철도차량용 그린내장재의 유해물질 방출특성 연구
Study on the VOCs emissions from the green interior materials for railroad

조영민* 박덕신* 박병현** 박은영**
Cho, Young Min Park, Duckshin Park, Byung Hyun Park, Eun Young

---

ABSTRACT

Recently, the problems in the management of indoor air quality in the railroad passenger cabins became a hot issue. As a result, the demand for the efficient management of indoor air quality in passenger cabins are increasing. The development of technology for the zero-emission interior materials is very important, because the railroad carries many passengers in a short time and most of passenger cabins are air-tight. At present, railroad stations are now under the regulation of air quality management law, while passenger cabins are exception in Korea. However, it is expected that the law will be active for the passenger cabins in a few years. Therefore, the air quality management of passenger cabins are more important to protect the health of the passengers. In this study, we developed a new interior materials, which emit less VOCs, for railroad passenger cabin.

---

1. 서론

최근 철도 객차 및 지하철 객차의 실내공기질 문제에 대한 지적이 늘면서 열차의 실내공기질 관리에 대한 요구가 급격히 증대되고 있다. 철도는 단시간에 다중이 이용하고, 간선철도의 경우에는 방음 등을 위해 밀폐되어 실내의 오염물질이 쉽게 밖으로 나갈 수 없기 때문에 실내에 오염물질이 발생하지 않도록 하는 원천기술의 개발이 요구된다. 현재 철도역사에 대해서는 '다중이용시설 등의 실내공기질 관리법'에 의해 관리되고 있으나, 객실 내부는 아직까지 본격적인 규제가 이루어지지 않고 있다. 그러나, 향후 객실 내부까지 적용대상이 확대되어 시행될 것으로 예상됨에 따라 객차 내의 실내공기질을 알맞게 유지하고 관리하여 승객의 건강을 보호하는 일의 중요성이 그 어느 때보다 더 크게 부각되고 있다.

그러나 철도차량 객실의 경우는 일반적인 실내환경과 약간 다른데, 단기간에 불특정 다수의 승객이 같은 공간에 있게 되므로 오염물질의 영향이 승객에게 크게 미치고, 실내환경 자체가 지속적으로 공간을 이동하며, 간선철도의 차량의 경우는 창문의 개폐가 안 되는 등 밀폐된 공간이 되어 기계적 환기 및 출입문을 통한 자연환기 외에는 환기가 안 되는 등의 독특한 특징이 있다. 이러한 특징들 때문에 철도차량의 실내공기는 다른 일반적인 실내환경보다 관리가 더 어렵기 때문에 객차의 실내공기는 더 오염되기 쉽다. 따라서 철도차량 객실 내부의 공기를 쾌적하게 유지하기 위해서는 적절한 환기, 차량 내부의 청소, 공기정화장치의 설치 및 운영 등의 노력이 필요하지만, 근원적으로는 새집증후군의 원인이 되는 철도차량 내장재 자체에서 발생하는 오염물질의 양이 적어야 하며, 또한 이미 발생된 객실 공기 중의 오염물질을 제거할 수 있는 친환경 기능성 내장소재의 개발의 중요성이 커지고 있어 이에 대한 연구가 필요하다.

---

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원
** 한국철도기술연구원 연구원, 정회원

본 연구에서는 유해물질의 방출이 적은 기능성 그린내장재를 개발하고, 유해물질 방출특성 시스템을 이용하여 개발한 그린내장재의 유해물질 방출량을 평가함으로써, 유해물질 방출량을 최소화할 수 있는 그린내장재 제작 조건을 찾아내고자 하였다. 본 연구에서 개발한 그린내장재는 실용화를 위한 보완 연구를 통하여 향후 철도객차에 적용함으로써 객실의 실내공기질을 개선할 수 있도록 하고자 한다.

