

철도차량 내장재에서의 VOCs 방출특성

Emission Characteristics of Volatile Organic Compounds from the Interior Materials of Railroad Rolling Stocks

박덕신*
Park, Duck-Shin

조영민*
Cho, Young-min

ABSTRACT

The aim of this study is to investigate the emission characteristics of volatile organic compounds from the interior materials of railroad rolling stock. Samples for VOCs were collected using an environmental chamber and the samples were analyzed for 35 individual compounds. 6 different types of materials, seat cover and floor material of Mugunghwaho, Saemaeulho and electric rolling stock were analysed. The results were expressed as concentrations over 12, 18, 24, 36 and 48 hours. VOCs concentrations were measured to be higher in the 12 hours than in the 48 hours. Floor material of Mugunghwaho showed the highest concentration of all studied materials. Followed by floor materials of Saemaeulho and electric rolling stock.

1. 서론

현대인들은 하루 시간의 80 % 이상을 주택, 작업 공간, 지하 공간, 대중 교통수단 등 다양한 실내 공간에서 생활하고 있다. 이처럼 대부분의 시간을 실내에서 보내는 현대인들에게 있어 쾌적한 실내 환경은 일의 효율성을 증대시키고 나아가 인간의 건강을 유지하는데 매우 중요하다. 실내 공기 환경은 온도, 습도, 기류, 복사온도 등의 온열환경 요소와 일산화탄소, 이산화탄소, 질소산화물, VOCs 등의 가스 성분, 냄새 그리고 공기 중에 떠다니는 부유분진, 각종 미생물 등의 입자 요소로 구성되며 재실자는 이들 물질로부터 생리적, 물리적, 심리적인 영향을 받게 된다.

실내에서는 재실자의 신진대사나 활동, 각종 기기나 건축자재, 마감재료, 가구 등으로부터 방출되는 열이나 이산화탄소, 먼지, 각종 VOCs 등이 공기를 오염시키고, 실내공간이나 건축설비에서 서식하는 세균, 곰팡이와 같은 미생물들이 실내로 유입될 수 있다. 실내의 오염물질을 적절히 관리하지 않으면 공조설비나 환기시스템이 제대로 설계, 시공되었다고 하더라도 실내공기환경은 악화될 수 있다. 철도 차량 내부는 밀폐된 공간에 오염물질이 누적되어 극단적인 고농도를 유발할 가능성이 높으므로 이용 승객의 건강 영향에 대한 세심한 주의가 요구된다.

최근 정부에서는 실내 공기질에 대한 중요성을 인식하고, 관련 기준 및 항목을 점차 추가하고 있으므로 이에 대한 시의 적절한 대응을 위해서는 관련 연구의 선행이 요구된다. 이런 시점에서 본 연구를 통해 건강한 삶의 질적 향상을 추구하는 국민의식에 부응하여 철도 실내공간의 공기질을 향상시킬 수 있는 방안을 모색하였다. 또한, 유해물질 방출 실험용 챔버를 제작하여 철도 내장재중 VOCs의 방출 가능성이 높은 시트커버와 바닥재 등에서 방출되는 유해물질을 정량적으로 평가하여 향후 저감장치를 제작하거나 환기시스템을 설계할 때 필요한 기초 자료를 축적하고자 하였다.

2. 국내외 연구동향

건축 자재의 체계적인 VOCs 방출 변수 연구가 캐나다 그룹에 의해 수행되었다. 이 연구에서는 건축 자재에서 방출되는 VOC를 예측하기 위하여 자료의 VOC 확산 계수, VOC 분배 계수, 재료 두께, 표면 공기 속도의 네 가지 변수를 갖는 수학적 모델을 이용하여 시뮬레이션 디자인을 하고, 분석하고자 하는 재료의 VOC 방출 속도에 대한 네 가지 인자 (VOC 확산계수, 재료의 두께, VOC 분배계수, 표면 공기 속도)의 영향을 조사하기 위해 통계를 이용하였다. 이들의 연구 결과 VOC 확산계수와 재료 두께가 재료의 VOC 시간에 크게 영향을 미치는 반면에 VOC 분배 계수나 표면 공기 속도 등은 매우 적은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 확산 계수가 크면 VOC 방출량이 시간에 따라 급격하게 감소하고, 재료 두께가 증가하면 VOC가 방출되는 시간이 증가하였다.

