

콘칼로리미터를 이용한 도시철도차량 내장재료별 발열량 비교

The Heat Release Rate Comparison of Subway car's Interior Materials using Cone Calorimeter

이철규*

이덕희**

정우성***

Lee, Cheul-kyu Lee, Duck Hee Jung, Woo Sung*

ABSTRACT

The interior materials of the urban subway car in operation are now being changed to new materials that meet the latest law in effect, the fire safety criteria of the urban railway vehicle. It was well known fact that the composite materials, that were applied to last subway car, were weak on the fire. Contrary to this materials, materials in work have good resistance to the fire. On the paper, To investigate the difference of fire safety level on the subway car, cone calorimeter was used to measure the heat release rate and total heat released according to the ISO 5660. A high radiative heat flux of 50kW/m^2 was used to burn out all materials and to simulate the condition of fully developed fire case in the tests.

1. 서 론

친환경성 및 정시성 등 많은 장점으로 인하여 대중교통수단으로 역할이 증가하고 있는 도시철도를 포함한 철도차량은 터널 및 지하공간을 이용한다는 점에서 화재발생시 대량 인명피해를 동반하는 위험성을 가지고 있다. 전 세계적으로 철도 화재는 다양한 형태로 발생하지만 다행히 높은 빈도를 가지고 있는 것은 아니다.

영국의 철도에서 발생된 화재 원인을 분석한 결과, 국내와 동일하게 엔진에서의 화재가 가장 높았으며 그 다음으로 객실 내 방화였으며 객실 내에서 발생한 화재의 경우 거의 모두 인명피해를 동반하였다.¹⁾ 철도에서 화재로 인하여 발생한 인명피해는 많은 원인이 있겠지만 가장 중요한 것이 내장재의 내화성능으로 화재저항성을 향상시키기 위하여 유럽연합을 포함한 선진철도에서는 철도차량 재료의 화재 안전 시험평가기준을 수립하여 적용하고 있으며, 지속적인 연구를 수행하고 있다. 미국의 경우 철도차량의 종합 화재안전도를 평가하기 위하여 화재감지, 소화 장치, 차량설계 및 재료별 연소특성평가 등 다양한 방법으로 접근하고 있다. 특히, 재료별 연소특성 D/B를 바

* 한국철도기술연구원 환경화재연구팀 주임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 환경화재연구팀 선임연구원, 정회원

*** 한국철도기술연구원 환경화재연구팀 책임연구원, 정회원

탕으로 다양한 형태로 발생하는 화재조건을 모사하여 차량 내에서의 재료별 및 전체 화재성장을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 있다.²⁾

국내의 경우 대우지하철 사고를 계기로 철도에서 화재 발생 시 초래할 수 있는 위험성을 인식하여 출퇴근 시 수만~수십만 명이 이용하고 있는 도시철도차량을 중심으로 시트 등의 내장재를 교체하고 있으며, 일부 운행처에서는 기존 전통차의 내장재료 교체 사업 시 신규로 제작되는 차량의 1/3 목업 차량을 이용하여 화재로부터 안전하다는 것을 시각적으로 보여주기 위한 화재시연회 등의 행사를 하고 있다. 이러한 교체사업은 기존에 적용되어 왔던 화재안전기준인 KS F 2271 등에서 도시철도차량 안전기준에 관한 규칙의 별표규정에 준하여 시행되고 있다. 별표규정에는 산소지수, 연기밀도, 화염전파, 연소가스독성평가의 항목 및 기준이 포함되어 있으며, 기준을 통과한 제품을 철도차량 내장재료로 사용하고 있도록 규정하고 있다. 도시철도차량 안전기준에 의하여 철도차량의 화재안전도는 선진국 수준으로 향상된 것으로 볼 수 있으나, 시편시험 결과만으로 차량 전체의 화재거동을 예상하기에는 여전히 부족하며, 미국의 경우, 차량전체의 화재안전도를 평가하기 위하여 콘칼로리미터를 이용한 연구를 진행 중에 있다.³⁾ 현재까지 시험장비 중에서 실제 화재상황과 유사한 조건하에서 측정이 가능한 콘칼로리미터는 재료 연소 시 소모되는 산소량을 이용하여 발열량을 측정하는 장비로서, 발열량은 시편이 연소하는 동안 발생하는 열 에너지로 정의를 내릴 수 있다. 발열량 이외에도 연기발생량, 일산화탄소/이산화탄소와 같은 유독가스 발생량을 정량적으로 측정할 수 있는데 미국 등의 선진국에서는 지금까지의 작은 시험 시편크기에서 벗어나 중·대형 콘칼로리미터를 활용하여 외차 어셈블리(시트커버, 쿠션, 바디) 및 객차 한량의 화재성능을 종합적으로 평가하고 있는 상황이다. 현재 영국 등 유럽 및 미국에서는 콘칼로리미터를 이용한 재료평가 기준을 위한 연구를 수행하고 있으며, 전선재료 및 시트재료 등 철도차량의 일부 품목에 대한 기준은 적용 중에 있다.

