

온 · 습도에 따른 건축 내장재별 휘발성유기화합물의 방출특성

서병량[†] · 김신도* · 박성규*

순천제일대학 그린전남환경종합센터, *서울시립대학교 환경공학과

The Characteristic of Volatile Organic Compounds(VOCs) Emission from the Type of Indoor Building Materials as the Temperature and Humidity

Byeong-Ryang Seo[†] · Shin-Do Kim* · Seong-Kyu Park*

Green Jeonnam Environmental Complex Center, Suncheon First College

*Department of Environmental Engineering, University of Seoul

(Received July 13, 2006/Accepted August 13, 2006)

ABSTRACT

The Volatile Organic Compounds(VOCs) are emitted from various sources and have lots of different form. Recently human are spending the many times at indoor area and indoor air pollution is issued the important social problem. The emission sources of indoor air pollutants are very various, also indoor building materials are composed of very complex chemical compounds, these indoor building materials discharge very much VOCs and other hazardous compounds. In this study, we performed the small chamber test to investigate the VOCs emission concentration and characteristics involving five kinds of the indoor building materials(furniture material, wooden floor, wall paper, paint and tile) under different conditions of four temperature and relative humidity as account of the air flow rate(AFR), air exchange rate(AER), loading factor and air velocity respectively. As the result, It was showed that building materials are emitted the highest VOCs concentration at the beginning of experiment and furniture material is emitted the highest VOCs concentration. Most of the materials were affected by temperature, but paint and tile material were affected by humidity.

Keywords: volatile organic compounds(VOCs), indoor building materials, small chamber test, emission concentration, emission factor

I. 서 론

휘발성유기화합물(Volatile Organic Compounds: 이하 VOCs)은 실내 · 외 공기 중에 존재하는 수 많은 종류의 유기화합물질을 총칭하며, 다른 명칭으로는 탄화수소(hydrocarbons), 반응성 유기가스(reactive organic gases), 비메탄계 휘발성유기화합물(non-methane VOCs) 등이 있다. VOCs는 증기압이 높아 대기 중으로 쉽게 증발되고 보건학적으로는 암을 유발하는 등 인간의 건강에 악 영향을 줄 뿐만 아니라, 환경학적으로는 오존 전구물질(ozone precursor)로서 광화학 스모그 형성과 많은 관련이 있는 것으로 알려져 있다.¹⁾ 또한, VOCs의

발생원은 실내 · 외 구분 없이 매우 다양하며, 각 물질들의 특성과 인체에 미치는 영향 그리고 VOCs중 일부 물질은 악취를 유발하는 물질로 그 중요성이 더욱 더 중요하게 거론되고 있다.

경제 발전과 산업의 발달로 현대인들은 실내에서 생활하는 시간이 계속해서 증가하고 있으며, 하루생활 중 약 80~90% 이상을 실내에서 생활하는 것으로 보고되고 있다.^{2,3)} 또한, 건축물은 에너지 절약을 위하여 밀폐하는 시간이 많아졌으며, 환기설비의 부적절한 설치 및 운영은 실내공기질 악화의 중요한 원인이 되고 있다.^{4,5)} 최근에는 리모델링 뿐만 아니라 건축물의 시공에 있어 복합화합물질로 구성된 건축 내장재의 사용이 지속적으로 증가하고 있으며, 이러한 건축 내장재는 공정상 시공이 가장 늦게 이루어져 실내 공기와 직접적으로 접촉하기 때문에 실내공기질에 영향을 주는 중요한 요소로 작용한다.⁶⁾ 이러한 건축 내장재에는 VOCs와 폼알

[†]Corresponding author : Green Jeonnam Environmental Complex Center, Suncheon First College
Tel: 82-61-740-1261, Fax: 82-61-740-1246
E-mail : brseo@hanmail.net

데하이드 등 수 많은 종류의 유해화학물질들이 포함되어 있으며, 이 중에서 다량으로 발생하는 VOCs는 실내에서 생활하는 거주자들의 건강에 악 영향이 있는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾

건축 내장재에서 발생하는 VOCs와 폼알데하이드는 실내의 온도와 습도 조건 등에 많은 영향을 받으며, 흡착과 탈착의 반복과정을 통해 방출되는 특성이 있다.⁸⁾ 또한, 건축 내장재에서 발생된 VOCs와 폼알데하이드 등 여러 종류의 화학물질들은 재실자들의 눈, 목, 코 등을 자극하고 장기간 독성을 나타내고 있으며,⁹⁾ 빌딩증후군(sick building syndrome : SBS)과 새집증후군(new house syndrome) 등의 문제를 야기시키고 있다. 외국의 경우는 건축 내장재에서 발생하는 VOCs와 폼알데하이드의 방출특성 연구에 있어 다양한 종류의 건축 내장재와 실험조건에서 진행되고 있으며, 측정대상 VOCs 종류 또한 매우 다양하다. 그러나 국내에서는 이와 관련하여 일부 연구자에 의해 국한적으로 연구가 진행되고 있으며, 건축자재의 종류와 실험조건 또한 너무 제한적인 실정이다.^{10,11)} 따라서, 본 연구에서는 건축 건축물의 마감 및 내부공사에 주로 많이 사용되는 5종류의 건축 내장재를 대상으로 소형챔버 실험을 수행하였으며, 온도와 습도 조건을 각각 4가지 형태로 구분하고 온도와 습도 조건별, 그리고 시간의 경과에 따라 건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 방출특성을 파악하였다.

II. 연구의 내용 및 방법

1. 실험장치의 개요

건축 내장재별 온도와 습도 조건에 따른 VOCs의 방출특성을 파악하기 위하여 소형챔버실험을 수행하였으며, Fig. 1과 Fig. 2는 본 연구에서 사용한 소형챔버와 시료의 고정틀을 나타낸 것이다. 소형챔버는 건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 흡착을 최소화하기 위하여 스테인레스 스틸(stainless steel) 재질로 되어 있으며, 전체에서 부품의 분리가 가능하고 세정 및 열처리가 용이하게 제작하였다. 또한, 뚜껑과 몸체는 분리형으로 하단부에는 청정한 공기의 주입을 위하여 급기구를 설치하였고 뚜껑에는 건축자재에서 발생하는 VOCs 측정 및 소형챔버 내부의 온도, 습도, 차압 등을 측정할 수 있는 배기구를 설치하였다. 또한, 외부 공기와의 기밀성을 유지할 수 있도록 챔버의 몸체와 닿는 뚜껑의 안쪽 둘레에는 테플론 재질로 실링(sealing)하였으며, 소형챔버 내부에서 발생될 수 있는 난류의 방지와 완전혼합을 위하여 하단부에 다공판(baffle)을 설치하는 등 챔버 내부의 공기를 완전혼합 상태로 유지하였다.

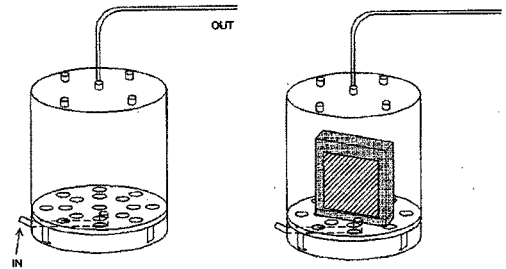


Fig. 1. Small test chamber.

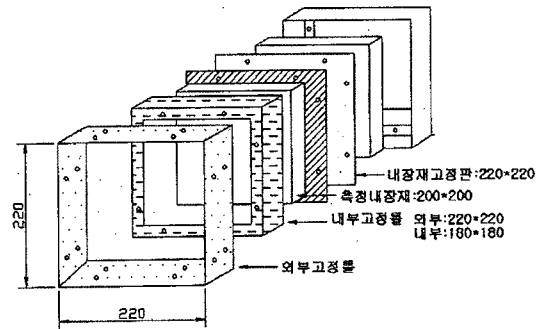


Fig. 2. Building material seal box.

