

# 콘칼로리미터를 이용한 내장판용 복합재료의 화재특성

## Fire Characteristics of Composites for Interior Panels Using Cone calorimeter

이철규<sup>1</sup> · 정우성<sup>2</sup> · 이덕희<sup>1</sup>

Cheul-Kyu Lee · Woo-Sung Jung · Duck-Hee Lee

### Abstract

Composite materials were used widely due to merit of light weight, low maintenance cost and easy installation. But it is the cause of enormous casualties to men and properties because of weak about the fire. Particularly, it is more serious in case of subway train installed composite materials. For this reason, experimental comparison has been done for measuring heat release rate(H.R.R) and smoke production rate(S.P.R) of interior panels of electric motor car using cone calorimeter. A high radiative heat flux of  $50\text{kW/m}^2$  was used to burn out all materials and to simulate the condition of fully developed fire case in the tests. It was observed that Heat Release Rate and Smoke Production Rate curves were dependent on the kinds of the interior materials. From the heat release rate curves, the sustained ignition time, peak heat release rate and total heat release rate were deduced. These data are useful in classifying the materials by calculating two parameters describing the possibility to flashover.

**Keywords** : Electric Rolling Stock(전동차), Interior panel(내장판), Composite(복합재) Heat Release Rate(발열량), Smoke Production Rate(연기방출량), flashover(플래시오버)

### 1. 서론

60년대 초 Boron섬유의 도입으로 시작된 복합재료는 현재 나노 복합재까지 상당히 발전되어 왔다. 무게에 비하여 높은 탄성계수, 고강도를 갖고 있는 특성으로 인하여 초기에는 항공분야에 사용되기 시작하였다. 현재는 무게감량, 낮은 유지비용, 간편한 설치 및 제작방법 등의 장점으로 인하여 금속, 나무 및 콘크리트를 대체하는 제품으로 산업 전반적으로 사용되고 있다. 양질의 재료와 미적인 우수성, 내부식성, 환경친화적 공법 등으로 인하여 내장재료로도 적용되어왔다. 이러한 복합재료는 열이나 화염에 노출될 경우 고분자 모재수지가 가교결합분자의 분해 및 화학반응에 의한 기화 확산과정을 거쳐 착화되어 연소반응이 진행된다. 따라서 복합재료가 내장재료로 사용된 경우 막대한 인명 및 재산피해를 일으킬 수 있는 원인을 제공하게 된다.

특히, 많은 사람이 이용하는 운송매체인 철도차량에 적용될 경우 사용되는 복합재료에 대한 화재특성을 사전에 정립할 필요가 있다. 미국 FRA(Federal Railroad Administration)에서는 1984년 이후 화재안전분야에 대한 연구를 수행하여 철도에서 화재로 인한 피해정도를 감소시키기 위하여 노력하였으며, 객차의 디자인 및 내장재, 화재감지 와 소화분야에 대한 체계적인 접근을 시도하였다[1]. 이 시기에 전동차에 사용된 재료에 대한 인화성 및 연기방출량 등에 대한 전반적인 화재기준을 마련하여 발표하였다[2]. 기준에 포함되지 않았던 바닥재와 연결통로막에 대한 항목이 추가되어 1989년에 기준이 수정되었으며 이러한 재료에 대한 기준을 정립한 후 유럽과 미국등에서 small-scale 테스트를 통하여 재료의 화재성능을 평가하였다[3,4]. 1993년 FRA의 지원으로 NIST(National Institute of Standards and Technology)와 ERRI(European Railway Research Institute)에서는 보다 신뢰성있으며 비용이 절감되는 방법으로 재료의 발열량(Heat Release Rate, H.R.R)를 이용하여 화재모델링을 통한

1 정희원, 한국철도기술연구원 철도환경연구그룹, 주임연구원

2 정희원, 한국철도기술연구원 철도환경연구그룹, 책임연구원

연구를 수행하였다. 이러한 H.R.R을 이용한 fire modeling과 독성가스분석 연구의 현실성있는 결과를 도출하기 위하여 Volpe Center(Volpe National Transportation Systems Center)에서는 광범위한 화재안전프로그램을 개발하였다.