본 실험에서는 기존 및 개선 도시철도 차량의 내장재별 재료를 선택하여 콘칼로리미터 측정 결과인 발열량을 이용하여 도시철도차량 화재안전도를 비교하고자 하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

2004년 12월 도시철도차량 안전기준에 관한 규칙이 시행되기 이전의 국내 도시철도차량에 사용된 재료는 일부를 제외한 거의 모든 차량에서 유사한 것으로 나타났다. 각 단품별로 조사한 결과, 내장판의 경우 불포화폴리에스터수지 강화플라스틱과 고충격플라스틱 및 MPAL 계열을 사용하였으며, 시트커버는 울이나 폴리에스터 섬유를 이용하여 모켓트 방식으로 시트쿠션의 경우는 거의 대부분 우레탄 폼재를 사용하였다. 단열재 및 바닥재는 각각 폴리엠틸렌폼과 염화비닐수지를 사용하고 있었다. 이와 달리, 현재 개선차량에서는 화재성능이 향상된 다양한 재료들이 적용되고 있는 것으로 나타났으며, 구성품별로 내장판은 MPAL 계열과 페놀 하나킴 혹은 페놀 유리섬유강화플라스틱이며, 시트커버는 불연성인 스테인리스와 울모켓트를, 시트쿠션은 네오프렌 폼 또는 스테인리스 외자인 경우는 적용하지 않으며, 바닥재의 경우는 합성고무를 대부분 적용하고 있다. 이와 같이 조사된 도시철도차량 내장 재료를 중에서 일부를 실험에 사용하였으나, 실험에 사용된 재질과 동일하더라도 제조방법 및 첨가물의 조성에 따라 결과가 다양하게 나타날 수 있기 때문에 본 연구에 사용된 재료를 적용한 차량의 화재성능을 대표하지는 않는다. 표 1과 같이 실험에 사용한 재료를 간단히 정리하였다.

표 1. 실험에 사용된 도시철도차량 구성품별 재료

구분	기존	개선
내장판	불포화폴리에스터 FRP	페놀 FRP
시트커버	모켓트 폴리에스터	울모켓트
시트쿠션	우레탄폼	네오프렌폼
바닥재	염화비닐수지	합성고무
단열재	폴리에탈렌폼	유리섬유

2.2 실험방법

2.2.1 발열량(Heat Release Rate)

