

PVC바닥장판재의 실내공기오염물질 발생강도 측정에 관한 연구

A Measurement of the Emission Rate of Indoor Air Pollutants from the PVC Flooring

김 윤 일, 김 성 준, 박 진 철, 이 언 구

Kim, Yoon-Il, Kim, Sung-Jun, Park, Jin-Chul, Rhee, Eon-Ku

Abstract

This study was conducted to investigate the emission rate of Indoor Air pollutants from the PVC flooring. The results can be summarized as follows; in the model system & model house testing of the emission rate from the PVC flooring(pet, non-uv, uv), VOCs(benzene, toluene, xylene, ethyle benzene) and formaldehyde were detected. Although the concentration of pollutants were lower than the foreign standards, the emission rates were found to increase in propotion to floor temperature, and could be expected to be higher if TVOC is considered. The test result of GC-MS to identify DOP(DEHP) component from the PVC flooring showed an average of 20% concentration of DOP. However, the concentration of DOP was not detected in the air.

키 워 드 : PVC바닥장판재, 실내공기오염물질, 모델시스템 및 실험주택측정
keywords : PVC Flooring, Indoor Air Pollutants, Model System & Model House Testing

1. 서론(연구의 목적)

최근 각종 건축자재로부터 발생하는 유해가스는 종류가 다양할 뿐만 아니라 장기간 지속적으로 인체에 축적될 경우 해를 끼치는 것으로 알려져 있다. 그러나, 아직까지 이에 대한 인식은 매우 미흡한 실정이며, 더욱이 국내건축자재의 제조업체에서 조차 오염물질의 발생에 대한 충분한 실험과 검증없이 제품을 생산하고 있는 상황이다.

본 연구에서는 주거용 건물에서 사용되고 있는 PVC 바닥장판재를 대상으로 각종 오염물질의 발생강도를 모델시스템과 실험주택에서 각각 측정함으로써 오염물질의 발생량을 정량적으로 파악하고자 하였다. 본 연구에서 제시된 자료는 최근 주택에서 보편적으로 사용되고 있는 PVC 바닥재의 환경성능을 기술적으로 확인함으로써 앞으로 보다 환경친화적인 제품의 개발 생산을 위한 기초자료로 활용할 수 있게 할 것이다.

2. PVC 바닥장판재 및 실내공기환경(IAQ) 특성

2.1 PVC바닥장판재의 특성

* 성희원, 중앙대학교 건축공학과 대학원(석사과정)
** 성희원, 경민대학 건축설비과 조교수, 공학박사
*** 성희원, 중앙대학교 건축학과 교수, 건축학박사

현재 국내의 가정용 온돌바닥재는 립이라 불리는 PVC 바닥장판재가 가장 널리 이용되고 있다.

PVC 바닥재의 특성을 살펴보면, 가격이 저렴하고 시공이 간편하며, 제품이 다양하고 위생적이며 내수성이 뛰어나고, 탄력성이 있어 보행감이 좋다. 반면에 내구연한이 짧고 내압인성이 부족한 단점이 있으며 특히, PVC 계통의 바닥재의 대부분은 석유화학제품으로 이들은 화재시 유독가스가 발생하고 있고 밀폐된 실내에서는 불쾌한 냄새나, 호흡기 자극 뿐만 아니라 피로감, 메스꺼움 또는 집중력 감소 등을 일으켜 인체에 해로운 영향을 미치고 있는 것으로 알려져 있다.

2.2 건축바닥장판재에서 발생가능한 공기오염물질

최근의 연구보고 자료에 의하면 PVC 및 고무(Rubber) 계통의 석유화학제품에서 발생가능한 공기환경 오염물질로는 휘발성유기용제(VOCs) 및 포름알데히드(HCHO) 등의 오염물질을 들 수 있고, 그외에도 “내분비계 장애물질”로 인간에게 암을 유발할 가능성이 있는 것으로 알려진 환경호르몬인 DOP(DEHP) 등의 물질을 들 수 있다.