철도차량 내장재료의 화재안전기준의 보강과 더불어 재료의 내화성능향상에 대한 관심 또한 고조되어 런던의 Kings Cross지하역에서의 화재사고 이후 영국 런던 공항고속열차 등에 페놀계열의 내외장재를 적용하기 시작하였다[5].

국내 철도차량의 내장재료 중 내장판의 경우 기존에 적용된 복합재료의 재질은 대부분이 불포화폴리에스테르(FRP) 및 MPAL(Melamine Panel Aluminum Laminate)계열의 소재를 이용하고 있으며 화재기준으로는 KS규격과 KRS 표준규격을 적용하여 자기소화성 이상의 재료를 사용하고 있으나 선진국의 기준에는 미흡한 실정이다. 또한 대구지하철참사 이후 난연, 불연성 재료에 대한 개발 및 화재성능에 대한 기준의 필요성을 인식하고 관련법을 개정하며 향상된 내열재료를 개발하고 있으며 그 경향은 MPAL(Melamine Panel Aluminum Laminate) 및 페놀계열이 대부분을 차지하고 있다.

본 연구는 이러한 내장판에 적용된 재료별 화재성능을 Cone Calorimeter를 이용하여 발열량(H.R.R) 및 연기방출율(Smoke Prodection Rate, S.P.R)을 측정하여 결과를 측정 및 비교하였으며, 또한 재료특성에 따른 flashover에 대한 경향을 예상하는 기준을 적용하여, Cone Calorimeter를 이용하여 측정한 시편에 대한 화재 특성 평가에 새로운 기준을 적용하는 데 목적이 있다.

## 2. 실험방법

### 2.1 실험대상

실험에 사용된 시편을 Table 1에 정리하였으며 시편의 제조방법에 따라 (I), (II)로 구분하였다. 국내 전동차에 적용하

Table 1. 실험시편재료

구분	두께 (mm)	비고	
기존 적용	FRP(I)	3	제조공법에 따라 분류
	FRP(II)	3	
	H.I.P	3	
	MPAL(I)	2	
신규 재료	MPAL(II)	1.5	멜라민수지 접착
	Phenol(I)	3	페놀계 FRP
	Phenol(II)	4	페놀수지층 상하 합성 아크릴레이트계열 접착

고 있는 내장판에는 KS M 3015 자기소화성 규격과 KS F 2271 난연 2급이상 기준의 불포화 폴리에스테르수지가 사용된 유리섬유 강화 F.R.P(G-FRP)와 수지함유량 65 %이하인 MPAL, 아크릴 변성 고충격 염화비닐 수지판을 사용하여 압출성형법에 의해 제조된 고충격플라스틱등이 사용되고 있었다. 이러한 기존 내장판 시편과 신규 개발품인 MPAL 및 Phenol계열의 내장판을 재질별 실차량 적용형태의 두께로 확보하여 동일 시편당 3회 이상의 실험을 수행하여 평균값을 결과로 사용하였다.

### 2.2 실험방법

국내 전동차에 적용된 내장판의 재질별 발열량 및 연기방출율을 측정하기 위하여 영국 FTT사의 dual-Cone Calorimeter를 이용하여 ISO 5660 Part 1 및 Part 2의 시험방법에 따라 실험하였다. Fig. 1에 dual-Cone Calorimeter의 개략도를 나타내었으며, 이 장치는 콘 형태의 복사전기히터, 산소분석장치, 유량측정용 레이저가 부착된 ventilation시스템, 시편의 질량을 측정하기 위한 질량측정장치, 시편홀더, 스파크 점화회로, 열량 측정을 위한 heat flux meter, 매탄열량측정을 위한 버너 및 데이터 수집/분석시스템으로 구성되어 있다.

실험은 재질별로 확보된 내장판 시편을 100mm × 100mm 크기(두께: 시편두께)로 준비하였으며, 복사열은 화재시나리오 4단계(ignition, growth, fully develop, decay)중 차량의 실제 화재상황과 가장 유사한 단계인 fully developed에 해당되는 복사열수준인 50kW/m<sup>2</sup>로 설정하였다.

시편홀더 및 grid의 경우는 동일한 조건을 주기 위하여 모든 시편에 동일하게 적용하였으며 pyrolysis gas에 정확하기 위하여 spark igniter를 사용하였다.

