철도차량용 FRP 내장재의 화재안전성 평가
Fire Safety Characteristics of the FRP composites for railcar

이덕희* 정우성** 김용기** 김선옥***

Lee, Duck-Hee Jung, Woo-Sung Kim, Yong-Ki Kim, Sun-ok

ABSTRACT

In this study we reported the Smoke Density, the Toxicity, the Flame Spread Characteristics and the Oxygen Index of the FRP composite interior panels for raicars. Also investigated the test codes of the concerning items of other countries. We made some samples to the variance of resin types, surface finishing methods and panel shapes. It's not the really used ones but may help us effectively to guess the fire safety characteristics of railcars.

1. 서론

철도차량용 내장재료로 현재 사용되고 있는 소재는 불연성 칼라강판, 멜라민 하드보드, FRP(Fiberglass Reinforced Plastics) 복합재 판넬 등이다. 이중에서도 FRP 복합재는 강도가 뛰어나고 형상 가공성이 우수하여, 차체의 경량화 및 쾌적한 객실공간 연출을 위해 많이 사용되고 있다. 그러나 FRP에 함유된 레진류는 차량 화재시에 다량의 연기와 유독성 가스를 발생시키는 취약성도 가지고 있는 것으로 알려져 있다. 우리나라의 철도차량용 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. 따라서 본 연구에서는 선진철도에서 적용하고 있는 국제기준에 따라 현재 철도차량용 FRP 복합재로 사용되고 있는 내장재의 종류에 따라 산소지수, 연기밀도 특성 및 가스 유독성, 화염전파 등을 평가하고 대표적인 결과를 정리하였다.

2. 본문

2.1 연기밀도 및 가스유독성 특성

연기밀도를 평가하는 방법으로는 챔버내에 연소가스를 가두어 평가하는 방법과 강제 또는

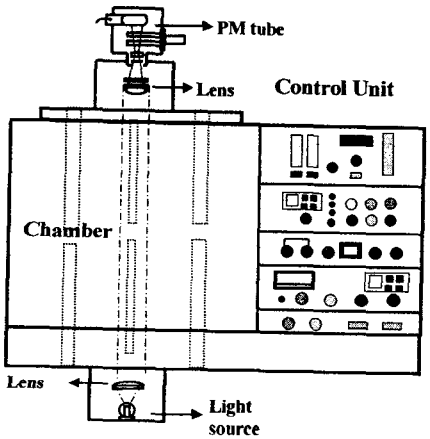
* 한국철도기술연구원 주임연구원

** 한국철도기술연구원 책임연구원

**** 한국철도기술연구원 연구원

자율배기 상태에서 배기관내의 연기밀도를 평가하는 방법이 사용되고 있다. BS 6853의 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.

본 연구에서 사용된 연기밀도시험기는 그림1과 같이 광원과 광량 감지기 사이에 연기가 머무는 공간을 두어 연기에 의해서 차단되는 광투과율의 변화를 측정하도록 설계되었다. 미국의 NFPA 130은 25kW/m^{2}의 열복사 상태에서 Flaming mode와 Non-flaming mode에서 평가하여 연기발생이 많은 방법으로 Ds(1.5min)≤100, Ds(4.0min)≤200이 되도록 철도차량 기준을 정하고 있다. FRP 내장재의 경우는 flaming mode에서 대체로 연기가 더 많이 발생하였다.



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

G = V/(A×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)

그림1. 연기밀도시험기의 구성도

연기밀도(Specific Smoke Density: Ds) 평가방법은 연기상자의 크기와 시편의 크기로부터 결정되는 상수 G값과 PM (photo multiplier) 튜브에서 감지되는 투과율 T 및 필터조건에 의해서 결정된다. 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/m^2 열복사 조건에서 비교시험을 실시하였다.

시험결과는 동일한 조건의 시편에 대하여 ISO 5659-2 방법이 ASTM E 662 방법에 비하여 많은 연기를 발생하였다. ISO 전기로에서 연소되는 시편에서 상대적으로 크고 지속시간이 긴 화염이 발생하는 것을 관측할 수 있었다. 연소후 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.

그림 2의 왼쪽은 난연성 FRP로 평가되고 있는 페놀 및 에폭시, 페놀-에폭시 FRP의 연기밀도 특성을 ASTM E 662 방법에 따라 시험한 결과이다. 시편은 겔코트나 페인트 마감처리를 생략하여 수지변화에 따른 연기밀도 특성만을 평가할 수 있도록 하였다. 시험결과 에폭시의 Ds(max, 9분) 값이 140 정도로 나타났으나 NFPA 철도 기준에 비하여도 양호한 것으로 평가되며, 페놀의 경우는 Ds(max) 값이 10 내외로 매우 우수한 연기밀도 특성을 나타냄을 알 수 있었다. 반면 불포화 폴리에스테르계열의 수지는 Ds(max) 값이 대체로 300이상에 분포하였으며, 대체로 NFPA 130 기준을 만족시키지 못하고 있는 것으로 나타났다.

