

대학 도서관 건물 리모델링에 따른 실내공기질 영향 평가

Impact Assessment of Remodeling Works on Indoor Air Quality in a University Library Building

백성옥* · 박대권 · 박선영 · 이여진
영남대학교 건설환경공학부
(2006년 5월 4일 접수, 2006년 9월 19일 채택)

Sung-Ok Baek*, Dae-Gwon Park, Sun-Young Pak and Yeo-Jin Lee
School of Civil and Environmental Engineering, Yeungnam University

(Received 4 May 2006, accepted 19 September 2006)

Abstract

Recently, there have been a large number of remodeling (or renovation) works in old buildings in urban areas. Compared to new buildings, environmental risk might be more significant in such buildings where remodeling works are going on, since some parts of the building may still be in service for people. This study was carried out to investigate the impacts of remodeling works on the indoor air quality (IAQ) of a large building (a 22 stories university library). Indoor air monitoring was conducted during and after the remodeling works every two weeks for a one year period, and target compounds included BTEX, styrene, TVOC, carbonyl compounds such as formaldehyde and acetaldehyde, CO, CO₂, PM₁₀, and PM_{2.5}. Overall, the IAQ appeared to be recovered within two months after the remodeling works. However, in some places, concentrations of formaldehyde, toluene, xylene, and ethylbenzene showed higher levels even after works than those during the works. The results indicate that painting, glues and office furnitures are major sources of aromatic VOCs and formaldehyde. Therefore, in order to decrease the concentrations of toxic VOCs, the use of environmental-friendly building materials is strongly recommended during the remodeling works. In addition, IAQ control and management scheme (for example, baking the inside of the building) should be taken into consideration before reopening the buildings.

Key words : Remodeling works, Library, IAQ, TVOC, Carbonyl compounds

1. 서 론

최근 경제수준의 향상으로 인한 다양한 생활용품의 사용은 예상치 못한 오염물질의 방출을 촉진시켜

실내공간에서 생활하는 거주자들에게 '새집증후군 (Sick House Syndrome)' 및 '화학물질과민증 (Multi-Chemical Sensitivity)' 등이 주요 사회문제로 대두되고 있다(김강석 등, 2001). 이에 환경부는 실내 공기 오염에 대한 대책 마련에 중점을 두어 『다중 이용 시설 등의 실내 공기질 관리법』의 시행 및 다양한 정책을 도입하고 적극적인 관리 대책을 추진하고 있

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)53-810-2544, E-mail : soback@yu.ac.kr

다(정부 관계부처 합동, 2004). 환경부에서 규정한 다중이용시설에는 도서관과 같이 불특정 다수가 많이 이용하는 시설들이 포함되어 있다.

생활 여건의 변화와 함께 보다 나은 삶의 질에 대한 사람들의 욕구는 사회 곳곳에서 노후 건물에 대한 재건축 혹은 시설개선 등의 요구가 증대되어 소위 remodeling 혹은 renovation의 이름으로 많은 공사가 시행되고 있다. 이 같은 시설개선이 진행되는 건물 내에는 신축 건물과 크게 다를 바 없이 많은 종류의 건축자재와 내장재 및 각종 유기용제 등이 사용되므로 건물 이용자가 노출되는 실내공기에 큰 영향을 줄 수 있다. 더욱이 리모델링 공사가 진행되는 건물에서는 공사 중에도 일부 공간을 사용하는 경우가 많으므로 시설이 준공된 후 사용자가 입주하게 되는 신축 건물 보다 건물 이용자에게 더 큰 영향을 미칠 수도 있다. 그럼에도 불구하고 최근 규제의 동향은 신축 건물에 대해서는 매우 엄격하게 적용되는 반면, 기존 건물이나 재건축 건물에 대해서는 상대적으로 규제와 관리가 허술한 편이다.

실내에서 나타나는 휘발성 유기화합물(VOC) 및 카보닐 화합물의 발생원은 매우 다양하지만 특히, 건축물의 신축과 리모델링 과정에서 사용되는 건축자재에서 고농도로 방출되는 것으로 알려져 있으며(한국대기환경학회, 2004), 그 방출량은 건축 자재의 종류와 시공 후 경과 시간에 따라 차이가 있다. 특히 이러한 물질들은 오랜 시간동안 서서히 방출되는 경향이 있으므로 공사가 완료된 후에도 그 영향이 지속되게 된다. 이러한 측면에서 본 연구에서는 최근 대규모 개축과 증축 공사가 이루어진 대학 도서관 건물을 대상으로 공사 기간 중과 공사가 완료된 후의 일정기간 동안 주요 오염물질을 지속적으로 측정하여 실내공기질의 변동 양상을 파악하고자 하였다. 보다 구체적으로는 대학 도서관이라는 특수한 상황에서 리모델링 공사로 인하여 어떤 종류의 오염물질이 특별히 문제가 되는지, 그리고 공사가 완료된 후 어느 정도의 기간이 지나면서 정상적인 수준으로 회복되는 지에 대한 정보를 제공하고자 하였다.

2. 조사 및 측정방법

2.1 측정지점 및 기간

본 연구에서는 Y대학 중앙도서관 리모델링 현장

Table 1. Summary of a university library building investigated in this study.

Story	Area (m ²)	Reading seat	Remark
B1F	2,972	760	Lobby, Reading room
1F	4,757	300	Library, Reading room
2F	4,554	300	Library, Reading room
3F	4,554	300	Library, Reading room
4F	1,774	100	Library, Reading room
5F	447	-	Storage room
6~20F	635 each	-	Office, Storage room
21~22F	90 each	-	Penthouse
Total	28,763	-	

에서 시료를 채취하였다. 측정 지점은 도서관 건물 내의 9개 장소와 대조지점으로 실외의 1개소를 선정하였다. 도서관 건물의 각 층별 면적과 열람석 규모 등은 표 1에 나타내었다.

실내공기 시료의 채취는 지하 1층(주 출입문이 위치한 곳)의 로비와 제1열람실, 그리고 지상 1~4층에서는 각 층의 자료실에서 이루어 졌으며, 건물 내 도서관 이외의 용도로 사용되는 6층 이상의 공간에 대해서는 8층과 14층 및 20층의 복도에서 각각 시료를 채취하였다. 제1열람실은 사람들이 자유로이 공부하는 공간이며, 자료실은 책과 문헌들이 보관되어 있다. 8층, 14층 및 20층 복도는 아래쪽과 직선으로 연결된 계단과 인접하여 있으며 중앙에는 화장실과 엘리베이터가, 양쪽에는 소규모 사무실들이 위치해 있다. 8층과 14층 사무실에는 낮 동안에는 사람이 상주하고 있었으나 20층 사무실은 조사기간 중에는 계속 비어 있는 상태였다.

시료채취 기간은 2004년 5월 29일부터 2005년 5월 14일까지 1년의 기간에 걸쳐 매 2주 간격으로 토요일에 채취하였다. 공사 준공 시점(2005년 2월 중순 예정)에 인접한 기간 중에는 내부 정리와 이사 등의 현장 사정으로 인하여 약 10주간은 시료채취를 할 수 없었다. 결과적으로 본 연구에 수록된 자료들은 2004년 5월부터 12월까지의 공사가 진행 중에 측정한 결과(총 14회 측정)이며, 2005년 3월부터 5월까지의 공사가 완전히 종료된 후에 측정한 결과(총 6회의 측정)이다.