Fig. 3은 챔버실험 장치를 나타내는 것으로 clean air generation system, monitoring and control system (temperature, humidity), sample collection equipment 등으로 구성되어 있다. Clean air generation system은 챔버로 유입되는 공기중에 존재하는 먼지 뿐만 아니라 VOCs 등을 제거하기 위하여 HEPA filter(Gelman Science, USA), activated carbon trap, activated carbon & molecular sieve trap으로 구성하였다. Monitoring and control system은 온도와 습도 조절을 위한 장치로 향온기와 습도 조절장치를 이용하였으며, 온도와 습도의 연속적인 측정을 위해 thermo recorder (TABAI ESPEC, RS-11, Japan)를 설치하였다. Sample collection equipment는 건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 방출농도를 측정하기 위한 장치로 Fig. 4와 같이 챔버의 뚜껑부분에 설치되어 있는 배기구 부분에 직경 0.6 cm 테프론 튜브로 연장하였으며, VOCs 측정시 측정지점에서 최종 배기되는 곳까지의 길이가 챔버에서 측정지점까지의 길이보다 짧으면 가까운 쪽의 공기 즉, 외부의 공기가 채워져서 정확한 측정이 이루어질 수 없으므로 측정지점에서 최종적으로 배기되는 지점까지의 튜브 길이는 챔버와 측정지점까지의 길이보다 5배 이상 길게 하였고, 최종 배기되는 지점에서는 펌프를 이용하여 강제 흡입하였다.

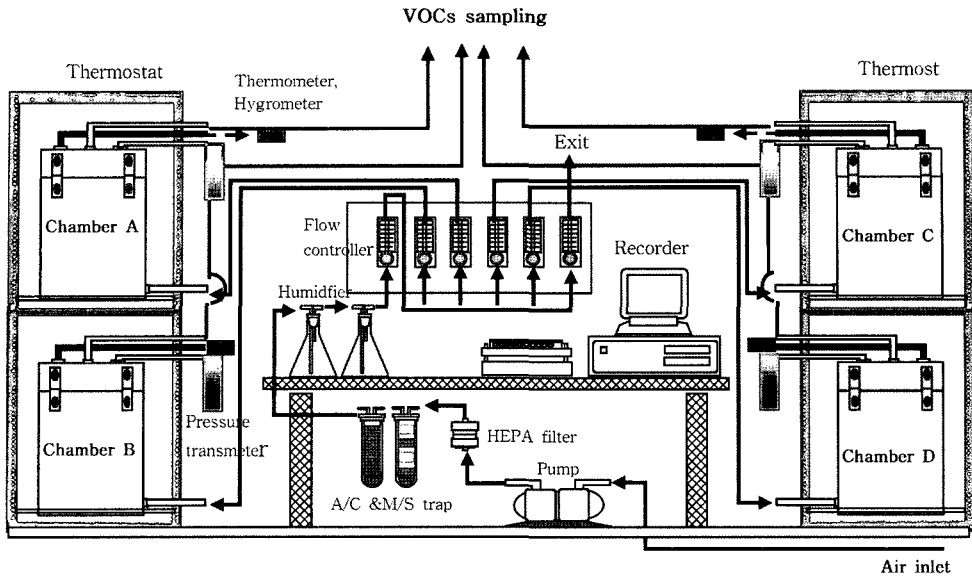


Fig. 3. Schematic diagram of small chamber test facility.

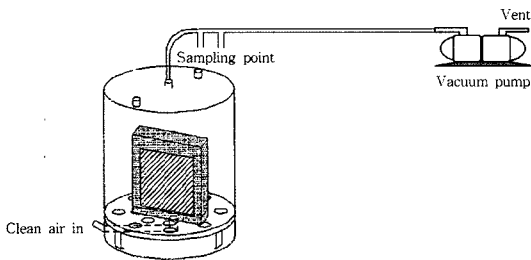


Fig. 4. Sample collection equipment.

2. 실험조건 및 방법

소형챔버를 이용한 챔버실험은 미국¹²⁾과 일본¹³⁾ 등에서 주로 사용되고 있다. 스테인레스 재질로 만들어진 소형챔버(40±0.5 l)는 실험 전 챔버 내부에 부착된 VOCs의 제거를 위해 알칼리성 세정제로 세척한 후 260°C에서 2시간 이상 가열하였다. 챔버에 공급되는 공기는 외부의 공기를 사용하였으며, clean air generation system을 통과한 공기를 각각의 챔버에 공급하였다. 챔버 내 VOCs의 blank 농도 측정은 건축 내장재를 넣지 않은 상태에서 챔버속에 청정한 공기를 공급하고 온도와 습도 조건을 정상상태로 유지하였으며, 24시간 이상 경과 후 100 ml/min으로 5시간 이상 측정하였다. 본 연구에서는 온도 조절장치와 습도 조절장치를 이용하여 4가지의 온도와 습도 조건을 설정하였으며, 온도와 습도 조건은 Table 1과 같다.

측정대상 건축 내장재는 신축 건축물의 마감 및 내부

Table 1. The conditions of experimental temperature and humidity

Items	Experiment type	Experiment condition
Temperature & Humidity Condition	A	20°C, 35%
	B	25°C, 50%
	C	40°C, 9%
	D	60°C, 4%

공사에 주로 많이 사용되는 가구재료(furniture), 바닥재료(wooden floor), 벽지(wall paper), 페인트(paint), 타일(tile)의 5종류를 실험대상으로 하였다. 건축 내장재로부터 발생하는 VOCs의 방출실험을 위해서는 건축 내장재가 화학물질에 대한 오염과 열, 습기 등에 영향을 받지 않도록 보호해야하며 또한, 운반조건 및 운반방법, 시험편의 구비방법, 보관 등이 무엇보다도 중요하다.¹³⁾ 본 연구의 대상 건축 내장재는 공사현장에서 적용되는 것과 동일한 것으로 실험에 사용될 수 있도록 적당한 크기로 절단한 후 알루미늄 은박지로 감싸고 인쇄되지 않은 폴리에틸렌(PE) 재질의 백에 담아 운반 및 보관하였다. 이처럼 준비된 시험편은 스테인레스 재질의 고정틀에 고정시켰으며, 건축 내장재의 단면적에서 방출되는 VOCs 방출농도 측정을 위하여 고정틀 안쪽 부분과 시료가 접하는 부분에는 테플론을 이용하여 실링(sealing)하였다. 건축 내장재를 고정시킨 고정틀은 챔버의 중앙에 놓고 공기가 시험편의 방출면 위에 균일

Table 2. Experiment condition of chamber test

Items	Experiment condition
Chamber material	stainless steel
Chamber volume(m ³)	0.04 ± 0.0001 m ³
Sample area(m ²)	0.0648 m ² (0.0324 m ² × 2 side)
Air flow rate(m ³ /hr)	0.024 m ³ /hr
Air exchange rate(hr ⁻¹)	0.6 hr ⁻¹
Air exchange age(hr)	1.67 hr
Loading factor(m ² /m ³)	1.62 m ² /m ³

하게 흐르도록 유지한 후, 시간의 경과에 따른 VOCs의 방출특성을 파악하였다.

소형챔버의 규격 및 환기량 등 챔버실험의 물리적 조건은 Table 2와 같으며, 각각의 챔버에 공급된 환기량 (air flow rate : AFR)은 단위시간당(hr⁻¹) 소형챔버에 공급되는 공기의 체적(m³)으로 0.024 m³/hr이고, 환기회수(air exchange rate : AER)는 단위시간당(hr⁻¹) 소형 챔버에 공급되는 공기의 체적(m³) 즉, 환기량을 소형 챔버의 용적(m³)으로 나눈 값으로 약 0.6회/hr이다. 환기 연령(air exchange age : AEA)은 소형챔버에 공기가 공급되어 배기 될 때까지의 시간으로 1.67 hr이며, 소형 챔버 내 기류속도(air velocity : AV)는 시험편의 표면을 흐르는 공기의 속도로 0.03~0.06 m/s이다. 시료부하율/loading factor : LF)은 시험편의 표면적(m²)과 소형 챔버 용적(m³)의 비율로 1.62 m²/m³이다.

