

## 건축용 바닥재로부터의 VOCs와 Aldehydes 방출 특성

장성기\* · 김미현 · 서수연 · 이우석 · 임준호 · 임정연

국립환경과학원 실내환경과  
(2006. 9. 6. 접수. 2006. 10. 10. 승인)

### Characteristics for VOCs and aldehydes emission rates from architectural flooring

Seong-Ki Jang\*, Mi-Hyun Kim, Soo-yun Seo, Woo-suk Lee, Jun-ho Lim and Jeong-yun Lim

Indoor Air Quality Division, National Institute of Environmental Research, Incheon, Korea

(Received September 6, 2006; Accepted October 10, 2006)

**요약:** 본 논문은 소형챔버법을 이용해 바닥재 종류에 따른 방출농도특성을 알아보고자 수행되었다. 환경학적 관심사가 높은 개별 휘발성유기화합물(VOC) 및 총휘발성유기화합물(TVOC)을 측정대상물질로 선정하여 HPLC 및 GC/MSD를 이용하여 분석하였다. 바닥재에서 방출된 TVOC 및 포름알데히드(HCHO)의 평균방출농도는 각각  $0.3 \text{ mg/m}^2\cdot\text{h}$ 와  $0.2 \text{ mg/m}^2\cdot\text{h}$ 로 나타났으며 37개 바닥재 모두 방출기준을 만족하는 것으로 조사되었다. TVOC 방출농도는 PVC Sheet, PVC Tile, 마루 순으로 나타났으며, 반면 HCHO 방출농도는 PVC 계열보다 마루 제품에서 높게 나타나는 경향을 보였다.

**Abstract:** Emission tests were carried out to investigate the characteristics of concentration according to flooring sort using small chamber method. The target Volatile Organic Compounds (VOC) included 27 individual compounds of environmental concern, which were determined by adsorption sampling and thermal desorption coupled with GC/MS method and by DNPH cartridge/HPLC method. The emission factor of Total Volatile Organic Compounds (TVOC) and Formaldehyde (HCHO) was detected  $0.3 \text{ mg/m}^2\cdot\text{h}$  and  $0.2 \text{ mg/m}^2\cdot\text{h}$  respectively, and the floorings of 37 (9 PVC Tile, 10 PVC Sheet, 18 Flooring) were satisfied emission standard. TVOC emission factor appeared in order of concentration of PVC Sheet, PVC Tile, and floor flooring, while HCHO was detected very high emission factor (as  $0.4 \text{ mg/m}^2\cdot\text{h}$ ) at floor flooring above PVC series (as  $0.001 \text{ mg/m}^2\cdot\text{h}$ ).

**Key words:** small chamber method, TVOC, HCHO, toluene, PVC sheet flooring, floor flooring

### 1. 서 론

에너지 절약을 위한 단열재와 같은 건축자재의 사용과 경제수준 향상에 따른 다양한 생활용품(Consumer

Products)의 사용으로 예기치 않은 오염물질들이 방출되어 실내공간에서 생활하는 거주자가 일명 ‘빌딩증후군(Sick Building Syndrome)’ 및 ‘화학물질과민증(Multi-Chemical Sensitivity)’ 등에 대한 질환을 호소하게 됨

★ Corresponding author

Phone : +82-(0)32-560-7360 Fax : +82-(0)32-560-7365

E-mail: skjang@me.go.kr

로써 실내공기오염에 대한 인식이 새로운 사회적 관심사로 부각되었다.<sup>1</sup> 또한, 도시인의 생활양식과 직장인의 근무형태에도 큰 변화를 가져와 현대 도시인의 경우 약 80~90% 이상의 시간을 실내에서 영위하고 있는 것으로 보고되고 있다.<sup>2,3</sup> 따라서, 유아나 노약자 및 주부들의 경우 거의 모든 시간을 실내공간에서 생활함으로써 쾌적한 실내환경에 대한 인식이 새롭게 부각되기에 이르렀다. 선진 각국에서는 실내공기질을 하나의 새로운 환경문제로 인식하고 이에 대한 연구를 활발히 진행하고 있으며, 특히 미국 환경청(Environmental Protection Agency)에서는 실내공기오염을 미국이 직면한 가장 시급히 처리해야 할 5대 환경문제 중의 하나로 보고, 실내공기질에 대한 연구를 적극 권장·지원하고 있다.<sup>4</sup> 실내공기에는 물리적, 화학적, 생물학적으로 다양한 오염물질이 존재할 가능성이 항상 내재되어 있으며, 오염물질의 발생원 측면에서 살펴보면 실외공기에서 기인하는 오염물질, 건물자재에서 발생하는 오염물질과 거주자의 활동에서 기인하는 물질 등의 세 가지 부류로 구분할 수 있다. 또한, 실내환경에서 최근 관심을 끌고 있는 오염물질 종류는 포름알데히드를 포함한 알데히드류, 벤젠을 포함한 방향족탄화수소 및 불완전 연소과정에서 주로 배출되는 반휘발성유기화합물인 다환방향족 탄화수소 등을 들 수 있다.<sup>5</sup> 따라서, 본 연구는 실내공기질을 악화시키는 여러 요인 중 건물자재에서 발생하는 포름알데히드를 포함한 알데히드류와 휘발성유기화합물(VOC)에 대한 연구를 수행하고자 건축자재 중 바닥재를 소형챔버법을 이용해 방출시험을 실시하였다. 일반적으로 포름알데히드, 그 외 알데히드류, 테르펜 탄화수소의 주요 배출원은 바닥재 중 마루용으로 알려져 있으며,<sup>6</sup> 그 중 포름알데히드는 국제암연구센터(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 분류한 발암물질 B1 등급으로 인체에의 발암성은 입증되지 않았으나 동물실험에서는 발암물질로서 입증되어 인체에 큰 위해성을 줄 수 있는 물질로 간주되고 있다.<sup>7,9</sup> 이에 본 연구는 마루제품과 PVC 계열 제품에 대한 방출시험을 통해 바닥재 종류별 오염물질 방출특성 및 개별 VOC 물질의 농도 분포특성을 파악하고 방출농도 기준 적합여부를 파악하고자 하였다.

