

Passive Sampler를 이용한 유물 전시관내 폼알데하이드 농도 모니터링

이선명¹ | 임보아* | 김서진**

국립문화재연구소 문화재보존과학센터, *국립문화재연구소 복원기술연구실, **국립해양문화재연구소 수증발굴과

Monitoring of Formaldehyde Concentration in Exhibition Hall Using Passive Sampler

Sun Myung Lee¹ | Bo A Lim* | Seojin Kim**

Cultural Heritage Conservation Science Center,
National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

*Research Division of Restoration Technology,
National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

**Underwater Excavation & Conservation Division,
National Research Institute of Maritime Cultural Heritage, Mokpo, 58699, Korea

¹Corresponding Author: choro13@korea.kr, +82-42-860-9374

초록 이 연구에서는 Passive sampler를 이용하여 연구대상으로 선정된 2곳의 유물 전시관 내부의 폼알데하이드 농도를 2012년 5월부터 2013년 4월까지 1년간 공간별로 모니터링 하였다. 이 결과, 유물 전시관 내부의 폼알데하이드 농도는 외기에 비해 5배~36배 이상 높은 수치를 나타냈다. 각 전시실과 진열장 내부는 오염원, 공기조화설비, 환경관리에 따라 농도 수준을 달리하였다. 유물 전시관 내 폼알데하이드 농도 수준을 주시험법에 준하여 보정한 결과, 대부분이 환경부의 실내공기질 관리법에서 고시하는 전시실 유지기준($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) 뿐만 아니라 일본 국립동경박물관에서 권고하는 문화재 보존환경 기준(약 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 모두 초과하였다. 전시실과 진열장 내 폼알데하이드의 농도는 모두 여름>가을>봄>겨울 순으로 높았으며 온-습도가 높은 여름철에 농도 방출량이 증가하였다. 온-습도환경 변화에 따른 폼알데하이드의 농도는 모두 양의 상관관계를 나타냈다. 온도의 경우 R^2 값이 0.8~0.9의 범위로 폼알데하이드 농도가 습도에 비해 온도에 대한 의존 경향이 큰 것을 알 수 있다. 유물 전시관 내 폼알데하이드 방출 특성 분석은 실내공기질을 개선하는데 기초자료로 활용될 수 있을 것이다.

중심어: 폼알데하이드, 패시브 샘플러, 실내공기질, 온도, 유물 전시관

ABSTRACT In this study, formaldehyde concentrations in two exhibition halls were monitored using a passive sampler from May 2012 to April 2013. Formaldehyde concentrations in the exhibition halls were 5 to 36 times higher than concentrations outdoors. Concentrations inside the exhibition room and showcase varied according to pollutant source, HVAC(heating, ventilation, air conditioning)system and environment management. The formaldehyde concentration levels were corrected according to a standard method prescribed by Indoor Air Quality Management Law of the Ministry of Environment, Korea. As a result, Most concentration levels exceeded the exhibition standard of the Ministry of Environment($100 \mu\text{g}/\text{m}^3$) and artifacts conservation standard of Tokyo National Museum($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$). Seasonal concentrations in the exhibition room and showcase were in the order summer>fall>spring>winter. Formaldehyde emissions

increased in summer when air temperature and relative humidity are both high. Formaldehyde concentration distribution according to the temperature and relative humidity showed positive correlation. Air temperature showed good correlation because R^2 was in the range of 0.8~0.9. Analysis of formaldehyde emission characteristics in the exhibition hall would be helpful in efforts to improve indoor air quality.

Key Words: Formaldehyde, Passive sampler, Indoor air quality, Temperature, Exhibition hall

1. 서 론

최근 문화재를 보다 체계적이고 효율적으로 보존·관리 및 활용하고자 하는 문화재 정책 환경 변화에 발맞춰 유물을 안전하게 보존, 관리할 뿐만 아니라 많은 사람들이 향유할 수 있도록 유물 전시관의 건립이 증가되고 있다(Cultural Heritage Administration, 2012). 이러한 전시관은 소장 유물의 전시를 통해 관람객들에게 지식을 전달하고 증진시키는 시설 고유의 목적으로 인해 전시효과의 극대화 및 쾌적한 관람 환경 조성이 불가피하고 이와 함께 유물의 보존적 측면을 고려해야 하므로 전시관 실내 환경 관리에 어려움이 많다.

특히 유물 전시관은 유물의 보안과 보존을 위해 공간의 기밀성이 높고 복합 화학물질로 구성된 다양한 건축물의 내장재료, 마감재료, 전시재료의 사용으로 악취 및 논 따가

움과 같은 환경성 질환이 발생하는 등 실내 환경 문제가 최근까지 꾸준히 제기되고 있다. 이 같은 현상은 신축 전시관 뿐만 아니라 상설전시관의 교체, 기획 및 특별전시가 새롭게 개관된 이후에도 발생되고 있으나 문제의 인식에서만 그칠 뿐 근본인 문제가 해결되지 않은 실정이다.

실내공기오염물질의 종류와 발생원은 매우 다양하며 특히 인체에 발암성과 위해성을 갖는 알데하이드류와 휘발성유기화합물에 대한 중요성이 부각되고 있다. 이 중 폼알데하이드는 일반 휘발성유기화합물질들에 비해 발생빈도가 높고 긴 시간 발생을 계속하며 독성이 강한 물질로 특별한 주의를 필요로 한다(Yoo, 2010b). 현재 이 물질은 환경부의 「실내공기질 관리법」에서도 휘발성유기화합물과 별도로 취급관리하고 있다.

폼알데하이드의 주요 발생원은 각종 단열재, 압축 목재 제품, 바닥재 등과 같은 건축 내장재료와 페인트 칠, 래카

Table 1. Characteristics of exhibition halls investigated in this study

Classification	Exhibition hall A		Exhibition hall B	
Location	Daejeon		Asan	
Site	Urban		Rural	
B.C.Y*	2008		2011	
E.R.S**	283.5 m ²		182.5 m ²	
Opening time	Open by request		09:00~18:00(Close: every tuesday)	
Building type	Reinforced concrete		Reinforced concrete	
B.I.M***	Ceiling	gypsum board, plywood, pattern wood	Ceiling	gypsum board, painting
	Wall	gypsum board, fabric and pattern wood pannel, painting by lacquer	Wall	gypsum board, painting by lacquer
	Floor	wood flooring	Floor	wood flooring
Air conditioning	Thermo-hygrostat(2 ea) (almost not operated)		Central HVAC system (operated intermittent air conditioning)	
Case type	Wall type airtight showcase		Wall type airtight showcase	
M.E.A****	Earthenware, stone tool etc.		Paper etc.	