2.3 오염물질 기준치 및 각국의 대처현황

공기환경기준은 각각의 환경적 특성에 따라 오염물질의 발생과 재실자에게 미치는 영향정도가 다르기 때문에 그 대상을 일반실내환경, 대기(외기) 그리고 작업환경으로 구분하여 설정하고 있는데, 우리나라를 비롯한 대부분의 국가에서는 대기(외기)와 작업환경에 관한 기준치는 이미 설정되어 있지만, 실내환경부분의 기준에 대해서는 선진외국의 몇몇 나라를 제외하고는 거의 전무한 상태이다(표 1. 참조).

표 1. 국외의 실내공기환경(IAQ) 기준

오염물질	실내환경(Indoor Air)
이산화탄소(CO2)	1,000ppm(일본건축기준법) 1,000ppm(ASHRAE)
부유분진(TSP)	0.15mg/m ³ (일본건축기준법) 0.1~0.12mg/m ³ (WHO,8시간)
포름알데히드(HCHO)	0.1ppm(ASHRAE) 0.1ppm(스웨덴:신축주거)
VOCs	벤젠
	톨루엔
	크실렌
일산화탄소(CO)	10ppm(일본건축기준법) 25ppm(WHO Europe:1시간)

그러나, 미국 및 유럽공동체(EC) 등의 국가에서는 건축자재의 오염물질 방출강도에 대한 분류규정을 제정하여 설계지침으로 활용하고 있다. 예를들면, 미국 워싱턴주의 관공서에서는 사무기기의 전체 휘발성유기용제(TVOCs) 및 포름알데히드의 방출량을 규정하고 있으며, 유럽의 스칸디나비아국가(SCANVAC)에서는 건축재료로부터의 휘발성유기용제 오염물질의 방출강도에 따라 건축재료를 아래의 3단계로 구분하여 사용하고 있다(표 2. 참조).

표 2. SCANVAC의 건축재료에서의 VOCs의 방출강도분류

방출강도의 분류	최대방출강도 (20℃, RH 50%)
MEC(Material Emission Class)-A	40 μg/m ² per hr
MEC(Material Emission Class)-B	100 μg/m ² per hr
MEC(Material Emission Class)-C	450 μg/m ² per hr

한편, DOP(DEHP)인 경우 외국에서는 이미 ‘호르몬 작용성 화학물질’로 규정하고 지난 1995년부터 본격적으로 대응하기 시작 하였는데, 미국에서는 1996년 이 후 모든 신규화학물질에 대하여 DOP(DEHP) 테스트를 의무화 하는 등 최우선 연구과제로 선정하고 있다. 또한, 가까운 일본에서도 1997년 이 후 학계, 산업계와 연대하여 이에 대한 실태조사, 검사방법, 규제관리방안에 대한 연구가 진행중에 있으나, 우리나라에서는 이에 대한 큰 인식이 없다가 1998년 6월에서야 ‘관찰물질’로 지정하고 규제조치를 검토

하고 있으나, 아직까지 적극적인 대응에는 극히 미흡한 실정이다.

3. PVC 바닥장판재에 따른 공기환경오염물질 발생강도 측정

3.1. 측정개요

PVC 바닥장판재를 대상으로 각종 공기환경 오염물질의 발생강도 측정에 대한 세부적 내용은 다음과 같다(표 3. 참조).

