

국내 전동차 내장판 발열량 비교

Heat Release Rate Comparison of Electric motor car's Interior panels

이철규* 정우성** 이덕희***
Lee, Cheul-Kyu Jung, Woo-Sung Lee, Duk-Hee

ABSTRACT

Experimental comparison was done for measuring Heat Release Rate and Smoke Production Rate of electric motor car's interior panels using cone calorimeter. Radiative heat flux of 50kW/m² was used 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 shown differently according to interior materials. From experiment's results we can deduce that materials having higher rate of heat release smolder more smoke. It needs to establish fire risk propensity of each material and to set up the standards urgently.

1. 서 론

복합재료는 무게감량, 낮은 유지비용, 간편한 설치 및 제작방법의 장점으로 인하여 금속, 나무 및 콘크리트를 대체하는 제품으로 산업 전반적으로 사용되고 있다. 가장 많이 사용되는 열경화성 수지로는 불포화폴리에스터, 비닐 에스터 및 에폭시수지등이며 철도, 선박, 항공기 및 건축자재로 많이 적용되어 왔다. 이러한 복합재료는 화재시 높은 열, 연기 및 독성가스를 방출하기 때문에 많은 인명 및 재산피해를 일으킬 수 있는 원인이 될 우려가 있다. 이러한 이유로 선진국에서는 이미 내열성 복합재료의 개발이 진행되었으며, 많은 인명피해를 일으킬 수 있는 운송수단의 내장재료로 적용하였다.

이에 반해 국내 철도차량의 내장판의 경우 대부분이 불포화폴리에스테르(FRP) 및 MPAL계열의 소재를 이용하고 있으며, KS규격과 KRS 표준규격을 적용하여 자기소화성이상의 재료를 사용하고 있으나 선진국의 기준에는 미흡한 실정이다.

선진철도의 경우 1984년 이후 내열성 복합재료 및 새로운 화재안전기준의 필요성을 인식하기 시작하였으며 이 무렵 영국 런던 공항고속열차등에 페놀계열의 내외장재를 적용하였고, 미국 FRA에서는 철도차량 내장재료의 새로운 화재안전성능을 평가하기위한 신뢰할 수 있는 기준을 발표하였다. European Railway Research Institute(ERRI)와 공동으로 발열량(Heat Release Rate, H.R.R)를 이용하여 small-scale and real-scale fire 모델링을 통한 화재규모를 예상하는 다양한 방법을 통하여 재료별 화재위험도(인화점, 연기특성)를 측정하고 그 기준을 정하고 있는 실정이다.¹⁻³⁾ 또한 재료별 발열량 기준을 정하기 위한 연구를 진행하고 있다.

국내 철도차량 내장재료의 경우 대구지하철참사이후 난연, 불연성 재료에 대한 개발 및 화재성능에 대한 기준의 필요성을 인식하고 관련법을 개정하며 향상된 내열재료를 개발하고 있으며 그 경향은

* 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 주임연구원, 정회원

MPAL 및 페놀계열이 대부분을 차지하고 있다.

본 연구는 이러한 내장재료를 Cone Calorimeter를 이용하여 발열량(H.R.R) 및 연기방출율(Smoke Production Rate, S.P.R)을 측정하여 내화성능을 비교, 분석하였다.

Cone Calorimeter는 고체재료의 다양한 복사열하에서 발생하는 H.R.R을 측정하기위한 장치이다. 또한 재료의 연소특성, 질량감소율, 연소시 발생하는 연기량등을 측정할 수 있다.⁴⁾

이를 이용하여 다양한 재료의 기초물성을 측정하고, simulation을 통하여 실제화재시 재료의 거동을 알 수 있다. 하지만 국내에서는 전동차의 경우 Cone Calorimeter를 이용한 재료별 발열량(Heat Release Rate)에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다.

2. 실 험

2.1 실험재료

실험에 사용된 시편을 표 2-1에 정리하였다. 국내 전동차에 적용하고 있는 내장판에는 불포화 폴리 에스테르 계열의 F.R.P와 MPAL 고충격플라스틱(H.I.P) 등이 사용되고 있었다. 이러한 기존 내장판 시편 과 신규 개발품인 MPAL 및 Phenol계열의 내장판을 재질별 실차량 적용형태의 두께로 확보하여 동일 시편당 3회의 실험을 수행하여 평균값을 사용하였다.