재료의 연소 시 소모되는 산소소모량을 이용하여 측정되는 발열량은 현재 국내외적으로 난연재료 연구 및 시험기준 분야에서 많은 관심을 가지고 있으며, 다양한 연구가 수행되고 있다. 본 실험에서는 영국 FTT사에서 제작된 콘칼로리미터를 이용하여 실험을 수행하였으며, 실험기준은 ISO 5660-1 : 2002(Reaction-to-fire tests-Heat release, smoke production and mass loss rate-Part 1:Heat release rate(cone calorimeter method))를 적용하였다. 실제 화재상황을 가장 잘 묘사하는 콘칼로리미터는 재료 연소 시 in-situ한 방법으로 착화시간, 발열량, 발연량 및 유독가스(CO, CO₂) 등의 측정이 가능하며, 시험기준에 의하면, 재료별 25, 35, 50 kW의 복사열 조건에서 실험이 가능하지만 본 실험에서는 구성품별로 동일하게 50 kW를 적용하였다. 영국의 경우 시트커버 등 일부 구성품에 35 kW의 기준을 적용하기도 하지만, 미국 NIST에서 연구한 내용과 같이 50 kW의 복사열 조건이 실제 화재에서 규모가 가장 성장한 단계로 판단되어 본 실험에서는 동일한 조건하에서 수행하였다. 각 시편의 크기는 100 mm × 100 mm크기(두께: 시편두께)로 준비하였다.

간략히 발열량을 산출하는 식은 아래 수식과 같다.

$$\dot{q}_c(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_0} \right) (110) C \sqrt{\frac{\Delta F}{T_e}} \frac{x^0 O_2 - x O_2}{1.105 - 1.5x O_2}$$

여기서,

$$\dot{q}_c(t) = \text{발열량(Heat Release Rate, H.R.R.)}, \frac{\Delta h_c}{r_0} = 13.1 \times 10^8 \text{ kJ/kg}$$

Δh_c = 순연소열, r_0 = 양론적 산소/연료 질량비,

C = 오리피스 유량계 교정상수, $x^0 O_2$ = 산소분석기 초기값, $x O_2$ = 산소분석기 분석값

Fig. 1에 dual-Cone Calorimeter의 개략도를 나타내었으며, 이 장치는 콘 형태의 복사전기히터, 산소 및 CO, CO₂ 분석장치, 유량측정용 레이저가 부착된 ventilation시스템, 시편의 질량을 측정하기 위한 질량측정장치, 시편홀더, 스파크 점화회로, 열량 측정을 위한 heat flux meter, 메탄 열량측정을 위한 버너 및 데이터 수집/분석시스템으로 구성되어 있다.

시편의 특성에 따라 연소 시 부풀어오름(swelling)현상을 보이는 경우 grid를 적용하였으며, 모든 시편에는 시편홀더를 사용하였다. 또한, pyrolysis gas에 spark igniter를 사용하였다.

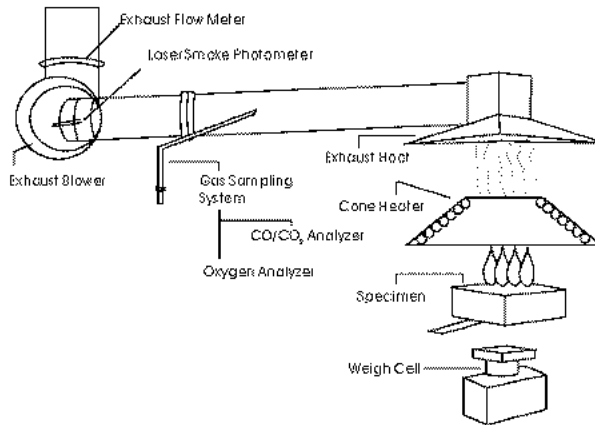


그림 1. Cone Calorimeter 개략도

3. 결과 및 토의

현재 국내 도시철도차량 안전기준 법 조항 중 내장재료의 화재안전 기준 상에 발열량에 대한 시험기준은 규정되어 있지 않다. 하지만, 국외 및 국내 일부 운영처의 경우 철도차량 제작사양에 포함하여 일부 재료에 대하여 화재성능을 평가하고 있다. 콘칼로리미터 시험장비를 이용하여 ISO 5660-1 기준에 따른 시험결과에서 얻게 되는 정보는 발열량 외에도 연기발생량, 유독가스 발생량 등이 있으나, 현재 발열량에 대한 관심이 높은 상태이다. 발열량은 평가 대상물의 화재 시 화재에 대한 규모를 다른 시험장비 및 기준에 비하여 정량적으로 나타내 줄으므로 현재 많은