*B.C.Y: Building completion year, **E.R.S: Exhibition room scale, ***B.I.M: Building interior material, ****M.E.A: Main exhibition artifacts

도장 등과 같은 마감재료 등을 들 수 있다. 이는 자재의 종류 및 내부의 화학물질 총량 등 자재 특성에 대한 영향뿐만 아니라 노출되어 있는 환경 조건에 영향을 받아 방출량이 정해지는 것으로 보통 건축 완공 연도가 짧은 신축건물에서 높게 나타나며 건축 완공 후 시간이 경과될수록 감소하나 시설 및 공기조화설비(HVAC; Heating, Ventilation, Air Conditioning)에 따라 그 저감율에 차이를 보인다.

실내공기질에 대한 연구는 국내의 건축환경, 실내환경 분야에서 활발하게 진행되고 있다(Jo and Sohn, 2008; Yoo, 2010a; Ham, 2012; Park *et al.*, 2013). 그러나 대부분이 인체 유해환경 기준을 바탕으로 주택과 같은 주거공간과 학교, 지하철 등과 같은 공공시설 위주로 진행된 실정이다.

한편 문화재 환경 관련해서는 유물 전시관 내 알데하이드류와 휘발성유기화합물과 같은 실내공기오염물질의 농도가 외기보다 높은 것으로 보고된 바 있다(Kim *et al.*, 2007; Kim *et al.*, 2009; Lee *et al.*, 2009). 이 같은 연구는 일부 박물관을 대상으로 실내 환경에 대한 종합적 평가를 실시한 것으로 극히 제한적으로 이루어졌다. 즉, 전시실과 함께 유물 보존을 위해서는 진열장 내 환경 실태 파악이 중요함에도 불구하고 전시실에 치중되는 한편 조사 당시 측정위치에 따른 농도 파악에 그치는 단편적 연구로 미흡한 편이다. 이는 유물을 보관 및 전시하는 곳에 대한 접근이 어렵고 제한적인 것에 기인한 것으로 판단된다.

이 연구에서는 유물 전시관 내 공간별 폼알데하이드의 분포 특성을 파악하기 위해 개관년도, 시설 및 공기조화설비, 환경관리에 차이를 보이는 전시관 2곳을 모니터링 대상으로 선정하였다. 모니터링은 시공간적 제약이 없고 많은 측정지점에서 장기간 측정이 가능하여 동시 비교하는데 용이한 Passive sampler를 이용하였으며, 일 년간 매월 정기적으로 시료를 채취하고 분석하였다. 분석결과를 토대로 전시관 내 공간별, 계절별 온도 변화에 따른 폼알데하이드의 방출 농도 특성 변화를 살펴보았다. 이 결과는 전시관 내 폼알데하이드 방출 패턴을 파악하여 관람자 및 유물 보존에 있어 쾌적한 환경을 마련하는데 기초자료로 활용될 것이다.

2. 연구방법

2.1. 조사대상 시설

유물 전시관내 폼알데하이드 방출 농도 분포 특성을 파악하기 위해 개관년도, 시설환경 및 공기조화설비, 환경관

리를 달리하는 전시관 2곳을 선정하였다(Table 1). A 전시관은 도심지 주변의 산중턱에 위치하는 것으로 2008년에 개관하였으며 철근 콘크리트로 건축되었다. 내장 재료로는 천정부와 벽재에서 석고보드, 합판, 무늬목에 마감 재료로 페인트 등이 사용되었고 바닥은 우드 플로어링(wood flooring)으로 시공된 상태이다.

이 전시관은 상시 개방을 하지 않는 것으로 전시관 내 향온습도가 설치되어 있으나 거의 가동하지 않고 있는 등 활용도가 적은 곳이다. 주요 전시유물은 도·토기, 석기이며 일부 금속, 지류 등과 같이 환경에 민감한 재질도 함께 전시되고 있다. 유물들은 대부분 전시실의 가장자리에 위치하고 있는 비공조식 벽부형 밀폐 진열장 내에 보관 전시되고 있다. 진열장은 금속제 프레임으로 표면은 래커칠하여 마무리하고 전면은 내부가 투명하게 투시되는 강화유리로 제작되었다. 진열장 내부에는 목질제품으로 가공하고 패브릭으로 마감 처리한 유물받침대가 설치되어 있다. 또한 전시실 한편에 공기가 정체되는 공간에는 유적지의 토층전사 전시물이 있다.

B 전시관은 도시 외곽의 산 밑 평지에 위치하는 것으로 2011년에 개관하였으며 철근 콘크리트로 건축되었다. 내장 재료로는 천정부와 벽재에서 석고보드에 마감 재료로 페인트, 래커 등이 사용되었고 바닥은 우드 플로어링(wood flooring)으로 시공된 상태이다. 이 전시관은 휴관일을 제외하고 상시 개방을 하고 있으며 개방 시 보존 및 쾌적한 관람환경 조성을 위해 간헐적으로 공조기를 가동하고 있다(가동시간, 09:00~18:00). 주요 전시유물은 지류이나 일부 금속, 옥기류도 소량 전시되고 있다. 이 유물들은 대부분 전시실의 가장자리에 위치하고 비공조식 벽부형 밀폐 진열장 내에 보관·전시되고 있다. 진열장은 A 전시관에 있는 진열장과 사용자재 및 구성이 유사하다.

두 전시관은 석고보드, 우드 플로어링 마감재로 페인트 등 이용된 주요 건축 자재가 유사하나 전시 연출에 따라 합판, 래커의 사용 등 일부 차이를 보였다. 특히 A 전시관의 경우 합성수지를 다량 사용하여 유적지 유구의 형태를 전사 복원한 전시물이 확인되었다. 이 같은 건축 및 전시재료는 아무리 친환경 건축자재를 사용했어도 자재 내에 100 $\mu\text{g}/\text{m}^2\cdot\text{h}$ 미만의 폼알데하이드가 저농도로 잔존해 있다(Yoo and Park, 2006; Korean Air Cleaning Association, 2016, Healthy Building Material, 31). 또한 가공과정에서 퍼티, 접착제, 실란트, 페인트 등 폼알데하이드의 주요 오염원으로 작용하는 다양한 실내 마감재를 사용하게 되므로 실내 공간에서 폼알데하이드 농도는 초기에 완벽히 제어되기 어렵다.

따라서 모든 전시관 내에서 폼알데하이드가 오랜 시간 서서히 실내공기로 방출되는 것을 전제로 개관시기, 시설 및 공기조화설비 현황에 따른 폼알데하이드의 방출 농도 경향을 살펴보고 이에 대한 합리적인 관리 방법을 마련할 필요성이 제기되어 일 년간 각 전시관 내 공간을 모니터링 후 비교하였다.