건축물 내부의 내장재, 특히 카펫에서 발생하는 VOC 관련 연구도 많이 진행되어왔다. 카펫은 가정과 사무실 등 다양한 실내 환경에서 사용되고, 비교적 사용 면적이 넓으며, 장기간 사용되므로 실내공기질에 미치는 영향이 다른 VOC에 비하여 크다. 미국에서는 카펫의 쿠션에서 나오는 악취와 가스로 인해 감각장애, 폐질환, 염증, 신경이상 등의 민원이 제기되자, 미국 소비자 생상품 안전 위원회 (U.S. Consumer Product Safety Commission; CPSC)가 카펫 시스템 물질에서 배출되는 VOC의 종류와 배출량 등의 배출 상태를 조사하였다.

방출되는 총 VOC를 조사하기 위해 큰 챔버에 시료를 넣고 96시간 동안 방출되는 VOC를 측정 한 결과 농도 범위는 10~500 mg/m³이었다. 또한 공장에서 직접 얻은 시료가 유통되는 소매장에서 얻은 시료보다 VOC 농도가 낮았다. VOC 농도는 첫 24시간 동안 가장 높았고, 이후에는 시간에 따라서 점차 감소하였는데, 방출율은 시간에 따라 급격히 감소하였다. 습도가 높을 경우에는 초산이 더 많이 발생하였다. 쿠션에 카펫 피복을 입힌 경우에는 VOC 방출율이 20~90 % 감소하였는데, 피복이 쿠션으로부터 방출되는 VOC의 확산을 방지하기 때문이다.

카펫에서 방출되는 VOC의 방출 특성은 최근에 국내에서도 조사된 바 있다. 이 연구에서는 제작된 지 1일 이내의 카펫 (폴리프로필렌 계통)에서 방출되는 VOC를 ASTM 시험법에 따라 측정

하였다. 실험 초기에는 고농도의 VOC (클로로벤젠 (chlorobenzene), 에틸벤젠 (ethylbenzene), 이소프로필벤젠 (iso-propyl benzene), 브로모벤젠 (bromobenzene), 1,2,3-트리메틸벤젠 (1,2,3-trimethyl benzene), 스티렌 (styrene), 2-클로로톨루엔 (2-chloro toluene))가 방출되지만, 방출량은 시간에 따라 지속적으로 급격히 감소하였다. 그러나 성분별 방출 경향과 분자량, 끓는점, 증기압과의 연관성은 발견되지 않았다. 카펫에서 방출되는 각 물질의 농도는 카펫 내부에서의 각 물질의 확산계수, 초기 농도, 분배계수 등에 의해 의존한다. 카펫에서 방출되는 VOC의 방출 위해성을 평가하기 위하여 방출계수를 직접계산법과 일차감소모델을 이용하여 산출하여 본 결과, 이 연구에 사용된 카펫에서 방출되는 총VOC의 방출계수는 $55 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 로 미국 CRI (Carpet and Rug Institute)의 권고 기준인 $500 \mu\text{g}/\text{m}^2 \cdot \text{h}$ 를 만족시켰다. 질량방출을 조사해본 결과 초기 농도 및 농도 감소 경향에 따라 총질량방출의 변화가 나타났으며, 특히 스티렌의 질량 방출이 컸다.

카펫은 VOC를 흡착했다가 이후 오랫동안 다시 방출하여 실내 공기를 오염시키기도 하는데, 이러한 카펫의 VOC의 흡착 및 탈착 특성이 연구되기도 하였다. 이 연구에서는 1,1,1-트리클로로에탄 (1,1,1-trichloroethane), 1,2-디클로로벤젠 (1,2-dichlorobenzene), 톨루엔 (toluene)을 1~1000 ppm의 농도로 폴리아크릴로 니트릴계 카펫에 대한 흡착 및 탈착 실험을 수행하였다. 실험 결과 카펫에 VOC가 흡착하여 카펫의 질량은 증가하고, 대기 중 VOC의 농도는 감소하였다. 흡착량은 VOC 농도에 비례하였고, 낮은 온도에서 더 컸다. 흡착 계수 (헨리 계수)는 1,2-디클로로벤젠이 가장 컸고, 1,1,1-트리클로로에탄이 가장 작았다. 카펫의 섬유는 VOC를 어느 정도 흡착하여 공기 중의 최대 VOC 농도는 낮추었으나, 오랜 시간 동안 서서히 VOC가 탈착되어 VOC의 농도가 더 높은 상태로 있게 된다.