3. 측정 및 분석방법

건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 측정은 2주 동안 연속적으로 실시하였다. 측정시간 간격은 초기에 6시간 간격으로 4회 측정하였으며, 12시간 간격으로 4회, 24시간 간격으로 4회, 48시간 간격으로 3회씩 각각의 건축 내장재에 대해 총 15회를 측정하였다. 건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 종류는 매우 다양하지만 수많은 종류의 VOCs 중에서 미국 EPA Method TO-14에 명시되어있는 독성물질 40종을 측정 대상으로 선정하였다. VOCs 측정은 Tenax-TA(60/80 mesh, Supelco, USA)가 200 mg 이상 충전된 스테인레스 흡착튜브(1/4 inch×9 cm, Perkinelmer, UK)를 이용하였고 흡착튜브는 측정 전 자동열탈착기(ATD 400, Perkinelmer, UK)를 이용하여 300°C에서 3시간 이상 열탈착 전처리를 실시하였다. VOCs 측정에 사용되는 흡착제의 종류는 매우 다양하며, 각각 고유한 특징이 있으나 Tenax-TA는 일본, 미국, 유럽 등에서 건축자재와 생활용품에서 발생하는 VOCs 측정에 가장 많이 사용되고 있다.^{9,12,13)} Tenax-TA는 표면적이 35 m²/g으로 약한 흡착제로 측정

Table 3. The conditions of VOCs analysis

Items	System and analysis condition	
ATD 400	Perkinelmer, UK	
GC	HP 6890	
Detector	MSD	
Colume	BP-1, 60 m	
Carrier gas	He (99.999%)	
Temperature program	Initial temperature	40°C (10 min)
	Temperature program rate	5°C/min
	Final temperature	190°C (2 min)

대상 범위는 C₆~C₂₆이며, 열탈착 시 최대 가열온도는 350°C이다. VOCs 측정에 사용한 펌프는 측정 전·후의 유량변동이 비교적 적은 personal air sampler (Gilian, USA)를 이용하여 측정하였다. 또한, 건축 내장재에서 VOCs의 방출농도는 실험 초기단계에서 고농도로 방출되며, 시간의 경과에 따라 감소하는 특성을 가지고 있어^{14,15)} 고체흡착법의 단점으로 지적되고 있는 breakthrough의 문제점을 충분히 고려하여 측정유량을 설정하였다. VOCs 측정에 있어 유량측정은 디지털 유량계(Alltech, USA)를 이용하였으며, 실험 초기부터 24시간까지는 50 ml/min으로 30분간 총 1.5 l를 채취하였고 24시간 이후부터는 50 ml/min으로 60분간 총 3 l를 채취하였다. 측정이 끝난 시료는 PTFE storage cap으로 막은 후 파라필름을 이용하여 완전히 밀봉하였고 분석 전까지 4°C 이하의 냉장고에 보관하였다. VOCs의 분석은 자동열탈착기(ATD 400, Perkinelmer, UK)를 이용하여 열탈착시킨 후 가스크로마토그래피 질량분석기(GC/MSD, HP-6890, Agilent 5973N, USA)로 분석하였다. VOCs 분석조건은 Table 3과 같다. VOCs 분석에 있어 선형성 평가는 40종류의 VOCs 성분들이 혼합되어 있는 1 ppm 농도의 표준가스(Supelco, USA)를 0.1~1 ppm 사이에서 3단계로 희석하여 미지시료의 농도가 포함될 수 있도록 검량선을 작성하였으며, 선형성 평가 결과 개별 VOCs 성분들의 선형계수는 0.997 이상으로 매우 양호한 선형성을 보였다.

III. 결과 및 고찰

1. 챔버실험 시스템 평가

1) 챔버 공실험(Blank test) 결과

챔버 blank 실험은 소형챔버 실험의 실험오차와 관련하여 매우 중요한 부분으로 환경부의 다중이용시설 등의 실내공기질공정시험방법(이하, 실내공기질공정시험

방법)에 소형챔버를 이용한 실험장치의 챔버 blank 농도를 toluene의 농도로 환산한 TVOCs 농도 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하로 규정하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 방출특성을 파악하기에 앞서 챔버 blank 실험을 통하여 소형챔버와 부대장비의 적합성 평가 및 실험오차를 파악하였다. 챔버 blank 실험은 챔버에 공급되는 외부공기의 농도와 챔버실험의 배경농도인 습도 조절장치를 통과한 공기의 농도 그리고 blank 챔버에 대한 농도를 평가하였다. 챔버 blank 실험 결과 clean air generation system을 통과하기 전 즉, 외부공기의 농도는 $53.20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으며, 습도 조절장치 통과 후와 blank 챔버의 농도는 각각 $8.73 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $14.42 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로서 실내공기질공정시험방법 오염물질 방출 건축자재 시험방법에 규정되어 있는 챔버 blank 농도인 $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 이하를 만족하였다.

2) 열 탈착기의 회수율 평가

열 탈착기의 회수율 평가는 6종의 VOCs(n-hexane, toluene, decane, tetradecane, pentadecane, hexadecane)가 혼합되어 있는 표준물질 일정량($2 \mu\text{l}$)을 GC/MSD에

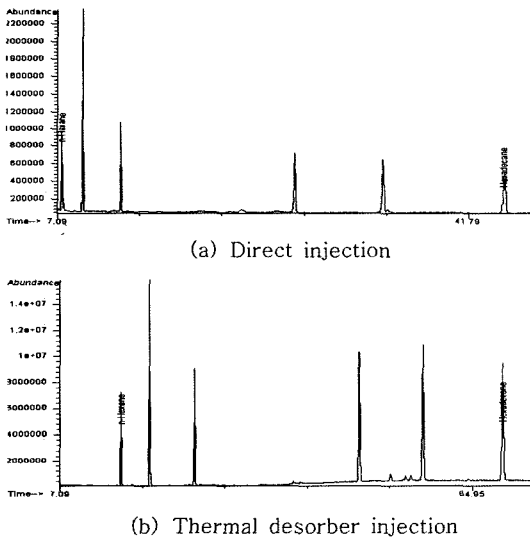


Fig. 5. Chromatogram of VOCs standard analyzed by GC/MSD.

직접 주입하여 분석한 TVOCs(toluene 농도로 환산한 TVOCs) 농도와 동일한 양의 표준물질을 흡착튜브에 흡착시킨 후 열탈착기를 이용하여 GC/MSD로 분석한 TVOCs 농도를 서로 비교하여 평가하였다. Fig. 5는 표준물질 일정량($2 \mu\text{l}$)을 각각 직접주입과 열 탈착기를 통과시킨 후 분석한 크로마토그램이며, toluene의 선형성 평가 결과 선형계수는 0.997 이상으로 매우 양호하였다.

Table 4는 직접주입과 열탈착기를 통과시킨 후 GC/MSD로 분석한 toluene 성분과 6종류의 VOCs 성분들에 대한 area를 toluene 농도로 환산한 TVOCs의 회수율을 평가 결과이다. 실험결과 toluene과 TVOCs의 회수율은 각각 102.70%, 99.11%로 우수하여 본 연구에 사용된 열탈착기의 탈착효율은 매우 양호한 것으로 확인되었다.

2. 건축 내장재별 VOCs의 방출특성

건축 내장재에서 방출되는 VOCs는 각각의 재료에 따라 다양한 방출특성을 보이고 있으며, 방출농도에도 많은 차이가 있는 것으로 조사되었다. VOCs 방출농도에 영향을 주는 요인으로는 건축 내장재에 따라 다소 차이가 있었으나 온도와 습도의 영향이 많은 것을 알 수 있었다. 평균적으로 5종류의 건축 내장재 중 가구재료에서 TVOCs의 방출농도가 가장 높았으며, 바닥재료, 벽지, 페인트, 타일 순서로 조사되었다. 건축 내장재에 따라 방출되는 VOCs의 종류와 방출특성을 파악하기 위하여 미국 EPA TO-14에 제시되어 있는 40종의 VOCs중에서 각각의 실험조건에서 고농도로 발생하는 10종의 VOCs(전체에서 방출되는 VOCs의 $98 \pm 1\%$ 이상)를 대상으로 방출특성을 파악하였고 10종의 VOCs에 대한 산술적인 합을 TVOCs로 사용하였으며, 실험 조건별 건축 내장재의 방출농도는 Table 5와 같다.

