

철도차량 내장재용 FRP 복합재의 연기밀도 특성

이덕희, 정우성, 박덕신, 김선옥
한국철도기술연구원

Smoke Density Characteristics of the FRP Composite Panel for railcars

Lee Duck Hee, Jung Woo Sung, Park Duck Shin, Kim Sun Ok
Korea Railroad Research Institute

1. 서론

최근 국내 철도차량용 부품 제작사 및 운영처에서는 철도차량 화재안전성 향상을 위한 평가방안 및 적절한 적용기준 정립작업에 주목하고 있다. 철도차량 소재 중 화재안전과 관련 있는 내장재, 바닥재, 의자, 커튼 등의 소재가 바로 관심의 대상이다. 이 중에서 내장 판넬은 가장 많은 면적을 차지하여 일차적으로 화재성능 향상을 요구받고 있는 부위다. 현재 국내 철도차량용 내장재로 사용되고 있는 소재는 불연성 칼라강판, 멜라민 하드보드, FRP(Fiberglass Reinforced Plastics) 복합재 판넬 등인데, 이 중에서도 강도 및 형상 가공성이 우수하고 외피처리가 미려한 FRP 복합재료가 많이 사용되고 있다. 그러나 차량 내장재로 사용되는 FRP 복합재는 합성고분자 수지의 연소에 의한 다량의 연기와 유독성 가스를 발생시키는 취약성도 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 선진 철도에서는 이와 같은 문제에 대처하기 위하여, 적어도 승객이 피난할 때까지의 내연기능 및 화재의 전파를 지연시키기 위한 적절한 화재안전 기준을 설정하여 적용하고 있다. 영국의 BS 6853 이나 프랑스의 NF 16-101, 미국의 NFPA 130등이 철도차량의 화재안전성을 종합적으로 규정하는 기준이다.

우리나라의 철도차량 FRP 내장재도 화재 안전기준이 점차 강화되어 과거의 KS 3015 (열경화성 플라스틱 일반 시험 방법)의 자기소화성 평가뿐 아니라 KS F 2271(건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험 방법)의 연기 및 독성평가를 추가하여 난연 2급 이상의 제품을 사용하도록 규정하고 있다. 그러나 현행 수행되고 있는 평가법은 당초 철도차량용 내장재를 평가하기 위한 목적으로 작성된 것이 아니거나 국제적인 시험방법과 차이가 있어 단계적으로 개선될 여지가 있고, 선진철도에 비하여 안전기준도 다소 낮게 설정되고 있는 것으로 평가된다.

본 연구에서는 선진철도의 차량내장재용 연기밀도시험법으로 적용되고 있는 ISO 5659 및 ASTM E 662 시험법에 따라서 수지 종류와 마감처리 및 판넬의 형상을 변화시켰을

때 평가된 FRP 복합재의 연기밀도 시험결과의 변화를 정리하였다.

2. 본문

2.1 연기밀도 시험방법

연기밀도를 평가하는 방법으로는 챔버내에 연소가스를 가두어 평가하는 방법과 강제 또는 자율배기 상태에서 배기관내의 연기밀도를 평가하는 방법이 사용되고 있다. BS 6853(영국의 철도차량 화재안전규정)의 3미터 입방체나 KS F 2271의 연기포집상자 및 본 연구에서 사용한 ISO 5659 및 ASTM E 662 등의 연기상자 등이 챔버를 이용하는 방법에 해당한다면, ISO 5660의 콘칼로리미터나 ISO 9705(Room Corner Test), SBI(Single Burning Item)등은 연소가스의 배기관에서 연기를 평가하는 방법으로 분류할 수 있겠다. 챔버법은 주로 소형시편에 적용되며 시험의 재현성 등에 유리한 장점이 있고, 배기관법은 대부분 시험편을 실제 외기에 노출시킨 상태에서 연소시키므로 실제 화재와 유사한 특성을 조사할 수 있다는 장점을 평가받고 있다.