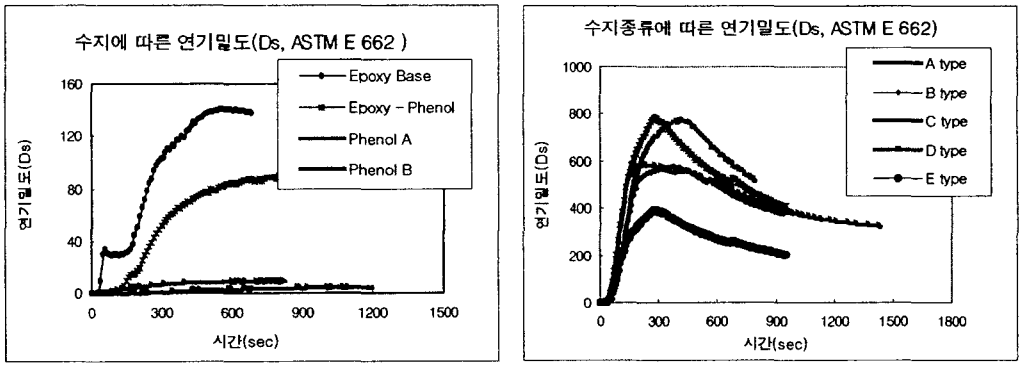


그림2. 수지에 따른 연기밀도 특성(좌 : 에폭시- 페놀계열, 우 : 불포화 폴리에스테르 계열)

동일한 시험조건에서 형상에 따른 연기밀도 시험을 수행한 결과 샌드위치형의 연기밀도가 가장 낮았고 일반 판형(laminate)이 가장 높게 나타났다. 이와 같은 결과는 화염에 노출되는 FRP 판재의 두께에 의하여 결정되는 것으로 보인다. 그러나 같은 이유로 화염전파 특성에서는 샌드위치 판재가 점화시간이 빠르고 화염이 빠르게 진행하므로 착화성 및 표면화염전파 측면에서는 불리한 것으로 평가되었다. 페놀 A의 표면에 페인트와 Film 마감한 경우의 연기밀도를 그림3에 나타냈다.

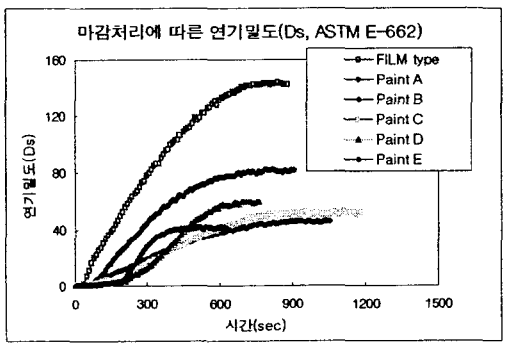


그림 3. 마감처리에 따른 연기밀도 특성

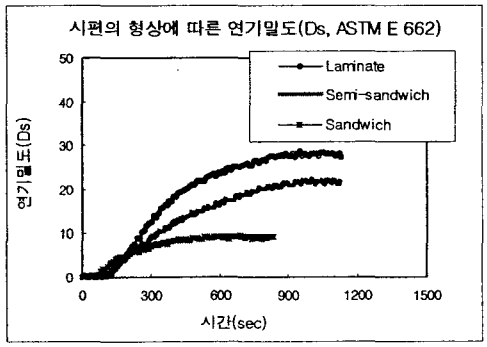


그림4. 시편의 형상에 따른 연기밀도 특성

연기밀도와 함께 연기에 대한 화재안전성 평가에서 주목하는 점은 가스의 독성에 대한 평가이다. 현재 철도차량용 내장재에 적용되고 있는 유독성 평가는 KS F 2271의 생쥐시험법인데, 이 방법은 유독성 여부를 측정하는 데는 적절하지만 재현성과 객관성 측면에서 단점이 있으므로 정량적인 화학분석 방법으로 보완되어야 할 것으로 보인다. 연소가스에 대한 선진적인 평가방법은 연

소가스를 포집 또는 On-Line 연결하여 GC, 가스텍튜브, FT-IR 등으로 평가하는 것이다. 이 중에서 FT-IR Gas Cell을 활용하는 방법은 시험대상 연소가스와 On-Line 연결을 가능하게 하여 시간에 따른 가스의 정량적 변화를 지속적으로 관찰할 수 있게 하였으며, 동시에 여러 가지 가스를 분석하는 장점을 가지므로 점차 사용이 확대되고 있다.