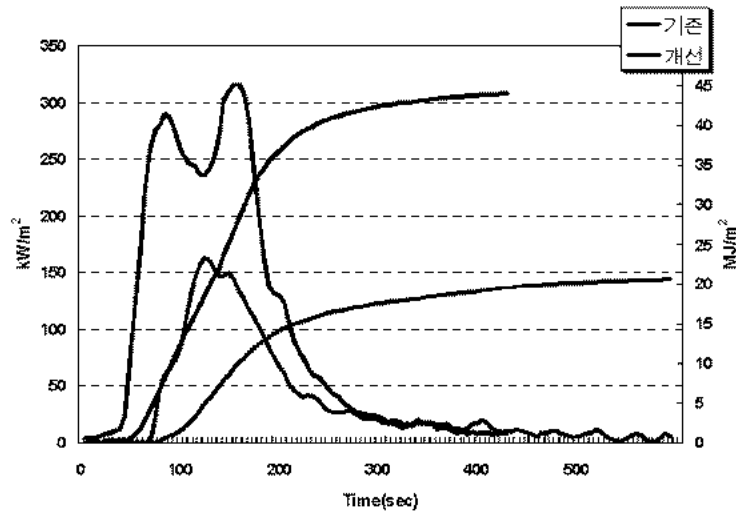


그림 2. 발열량(내장판) 실험결과 비교

관심을 가지고 있으며, 향후 연구결과에 따라 국내 시험기준에 포함될 가능성이 높은 항목이다. 하지만, 국내 철도차량 및 관련 내장재 제작회사에서는 발열량에 대한 정확한 정보를 가지고 있지 못하고 있어 제품 개발에 어려움이 따르고 있는 상태이며, 실험결과를 이용하여 제작사 및 운영처에서는 어느 항목을 평가하여야 하는 자에 대한 기준이 명확하게 정립되어 있지 않고 있다. 일부 국외에서는 caloric content(MJ/kg)라는 항목을 이용하여 재료의 발열량 기준으로 사용하고 있는

나, 이러한 항목 또한 국가 기준으로 설정되어 있지 않은 상태이며, 영국 등 유럽 통합기준에서 검토되고 있는 평가기준은 MARHE(Maximum Average of Heat Emission) 값을 이용하여 난연 등급을 설정하는 기준으로 검토하고 있다.

본 실험에서는 기존 및 개선 도시철도 차량의 화재안전도를 콘칼로리미터를 이용하여 내장 구성품별 발열량으로 비교해 보고자 하였으며, 그 결과를 그림 2-6에 정리하였다. 그림에서 좌측은 발열량을 보여주고 있으며, 우측은 총발열량을 나타내고 있다. 총발열량은 시편이 연소되는 과정에서 발생하는 모든 열량을 적분한 값으로서, 재료 연소 시 단위면적당 발생하는 열량의 총량으로 정의할 수 있다.