표 3. 측정개요

종류	PET제품, NON-UV제품, UV제품	
실험종류	모델시스템 측정	실험주택 측정
크기 및 구성 재료	크기: 0.14m ² (원통형) (직경0.5m, 높이0.7m) 재질: 오염물질발생이 없는 스테인레스철판재 (두께 1.0mm)	크기: 18.6m ² (약2.5평) (2.7m*3.0m *2.3m) 바닥: 온수온돌콘크리트 벽 및 천정: 석고보드 및 벽지마감
실험조건	- 바닥판 온도 비가열시 - 바닥판 온도 가열시 (35℃/50℃)	- 바닥온도 비 가열시 - 바닥온도가열시(50℃)
측정요소 및 측정장비	온열환경요소: 온도, 습도 공기환경요소: VOCs(BTEX), HCHO, DOP 측정장비: 1) 온도 및 습도: Data Logger(sensor: thermo-couple) + Computer 2) 포름알데히드: Passive Bubbler Monitor 3) 휘발성유기용제 및 DOP: Air Sampler +GC(Gas Chromatography)+Mass Detector	
비고	- 장판재: 공장출고 후 15일 이내 제품 - 초기조건(바닥장판재를 설치하지 않았을 경우 및 외기조건)을 모든 실험에 적용	

3.2. 모델시스템 측정

모델시스템 측정은 1999년 7월 13일부터 16일까지 실시하였으며 이 때, 바닥온도는 비가열시(24-26℃)와 34℃-36℃ 및 최고 48℃-53℃ 까지 가열했을 경우인 세가지로 분류하여 측정하였다.

모델시스템을 통한 측정결과, 휘발성유기용제

는 PET와 NON-UV제품에서 주로 검출되었고, UV제품에서는 톨루엔, 에틸벤젠 및 크실렌 등이 미량 방사되고 있었으며, 포름알데히드의 물질도 검출됨을 확인 할 수 있었다. 한편, 오염물질의 발생량은 유럽의 SCANVAC 등에서 적용하고 있는 최대방출량의 값과 비교해 볼 때, 그 값을 초과하지 않는 것으로 나타났다. 그러나, 바닥온도를 34℃에서 53℃까지 가열했을 경우 온도상승에 따른 발생농도는 평균 4.5배에서 7.8배까지(최고 8.4배정도(톨루엔)) 증가하는 매우 높은 농도분포를 보이고 있음을 알 수 있었다(표 4. 참조).

표 4. 모델시스템 측정결과: 바닥장판재의 단위면적(m²) 및 단위시간(hr) 당 오염농도 방사량(단위: µg/m³hr)

종류	PET			NON-UV		
	비가열 (24℃)	가열1 (35℃)	가열2 (53℃)	비가열 (25℃)	가열1 (34℃)	가열2 (51℃)
온도 및 습도	(59%)	(54%)	(55%)	(51%)	(61%)	(64%)
벤젠	N.D.	N.D.	0.939	2.750	10.533	12.478
톨루엔	3.150	3.667	26.428 (8.4배)	2.072	3.561	12.628 (6.1배)
에틸벤젠	0.811	0.950	3.461 (4.3배)	1.089	1.806	2.578
크실렌	2.378	3.722	6.283	0.778	1.472	2.672 (3.4배)
TVOCs	6.33	8.339	37.111 (5.9배)	6.689	17.372	30.356 (4.5배)
포름알데히드	N.D.	0.178	0.222	N.D.	0.189	0.222

상판재종류	UV		
	비가열 (24℃)	가열1 (37℃)	가열2 (51℃)
온도 및 습도	(86%)	(64%)	(68%)
벤젠 µg/m ³ hr	N.D.	0.172	2.294
톨루엔 µg/m ³ hr	0.267	0.617	0.900
에틸벤젠 µg/m ³ hr	0.272	1.178	1.272(4.7배)
크실렌 µg/m ³ hr	0.250	0.933	1.656(6.6배)
합계TVOCs µg/m ³ hr	0.789	2.900	6.122(7.8배)
포름알데히드 µg/m ³ hr	0.311	0.178	0.394

* N.D.: Not Detected

또한, 바닥장판시공시 접착제의 사용에 따른 오염농도발생량 측정결과에서는 톨루엔과 포름알데히드 등의 오염물질이 일부 검출되고 있음을 확인할 수 있었다(표 5. 참조).