건축 내장재별 방출강도(emission factor : EF)는 건축 내장재의 종류와 형태에 따라 단위면적, 단위길이, 단위용적, 개수단위 당으로 계산할 수 있다.¹³⁾ 본 연구에서는 판형의 형태를 가진 건축 내장재를 대상으로 VOCs의 방출실험을 실시하였으며, 실험대상 건축 내장재의 단위면적 당 TVOCs의 방출강도(emission factor

Table 4. The result of thermal desorber(TD) system recovery test

Items	TVOCs (mg/l)		Difference (mg/l)	Recovery ratio (%)
	TDI*	DI**		
Toluene	663.36	649.90	13.46	102.07
TVOC	3,011.89	3,038.86	26.97	99.11

TDI*: Thermal desorber injection, DI**: Direct injection

Table 5. TVOCs emission concentration from each building material

		(Unit : mg/m ³)														
Materials	Conditions	6	12	18	24	36	48	60	72	96	120	144	168	216	264	312
Furniture	A(20°C, 35%)	2.51	1.71	1.09	1.52	1.40	1.44	1.24	1.15	1.20	0.87	0.91	1.23	1.29	0.93	0.85
	B(25°C, 50%)	9.81	5.09	6.33	6.69	7.23	7.80	6.03	6.23	4.55	4.28	3.85	3.65	4.23	3.61	3.80
	C(40°C, 9%)	21.75	20.38	16.67	14.00	12.62	11.90	11.48	11.94	11.19	9.64	8.69	7.91	4.80	6.07	6.72
	D(60°C, 4%)	20.34	20.73	10.62	10.10	8.41	6.72	5.29	4.83	3.23	1.62	1.01	0.71	0.51	0.32	0.25
Wooden floor	A(20°C, 35%)	2.17	1.54	0.33	0.56	0.83	1.06	0.62	0.38	0.42	0.44	0.45	0.37	0.38	0.33	0.38
	B(25°C, 50%)	2.40	1.46	1.52	1.58	1.13	1.28	1.22	1.20	1.17	0.90	0.74	0.59	0.99	1.20	1.26
	C(40°C, 9%)	5.99	6.97	7.75	8.59	4.56	4.30	4.04	3.71	3.60	2.70	2.58	2.57	2.58	2.30	1.78
	D(60°C, 4%)	20.29	19.84	21.51	19.66	17.13	14.18	13.90	13.63	12.53	11.99	11.44	10.67	9.91	9.15	9.08
Wall paper	A(20°C, 35%)	2.72	2.27	1.54	1.91	1.59	1.55	1.42	1.38	0.60	0.44	0.36	0.34	0.25	0.19	0.14
	B(25°C, 50%)	3.03	2.92	1.85	1.86	1.70	1.66	1.57	1.62	1.15	0.92	0.54	0.44	0.37	0.27	0.22
	C(40°C, 9%)	7.52	5.30	4.49	3.14	3.59	3.06	2.53	2.01	1.94	1.45	1.07	0.74	0.66	0.51	0.47
	D(60°C, 4%)	8.93	6.50	4.08	3.51	2.94	2.37	1.80	1.38	1.33	1.28	1.03	0.79	0.86	0.39	0.49
Paint	A(20°C, 35%)	1.49	2.19	0.90	0.92	1.08	1.16	1.23	0.41	0.43	0.42	0.47	0.48	0.50	0.52	0.53
	B(25°C, 50%)	5.12	10.03	4.08	3.27	2.47	1.22	0.97	0.72	0.75	0.74	0.84	0.72	0.61	0.48	0.36
	C(40°C, 9%)	8.98	1.49	1.49	1.50	1.40	1.30	0.94	0.72	0.75	0.54	0.54	0.49	0.45	0.71	0.58
	D(60°C, 4%)	2.42	3.06	2.81	2.56	2.82	3.37	3.93	2.44	1.91	1.38	0.98	0.84	0.69	0.68	0.67
Tile	A(20°C, 35%)	0.35	0.27	0.13	0.15	0.15	0.15	0.16	0.16	0.14	0.11	0.11	0.11	0.11	0.12	0.05
	B(25°C, 50%)	0.82	0.49	0.47	0.25	0.18	0.14	0.11	0.12	0.11	0.10	0.11	0.11	0.11	0.08	0.03
	C(40°C, 9%)	0.57	0.63	0.34	0.12	0.13	0.14	0.13	0.10	0.09	0.09	0.09	0.08	0.07	0.07	0.06
	D(60°C, 4%)	0.59	0.70	0.65	0.52	0.34	0.18	0.13	0.14	0.10	0.10	0.10	0.10	0.08	0.07	0.06

area: EF_a)를 평가하였다. 단위시간에서 단위면적 당 VOCs 방출강도 평가는 시간에 따른 농도의 자료를 이용하여 1차 감소와 같은 수학적 모델에 적용하여 산출하는 방법과 식 (1)을 이용하는 방법이 있다.¹²⁾ 본 연구에서는 각각의 건축자재에서 발생하는 VOCs 방출농도를 식 (1)에 대입하여 건축 내장재별 VOCs 방출강도를 계산하였으며, 시간의 경과에 따른 건축 내장재별 TVOCs 방출강도는 Fig. 6과 같다. 또한 본 연구의 실험기간 동안 일반적인 실내에서의 온도와 습도 조건인 B조건(25°C, 50%)에서 방출되는 VOCs 성분들의 구성비는 Fig. 7과 같다.

$$EF_a = \frac{(C_t - C_{tb,t}) \times Q}{A} = \frac{(C_t - C_{tb,t}) \times nV}{A}$$

$$= (C_t - C_{tb,t}) \times q = (C_t - C_{tb,t}) \times \frac{n}{L} \quad (1)$$

- EF_a : 단위면적 당 방출강도(mg/m²·hr)
- C_t : t 시간의 농도(mg/m³)
- $C_{tb,t}$: t 시간의 travel blank 농도(mg/m³)
- Q : 환기량(m³/hr)
- A : 시료의 단면적(m²)

- n : 환기회수(hr)⁻¹
- V : 챔버용적(m³)
- q : 단위면적 당 환기량(mg/m²·hr)
- L : 시료 부하율(m³/m²)

1) 가구재료

가구재료는 모든 실험조건에서 다른 4종류의 건축 내장재에 비해 TVOCs 농도가 가장 높았다. 실험조건별 TVOCs의 최대 방출농도는 A(20°C, 35%), B(25°C, 50%), C(40°C, 9%) 조건의 경우 실험초기인 6시간 경과 후 각각 2.51 mg/m³, 9.81 mg/m³, 21.75 mg/m³이었으며, D(60°C, 4%) 조건에서는 12시간 경과 후 20.73 mg/m³으로 주로 실험초기에 고농도로 방출되는 것을 알 수 있었다. 실험 조건별 TVOCs 농도가 가장 높은 최대 방출농도 시간대의 개별 VOCs 농도는 Fig. 8과 같이 모든 실험조건에서 호흡기와 피부, 눈 등을 자극하고 중추신경계에 영향을 미치는¹⁶⁾ xylene 성분의 농도가 가장 높았으며, toluene 성분과 호흡기, 피부, 눈의 자극 및 중추신경계에 영향을 줄 뿐만 아니라 동물 실험결과 발암성 의심물질로 알려진¹⁶⁾ ethylbenzene 성분이 주로 검출되었다. 또한, 최대 방출농도 시간대의

