

철도차량용 내장재의 휘발성유기화합물 방출특성 분석

Characterization of Volatile Organic Compounds Emission from Interior Materials of Railway Passenger Cabin

조영민[†] · 박덕신* · 권순박* · 박은영**

Youngmin Cho · Duck-Shin Park · Soon-Bark Kwon · Eun-Young Park

Abstract The environmental significance of indoor air quality is gaining more attention. Especially, the contamination of indoor air by volatile organic chemicals (VOCs) has become a serious environmental concern. We investigated the VOCs emissions from some interior materials used in the conventional railway passenger cabin. The seat cover and the flooring of cabins were used as testing materials, and they were put in a clean environmental chamber. The temperature and relative humidity was kept at 25 ± 1 °C and 50 ± 5 %, respectively. It was found that these interior materials emitted significant amount of VOCs under constantly ventilated condition. The flooring emitted more halogenated VOCs than the seat cover, because it is made of PVC, which contains many chlorine atoms. However, the emission gradually decreased over time. Because the VOCs emission from interior materials may threaten the health of passengers in the cabin, interior materials emitting less VOCs should be used.

Keywords : Indoor air quality, VOCs, Interior material, Passenger cabin

요 지 실내공기질의 중요성이 날로 부각되고 있다. 특히 휘발성유기화합물(VOCs)에 의한 실내공기의 오염은 매우 심각한 환경문제가 되고 있다. 이에 본 연구에서는 철도차량 객실용 시트커버와 바닥재를 대상으로 청정한 챔버 안에 넣고, 고정 환기 조건에서 VOCs 방출특성을 조사하였다. 챔버는 온도 25 ± 1 °C, 상대습도 50 ± 5 %를 유지하면서 방출량을 조사하였다. 실험결과 바닥재가 시트커버보다 많이 양의 VOCs를 방출하는 것으로 나타났는데, 이는 바닥재가 PVC 재질이기 때문인 것으로 보인다. 방출량은 시간에 따라 점차 감소하였다. 내장재에서 방출되는 VOCs는 객실 승객의 건강을 위협할 수 있으므로, VOCs를 덜 방출하는 내장재가 사용되어야 한다.

주요어 : 실내공기질, 휘발성유기화합물, 내장재, 객실

1. 서론

현대인들은 일상생활의 90% 이상을 실내에서 생활하는데, 이러한 실내의 대기환경은 입자상 오염물질, 화학적 오염물질, 생물학적 오염물질, 중금속, 방사성 물질 등의 여러 오염물질에 의해 오염되어 있는 경우가 많다[25]. 실내 공기 오염은 거주자의 건강을 심각하게 위협할 수 있기 때문에, 실내 대기질 제어는 매우 중요한 환경문제가 되고 있

다. 최근에는 특히 새로 지어진 건물이 VOCs(volatile organic compounds; 휘발성유기화합물)와 포름알데히드 등에 의해 오염되어 있다는 연구결과가 많이 나오고 있다 [6,20]. 신축 건물의 내장재에서 방출되는 VOCs와 포름알데히드 등에 지속적으로 노출될 경우 새집증후군(sick building syndrome; SBS)을 유발할 수 있는데, 이는 호흡기 및 눈 자극, 호흡 문제, 코 및 목 질환, 피부 질환, 두통, 기억력 감퇴 등의 원인이 될 수 있다고 보고되고 있다 [1]. 또한, 카페트에서 발생하는 VOCs는 쥐들의 신경장애, 심각한 호흡 곤란과 더불어 최악의 경우 사망에까지 이를 수 있다고 보고되기도 하였으며[2], 이에 따라 VOCs의 저감방법에 대한 연구가 활발하게 이루어지는 등[3], 실내 공간에서의 VOCs 농도 제어에 대한 관심이 크게 증가하고

[†] 책임저자 : 회원, 한국철도기술연구원 철도환경연구실 선임연구원
E-mail : ymcho@krii.re.kr

TEL : (031)460-5362 FAX : (031)460-5319

* 한국철도기술연구원 철도환경연구실 선임연구원

** 과학기술연합대학원대학교 박사과정

있다.