2.2 측정대상물질

측정 대상물질은 다중이용시설에 대한 실내공기질

Table 2. Target pollutants and measurement methods.

Pollutant	Sampling method	Analytical method
VOC	Adsorbent (Carbotrap) tube	Thermal desorption with GC/MS
Carbonyls	DNPH cartridge sampling	Solvent extraction and HPLC/UV
CO	Real-time monitoring	Electrochemical method
CO ₂	Real-time monitoring	NDIR method
PM ₁₀ /PM _{2.5}	Real-time monitoring	Light scattering method

유지 및 권고기준이 설정된 항목을 위주로 선정하였으며, VOC, 카보닐 화합물 및 일산화탄소와 이산화탄소, 그리고 미세먼지 (PM₁₀)과 초미세먼지 (PM_{2.5})를 대상으로 하였다. 측정 대상물질 별 측정 방법은 표 2에 요약하였다.

2. 2. 1 휘발성 유기화합물 (VOC)

본 연구에서 측정한 VOC는 실내공기질 권고기준이 설정되어 있는 벤젠, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 (o-, m-, p-), 스티렌 등 5개 항목과 Total VOC (이하 TVOC, 핵산에서 핵사데칸까지의 모든 VOC를 톨루엔의 농도로 환산하여 정량 함)를 포함하였다. 각 물질의 정량·정성 분석에 사용된 기체 상 표준혼합물질은 독성 휘발성 유기화합물 41종의 물질이 들어있는 Restek사의 휘발성 유기화합물 표준혼합시료 (공칭농도 1 ppm)를 사용하였다. 시료채취 용 매체로는 Carbotrap C 100 mg을 전단에, Carbotrap 300 mg을 후단에 충전한 스테인레스 스틸 흡착관 (1/4"×9 cm, Perkin Elmer, UK)을 사용하였다 (Bianchi and Varney, 1993). 모든 흡착관은 사용하기 전에 TC-20 (Thermal Conditioner, MARKERS, UK)을 이용하여 고 순도 헬륨가스가 분당 80 mL/min으로 흐르는 조건 하에서 350°C에서 전처리 (conditioning)하였다. 전처리를 마친 흡착관은 1/4인치 swagelok 타입의 마개와 PTFE 패럴로 막은 후, 다시 septum이 달린 마개가 있는 50 mL 바이알에 넣어서 4°C에서 보관하였다.

현장에서의 시료 채취는 미국 EPA TO-17 (USEPA, 1997)의 수순에 따라 휴대용 펌프 (Double take sampler, SKC, USA)를 이용하여 흡착관을 연결한 후 각 시료 당 약 200~250 mL/min의 유량으로 30분 동안 수행하였다. 시료 채취 시 흡착관을 통과하는 유량은 전자식 초미량 유량계 (Ultraflow Electro-

nic Calibrator, SKC Inc., USA)를 사용하여 현장에서 직접 측정하였다.

VOC의 농도 정량을 위한 표준 시료는 자체 제작한 가스 함침 장치를 이용하여 흡착관 통과 유량과 함침 시간을 조절하면서 적절한 양이 흡착되도록 하였다. VOC의 분석은 자동 열 탈착장치 (ATD-400, Perkin Elmer, UK)가 GC칼럼 (Rtx-1, 0.32 mm×105 m×1.50 μm)에 직접 연결된 GC/MS (HP6890/5973) 시스템을 사용하였다. VOC 시료 분석에 사용된 ATD-400과 GC/MS의 운전 조건 등은 기존 문헌에 보고된 바와 같다 (백성욱 등, 2003, 2002).

2. 2. 2 카보닐 화합물 측정방법

본 연구에서는 실내 환경 중 검출빈도가 높은 폼알데하이드, 아세트알데하이드, 아세톤 및 프로피온알데하이드의 총 4종의 카보닐 화합물을 측정하였다 (Sirju and Shepson, 1995). 시료 채취를 위하여 1 cm (i.d)×4 cm (total length)의 폴리프로필렌 튜브에 350 mg의 2,4-DNPH (디나이트로페놀하이드라진)가 코팅된 실리카가 충전된 카트리지 (Supelco Inc., LpDNPH S10L, U.S.A)를 사용하였다. 이때 유량조절장치가 부착된 시료채취용 펌프 (SKC Inc., Double Take Sampler, U.S.A)를 사용하였으며, 바닥으로부터 약 1.5 m의 높이에서 약 1 L/min의 유량으로 30분 동안 시료를 채취하여 총 공기 채취량이 대략 30 L가 되도록 하였다.

시료채취 중에는 공기 중 오존의 영향을 배제하기 위하여 1 cm (i.d)×4 cm (total length)의 테플론 튜브에 KI 결정을 채운 오존 스크리버를 DNPH-Silica 카트리지 앞에 장착하였으며, 채취된 시료는 용출 전까지 냉장 보관하였다. DNPH와 반응하여 형성된 카보닐-DNPH 유도체는 농축 바이알을 이용하여 아세트나이트릴 (HPLC 등급) 3 mL로 추출하였으며, 추출된 DNPH 유도체는 실내공기질 시험법에 따라 HPLC/UV 시스템을 이용하여 분석하였다.

2. 2. 3 일산화탄소 (CO)와 이산화탄소 (CO₂) 측정방법

일산화탄소와 이산화탄소는 두 기체를 동시에 측정하는 기기 (CMCD-10p, GASTEC, USA)를 사용하여 현장에서 직접 농도치를 기록하였다. 일산화탄소는 정전위전해식 센서로 측정되며, 이산화탄소는 가스가 제각기 고유한 적외선 파장을 흡수하는 성질을 이용하여 비분산형적외선흡수식 센서로 측정된다. 측

정 현장에서는 매 1분마다 농도를 기록하였으며, 측정시간 30분에 대하여 평균치를 계산하였다.

2.2.4 부유먼지 측정방법

미세먼지 (PM₁₀) 및 초미세먼지 (PM_{2.5})의 농도는 실시간 동시 측정이 가능한 Dust Mate (Turnkey Instruments Ltd., USA)를 이용하여 측정하였다. Dust Mate는 기기 내에 펌프가 내장되어 있으며, 불규칙적 미립자에 대해 레이저 빔을 이용한 광 산란 방식에 의해 측정된 결과를 중량 농도로 환산하여 나타내는 장치이다. 측정 data는 매 1분마다 logging되었으며, 30분 간격으로 평균농도를 산출하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 휘발성 유기화합물의 농도 변동

매 2주마다 1년의 기간에 걸쳐 측정된 VOC에 대한 각 지점별 측정 결과는 그림 1에 수록하였다. 그림에서 화살표로 표시된 구간은 공사 준공 전후에 현장 사정으로 측정이 이루어지지 못한 구간을 나타낸다. 따라서 화살표를 전후하여 공사 중과 공사 후에 대한 측정 결과로 구분할 수 있다. 한편, 측정된 결과를 공사 중과 공사 후로 구분하여 통계 처리한 결과는 표 3에 나타내었다. 본 연구에서는 BTEX와 스티렌 이외에도 1,4-디클로로벤젠도 분석하였다. 1,4-디클로로벤젠은 주로 방충제, 살충제, 방향제 등과 관련 있는 것으로 알려져 있으며, 다다미를 사용하는 일본의 일반적인 가정의 실내에서는 빈번히 검출된다고 알려져 있다(佐佐木裕价, 1998). 그러나 본 연구의 측정 결과에 의하면 1,4-디클로로벤젠은 실외는 물론 실내에서 한 번도 검출되지 않았다.