## 2. 실험

### 2.1. 방출시험방법

본 연구에 사용된 방출시험법은 실내공기질공정시험방법에 준한 소형챔버법으로 챔버내의 공기농도와

챔버를 통과하는 공기의 적산유량 및 시험편의 표면적을 구하여, 시험대상인 건축재료의 단위면적당 휘발성유기화합물 및 포름알데히드 방출량을 측정하는 방법이다. 일반적으로, 건축물의 내장재로 적용되는 판, 판넬 및 보드 등 판상형태와 벽지, 카펫, 바닥재 등 롤(Roll)형태의 고상제품은 제작된 시편을 챔버에 넣은 후 7일 후에 방출량을 측정하고, 내장 마감을 위한 페인트와 내장재의 시공에 사용되는 접착제와 같은 액상제품은 3일후에 방출량을 측정한다. 또한, 고상제품은 시편 제작 후 바로 챔버 내에 설치하고, 액상의 경우 접착제는 상온에서 60분간, 유성 페인트는 24시간, 수성페인트는 48시간 건조시킨 후 챔버 내에 설치를 원칙으로 한다. 방출시험 시 챔버 내 청정공기 환기횟수는 0.5회/h로, 온습도는 각각  $25 \pm 1^\circ\text{C}$ ,  $50 \pm 5\%$ 의 범위를 유지하여야 하며, 챔버배경농도는 총휘발성유기화합물(Total volatile organic compounds, 이하 TVOC)은  $20 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하, 포름알데히드는  $5 \mu\text{g}/\text{m}^3$  이하를 만족하여야 한다. 외국의 소형챔버방출시험법으로는 ASTM(American Society for Testing and Materials) D5116-97, JIS(Japanese Industrial Standard) A 1901, ENV(European prestandard) 13419-1, 13419-2, ISO (International Organization for Standardization) 16000-9, 16000-10 등이 있으며, 소형챔버법 이외에 FLEC법(Field and Laboratory Emission Cell)은 시료채취가 용이하고, 시험실 내에서의 건축자재 방출시험은 물론, 현장에서의 실내공기측정 및 준공 건물 구조체에서 발생하는 오염물질 측정이 가능한 방법으로 소형챔버법을 대응할 만 한 것으로 알려져 있다.<sup>10</sup>

### 2.2. 시편 제작 및 시료채취방법

일반적으로 바닥재는 크게 PVC Tile, PVC Sheet, 마루로 구분되며, 본 방출시험에 사용된 바닥재는 15개 제조업체로부터 생산된 PVC Tile 9개, PVC Sheet 10개, 마루 18개를 대상으로 하였다. 선정된 바닥재는 알루미늄 재질의 포장재로 싸고 테프론 백(teflon bag)으로 밀봉하여 방출시험과 동일한 온습도 조건으로 보관하였으며, 시편은 방출시험 직전에 시료부하율(Product loading factor)  $2.2 \text{ m}^2/\text{m}^3$ 로 제작하여, 온·습도 및 배경농도 기준을 만족하는 소형 챔버에 넣어 7일후에 시료채취 하였다. 여기서 시료부하율이란 시험편의 표면적( $147 \text{ mm} \times 147 \text{ mm} \times 2$ )과 소형 챔버 용적(20 L)의 비율을 의미한다. TVOC는 Tenax-TA 200 mg이 충전된 흡착관( $1/4" \times 9 \text{ cm}$ , Perkin Elmer, UK)을 이용하여 167 ml/min 유량으로 20분간, 포름알데히드는

오존스크러버와 2,4-DNPH 카트리지를 이용해 167 ml/min 유량으로 60분간 시료채취 하였다. 채취에 사용된 흡착관과 챔버는 깨끗한 상태로 전처리(conditioning)하여 사용하였다. 소형챔버는 초순수로 3회 세척하고 260°C에서 20분간 가열 한 다음 온도를 점차적으로 60°C, 30°C로 낮춘 후 방출시험 전까지 항온조에 넣어 보관하였으며, 흡착관은 자동 전처리 장치인 ATC 1200 (ACEN Tube Conditioner)을 이용해 고순도 질소가스가 분당 100 ml로 흐르는 조건 하에서 320°C에서 1시간 전처리 하였다. 본 연구의 시편 제작 및 시료채취는 실내공기질공정시험방법을 따랐다.<sup>11</sup>