최근 건물 내부의 VOCs 농도에 대해서는 많은 연구가 이루어지고 있다. Wolkoff[4]는 건물의 내장재에 대해 VOCs 장기적인 방출특성을 조사하였고, Jo 등[5]은 아파트의 저층과 고층의 실내 VOCs 농도를 측정하여

저층 아파트의 실내 VOCs 농도가 주차장의 차량에서 배출된 가스가 실내로 유입되어 높다고 결론 내렸다. Yu 등[6]은 일반적으로 건물에 사용되는 고분자 재료에서 방출되는 VOCs 농도를 조사하기도 하였다. Little 등[7], Schaeffer 등[8] 및 Guo 등[9]은 카펫에서 많은 양의 VOCs가 방출된다고 보고했고, Elkilani 등[10]은 카펫의 VOCs 흡착과 탈착 특성을 연구하여, 카펫이 VOCs의 방출원이 될 수 있다고 보고하였다. 또한, 건축자재 중 벽지, 페인트 및 접착제에 대한 VOCs 방출특성평가도 널리 연구되고 있다.

최근 차량 내부의 VOCs 연구도 활발히 이루어지고 있는데, 이는 차량의 경우에도 내장재에서 각종 VOCs가 방출될 수 있기 때문이다. Jo 등[11,12]은 한국의 도심을 운행하는 버스와 택시의 VOCs 농도를 조사하여, 도로에서 차량의 배기가스가 실내 VOCs 오염의 가장 큰 근원이라고 보고한 바 있다. 환경부에서도 기존의 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'[26]의 적용 대상을 대중교통수단의 객실까지 확대하고자 하고, 이를 위해 2006년에 실태조사를 수행한 바 있으며[13], 이를 바탕으로 이산화탄소와 미세먼지에 대하여 관리를 시작하였고, 향후 VOCs도 관리항목으로 추가될 전망이다. 국외에서도 차량 내부의 VOCs 농도에 대한 조사와 저감방안 연구가 활발히 이루어지고 있는데, Chan 등[14] 및 Lau와 Chan[15]은 홍콩에서 궤도 전차, 버스, 택시, 도선장, 및 철도 시스템을 포함하여 대중교통수단의 VOCs 농도를 조사하여 차량 내장재에서 방출되는 VOCs도 차량 내부의 VOCs 농도를 높이는데 기여한다고 보고한 바 있다. Sakakibara 등[16] 및 Leung과 Harrison[17]은 새차 내장재의 VOCs 방출이 실내 중 VOCs 농도를 높인다고 보고하였다.

최근 철도차량은 고속화되면서 객실이 밀폐되어 기계적으로 환기되고 있다. 객실의 공기는 환기가 제대로 이루어지지 않을 경우 객실 내부에서 발생하거나 외부에서 유입되는 오염물질에 의해 쉽게 오염될 수 있다[18,19]. 특히, 객실의 내장재에서 방출되는 VOCs에 의한 실내 공기 오염은 매우 중요한 오염원 중의 하나라고 보고되고 있다[6]. 그러나, 객실의 VOCs 농도와 객실 내장재의 VOCs 방출간의 상관관계에 대해서는 아직 연구가 부족하다. 이 연구에서는, 철도 차량의 객실에서 방출되는 VOCs를 확인하기 위하여 환경 챔버를 이용하여 실험을 수행하였다. 본 연구

를 통해 내장재에서 방출되는 VOCs가 객실의 실내공기질에 미칠 수 있는 영향을 간접적으로 알아보려고 하였다.

2. 실험방법

2.1 내장재

내장재는 현재 운행 중인 철도차량에 납품되고 있는 시트커버와 바닥재를 그대로 실험에 사용하였다. 시트커버는 폴리에스테르(polyester, 더블 릿셀과 모켓) 재질, 바닥재는 폴리염화비닐(poly vinyl chloride, PVC)로 만들어졌으며 새마을호와 무궁화호의 내장재도 달랐으나, 각 내장재의 제조공정과 조성 등에 대한 구체적인 자료는 구할 수 없었다. 모든 견본은 VOCs의 자연 방출을 최소화하기 위하여 만들어진 직후에 완전히 밀봉하였다.