본 연구에서도 ISO 5659 연기상자에 FT-IR Gas Cell 장치를 연결하여 BS 6853 Annex B(prEN 2826)의 방법에 따라 가스에 대한 평가를 수행하였다. BS 6853에서의 가스 유독성을 평가하기 위해서는 독성지수 R값을 계산하여야 하는데, R값은 아래의 식에 의하여 구해진다. $f_{(x)}$는 표1의 값으로 30분 이상 노출시 생명이나 건강에 유해한 값을 의미한다.

$$R = \sum r_{(x)} \quad , \quad r_{(x)} = \frac{c_{(x)}}{f_{(x)}} [c_{(x)}\text{는 } x \text{ 가스의농도, } f_{(x)}\text{는 } x \text{ 가스의 } Reference \text{ 농도}]$$

표 1. 유해가스의 Reference values

유해가스	Reference values (mg/g or mg/㎥)
CO	280
CO_2	14,000
HCl	15
HBr	20
HCN	11
HF	4.9
SO_2	53
NOx	7.6

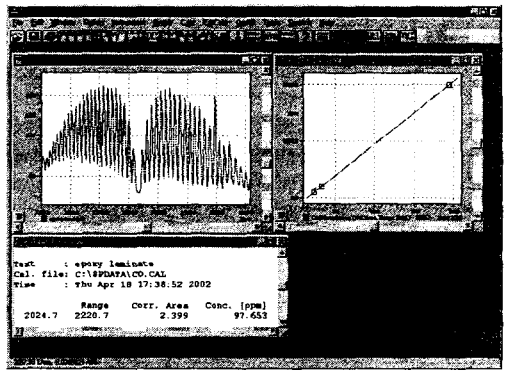


그림 5. 그림3. FT-IR을 이용한 CO 분석사례

본 연구에서 선정한 시험편의 시험결과는 표2와 같이 나타났다. BS 기준에는 철도차량 내장재는 R< 1, 외장재의 경우는 R < 2가 되도록 규정하고 있는데 에폭시와 불포화 폴리에스테르 계열(Unsaturated Polyester)의 경우 기준에 적합하지 않은 것으로 평가되었다. 그러나 본 시험에 선정된 시편이 같은 계열의 수지로 만들어질 수 있는 여러 가지 타입을 대표하는 것은 아니다.

표 2. 수지의 종류에 따른 연소가스 평가 사례

구 분	Phenol A		Phenol B		Phenol/Epoxy		Epoxy type		UP B type	
	Conc (ppm)	r(x)	Conc (ppm)	r(x)	Conc (ppm)	r(x)	Conc (ppm)	r(x)	Conc (ppm)	r(x)
CO	117.9	0.046	140.85	0.054	145.35	0.056	391.05	0.151	1498.5	0.579
CO_2	6000	0.073	7500	0.091	5500	0.067	11500	0.139	13000	0.158
SO_2	0	0.000	0	0.000	1	0.005	9	0.042	114	0.533
HCl	< 15	0.141	< 15	0.141	-	0.000	-	0.000	-	0.000
HBr	< 5	0.078	< 5	0.078	-	0.000	-	0.000	-	0.000
HF	< 5	0.079	< 5	0.079	-	0.000	-	0.000	-	0.000
HCN	< 5	0.047	< 5	0.047	-	0.000	-	0.000	-	0.000
NOx	15	0.351	8	0.187	37	0.865	101	2.362	7	0.164
R	< 0.815		< 0.678		> 0.993		> 2.695		> 1.434	

2.2 화염전파 특성

철도차량의 화재안전을 평가하기 위하여 고려되어야 할 것 중 하나는 화재의 전파에 관한 항목이다. 화재의 전파를 평가하기 위한 평가법 중 BS 476-6(Method of test for fire propagation for products)은 재료를 통과하여 전파하는 양상을 평가하는 것이고, BS 476-7(Methods for classification of the surface spread of flame of products)과 ISO 5658-2(Reaction to fire tests -spread of flame- 중 lateral spread on building products in vertical configuration)는 수직형 표면을 통한 화염전파 특성을 평가하는 것이다. ISO 9239(Reaction to fire tests for floorcoverings - Determination of the burning behavior using a radiant Heat source)와 ASTM E 648의 경우는 수평형 화염전파성을 평가하는 시험법이다. 본 연구에서는 철도차량용 내장재가 주로 사용되는 벽면(Walls)을 고려하여 수직형 시험법인 ISO 5658-2 시험기를 이용하여 몇가지 종류의 FRP 내장재에 대하여 평가를 수행하였다.