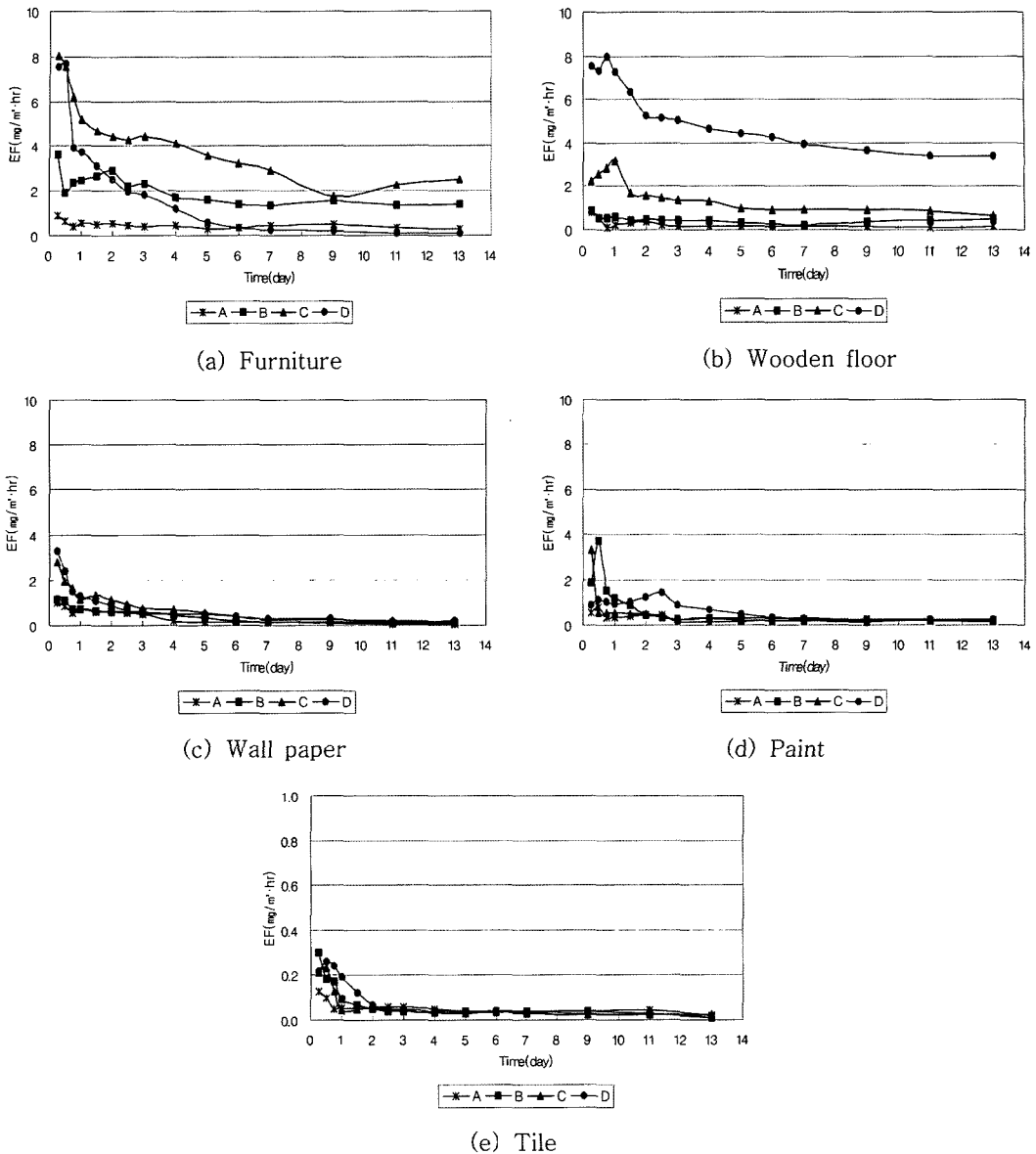


Fig. 6. TVOCs emission factor area(EFa) from each building material (A : 20°C, 35%, B : 25°C, 50%, C : 40°C, 9%, D : 60°C, 4%).

A, B, C, D 실험조건별 xylene 성분의 농도는 각각 $1.80 \text{ mg}/\text{m}^3$ (A 조건의 71.7%), $7.98 \text{ mg}/\text{m}^3$ (B 조건의 81.4%), $18.47 \text{ mg}/\text{m}^3$ (C 조건의 84.9%), $18.24 \text{ mg}/\text{m}^3$ (D 조건의 88.0%)이었으며, ethylbenzene 성분의 농도는 각각 $0.21 \text{ mg}/\text{m}^3$ (A 조건의 8.5%), $1.06 \text{ mg}/\text{m}^3$ (B 조건의 10.8%), $1.73 \text{ mg}/\text{m}^3$ (C 조건의 8.0%), $1.63 \text{ mg}/\text{m}^3$ (D 조건의 7.9%)으로 가구재료에서 xylene 성분과 ethylbenzene 성분이 전체의 80~90% 이상 차지하

였다.

가구재료에서 방출되는 TVOCs의 방출특성을 온도와 습도 조건에 따라 살펴보면, Fig. 9와 같이 실험기간 동안 온도가 상대적으로 높은 C와 D 조건이 A, B 조건에 비해 TVOCs 방출농도가 높아 VOCs 방출에 있어 습도보다는 온도에 더 많은 영향을 받는 것으로 파악되었다. 시간의 경과에 따라 실험 조건별로 가구재료에서 방출되는 TVOCs의 방출농도 특성은 온도가 가장