2. 실험

2.1 시편의 제작

본 연구에서는 철도차량용 바닥재와 내장판에 광촉매를 처리하여 그린내장재를 제작하였다. 철도차량 바닥재는 PVC 및 TPO 베이스수지를 이용하여 제작하였다. PVC바닥재는 기존 철도차량의 바닥재 사용품이며, TPO베이스의 경우는 친환경 및 무독성 기준에 의한 고무계 바닥재이다. 각각의 시험편에 대한 광촉매의 처리는 0, 0.5, 1.0 및 2.0%로 표면 코팅법을 사용하여 처리하였다. 철도차량 내장판은 불포화폴리에스테르 수지를 이용하여 핸드레이업법에 의해 제작하였다. 총두께는 3mm 이며 도색층인 겔코트층은 0.25mm이었다. 광촉매는 겔코트층 상부에 도포하여 표면 코팅하였으며 각각의 시험편에 광촉매의 처리는 0, 0.5, 1.0, 2.0%로 처리하였다. 시편의 크기는 350mm × 400mm 4EA /1set로 각 시료당 3set를 제작 후에 실험에 사용하였다.

2.2 유해물질방출량 평가 시스템

본 연구에서 방출실험에 사용된 소형 챔버는 용량이 88 L로 VOC 분석에 영향을 주지 않는 스테인레스 재질로 되어있다. 또한 구성 부품의 분리가 가능하도록 제작하여 세정·가열처리가 용이하도록 하였다. 챔버의 하부에는 지름 20 mm의 포트가 2개 있는데 이를 통해서 청정공기가 챔버 내부로 유입되도록 하였고, 유입된 공기는 내부에 설치된 소형 팬으로 충분히 혼합될 수 있게 설계하였다. 챔버의 상부에는 2개의 포트가 있는데 이곳으로 온·습도 센서를 설치하고, 챔버 내부에서 발생된 유해물질은 캐니스터 캔을 이용하여 포집하고, GC/MS를 이용하여 VOC를 분석하였다.

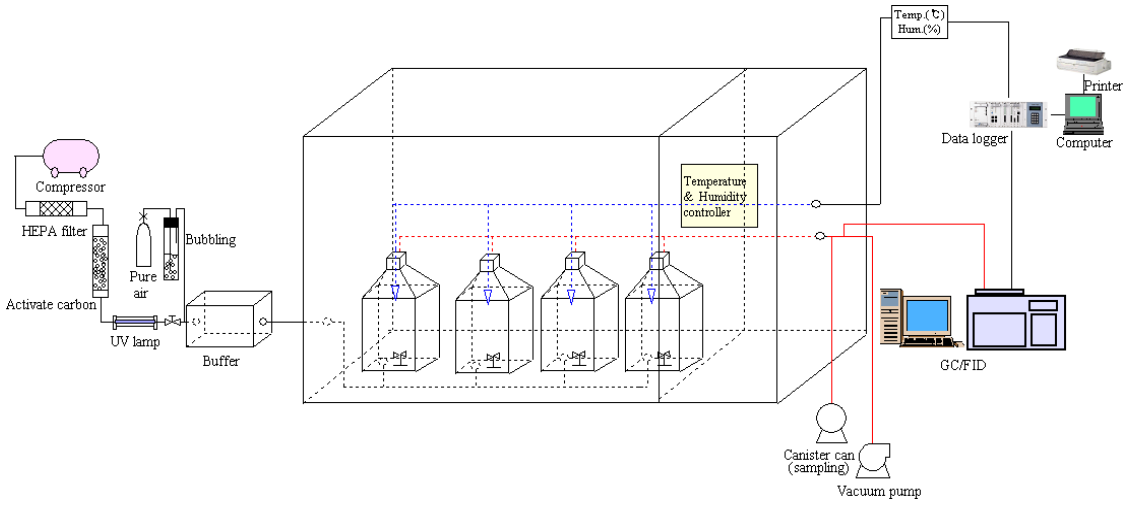

그림 1. 유해물질 방출실험용 챔버 및 분석장치 구성도

이 시스템의 운전조건을 표 1에 나타내었다. 소형 방출챔버의 용적은 88 L, 유량은 1.4 L/min, 환기 횟수는 1 h^{-1}, 온도는 24±2 ℃, 상대습도는 50±5 %, 시료의 부하율은 1.455 ㎡/㎥으로 설정하여 실험을 실시하였다.