일반적으로 연기밀도시험법은 그림1과 같이 광원과 광량 감지기 사이에 연기가 통과하는 공간을 두어 연기에 의해서 차단되는 광투과율을 측정하는 방법을 이용한다. 본 연구에서 사용한 연기상자는 ISO/TC 61의 ISO 5659-2(Determination of optical density by a single-chamber test)와 ASTM E 662(Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials) 기준에 따른 NBS(National Bureau of Standards) 연기상자(smoke box)다. 시편은 75mm×75mm의 넓이를 가지며 두께는 형상에 따라 차이가 있다. 연기밀도(Specific Smoke Density: D_s) 평가방법은 연기상자의 형상으로부터 결정되는 상수 G 값과 PM (photo multiplier) 튜브에서 감지되는 투과율 T 및 필터조건에 의해서 결정된다.

$$D_s = G \left(\log \frac{100}{T} + F \right)$$

$$G = V/(A \times L)$$

(V : volume of the Chamber, A : specimen surface area,

L : light pass length)

T = transmittance of light

F = the density of the filter or 0 (depend on filter condition)

시험결과는 동일한 시험조건 아래서 정상적으로 처리된 3개 시험값의 평균으로 처리하였다. 시편의 연소조건은 25kW/m²의 열복사에 노출되고, flaming mode의 경우 시편의 표면에 Pilot flame이 접촉하도록 하였고, non-flaming mode의 경우 Pilot flame 없이 시험하였다. 이 시험법을 철도규격에 적용하고 있는 미국의 NFPA 130(Fixed Guideway Transit System)은 25kW/m²의 열복사 상태에서 Flaming mode와 Non-flaming mode에서 각각 시험하여 연기발생이 많은 방법으로 평가한 결과가 $D_s(1.5\text{min}) \leq 100$, $D_s(4.0\text{min}) \leq 200$ 이 되도록

록 내장재의 연기밀도 기준을 정하고 있다. FRP 내장재의 경우는 flaming mode에서 대체로 더 많은 연기가 발생하였다.

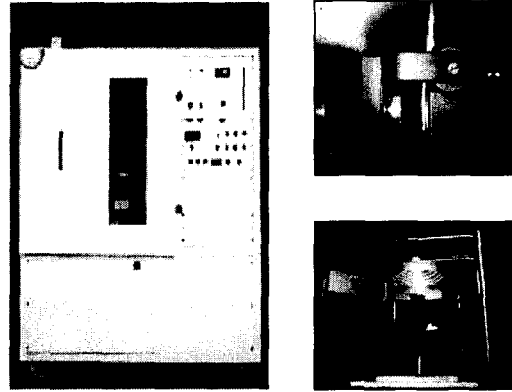
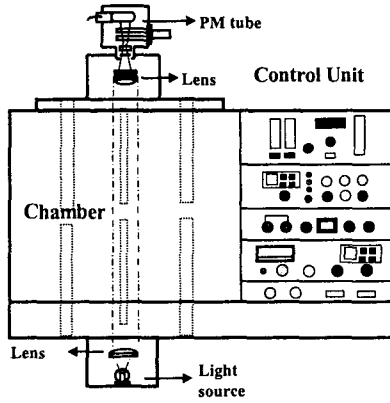


그림 1. 연기밀도시험기의 구성도 그림 2. 연기상자와 ASTM E 662(상), ISO 5659(하)

2.2 시험법에 따른 연기밀도(Ds) 평가

그림 2에 나타내었듯이 ASTM E 662법과 ISO 5659법의 차이는 전기로의 열복사방향에 따라 시편의 연소형태가 수직형과 수평형으로 구분되는 데 있다. 수평연소와 수직연소에 특성에 따른 FRP 복합재의 연기 발생량을 평가하기 위하여 같은 시편에 대하여 25kW/m2 열복사 조건에서 비교시험을 실시하였다.

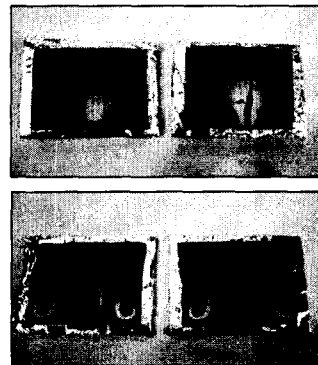
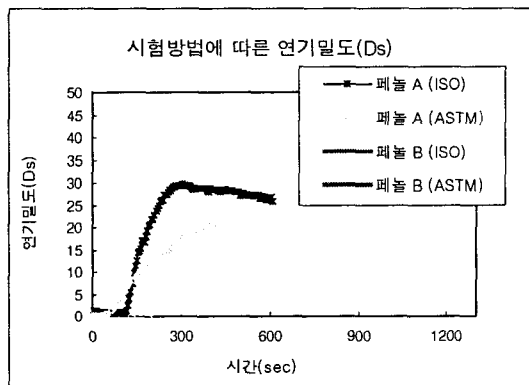