표 5. 접착제의 오염물질 발생농도 측정결과

측정일자:1999년 7월 23일	측정일자:1999년 7월 23일					
	벤젠	톨루엔	에틸벤젠	크실렌	합계 TVOCs	포름알데히드
농도단위: $\mu\text{g}/\text{m}^3 \cdot \text{hr}$	N.D.	1.244	0.022	0.061	1.327	0.928

* N.D.: Not Detected

3.3. 실험주택 측정

실험주택 측정은 실제의 방 하나의 크기 즉, 약 2.5평(2.7m*3.0m*2.3m)인 실에 PVC바닥장판재를 일반주택에 설치되는 조건과 똑같이 시공하여 측정하였다. 측정은 1999년 7월 23일부터 8월3일까지 실시하였으며 특히, 온돌바닥표면온도의 변화에 따른 오염농도 분포를 측정하고자 앞서 실시된 모델시스템 측정과 마찬가지로 바닥온도를 가열할 수 있도록 하였다.

실험주택 측정결과의 내용은 다음과 같다(표 6. 참조).

즉, 실험주택내 바닥장판재를 설치하였을 경우에 오염물질의 농도분포를 살펴보면, 비가열시에 PET제품에서는 휘발성유기용제 중 톨루엔이, 그리고 NON-UV와 UV제품에서는 톨루엔과 벤젠의 휘발성유기용제와 포름알데히드가 각각 검출되고 있었고, 이와 같은 결과는 앞에서 실시된 모델시스템 측정과 비슷한 검출패턴을 보이고 있음을 알 수 있었다. 또한, 바닥온도를 최고 52℃까지 가열했을 경우에도 모델시스템 측정과 마찬가지로 오염물질의 농도는 약 5배에서 최고 11.9배까지 증가함으로써 바닥온도 상승에 따라 오염농도의 발생이 크게 증가하고

있음을 확인 할 수 있었다.

표 6. 실험주택 측정결과
단위:ppm

	PET		NON-UV	
	비가열 (28℃) (68%)	가열시 (50℃) (79%)	비가열 (30℃) (64%)	가열시 (52℃) (87%)
	7월23일	8월4일	7월27일	7월31일
벤젠	N.D.	0.084	0.174	0.202
톨루엔	0.809	9.150(11.3배)	0.671	0.965
에틸벤젠	0.065	1.015(15.6배)	0.140	0.211
크실렌	0.084	1.167	0.108	0.218
합계 TVOCs	0.958	11.416(11.9배)	1.093	1.596(1.46배)
포름알데히드	N.D.	0.037	0.040	0.059

	UV	
	비가열시 (27℃) (83%)	가열시 (52℃) (90%)
	7월29일	7월28일
벤젠	ppm 0.212	0.895(4.2배)
톨루엔	ppm 0.026	0.106
에틸벤젠	ppm 0.049	0.415(8.5배)
크실렌	ppm 0.031	0.240(7.7배)
합계TVOCs	ppm 0.318	1.656(5.2배)
포름알데히드	ppm 0.024	0.076

* N.D.: Not Detected

3.4. DOP(DEHP)측정

바닥장판재가 함유하고 있는 물질 중 최근 환경호르몬 물질로 알려진 DOP(DEHP)농도분석은 두가지방법에 의하여 실시하였는데, 한가지는 바닥장판 자체의 DOP(DEHP)함유량을 분석하는 것이고, 또 다른 하나는 바닥장판을 주택내에 시공하였을 경우 공기 중에 함유된 농도에 대한 것이다.

이 때, DOP(DEHP)분석장비는 공기 중의 가스성분을 분석하는 가스크로마토그래피(HP6890 GC)와 Mass Selective Detector(HP5973 MSD)를 사용하였다

표 7.에서 알 수 있듯이 바닥장판재의 DOP(DEHP) 함유량 분석결과에서는 PET제품이 19.68%, NON-UV제품이 23.63%, UV제품이 24.97%로 각각 검출되었고 종류별로는 UV제품이 가장 높은 함유량을 보이고 있었다.