실내에서의 VOC 농도가 증가하는 주요 요인을 건축자재와 시공의 측면에서 나누어 생각해 보면, 복합적인 화학 물질을 사용하여 만든 건축자재의 사용과 시공 과정에서 사용하는 많은 양의 접착제 및 단열재(우레탄) 살포 등에 사용되는 발포제 등을 들 수 있다. 이러한 영향은 벤젠이나 톨루엔과 같은 VOC 개별 물질의 농도 경향을 살펴봄으로써 좀 더 확실히 알 수 있다.

3.1.1 벤젠 농도

그림 1에서 볼 수 있듯이, 벤젠 농도는 도서관 내

고층의 일부 지점을 제외하고는 대부분의 지점에서 공사 중과 공사 후에 측정된 결과가 크게 차이가 나지 않는 것을 알 수 있다. 더욱이 실내의 농도가 실외에서 측정된 농도와도 전반적으로 유사한 것을 알 수 있다. 이는 도서관 내에는 벤젠을 배출하는 특정한 발생원이 없기 때문인 것으로 보이며, 실외를 포함한 대부분 측정 지점에서 평균적으로 약 10 µg/m³ (약 3 ppb 수준) 이하의 수준을 나타내었다. 그러나 공사 기간 중인 2004년 10월 23일에 8층·14층·20층에서 벤젠의 농도가 각각 15 µg/m³, 16 µg/m³, 52 µg/m³으로 다른 층에 비해서는 매우 높게 나타났다. 이 날은 벤젠뿐만 아니라 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌 그리고 카보닐 화합물인 아세톤도 동시에 높은 농도를 나타내었다.

실내에서 벤젠은 세척 및 청소용품, 페인트 제거제 등에서 주로 발생하는 것으로 알려져 있다(WHO, 2000). 특이하게도 8층·14층·20층 복도에서만 이날 벤젠의 농도가 높았으며 하층부에서는 다른 날에 비해 벤젠의 농도가 오히려 더 낮았던 점으로 미루어 보아 일부 리모델링 작업이 끝난 상층부에서 바닥 청소 등으로 인한 일시적인 현상이라 생각된다. 상층부 중에서도 특히 20층에서 벤젠의 농도가 52 µg/m³으로 매우 높게 나타났는데, 이는 벤젠이 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발됨으로 8층과 14층에서 발생된 벤젠이 계단을 타고 20층까지 올라가 20층에서 발생된 벤젠과 합쳐진 후 실외로 빠져나가지 못하고 20층에 머무르면서 나타난 결과라 생각된다. 20층의 경우 8층이나 14층과 달리 입주한 사무실이 없었기 때문에 환기가 일어날 수 있는 경우(예를 들어, 사람이 창문 등을 열어 자연 환기를 시킴.) 또한 매우 줄어들었다고 할 수 있다. 그러나 공사 완료된 후에는 8층·14층·20층 또한 다른 시료 채취 지점과 마찬가지로 벤젠의 농도가 약 6 µg/m³ 이하의 평상시 수준으로 회복되고 있음을 알 수 있다.

3.1.2 톨루엔 농도

실내에서 톨루엔의 경우 주로 페인트, 바닥용 왁스, 니스, 등유용 난방기구, 벽지, 코킹 및 실런트 제품에서 많이 발생한다. 그림 1에 의하면 톨루엔의 농도는 벤젠에 비해 농도 변동 폭이 클 뿐만 아니라 농도 또한 높게 검출되어, 톨루엔이 단시간에 고농도의 농도 분포를 가능하게 하는 배출원으로부터 검출

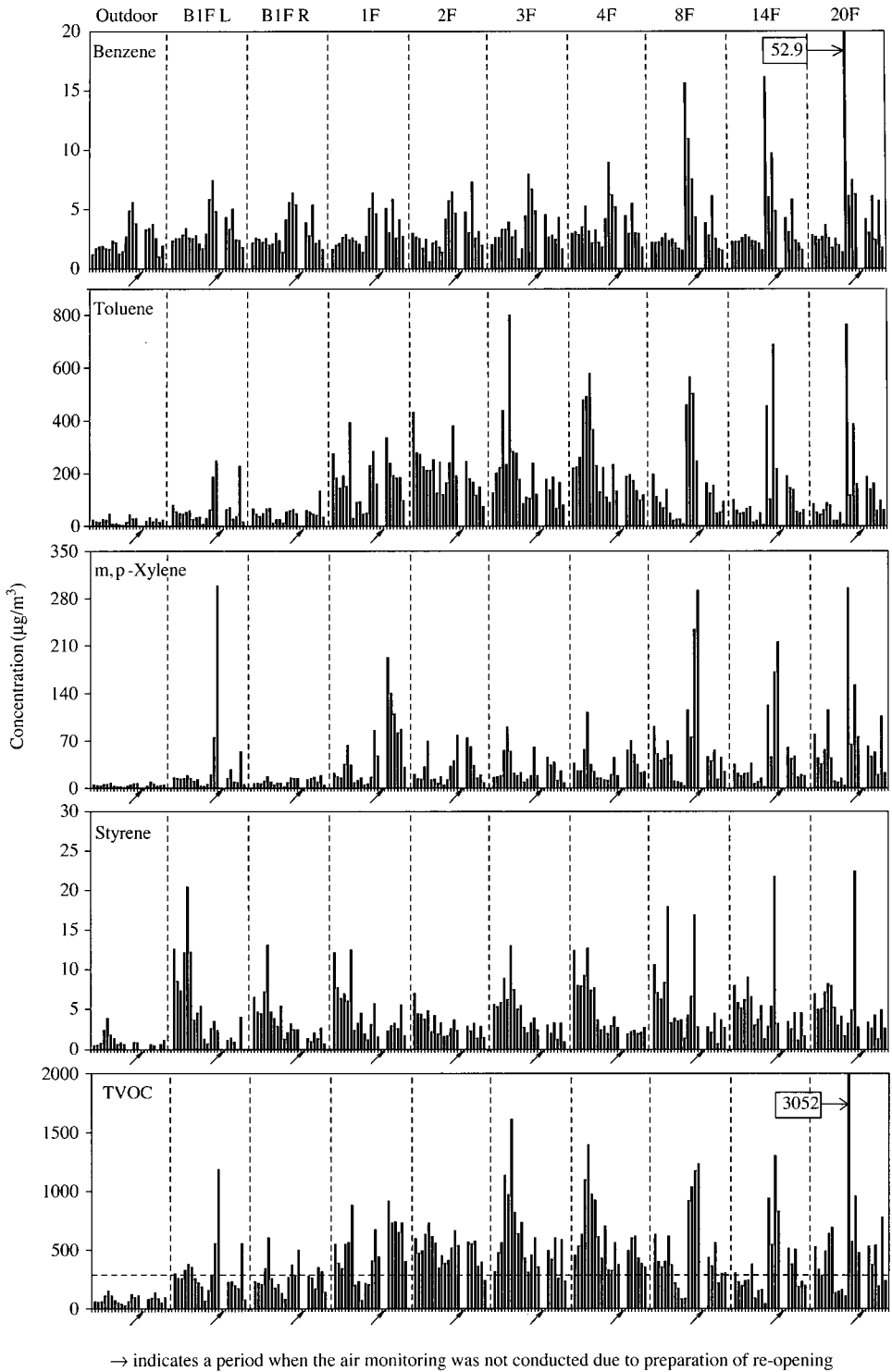


Fig. 1. Variations of VOC concentrations during and after the remodeling works in a university library.

