

C-09

## 도시철도차량 내장판의 재료별 발열 및 발연특성 연구

이철규, 정우성, 이덕희, 김종훈\*

한국철도기술연구원 철도환경연구그룹, 경민대학\*

Heat Release and Smoke Production Rate Characteristic Study of Electric motor car's Interior panel

Lee Cheul-Kyu, Jung Woo-Sung, Lee Duk-Hee, Kim Jong-Hun\*

*Korea Railroad Research Institute Railroad Environmental Research Group*

*Kyungmin College\**

### 1. 서론

고분자 복합재료는 금속재료에 비하여 경량화 및 내열성 및 강도를 가질 수 있는 효과를 얻을 수 있는 장점으로 인하여 항공기 및 선박등의 내장재료 사용되어지고 있다. 국내 철도차량 대부분에는 다양한 복합재료의 내장재를 사용하여 실내미관 및 쾌적성을 유지하고 기능상으로는 무게감량, 내식성, 내충격성을 증가시키는 방향으로 발전되어 가고 있다. 하지만 현재 국내 철도차량 내장재에 사용되어지는 대부분의 고분자재료는 화재에 매우 취약하여 급번 대구지하철 참사와 같이 대규모 인명피해를 초래하였다.

따라서 도시철도 차량에 대한 종합적이고 체계적인 화재안전조치는 아주 중요한 요소이며, 차량설계에서부터 재료의 선택 및 시스템적인 화재감지 및 소화기능, 비상대응체계 등 모든 것이 고려되어야 한다. 선진국에서는 이미 차량 내장재의 화재를 방지하고 안전성 확보를 위하여 각종 규격을 통하여 재료별 화재기준을 정하여 화재피해를 줄일 수 있는 화재 예방대책을 마련하고 있다.

국내 철도차량 내장판의 경우 F.R.P계열, MPAL계열 등의 소재들을 사용하여 왔으며, KS규격과 KRS 표준규격을 적용하여 난연성 시험(KS M 3015)을 하여 자기소화성 이상의 재료를 사용하고 있으나 선진국의 기준에는 미흡한 실정이다.

선진철도에서는 각종 내장재들의 화재위험성을 감소시키기 위하여 real-scale 및 bench-scale test등 다양한 방법을 통하여 재료별 화재위험도(연소성, 연기특성, 가스유독성 등)를 측정하여 그 기준을 세우기 위한 연구를 수행하고 있으며<sup>1)</sup>, 또한 화재시 차량 내장 재료별 상호작용 및 bench-scale test를 통한 real-scale 화재시 위험도를 Cone Calorimeter의 열방출율(Heat Releases Rate ; H.R.R) 값을 이용한 화재 모델링을 통하여 예측하고 있으며,<sup>2)</sup> 또한 재료별 열방출율 기준을 정하기 위한 연구를 수행하고 있는 실정이다.<sup>3)</sup>

Cone Calorimeter는 고체재료의 다양한 복사열하에서 발생하는 발열량(H.R.R)을 측정하기 위한 장치이다. 또한 재료의 연소특성, 질량감소율, 연소시 발생하는 연기량등을 측정할 수 있다.<sup>4)</sup> 따라서 다양한 재료의 기초물성을 측정하고 시뮬레이션을 통하여 실제 화재시 재료의 화재특성을 알 수 있다. 하지만 국내 철도차량의 내장재에 대하여 Cone Calorimeter를 이용한 재료별 열방출율(H.R.R)에 대한 연구가 거의 전무한 상태이다. 본 연구에서는 철도차량 내장판의 재질별 열방출량에 대한 실험을 수행하였으며, 이를 통하여 재료별 화재특성을 비교하였다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

현재 국내 전동차에 사용되고 있는 내장판 재질은 불포화 폴리에스테르 계열의 F.R.P, 고충격플라스틱(H.I.P) 및 MPAL계열(MPAL(I)) 등이 사용되고 있다. 따라서 이들 현차에서 시편을 채취하여 실험하였고, 이들 이외에 내화성을 강화한 개발품인 MPAL 계열(MPAL(II)) 및 Phenol-FRP계열(2종) 시편을 구하여 실험 하였다. 실험은 각각 시험편에 대하여 3회 이상 실험을 수행하여 내장판 재질별 특성을 비교분석 하였다.