3. 실험 및 방법

3.1 유해물질 방출챔버

그림 1의 유해물질 방출실험용 챔버를 제작하여 철도 실내공간에서 사용되는 내장재에 대한 VOCs의 방출특성을 평가하였다. 챔버의 내부용적은 1.0 m^3 ($1.0 \times 1.0 \times 1.0 \text{ m}$)으로 재질은 스테인레스이며, 온도제어범위는 $-60 \sim 150 \text{ }^\circ\text{C}$, 습도제어범위는 25~98 % RH이다. 항온·항습기 내부의 온·습도는 실시간으로 모니터링되어 컴퓨터에 저장된다. 항온·항습기 내부에 들어가는 소형 방출챔버는 용적이 88 ℓ로 스테인레스 재질로 만들어졌다. 소형 챔버의 하부에는 지름 20 mm의 포트가 2개 있는데 이곳을 통해서 청정공기가 챔버 내부로 유입된다. 유입된 공기는 소형 팬에 의해 충분히 혼합될 수 있게 설계하였다. 챔버의 상부에는 2개의 포트가 있는데 이곳으로 온·습도 센서와 샘플링 튜브를 설치하였다. 방출챔버 내부로는 청정공기 공급 장치를 거친 신선외기가 공급되도록 설계하였다.

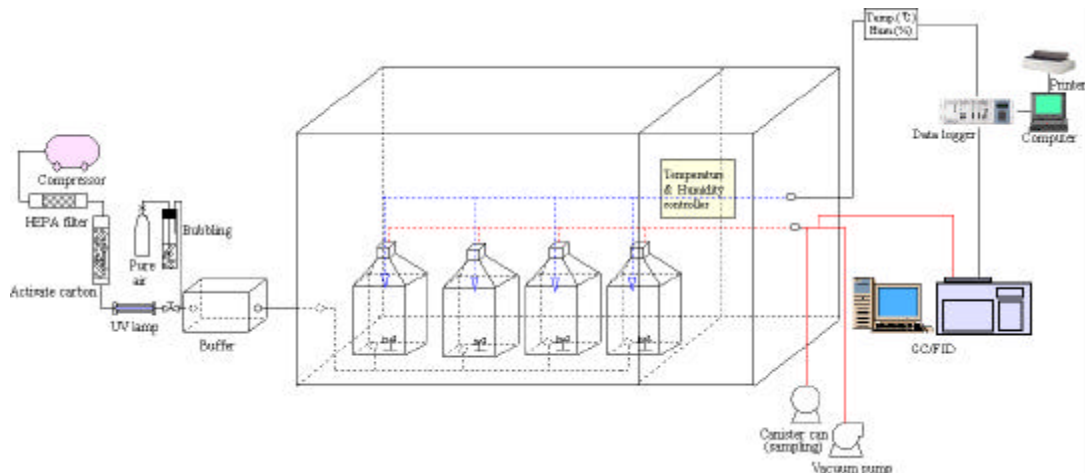


Figure 1. A schematic diagram of sampling and analysis system for VOCs emission.

Table 1. Experimental conditions for emission of interior material.

Parameter	Value
Volume	88 ℓ
Air flow rate	1.4 ℓ/min
Air change rate	1 h^{-1}
Temperature	24±2 $^{\circ}\text{C}$
Relative humidity	50±5 %
Product loading	1.455 m^2/m^3

소형 방출챔버에서 방출되는 유해가스는 캐니스터 캔으로 포집하였다. 캐니스터 캔은 VOCs에 대한 반응성이 적고 여러 가지 분석조건에서 분석할 수 있는 장점이 있다. 캔의 내부는 감압된 상태이므로 배출되는 가스는 특별한 장치가 없어도 1/4 인치의 스테인레스 튜브를 통해 캔 안으로 유입이 된다.