### 2.3. 시료분석방법

측정대상물질은 TVOC와 출현빈도가 높거나 독성이 강한 개별 VOC 및 포름알데히드를 포함한 알데히드류로 선정하였다. 채취된 분석대상물질은 각각 TD/GC/MS와 HPLC를 이용하여 분석하였으며, 액체상 표준혼합물질(Japanese Indoor Air Standards Mixture: VOC, Supelco CARB Carbonyl-DNPH Mixture 1: 알데히드류)을 사용하여 감응계수 및 검량선을 작성하여 농도를 정량하였다. 분석대상물질 시료 분석에 사용된 STD-1000과 GC/MS, HPLC의 작동조건은 Table 1, 2에 나타내었다. TVOC 방출농도( $\text{mg}/\text{m}^2\cdot\text{hr}$ ) 계산은 톨루엔 검량선으로 농도( $\text{mg}/\text{m}^3$ )를 구한 후<sup>12,13</sup> 시료부하율과 환기 회수를 각각 나누고 곱하여 계산하였다. 한편, Tenax-TA가 충전된 흡착관, DNPH 카트리지를, 소형 챔버에 대한 blank 농도는 정량 시 보정하여 바닥재에서만 발생하는 오염물질농도를 나타내었다.

### 2.4. 측정정도관리

소형챔버법에 대한 전반적인 성능을 평가하기 위하여 온·습도 및 배경농도, 열탈착장치 및 챔버 회수율,

Table 2. Operating conditions for aldehyde analysis with HPLC

HPLC system	Shimadzu LC-10Avp
Injector	Shimadzu SIL-10ADvp
Analytical Column	ACE 5 C-18(250 mm×4.6 mm×5 μm)
Detector	UV-VIS Detector, Shimadzu
Mobile phase	20% THF containing water (A)/CH <sub>3</sub> CN (B)
Gradient Elution	0~20 min : A/B = 80/20 → 40/60 20~22 min : A/B = 50/60 → 80/20
Detection	Absorbance at 360 nm
Flow Rate	1.0 ml/min
Injection Volume	20 μl

기기 감도 재현성, 시료 중복·반복채취에 대한 재현성, 기기 검출한계 및 흡착관 파과 시험을 수행하였다. 온·습도는 각각 24~25°C, 48~51%의 범위를 보여 소형챔버법에 명시된 기준을 만족하는 것으로 나타났으며, 챔버 배경농도도 기준치 이내로 검출되었다. 또한, 기기감도 및 중복·반복시료채취의 재현성은 20~30% 이내로 나타났으며, 열탈착장치 및 소형챔버에 대한 회수율은 80%이상으로 전반적으로 양호한 성능을 보였으며, 파과역시 일어나지 않아 시료채취에 의한 시료손실은 없었다. 건축자재 방출시험방법 및 측정정도 관리에 대한 상세한 내용은 이미 별도로 상세히 논한 바 있다.<sup>14,15</sup>

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. VOCs 및 Aldehydes 방출농도 분포특성

건축자재 중 PVC 계열 바닥재(PVC Tile 9개, PVC Sheet 10개) 19개와 마루바닥재 18개를 대상으로 하여 바닥재로부터 방출되는 휘발성유기화합물과 알데히드류의 종류와 농도를 파악하였다. Fig. 1에 현 다중이

Table 1. Operating conditions for thermal desorption and GC/MS analysis

STD 1000 (DANI, Italy)		GC/MSD(Shimadzu GC-2010, Japan)	
Purge Temp and time.	40°C, 0.5 min	GC Column	VB-1(0.25 mm, 60 m, 1.0 μm)
Desorb time and flow	15 min, 50 ml/min	Initial Temp.	40°C (6 min)
Desorb Temp.	250°C	Oven Ramp Rate 1	4°C/min (40~180°C)
Cold trap holding time	15 min	Oven Ramp Rate 2	20°C/min (180~250°C)
Cold trap high temp.	250°C	Final Temp.	250°C (10 min)
Cold trap low temp.	-10°C	Column Flow	1.5 ml/min
Cold trap packing	Tenax TA	MS Source Temp.	200°C
Split	No	Detector Type	EI (Quadropole)
Valve temp.	200°C	Mass Range	35~300 amu
Transfer line temp.	200°C	Electron Energy	70 eV

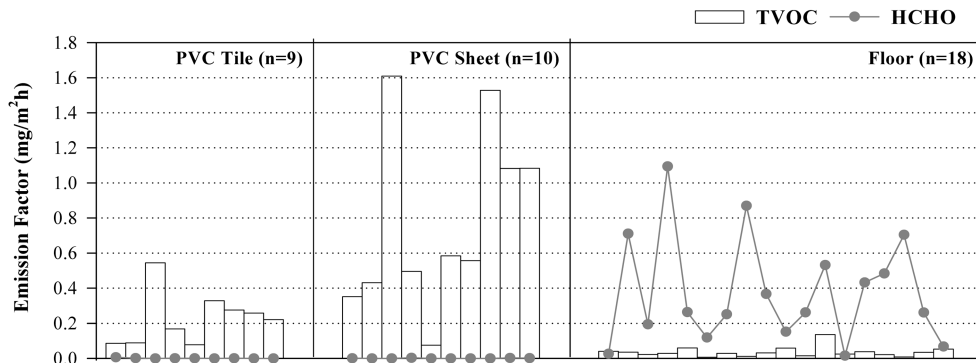


Fig. 1. Emission factor of TVOC and HCHO for each flooring.