그림 3. ISO 와 ASTM 시험법에 따른 연기밀도 그래프와 연소시편 (상-ISO, 하-ASTM)

시험결과는 동일한 조건의 시편에 대하여 ISO 5659-2 방법이 ASTM E 662 방법에 비하여 많은 연기를 발생하였다. ISO 전기로에서 연소되는 시편에서 상대적으로 크고 지속 시간이 긴 화염이 발생하는 것을 관측할 수 있었다. 연소 후 시편의 무게감소(mass loss)

를 평가했을 때도 ISO 방법에 따른 수평연소가 ASTM 수직연소에 비하여 커서, 수평연소에서 더 많은 수지가 연소되었음을 확인 할 수 있었다. 현재 미국의 NFPA 130에서 정하고 있는 철도차량 내장재의 연기밀도 적용기준은 ASTM E 662법에 따라 시험하도록 하였는데, 만약 ISO 수평연소로 평가하고자 한다면 동일한 시편일지라도 위와 같이 연기발생량이 증가한다는 것을 고려하여야 할 것이다.

2.3 수지의 종류와 마감처리 등에 따른 연기밀도(Ds) 평가

현재 국내 철도차량 내장재 FRP 판넬에는 불포화 폴리에스테르 계열의 수지와 페놀 수지 등이 쓰이고 있고 에폭시 수지를 이용하여 물성을 개선하려는 제품 등이 개발중이다. 이러한 수지의 종류에 따른 연기밀도 차이를 평가하기 위하여 ASTM E 662 법의 Flaming mode법에 따라 비교하였다. 각 수지별 대표적인 시험결과를 그림 4에 비교하여 나타내었다. 왼쪽의 결과는 페놀 및 에폭시, 페놀-에폭시 혼합수지의 연기밀도 특성을 시험한 결과이다. 시편은 겔코트나 페인트 마감처리를 생략하여 수지변화에 따른 연기밀도 특성만을 평가할 수 있도록 하였다. 시험결과 에폭시의 Ds(max, 9분) 값이 140 정도로 나타났으며 페놀의 경우는 Ds(max) 값이 10 내외로 매우 우수한 연기밀도 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 페인트나 필름 등으로 마감처리를 한 경우는 그림 5와 같이 연기밀도 값이 추가로 30~70 정도 상승하는 것으로 나타났다. 오른쪽에 나타낸 불포화 폴리에스테르 계열의 수지는 Base 수지와 첨가제나 겔코트 등으로 5가지 타입의 변화를 주어 평가한 결과이다. 이 경우에는 그림에 나타낸 바와 같이 Ds(max) 값이 거의 300이상에 분포하였으며, 대체로 NFPA 130 기준을 만족시키기 어려운 것으로 나타났다. 국내 기준설정의 경우 이와 같은 점을 고려하여 차량의 운행조건에 따른 적용기준의 등급분류 등을 고려하여야 할 것이다.

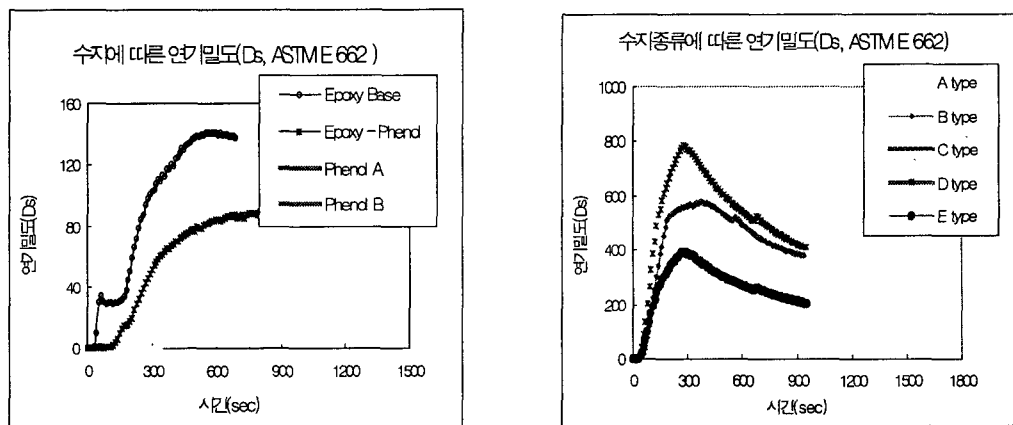


그림 4. 수지에 따른 연기밀도 특성
(좌 : 에폭시- 페놀계열, 우 : 불포화 폴리에스테르 계열)