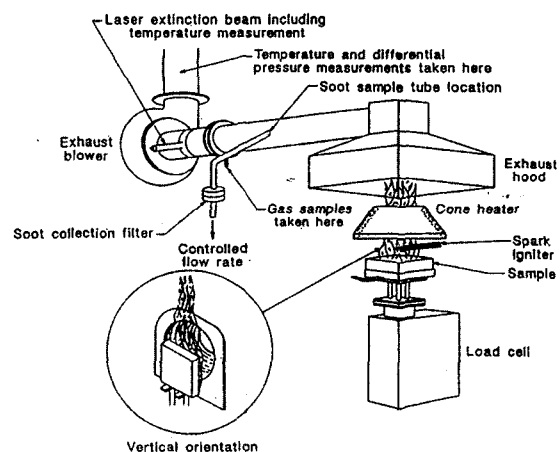


Fig. 1. Cone Calorimeter 개략도

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 발열량(Heat Release Rate, H.R.R)

발열량(H.R.R)은 재료의 연소시 소비되는 산소소비량을 측정하여 H.R.R을 역으로 계산한 것으로 일반적으로 연소시 산소 1kg당 약 13 MJ의 열방출을 한다고 가정하여 계산한다. 열방출량은 초기단계의 Peak Heat Release가 중요한데 이것은 화재의 초기성장속도 및 크기에 대한 정보를 제공한다. Babrauskas와 Krasny는 콘칼로리미터에 의한 실험을 통하여 재료가 착화 후 180초에서의 평균발열량이 실제 규모 화재에서의 최대발열량 값에 상응한다고 보고하였으며, NFL(National Fire Laboratory)의 연구결과에서는 착화 후 300초에서의 평균발열량이 실제규모 화재실험에서의 결과와 더 좋은 상관관계를 갖는다고 주장하였다. ISO규격에서는 시험기준에서 180초 및 300초 평균발열량을 측정하고 있다[6]. 본 실험에서 Cone Calorimeter를 이용하여 기존 및 개발 내장판 재질별 Heat Release Rate를 측정하여 Fig. 2, Fig. 3에 비교하였다. 실험결과 기존복합재료의 발열량의 경우 대부분이 많은 열방출량을 나타내었으며, 특히 기존 철도 차량에 가장 많이 적용된 F.R.P계열의 경우 F.R.P(I)은 Peak H.R.R.로 보이는 Peak 2개를 볼 수 있는데 이것은 연소로 인

하여 생성된 char residue로 높은 복사열로 인하여 바로 재연소되는 것을 보여주었다.

또한 다른 내장재료와 비교하여 초기발열량 및 이차발열량이 상당히 큰 것으로 나타났다.

고충격플라스틱 및 F.R.P(II)의 경우 고분자물질이 연소함에 따라 생성된 carbonaceous 물질이 barrier로 작용하면서 지속적인 열방출을 보여주고 있음을 알 수 있었다. 신규 내장판 재질 중 Phenol계열의 경우 Phenol계-FRP와 불연물질을 처리한 Phenol(II)의 차이를 볼 수 있는데, 이를 통하여 Phenol수지의 경우는 Phenol수지 자체로는 우수한 내화성능을 기대하기 어려운 것으로 판단된다.

#### 3.2 연기방출량(Smoke Production Rate, S.P.R)

Cone Calorimeter를 이용하여 재료의 연소시 발생되는 연기의 양을 Bougure's law를 이용하여 extinction 상수 및 volume flow rate를 이용하여 연기방출량을 측정할 수 있다 [7]. 또한 인체흡입시 치명적인 carbon monoxide의 양 또한 측정이 가능하다. 화재가 발생하였을 경우 발생하는 연기에 의한 사상자가 많은 것을 고려하였을 때 사용되어지는 재료의 연기발생량을 줄이는 것 또한 중요한 것으로 판단된다. 따라서 내장판의 재질별 연기방출율(S.P.R)을 조사하여 Fig. 4,