표 1. 내장판 시편구분

구 분		Thickness (mm)	비 고
기존전동차 적용재질	FRP(I)	3	제조공법에 따라 분류
	FRP(II)	3	
	H.I.P	3	고충격 염화비닐 수치
	MPAL(I)	2	멜라민수지 접착
신규개발 재질	MPAL(II)	1.5	멜라민수지 접착
	Phenol(I)	3	페놀계 FRP
	Phenol(II)	4	페놀수지층 상하 합성아크릴레이트계열 접착

2.2 실험방법

국내 전동차에 적용된 내장판의 재질별 열방출량 및 연기방출량(S.P.R)을 측정하기위하여 영국 FTT사의 dual-Cone Calorimeter를 이용하여 ISO5660 Part 1 및 Part 2의 시험방법에 따라 실험

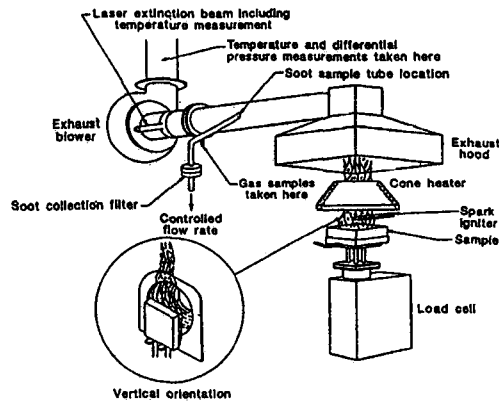


그림. 1 Cone Calorimeter 개략도

하였다. 그림 1에 dual-Cone Calorimeter의 개략도를 나타내었으며, 이 장치는 큰 형태의 복사전기히터, 산소분석장치, 유량측정용 레이저가 부착된 ventilation시스템, 시편의 질량을 측정하기위한 질량측정장치, 시편홀더, 스파크 점화회로, 열량 측정을 위한 heat flux meter, 메탄열량측정을 위한 버너 및 데이터 수집/분석시스템으로 구성되어있다.

실험은 재질별로 확보된 내장판 시편을 100 mm × 100 mm크기(두께: 시편두께)로 준비하였으며, 복사열은 화재시나리오 4단계(ignition, growth, fully develop, decay)중 fully developed에 해당되는 복사열수준인 50kW/m²로 설정하였다. 이 수준은 실제 차량 화재시 화재노출정도와 유사하다.⁵⁾ 시편홀더 및 grid의 경우는 동일한 조건을 주기위하여 모든 시편에 동일하게 적용하였으며 pyrolysis gas에 점화하기위하여 spark igniter를 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Heat Release Rate(H.R.R)

열방출량(H.R.R)은 재료의 연소시 소비되는 산소소비량을 측정하여 H.R.R을 역으로 계산한 것으로 일반적으로 연소시 산소 1kg당 약 13MJ의 열방출을 한다고 가정하여 계산한다.⁶⁾⁻⁹⁾ 열방출량은 초기 단계의 Peak Heat Release가 중요한데 이것은 화재의 초기성장속도 및 크기에 대한 정보를 제공한다. Babrauskas와 Krasny는 콘칼로리미터에 의한 실험을 통하여 재료가 착화 후 180초에서의 평균발열량이 실제규모 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.¹⁰⁾ 본 실험에서 Cone Calorimeter를 이용하여 기존 및 개발 내장판 재질별 Heat Release Rate를 측정하여 그림 2, 3에 비교하였다. 실험결과 기존복합재료의 H.R.R의 경우 대부분이 많은 열방출량을 나타내었으며, F.R.P(I)의 경우 Peak H.R.R로 보이는 Peak 2개를 볼 수 있는데 이것은 연소로 인하여 생성된 Carbonaceous물질이 높은 복사열로 인하여 바로 재연소됨을 알 수 있다.¹¹⁾⁻¹²⁾ 또한 다른 내장재료와 비교하여 초기발열량 및 이차발열량이 상당히 큰 것으로 나타났다. 고충격플라스틱 및 F.R.P(II)의 경우 고분자물질이 연소함에 따라 생성된 탄소화합물이 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 Phenol수지 자체로는 우수한 내화성능을 기대하기 어려운 것을 알 수 있었다.