3.2 방출실험 조건

방출챔버를 이용하여 유해물질의 방출을 평가하기 위해서는 방출챔버 내부의 운전조건을 설정해야 한다. 사례조사를 통해 유해물질 방출실험에 적절한 운전조건을 파악하여 적합한 운전조건을 도출했으며, 표 1에 본 실험에서 적용한 철도 내장재용 방출챔버의 운전조건을 나타내었다. 소형 방출챔버의 용적은 88 ℓ , 유량은 1.4 ℓ/min , 환기 횟수는 1 h^{-1} , 온도는 24±2 $^{\circ}\text{C}$, 상대습도는 50±5 %, 시료의 부하율은 1.455 m^2/m^3 으로 설정하여 실험을 실시하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 시트커버에서의 VOCs 방출특성

무궁화호, 새마을호, 전동차에 사용되는 내장재중 시트커버의 시간에 따른 VOCs의 방출특성을 분석하였다. 실험결과 초기에는 상대적으로 고농도의 TVOCs가 방출되었으나, 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다. 그림 2에 차량별 시트커버에서 방출되는 TVOCs 농도를 시

간대별로 나타내었다. 무궁화호용 시트커버의 경우 12시간 이후 TVOCs 농도는 264.9 ppb로 나타났으나, 96시간 이후에는 70.9 ppb로 감소하였다. 새마을호용 시트커버는 초기 3시간 이후 TVOCs가 302.5 ppb에서 48시간 이후에는 93.5 ppb로 감소하였고, 전동차용 시트커버는 6시간 이후 TVOCs 농도가 190.5 ppb에서 48시간 이후에 62.1 ppb로 감소하는 것으로 나타났다.

각 물질별 측정 농도를 살펴보면 trans-1,3-Dichloropropene, 1,1,2-Tri-chloroethane, 톨루엔의 농도가 비교적 높게 조사되었다. 실험시작 12시간 경과 후의 trans-1,3-Dichloropropene의 농도는 무궁화호용 시트커버에서 81.6 ppb, 새마을호용 시트커버 84.9 ppb, 전동차용 시트커버 83.9 ppb로 가장 높은 농도를 나타내었다. 1,1,2-Trichloroethane의 경우 초기 방출량이 모든 시트커버에서 높은 것으로 조사되었다. 톨루엔의 경우, 무궁화호용 시트커버에서 12시간 후 72.0 ppb이었던 농도가 96시간 이후에는 14.9 ppb로 감소하였고, 새마을호용 시트커버의 경우 초기 3시간 후 92.7 ppb이었던 농도가 48시간 이후에는 27.6 ppb로, 전동차용 시트커버는 6시간 후 농도가 60.4 ppb에서 48시간 이후에는 19.2 ppb로 감소하는 것으로 조사되었다.

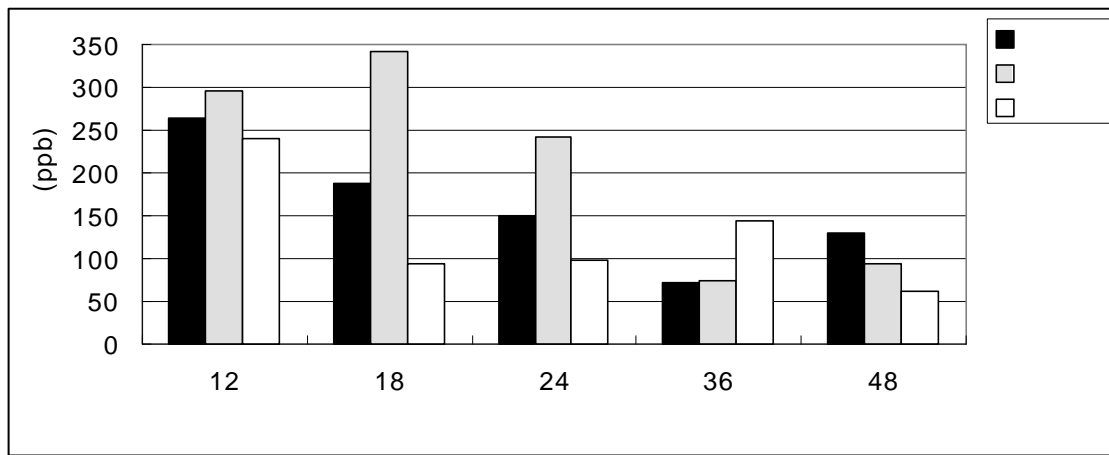


Figure 2. Characteristics of TVOCs emissions from 3 different types of seat cover.