Table 3. Summary of VOC concentrations (mean±s.d. in µg/m³) during and after the remodeling works in a university library.

	Sampling period	Benzene	Toluene	Ethylbenzene	m, p-Xylene	o-Xylene	Styrene	TVOC
Outdoor	During (D)	2.4±1.4	20.4±13.2	2.8±1.6	4.1±2.0	1.4±0.7	1.3±1.0	80±36
	After (A)	2.7±1.0	21.7±6.8	3.2±1.1	4.9±2.4	1.2±0.7	0.7±0.3	89±27
	Ratio (D/A)	0.9	0.9	0.9	0.8	1.1	1.7	0.9
B1F L	During (D)	3.3±1.6	68.6±66.7	26.9±45.9	37.0±77.4	12.2±27.2	6.9±5.6	341±268
	After (A)	3.2±1.3	73.1±78.6	16.4±17.5	19.7±18.7	5.8±6.8	1.9±1.4	241±164
	Ratio (D/A)	1.0	0.9	1.6	1.9	2.1	3.7	1.4
B1F R	During (D)	3.2±1.6	44.4±19.8	5.9±3.1	9.1±4.5	3.0±1.4	4.5±3.0	276±141
	After (A)	3.0±1.4	61.0±35.9	9.7±4.8	12.1±5.1	3.1±1.8	1.5±0.7	252±83
	Ratio (D/A)	1.0	0.7	0.6	0.8	1.0	3.0	1.1
1F	During (D)	2.9±1.4	165.3±104.3	25.2±25.8	27.0±23.7	8.2±6.2	5.3±3.6	408±221
	After (A)	3.9±1.4	205.2±78.9	112.3±55.1	107.2±55.4	30.9±13.9	3.0±1.3	695±168
	Ratio (D/A)	0.7	0.8	0.2	0.3	0.3	1.8	0.6
2F	During (D)	3.0±1.7	238.9±86.5	22.3±18.9	25.9±22.7	7.7±5.4	3.4±1.5	529±111
	After (A)	3.8±2.0	154.7±58.3	30.1±25.4	35.0±26.9	10.9±7.6	2.3±0.8	449±138
	Ratio (D/A)	0.8	1.5	0.7	0.7	0.7	1.5	1.2
3F	During (D)	3.6±1.9	244.0±185.9	27.9±24.9	30.8±24.3	10.2±7.3	5.5±2.9	673±365
	After (A)	3.1±1.1	135.1±50.9	20.8±12.2	26.7±15.1	9.1±5.0	2.3±1.0	432±160
	Ratio (D/A)	1.2	1.8	1.3	1.2	1.1	2.4	1.6
4F	During (D)	3.9±1.9	268.7±153.0	29.7±25.7	32.1±26.4	10.3±7.5	6.1±3.7	668±319
	After (A)	3.5±1.3	150.7±39.9	43.9±19.0	42.8±18.9	13.2±5.2	2.2±0.3	480±111
	Ratio (D/A)	1.1	1.8	0.7	0.7	0.8	2.8	1.4
8F	During (D)	4.4±4.2	178.9±192.6	54.0±62.0	77.8±85.9	27.6±33.7	6.9±5.1	551±396
	After (A)	3.1±1.7	105.7±49.7	31.5±14.3	37.2±15.6	14.8±6.4	2.7±1.3	364±122
	Ratio (D/A)	1.4	1.7	1.7	2.1	1.9	2.6	1.5
14F	During (D)	4.3±4.0	139.2±196.0	54.0±49.3	52.8±66.8	15.7±20.1	6.2±5.0	404±371
	After (A)	3.2±1.6	106.8±59.4	30.2±16.2	33.9±18.4	11.6±5.4	2.9±1.4	336±152
	Ratio (D/A)	1.3	1.3	1.8	1.6	1.3	2.1	1.2
20F	During (D)	7.0±13.4	137.8±204.1	55.2±45.1	71.3±77.1	19.3±14.1	6.2±5.1	613±745
	After (A)	3.9±1.8	117.4±53.3	47.0±30.8	51.5±31.5	17.5±9.6	3.2±1.3	444±219
	Ratio (D/A)	1.8	1.2	1.2	1.4	1.1	2.0	1.4
Indoor average	During (D)	3.9	165.1	33.5	40.4	12.7	5.7	496
	After (A)	3.4	123.3	38.0	40.7	13.0	2.4	410
	Ratio (D/A)	1.2	1.3	1.1	1.2	1.1	2.4	1.3

된 물질임을 알 수 있었다. 일례로 짧은 시간의 도색 작업으로 인해 수 ppm의 톨루엔이 검출될 수 있는 가능성도 배제할 수 없다. 실제 3층 자료실의 경우 최대 750 µg/m³ (약 200 ppb 수준)의 고농도도 관측되었다. 본 연구에서는 톨루엔의 농도가 TVOC 농도의 약 30~40%를 차지 할 정도로 VOC 중 가장 높은 농도를 나타내는 물질임을 확인할 수 있었다. 공사 중과 공사 후의 톨루엔 농도를 비교해 보면 지하 1층의 로비 (B1F L지점), 제1열람실 (B1F R지점) 그리고 1층 자료실을 제외한 나머지 시료채취 장소에서

공사 후 톨루엔 농도가 공사 중 톨루엔 농도에 비해 전반적으로 낮아졌음을 알 수 있다. 로비와 제1열람실의 경우 그 차이가 매우 미미한 것으로 보아 준공 후에도 내장재와 건물 내부 청소 상황에 따라 꾸준히 배출되고 있는 요인이 있음을 추정할 수 있다. 반면에, 1층 자료실의 경우, 공사 중에는 2층·3층·4층의 다른 자료실과 마찬가지로 도서관이 구비된 상태에서 사람들의 출입이 잦았으나(임시 열람실로 이용됨) 공사 완료 후에는 도서관이 구비되어 있기는 하지만 사람의 출입이 거의 없고 환기가 제대로 이루어

지지 않는 상태였다. 이러한 이유에서 1층 자료실은 공사 후 톨루엔의 농도가 준공 전의 농도에 비해 상대적으로 높아졌을 것으로 추정된다. 전반적으로 공사 초기에는 1층·2층·3층·4층 자료실의 톨루엔 농도가 다른 시료 채취 지점에 비해 높게 나타났다. 그러나 공사 후반에는 8층·14층·20층 복도에서 톨루엔의 농도가 다른 시료 채취 지점에 비해 매우 높게 나타났다. 공사 완료 후 총 6회의 측정이 이루어졌는데 시간의 변화에 따른 톨루엔의 농도 변화는 대체로 완만한 하향 곡선을 그리면서 서서히 낮아지고 있음을 알 수 있다.

3.1.3 자일렌과 에틸벤젠의 농도

실내에서 자일렌은 주로 접착제, 도료, 난방기구, 단열재, 카펫 등에서 주로 발생된다. 따라서 자일렌의 발생원과 에틸벤젠, 톨루엔의 발생원이 유사하다는 것을 알 수 있다. 일반적으로 톨루엔, 자일렌 그리고 에틸벤젠은 벤젠과는 달리 대기 중에서도 그 거동이 상호간에 유사한 것으로 알려져 있으며, 일반 대기 중 자일렌의 농도는 톨루엔의 약 1/10~1/15 수준으로 나타난다고 보고된 바 있다(백성욱 등, 2003). 그러나 도서관 실내 대기를 측정해 본 결과 공사 후반에, 특히 8층·14층·20층 복도에서, 자일렌의 농도가 톨루엔의 농도에 비해 오히려 높게 나타난 경우가 몇 번 있었다(그림 1). 따라서 페인트를 사용한 내부 도색 작업 과정에서 발생하는 VOC 중에는 경우에 따라서는 톨루엔 보다 자일렌과 에틸벤젠이 더 높게 나타나는 것으로 파악된다(한국페인트공업협동조합, 1996). 그림 1에는 나타나지 않았으나, 에틸벤젠의 농도 변화 양상은 자일렌과 매우 유사한 것으로 나타났다.