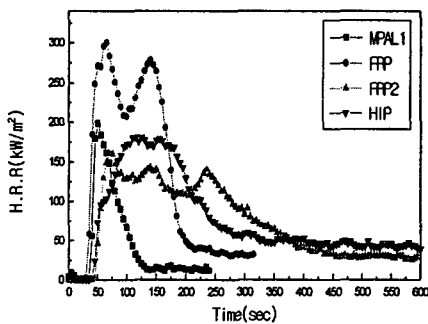


그림 2. 기존 내장재료 H.R.R

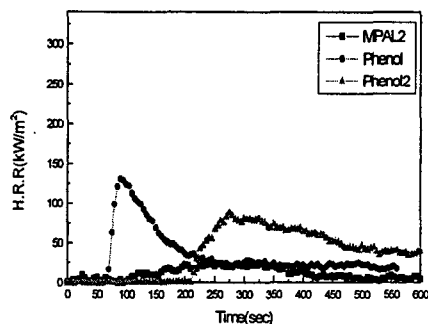


그림 3. 신규 내장재료 H.R.R

Time To Ignition(T.T.I, T_{ig})은 고분자 물질에 외부적인 요인(전기적인 스파크)에 의한 점화시 물질에 점화되는 시점의 시간을 측정된 것이다. 동일한 heat flux하에서 T_{ig}는 재료의 고유 특성으로 볼 수 있는데^{6)-9),13)} 표 2에서 보아 알 수 있듯이 기존복합재료에서는 F.R.P(I)이 가장 높았으며, 신규복

합재료의 경우 Phenol(I)이 높게 나타났다. 여기서 MPAL(II)의 경우 heat flux 50 kW하에서 점화가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 이러한 재질별 H.R.R과 관련된 데이터를 표 2에 비교하여 정리하였다.

표 2. 기존 및 신규 복합재료 Cone Calorimeter H.R.R 데이터

구 분		T _{ig}	THR	Peak HRR	Peak HRR Time	average HRR	180sec average HRR
		sec	MJ/m ²	KW/m ²	sec	KW/m ²	KW/m ²
기존 내장재료	F.R.P I	29	34.2	296.2	130	180.1	200.5
	F.R.P II	44	38.4	160.7	70	96.2	122.9
	H.I.P	42	48.4	180.9	115	78.16	145.8
	MPAL I	34	9.5	198.1	50	89.03	58.2
신규 내장재료	MPAL II	N.I.	1.2	18.1	170	6.66	6.5
	Phenol I	52	17.5	131.6	85	48.53	71.1
	Phenol II	211	38.1	88.3	275	54.42	69.1

* N.I. : Not Ignited

3.2 연기방출율(Smoke Production Rate, S.P.R)

국내 및 일본의 경우 화재시 연기에 의한 사상자 비율이 70%이상으로 조사되고 있는 만큼 건물 등 실내에서 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 그림 4, 5에 나타내었다. Cone Calorimeter를 이용한 S.P.R의 측정은 laser를 이용하여 매질 속을 투과하는 빛의 세기는 매질의 경로 길이에 지수함수적으로 감소한다는 Bougre법칙을 이용한다.¹⁴⁾⁻¹⁵⁾ 그림 4, 5에서 알 수 있듯이 기존 복합재료중에서 F.R.P 및 H.I.P의 연기방출율(S.P.R)이 상당히 높게 나타났으며, MPAL계열의 경우 수지층의 두께가 상대적으로 낮으며 불연처리로 인하여 Phenol계열과 같이 상당히 낮음을 알 수 있었다.

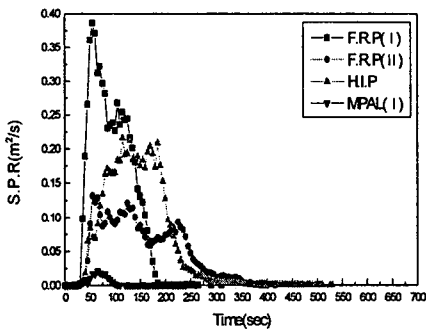


그림 4. 기존 내장재료 S.P.R

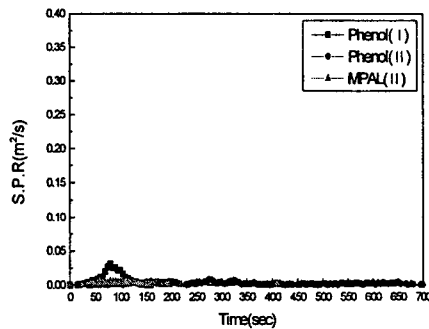


그림 5. 신규 내장재료 S.P.R

표 3에는 Cone Calorimeter에서 알 수 있는 총연기방출량(Total Smoke Release, T.S.R), 비소화면적(Specific Extinction Area, S.E.A), CO 및 CO₂ 방출량을 정리하였다. S.E.A는 S.P.R을 질량감소율로 나눈 것으로 연기발생량의 지수로 많이 사용되고 있다. T.S.R결과에서 H.R.R과 동일하게 F.R.P 계열

이 가장 높게 나타났으며 신규내장재료에서 상당히 감소한 것을 알 수 있다. MPAL(Ⅱ)의 경우 수지층이 얇으며 불연처리가 되어있어 연기량, CO 및 CO₂량 또한 적게 나타났다.