2.2. 시료채취 및 분석방법

각 유물전시관 내 환경조사로 폼알데하이드 농도와 함께 실내 온습도를 2012년 5월부터 2013년 4월까지 모니터링 하였다. 대상 공간은 전시실 및 진열장을 대상으로 실

시하였으며 실내-외 간 환경 수준을 비교하기 위해서 외부의 환경 조사도 동일한 방법으로 병행하였다(Figure 1).

폼알데하이드 시료 채취는 Passive sampler를 이용하였다. 일 년간 매월 정기적으로 각 측정 지점에서 Passive sampler를 일주일 동안 노출시킨 후 분석을 위해 수거하였다. 이 연구에서 사용된 Passive sampler는 (주)앤버스에서 제작한 것으로 Passive sampler에 의해 포집된 폼알데하이드는 ACN(Acetonitrile, CH_3CN)추출을 통해 HPLC(DIONEX, USA)로 분석하였고 분석 조건은 Table 2와 같다.

Passive sampler는 자연확산과 막투과의 원리를 토대로 펌프와 같은 동력이 필요하지 않아 시료채취에 있어 공간적 제한이 적으므로 유물 진열장과 같이 협소한 공간에서

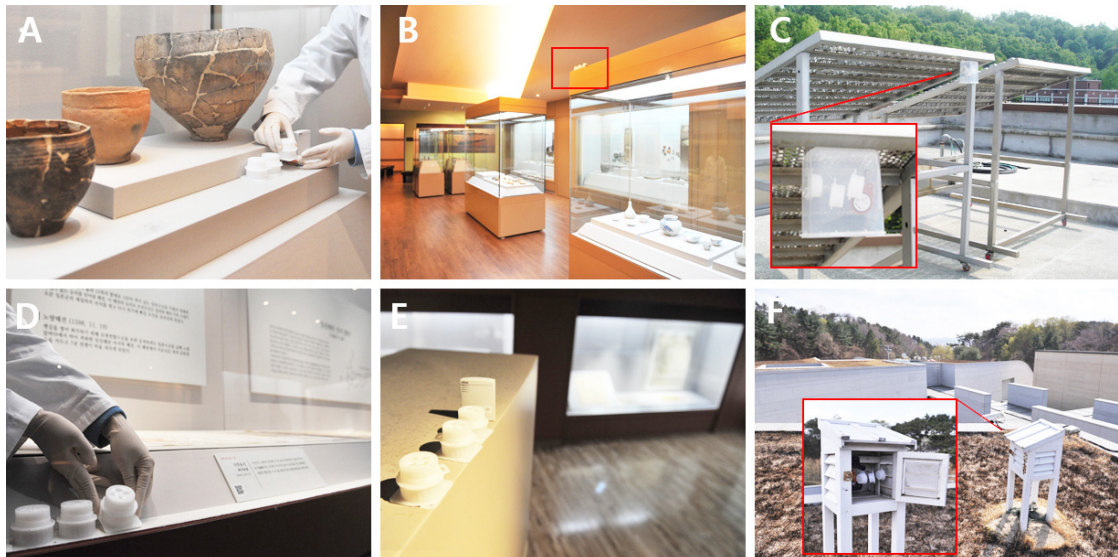


Figure 1. Formaldehyde measure point of exhibition hall A, B. (A) Showcase of exhibition hall A, (B) Room of exhibition hall A, (C) Outdoor of exhibition hall A, (D) Showcase of exhibition hall B, (E) Room of exhibition hall B, (F) Outdoor of exhibition hall B.

Table 2. Analytical condition of HPLC

Variables	Conditions
HPLC	DIONEX, USA
Detector	UV/Vis 360 nm
Column	Acclaim® 120(C18, DIONEX), 4.6×250 mm
Mobile phase	A: Acetonitrile, B: Water:Acetonitrile(50:50 v/v)
Gradient elution	0~2 min: B(100%) / 2~55 min: A(0→40%), B(100→60%) / 60 min : A(100%)
Flow rate	1.0 mL/min
Analytical time	60 min
Temperature	Room temperature

Table 3. Analysis result of formaldehyde concentration according to measure point of exhibition hall A, B

Measure point		Min($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Max($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Mean($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SD	I/O
Exhibition hall A	Showcase	7.4	45.2	18.8	12.7	5.0
	Room	20.4	338.3	135.9	113.8	36.4
	Outdoor	1.6	6.5	3.7	1.8	-
Exhibition hall B	Showcase	94.1	263.4	173.5	52.1	32.4
	Room	18.4	42.1	28.5	6.7	5.3
	Outdoor	2.6	11.5	5.3	2.5	-

측정이 쉽다(Kim and Kim, 2001; Lee *et al.*, 2004). 또한 사용이 편리할 뿐만 아니라 경제적이어서 장기간 다측점 시료채취에 활용도가 좋다. 무엇보다도 환경부에서 제시하는 주시험법의 경우 진열장과 같은 협소한 공간에서 측정하기 어렵고 당일 측정이므로 일기, 현장 상황에 영향을 받는 등 매일 경향성 파악하기에는 대표성, 재현성이 떨어질 수 있다. 반면 Passive sampler를 활용하면 해당 월의 일주일간의 모니터링 결과로 비교적 대표성, 재현성 면에서 보완이 될 것으로 기대되어 본 연구에서 적용하였다.

그러나 환경부에서 제시한 주시험법이 아니므로 실제 연구대상 공간 중 전시실을 대상으로 Passive sampler를 이용하여 알데하이드 농도를 포집을 시작하는 날, 환경부에서 제시한 주시험법인 Air sampler를 이용하여 당일 포집한 농도를 분석하고 측정방법 간 상관관계를 살펴보았다(Lim and Lee, 2015). 측정방법에 따른 알데하이드류 농도를 비교한 결과, Active type의 농도치가 Passive type에 비해 약 6.4배 높은 수준을 보였다. 알데하이드류 중 폼알데하이드의 경우 측정방법 간 절대값에서 큰 차이를 보이거나 두 방법 간의 강한 상관관계를 나타냈다. 이를 통해 Passive type의 경우 주시험법보다 감도가 떨어지는 것을 알 수 있으나 전시관 내 폼알데하이드 방출 농도 특성 변화를 파악하는데 유효한 것으로 판단하여 수집데이터에 대한 검토를 실시하였다.