형상에 따른 특성시험을 평가하기 위하여 동일한 페놀 수지로 판형(laminate)과 샌드위치 및 부분 샌드위치(semi-sandwich)형으로 시편을 제작하여 ASTM E 662 방법에 따라 연기밀도 특성 시험을 수행하였다. 샌드위치형은 FRP 판재 사이에 벌집구조(Nomex honeycomb)를 삽입한 형상으로 시험결과 착화 및 연소가 먼저 진행하였으나 화염과 접촉하는 판재의 수지연소가 일찍 종결되며 연기밀도는 가장 낮았고 일반 판형이 가장 높게 나타났다.

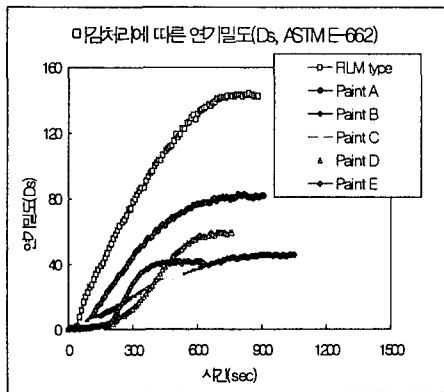


그림 5. 마감처리에 따른 연기밀도

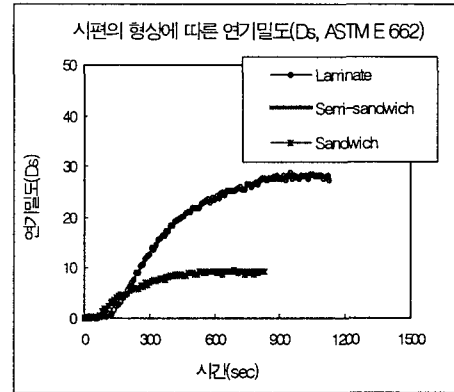


그림 6. 시편의 형상에 따른 연기밀도

이와 같은 결과는 화염에 노출되는 FRP 판재의 두께에 의하여 결정되는 것으로 보인다. 샌드위치 구조는 벌집구조가 중심부에 삽입되면서 화염에 접촉된 앞면의 판재만 연소되고 뒷면은 연소되지 않는 특성이 나타나면서 보다 두꺼운 두께의 단층판이 연소하는 경우에 비하여 연기발생이 적어지게 되었다. 그러나 화염이 일찍 발생하고 빠르게 진행하므로 착화성 및 화염전파 측면에서는 불리한 것으로 보인다.

3. 고찰

본 연구를 통하여 우리는 국내외에서 사용되는 연기밀도평가법의 기본적인 개념을 정리하고, NBS 연기밀도상자를 이용하여 철도차량 내장재용으로 사용되는 FRP 복합재의 연기밀도 특성을 평가하였다. ISO 5659-2 수평연소 방법과 ASTM E 662 수직연소 방법을 사용하여 두 가지 타입의 페놀 FRP의 연기밀도 특성을 평가한 결과 ISO법에서 더 높은 연기밀도 값을 확인할 수 있었다. 둘째로 에폭시와 페놀 및 불포화 폴리에스테르 계열의 수지를 비교하여 시험한 결과 페놀의 연기밀도 값이 현저하게 낮게 나타남을 확인하였다. 세 번째로 FRP 판재를 일반판형과 부분 샌드위치 및 샌드위치형으로 제작하여 연기밀도 시험을 수행한 결과 샌드위치형의 연기밀도 특성이 우수한 것으로 나타났으나 점화시간 및 화염전파 특성에서는 불리한 것으로 예측하였다. 그러나 기초소재의 화재안전성 평가는 단순한 연기밀도 결과로 판단될 수 없으므로 착화성, 발열량, 화염전파성 가스유독성 등의 평가결과가 보완되어 종합적으로 검토되어야 할 것이다.

참고문헌

1. ISO 5659-2, "Determination of optical density by a single-chamber test"
2. ASTM E 662, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials"
3. NFPA 130, "Fixed Guideway Transit System"
4. BS 6853, "Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains"
5. KS M 3015, "열경화성 플라스틱 일반 시험 방법"
6. KS F 2271, "건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험 방법"
7. ISO 5660, "Rate of heat release from building products(Cone calorimeter method)"