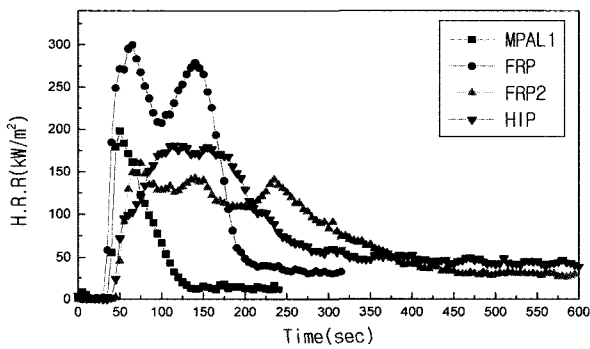


Fig. 2. 기존 내장재료 H.R.R

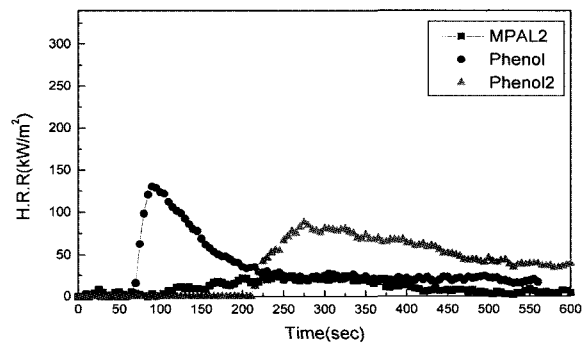


Fig. 3. 신규 내장재료 H.R.R

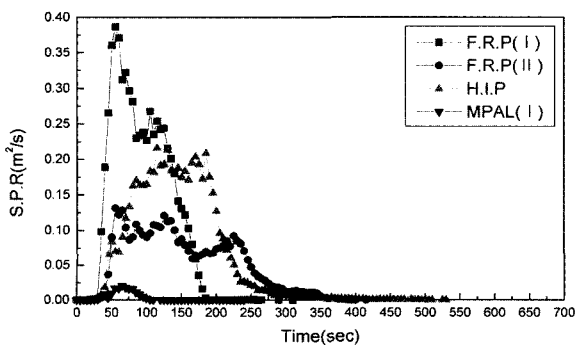


Fig. 4. 기존 내장재료 S.P.R

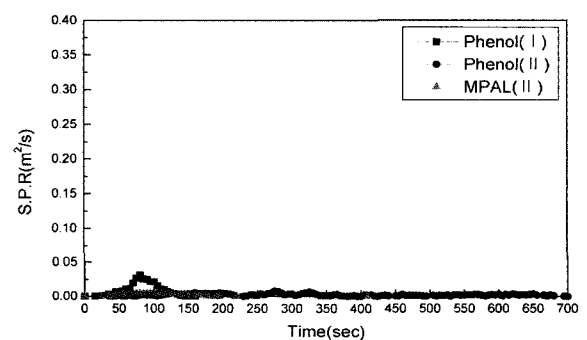


Fig. 5. 신규 내장재료 S.P.R

Table 2. 재료별 Smoke 데이터

구 분	T.S.R	peak SEA	peak SEA Time	average SEA	CO Yield	CO <sub>2</sub> Yield	
	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /kg	sec	m <sup>2</sup> /kg	kg/kg	kg/kg	
기존 적용	F.R.P I	3,110.2	1,402.6	165	1,123.5	0.088	1.04
	F.R.P II	2,281.7	1,714.3	75	672.7	0.065	0.97
	H.I.P	3,436.1	1,296.1	180	768.4	0.082	0.83
	MPAL I	88.2	854.8	82	117.4	0.0143	1.31
신규 재료	MPAL II	47.0	281.3	50	96.7	0.009	0.73
	Phenol I	149.8	1,020.5	140	224.5	0.079	2.39
	Phenol II	160.4	350.2	625	34.9	0.057	1.27

Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4, Fig. 5에서 알 수 있듯이 기존 복합재료중에서 F.R.P 및 H.I.P의 연기방출률(S.P.R)이 발열량(H.R.R)과 마찬가지로 상당히 높게 나타났으며, MPAL 계열의 경우 수치층의 두께가 상대적으로 낮으며 불연처리로 인하여 Phenol계열과 같이 상당히 낮음을 알 수 있었다. 또한 기존에 철도차량에 적용된 복합재료와 개발중인 재료와의 연기방출량의 차이를 비교해 볼 때 상당히 감소하고 있음을 알 수 있다.