폼알데하이드 시료 채취와 함께 공간별 온습도 환경을 분석하기 위해 2012년 5월 9일부터 2013년 5월 5일(362일)까지 매시간 전시실 및 유물 진열장과 전시관 외기를 대상으로 온습도를 측정하였다. 측정에 사용된 자동 온습도 데이터 로거는 외기의 경우 $\pm 0.5^\circ\text{C}$ 와 $\pm 2\%$ 의 정밀도, 0.1°C 와 0.1% 의 분해능을 가진 Testo사의 177-H1(Germany)이고, 전시실 및 유물 진열장 내부는 $\pm 0.35^\circ\text{C}$ 와 $\pm 2.5\%$ 의 정밀도와 $\pm 0.03^\circ\text{C}$ 와 $\pm 0.03\%$ 의 분해능을 가진 Hobo사의 U12-11(USA)이다. 수집된 데이터는 각 공간별 온열환경

파악 및 폼알데하이드 방출 농도 분포와의 상관관계를 살펴보기 위해 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 공간별 농도 분포 특성

A, B 전시관의 공간별 분포특성을 살펴본 결과 모두 외기 대비 전시실과 진열장 내부에서 높은 농도 분포를 보였다(Table 3). A 전시관은 전시실이 연간 $20.4\sim 338.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 평균 $135.9 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 진열장은 $7.4\sim 45.2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 평균 $18.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내 전시실이 진열장에 비해 높은 농도 수치를 나타냈다. 전시실과 진열장의 I/O 비를 살펴본 결과 각 36.4, 5.0으로 전시실이 진열장에 비해 7배 이상 오염도가 높았다(Figure 2A).

이 같은 농도 수준은 전시실의 경우 환경부의 실내공기질 관리법에서 고시하는 박물관 및 미술관의 전시실 폼알데하이드 유지기준(이하 환경부의 전시실 유지기준) $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 뿐만 아니라 일본 국립동경박물관에서 권고하는 문화재 보존환경 기준(이하 문화재 보존환경 기준)인 50 ppb(약 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$)을 모두 초과하는 것을 알 수 있다(National Research Institute of Cultural Heritage, 2008). 반면 진열장 내부는 환경부의 전시실 유지기준 및 문화재 보존환경 기준 보다 낮은 농도 분포를 나타냈다.

전시실과 진열장 내 폼알데하이드 농도 변화에 따른 상관관계를 살펴 본 결과, 전시실 내 방출 농도가 높아지면 진열장 내부의 농도도 지수함수적으로 증가하는 것으로 R^2 값이 0.95를 나타냈다. 이를 통해 전시실과 진열장내 폼알데하이드 방출 농도 수준에서 차이를 보이거나 전반적인 변화 경향에서 유사한 변화 경향을 보이는 것을 알 수 있다(Figure 2B).

B 전시관은 전시실이 연간 $18.4\sim 42.10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로

평균 $28.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 진열장은 $94.1\sim 263.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 범위로 평균 $173.5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 를 나타내 진열장이 전시실에 비해 높은 농도 분포를 보였다. 전시실과 진열장의 I/O 비는 각 5.3, 32.4로 진열장 내부가 전시실에 비해 6배 이상 오염도가 높은 것을 확인하였다(Figure 2A).

농도의 수준은 진열장의 경우 환경부의 전시실 유지기준 및 문화재 보존환경 기준 모두를 초과한 높은 농도 분포이나 전시실은 기준 이하를 나타냈다. 전시실의 폼알데하이드 농도 변화에 따른 진열장 내부 농도 변화 양상은 R^2 값이 0.41로 양적인 비례관계를 나타낸다. 이는 각 공간에서 폼알데하이드 방출 농도 수치의 차이를 보이나 최대값과 최소값을 제외하면 전반적인 변화 경향에서 유사한 양상을 보인다(Figure 2C).

A, B 전시관 내부는 유물의 보존과 보존을 위해 기밀성이 높은 편이며 전시실 내부에는 합판, 판넬과 같은 목질제품과 페인트, 래커 도장과 같은 마감칠이 기본으로 시공된 상태이고 전시환경 연출을 위해 합판과 접착제 등 복합화

학물질이 사용되어 폼알데하이드가 외기에 비해 높은 농도분포를 나타냈다.

특히 A 전시관의 전시실 내부는 완공연도가 B 전시관에 비해 3년이 경과한 상태로 폼알데하이드 방출 농도의 자연적 감소를 예측하였으나 A 전시관 내부의 경우 $7.4\sim 338.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$, B 전시관은 $18.4\sim 263.4 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 예상과 달리 A 전시관에서 방출 농도가 높은 수치를 나타냈다. 이는 전시실 내에 건축자재 외에도 합성수지를 사용하여 유적지 유구의 형태를 복원한 전시기법이 사용 되는 등 폼알데하이드 오염원을 가진 다양한 전시재료가 많은 상태에서 냉난방, 환기가 없어 방출 농도의 저감률이 더딘 것으로 사료된다.

각 전시관 내 전시실 및 진열장 각각에 대한 폼알데하이드 농도의 차이는 A 전시관의 경우 기본적으로 전시실과 진열장 내부에서 모두 별도의 냉난방, 환기와 같은 조치가 이루어지지 않은 상태에서 전시실에 주요 오염원이 위치하여 진열장에 비해 전시실의 방출 농도가 높게 나온 것으

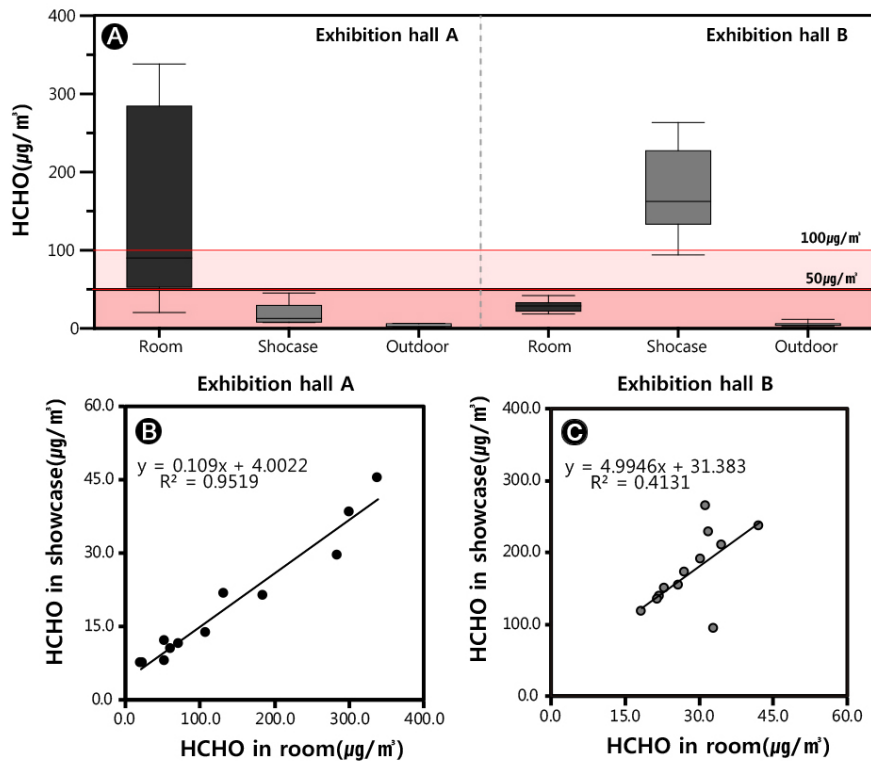


Figure 2. Formaldehyde concentration distribution in exhibition hall A, B. (A) Formaldehyde concentration distribution according to measure point, (B) Formaldehyde concentration correlation between room and showcase of exhibition hall A, (C) Formaldehyde concentration correlation between room and showcase of exhibition hall B.