### 2.2 실험방법

국내 전동차에 적용된 내장판의 재질별 열방출량 및 연기방출량(Smoke Production Rate ; S.P.R)을 측정하기 위하여 영국 FTT사의 dual-Cone Calorimeter를 이용하여 ISO5660 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, 메탄열량측정을 위한 버너 및 데이터 수집/분석시스템으로 구성되어있다.

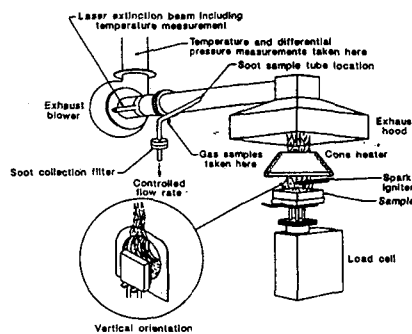


Fig. 1. Cone Calorimeter 개략도

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/m<sup>2</sup>로 설정하였다. 이 수준은 실제 차량 화재시 화재노출정도와 유사하다.<sup>5)</sup> 시편홀더 및 grid의 경우는 동일한 조건을 주기위하여 모든 시편에 동일하게 적용하였으며 pyrolysis gas에 점화하기위하여 spark igniter를 사용하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 열방출율(Heat Release Rate ; H.R.R)

H.R.R은 재료의 연소시 소비되는 산소소비량을 측정하여 H.R.R을 역으로 계산한 것으로 일반적으로 연소시 산소 1kg당 약 13,000kJ의 열방출을 한다고 가정하여 계산한다.<sup>6,9)</sup> Cone Calorimeter로부터 내장판 재료별 H.R.R을 Fig. 2에 나타내었다. F.R.P(I)의 경우 높은 Peak 2개를 보였는데 이는 연소로 인하여 생성된 carbonaceous물질이 높은 복사열로 인하여 바로 재 연소 되면서 두 번째 Peak로 나타나는 것으로 추정된다.<sup>10,11)</sup> 초기단계의 peak Heat Release는 화재의 초기성장속도 및 크기에 대한 정보를 제공하는데, F.R.P(I)의 경우 다른 내장재료에 비하여 초기발열량 및 2차발열량이 상당히 큰 것으로 나타났으며, 고층 격플라스틱 및 F.R.P(II)의 경우 broad하게 나타나는 peak로부터 고분자물질이 연소함에 따라 생성된 탄소화합물이 barrier로 작용하면서 서서히 연소가 일어나고 있음을 알 수 있다. 반면 현재 개발중인 MPAL 및 Phenol계열의 경우 peak H.R.R이 거의 나타나지 않아 난연성이 매우 뛰어날 것으로 예측되어 진다. 또한, MPAL계열의 경우 Al panel위에 접촉되는 재료의 난연처리 유무에 따라 내화성질이 다르게 나타남을 알 수 있었고 Phenol 계열의 경우 Phenol수지 자체로 fully develop된 화재상황에서 제조방법 및 제품형태에 따라 발열량이 다르게 나타남을 알 수 있었다.

T<sub>ig</sub>(Time To Ignition)는 고분자 물질에 외부적인 요인(전기적인 스파크)에 의한 점화시 물질에 점화되는 시점의 시간을 측정한 것이다.<sup>6,9),12)</sup> 동일한 heat flux하에서 T<sub>ig</sub>는 재료의 고유 특성으로 볼 수 있는데 Fig. 2에서 보면 기존 전동차에 사용되고 있는 재료의 경우 FRP계열 및 MPAL(I)계열에서 빠른 연소시간을 보이고 있으며, 새로이 개발되는 MPAL(II)경우 연소가 일어나지 않고 있음을 알 수 있다. 또한 Phenol계열의 경우 모두 연소가 발생하고 있으나 연소시간이 충분히 지연되고 있음을 알 수 있다.

