이루어지지 않는 1층의 시료채취 지점들에서 모든 항목이 높은 농도를 나타냈다. 특히 F1-1과 F1-2 지점은 이용빈도가 낮은 밀폐공간으로, F1-1 (대강의실)에서 포름알데히드가 다른 지점에 비해 7배 이상 높은 농도를 나타내었다. 포름알데히드는 단열재, 합판, 가구 접착제 등에 사용되며 방출량이 시간에 비례하여 감소하는 것으로 알려져 있으므로,¹⁹⁾ 실내공기 중 농도는 시간이 지남에 따라 감소할 것으로 예상된다. 다환방향족탄화수소의 경우, F1-2(슈퍼컴퓨터실)에서 다른 지점에 비해 2~4배 이상 높은 농도를 나타내었다. 이와 같이, 정기적으로 환기가 이루어지는 2~4층 공간과 다소 밀폐된 1층 공간의 농도 차이를 확인하였다.

한편, 2~4층에서는 같은 층이라도 측정지점에 따라 농도가 다른 것으로 나타났다. 2, 3층에서는 열람실 이용자가 많은 지점에서 휘발성유기화합물과 다환방향족탄화수소 농도가 낮았다. 이 결과는 이용자들의 잦은 이동과 환기에 따른 희석효과로 판단된다. 4층 단행본 열람실에서는 책이 진열된 지점에서 휘발성유기화합물과 포름알데히드가 고농도로 검출되었는데, 이는 책꽂이와 책에 사용된 다양한 접착제 때문으로 판단된다.

미국 냉난방공조학회(American society of heating, refrigeration and air-conditioning engineers: ASHRAE)의 『ASHRAE Standard 62 1989』²⁸⁾와 국내 『다중이용시설 등의 실내공기질관리법』¹³⁾에는 먼지, 일산화탄소, 이산화탄소의 농도를 규제치 이하로 유지하는 환기 규정이 있다. 본 연구에 따르면 같은 신축건물 내부 공

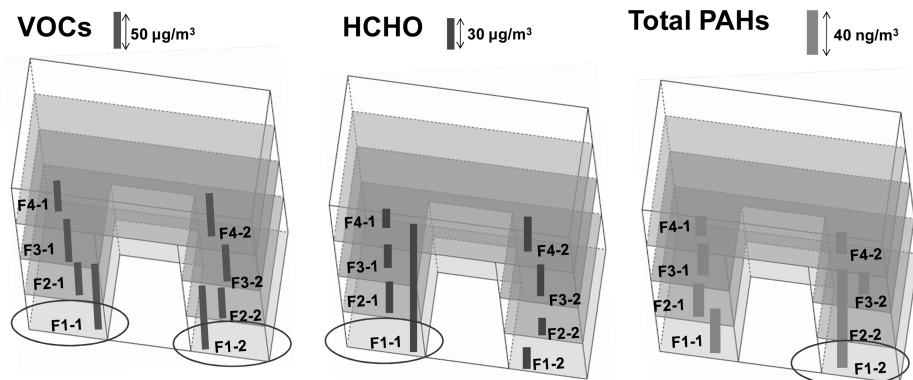


Fig. 3. Spatial distribution of VOC, HCHO, and PAH concentrations.

간일지라도 환기 여부와 정도에 따라 실내오염물질 농도는 확연한 차이를 나타내므로, 주기적이고 충분한 환기를 통해 신축건물에서 실내오염을 저감할 수 있을 것이다.