로 판단된다. 반면 B 전시관의 경우 전시실을 상시 운영하면서 냉난방과 환기설비를 운용하여 상대적으로 기류가 정체되어 있는 진열장의 폼알데하이드 방출 농도가 높게 나온 것으로 판단된다.

Lim and Lee(2015)의 연구에 따르면 Passive sampler로 포집한 폼알데하이드 농도는 환경부의 주시험법에 비해 감도가 낮고 약 6.4배 낮은 수치를 보이는 것으로 보고되었다. 이를 바탕으로 각 공간별 농도 수치를 보정하면 두 전시관 내 모든 공간에서 환경부의 전시실 유지기준 및 문화재 보존환경 기준 농도를 상회하여 실내공기질 관리가 필요한 실정이다.

3.2. 계절별 농도 분포 특성

A, B 전시관은 공간별 농도 수준에 차이를 나타내지만 전반적으로 봄철에서 여름철로 갈수록 농도가 상승하다 8월에 최고 수치를 기록하고, 겨울철로 넘어가면서 감소하

다 이듬해 1월에 최저 수치를 기록하는 유사한 경향을 보였다(Figure 3). 이를 통해 전시관 내 폼알데하이드 농도가 계절 변화에 영향을 받으며 특히 온습도가 높은 여름철에는 모든 지점에서 높은 농도 분포를 나타내는 것을 알 수 있다. B 전시관의 경우 진열장 내부에서 일부 농도가 급격히 감소하는 농도 이상대를 나타낸다. 이는 해당 전시관 담당자와의 인터뷰를 통해 살펴본 바, 모니터링 기간 중 유물 점검을 위해 진열장이 개방되어 자연환기가 된 것에 기인한 결과로 판단되어 데이터 검토 시 그 부분을 고려하고 해석하였다.

A, B 전시관의 전시실과 진열장 내 계절별 평균 농도를 살펴보면 여름>가을>봄>겨울 순으로 높은 농도를 나타냈다(Figure 4). 최저 농도수치를 보이는 겨울철(1월) 대비 최고 농도수치를 보이는 여름철(8월) 전시관의 공간별 폼알데하이드 방출 농도 증가율을 살펴보았다. 이 결과, A 전시관의 전시실은 17배, 진열장은 6배를 나타내고 B 전시관에서는 전시실이 2배, 진열장이 3배로 폼알데하이드 방출

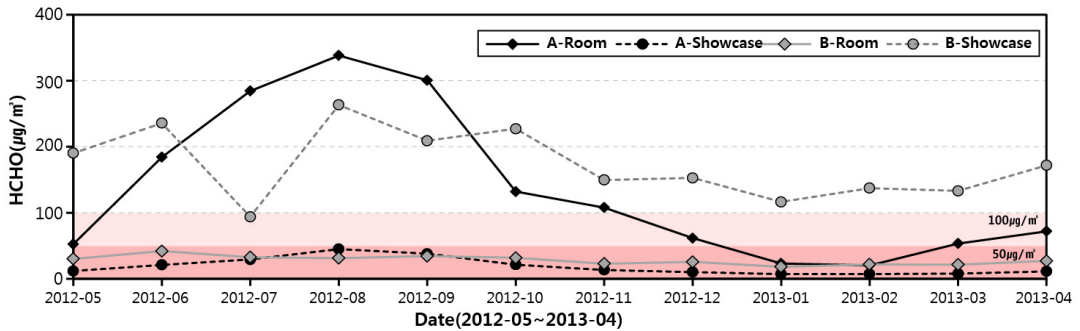


Figure 3. Annual change of formaldehyde concentration according to measure point.

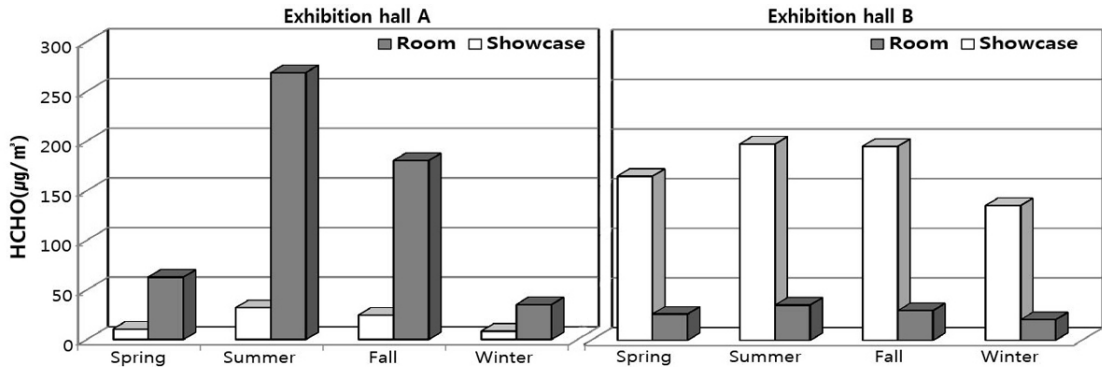


Figure 4. Seasonal change of formaldehyde concentration according to measure point.