표 1. 유해물질 방출챔버의 운전조건

Parameter	Value
Volume	88 ℓ
Air flow rate	1.4 ℓ/min
Air change rate	1 h^{-1}
Temperature	24±2 ℃
Relative Humidity	50±5 %
Product loading	1.455 ㎡/㎥

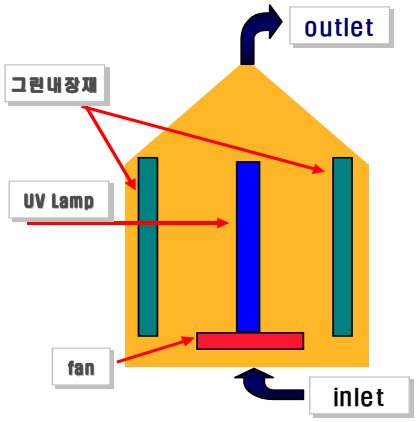

그림 2. UV-광활성 평가 시스템

2.3 UV 광활성 평가 시스템

유해물질 방출특성 평가시스템의 실내환경 챔버 내부에 그림 2와 같이 36W mercury lamp를 장착하였다. 실험은 광촉매의 효과를 확인하기 위하여 크게 자외선을 조사해주지 않은 dark 상태와 자외선을 조사한 UV 상태의 두 가지로 나누어 수행하였으며, VOC의 농도를 초기, 6, 12, 24, 48시간 후에 각각 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 바닥재의 유해물질 방출특성

3.1.1 Dark 상태에서의 VOCs 방출량

자외선을 조사하지 않은 dark 상태에서는 광촉매 반응이 일어날 수 없으므로 TiO_2의 단순 첨가에 의한 유해물질 방출속도 저하 정도를 알아보고자 하였다. 광촉매가 없을 때에는 초기에 다양한 종류의 고농도의 VOCs가 발생하고, 이후 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 광촉매가 0.5% 첨가되어 있을 때에는 표 5.27과 같이 초기 6시간의 VOCs 방출량이 광촉매가 첨가되지 않았을 때와 비교하여 현저히 감소하는 것을 볼 수 있었다. 그러나, 12시간 이후에는 광촉매가 첨가되지 않았을 때와 비슷한 수준까지 증가하고 이후 다시 방출량이 다시 점차 감소하였다. 광촉매가 1% 첨가되어 있을 때에도 0.5% 첨가되어 있을 때와 마찬가지로 초기 6시간의 VOCs 방출량이 광촉매가 없을 때보다는 작았으나 0.5% 첨가된 경우보다는 많았다. 이후 절반 수준으로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 광촉매가 2% 첨가되어 있을 때에는 초기 농도가 광촉매가 없을 때와 유사한 수준으로 컸으며, 광촉매가 첨가된 다른 경우와 마찬가지로 12시간에서 방출량이 더 커졌고, 그 이후 점차 감소하였다. 따라서 dark 상태에서 광촉매가 첨가되면 초기 방출량은 적어지며, 12시간에 방출량이 최대가 되는 것을 알 수 있었다. 또한, 광촉매 첨가량이 클수록 6시간에서의 방출량 (peak값)이 최대가 되는 것으로 보아 dark 상태에서는 광촉매를 소량 첨가하였을 때가 가장 효과가 좋은 것으로 나타났다.

그림 3은 TiO_2 첨가량에 따른 총 VOCs의 변화를 나타낸 것이다. 광촉매가 0.5~1% 첨가되었을 경우에는 6시간 경과 후의 농도가 낮고 대신 12시간 경과 후의 농도가 높아지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 2%까지 증가시키면 초기 농도도 크고, 특히 12시간 경과 후의 농도가 급격하게 증가하였다. 이는 광촉매가 많으면, dark 상태에서도 일종의 촉매로 작용하여 2차 생성물을 유발하는 반응이 발생하기 때문인 것으로 보인다.