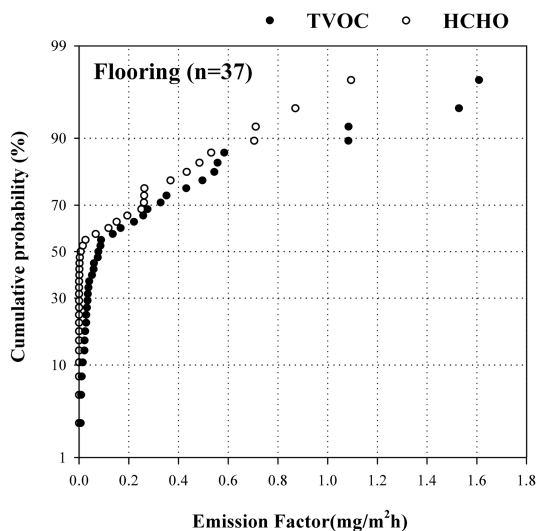


Fig. 2. Cumulative distribution of TVOC and HCHO in flooring (linear scale).

용시설 등의 실내공기질관리법에 제시된 관리대상 오염물질인 TVOC와 포름알데히드의 방출농도를 막대 그래프로 나타내 놓았다. 37개 바닥재에서 검출된 TVOC와 포름알데히드의 방출농도는 방출농도기준 (TVOC 4 mg/m<sup>2</sup>·h, 포름알데히드 1.25 mg/m<sup>2</sup>·h)을 만족하는 것으로 나타났으며, PVC 계열은 TVOC 농도가, 마루제품은 포름알데히드 농도가 상대적으로 높게 검출되었다. 또한, 마루제품은 TVOC 방출농도가 0.1 mg/m<sup>2</sup>·h 이하로 아주 낮은 농도를 보여주었다. TVOC와 포름알데히드의 37개 자료를 이용해 방출농도 누적확률 분포도를 Fig. 2에 나타내 놓았다. TVOC는 0.01~1.61 mg/m<sup>2</sup>·h, 포름알데히드는 N.D.~1.09 mg/m<sup>2</sup>·h로 검출되었고, TVOC와 포름알데히드는 비선형의 유사한 농도분포를 보여 단일물질인 포름알데히드의 농

도가 상대적으로 높게 검출되고 있음을 알 수 있었다. 바닥재는 가공 시 사용되는 접착제의 종류에 따라 포름알데히드 방출량이 결정되므로, 포름알데히드수지계 접착제 선정 시 구성성분을 세밀히 점검하여 사용하여야 한다. 예를 들면 포름알데히드수지계 접착제 중 포르말린 함량이 2% 이하인 요소수지와 55%인 멜라민 수지가 국내 시판되고 있어 구성성분 함량차가 상당히 높게 나타남을 알 수 있었다. 외국의 경우 포르말린 함량이 적은 요소수지를 이용한 목재 가공 역시 피해야 한다<sup>6</sup>고 언급하고 있어 국내 실정과 비교했을 때 강화된 기준이 적용되고 있음을 확인 할 수 있었다. 검출된 농도 중 90% 즉 33개 바닥재의 농도가 0.6 mg/m<sup>2</sup>·h 이하의 농도분포를 보였으며, 50%에 해당하는 17개 제품은 0.1 mg/m<sup>2</sup>·h 이하로 방출되었다 (Fig. 2). 방출기준과 비교했을 때 아주 낮은 농도를 보였으나, 농도단위(μg/m<sup>3</sup>)로 환산된 개별 VOC와 알데히드류의 세밀한 조사를 통해 바닥재의 오염물질 방출여부를 논할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 3.2. 바닥재 종류별 방출농도비교

방출농도에 대한 평균, 중앙값, 표준편차, 최대값, 최소값을 Table 3에 정리해 놓았으며, 평균농도와 표준편차를 이용한 바닥재종류별 비교그래프는 Fig. 3에 나타내 놓았다. TVOC 방출농도는 PVC Sheet, PVC Tile, 마루제품 순으로 조사되었다. PVC 시트는 0.78 mg/m<sup>2</sup>·hr로 방출되어 PVC 타일 0.23 mg/m<sup>2</sup>·hr 보다 약 3배정도 높게 나타났으며, 마루 제품에 비해 약 20 배 정도 높은 평균방출농도를 보였으며, 표준편차 역시 높게 나타나 농도범위가 넓게 분포되어 있음을 알 수 있었다. 바닥재 중 마루제품은 0.04 mg/m<sup>2</sup>·hr로 가장 낮은 농도를 보여주었다. 그 외 카펫타일과 마모류의 경우 한번의 방출농도 실험으로 대표성을 나타낼

Table 3. Emission factor of TVOC & HCHO for flooring (unit : mg/m<sup>2</sup>·h)

	Flooring (n=37)		PVC Tile (n=9)		PVC Sheet (n=10)		Floor (n=18)	
	TVOC	HCHO	TVOC	HCHO	TVOC	HCHO	TVOC	HCHO
Mean	0.28	0.184	0.23	0.001	0.78	0.001	0.04	0.378
Median	0.08	0.006	0.22	0.000	0.57	0.000	0.03	0.263
S.D.*	0.41	0.283	0.15	0.002	0.52	0.001	0.03	0.304
Minimum	0.01	N.D.	0.08	N.D.**	0.08	N.D.	0.01	0.015
Maximum	1.61	1.094	0.54	0.006	1.61	0.003	0.14	1.094