Table 4. Coefficient of determination between formaldehyde concentration and thermal environment in exhibition hall A, B

Measure point		T(°C)*	T-R ²	RH(%)**	RH-R ²
Exhibition hall A	Showcase	20.9±4.6 (15.8~28.6)	0.87	52.6±12.4 (38.9~71.8)	0.77
	Room	20.6±4.8 (15.1~28.6)	0.86	51.6±13.2 (38.9~70.1)	0.81
Exhibition hall B	Showcase	18.5±3.8 (13.1~23.4)	0.45	61.2±2.3 (56.8~65.4)	0.43
	Room	19.8±2.6 (16.0~23.6)	0.89	54.4±2.7 (51.2~60.2)	0.46

*T: monthly mean air temperature, **RH: monthly mean relative humidity

농도가 증가된 것을 알 수 있다. 이를 통해 A 전시관에 비해 B 전시관의 계절환경에 따른 폼알데하이드 농도 증가율이 현저히 낮으며 전시관의 공간별로도 오염도가 높은 공간의 증가율이 상대적으로 높은 것을 알 수 있다. 이는 오염원의 차이도 있겠지만 그 보다 공기조화설비와 환기 조치 등과 같은 환경관리에 기인한 결과로 판단된다.

A 전시관의 전시실, B 전시관의 진열장은 모든 계절에서 환경부의 전시실 유지기준 및 문화재 보존환경 기준 초과하였다. 반면 A 전시관의 진열장, B 전시관의 전시실은 폼알데하이드의 농도 기준 미만을 나타냈다. 그러나 Lim and Lee(2015)의 연구를 바탕으로 주시험법에 준하여 농도를 보정하면 각 전시관 내 모든 공간별 농도 수치는 사계절 모두 인체와 문화재 관련 허용기준을 상회하여 모든 공간이 공기질 개선이 필요한 실정임을 알 수 있다.

3.3. 온·습도 환경과의 상관관계

일반적으로 폼알데하이드의 주요 오염원은 건축자재와 마감재, 전시재료를 들 수 있다. 자재 내에서 방출되는 폼알데하이드의 총량이 정해진 상태에서 공간 내 폼알데하이드의 방출은 많은 요인에 의해 영향을 받는다. 이는 폼알데하이드 고유 물성뿐만 아니라 오염원의 종류와 물리적 환경 인자에 따라 방출 매커니즘과 양이 달라지며, 특히 온·습도 환경의 영향이 큰 것으로 보고되고 있다(Yoo, 2010a). 또한 폼알데하이드에 대한 온·습도 의존성은 서로 다른 양상을 보이는 것으로 보고된다(Yoo, 2010b).

폼알데하이드는 온·습도 환경과 상호작용하여 금속, 지류, 직물문화재 재료의 훼손을 촉진시킬 수 있다고 알려져 있다. 특히 폼알데하이드는 수분과의 친화력이 크고 극성을 가져 다른 재료와 매우 쉽게 반응하는 강한 환원제로 온·

습도 환경 변화에 따라 포름산으로 산화되고 금속재료의 부식이나 석회질 유물의 풍화를 촉진시킨다고 보고되고 있다(Hatchfield, 2002).

전시관 내에서 유물을 보관, 전시하는 진열장은 전시실 내부의 급격한 환경 변화로부터 유물을 보호하는 층의 개념으로 'box in a box' 모델과 같은 또 하나의 독립된 보존 공간(buffer zone)이다(Camuffo *et al.*, 2000). 따라서 개폐구가 있고 관람객의 유동과 함께 공조설비 운용에 따른 환경적 영향을 직접적으로 받는 전시실과 다르게 기류교환이 적고 밀폐도가 높은 편이다.

따라서 진열장 내에 아무리 저 농도이더라도 폼알데하이드가 방출되면 오랜 기간 유지하게 되며, 이 같은 환경에서 지류 및 직물과 같이 흡습성 있는 재료의 경우 재료 내 가스가 농축되고 주변 온·습도 환경과 작용하여 변퇴색을 일으킬 수 있다(Te'treault, 2003). 따라서 전시관 내 공간별 온·습도 환경 변화에 따른 폼알데하이드 방출 농도 분포 특성에 대한 검토의 필요성이 제기되었다.

온·습도 모니터링 결과, A 전시관은 전시실의 월 평균 온도가 15.1~28.6°C의 범위로 평균 20.6°C를 나타내고 진열장은 15.8~28.6°C의 범위로 평균 20.9°C를 보였다. 습도는 전시실이 38.9~70.1%의 범위로 평균 51.6%를 나타내고 진열장은 38.9~71.8%의 범위로 평균 52.6%를 나타냈다. B 전시관은 전시실의 온도가 16.0~23.6°C의 범위로 평균 19.8°C를 나타내고 진열장은 13.1~23.4°C의 범위로 평균 18.5°C를 보였다. 습도는 전시실이 51.2~60.2%의 범위로 평균 54.4%를 진열장은 56.8~65.4%의 범위로 평균 61.2%를 나타냈다(Table 4).

온도의 경우 B 전시관이 20±4°C 내에서 안정화 분포를 보이면서 A 전시관에 비해 온도 편차가 낮고 낮은 분포대를 보였다. 습도의 경우 B 전시관이 50±5%의 분포대에서

유지되면서 A 전시관에 비해 습도의 편차가 현저히 적은 것을 알 수 있다. 이는 실리카겔과 같은 습도조절장치의 사용 및 전시관 내부 공기조화설비 운영의 차이에서 비롯된 것으로, 각 전시관 내 온습도 환경 관리 현황을 파악할 수 있다.

A 전시관 내 공간별 온습도환경 변화에 따른 폼알데하이드 농도 분포를 살펴본 결과, 모두 온습도가 증가할수록 방출 농도가 증가하고 R^2 값이 0.8~0.9의 범위로 높은 결정계수를 나타내 상호간의 밀접한 상관성이 있는 것을 확인하였다. B 전시관에서도 온습도가 증가에 따른 폼알데하이드 방출 농도의 분포양상이 모두 양적인 지수함수적 관계를 나타냈다. R^2 값은 0.4~0.8의 범위를 나타내나 2012년

7월 폼알데하이드 방출 농도가 급격히 저감되는 이상대의 수치를 제외하면 온도의 경우 0.8~0.9의 범위로 보정되어 높은 상관성을 보인다. 또한 A, B 전시관 내 공간에서 폼알데하이드 방출 농도는 습도에 비해 온도에 대한 의존성이 큰 것을 알 수 있다(Figure 5).