2.2 환경챔버실험

내장재에서 방출되는 VOCs 측정을 위하여 VOCs 방출 측정 시스템을 제작하였다. 스테인리스강으로 만들어진 내부 용적 1.0m³의 항온항습기(가로 1.0m×세로 1.0m×높이 1.0m)가 사용되었다. 항온항습기 안에 4개의 88 L(가로 0.4m×세로 0.4m×높이 0.55m) 유해물질 방출량 정량용 환경챔버를 설치하고, 환경챔버 안에 내장재를 고정하여 방출되는 VOCs를 정량할 수 있도록 하였다. 환경챔버는 밀폐되도록 하였고, 환경챔버의 내부 바닥에 재순환 팬을 설치하여 내부에서 증류를 발생시켜 공기순환이 가능하도록 하였다. 신선공기는 에어 펌프를 이용하여 발생시킨 후 HEPA(High efficiency particulate air) 필터, 활성탄 필터를 통과한 후에 환경챔버에 공급되도록 하였다. 습도를 일정하게 유지하기 위하여 환경챔버에 공급되는 신선공기의 일부는 증류수를 통과하도록 하였다.

내장재는 각각의 표면적이 0.128m²(0.332m×0.386m)이 되도록 하는 시료 10개를 준비하여 총 표면적은 1.28m²가 되도록 환경챔버 안에 세로로 설치하여, 시료의 부하율은 1.455m²/m³이 되도록 하였다. 유량계로 공급되는 공기의 유량을 제어하였으며, 이때의 유량은 1.4L/min이 되도록 하였다. 환경챔버 내부의 온도와 상대습도는 각각 25±1 °C와 50±5%로 유지하도록 하였으며, 실험이 진행되는 동안 지속적으로 모니터링 하였다. VOCs 시료 채취를 위하여 환경챔버 내부의 공기를 6L의 캐니스터 캔(Entech Co.)에 포집하였다. 또한, 매 실험에서 환경챔버 내부에 내장재를 설치하기 전에 시료를 채취하여 배경농도를 분석하였다.

2.3 시료 분석

VOCs 농도는 미국 환경청(EPA)의 TO-14 방법으로

Table 1에 있는 물질들을 분석하였다[27]. 캐니스터 캔에 포장된 샘플은 농축기(Entech Co., Model 7100)로 농축한 후에 HP-1 칼럼(90m × 0.32mm × 5µm, Agilent)이 장착된 기체 크로마토그래피(HP6890, Agilent)에 주입하고, 질량스펙트럼 검출기(HP5973, Agilent)를 사용하여 분석하였다. 기체 크로마토그래피는 공기 중의 오염물질이 컬럼을 통과할 때 걸리는 이동시간의 차이를 이용하여 물질을 분리하는 것이며 질량스펙트럼 검출기는 각 오염물질의 분자량을 측정하여 오염물질의 성분을 알아내는 것이다. 칼럼의 오븐 온도는 40, 70, 150, 200, 및 220°C에서 각각 5분씩 유지하도록 하였고, 각 단계 사이의 승온 속도는 5°C/min으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 시트커버의 VOCs 방출특성

환경챔버 내에서 무궁화호와 새마을호 객실에 사용되는 시트커버의 VOCs 방출특성을 조사한 결과, *trans*-1,3-dichloropropene(CIHC=C=CHCl), 1,1,2-trichloroethane(Cl₂HCCH₂Cl), toluene(C₆H₅CH₃), ethylbenzene(C₆H₅CH₂CH₃), *m,p*-xylene(C₆H₄(CH₃)₂), styrene(-(C₆H₅)H-CH₂-)_n-, *o*-xylene(C₆H₄(CH₃)₂), 1,2,4-trimethylbenzene(C₆H₃(CH₃)₃) 등이 검출되었다. 무궁화호의 시트커버와 새마을호의 시트커버에서 방출되는 VOCs의 종류와 농도는 큰 차이가 없었다. 검출된 VOCs의 농도는 *trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane 및 toluene 등을 제외하고는 대부분 농도가 매우 낮았다. Fig. 2와 Fig. 3에 시간에 따른 *trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane, toluene의 환경챔버 내에서의 농도 변화를 나타내었다. 이 화합물들의 농도는 이전에 다른 연구들[4,6,8,20]에서 보고된 바와 마찬가지로 지속적인 환기조건에서 시간이 지남에 따라 화합물질의 방출량이 감소하여 그 농도가 감소하였다.