\* : Standard Deviation, \*\* : Not detected

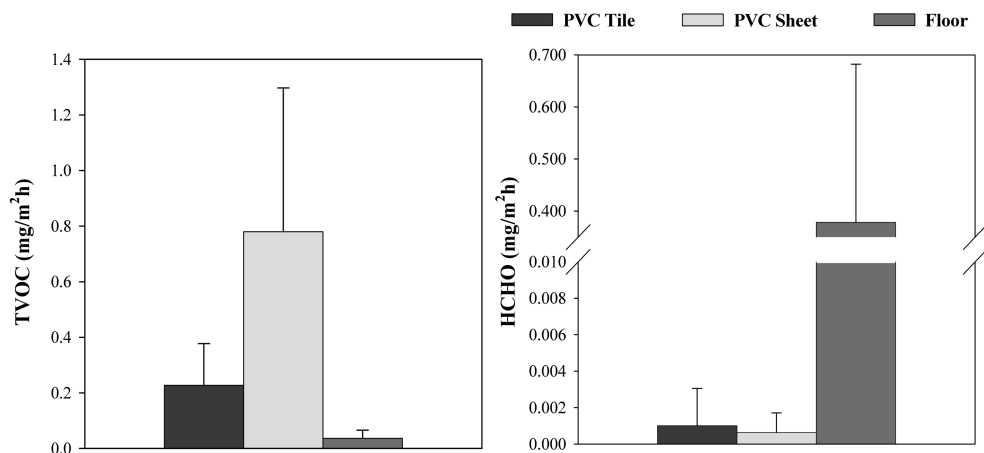


Fig. 3. Comparison of TVOC and HCHO emission factor from different source flooring.

수는 없으나, TVOC 농도가 각각 2.13 mg/m<sup>2</sup>·hr과 1.73 mg/m<sup>2</sup>·hr로 다른 바닥재에 비해 농도가 월등히 높게 검출되었다.

포름알데히드는 마루제품을 제외하고는 0.006 mg/m<sup>2</sup>·hr 이하로 낮은 농도분포를 보였으나, 마루제품은 평균농도 0.378 mg/m<sup>2</sup>·hr, 농도범위 0.015~1.094 mg/m<sup>2</sup>·hr로 높은 농도를 보여 마루바닥재만의 농도분포 특성을 보여주었다. 특히, 온돌마루의 평균방출농도는 0.470 mg/m<sup>2</sup>·hr로 전체 마루제품(강화마루, 강마루 등) 농도 보다 높게 나타나는 경향을 보여주었다. PVC의 경우 시트와 타일 모두 0.001 mg/m<sup>2</sup>·hr로 검출되었다.

온돌마루의 TVOC는 다른 제품에 비해 낮게 방출되었으나, 포름알데히드는 높은 방출농도를 보여 제품의 품질 개선이 균형 있게 이루어져야 함을 보여주었다.

### 3.3. 바닥재에서 방출되는 개별 VOC 농도분포

바닥재종류별 개별 VOC의 평균농도를 정리하여 Table 4와 Fig. 4에 나타내 놓았다. 여기서, 평균농도는 시료부하율과 환기횟수를 적용하여 계산되는 방출

농도 전 단계 농도를 의미한다. 전반적으로 PVC Sheet 바닥재의 방출량이 다른 바닥재에 비해 3~5배 정도 높게 나타났으며, 바닥재 종류에 상관없이 톨루엔 농도가 가장 높게 검출되어 전체 정량된 농도의 약 30%를 차지하였다. 또한, 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌이 전체 오염물질에 차지하는 비율은 50% 이상으로 나타나 오염물질 방출량에 상당한 기여를 하고 있음을 확인 할 수 있었다. 파라핀족 탄화수소 중에는 데칸이 다른 물질에 비해 높게 나타났으며, 다음으로 테트라데칸이 검출되었다. PVC Sheet 바닥재는 스타타렌,  $\alpha$ -피넨,  $\beta$ -피넨, *d*-리모넨을 제외한 모든 물질에서 높은 농도를 보여 방향족 및 파라핀족 탄화수소 계통 오염물질의 검출빈도와 검출량이 모두 높게 나타남을 알 수 있었다. 특히, 톨루엔, 부틸아세테이트, 에틸벤젠, 자일렌, 데칸, 테트라데칸은 상당히 높은 농도로 나타났으며, 톨루엔농도는 124.6  $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 마루제품에 비해 약 9배 정도의 차이를 보여주었다. 데칸 농도 역시 48.3  $\mu$ g/m<sup>3</sup>로 고농도를 보여 주었다. PVC Tile과 마루제품은 파라핀족 탄화수소 보다 방향족 탄화수소 계통의 방출량이 다소 많은 것으로 나타났