시간에 따른 VOCs의 방출특성을 분석한 결과 에틸벤젠과 자일렌이 무궁화호, 새마을호, 전동차의 시트커버에서 저농도로 검출되었다. 12시간 이후부터 48시간 이후까지의 측정결과를 살펴보면 에틸벤젠은 새마을호용 시트커버는 1.4 ppb에서 1.3 ppb로 감소하였고, 무궁화호용 시트커버는 1.5 ppb에서 1.0 ppb로, 전동차용 시트커버는 1.1 ppb에서 0.7 ppb로 감소하였다. 자일렌의 경우 새마을호용 시트커버는 3.7 ppb에서 0.9 ppb로, 무궁화호용 시트커버는 3.7 ppb에서 1.0 ppb로, 전동차용 시트커버는 2.6 ppb에서 0.6 ppb로 감소하였다. 각 차량용 시트커버의 방출특성을 보면 새마을호용에서 가장 많이 방출되었고, 이어 무궁화호용, 전동차용의 순으로 나타났다. 에틸벤젠, 자일렌은 매우 낮은 비율로 나타났지만, 톨루엔의 경우 무궁화호용 시트커버에서 약 23 %, 새마을호용 시트커버에서 약 30 %, 전동차용 시트커버에서 약 32 %로 비교적 높은 비율을 나타내었다.

4.2 바닥재에서의 VOCs 방출특성

무궁화호, 새마을호, 전동차에서 사용되고 있는 내장용 바닥재의 시간에 따른 VOCs의 방출특성을 분석하였다. 시트커버의 VOCs 방출실험 결과와 비교해 보면 전반적으로 바닥재에서 상당히 고농도의 VOCs가 방출되는 것으로 나타났으며, 시트커버에서는 검출되지 않은 씨스-1,2 디클로로

에틸렌 (cis-1,2-Dichloroethylene)이 무궁화호용 바닥재에서 고농도로 검출되었다. 1,2-Dichloroethylene은 용매, 가솔린 첨가제, 화학물질 제조 중간체 등으로 사용되는데 나무좀을 막기 위해 살충제로도 사용되는 인체에 유해한 물질로 알려져 있다. 무궁화호용 바닥재의 cis-1,2-Dichloroethylene 농도는 실험시작 3시간 후 56.4 ppb에서 48시간 이후 12.6 ppb로 감소하였다. 바닥재의 TVOCs는 시트커버와 유사하게 초기에는 고농도로 측정되었으나 시간이 경과함에 따라서 서서히 감소하는 방출특성을 보였다. TVOCs는 무궁화호용 바닥재에서 가장 고농도로 검출되었으며, 새마을호용, 전동차용의 순으로 나타났다. 바닥재에서는 trans-1,3-Dichloropropene, 1,1,2-Trichloroethane, 톨루엔이 많이 방출되는 것으로 조사되었다.

5. 결 론

본 연구는 철도 실내공기질을 개선하기 위한 기초연구로서 철도차량에 사용되는 내장재 중 시트커버와 바닥재에서의 유해물질 방출특성을 평가하였다. 국내 철도차량에 사용된 내장재 중 시트커버의 시간에 따른 VOCs의 방출특성은 초기에는 상대적으로 고농도의 TVOCs가 방출되나 시간이 경과함에 따라 서서히 감소하는 경향을 보였다. 바닥재에서의 VOCs 방출특성을 분석한 결과 시트커버에 비해 상당히 고농도의 VOCs가 방출되었으며, 시트커버에서는 검출되지 않은 cis-1,2-Dichloroethylene이 무궁화호용 바닥재에서 고농도로 검출되었다. 본 연구를 통해 철도차량 내장재 중 시트커버와 바닥재의 휘발성 유기화합물의 방출특성에 대한 기초정보를 얻을 수 있었다.

참고문헌

- 신동민 (2003) “카펫에서 방출되는 VOCs의 방출특성”, *설비공학논문집*, Vol.15, 40-49.
- 한국철도기술연구원 (2003) 철도 신공간 창출 기반기술 개발, 연차보고서.
- Brown, S.K. (1999) Chamber assessment of formaldehyde and VOC emission from wood-based panel, *Indoor Air*, 9, 209-215.
- Elkilani, A.S. (2003) "Sorption of volatile organic compounds on typical carpet fibers", *Environmental International*, Vol.29, 575-585.
- Schaeffer, V.H. (1996) "Characterization of volatile organic chemical emissions from carpet cushions", *Journal of Air Waste Management Association*, Vol.46, 813-820.