무궁화호의 경우, Fig. 1에 나타난 바와 같이 *trans*-1,3-dichloropropene, toluene, 1,1,2-trichloro-ethane의 농도는 6시간 후에 최대인 97.9, 86.4, 80.4ppb에 이르고 1일 경과 후에는 이 농도의 41% 수준으로 감소하였으며, 4일 후에는 20% 수준까지 감소하였는데, 이는 VOCs의 방출량 감소 속도는 VOCs의 종류에 따라 달라지지 않음을 의미한다.

새마을호의 경우, Fig. 2과 같이 *trans*-1,3-dichloropropene, toluene, 1,1,2-trichloroethane의 농도는 3시간 경과 후에 최대값인 105.0, 92.7, 86.2ppb를 나타내고, 이후 감소하여 36시간 경과 후에는 대략 30% 수준까지 낮아지는 경향을 보였다.

이와 같은 내장재의 VOCs 방출 감소에 대해서는 1차원

Table 1. List of VOCs analyzed

No	Compounds	No	Compounds
1	Freon 12	19	cis-1,3-Dichloropropene
2	Methyl chloride	20	trans-1,3-Dichloropropene
3	Freon 114	21	1,1,2-Trichloroethane
4	Vinyl chloride	22	Toluene
5	Methyl bromide	23	1,2-Dibromoethane
6	Freon 11	24	Tetrachloroethylene
7	1,1-Dichloroethene	25	Chlorobenzene
8	Dichloromethane	26	Ethylbenzene
9	Freon 113	27	<i>m,p</i> -Xylene
10	1,1-Dichloroethane	28	Styrene
11	cis-1,2-Dichloroethylene	29	<i>o</i> -Xylene
12	Chloroform	30	1,3,5-Trimethylbenzene
13	1,2-Dichloroethane	31	1,2,4-Trimethylbenzene
14	Methyl chloroform	32	<i>m</i> -Dichlorobenzene
15	Benzene	33	<i>o</i> -Dichlorobenzene
16	Carbon tetrachloride	34	<i>p</i> -Dichlorobenzene
17	1,2-Dichloropropane	35	Hexachlorobutadiene
18	Trichloroethylene		

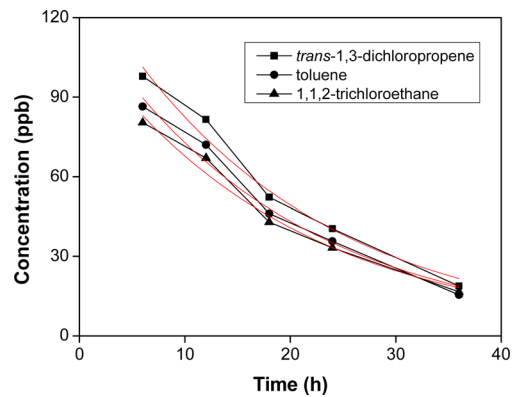


Fig. 1. VOCs emission from the seat cover of Mugunghwa Express

감소 모델[21,22], 질량 전달 모델[23], 확산 모델[7], 또는 이중 지수 모델[9] 등이 제안되기도 하였는데, 본 연구결과에서는 내장재에 따라 주요 VOCs 물질들의 배출량 감소 경향을 시간에 따른 유해물질의 방출 모델링에 널리 사용되는 이중 지수 모델[9]을 이용하여 모델링하였다.

$$E(t) = E_1 + E_2 = E_{10}e^{-k_1t} + E_{10}e^{-k_2t} \quad (1)$$

여기서, E(t)는 VOCs의 농도(ppb), E₁은 주로 증발(Phase 1)에 의한 VOCs 방출 농도(ppb), E₂는 주로 확산(Phase 2)에 의한 VOCs 방출 농도(ppb), E₁₀은 Phase 1의 초기 방출 농도(ppb), k₁은 Phase 1의 방출 감소 상수(h⁻¹), E₂₀