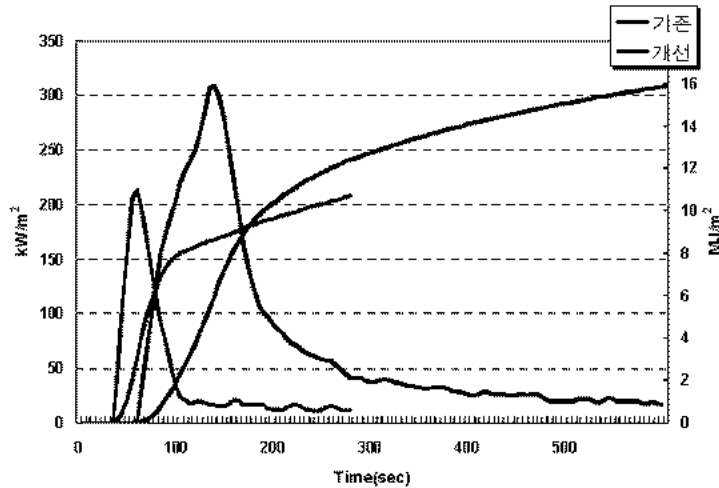


그림 3. 발열량(시트커버) 실험결과 비교

실험결과에서와 같이, 일부 바닥재를 제외한 모든 내장 재료에서 기존에 비하여 절반이하로 발열량 및 총발열량이 감소하는 것을 확인할 수 있었으며, 단열재의 경우 기존 우레탄 폼재에 비하여 불연재인 유리섬유를 사용함으로써 착화를 포함한 연소가 발생하지 않음을 알 수 있었다.

도시철도차량 각 구성품별 결과를 표 2에 정리하였으며, caloric content 항목을 시편 초기중량 대비 연소시 손실된 중량에 의한 값을 비교하였다. 일부 국외 도시철도차량 물량에서 적용되고 있는 항목인 caloric content을 살펴보면, 내장판의 경우 총발열량 결과에서는 기존 대비 개선차량의 재료가 1/2수준으로 감소한 것을 알 수 있으나, caloric content의 값에서는 개선차량의 재료의 중량이 더 높아 1/3로 감소한 것을 알 수 있다. 연소 손실량을 적용한 경우에는 오히려 기존차량 더 높은 손실량으로 인하여 개선차량의 재료 화재성능이 감소한 것으로 나타났다.