표 3과 그림 1에 나타난 공사 중과 공사 완료 후의 자일렌과 에틸벤젠의 농도를 비교해 보면 제1열람실, 1층·2층·4층 자료실을 제외한 나머지 시료 채취 지점에서는 공사 후의 농도가 공사 중의 농도에 비해 감소하는 것으로 나타났다. 그러나 1층 자료실의 경우 공사 후의 농도가 공사기간 중의 농도에 비해 평균적으로 약 4배 정도 높아졌으며, 또한 공사 후의 1층 자료실의 자일렌과 에틸벤젠의 농도가 다른 어떤 지점보다도 높은 상태임을 알 수 있었다. 이는 톨루엔의 경우와 유사하게, 1층 자료실이 공사 중에는 도서관이 구비된 상태에서 사람들의 출입이 잦았

으나 공사 완료 후에는 사람의 출입이 없고 환기가 제대로 이루어지지 않은 상태였기 때문에 판단된다.

3.1.4 스티렌의 농도

악취 유발 물질로도 알려진 스티렌은 실내에서 록킹재, 발포단열재, 섬유형 보드, FRP 표면 수지 등에서 주로 발생된다. 따라서 스티렌은 벤젠이나 톨루엔과 같은 일반 방향족 VOC와는 달리 환경 중 거동이 상이할 것으로 짐작된다. 공사 중과 공사 후의 스티렌 농도를 비교해 보면 모든 시료채취 장소에서 공사 후 스티렌의 농도가 공사 중 스티렌의 농도에 비해 약 2배 정도 낮아졌음을 알 수 있다(그림 1). 스티렌은 실외의 농도에 비해 실내에서 시료채취지점에 관계없이 농도가 모두 높게 나타났다. 특히 도서관 리모델링 공사의 상당 부분이 건물 단열재를 시공하는 공정이 있었으므로 실내의 고농도는 그 영향을 반영한 결과라고 할 수 있다. 공사 기간 중 스티렌의 실내 농도는 장소에 관계없이 그 농도가 대체로 유사한 것으로 나타났다. 이는 로비, 제1열람실, 자료실 및 상층부 복도의 모든 시료 채취 장소에 스티렌 발생원이 공통적으로 존재하기 때문인 것으로 생각된다. 공사 완료 후 스티렌의 시간 변화에 따른 농도 변화에 대해 살펴보면, 완만한 하향 곡선을 그리지는 않으나 전반적으로 시간이 지날수록 그 농도가 서서히 낮아짐을 알 수 있었다. 또한 공사 후에도 스티렌의 농도는 건물 내 여러 지점에서 그 농도가 비슷한 수준을 나타내었다.

3.1.5 TVOC 농도

현재 국내의 TVOC의 실내 공기질 권고 기준치는 $500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 설정되어 있다. 공사 중 1층에서 4층의 자료실, 8층·14층·20층 복도의 경우 기준치보다 높게 나타나는 날이 많았다. 그러나 공사 후에 그 농도가 약간 낮아지기는 하였으나, 실내 공기질 권고 기준치보다 높게 나타나는 날이 종종 있었다. TVOC는 다른 개별 VOC 물질과 마찬가지로 공사 초기에 비해 공사 중반기에 그 농도가 서서히 줄어들다가 공사 후반기에 다시 그 농도가 높아짐을 알 수 있다. 이는 현장의 공사 계획에 의한 결과로 보여진다. 공사 초기에 휘발성 유기화합물이 많이 발생하는 건축 자재나 페인트 등을 사용하여 시공한 후, 시간이 갈수록 휘발성 유기화합물이 증발하면서 그 농

도가 서서히 줄어드는 경향을 보인다. 그 후 공사 후 반기에 또 다시 마감재와 같이 VOC를 많이 발생하는 자재를 사용함으로써 이러한 결과가 나타난 것으로 보여진다.

3.2 카보닐 및 일반 오염물질의 농도 변동

3.2.1 카보닐 화합물의 농도

폼알데하이드는 자극성 냄새가 있는 무색 기체로서 주로 단열재, 실내 가구(합판 및 칠), 가스난로 연소, 벽지접착제에서 많이 발생한다. 그림 2에 의하면, 실내의 폼알데하이드 농도가 실외 지점에 비해 매우 높게 나타남을 알 수 있었다. 이는 실내에 폼알데하이드를 배출하는 특정 발생원이 존재하기 때문이다. 다중이용시설에서의 폼알데하이드의 실내 공기질 유지 기준치는 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서, 대부분의 시료 채취 지점에서 이 기준치를 만족하였다. 그러나 2층 자료실에서 공사 중 2회, 공사 후에는 1회 정도 기준치인 $120 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 초과하는 고농도를 기록하였다. 시료 채취 지점에 관계없이 도서관 내 폼알데하이드의 농도 분포는 대체로 비슷한 양상을 보였는데 농도 범위는 $30 \sim 100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 나타났다. 전반적으로 로비나 상층부 복도에 비해 제1열람실과 1층·2층·3층·4층 자료실의 폼알데하이드의 농도가 상대적으로 높은 것으로 미루어 보아 도서관의 경우 리모델링 공사 이후 건축 자재, 접착제나 도료 등의 사용이외에도 실내에 있는 책상과 책장 등 실내 사무용 가구에서 많이 배출 되는 것으로 사료된다. 또한 그림 2에서 볼 수 있듯이 폼알데하이드 또한 다른 VOC와 마찬가지로 농도 변동 폭이 클 뿐만 아니라 농도 또한 높게 검출되어 공사 기간 중에 단시간에 고농도의 농도분포를 가능하게 하는 발생원으로 부터 검출되고 있음을 알 수 있었다.

공사 중과 공사 후의 폼알데하이드의 농도를 비교해 보면, 시료 채취 지점에 관계없이 공사 중에 비해 공사 후의 폼알데하이드의 농도가 조금 낮아졌다. 그러나 실외를 제외한 모든 시료 채취 지점에서 공사가 완료된 후에도 시간이 갈수록 폼알데하이드의 농도가 조금씩 높아지는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 톨루엔이나 자일렌 등의 농도 변화 양상과는 다른 것으로 폼알데하이드는 공사 후 새로이 배치된 책상과 책장 등과 같은 사무용 가구에서 배출되고

있는 것으로 파악된다.

그림에는 나타나지 않았으나 아세톤의 경우 20층에서 한번 매우 높은 농도를 나타냈는데 이를 제외하고는 실외에 비해 약간 높기는 하지만 도서관 내 각 장소별로 특이한 사항은 보이지는 않았다. 이는 도서관 내에는 아세톤을 배출하는 특정한 발생원이 없기 때문인 것으로 보이며 실외를 포함하여 시료채취지점 10곳 모두 약 $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하의 평이한 수준의 농도분포를 나타내었다. 아세톤 이외에 아세트알데하이드나 프로피온알데히드도 대체로 공사 기간 중이 공사 후보다는 농도가 높았으나 그 경향은 아세톤과 유사하며 특이한 사항을 발견하기는 어려웠다.