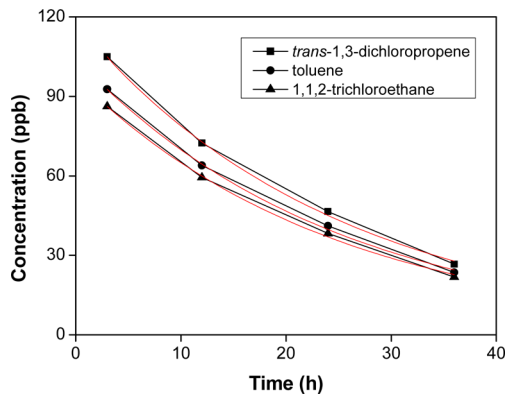


Fig. 2. VOCs emission from the seat cover of Saemaedul Express

은 Phase 2의 초기 방출 농도(ppb), k_2 는 Phase 2의 방출 감소 상수(h^{-1})를 나타낸다. 모델링 결과는 Fig. 2와 3에 함께 나타내었으며, 값은 Table 2에 정리하여 나타내었다.

일반적으로 내장재의 VOCs 방출은 내장재 표면에서의 화학물질의 휘발[15], 내장재와 산소 또는 공기 중 수증기와의 화학반응[20], 내장재 표면에서의 물리적 흡탈착[6,10,20], UV에 의한 광화학 반응[24] 등에 의하여 발생하게 된다. VOCs 방출의 초기 단계에서는 고분자 소재 표면에서 화학물질(특히 용매 등)의 증발 과정이 매우 활발히 일어난다[6]. 지속적으로 환기가 이루어지는 조건 하에서 내장재 표면의 증발 가능한 물질의 양은 계속 감소하기 때문에 증발에 의한 VOCs 방출은 시간이 흐름에 따라 감소하며, 이러한 내장재 표면에서의 VOCs 증발이 내장재의 VOCs 방출에 큰 영향을 미치는 것으로 보인다.

할로겐계 VOCs는 잠재적인 독성 물질로서 승객의 건강에 위협을 줄 우려가 있는데[6], 본 연구 결과, 몇몇 할로

겐계 화합물(*trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane 등)이 내장재에서 방출된 VOCs 중에 포함되어 있는 것을 볼 수 있었다. 시트커버가 할로겐 화합물이 포함되어 있지 않은 폴리에스터(-CO-O-)로 만들어진 것을 고려하면, 할로겐은 시트커버 제작시에 첨가된 기타 화학물질(염료, 용제 등) 등에서 기인한 것으로 보인다. 따라서, VOCs 방출을 최소화하기 위해서는 화학물질 첨가를 최소화하고, 휘발성이 약한 용제를 사용하며, 유기 화학물질의 사용을 줄여야 할 것이다.

3.2 바닥재의 VOCs 방출특성

환경챔버 내에서 새마을호와 무궁화호의 바닥재에서 방출되는 VOCs를 분석하였다. 바닥재에서 방출되는 VOCs에는 *cis*-1,2-dichloroethylene, benzene, *trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane, toluene, ethylbenzene, *m,p,o*-xylene, styrene, 1,3,5-trimethylbenzene, 1,2,4-trimethylbenzene, vinyl chloride 등과 미량의 기타 물질들이 포함되어 있었다. 시트커버와 마찬가지로 *trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane, toluene의 농도가 높았고, 나머지 물질들은 검출한계 수준으로 낮게 나타났다. Fig. 3과 Fig. 4에 각각 무궁화호와 새마을호 바닥재의 시간에 따른 toluene, *trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane의 환경챔버 내에서의 농도변화, 그리고 시트커버와 마찬가지로 이중 지수 모델을 이용한 모델링 결과를 나타내었고, 모델링 상수는 Table 2에 함께 나타내었다. 시트커버와 유사하게 이 물질의 농도도 지속적인 환기 조건에서 시간이 지남에 따라 그 농도가 급격하게 감소하였다.