표 7. 바닥장판재의 DOP(DEHP) 함유량 분석결과

	검량선결과값 (µl/ml)			최종 결과 (µg/g)	최종 결과 (%)	평균 (%)
	1회	2회	평균			
PET	66.76	66.42	66.59 a	196817.73	19.68	22.76
NON-UV	79.80	79.29	79.55 b	236272.28	23.63	
UV	84.91	84.20	84.56 c	249670.28	24.97	

*a, b, c : Means with the different letter are significantly different ($\alpha=0.05$)

특히, 분석결과는 SAS(Statistical Analysis System) 통계 Package의 LSD를 사용하여 유의차 검증을 한 결과 유의도 $\alpha=0.05$ 내에서 Pr=0.0001로 유의함으로써 자료의 타당성을 확인 할 수 있었다.

한편, 표 7.에서 나타난 바와 같은 DOP를 함유한 바닥장판재를 주택내부에 시공하여 실내공기중에서의 DOP 분석결과, 바닥장판재에서는 DOP(DEHP)의 물질이 검출되지 않고 있음을 확인 할 수 있었다(표 8. 참조).

표 8. 바닥장판이 시공된 실내공기 중의 DOP(DEHP) 농도 분석결과

장판재종류	PET제품	NON-UV제품	UV제품	
	가열시(51℃)	가열시(51℃)	가열시(53℃)	
평균농도	7월 29일 포집시간: 25시간	7월 31일 포집시간: 7시간	8월3일 포집시간: 15시간	
	µg/ml	N.D.	N.D.	N.D.
DOP (DEHP)	ppm	N.D.	N.D.	N.D.

* N.D. : Not Detected

4. 연구결과 종합

본 연구는 주거용건물에서 일반적으로 사용되고 있는 PVC 바닥장판재를 대상으로 공기환경 오염물질의 발생강도를 측정하고자 한 것으로 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

첫째, 오염물질의 발생을 배제한 밀폐된 모델 시스템 측정에서 바닥장판재에서의 휘발성유기용제 및 포름알데히드 오염물질의 검출여부는 PET와 NON-UV제품에서 휘발성유기용제가 주로 검출되었고, UV제품에서는 톨루엔, 에틸벤젠, 크실렌의 휘발성유기용제와 포름알데히드의 물질이 소량 검출되고 있었다. 그러나, 바닥온도를 34℃에서 최고 53℃까지 가열했을 경우에는 가열전에 검출되지 않았던 오염물질이 검출되었을 뿐만 아니라 발생평균농도가 약 7.8배까지 증가함으로써 바닥온도 상승에 따라 오염농도의 발생이 한층 활발하게 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다.

또한, 바닥장판시공시 접착제의 사용에 따른 오염농도 발생량에서는 톨루엔과 포름알데히드 등의 물질이 주로 검출됨으로써 기존 연구결과와 일치하고 있음을 확인할 수 있었다.

둘째, 각종 바닥장판재를 일반주택에 설치되는 조건과 똑같이 시공한 실험주택 측정에서는 PET제품에서 톨루엔의 휘발성유기용제가, NON-UV와 UV에서는 벤젠과 톨루엔의 휘발성유기용제 및 포름알데히드의 물질이 주로 검출되고 있었고, 접착제의 사용에 따라서는 톨루엔과 포름알데히드의 물질이 높게 검출되고 있었으며 이와 같은 결과는 앞에서 실시된 모델시스템 측정과 비슷한 검출패턴을 보이고 있음을 알 수 있었다. 그러나, 바닥온도를 최고 52℃까지 가열했을 경우에 오염물질의 농도는 약 5배에서 최고 약 11.9배까지 증가 함으로써 바닥온도 상승에 따라 오염농도의 발생이 크게 증가하고 있음을 확인할 수 있었다.