각 전시관의 공간별 폼알데하이드 방출 농도 증가율을 온·습도 환경 변화와 함께 살펴보았다. 이 결과, A 전시관의 전시실 17배 농도 증가 시 온도편차 13.6°C, 습도편차 34.7%를 나타내고 진열장 6배 농도 증가 시 공간 내 온도 편차 12.8°C, 습도편차 30.3%를 보였다. B 전시관은 전시실 2배 농도 증가 시 온도편차 5.9°C, 습도편차 5.0%를 나타내고 진열장 3배 농도 증가시 온도편차 10.3°C, 습도편

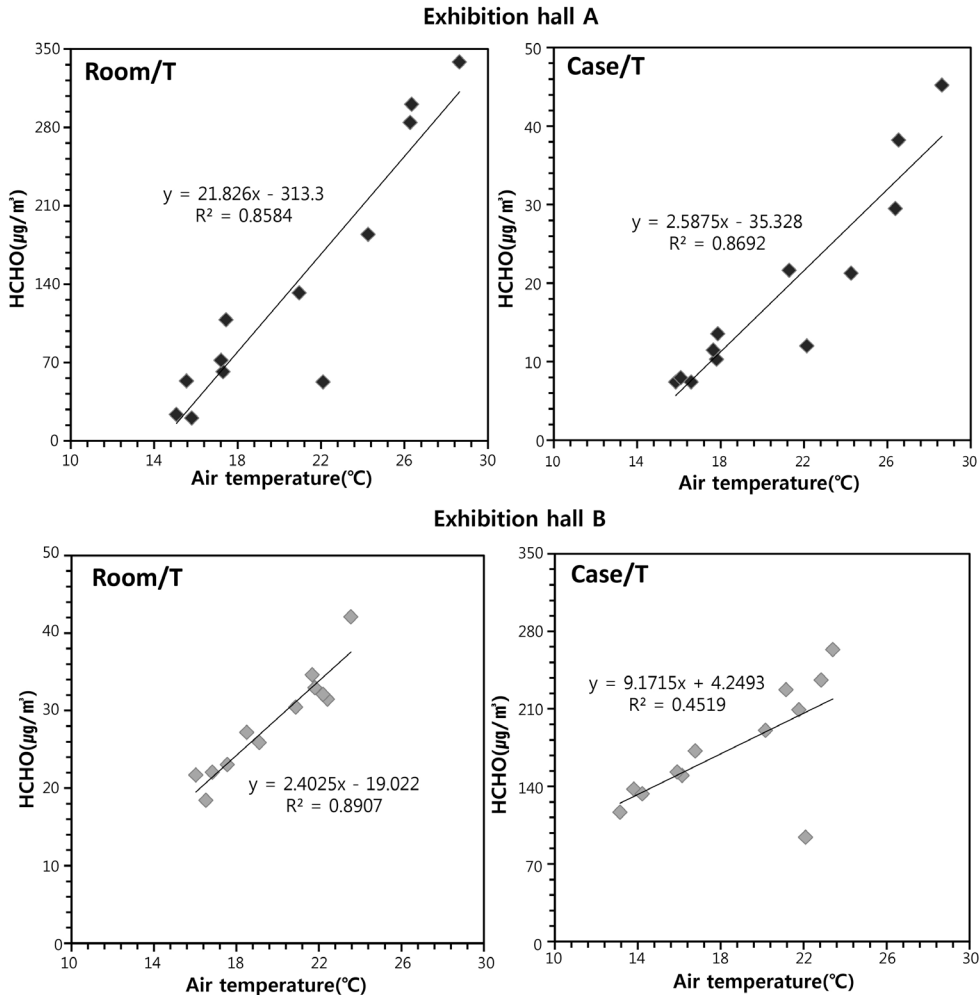


Figure 5. Formaldehyde concentration distribution according to change of air temperature in exhibition hall A, B.

차 5.7%를 나타냈다.

A 전시관의 경우 폼알데하이드 방출 농도 증가 시 공간별 온습도 편차가 큰 차이를 보이지 않으나 증가율에서 큰 차이를 보여 전시실과 진열장 내 폼알데하이드 오염원의 종류와 양이 다르고 진열장에 비해 전시실에 오염원이 다량 분포하는 것을 확인하였다. 실제 전시실에 유적지의 토층을 전사 복원한 전시물이 위치하여 이에 의한 영향임을 재차 확인하였다.

B 전시관의 경우 A 전시관에 비해 방출 농도 증가율이 낮은 편으로, 방출 농도 증가 시 공간별 습도 편차는 유사하나 온도 편차에 차이를 보이고 온도 편차가 큰 진열장에서 증가율이 높았다. 이 같은 결과는 공기조화설비 운영 등 전시실 환경 관리로 인해 B 전시관이 A 전시관에 비해 방출 증가율이 낮은 편인 것으로 해석된다. 또한 공간별 방출 증가율의 차이는 오염원의 차이 보다 공조환경에 의한 차이로 특히 습도보다는 온도에 의한 영향력이 큰 것으로 판단된다.

이 연구에서는 건축자재 및 전시재료 등의 폼알데하이드 발생원에 의한 방출량의 총량이 정해진 상태에서 전시관 내 온습도 환경이 공간별 방출량을 증가시키거나 저감시킬 수 있는 주요 환경인자임을 알 수 있다. 또한 온습도 모두 폼알데하이드 방출 농도 변화에 영향을 미치나 습도에 비해 온도와 높은 상관성을 나타내는 것으로 실내공기질 개선을 위해서는 온도변화에 특히 주의를 요해야 할 것으로 판단된다(Figure 5).

5. 결론

이 연구에서는 유물 전시관 A, B 두 곳을 대상으로 실내 공기오염물질의 주요 원인물질로 알려진 폼알데하이드의 공간별, 계절별 온습도 환경 변화에 따른 농도 특성을 분석하여 전시관 내 폼알데하이드 방출 농도 패턴 및 방출량을 파악하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1. 각 유물 전시관의 전시실과 진열장 내부는 외기 대비 약 5배에서 크게는 36배 이상의 높은 오염도를 보였다. A 전시관은 전시실이 진열장에 비해 7배 이상 오염도가 높았고, B 전시관은 진열장이 전시실에 비해 6배 이상 높은 농도수치를 나타냈다. 측정된 폼알데하이드 농도 수준을 환경부의 주시험법으로 보정한 결과, 대부분 환경부의 전시실 유지기준 및 문화재 보존환경 기준 모두를 상회하는 것으로 쾌적한 관람 및 전시유물 보존을 위해 실내공기질 개선이 필요한 실정이다.

2. 일반적으로 폼알데하이드 농도에 영향을 미치는 주요 인자는 주요 발생원인 건축자재, 마감재, 전시재료이며 자재 내 방출 총량이 정해진 상태에서 보통 건축 완공 년도가 짧은 신축건물에서 높게 나타나고 이후 시간이 경과될수록 감소되는 경향을 보인다. 그러나 이번 연구대상의 경우 완공연도에 따른 차이보다는 시설 내 폼알데하이드의 주요 발생원을 기초로 시설환경 및 냉난방, 환기율과 같은 공기조화설비 현황에 의해 방출량과 저감율이 높아지는 것을 확인하였다.