Table 4. Summary of VOC mean emission concentration for flooring (unit :  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Compounds		Flooring (n = 37)	PVC Tile (n = 9)	PVC Sheet (n = 10)	Floor (n = 18)
1	Toluene	55.8 ± 72.3	63.0 ± 67.5	124.6 ± 86.1	13.9 ± 18.3
2	<i>n</i> -Butyl acetate	26.8 ± 4.6	0.2 ± 0.5	77.0 ± 99.0	12.2 ± 39.4
3	Ethylbenzene	18.5 ± 32.4	4.1 ± 3.3	43.0 ± 13.3	13.3 ± 28.4
4	<i>m,p</i> -Xylene	15.0 ± 30.5	6.8 ± 7.6	46.7 ± 45.6	1.5 ± 4.3
5	Styrene	3.5 ± 9.4	4.5 ± 8.5	0.8 ± 0.8	4.5 ± 12.1
6	<i>o</i> -Xylene	8.4 ± 17.9	2.8 ± 4.3	17.2 ± 27.1	6.3 ± 14.6
7	$\alpha$ -Pinene	1.1 ± 2.8	N.D.*	0.4 ± 0.9	2.0 ± 3.7
8	<i>p</i> -Ethyltoluene	1.5 ± 2.8	1.8 ± 1.8	3.8 ± 4.3	0.2 ± 0.5
9	$\beta$ -Pinene	0.2 ± 0.9	N.D.	0.1 ± 0.2	0.5 ± 1.2
10	1,2,4-trimethylbenzene	3.9 ± 5.1	2.6 ± 3.1	5.5 ± 6.4	3.6 ± 5.2
11	<i>n</i> -Decane	15.3 ± 44.0	9.2 ± 8.5	48.3 ± 77.3	N.D.
12	1,3,5-trimethylbenzene	1.0 ± 2.1	1.1 ± 1.4	1.8 ± 2.4	0.6 ± 2.1
13	<i>d</i> -Limonene	0.4 ± 1.4	N.D.	0.2 ± 0.3	0.7 ± 2.0
14	<i>n</i> -Dodecane	6.2 ± 16.7	4.3 ± 7.5	14.0 ± 30.8	2.8 ± 3.8
15	<i>n</i> -Tridecane	3.2 ± 4.7	2.3 ± 5.5	6.1 ± 5.7	2.0 ± 2.8
16	<i>n</i> -Tetradecane	14.7 ± 27.1	7.0 ± 14.1	25.5 ± 46.5	12.5 ± 14.7
17	<i>n</i> -Pentadecane	3.8 ± 8.6	4.9 ± 9.3	8.2 ± 13.3	0.8 ± 0.6
18	<i>n</i> -Hexadecane	2.6 ± 4.9	2.8 ± 4.1	3.3 ± 8.0	2.0 ± 2.8

\* : Not detected

Table 5. Ranking of mean emission concentration for target compounds in flooring (unit :  $\text{mg}/\text{m}^3$ )

Order	Flooring(n=37)		PVC Tile(n=9)		PVC Sheet(n=10)		Floor(n=18)	
	Compounds	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ %*	Compounds	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ %	Compounds	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ %	Compounds	$\mu\text{g}/\text{m}^3$ %
1	Formaldehyde	796.5 70	Toluene	63.0 100	Toluene	124.6 100	Formaldehyde	1633.8 100
2	Toluene	55.8 92	<i>n</i> -Decane	9.2 78	<i>n</i> -Butyl acetate	77.0 50	Toluene	13.9 83
3	<i>n</i> -Butyl acetate	26.8 27	<i>n</i> -Tetradecane	7.0 22	<i>n</i> -Decane	48.2 100	Ethylbenzene	13.3 61
4	Ethylbenzene	18.5 76	<i>m,p</i> -Xylene	6.8 89	<i>m,p</i> -Xylene	46.7 90	<i>n</i> -Tetradecane	12.5 89
5	<i>n</i> -Decane	15.3 49	<i>n</i> -Pentadecane	4.9 44	Ethylbenzene	40.8 90	<i>n</i> -Butyl acetate	12.2 22
6	<i>m,p</i> -Xylene	15.0 60	Styrene	4.5 100	<i>n</i> -Tetradecane	25.5 90	<i>o</i> -Xylene	6.3 78
7	<i>n</i> -Tetradecane	14.7 73	Formaldehyde	4.3 67	<i>o</i> -Xylene	17.2 90	Styrene	4.5 33
8	<i>o</i> -Xylene	8.4 84	<i>n</i> -Dodecane	4.3 44	<i>n</i> -Dodecane	14.0 90	1,2,4-TMB	3.6 72
9	<i>n</i> -Dodecane	6.2 51	Ethylbenzene	4.1 89	<i>n</i> -Pentadecane	8.2 90	<i>n</i> -Dodecane	2.8 61
10	1,2,4-TMB**	3.9 81	<i>o</i> -Xylene	2.9 89	<i>n</i> -Tridecane	6.1 90	<i>n</i> -Hexadecane	2.0 56

\* : Detection frequency percent, \*\* : Trimethylbenzene

며,  $\alpha$ -피넨,  $\beta$ -피넨, *d*-리모넨은 마루 제품이 다른 바닥재에 비해 3~5배 정도 높게 검출되었다. 같은 PVC 계열 이지만 Tile이 Sheet에 비해 오염물질 방출이 낮게 나타나는 경향을 보여주었으며, 톨루엔은  $63.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2배 정도 낮은 농도로 검출되었다.

개별 VOC 및 포름알데히드의 농도순과 검출빈도를 Table 5에 정리해 놓았다. 전반적으로 톨루엔, 에틸벤젠, 자일렌, 데칸류의 농도 및 검출빈도가 높게 나타남을 수치로 확인 할 수 있었다. PVC 바닥재는 톨루

엔이 100%의 검출빈도를 보였고, 마루제품은 포름알데히드가 100% 검출되었다. 종류별로 살펴보면 PVC Tile은 스티렌이 100% 검출되었으며, PVC Sheet는 10 순위에 포함된 물질모두 80% 이상의 검출빈도를 보였으며, 농도 또한 높게 나타났다. 마루제품에서는 포름알데히드가 상당히 고농도로 검출되었으며, 1,2,4-트리메틸벤젠도 검출되는 특성을 보여주었다. 한편, 할로젠화 탄화수소는 바닥재 모두에서 검출되지 않거나 저농도 수준을 보여주었다.