3.1.2 자외선 조사 상태에서의 VOCs 방출량

UV 상태에서는 광촉매 반응이 가능하므로 TiO_2의 광반응에 의한 유해물질의 저감 혹은 부산물 생성 여부 등을 조사하였다. 광촉매가 없을 때에는 초기 12시간에 다양한 종류의 고농도의 VOCs가 발생하고, 이후 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 광촉매가 0.5% 첨가되어 있을 때에는 12시간 후에 VOCs 농도가 크게 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 이는 광촉매 반응에 의하여 VOC가 분해되기 때문이다. 그러나, 24시간 후에는 다시 다소 증가하였는데, 이는 광촉매 반응 중에 부산물로 다른 종류의 VOC가 생성되기 때문이다. 그러나, 시간이 지남에 따라 다시 감소하였다. 광촉매가 1%와 2% 첨가되어 있을 때에도 0.5% 첨가되어 있을 때와 마찬가지로 12시간 경과 후에 총 VOC 농도가 크게 감소하는 것을 볼 수 있었는데, 이는 광촉매 반응에 의하여 VOC 물질들이 분해되었기 때문이다. 이처럼 자외선을 조사하면 암반응과는 반대로 초기 12시간 후에 VOC 농도가 크게 줄어들었으며, 광촉매의 양과는 큰 상관관계가 없는 것으로 나타나 소량의 광촉매만 존재하여도 충분히 반응이 일어남을 알 수 있었다.

그림 4는 TiO_2 첨가량에 따른 총 VOCs의 변화를 나타낸 것이다. 광촉매가 첨가되면 VOC의 농도가 12시간 경과 후에 크게 감소하는 것을 볼 수 있다. 이는 광촉매의 반응에 의하여 VOC가 분해되기 때문이다. 그러나, 24시간 및 48시간 경과 후에는 VOC 농도가 모든 경우에 있어서 유사하게 나타났는데, 이는 광촉매의 효과는 자외선을 조사하기 시작한 초기에 특히 크게 나타남을 의미한다.