따라서, 콘칼로리미터를 이용한 ISO 5680-1의 시험기준으로 일부 적용하고 있는 caloric

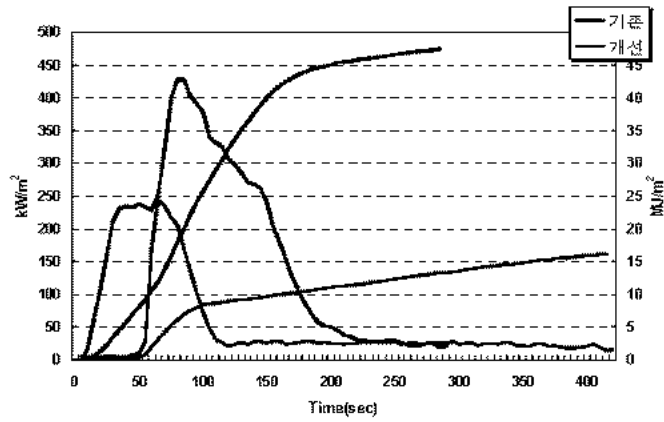


그림 4. 발열량(시트쿠션) 실험결과 비교

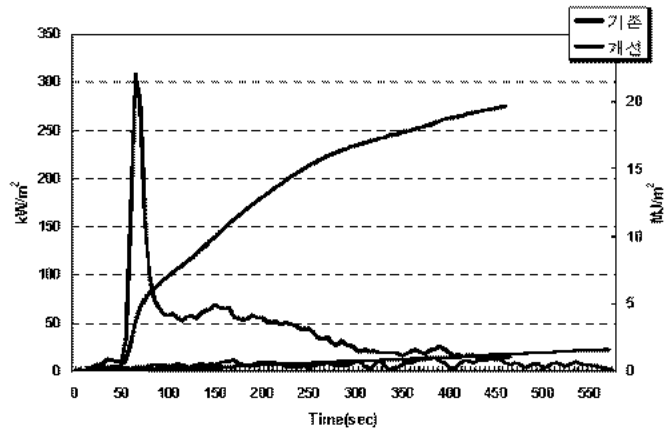


그림 5. 발열량(단열재) 실험결과 비교

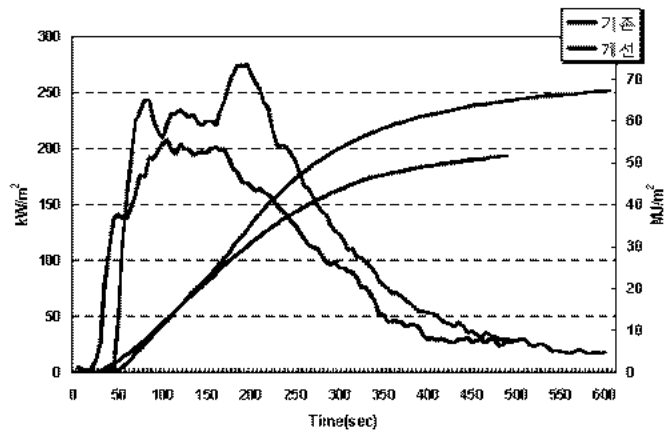


그림 6. 발열량(바닥재) 실험결과 비교

표 2. 발열량 측정결과(50 kW)

구 분		내장관		시트커버		시트쿠션		단열재		바닥재	
		기존	개선	기존	개선	기존	개선	기존	개선	기존	개선
초기무게	g	31.9	40.7	12.5	7.8	19.1	9.5	4.9	10.4	47.7	45.4
연소손실량	g	21.3	8.7	8.9	6.0	16.3	7.2	4.0	0.5	24.7	19.3
발열량(HRR)	kW/m ²	164.6	48.7	98.1	85.7	221.7	101.1	52.5	4.9	135.9	151.9
총발열량(THR)	MJ/m ²	316.4	162.4	309.3	213.7	429.0	245.1	309.3	8.4	208.2	275.8
Caloric Content (MJ/kg)	시편중량	13.2	4.9	11.4	11.0	23.8	10.0	38.2	0.3	10.1	14.0
	연소손실량	19.8	23.0	16.1	14.3	27.9	13.2	46.8	6.0	19.6	33.0

content 결과값은 개발되는 제품의 중량에 따라 변할 수 있기 때문에 적용에 있어서 논란의 여지가 있으며, 학화시간, 연기 및 유독가스 발생량 및 MARHE 등 추가적인 연구가 필요한 상황이다.

4. 결론

국내 도시철도 차량용 내장재로 사용되고 있는 재료를 조사한 결과, 구성품별로 다양한 재료들이 적용되고 있음을 알 수 있었다. 현재 운행되고 있는 기존 및 개선 철도차량 내장재료 구성품별 재료를 대상으로 콘칼로리미터 장비를 이용하여 발열량을 측정한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 실험에 사용된 철도차량 내장재료 중 대부분은 발열량 및 총발열량의 결과에서 1/2 이상 감소하였으며 전체적인 화재안전도는 증가한 것을 확인 할 수 있었다. 바닥재는 실내 화재의 규모가 작을 경우 착화 및 전파에 있어서 다른 재료 보다 차량 전체에 미치는 영향은 상대적으로 낮을 수 있으나, 내화성능이 향상된 제품 개발 및 적용이 요구된다.
2. 개선 도시철도차량의 화재안전도 향상에 가장 큰 영향을 주는 구성품으로는 단열재로 측정되었으며, 기존 차량에 적용된 폴리에틸렌 폼재에 비하여 차량 실내 화재성장 및 전파에 기여하지 않을 것으로 판단할 수 있다.
3. 콘칼로리미터의 결과로부터 얻을 수 있는 caloric content의 경우 시험기준으로는 다소 논란의 여지가 있는 것으로 판단되며, 재료 및 구성품별 특성이 고려된 재료의 내화성능 시험기준 정립이 요구된다.

참고문헌

1. Steve Hudson(2001), "Railway Safety", Train Fires-Special Topic Report
2. R-D. peacock and J-D. Averill(2004), "Fire safety of passenger trains". NISTIR6563
3. R-D. peacock, R-W. Bukowski and S-H. Markos(1999), "Evaluation of passenger train car materials in the cone calorimeter", FIRE AND MATERIALS, Vol23.No1,pp53-62