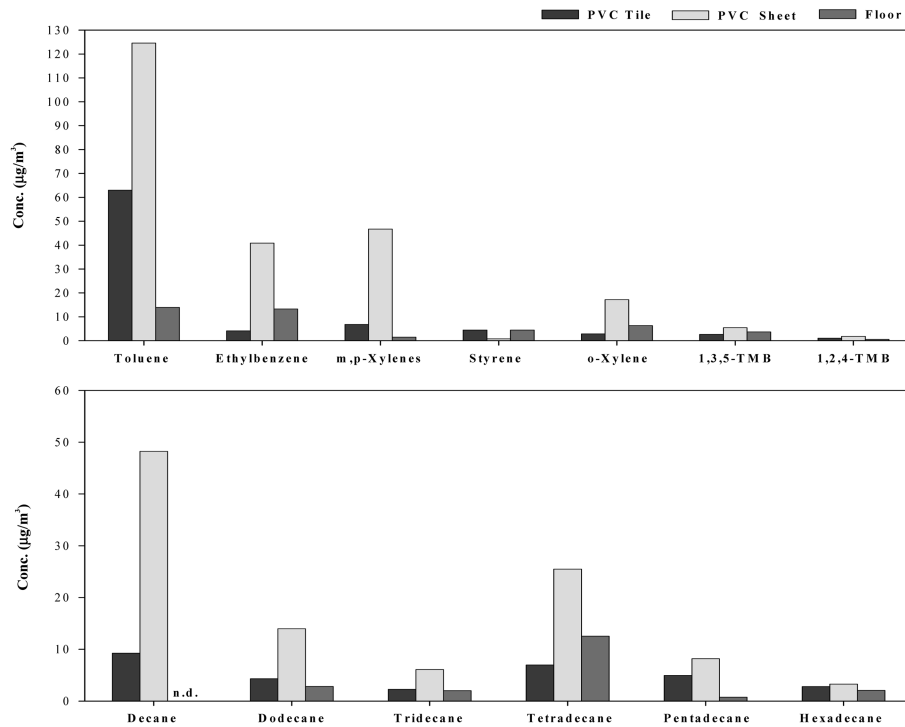


Fig. 4. Comparison of VOC concentration of each flooring.

Table 6. Summary of carbonyls mean emission concentration for flooring

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

Compounds	Flooring (n = 19~37)	PVC Tile (n = 9)	PVC Sheet (n = 10)	Floor (n = 18)
1 Formaldehyde	796.5 ± 1224.0 (N.D. ~4727.6)	4.3 ± 8.9 (N.D.*~27.2)	2.2 ± 4.6 (N.D.~13.4)	1633.8 ± 1314.1 (65.3~4727.6)
2 Acetaldehyde	11.6 ± 23.6 (N.D.~102.5)	8.5 ± 11.3 (N.D.~34.6)	14.5 ± 32.3 (N.D.~102.5)	N.A.**
3 Acetone	6.9 ± 11.2 (N.D.~31.0)	10.3 ± 13.1 (N.D.~42.1)	3.9 ± 9.6 (N.D.~31.0)	N.A.
4 Acrolein	N.D.	N.D.	N.D.	N.A.
5 Propionaldehyde	15.9 ± 31.7 (N.D.~120.1)	8.4 ± 15.2 (N.D.~38.1)	21.1 ± 40.1 (N.D.~120.1)	N.A.
6 Btyraldehyde	5.7 ± 7.5 (N.D.~33.9)	4.0 ± 2.9 (N.D.~7.8)	7.1 ± 10.2 (N.D.~33.9)	N.A.
7 Benzaldehyde	7.3 ± 13.7 (N.D.~57.5)	15.5 ± 17.4 (N.D.~57.5)	N.D.	N.A.
8 Nonanal	6.9 ± 12.5 (N.D.~58.7)	2.7 ± 3.1 (N.D.~7.7)	8.3 ± 17.9 (N.D.~58.7)	8.3 ± 12.0 (N.D. ~ 37.5)
9 Decanal	8.4 ± 34.1 (N.D.~204.6)	4.9 ± 9.6 (N.D.~29.8)	26.1 ± 63.8 (N.D.~204.6)	0.4 ± 0.7 (N.D. ~ 1.9)

\* : Not detected, \*\* - : Not available

## 3.4. 바닥재에서 방출되는 알데히드류 농도분포

바닥재에서 발생하는 알데히드류의 방출분포를 Table 6에 나타내 놓았다. 여기서, 농도는 시료부하율

과 환기횟수를 적용하여 계산되는 방출농도 전 단계 농도로 정리하였다. 바닥재 종류별 방출특성을 보면 마루제품의 경우 포름알데히드의 평균농도가 1633.8