표 3. 기존 및 신규 복합재료 Smoke Production 데이터

구 분		T.S.R	peak SEA	peak SEA Time	average SEA	CO Yield	CO ₂ Yield
		m ² /m ²	m ² /kg	sec	m ² /kg	kg/kg	kg/kg
기존 내장재료	F.R.P I	3,110.2	1,402.6	165	1,123.5	0.088	1.04
	F.R.PⅡ	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 내장재료	MPALⅡ	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
	PhenolⅡ	160.4	350.2	625	34.9	0.057	1.27

3. 결 론

국내전동차 내장판의 화재 특성 평가를 위하여 Cone Calorimeter를 이용하여 내장판의 기존적용 재질과 신규 개발재료의 열방출률 및 연기방출률을 실험 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 내장판 재질별 즉, 기존적용 재질인 불포화폴리에스테르계-FRP, 고충격플라스틱, MPAL(Ⅰ) 및 신규개발재질인 MPAL(Ⅱ) 및 phenol계열의 발열량 및 연기방출율을 비교하였으며, 실험재료 중 불포화폴리에스테르계-FRP가 열방출률 및 연기방출률에서 최대값을 나타내었다. 또한, 기존의 도시철도 차량에 사용 중인 내장판 재질에 비하여 개발 제품이 매우 우수한 내화특성을 보였다.
- 2) 내장판의 재질이 동일한 경우 난연처리방법 및 내장판의 제작형태에 따라서 열방출률 및 연기방출률에서 매우 차이가 크게 나타났으며, 이는 MPAL 및 phenol계열의 실험결과에서 확인할 수 있었다.
- 3) Cone Calorimeter를 이용하여 국내전동 차량의 내장판 재질별, 제작 형태별로 화재특성을 매우 잘 정립 할 수 있으므로 소재의 발열량 및 연기방출률에 대한 적정기준을 정립하여 도시철도 차량의 화재 안전을 확보하여야 할 것으로 판단된다.

4. 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, 53-60(1999).
- 2) Reasons for Undertaking Supplementary Studies on Improvement of the Protection of Coaches Against Fire. ERRI B 106/RP22, European Rail Research Institute, 1992.
- 3) W. K. Chow, Assessment on Heat Release Rate of Furniture Foam Arrangement by a Cone Calorimeter, *J. Fire Sci.* Vol. 20(2002).
- 4) V. Babrauskas, The Cone Calorimeter, *ASTM Standardization News*, Jan. 1990.
- 5) RD. Peacock, E. Braun, Fire Tests of Amtrak Passenger Rail Vehicle Interiors. National Bureau of Standards(U.S.), Technical Note 1193, 1984.
- 6) C.F. Cullis, M. M. Hirschiler, and R. G. Madden, *Eur. Polym. J.*, 58, 493(1992).
- 7) P.A. Cusack, M. S. Heer, and A. W. Monk, *Polym. Degrad. Stab.*, 58, 229(1997).
- 8) S. H. Chiu, and W. K. Wang, *Polymer*, 39, 1951(1998).
- 9) V. Babrauskas, and S. J. Grayson, *Heat Release in Fires*, Elsevier Science Publishers, New

York, 1992.

- 10) K. W. Lee, and K. E. Kim, 콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성, J. Korean Institute of Fire Sci. & Eng. Vol. 17. No. 1(2003).
- 11) B. Moritaigne, S. Bourbigot, M. Le Bras, Fire behaviour related to the thermal degradation of unsaturated polyesters, Polymer Degradation and Stability, 64 443-448(1999).
- 12) Morice M, Bourbigot S, Leroy JM, J Fire Sci, in press.
- 13) JS. Bl. Kwak, C. H. Jung and J. D. Nam, 콘칼로리미터와 TGA를 이용한 할로젠 계통의 난연제를 첨가한 폴리프로필렌 수지의 난연성 및 열 안정성에 관한 연구, Polymer, Vol. 24, No. 6, 777-786(2000).
- 14) M. Checchin, C. Cecchini, B. Cellarosi, and F. O. Sam, Use of cone calorimeter for evaluating fire performances of polyurethane foams, Polymer Degradation and Stability 64. 573-576(1999).
- 15) ISO 5660-2, "reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate-Part 2. Smoke production rate(dynamic measurement).