무궁화호의 경우, Fig. 3과 같이 가장 높은 농도를 보였던 *trans*-1,3-dichloropropene, toluene, 1,1,2-trichloroethane의 농도가 6시간 후에는 각각 2341, 2036, 2102ppb까지 증가한 후에 감소하기 시작하여 2일 경과 후에는 68.4~71.5%

Table 2. Modelled emission parameters

Product		R ²	E ₁₀ (ppb)	k ₁ (h ⁻¹)	E ₂₀ (ppb)	k ₂ (h ⁻¹)	
Seat cover	Mugunghwa	A	0.98	68.98	19.44	68.98	19.44
		B	0.98	61.31	19.18	61.31	19.18
		C	0.98	56.26	19.72	56.26	19.72
	Saemaedul	A	0.99	117.8	24.96	40.13	0.69
		B	0.99	52.26	24.83	52.26	24.83
		C	0.99	48.63	24.78	48.63	24.78
Flooring	Mugunghwa	A	0.99	964.6	143.8	1,754	27.98
		B	0.99	2,066	56.13	687.1	6.67
		C	0.99	1,449	4.39	1,929	56.03
	Saemaedul	A	0.99	177.3	2.72	205.0	14.4
		B	0.99	258.3	10.8	150.0	1.74
		C	0.99	581.7	2.76	235.1	114.4

A: *trans*-1,3-dichloropropene, B: toluene, C: 1,1,2-trichloroethane

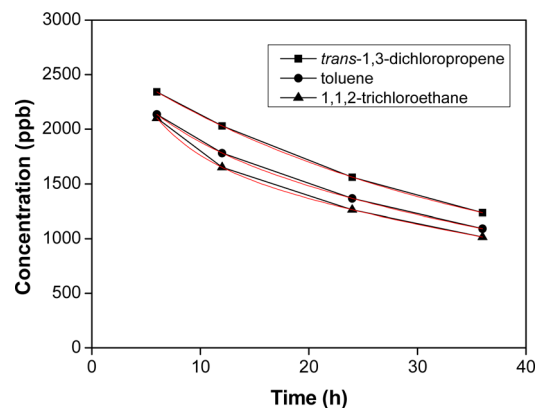


Fig. 3. VOCs emission from the flooring of Mugunghwa Express

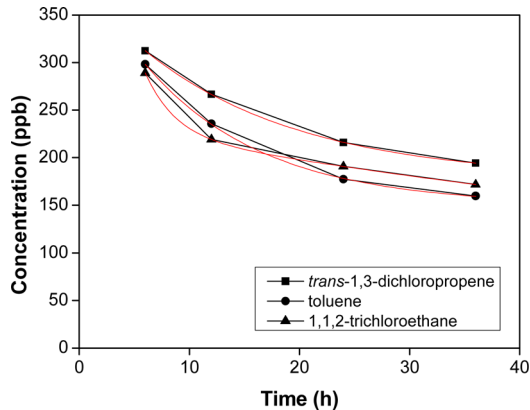


Fig. 4. VOCs emission from the flooring of Saemaoul Express

가량 감소한 것으로 나타났다. 새마을호의 경우, Fig. 4에 나타난 것과 같이 VOCs 중에서도 *trans*-1,3-dichloropropene, toluene, 1,1,2-trichloroethane의 농도가 가장 높았는데, 각 물질의 농도는 6시간 경과 후 최대인 312, 298, 289ppb까지 증가한 후에 감소하기 시작하여 36시간 경과 후에는 53~62%까지 낮아졌다.

Benzene, *trans*-1,3-dichloropropene, ethylbenzene, styrene, *m,p,o*-xylene, toluene, 1,1,2-trichloroethane, 1,2,4-trimethylbenzene은 새마을호와 무궁화호의 바닥재 모두에서 나타났으며, 이들 물질들은 시트커버에서도 방출되는 것으로 나타났다. 그러나 tetrachloroethylene과 *cis*-1,2-dichloroethylene은 무궁화호 바닥재에서만 나타났다. Tetrachloroethylene의 농도는 검출한계 수준으로 낮았으나, *cis*-1,2-dichloroethylene의 농도는 매우 높아서 방출실험의 초기인 6시간 경과 후의 농도가 toluene의 약 1/4 수준인 56.4ppb에 이르렀고, 36시간 경과 후에는 초기에 비하여 농도가 약 78% 감소하였다. 이 물질들의 농도 감소 속도는 toluene, *trans*-1,3-dichloropropene, 1,1,2-trichloroethane보다 2~3배 더 높았다.