$\mu\text{g}/\text{m}^3$ 로 상당히 고농도로 검출되었으며, 최소값은  $65.3 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 PVC 계열 바닥재의 최대값보다 2.5배 정도로 높게 나타나, 마루제품은 포름알데히드의 주배출원으로 판단되었다. 데칸알은 다른 바닥재에 비해 낮게 나타났다. PVC 계열 바닥재에서 PVC Tile은 포름알데히드, 아세트, 벤즈알데히드 농도가 PVC Sheet에 비해 높게 나타났으며, 그 외 악취유발물질로 설정된 아세트알데히드, 프로피온알데히드, 부티르알데히드와 노난알, 데칸알은 PVC Sheet에서 더 많이 방출되었다. 한편, 아크롤레인은 검출되지 않는 특성을 보여주었다. 전반적으로 포름알데히드를 제외하면 PVC Sheet에서 최대값이 검출되어 PVC Tile에 비해 알데히드류의 방출량이 많은 것으로 조사되었다. 하지만, 본 연구에서 측정분석한 PVC Sheet 중에서 알데히드류가 전혀 검출되지 않는 제품도 있어 바닥재의 종류에 따라 다양한 농도분포를 하고 있음을 확인 할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구는 실내공기질에 영향을 미칠 것으로 예상되는 건축자재 중 바닥재 37개(PVC Tile 9개, PVC Sheet 10개, 마루 18개)를 대상으로 방출시험을 수행하여 바닥재 종류에 따른 농도분포특성을 파악하여 다음과 같은 결론을 얻었다. 본 방출시험에 대한 측정정도관리 재현성은 양호한 결과를 보여 측정 분석된 방출농도 자료는 신뢰할 만한 수준으로 나타났다. TVOC 방출농도를 백분율로 환산하면 PVC Sheet는 74.7%, PVC Tile은 21.8%, 마루는 3.5%의 비율을 보여 방출농도는 PVC Sheet, PVC Tile, 마루 순으로 나타났다. 포름알데히드는 각각 마루 99.6%, PVC Tile 0.3%, PVC Sheet 0.1%의 방출비율을 보여 마루가 월등히 많은 양의 포름알데히드를 방출하고 있음을 알 수 있었으며, 특히 온돌마루의 평균방출농도는 전체 마루제품 농도보다 높게 나타나는 경향을 보여주었다. 또한, TVOC와 포름알데히드 방출농도에 대한 전체 방출량은 PVC Sheet 바닥재가 다른 바닥재에 비해 2배정도 높게 방출됨을 수치를 통해 알 수 있었다. 한편, 측정 분석 결과 TVOC와 포름알데히드 모두 현 방출농도기준을 만족하는 것으로 조사되었다.

마루제품은 포름알데히드가 100%의 검출빈도를 보이며,  $1633.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 가장 높은 농도로 검출되었고, PVC 바닥재는 톨루엔이 100%의 검출빈도를 보이며,  $50\sim 130 \mu\text{g}/\text{m}^3$  농도로 검출되었다. 또한, 에틸벤젠과

자일렌 농도 역시 높게 나타나 방향족 유기용제는 일반적으로 많이 사용되고 있는 것으로 판단된다. PVC Sheet 바닥재는 개별 VOC 물질에 대한 검출빈도 및 방출농도가 다른 바닥재에 비해 높게 나타나는 경향을 보였으며, 마루제품은 자연 VOC 물질인  $\alpha$ -피넨,  $\beta$ -피넨, *d*-리모넨이  $0.5\sim 2.0 \mu\text{g}/\text{m}^3$  농도범위를 보이며, PVC 바닥재에 비해 3~5배 정도 높게 검출되는 특성을 보여주었다. 알데히드류 중 악취유발물질인 아세트알데히드, 프로피온알데히드, 부티르알데히드는 PVC 계열 자재 중 PVC Sheet에서 더 높은 농도를 보여 주었으며, 아크롤레인은 검출되지 않았다.

따라서, 제품 종류에 따라 주요 오염물질이 다르게 나타나므로, TVOC와 포름알데히드는 물론 검출빈도 및 농도가 높은 개별 VOC 물질에 대한 적절한 기준 설정 및 관리방안이 수립되어야 할 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

1. A. Hedge, *Indoor Environ.*, **4**, 251-253(1995).
2. 환경부, 실내공기질관리법 제정에 대한 공청회 자료집, 1995.
3. D.W. Dockery and J.P. Spengler, *Air Pollut. Control Assoc.*, **31**, 153-159(1981).
4. C.C. Chan, H. Ozkaynak, J.D. Spengler, J.D., and L. Sheldon, *Environ. Sci. Technol.*, **25**, 964-972(1991).
5. J.M. Samet and J.D. Spengler, *Indoor Air Pollution*, Johns Hopkins University Press, London, 1991.
6. A.T. Hodgson, D. Beal and J.E.R. Mecllvaine, *Indoor Air*, **12**, 235-242(2002).
7. WHO, *Air quality guidelines for Europe*, WHO Pub. European Series No. 23(1987).
8. V.J. Feron, H.P. Til, Flora de Vrijer, and P.J. Bladeren, *Indoor Environ.*, **1**, 69-81(1992).
9. D.R. Patrick, "Toxic Air Pollution Handbook", Van Nostrand Reinhol, New York, 1994.
10. R.S. Maria, *Indoor Air*, **9**, 268-272(1999).
11. 환경부, "실내공기질공정시험방법", 환경부 고시 제 2004-80호, 160-175, 2004.
12. ECA, "European Comission, Guideline for the characterization of volatile organic compounds emitted from indoor materials and products using small test chambers", Report No. 8, 1991.
13. ASTM D 5116-97, "Standard guide for small-scale environmental chamber determinations of organic emis-

- sions from indoor materials/products”, 1997.
14. 이석조, 장성기, 김미현, 이홍석, 임준호, 장미, 서수연, 한국분석과학회지, **18**(4), 344-354(2005).
  15. 장성기, 이우석, 김상돈, 서수연, 이홍석, 임준호, 임정연, “건축자재 오염물질 방출시험 방법 최적화 및 방출특성연구”, 1-79, 국립환경과학원, 2005.

K C I