4. 결 론

2009년 준공된 신축 도서관에서 휘발성유기화합물, 포름알데히드, 다환방향족탄화수소의 농도수준과 지점별 분포를 조사한 결과, 정기적으로 환기가 이루어지는 장소에 비해 환기가 부족한 곳에서 높은 농도로 검출되었다. 신축 다중이용시설은 기존 시설보다 밀폐도가 높으며 중앙시스템으로 환기를 제어하는 경우가 많다. 따라서 개별 환기가 불가능한 곳이 많으므로 이용자 건강을 고려하여 환기에 관심을 가져야 한다. 특히 새집 증후군의 주요물질로 알려진 포름알데히드가 다중이용시설 실내공기질 기준을 초과하였으므로, 이에 대한 적절한 대책이 요구된다. 다환방향족탄화수소의 실내오염에 대한 연구는 국내에서 많이 이루어지지 않았으며, 다중이용시설 실내공기질 기준도 없으므로, 향후 지속적인 연구가 필요하다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었습니다(No. 2010-0003424, No. 2010-0026716).

참고문헌

1. 환경부, 2002. 실내공간 실내공기오염 특성 및 관리방법 연구.
2. 경기개발연구원, 2007. 다중이용시설 실내공기질 관리방안.
3. WHO, 2002. The world health report, Reducing risks promoting healthy life.
4. 환경부, 2007. 한국 노출지수 개발 및 운영체계 구축.
5. 박현구, 이재홍, 고성석, *대한건축학회지*, 2005, 21, 97-104.
6. 윤동원, *살비저널*, 2002, 31, 23-31.
7. 손종렬, 노영만, 손부순, *한국환경보건학회지*, 2006, 32, 140-148.
8. 이정재, 김석근, 최석용, *대한건축학회지*, 2005, 21, 175-182.
9. 고연정, 김신도, 박숙영, 장성기, *한국환경보건학회지*, 2009, 35, 75-85.
10. 노영만, 이철민, 김윤신, 김석원, 김치년, 김현욱, 조기홍, 최호준, 김정만, *한국산업위생학회지*, 2006, 16, 54-67.
11. 류인철. 다중이용시설 실내공기질 특성 및 건강위해성 평가에 대한 연구. 부경대학교 공학박사학위논문, 2010.
12. 서울시정개발연구원, 2004. 서울시 다중이용시설의 실내공기질 실태조사 및 관리방안에 대한 연구.
13. 환경부, 2008. 다중이용시설 등의 실내공기질관리법.
14. 이경준, 김태우, 홍원화, *한국생태환경건축학회지*, 2008, 8, 249-254.
15. 차승현, 김강수, *한국생태환경건축학회지*, 2009, 9, 35-40.
16. 신은상, 김종오, 홍중순, 황상용, *동남보건대학 논문집*, 2002, 20, 521-533.
17. 이종렬, 정광섭, 김영일, *대한설비공학학회지*, 2010, 46-52.
18. 박진철, 최두성, 김동영, *한국생활환경학회지*, 2010, 17, 628-633.
19. 김상식, *대한건축학회*, 2009, 25, 301-309.
20. 김상식, 류기정, *대한건축학회지*, 2008, 24.
21. United Nations, 2004. Handbook for the 1979 convention on long-range transboundary air pollution and its protocols Geneva, Switzerland.
22. C. Li, J. Fu, G. Sheng, X. Bi, Y. Hao, X. Wang, B. Mai, *Building and Environment*, 2005, 40, 329-341.
23. A. Bhargava, R. N. Khanna, S. K. Bhargava, S. Kumar, *Atmospheric Environment*, 2004, 38, 4761-4767.
24. D. Castro, K. Slezakova, C. Delerue-Matos, M. d. C. Alvim-Ferraz, S. Morais, M. d. C. Pereira, *Atmospheric Environment*, 2011, 45, 1799-1808.
25. International agency for research on cancer, 2006. Polynuclear aromatic compounds, part 4: Bitumens, coal-tar and derived products, shale-oils and soots.
26. J. Guo, Y. Jiang, X. Hu, Z. Xu, *Environmental Science and Technology*, 2012, 46, 1028-34.
27. Y. Ren, T. Cheng, J. Chen, *Atmospheric Environment*, 2006, 40, 6956-6965.
28. ASHRAE, 2001. ASHRAE Standard 62-2001.