3. 유물 전시관의 전시실과 진열장 내 계절별 폼알데하이드 평균 농도를 살펴본 결과 여름>가을>봄>겨울 순으로 높은 농도를 나타냈다. 여름철인 8월에 폼알데하이드 방출량이 높았으며 겨울철인 1월에 방출량이 낮은 것으로 전시관 내 각 공간별 폼알데하이드 방출량 증가율을 살펴본 결과, 오염도가 높은 공간에서 방출량 증가율이 높은 것을 확인하였다. 따라서 전시관 내 폼알데하이드 농도가 계절 변화에 영향을 받으며 특히 여름철에는 방출량이 증가하므로 환경 제어에 따른 방출량 증가 억제 및 환기로 인한 공기질 개선이 필요한 것으로 판단된다.

4. 온·습도 환경에 따른 폼알데하이드 농도 분포를 살펴본 결과, 전시관 내 온습도에 따른 방출 농도에서 높은 상관성을 나타냈다. 또한 전시관 내 공간에서 폼알데하이드 방출 농도는 습도에 비해 온도에 대한 의존성이 큰 것을 알 수 있다. 각 전시관의 공간별 폼알데하이드 방출 농도 증가율을 온습도 환경 변화와 함께 살펴본 결과, 전반적으로 오염원의 종류와 양의 차이도 있지만 전시관 내 공기조화설비 운용과 환경관리에 따른 방출량의 차이가 큰 것을 알 수 있었다.

5. 유물 전시관 내 폼알데하이드 농도 저감을 위해서는 진열장 시공 및 내부 전시재료 사용 시 친환경 자재 인증을 받은 제품을 사용해야 하나 실제 친환경 자재에서도 미량의 농도가 방출되고 가공과정에서 접착제 등 폼알데하이드 발생원 사용이 불가피한 상황이 대다수이다. 따라서 시공이후 유물을 전시하기 전에 정화된 외기를 실내에 충분히 공급하는 플러시 아웃(Flush out)을 실시하여 오염도를 저감시켜야 할 것으로 판단된다.

6. 폼알데하이드 방출이 불가피한 상황에서 방출량 제어를 위한 온습도 환경 관리와 함께 오염된 공기질을 희석하기 위해 폼알데하이드 방출 패턴과 양을 고려하여 적절한 환기조치가 필요할 것으로 판단된다. 전시관 내에서 유물을 보관 전시하는 진열장의 경우, 미량이라도 폼알데하이드가 방출되면 공간의 밀폐도에 의해 오랜 기간 유지되

고 수분에 의해 유물 손상에 영향을 미칠 수 있으므로 특히 습도환경 관리에 주의를 해야 할 것으로 판단된다.

7. 이와 같은 자료는 특정 대상에 대한 분석결과로 모든 전시관에 해당되는 일반적인 사항이 될 수는 없다. 그러나 향후 유물 전시관의 전시환경 개선 및 관리 방안 마련 시 기초자료로 활용 될 수 있을 것이라 기대된다.

REFERENCES

- Camuffo, D., Sturaro, G. and Valentino, A., 2000, Showcases : A really effective mean for protecting artworks?. *Thermochimica Acta*, 365, 65-77.
- Cultural Heritage Administration, 2012, Five years master plan detailed tasks and action plans of cultural heritage, Five years master plan of preservation, management, applying for cultural heriatage(2012-2016). 85-243. (in Korean)
- Hatchfield, P.B., 2002, Pollutants in the museum environment. Archetype Publications, 21.
- Ham, J.S., 2012, A study on the formaldehyde concentration producing characteristics and reducing method in newly built apartment house. *Journal of the Architectural Institute of Korea : Planning & Design*, 28(9), 261-269. (in Korean with English abstract)
- Jo, W.J. and Sohn, J.Y., 2008, Indoor air pollution levels in new apartments and assessment of seasonal emission characteristics. *Journal of the Architectural Institute of Korea : Planning & Design*, 24(7), 231-239. (in Korean with English abstract)
- Kim, H.M. and Kim, S.T., 2001, Research paper: evaluation of detection limit and sampling time of passive sampler for the GC/FID analysis of VOC. *Environmental Engineering Research*, 23(5), 839-848. (in Korean with English abstract)
- Kim, Y.S., Roh, Y.M., Yoon, Y.H., Lee, C.M., Kim, K.Y., Kim, J.C., Jeon, H.J. and Sim I.S., 2007, A survey on characteristics of distribution for indoor air pollutants in museum environment. *Conservation Studies*, 28, 91-104. (in Korean with English abstract)
- Kim, I.K., Seo, Y.S. and Lee, J.H., 2009, Study on environmental factors for movable cultural properties in museum. *Environmental Engineering Research*, 31(9), 811-816. (in Korean with English abstract)
- Lee, C.M., Kim, Y.S. and Roh, Y.M., 2009, Identification of hazardous physical factors and chemical pollutant in museum. *Journal of Korean Society for Indoor Environment*, 10(4), 303-317. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.J., Sung, M.K., Lee, S.M., Lee, E.T., Kim, H. and Tanabe, S., 2004, Measurement of indoor air quality in a newly built apartment building by passive method. *Proceeding of the Conference of the Architectural Institute of Korea*, 24(2), 987-990. (in Korean with English abstract)
- Lim, B. and Lee, S.M., 2015, Comparison of Aldehydes Concentrations Characteristics According to Measurement Methods in Temporary Exhibition Hall. *Conservation Studies*, 36, 49-63(2015), (in Korean with English abstract)
- National Research Institute of Cultural Heritage, 2008, Standardization of analytical technology for conservation environment of movable cultural properties. 512-513. (in Korean)
- Park, H.J., Kim H.J., Woo, K.S., Kang, T.S., Lee, J.D. and Son, B.S., 2013, A study on the distribution for HCHO and VOCs of educational facilities in Chungnam area of Korea. *The Environmental Education*, 26(4), 468-479. (in Korean with English abstract)
- Te'treault, J., 2003, Airborne pollutants in museums, galleries, and archives : Risk assessment, control strategies, and preservation management. *CCI*, 8-9.
- Yoo, B.H. and Park, Y.S., 2006, The effect of indoor air pollution from VOCs and formaldehyde emitted building materials on indoor air. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 22(8), 233-240. (in Korean with English abstract)
- Yoo, B.H., 2010a, The analysis of the impact on VOC and formaldehyde concentration in new apartment housing relation with air temperature and relative humidity. *Journal of the Architectural Institute of Korea Planning & Design*, 26(5), 383-391. (in Korean with English abstract)
- Yoo, B.H., 2010b, Temperature and humidity on formaldehyde emission from building materials. *Journal of the Architectural Institute of Korea : Planning & Design*, 26(7), 249-257. (in Korean with English abstract)