Table 2에는 Cone Calorimeter로 측정된 재료별 smoke 관련 데이터를 정리하였다. 총연기방출량(Total Smoke Release, T.S.R), 비소화면적(Specific Extinction Area, S.E.A), CO 및 CO<sub>2</sub> 방출량을 나타내었는데 여기서 S.E.A는 S.P.R을 질량감소율로 나눈 것으로 연기관련 지수로 많이 연구되고 있다. T.S.R결과에서 H.R.R과 동일하게 F.R.P 계열이 가장 높게 나타났으며 신규내장재료에서 상당히 감소한 것을 알 수 있다. MPAL(II)의 경우 수치층이 얇으며 불연처리가 되어 있어 연기량, CO 및 CO<sub>2</sub>량 또한 적게 나타났다. 기존 적용 복합재료의 Carbon monoxide의 발생량 또한 높게 나타남을 알 수 있다.

### 3.3 Flashover경향을 통한 화재특성 평가

일반적으로 화재시나리오에 관련되는 매개변수는 수 없이 많지만 대표적으로(화재지연특성, 발열량, 연소생성물의 특성, Flashover, 화염전파속도)등을 들 수 있다. Flashover란 실내화재 시 연소열에 의해 천정류(ceiling jet)의 온도가 상승하여 600℃ 정도가 되면 천정류에서 방출되는 복사열에 의하여 실내에 있는 모든 가연물질이 분해되어 가연성 증기를 발생하게 됨으로서 실내 전체가 연소하게 되는 상태를 이야기하며, 이러한 현상을 전공간화재(full space involvement: FSI)라고 표현하기도 한다. 전실화재 단계도 다시 구분하게 되면 전실화재전단계(pre-flashover)와 전실

후단계(post-flashover)로 구분할 수 있다[8,9].

Flashover 화재 전 단계(pre-flashover)에서 실내화재가 flashover 화재로의 전개 여부는 화재 안전에서 가장 큰 관심이 된다. 또한 이 기간 중에 화재의 탐지 및 거주 인원의 안전 피난이 이루어지게 된다. 따라서 flashover 전 단계의 화재 위험분석은 거주 인원의 화재 안전을 예측하는데 매우 중요한 역할을 하게 된다.

발화시간 및 flashover 시간의 예측은 화재를 예방하기 위해서 중요한 연구가 된다. 최근 Ostman 등이 연구한 자료를 이용하여 발화시간 및 flashover 시간의 예측할 수 있는 모델을 제시하였고, 또한 Whiter 등은 다양한 내장재의 flashover 시간에 대하여 실험적으로 연구하여오고 있다.

Flashover 시간에 영향을 주는 인자는 다음과 같다.

- ① 실의 형태(shape of compartment)
- ② 발화원의 위치(position of ignition source)
- ③ 발화원면적(ignition source area)
- ④ 열방출율(heat release rate)
- ⑤ 발화시간(time to ignition)

등이 있다.

재료의 flashover에 기여하는 정도를 예상하는 방법으로는 Petrella는 최대발열량(Peak Heat Release Rate, pk H.R.R)와 총발열량(Total Heat Release Rate, THR)로 기준을 이용하여 분류하였는데. 계산하는 방법은 다음과 같다.

$$x = \frac{pkHRR}{TTI}, y = THR$$

계산한 다음 분류기준은 아래와 같다.

- x = 0.1~1.0 : Low  
 = 1.0~10 : Intermediate  
 = 10~100 : High  
 y = 0.1~1.0 : Very low(V.L.)  
 = 1.0~10 : Low(L)  
 = 10~100 : Intermediate(I)  
 = 100~1000 : High(H)

Petrella방법을 실험한 재료에 적용하여 재료별 flashover에 대한 결과를 Table 3에 정리하였다.

발열량의 결과에서 예상하였듯이 F.R.P(I)의 경우 flashover에 대하여 높은 수준임을 알 수 있으며, MPAL(II)와 Phenol(II)의 경우 예상과 같이 낮은 수준을 보여주었다. Intermediate에 해당되는 재료의 경우는 시편별 측정된 발열량의 분포가 넓게 나타나고 있음을 알 수 있다.