그림 6. 화염전파(ISO 5658) 시험장면

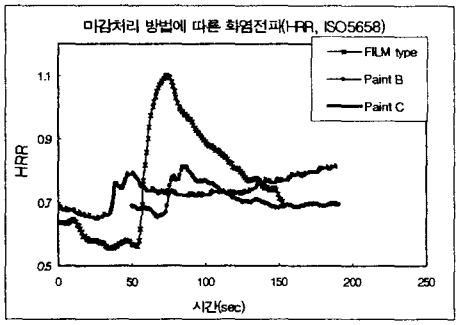


그림 7. 마감처리에 따른 화염전파 특성

표 3. 수지종류 및 마감처리에 따른 화염전파 특성 비교

품 명		Time (sec)		time to burned length		Extend of burn (mm)
		ignition	flame out	200mm	300mm	
Laminate	Phenol A	102.0	291.5	119.2	191.8	338.3
	Phenol B	162.3	331.5	193.5	278.0	300.0
	Phenol/Epoxy	77.3	467.3	98.7	149.0	433.3
	Epoxy	40.8	540.0	49.5	89.8	440.0
표면처리	페놀 A+ Panit A	39.5	73	59.5	-	270
	페놀l A+ Film	37	126	53	93	366
	UP B(gelcoat) type	51	397	63	105	410
	UP D(gelcoat) type	38	246	52	94	385

2.3 산소지수 특성

산소지수 시험은 일정한 비율의 산소와 질소를 혼합한 공기 중에서 시편을 연소시켜 불꽃이

지속되는 시간이 일정시간(ISO 4589-2: 180초) 이상이 되는 최소한의 산소농도를 평가하는 시험이다. 철도차량 내장재에 대하여 산소지수를 평가하도록 규정하고 있는 규격은 프랑스의 철도차량 기준인 NF F 16-101과 국제철도연맹의 철도규격 UIC 564-2이다. NF에서는 철도차량의 등급을 구분하여 지하구간을 운행하는 A, B범주의 차량에 대하여 산소지수가 45이상인 I1급 이상의 자재를 사용하도록 하고, 일반구간을 운행하는 차량인 C범주의 차량에 대하여는 32이상인 I2급을 사용하도록 하고 있다. 산소지수 시험방법에 대한 기준은 ISO 4589-2, ASTM D 2863, NF T 51-071, UIC 564-2 appendix 7 등에 제시되어 있다. 본 연구에는 ISO 방법에 따라 평가하였다.

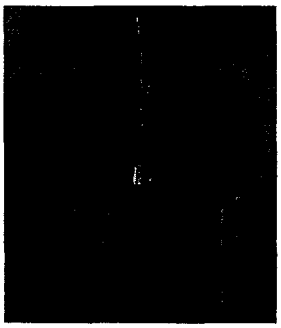


그림 8. 산소지수 시험

표 4. 산소지수 시험결과

구 분	O.I(%)
Phenol A + Panit A	61.91
Phenol A + Film type	54.75
UP B(gelcoat) type	29.92
UP D(gelcoat) type	34.85

시험결과 페놀타입은 표면처리에 관계없이 I1급 이상의 결과를 나타내었고 UP 계열의 경우는 대체로 12 이하의 값에 넓게 분포하였다.

3. 결과 고찰

본 연구를 통하여 철도차량용 FRP 내장재의 화재안전성을 연기밀도 외의 몇 가지 항목에 대하여 국제기준에 따라 수행하였다. 페놀, 에폭시, 불포화 폴리에스테르 수지의 화재 특성을 몇 가지 타입의 샘플을 제작하여 개괄적으로 비교하였다. 일부 항목의 경우는 마감처리와 형상에 대한 평가결과도 정리하였다. 그러나 본 연구에서 평가한 시편은 실제 차량에 장착된 것을 평가한 것은 아니므로 기본적인 참고자료로서만 활용되어야 할 것이다. 향후 국내차량에 설치될 FRP 제품에 대한 실질적인 평가와 기존의 KS 또는 KRS 평가법을 고려한 국내 안전기준 설정이 요구되고 있다. 시편의 평가결과에 의하여 철도차량의 화재안전성이 전적으로 결정되지 않고, 차량구조나 운용여건을 종합적으로 검토하여야 한다는 점도 간과되어서는 안 될 것이다.

참고문헌

1. ISO 5659-2, "Determination of optical density by a single-chamber test"
2. NFPA 130, " Fixed Guideway Transit System"
3. BS 6853, "Code of practice for fire precautions in the design and construction of passenger carrying trains"
6. KS F 2271, "건축물의 내장 재료 및 구조의 난연성 시험 방법"

7. BS 476-6, Method of test for fire propagation for products
8. BS 476-7, Methods for classification of the surface spread of flame of products