Vinyl chloride와 1,3,5-trimethylbenzene은 새마을호의 바닥재에서만 나타났다. 방출실험 시작 6시간 경과 후에 vinyl chloride의 농도는 약 40ppb인 반면에 1,3,5-trimethylbenzene의 농도는 약 1ppb였다. 그러나 이 물질들은 12시간 경과 후에는 더 이상 나타나지 않았다. 전체적으로 무궁화호의 바닥재가 새마을호의 바닥재보다 VOCs 농도가 10배 정도 높았는데, 이는 새마을호의 바닥재가 무궁화호의 바닥재보다 더 안전함을 의미한다. 두 바닥재의 재질은 똑같은 폴리염화비닐 재질인데, 이와 같이 방출량에 있어 큰 차이가 나타나는 것은 두 바닥재의 표면처리 방식이나 첨가물이 다르기 때문인 것으로 보인다.

바닥재의 VOCs 형성 및 방출 메커니즘은 시트커버와 유

사하게 내장재 표면에서의 VOCs 증발로 보이지만, 두 내장재에서 VOCs에는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. 이는 두 내장재의 소재가 서로 다르기 때문인 것으로 보이는데, 시트커버는 폴리에스터 재질인 반면에 바닥재는 폴리염화비닐 재질로 만들어져 있다. 이 중에서 폴리염화 비닐에는 염소 원자가 포함되어 있는데, 이들은 할로겐계 VOCs의 할로겐 source로 작용할 가능성이 있다. 시트커버와 바닥재의 VOCs 방출특성을 비교해보면 바닥재의 할로겐계 VOCs 농도가 시트커버보다 5~20배나 높게 나타나는 것을 볼 수 있다. 따라서 폴리염화비닐 내장재가 많은 할로겐계 VOCs 방출에 크게 기여하는 것으로 보인다. 대부분의 할로겐계 VOCs는 비할로겐계 VOCs보다 인체에 대한 독성이 크므로 폴리염화비닐은 가능한 한 내장재의 소재로 사용하지 않는 것이 더 바람직할 것이다.

4. 결론

객실에 사용되는 내장재에 대하여 환경챔버에서 VOCs 방출특성을 조사한 결과 다양한 종류의 VOCs가 내장재로부터 방출되는 것을 볼 수 있었다. 특히 내장재에 따라 방출량이 다르게 나타났는데, 시트커버의 경우 새마을호와 무궁화호에서 유사하게 나타났으나, 바닥재는 무궁화호가 새마을호보다 방출량이 훨씬 크게 나타났다. 바닥재의 유해물질 방출량이 특히 컸는데, 이는 소재가 폴리염화비닐이기 때문인 것으로 보이므로 사용을 최소화해야 할 것이다.

후 기

본 연구는 국토해양부와 한국건설교통기술평가연구원의 지원을 받아 미래철도기술개발사업의 일환으로 수행되었음(과제번호: 03-환경-12).

참 고 문 헌

1. Stadler, J.C., Kennedy, Jr GL. (1996), "Evaluation of sensory irritation potential of volatile organic chemicals from carpets-alone and in combination", Food Chem. Toxicol. Vol. 34, pp.1125-1130.
2. Anderson, R.C. (1992), Press release. Anderson Laboratories, Inc.; 18 August.
3. Lim, G-G (2005), "A study on the reduction process of VOCs Emission from Paint Booth - A hybrid process of biotrickling filter and activated sludge reactor", J. KOSAE. Vol. 21, pp.41-48.
4. Wolkoff, P. (1998), "Impact of air velocity, temperature, humidity, and air on long-term VOC emissions from building products", Atmos. Environ. Vol. 32, pp.2659-2668.
5. Jo, W.-K., Kim, K.-Y., Park, K.-H., Kim, Y.-K., Lee, H.-W., Park,