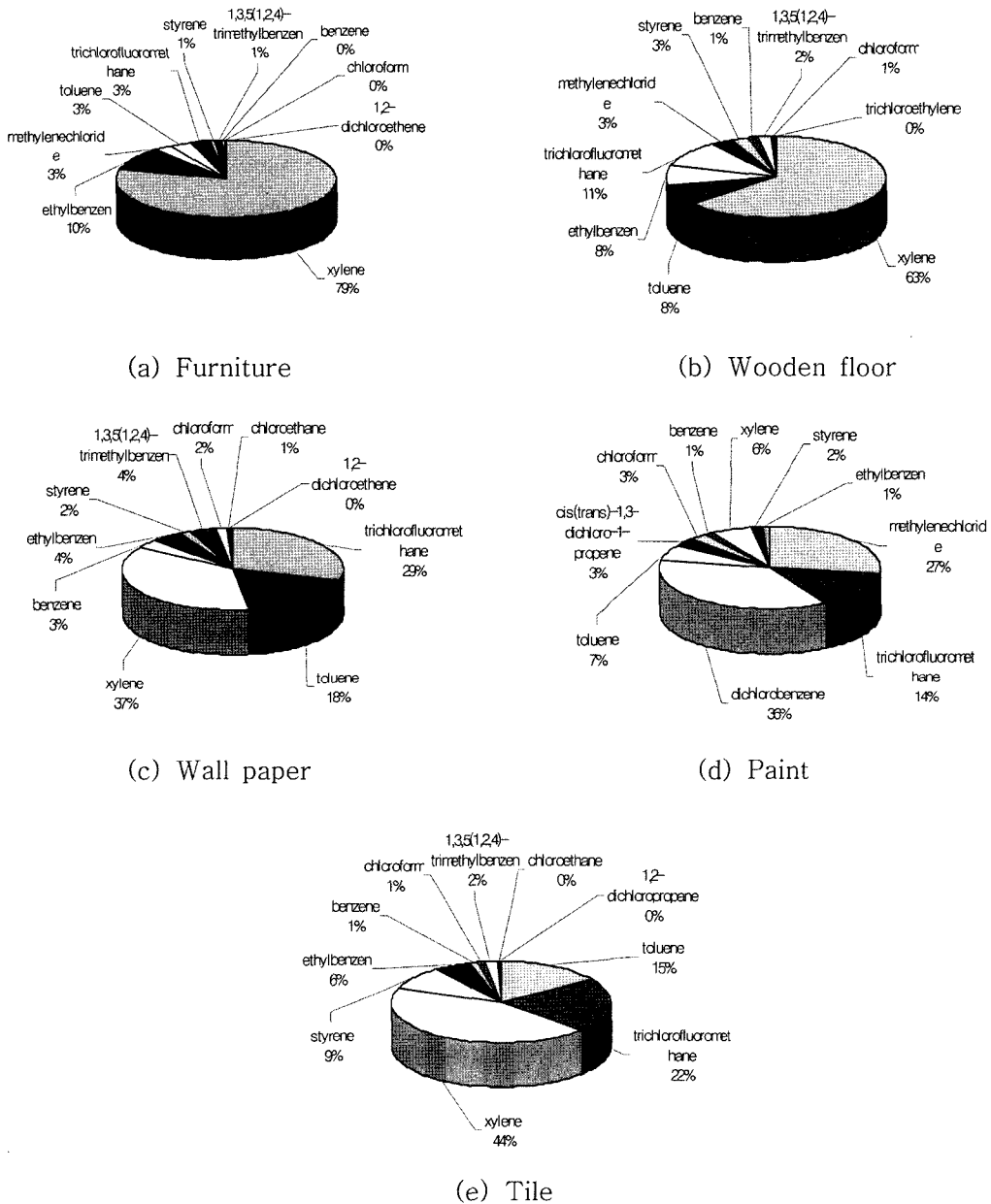


Fig. 7. Compositions of VOCs from each building material at the B (25°C, 50%) experiment condition.

높은 D 조건의 경우 18시간 경과 후 최대 방출농도의 50% 수준으로 감소하였으며, 시간이 경과함에 따라 TVOCs 방출농도는 매우 빠르게 감소하는 것을 볼 수 있었다. C조건에서는 실험초기부터 216시간까지는 시간의 경과에 따라 지속적으로 감소하다가 264시간부터는 점점 증가하는 경향을 보였으나 본 연구에서는 정확한 원인을 규명하기에는 다소 어려움이 있었다.

실험기간 동안 일반적인 실내에서 온도와 습도 조건인 B조건에서 방출되는 VOCs 성분들은 Fig. 7(a)와 같이 xylene 성분이 전체의 79%로 가장 많았으며, ethylbenzene 성분이 10%, toluene 성분이 3%로 전체의 95% 이상을 차지하였다. 또한, B 조건에서의 TVOCs 방출은 시간의 경과에 따라 감소와 증가가 반복되었으며, 이러한 결과는 일부 건축 내장재의 경

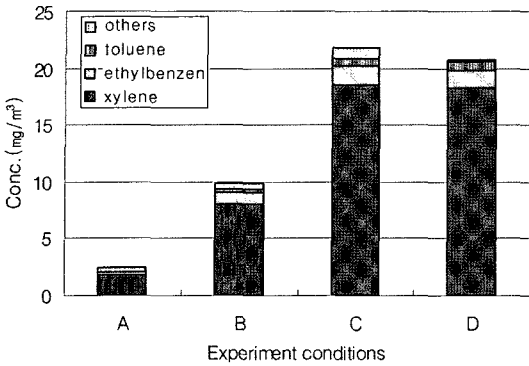


Fig. 8. TVOCs concentration of maximum emission time from furniture material (A, B, C: 6 hr, D: 12 hr).

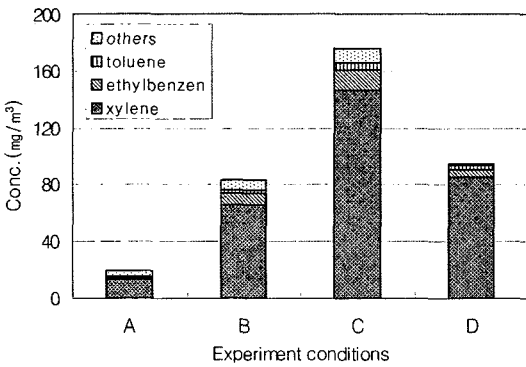


Fig. 9. The sum total VOCs concentration during the survey period from furniture material.

우 VOCs와 폼알데하이드가 흡착과 탈착을 반복하는 방출특성을 가지고 있어¹⁷⁾ MDF(medium density fiberboard)로 구성된 가구재료가 B 조건에서 이러한 VOCs의 흡착과 재 방출의 과정이 반복된 것으로 사료 된다.

2) 바닥재료

바닥재료에서의 TVOCs 최대 방출농도는 4가지 조건 중 D조건에서 18시간 경과 후 21.51 mg/m³으로 가장 높았으며, C, B, A 조건 순서로 나타났다. 실험조건별 최대 방출농도는 C 조건의 경우 24시간 경과 후 8.59 mg/m³이었으며, B, A 조건에서는 실험초기인 6시간 경과 후 각각 2.40 mg/m³과 2.17 mg/m³이었다. 온도와 습도 조건에 따른 TVOCs 최대 방출농도는 상대적으로 온도가 낮은 A와 B 조건이 온도가 높은 C와 D 조건의 약 1/10~1/4 수준으로 나무 바닥재인 바닥재료에서의 TVOCs 방출특성은 가구재료와 마찬가지로 습도보다는 온도의 영향이 많은 것으로 조사되었다. 또한, C와 D 조건에서 TVOCs 방출농도는 시간의 경과에 따

라 매우 빠르게 감소하는 가구재료와는 다르게 시간이 경과함에 따라 완만한 속도로 지속적인 방출을 보이고 있었다. 실험 조건별 TVOCs 최대 방출농도 시간대의 개별 VOCs 농도는 가구재료와 마찬가지로 대부분의 실험조건에서 xylene 성분의 농도가 가장 높았으며, ethylbenzene, toluene, trichlorofluoromethane이 주로 검출되었다. 또한, 최대 방출농도 시간대의 A, B, C, D 실험조건별 xylene 성분의 농도는 각각 1.03 mg/m³ (A 조건의 47.5%), 1.71 mg/m³(B 조건의 71.1%), 7.13 mg/m³(C 조건의 83.0%), 18.44 mg/m³(D 조건의 85.7%)이었으며, ethylbenzene 성분의 농도는 각각 0.11 mg/m³(A 조건의 5.2%), 0.21 mg/m³(B 조건의 8.8%), 0.71 mg/m³(C 조건의 8.3%), 1.83 mg/m³(D 조건의 8.5%)으로 상대적으로 온도가 높은 실험조건에서는 xylene과 ethylbenzene의 방출농도가 높을 뿐만 아니라 바닥재료에서 방출되는 VOCs 중에서 xylene과 ethylbenzene이 차지하는 구성비가 큰 것으로 조사되었다. 실험기간 동안 B조건에서 방출되는 VOCs의 구성비를 살펴보면, Fig. 7(b)와 같이 xylene 성분이 전체의 63%로 가장 많았고, trichlorofluoromethane 성분이 11%, 그리고 ethylbenzene과 toluene 성분이 각각 8% 씩으로 전체의 90% 이상을 차지하였다.