이와 같이 Petrella의 기준을 철도차량에 사용되는 내장재

Table 3. 재료별 flashover 특성

구 분	T <sub>ig</sub> sec	Peak HRR	THR	x	x 분류	y 분류	
		KW/m <sup>2</sup>	MJ/m <sup>2</sup>	-	-	-	
기존 적용	F.R.P I	29	296.2	34.2	10.2	H	I
	F.R.P II	44	160.7	38.4	3.7	I	I
	H.I.P	42	180.9	48.4	4.3	I	I
	MPAL I	34	198.1	9.5	5.8	I	L
신규 재료	MPAL II	N.I.	18.1	1.2	0	L	L
	Phenol I	52	131.6	17.5	2.5	I	I
	Phenol II	211	88.3	38.1	0.4	L	L

료에 대하여 Cone Calorimeter로부터의 결과를 이용하여 flashover 경향을 구분할 수 있었으며, 이를 통한 화재특성을 파악하기 위한 기준으로 적용할 수 있었다.

#### 4. 결론

국내전동차에 적용된 내장재료 중 복합재료의 화재 특성 평가를 위하여 Cone Calorimeter를 이용하여 내장판의 기존 적용 재질과 신규 개발재료의 열방출률 및 연기방출률을 실험 분석한 후 flashover에 대한 경향을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 내장재료의 복합재료별 즉, 철도차량에 기존적용 재질인 불포화폴리에스테르계-FRP, 고충격플라스틱, MPAL(I) 및 신규개발재질인 MPAL(II) 및 phenol계열의 실험재료 중 불포화폴리에스테르계-FRP가 발열량 및 연기방출률에서 최대값을 나타내었으며 flashover에 대한 경향도 가장 높은 것으로 나타났다.
- (2) 기존에 적용되어 운행중인 철도차량의 내장재료의 경우 화재에 대하여 매우 취약함을 알 수 있었으며, 이와 달리 현재 개발 및 적용하고자 하는 MPAL 및 Phenol계열의 경우 화재특성이 우수함을 알 수 있었다.
- (3) 내장재료의 재질이 동일하여도 제조방법에 따라 화재특

성이 차이가 발생함을 MPAL 및 Phenol계열을 통하여 확인할 수 있었다.

- (4) 화재시 많은 인명피해를 발생하는 원인인 연기방출량의 측정결과 그 경향이 발열량의 경향과 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다.
- (5) Petrella의 발열량(H.R.R.)을 이용한 flashover에 기여하는 경향을 판단하는 기준을 적용하여 복합재료별 화재특성을 파악할 수 있었으며, 이를 이용하여 Cone Calorimeter의 기준으로 활용할 수 있을 것으로 보인다.

#### 참고문헌

1. R. D. Peacock, R. W. Bukowski and S. H. Markos, Evaluation of Passenger Train Car Materials in the Cone Calorimeter, Fire Mater., 23, 53-62(1999).
2. Federal Railroad Administration, Rail Passenger Equipment; Reissuance of Guidelines for Selection materials to Improve Their Fire Safety Characteristics, Federal Register, Vol.49, No.217, 44052-44584(1984).
3. Urban Mass Transportation Administration, Recommended Fire Safety Practices for Rail Transit Materials Selection, Federal Register; Vol.49, No.158(1984).
4. National Fire Protection Association, NFPA 130, Standard for Fixed Guideway Transit Systems, 1990 edition, NFPA, Quincy, MA(1990).
5. A Mekjian, Fire Hardened Composites for Improved Safety, INTERNATIONAL SAMPE SYMPOSIUM AND EXHIBITION, 45, 1204-1213(2000).
6. 이근원, 김관웅, 콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재 특성, J. Korean Institute of Fire Sci. & Eng. Vol.17, No.1 (2003).
7. ISO 5660-2, reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate-Part 2. Smoke production rate(dynamic measurement).
8. T. L. Graham, G. M. Makhvilade and J. P. Roberts, On the Theory Flashover Development, Fire Safety Journal, Vol.25, 229-259(1995).
9. R. D. Peacock et. al., Defining flashover for fire hazard calculation, Fire Safety Journal, Vol.32, 331-345(1999).