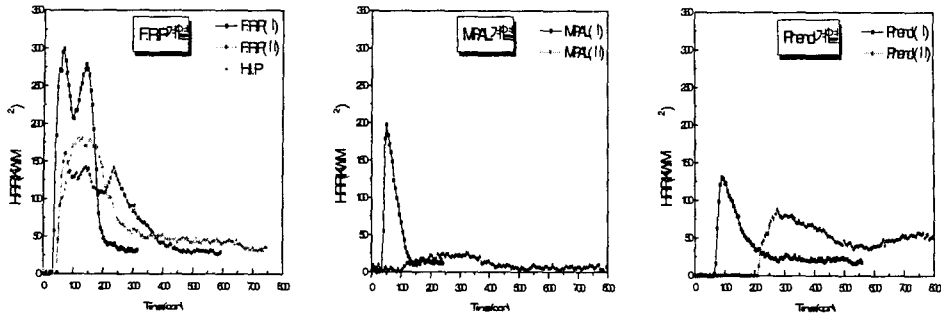


Fig. 2. 재질별 H.R.R 비교

### 3.2 연기방출률(Smoke Production Rate ; S.P.R)

일반적으로 화재시 연기에 의한 사상자 비율이 60~75%로 조사되었으며, 건물 등 실내에서 화재가 발생하였을 경우 발생하는 연기에 의한 사상자가 더 많을 것으로 예측되므로 사용되어지는 재료의 연기발생량을 줄이는 것이 중요하다. Cone Calorimeter는 화재시 대부분의 희생자를 발생하는 원인이 되는 연기의 측정이 가능하다.<sup>13)</sup> 따라서 전동차 내부에 사용되어지는 내장판의 재질별 연기발생량(S.P.R)을 조사하여 Fig. 3에 나타내었다. Cone Calorimeter를 이용한 S.P.R의 측정은 laser를 이용하여 매질 속을 투과하는 빛의 세기는 매질의 경로 길이에 지수함수적으로 감소한다는 Bouguere법칙을 이용한다.<sup>14)</sup> Fig. 3에서 알 수 있듯이 F.R.P계열의 경우 MPAL 및 Phenol에 비하여 상당히 많은 연기가 방출됨을 알 수 있었다. 또한 Fig. 2에서 본바와 같이 broad한 H.R.R peak와 마찬가지로 연기 또한 지속적으로 방출되는 것으로 나타났다. MPAL 및 Phenol계열의 경우 기존적용재료와는 달리 신규제품의 경우 난연 처리로 인하여 연기의 발생이 상당수 감소되었음을 실험을 통하여 알 수 있었다.

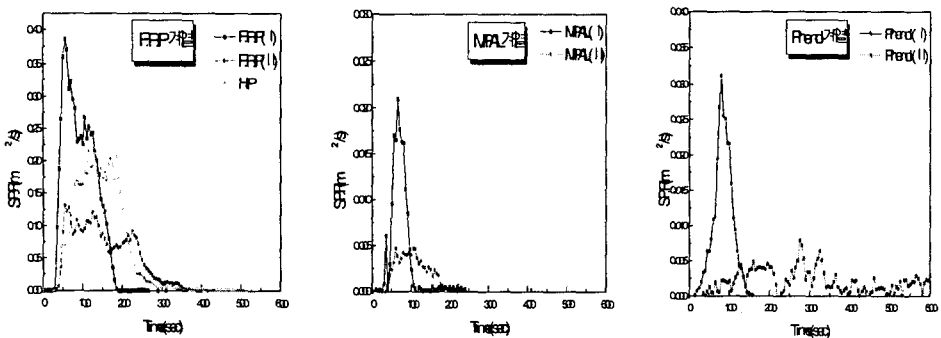


Fig. 3 재질별 S.P.R 비교

앞에서 기술한 H.R.R 및 S.P.R 외에 재질별  $T_{ig}$  및 연소되는 과정중의 단위 면적당 발생

되는 H.R.R.을 시간에 대하여 적분시킨 것으로 연소의 시작에서 끝까지 총발열량인(Total Heat Release ; THR)과 총연기량인(Total Smoke Release ; T.S.R), Peak & Average H.R.R 및 Peak H.R.R time 데이터를 Table 1에 정리하였다. Babrauskas와 Krasny는 콘칼로리미터에 의한 실험을 통하여 재료가 착화 후 180초에서의 평균열방출율이 실제규모 화재에서의 최대열방출을 값에 상응한다고 보고하였으며, NFL(National Fire Laboratory)의 연구결과에서는 착화 후 300초에서의 평균열방출율이 실제규모 화재실험에서의 결과와 더 좋은 상관관계를 갖는다고 주장하였다. ISO규격에서는 시험기준에서 180초 및 300초 평균열방출율을 측정하고 있다.<sup>15)</sup>