3) 벽지

벽지에서의 TVOCs 방출농도는 D, C, B, A 조건 순으로 조사되었으며, 벽지에서의 TVOCs 방출특성 역시 가구재료나 바닥재료와 마찬가지로 습도의 영향보다는 온도의 영향을 더 많이 받은 것으로 조사되었다. 벽지에서의 TVOCs 방출농도는 모든 실험조건에서 실험초기 6시간 경과 후 최대 방출농도를 나타냈으며, D, C, B, A 실험조건별 TVOCs 최대 방출농도는 각각 8.93 mg/m³, 7.52 mg/m³, 3.03 mg/m³, 2.72 mg/m³이었다. 실험 조건별로 TVOCs 농도가 가장 높은 최대 방출농도 시간대의 개별 VOCs 농도를 살펴보면, A, C, D조건의 경우에는 중추 신경 계통을 억제하는 물질인¹⁶⁾ trichlorofluoromethane 성분이 각각 1.71 mg/m³ (A 조건의 62.9%), 2.90 mg/m³(C 조건의 38.5%), 3.94 mg/m³(D 조건의 44.1%)으로 가장 높았고 B 조건에서는 xylene 성분이 1.56 mg/m³(B 조건의 51.5%)으로 가장 높았으며, toluene 성분과 ethylbenzene 성분이 주로 검출되었다. 실험기간 동안 B조건에서 방출되는 VOCs 성분들은 Fig. 7(c)와 같이 xylene 성분이 전체의 37%로 가구재료 및 바닥재료와 마찬가지로 VOCs 성분들 중에서 가장 많이 방출되는 것으로 조사되어 가구재료와 바닥재료, 벽지의 경우에는 재실자들의 건강상에 미치는 영향 등을 고려하여 xylene

성분의 방출을 최소화할 수 있는 방법들을 모색해야 할 것으로 보인다. 또한, trichlorofluoromethane 29%, toluene 18%, ethylbenzene 4%로 전체의 88% 이상을 차지하는 것으로 조사되었다. 그리고 실험조건별 개별 VOCs 성분들의 방출은 시간의 경과에 따라 특별한 경향은 없었으며, toluene 성분은 D 조건에서 18시간까지 증가하다가 시간의 경과에 따라 점점 감소하였고 trichlorofluoromethane 성분 역시 초기농도는 높았으나 시간의 경과에 따라 방출농도가 감소하였다. 반면, methylenechloride는 trichlorofluoromethane, toluene 성분과는 다르게 시간의 경과에 따라 농도가 점점 증가하는 특성을 보였다.

4) 페인트

건축 내장재로부터 방출되는 VOCs의 방출특성을 살펴보면 고체상태의 건축 내장재는 주로 내부확산에 의해 이루어지며, 액체상태의 건축 내장재는 시공 초기 표면증발에 의해 방출되다가 시간의 경과에 따라 내부 확산에 의해 방출되는 특성이 있다.¹⁰⁾ 페인트에서의 VOCs 방출특성은 다른 건축 내장재와는 다르게 온도의 영향 뿐만 아니라 습도의 영향을 많이 받는 것으로 조사되었다. 이러한 결과는 페인트가 완전히 건조되어 내부확산에 의한 방출이 일어나기 전에 일정한 습도가 지속적으로 유지될 경우 표면증발에 의한 VOCs 방출이 지속적으로 진행되어 상대적으로 습도가 높은 조건에서 VOCs의 방출이 많은 것으로 판단되며, 높은 온도조건보다는 높은 습도조건에서 TVOCs의 방출농도가 높게 조사된 외국의 연구 사례와 매우 유사하였다.¹⁸⁾ TVOCs 최대 방출농도는 Fig. 10과 같이 습도가 높은 B 조건(25°C, 50%)에서 12시간 경과 후 10.03 mg/m³으로 다른 실험조건에 비해 가장 높았으며, C(8.98

mg/m³), D(3.93 mg/m³), A(2.19 mg/m³) 조건순으로 나타났다. A, B, C 조건에서의 TVOCs 방출은 실험 초기인 12시간 이내에 최대 방출농도를 보였으며, 짧은 시간에 걸쳐 급격하게 감소하였으나 상대적으로 온도가 높은 D 조건(60°C, 4%)은 60시간 경과 후 TVOCs의 농도가 가장 높았고 시간의 경과에 따라 감소하였다. 실험 조건별로 TVOCs 농도가 가장 높은 최대 방출농도 시간대의 개별 VOCs 농도는 A와 C 조건에서는 trichlorofluoromethane 성분이 각각 0.50 mg/m³(A 조건의 23.1%)과 6.41 mg/m³(C 조건의 71.3%)이었으며, B 조건에서는 호흡기도와 피부, 눈의 자극, 혈액이상, 간 이상, 중추 신경 계통 억제 및 발암 위험 물질인¹⁶⁾ methylenechloride 성분이 4.83 mg/m³(B 조건의 48.2%), 그리고 D 조건에서는 호흡기도, 피부, 눈의 자극과 동물실험 결과 발암성 의심물질로 알려진¹⁶⁾ 1,3-dichloropropene 성분이 2.89 mg/m³(D 조건의 73.7%)으로 가장 높았으며, xylene과 toluene, dichlorobenzene 성분들이 주로 검출되었다. 또한, 습도가 상대적으로 높은 B 조건에서는 methylenechloride 뿐만 아니라 호흡기도, 피부와 눈의 자극 및 중추 신경 계통 억제를 유발하는¹⁶⁾ dichlorobenzene 성분이 4.12 mg/m³(B 조건의 41.0%)으로 methylenechloride 성분과 dichlorobenzene 성분이 전체의 89% 이상 방출되는 것을 알 수 있었다. 또한, 실험기간 동안 B 조건에서의 VOCs 구성비는 Fig. 7(d)와 같이 dichlorobenzene 성분이 전체의 36%로 가장 많았으며, methylenechloride, trichlorofluoromethane, toluene, xylene 성분들이 각각 27%, 14%, 7%, 6%로 전체의 90% 이상을 차지하였다.

5) 타일

타일은 다른 건축 내장재에 비해 TVOCs 방출농도가 매우 낮았고 TVOCs 최대 방출농도는 페인트와 유사하게 습도가 높은 B조건에서 6시간 경과 후 0.82 mg/m³으로 다른 조건에 비해 가장 높았으며, 12시간 경과 후 0.49 mg/m³으로 초기 농도의 약 50% 수준으로 빠르게 감소하였다. 실험 조건별 TVOCs 최대 방출농도는 D 조건과 C 조건의 경우 12시간 경과 후 각각 0.70 mg/m³, 0.63 mg/m³이었으며, A 조건에서는 6시간 경과 후 0.35 mg/m³으로 조사되었다. TVOCs 농도가 가장 높은 최대 방출농도 시간대의 개별 VOCs 농도를 살펴보면, A 조건과 C, D 조건에서는 xylene 성분이 그리고 B 조건에서는 trichlorofluoromethane 성분의 농도가 가장 높았으며, toluene과 styrene 성분들이 주로 검출되었다. 또한, 동일한 시점에서 A, C, D 조건의 경우 xylene 성분은 각각 0.19 mg/m³(A 조건의 53.9%),

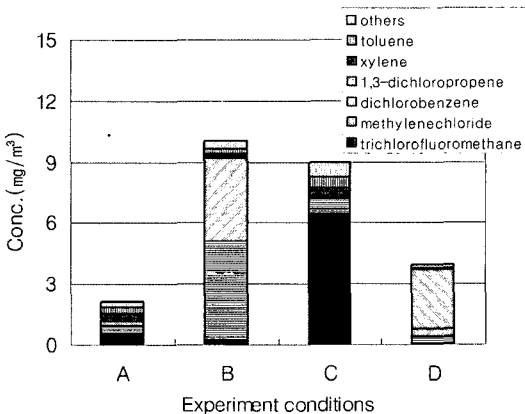


Fig. 10. TVOCs concentration of maximum emission time from paint material (A, B: 12 hr, C: 6 hr, D: 60 hr).

0.21 mg/m³(C 조건의 32.8%), 0.39 mg/m³ (D 조건의 54.9%)이었으며, B조건에서 trichlorofluoromethane 성분의 농도는 0.37 mg/m³(B 조건의 45.0%)이었다. 또한, 습도가 상대적으로 높은 B 조건에서는 trichlorofluoromethane 뿐만 아니라 xylene, toluene 성분들이 각각 0.22 mg/m³(B 조건의 26.6%), 0.12 mg/m³ (B 조건의 14.2%)으로 전체의 85.8% 이상이었으며, C 조건에서는 xylene 뿐만 아니라 trichlorofluoromethane, toluene 성분들이 각각 0.20 mg/m³(C 조건의 31.9%), 0.10 mg/m³(C 조건의 16.2%)으로 xylene, trichlorofluoromethane, toluene 성분들이 전체의 80.9% 이상 차지하였다. 실험기간 동안 B 조건에서 방출되는 VOCs 성분들의 구성비는 Fig. 7(e)와 같이 xylene 성분이 전체의 44%로 가장 많았고 trichlorofluoromethane, toluene, styrene 성분들이 각각 22%, 15%, 9%로 전체의 90% 이상이었다.