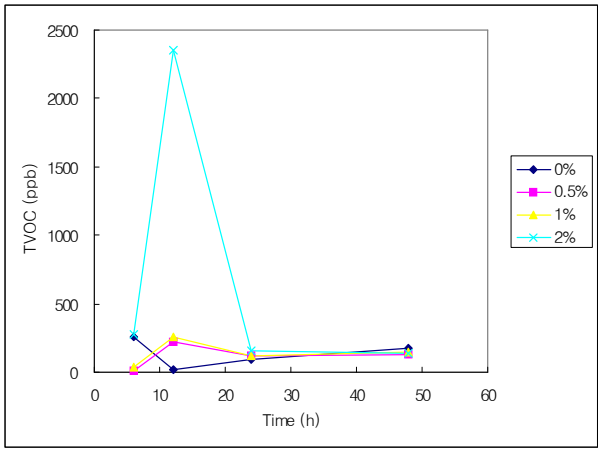

그림 3. 바닥재의 dark 조건에서의 VOC 방출

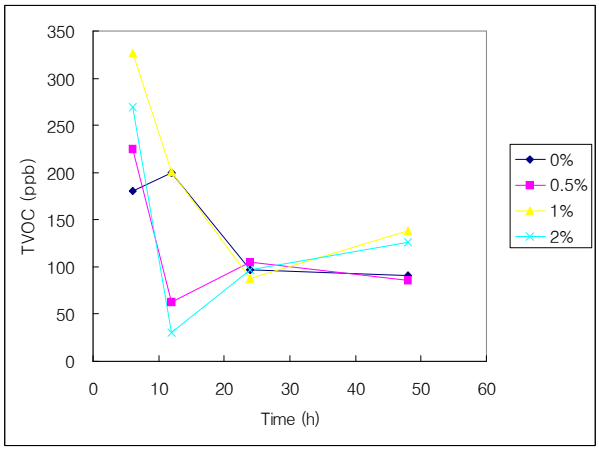

그림 4. 바닥재의 UV 조건에서의 VOC 방출

3.2 내장판의 유해물질 방출특성

3.1.1 Dark 상태에서의 VOCs 방출량

Dark 상태에서는 광촉매 반응이 일어날 수 없으므로 TiO_2의 단순 첨가에 의한 유해물질 방출속도 저하 정도를 알아보고자 하였다. 광촉매가 없을 때에는 초기 12시간 동안 다양한 종류의 고농도의 VOCs가 발생하고, 24시간 경과 이후로는 그대로인 것을 알 수 있었다. 광촉매가 0.5% 첨가되어 있을 때에는 6시간 경과 후의 총 VOCs 발생량이 크게 감소하고, 12시간 및 24시간 경과 후에도 VOC 방출량이 TiO_2가 없을 때보다 훨씬 적게 나타났다. 이는 광촉매에 의해 유해물질 방출이 다소 억제되었기 때문으로 보인다. 그러나, 48시간 경과 후에는 VOC가 다소 증가하였는데, 이는 광촉매의 암반응에 의한 부산물 생성 때문인 것으로 보인다. 광촉매가 1% 첨가되어 있을 때에는 6시간 후의 농도는 광촉매가 첨가되지 않았을 때와 유사하게 나타났으나 12시간 후의 농도는 절반 정도로 감소하였고, 24시간 및 48시간 경과 후의 농도도 광촉매가 존재하지 않을 때의 2/3 수준에 불과하였는데, 이는 내장판 표면의 광촉매에 의해 유해물질 방출이 억제되었기 때문인 것으로 보인다. 광촉매가 2% 첨가되어 있을 때에는 6시간 경과 후의 VOC 농도가 가장 낮게 나타나 유해물질 방출이 적었으나, 12시간 후에는 매우 높은 VOC 농도가 나타났다. 그러나, 이후에는 1%일 때와 유사하게 낮은 농도로 나타나 광촉매에 의해 dark 상태에서도 VOC

방출이 억제됨을 확인할 수 있었다.

그림 5는 TiO_2 첨가량에 따른 총 VOCs의 변화를 나타낸 것이다. 광촉매가 없을 때에는 6시간 농도가 매우 높았으나, 광촉매가 첨가된 경우에는 6시간 농도가 모두 광촉매가 없을 때보다 낮았다. 12시간 경과 후에는 6시간 경과 후보다 농도가 증가하였고, 그 이후에 모두 크게 감소하는 것으로 나타났으나, 광촉매가 1% 첨가된 경우에는 처음부터 지속적으로 감소하는 것을 볼 수 있었다. 이는 광촉매가 1% 첨가되었을 때가 유해물질 방출의 억제가 가장 잘 일어나는 최적 조건임을 의미한다.

3.1.2 자외선 조사 상태에서의 VOCs 방출량

UV 상태에서는 광촉매 반응이 가능하므로 TiO_2의 광반응에 의한 유해물질의 저감 혹은 부산물 생성 여부 등을 조사하였다. 광촉매가 없을 때에는 초기 12시간 동안의 농도가 낮았고, 24시간 경과 후에 다소 증가하였다가 48시간 후에는 다시 초기 농도만큼 감소하였다. 광촉매가 0.5% 첨가되어 있을 때에는 24시간 후에 VOCs 농도가 낮아지는 것을 볼 수 있었는데, 이는 광촉매 반응에 의하여 VOC가 분해되기 때문이다. 그러나, 48시간 후에는 다시 초기 농도 수준으로 증가하였는데, 이는 광촉매 반응 중에 부산물로 다른 종류의 VOC가 생성되기 때문인 것으로 보인다. 광촉매가 1% 첨가되었을 때의 6시간 농도는 광촉매가 0.5% 첨가되었을 때보다 낮았으나, 12시간과 24시간 후에는 오히려 더 크게 나타났으나, 48시간 후에는 크게 감소하는 것으로 나타났다. 광촉매가 2% 첨가되어 있을 때에도 0.5% 첨가되었을 때보다 6시간 농도는 낮게 나타났으며, 이후 다소 증가하다가 다시 감소하는 것으로 나타났다. 이처럼 광촉매가 첨가된 내장판에 자외선을 조사하면 초기의 VOC 농도가 다소 증가하였으나, 이후 광반응에 의하여 점차 감소하는 것을 볼 수 있었다. 광촉매의 첨가량은 반응 속도에 큰 영향을 미치지는 않으며, 소량의 광촉매만 첨가되어도 되는 것으로 나타났다.