- J.-K. (2003), "Comparison of outdoor and indoor mobile source-related volatile organic compounds between low- and high-floor apartments", *Environ. Res.* Vol. 92, pp.166-171.
6. Yu, C., Crump, D. (1998), "A review of the emission of VOCs from polymeric materials used in buildings", *Build and Environment* Vol. 33, pp.357-374.
7. Little, J.C., Hodgson, A.T., Gadgil, A.J. (1994). "Modeling emissions of volatile organic compounds from new carpets", *Atmos. Environ.* Vol. 28, pp.227-234.
8. Schaeffer, V.H., Bhooshan, B., Chen, S.-B., Sonenthal, J.S., Hodgson, A.T. (1996), "Characterization of volatile organic chemical emissions from carpet cushions", *J. Air Waste Manage. Assoc.* Vol. 46, pp.813-820.
9. Guo, H., Murray, F., Lee, S.C., Wilkinson, S. (2004), "Evaluation of emissions of total volatile organic compounds from an environmental chamber", *Building and Environment*, Vol. 39, pp.179-187.
10. Elkilani, A.S., Baker, C.G.J., Al-Shammari, Q.H., Bouhamra, W.S. (2003), "Sorption of volatile organic compounds on typical carpet fibers", *Environ. Int.* Vol. 29, pp.575-585.
11. Jo, W.-K., Park, K.-H. (1999), "Commuter exposure to volatile organic compounds under different driving conditions", *Atmos. Environ.* Vol. 33, pp.409-417.
12. Jo, W.-K., Yu, C.H. (2001), "Public bus and taxicab drivers' exposure to aromatic work-time volatile organic compounds", *Environ. Res. A*, Vol. 86, pp.66-72.
13. 환경부 (2006), "지하철 등 대중운송수단의 실내공기질 실태조사 및 관리방안".
14. Chan, L.Y., Lau, W.L., Wang, X.M., Tang, J.H. (2003), "Preliminary measurements of aromatic VOCs in public transportation modes in Guangzhou, China", *Environment International*, Vol. 29, pp.429-435.
15. Lau, W.-L., Chan, L.-Y. (2003), "Commuter exposure to aromatic VOCs in public transportation modes in Hong Kong", *Sci. Total Environ.* Vol. 308, pp.143-155.
16. Sakakibara, K., Kaitani, K., Hamada, C., Sato, S., Matsuo, M. (1999). "Analysis of odor in car cabin", *JSAE Rev.* Vol. 20, pp.237-241.
17. Leung, P.-L., Harrison, R.M. (1999). "Roadside and in-vehicle concentrations of monoaromatic hydrocarbons", *Atmos. Environ.* Vol. 33, pp.191-204.
18. 한국철도기술연구원 (2002), "실내 쾌적성 향상기술 개발", 연차보고서.
19. 한국철도기술연구원 (2007). "차세대 객차용 청정시스템 개발", 연차보고서.
20. Wolkoff, P. (1999), "How to measure and evaluate volatile organic compound emissions from buildings. A perspective", *Sci. Total Environ.* Vol. 227, pp.197-213.
21. Black, M.S., Work, L.M., Worthan, A.G., Pearson, W.J. (1993), "Measuring the TVOC contributions of carpet using environmental chambers". In: Saarela, K., Kalliokoski, P., Seppnen, O., editors. *Indoor Air 93, Sixth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Helsinki, Vol. 2, pp.401-405.
22. Wolkoff, P., Clausen, P.A., Nielsen, P.A., Gunnarsen, L. (1993), "Documentation of field laboratory emission cell FLEC-identification of emission processes from carpet, linoleum, paint and sealant by modeling". In: Saarela, K., Kalliokoski, P., Seppnen, O., editors. *Indoor Air Indoor 93, Sixth International Conference on Indoor Air Quality and Climate*. Helsinki, Vol. 2, pp.349-554.
23. Sollinger, S., Levsen, K., Wunsch, G. (1993), "Indoor air pollution by organic emissions from textile floor coverings: climate chamber studies under dynamic conditions", *Atmos. Environ.* Vol. 27B, pp.183-192.
24. Duffy, B.L., Nelson, P.F. (1997), "Exposure to emissions of 1,3-butadiene and benzene in the cabins of moving motor vehicles and buses in Sydney, Australia", *Atmos. Environ.* Vol. 31, pp.3877-3885.
25. Korhonen, H., Lintunen, M. (2004), "The good indoor air" Like Publishing Ltd. Helsinki, Finland.
26. 환경부 (2003), "다중이용시설 등의 실내공기질 관리법".
27. Environmental Protection Agency (1999), "Compendium of Methods for the determination of toxic organic compounds in ambient air".

(2008년 2월 12일 논문접수, 2008년 4월 23일 심사완료)