3.2.2 일산화탄소 농도

일산화탄소는 물질이 불완전 연소되는 과정에서 주로 발생하는 무색, 무취, 무자극의 공기보다 약간 가벼운 기체로서 적은 농도로도 인체에 치명적인 영향을 줄 수 있다(WHO, 2000). 주로 실내에서는 흡연이 가장 일반적인 오염원이며 그 외에도 취사, 난방 중에 일부 발생된다고 알려져 있다. 그러나 조사 대상 건물은 실내 전체가 금연 구역이며 건물 내에 식당과 같은 취사시설도 없다. 따라서 도서관 실내의 경우 일산화탄소를 발생시키는 특정한 배출원은 없다고 생각된다. 그림 2에 나타난 바와 같이 본 연구에서 측정된 실내의 일산화탄소 농도를 실외의 일산화탄소 농도와 비교했을 때 큰 차이가 없었으며 시료채취지점과 상관없이 건물 내에 농도가 1ppm 이하의 낮은 농도 수준을 나타내었다.

3.2.3 이산화탄소 농도

이산화탄소는 실내 공간에서 농도가 증가하면 호흡에 필요한 산소의 양이 부족하게 되어 일산화탄소와 함께 중요한 실내공기의 환기 상태를 파악하는 중요한 척도의 하나로 취급되고 있다. 본 조사에서 제1열람실을 제외한 모든 시료채취 장소에서 실내의 이산화탄소 농도는 실외의 농도와 비슷한 것으로 나타났다. 그러나 이용자가 가장 많은 지하 1층에 위치한 제1열람실의 경우 그 농도가 공사 중에 비해 공사 후의 농도가 조금 낮아지기는 했으나 여전히 실내 공기 유지 기준치인 1,000 ppm을 초과하는 날이 있었다. 특히 6월과 12월 초순에는 대학의 기말고사 기간이어서 이 시기에 기준치를 넘는 날이 많았다.

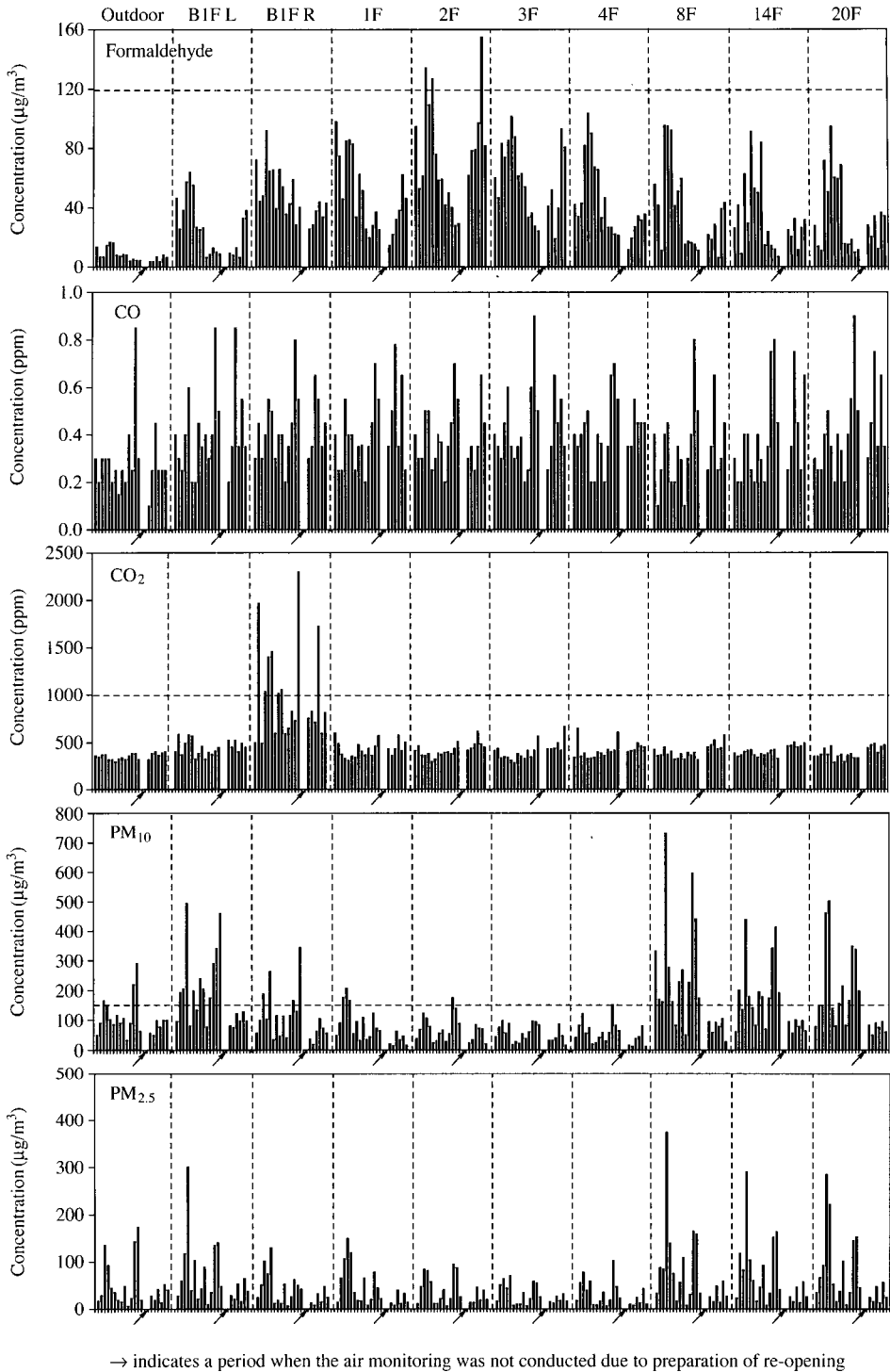


Fig. 2. Variations of concentrations of formaldehyde, CO, CO₂, and particulate matter (PM₁₀ and PM_{2.5}) during and after the remodeling works in a university library.

3. 2. 4 미세먼지 (PM₁₀)와 초미세먼지 (PM_{2.5})

일반적으로 직경 (공기역학적 등가경으로서) 10 μm 이하인 입자를 미세먼지 (PM₁₀) 또는 호흡성먼지라고 하며, 입경 2.5 μm 이하는 별도로 초미세먼지 (PM_{2.5}) 라고 부르기도 한다. 실내의 미세먼지는 주로 실외 대기 중 먼지가 유입되거나, 실내 바닥, 인간의 생활 활동에 의해 발생되며, 방향제나 도료에 의해서도 발생하는 것으로 알려져 있다. 공사 중과 공사 후의 미세먼지 농도를 비교해 보면, 공사 중에 비해 공사 후 그 농도가 실내의 모든 시료 채취 지점에서 낮아진 것을 알 수 있었다. 초미세먼지 또한 미세먼지와 같

은 농도 분포를 보여주고 있다. 로비나 제1열람실에 비해 유동인구가 적고 비교적 공간 용적이 큰 1층, 2층, 3층, 4층 자료실의 미세먼지 농도는 다른 시료 채취 지점에 비해 낮게 검출되었으며, 상대적으로 공간이 협소한 고층에서는 농도가 높게 나타나고 있어 건물 내부의 환경용량이 실내 공기질에 중요한 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었다.