IV. 결 론

복합화학물질로 구성되어 있는 일부 건축 내장재에서 발생하는 VOCs의 종류와 시간의 경과에 따른 VOCs의 방출특성을 파악하기 위하여 건축물의 마감공사에 주로 사용되는 가구재료, 바닥재료, 벽지, 페인트, 타일을 대상으로 4가지의 온도와 습도 조건에서 소형챔버 실험을 실시하였으며, 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 챔버실험 결과 건축 내장재에서 발생하는 TVOCs의 방출특성은 각각의 건축 내장재에 따라 많은 차이를 보이고 있었다. TVOCs 방출농도는 5종류의 건축 내장재 중 가구재료에서 가장 높았고 바닥재료, 벽지, 페인트, 타일 순서였으며, 타일에서는 TVOCs의 방출농도가 다른 4종류의 건축 내장재에 비해 매우 낮았다. 또한, 대부분의 실험대상 건축 내장재에서는 특히, xylene, trichlorofluoromethane, methylenchloride 성분들이 고농도로 방출되었으며, 그 밖에 가구재료와 바닥재료에서는 ethylbenzene 성분이 그리고 벽지와 페인트, 타일에서는 toluene 성분들이 주로 많이 검출되었다.

2. 건축 내장재와 실험 조건별 시간의 경과에 따른 VOCs의 방출특성을 살펴보면, 대부분의 건축 내장재가 실험초기에 주로 고농도로 방출되는 것을 알 수 있었다. 가구재료, 바닥재료, 벽지는 상대적으로 높은 온도 조건에서, 그리고 페인트와 타일은 상대적으로 높은 습도 조건에서 TVOCs의 방출농도가 높아 가구재료, 바닥재료, 벽지는 온도의 영향을 많이 받는 것으로 나타

났으며, 페인트와 타일은 온도보다는 습도의 영향을 많이 받는 것으로 조사되었다. 또한, 가구재료의 경우 25°C, 50% 조건에서 방출되는 TVOCs의 농도는 시간의 경과에 따라 감소와 증가가 반복되었으며, 이러한 결과는 MDF로 구성된 가구재료가 TVOCs의 방출에 있어 흡착과 탈착의 과정이 반복된 것으로 판단된다. 벽지의 경우는 60°C, 4% 조건에서 toluene 성분과 trichlorofluoromethane 성분의 농도는 실험초기에 고농도였으며, 시간의 경과에 따라 감소하였으나 methylenchloride 성분의 농도는 이와 반대로 증가하는 특성을 보였다.

3. 건축 내장재별 일반적인 실내에서의 온도와 습도 조건인 25°C, 50% 조건에서 방출되는 VOCs 성분들의 구성비를 살펴보면, 가구재료와 바닥재료의 경우 xylene 성분이 각각 전체의 79%, 63%로 가장 많았고 벽지에서는 xylene 성분이 37%, trichlorofluoromethane 성분이 29%로 많은 부분을 차지하고 있었다. 또한, 페인트에서는 dichlorobenzene 성분과 methylenchloride 성분이 각각 36%, 27%로 가장 많았고 타일은 xylene과 trichlorofluoromethane 성분이 각각 44%, 22%로 전체의 65% 이상을 차지하고 있었다. 이러한 결과로 볼 때, 건축 건축물의 마감 및 내장공사와 리모델링에 사용되는 일부 건축 내장재에서는 다량의 VOCs가 방출될 뿐만 아니라 시공초기에 주로 고농도로 방출되는 것을 알 수 있었으며, 재실자의 건강상에 많은 악 영향을 줄 것으로 판단된다. 따라서 건축물의 마감 및 내장공사에 사용되는 건축 내장재는 VOCs 등 오염물질의 방출이 없거나 적은 재료를 선정하여 시공할 필요가 있으며, 온도와 습도 등의 다양한 조건에 따른 VOCs의 방출특성을 파악한 후 적절한 관리방안을 모색하여 보다 쾌적한 실내공기질을 확보하는 것이 매우 중요하다고 사료된다.

참고문헌

1. Korean Society for Atmospheric Environment : Atmospheric environment and volatile organic compounds, 1-7, 1998.
2. Anthony L. Hines, Tushar K. Ghosh, Sudarshan K. Loyalka, Richard C. Warder, Jr. : Indoor air quality and control, PTR Prentice Hall, Inc., New Jersey, 1-3, 1993.
3. Kim, Y.-S., Lee, E.-G., Yup, M.-J. and Kim, K.-Y. : Distribution and classification of indoor concentration of microorganisms in public buildings. *Korean Journal of Environmental Health*, 28(1), 85-92, 2002.
4. Ha, K.-C. : A study on volatile organic compounds

- (VOCs) in environmental tobacco smoke(ETS) at indoor office environments. *Korean Journal of Environmental Health*, **27**(3), 87-98, 2001.
5. Lee, J.-J., Kim, S.-D. and Boo, M.-J. : Variation of indoor air quality in museum. *Korean Journal of Environmental Health*, **22**(4), 43-48, 1996.
 6. Kim, J.-H., Kang, D.-H., Choi, D.-H., Kim, S.-S., Yeo, M.-S. and Kim, K.-W. : A study on the numerical analysis of VOCs emission from plywood floor material. *The Society of Air Conditioning and Refrigerating Engineers of Korea*, **17**(12), 1123-1131, 2005.
 7. Mølhave, L., Clausen, G., Berglund, B., De Ceaurriz, J., Kettrup, A., Lindvall, T., Maroni, M., Pickering, A. C., Risse, U., Rothweiler, H., Seifert, B. and Younes, M. : Total volatile organic compounds (TVOC) in indoor air quality investigations. *Indoor Air*, **7**, 225-240, 1997.
 8. John, C. S. Chang, Bruce A. Tichenor, Zhishi Guo and Kenneth A. Krebs : Substrate effects on VOC emissions from a latex paint. *Indoor Air*, **7**, 241-247, 1997.
 9. ECA(European Collaborative Action "Indoor air quality and its impact on man") : Total volatile organic compounds(TVOCs) in indoor air quality investigations, 1997.
 10. Seo, B.-R. : The characteristic of volatile organic compounds(VOCs) and formaldehyde emission from building materials, Master's thesis, University of Seoul, 2003.
 11. Kim, S.-D., Seo, B.-R. and Yoon, J.-S. : A study on volatile organic compounds(VOCs) and formaldehyde(HCHO) emission characteristics from furniture. *Korean Society for Atmospheric Environment Proceeding*, 163-164, 2001.
 12. ASTM D5116-97 : Standard guide for small-scale environmental chamber determinations of organic emissions from indoor materials/products, 1997.
 13. 壁紙材料協會 : 放散試験チャンバー法, 建築材料の揮発性有機化合物(VOC)及びアルデヒド類放散測定, 2000.
 14. Sparks, L. E., Guo, Z., Chang, J. C. and Tichenor : Volatile organics compound emissions from latex paint-Part2. Test house studies and indoor air quality(IAQ) modeling. *Indoor Air*, **9**, 18-25, 1999.
 15. Rikke Bramming Jørgensen, Tor Helge Dokka and Olav Bjørseth : Introduction of a sink- diffusion model to describe the interaction between volatile organics compounds(VOCs) and materials surfaces. *Indoor Air*, **10**, 27-38, 2000.
 16. Korea Ministry of Labor : Material Safety Data Sheet(MSDS), 2005.
 17. Yuji Ataka, Shinsuke Kato, Shuzo Murakami, Qingyu Zhu, Kazuhide Ito and Tomohiro Yokota : Study of effect of adsorptive building material on formaldehyde concentrations: development of measuring methods and modeling of adsorption phenomena. *Indoor Air*, **14**(8), 51-64, 2004.
 18. Fariborz haghghat, Lisa de bellis : Material emission rates-Literature review, and the impact of indoor air temperature and relative humidity. *Building and Environment*, **33**(5), 261-277, 1998.