그림 6은 TiO_2 첨가량에 따른 총 VOCs의 변화를 나타낸 것이다. 광촉매가 첨가되면 광촉매가 없을 때보다 초기 농도가 다소 크게 나타나지만, VOC의 농도가 12시간 경과 후에 크게 감소하는 것을 볼 수 있는데, 이는 광촉매의 반응에 의하여 VOC가 분해되기 때문이다. 전체적인 농도는 자외선을 조사할 때가 자외선을 조사하지 않을 때보다 훨씬 낮은 것으로 나타났는데, 이는 광촉매에 의한 VOC 분해 반응이 자외선 조사 조건에서 활발히 일어났기 때문이다.

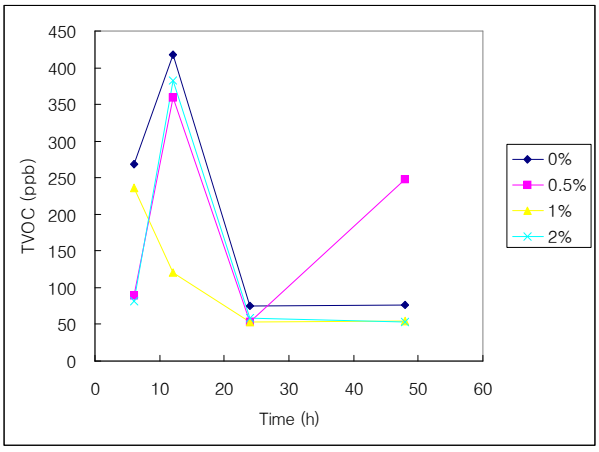

그림 5. 내장판의 dark 조건에서의 VOC 방출

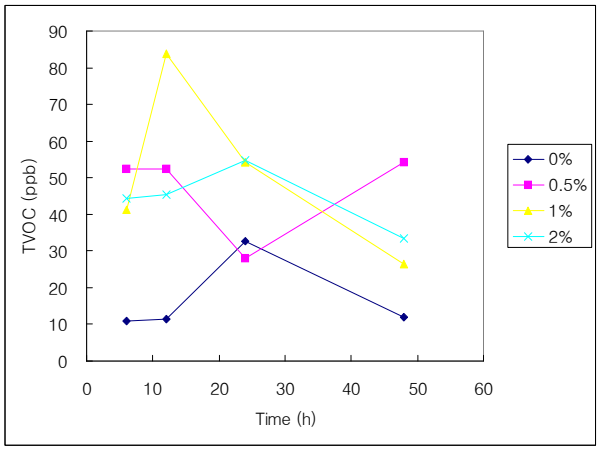

그림 6. 내장판의 UV 조건에서의 VOC 방출

4. 결론

내장판과 바닥재에 광촉매를 적용하여 본 결과, 광촉매를 첨가하면 dark 조건에서도 유해물질의 방출이 억제되거나 더 서서히 진행되는 것으로 나타났으며, 여기에 자외선을 조사하면 자외선에 의한 분해반응과 광촉매에 의한 광촉매 반응에 의해 유해물질의 농도가 매우 낮아지는 것으로 나타났다.