공사 중 상층부 복도에서 측정된 미세먼지의 농도는 다중이용시설에 대한 실내공기질 기준치인 150 μg/m³를 넘는 날이 자주 발생하였다. 전반적으로 공사 중 상층부의 미세먼지 농도가 실내의 다른 시료

Table 4. Summary of carbonyl concentrations (mean±s.d. in μg/m³) during and after the remodeling works in a university library.

	Sampling period	Formaldehyde	Acetaldehyde	Acetone	Propionaldehyde	CO	CO ₂	PM ₁₀	PM _{2.5}
Outdoor	During (D)	9.0±4.5	10.6±3.5	18.1±5.7	14.9±9.6	0.3±0.2	343±30	117±69	57±55
	After (A)	5.5±2.0	6.3±3.9	10.4±4.5	3.4±4.6	0.3±0.1	378±34	80±23	13±7
	Ratio (D/A)	1.6	1.7	1.7	4.4	1.2	0.9	1.5	4.3
B1F L	During (D)	29.5±19.8	14.5±8.2	29.7±13.1	15.7±7.9	0.4±0.2	439±90	228±130	84±76
	After (A)	18.0±13.8	9.5±2.7	18.7±3.6	5.2±3.4	0.4±0.2	477±47	100±22	16±9
	Ratio (D/A)	1.6	1.5	1.6	3.0	0.9	0.9	2.3	5.4
B1F R	During (D)	53.7±17.2	15.7±5.7	34.0±13.7	17.1±8.9	0.4±0.1	1044±557	129±88	47±36
	After (A)	35.5±7.5	11.4±2.6	27.9±10.1	8.1±3.7	0.4±0.1	905±410	58±30	10±7
	Ratio (D/A)	1.5	1.4	1.2	2.1	1.0	1.2	2.2	4.8
1F	During (D)	54.0±27.0	18.5±8.2	37.5±18.4	17.9±11.3	0.4±0.1	421±90	94±56	54±45
	After (A)	36.0±17.2	16.6±5.6	31.3±9.2	8.6±4.7	0.5±0.2	455±74	32±19	9±7
	Ratio (D/A)	1.5	1.1	1.2	2.1	0.8	0.9	3.0	5.9
2F	During (D)	68.7±34.7	19.9±8.9	34.9±10.7	16.9±9.9	0.4±0.1	393±55	76±46	43±32
	After (A)	92.1±32.8	14.9±5.0	30.0±7.1	7.1±3.8	0.4±0.1	483±69	50±28	10±6
	Ratio (D/A)	0.7	1.3	1.2	2.4	1.0	0.8	1.5	4.1
3F	During (D)	59.9±24.2	21.0±9.0	42.0±15.6	15.5±9.2	0.4±0.2	378±72	61±29	34±23
	After (A)	54.2±27.6	10.7±4.9	23.0±9.8	5.0±3.1	0.4±0.1	482±93	42±24	8±4
	Ratio (D/A)	1.1	2.0	1.8	3.1	1.0	0.8	1.4	4.0
4F	During (D)	50.3±26.9	24.5±11.5	47.0±21.1	20.2±11.2	0.4±0.2	410±98	64±37	37±29
	After (A)	26.6±9.4	13.2±3.0	40.3±11.6	5.1±2.8	0.4±0.1	443±34	33±27	8±6
	Ratio (D/A)	1.9	1.9	1.2	3.9	0.9	0.9	1.9	4.6
8F	During (D)	44.2±31.9	12.8±4.5	33.5±28.8	16.9±9.4	0.3±0.2	373±43	278±193	98±95
	After (A)	26.3±13.7	10.5±2.2	19.5±3.7	6.8±3.3	0.4±0.2	485±54	75±29	13±8
	Ratio (D/A)	1.7	1.2	1.7	2.5	0.9	0.8	3.7	7.5
14F	During (D)	37.1±27.6	10.8±3.8	36.8±36.7	13.8±8.7	0.4±0.2	385±32	200±119	88±76
	After (A)	24.6±7.7	9.9±2.6	19.9±4.2	5.2±4.3	0.5±0.2	477±19	81±20	13±8
	Ratio (D/A)	1.5	1.1	1.9	2.6	0.8	0.8	2.5	6.9
20F	During (D)	37.8±28.7	11.9±4.5	41.9±75.9	15.0±8.7	0.4±0.2	363±48	218±139	92±82
	After (A)	27.7±9.6	11.4±3.3	23.1±6.4	6.3±4.8	0.5±0.2	457±34	75±18	13±8
	Ratio (D/A)	1.4	1.0	1.8	2.4	0.8	0.8	2.9	7.3
Indoor average	During (D)	48.4	16.6	37.5	16.5	0.4	467	150	64
	After (A)	37.9	12.0	26.0	6.4	0.4	518	61	11
	Ratio (D/A)	1.4	1.4	1.5	2.7	0.9	0.9	2.4	5.6

채취 장소에 비해 높게 나타났는데, 이러한 사실은 하층부 보다 상층부 복도에서는 환기장치의 가동정도가 미비함은 물론 안전 관리상 자연환기 시킬 수 있는 창문의 개폐가 제한되어 있어 고농도가 나타난 원인이 된 것으로 판단된다. 또한 상층부에는 상주하는 인구가 적어, 사람에 의해 인위적으로 환기를 시키는 일이 거의 없기 때문에 미세먼지의 농도가 높아졌다고 생각된다. 공사 중 상층부의 미세먼지 농도가 다른 시료채취 지점에 비해 높은 또 다른 이유는 하층부에서 발생한 오염물질이 연통형의 건물구조로 인하여 공기의 흐름을 타고 계단을 따라 상층부로 이동되는 현상과 연계 지을 수 있다. 이러한 현상은 공사 후 오염물질 발생이 감소하거나 억제될 경우 일정 기간을 지나면서 서서히 개선되는 것으로 나타났다(그림 2).

사람들의 왕래가 가장 빈번한 제1열람실의 경우 공조시설이나 환기장치가 설치되어 있음에도 불구하고 공사 중 미세먼지 농도는 유지치인 150 µg/m³을 자주 초과하였으며 초미세먼지 역시 65 µg/m³(미국 일평균 대기환경기준치)를 초과하는 경우가 자주 발생하였다. 공사 후 미세 먼지 및 초미세먼지의 농도는 특정 장소에 관계없이 실내의 모든 시료채취 지점에서 그 농도가 비슷한 것으로 나타났으며, 또한 실외 미세먼지의 농도와도 비슷한 것으로 나타났다.

3. 3 실내와 실외 공기질의 상관성

대규모 건물에서 내부 공사와 같은 내부적 요인이

실내공기질에 일차적으로 영향을 미치는 것은 당연한 사실이겠으나 대부분의 건물 실내 환경의 배경농도는 인근의 외부 공기임에는 틀림이 없다. 그러나 실외 공기의 영향은 오염 물질에 따라 그 정도가 판이한 양상으로 다르게 나타날 수도 있다. 본 연구에서는 실내와 실외 공기의 상관성을 파악하여 외부 공기의 영향을 평가하고자 측정된 결과를 대상으로 상관성 분석을 수행하였다. 표 5의 상관계수 자료들은 실외의 1개 지점(도서관 외부 지면)과 도서관 실내의 9개 측정지점간의 상관성을 분석한 결과를 나타내고 있다.