한편, 이와 같은 오염물질의 농도분포는 외국의 최대 방출값에는 미치지 못하는 미미한 수준으로 나타났지만, 본 연구의 분석자료가 수 많은 휘발성유기용제 중 극히 일부분인 BTEX와 포름알데히드 등의 물질만을 대상으로 한 점을 감안한다면 바닥장판에서의 실제 오염물질농도는 보다 증가할 것이다. 더욱이, 바닥온도 상승 시에는 최고 11.9배까지 그 오염농도가 증가하고 있음을 고려할 때, 이에 대한 대책이 있어야 할 것으로 판단된다.

세제, 바닥장판재가 함유하고 있는 물질 중 최근 환경호르몬으로 알려진 DOP(DEHP) 분석은 MSD(Mass Selective Detector)를 통하여 실시하였는데, 그 결과 PET제품이 19.68%, NON-UV제품이 23.63%, 그리고 UV제품이 24.97%로 각각 검출되었고 그 종류별로는 UV제품이 가장 높은 함유량을 보이고 있었다. 특히, 분석결과는 SAS(Statistical Analysis System) 통계 Package의 LSD를 사용하여 유의차 검증을 한 결과 유의도 $\alpha=0.05$ 내에서 $Pr=0.0056$ 으로 유의함으로써 자료의 타당성을 확인 할 수 있었다.

그러나, 공기중에 함유된 DOP(DEHP)의 가스 크로마토그래피를 통한 농도분석에서는 비록 바닥장판재가 DOP(DEHP)성분을 함유하고 있을지라도 바닥장판이 주택내부에 시공된 공기중에서는 DOP(DEHP) 물질이 검출되지 않음으로써 바닥장판재에서는 DOP(DEHP)물질이 방사되지 않음을 확인할 수 있었다.

지금까지의 연구결과를 종합해 볼 때, PVC바닥장판재에서의 실내공기오염물질은 휘발성유기용제와 포름알데히드 등의 오염물질이 일부 검출되고 있었고 그 방출량은 외국자료에 비하여 미미한 수준으로 나타났다. 그러나, 이와같은 값은 휘발성유기용제 중 극히 일부분인 BTEX와 포름알데히드 등의 물질만을 대상으로 한 점을 감

안한다면 바닥장판에서의 실제 오염물질농도는 한층 증가할 것이라고 판단된다. 특히, 바닥온도를 가열했을 경우에는 가열전에 검출되지 않았던 오염물질이 검출되었을 뿐만 아니라 발생농도가 한층 증가하고 있음을 고려한다면, 이에 대한 대책이 있어야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

- 1) 김신도, 21세기 실내공기환경의 질 세미나발표집, 대한건축학회 환경 및 설비위원회, 1998
- 2) 윤동원, 21세기 실내공기환경의 질 세미나발표집, 대한건축학회 환경 및 설비위원회, 1998
- 3) 이언구, 박진철, 다세대주택의 실내공기환경 개선에 관한 연구, 한국건축설비학회 학회지 제 2권 2호, pp.102-109, 1999.6
- 4) 이언구, 박진철, 지하공간에서 라돈가스의 특성에 관한 연구, 1999. 4, 한국건축설비학회, Vol.2 No.1.
- 5) 이언구, 박진철, 건축재료에서의 실내공기오염물질 발생농도 측정 연구, 1998. 6, 한국건축설비학회, 창간호, Vol.1 No.1, pp.125-137.
- 6) Anthony L.Hines, Indoor AIR Quality and Control. New Jersey: PTR Prentice Hall, 1993. pp.166-167
- 7) Bearg,D.W. Indoor Air Quality & HVAC Systems; Evaluation criteria for IAQ, 1993
- 8) Hays, S.M., Gobbell R.V., Ganick N.R., Indoor Air Quality: solutions and strategies. New York: McGraw-Hill, Inc., 1995.
- 9) Hines, A.L., et al. 1993, Indoor AIR Quality and Control. New Jersey: PTR Prentice Hall,
- 10) Indoor Air '93. Proceedings of the 6th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Helsinki, Finland: 1993, Vol 2.
- 11) Indoor Air '96. Proceedings of the 7th International Conference on Indoor Air Quality and Climate. Japan: 1996, Vol 2-3.