T.H.R의 경우 F.R.P(I)의 경우가 가장 크게 나타났으며, MPAL(II)가 가장 작은 값을 보여주었다. 여기서 코팅된 수지에 따라 내화특성의 차이를 보인 MPAL의 경우 MPAL(I)과 달리 난연처리가 되어있는 MPAL(II)는 점화자체가 일어나지 않았다. H.R.R 및 연기발생 면적을 나타내는 Specific Extinction Area(S.E.A)값 또한 비교적 적게 측정되었으며 이는 난연성물질에 의하여 산소의 소비를 방해하여 연소진행이 억제되면서 연기발생량 또한 줄어든 것으로 보인다.<sup>9)</sup> S.E.A의 경우는 H.R.R의 수치와 거의 유사하게 증가함을 알 수 있었다. Phenol수지계열은 비교적 높은  $T_{ig}$ 값을 보였는데 Phenol(II)의 경우 페놀수지층위에 불연성 물질의 접촉으로 인하여 페놀수지의 연소가 더 지연되어 높은  $T_{ig}$ 값을 나타내었다.

Table 1. 내장판 재질별 Cone Calorimeter 실험결과

구 분	Tig	THR	TSR	peak HRR	peak HRR Time	average HRR	180sec average HRR	average SEA
	sec	MJ/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /m <sup>2</sup>	KW/m <sup>2</sup>	sec	KW/m <sup>2</sup>	KW/m <sup>2</sup>	m <sup>2</sup> /Kg
F.R.P ( I )	29	34.2	3,110.2	296.2	130	180.1	200.5	1,123.5
F.R.P(II)	44	38.4	2,281.7	160.7	70	96.2	122.9	672.7
H.I.P	42	48.4	3,309.7	180.9	115	78.16	145.8	790.4
MPAL( I )	34	9.5	88.2	198.1	50	89.03	58.2	117.4
MPAL(II)	-	1.2	47.0	18.1	170	6.66	6.5	96.7
Phenol( I )	52	17.5	132.8	131.6	85	48.53	71.1	198.4
Phenol(II)	211	38.1	160.4	88.3	275	54.42	69.1	34.9

#### 4. 결론 및 제언

도시철도 차량 내장판의 화재 특성 평가를 위하여 Cone Calorimeter를 이용하여 내장판 재질별, 내장판 형태별로 열방출률 및 연기방출률을 실험 분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 내장판 재질별 즉, 불포화폴리에스테르계-FRP, 고충격플라스틱, MPAL 및 phenol계

-FRP의 열방출률 및 연기방출률을 제시하였으며, H.R.R값이 큰 것이 S.R.R값이 크게 나타났다. 실험재료 중 불포화폴리에스테르계-FRP가 열방출량 및 연기방출량에서 최대값을 나타내었다. 또한, 기존의 도시철도 차량에 사용 중인 내장판 재질에 비하여 개발 제품이 매우 우수한 화재특성을 나타내었다.

2) 내장판의 재질이 동일한 경우 난연처리방법 및 내장판의 제작형태에 따라서 열방출률 및 연기방출률에서 매우 차이가 크게 나타났으며, 착화시간은 FRP(I)<MPAL(I)<HIP <Phenol(I) 순으로 내장재 재질별로 다르게 조사되었다.

3) Cone Calorimeter를 이용하여 도시철도 차량의 내장판 재질별, 제작 형태별로 화재특성을 매우 잘 정립 할 수 있으므로 열방출률 및 연기방출률에 대한 적정기준을 정립하여 도시철도 차량의 화재 안전을 확보하여야 할 것으로 판단된다.

## 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. Hirschler, 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. 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).
11. Morice M, Bourbigot S, Leroy JM, J Fire Sci, in press.
12. 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).
13. 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).

14. ISO 5660-2, "reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate-Part 2. Smoke production rate(dynamic measurement).
15. K. W. Lee, and K. E. Kim, 콘칼로리미터를 이용한 플라스틱 단열재의 화재특성, J. Korean Institute of Fire Sci. & Eng. Vol. 17. No. 1(2003).