표 5에서 볼 수 있는 바와 같이 벤젠과 일산화탄소등과 같이 실내에 특별한 발생원이 없는 물질들은 대체로 실내와 실외의 상관성이 양호하여 환기 등에 따라 실내 농도와 실외 농도에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 그러나 톨루엔과 자일렌, 이산화탄소 등과 같은 내부 요인이 큰 물질의 상관성은 상대적으로 낮게 나타나 공사 기간 중 실내 발생원의 영향이 실내의 농도변동에 지배적인 영향을 주고 있다고 보아진다.

폼알데하이드의 경우 다른 오염물질과는 특이한 양상을 보이고 있는데, 내부 요인이 큰 오염물질임에도 불구하고 실내와 실외의 농도 상관성이 매우 좋은 것으로 나타났다. 그러나 실외의 농도가 실내평균 농도의 약 20% 수준에도 미치지 못하는 점(표 4)을 고려하면 폼알데하이드는 오히려 리모델링 공사로 인하여 실내공기의 외부 유출로 인근 외부 공기가

Table 5. Correlation coefficients of target pollutants between indoors and outdoors.

Pollutant	Location									
	B1FL	B1FR	1F	2F	3F	4F	8F	14F	20F	
Benzene	0.92	0.89	0.82	0.82	0.74	0.77	0.59	0.54	0.15	
Toluene	0.26	0.38	0.73	0.16	0.35	0.21	0.44	0.19	0.06	
Ethylbenzene	0.26	0.51	0.32	0.40	0.49	0.49	0.35	0.35	0.36	
m, p-Xylene	0.37	0.57	0.40	0.56	0.47	0.53	0.43	0.38	0.11	
o-Xylene	0.20	0.60	0.14	0.41	0.57	0.58	0.37	0.30	0.56	
Styrene	0.79	0.81	0.33	0.31	0.56	0.66	0.56	0.27	0.29	
TVOC	0.31	0.65	0.51	0.57	0.31	0.39	0.51	0.34	0.05	
Formaldehyde	0.90	0.74	0.84	0.63	0.65	0.86	0.91	0.57	0.70	
Acetaldehyde	0.39	0.53	0.05	0.43	0.44	0.53	0.46	0.56	0.65	
Acetone	0.39	0.53	0.05	0.43	0.44	0.53	0.46	0.56	0.65	
Propionaldehyde	0.60	0.65	0.47	0.56	0.46	0.86	0.63	0.69	0.75	
CO	0.71	0.69	0.58	0.51	0.74	0.60	0.77	0.61	0.73	
CO ₂	0.01	-0.33	0.14	0.39	0.41	0.15	0.69	0.61	0.55	
PM ₁₀	0.48	0.26	0.48	0.80	0.54	0.64	0.61	0.75	0.56	
PM _{2.5}	0.68	0.55	0.57	0.90	0.73	0.76	0.61	0.68	0.61	

오염된 결과로 유추할 수 있다. 이와 유사한 경향은 미세먼지(PM₁₀과 PM_{2.5})에서도 찾아볼 수 있는데, 미세먼지의 경우 공사기간 중에는 실내의 농도가 외부 보다 더 높다가 공사 이후에는 비슷한 수준으로 나타나는 점을 미루어 볼 때 공사로 인하여 인근 외부 공기가 오염된 결과를 반영하고 있다고 보아진다.

4. 결 론

본 연구에서는 최근 리모델링공사가 진행 된 Y대학내의 중앙도서관의 실내 공기 중 휘발성 유기화합물 및 폼알데하이드, 총 휘발성 유기화합물, 폼알데하이드, 이산화탄소(CO₂), 일산화탄소(CO), 미세먼지(PM₁₀)에 의한 오염정도를 공사 중과 공사 후로 나누어 조사하였다. 다중이용시설의 범주에 들어가는 도서관과 같은 대형 건물은 실내 공기 오염이 다수에게 영향을 미칠 수 있으므로 각별한 주의와 관리가 요망되는 시설이다. 특히 신축공사와는 달리 리모델링 공사 중에는 건물 내 일부 공간은 사용하면서 공사를 진행하는 경우가 많으므로 내부에서 발생한 각종 오염물질에 거주자가 노출될 위험성이 매우 높게 된다.

본 연구의 결과 공사기간 중 TVOC는 대부분 지점에서 기준치 500 µg/m³를 초과하였으며, 최대 3,052 µg/m³까지 관측된 곳도 있었다. 특히 공간용적이 크고 환기가 비교적 잘 이루어지고 있는 저층부 보다는 공간면적이 좁고 환기가 원활하지 않은 고층부에서는 미세먼지 및 주요 VOC의 농도가 높게 나타났다. 전반적으로는 리모델링 공사 완료 후 TVOC, 폼알데하이드, 미세먼지, 일산화탄소, 이산화탄소 농도는 대체로 기준치를 만족하는 수준으로 회복되었으며 폼알데하이드를 제외하고는 시간의 경과에 따라 오염물질의 농도가 감소하는 경향을 나타내었다. 그러나 일부 측정 지점(특히 1층 자료실의 경우)에서는 폼알데하이드, 톨루엔, 자일렌 등과 같이 실내 사무용 가구나 페인트 등에서 유출되는 VOC들은 공사가 완료된 후에도 오히려 공사 기간 중 보다 더 높은 농도가 나타나 이들 물질이 지속적으로 방출되

고 있음을 알 수 있다. 대조적으로 스티렌이나 미세먼지는 공사가 완료된 후 농도가 급격히 감소하여 개선되고 있는 것으로 나타났다. 따라서 공사 후에도 농도가 감소하지 않는 유해물질을 저감하기 위해서는 리모델링 공사가 완료된 뒤에도 주기적으로 야간 baking 작업을 통하여 최대한 농도를 저감하는 관리 방안을 강구하여야 할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

김강석, 이희선, 공성용, 구현정(2001) 실내공기오염에 대한 국민의식 조사와 정책 방안 연구. 한국환경정책·평가연구원 연구보고서 KEI/2002/RE-07, 203pp.

백성욱, 김미현, 김수현, 박상곤(2002) 국내 대기 중 독성 휘발성 유기화합물의 오염특성(I) - 측정 방법론 평가, 환경독성학회지, 17(2), 95-107.

백성욱, 김미현, 서영교(2003) 발생원 유형에 따른 공기 중 휘발성 유기화합물의 비산배출 특성 평가, 한국대기환경학회지, 19(1), 363-376.

정부 관계부처 합동(2004) 실내공기질 관리 기본계획 보고서, 149pp.

한국페인트잉크공업협동조합(1996) VOC 배출원별 배출량 산정 및 저감기술연구, 페인트와 잉크, 102, 69-81.

한국대기환경학회(2004) 실내공기질 정책 및 관측기술, 151 pp.

佐佐木裕价(1998) 有害大氣汚染物質對策をめぐる最近の動向, 資源環境對策, 34(12), 47-58.

Bianchi, A.P. and M.S. Varney(1993) Sampling and analysis of volatile organic compounds in estuarine air by gas chromatography and mass spectrometry, J. of Chromatography, 643, 11-23.

Sirju, A.P. and P.B Shepson(1995) Laboratory and field investigation of the DNPH cartridge technique for the measurement of atmospheric carbonyl compounds, Environ. Sci. Technol., 29(2), 384-392.

US EPA(1997) Compendium of methods TO-17 determination of toxic organic compounds in ambient air, 2nd Ed., EPA U.S.A. 1-51.

WHO(2000) Guidelines for Air Quality, WHO, Geneva, 190pp.