

철도차량의 열방출율을 예측하기 위한 축소모형의 실험조건에 관한 연구

김치훈 · 이덕희 · 박원희 · 정우성
한국철도기술연구원

A Study on The Experimental Conditions of Reduced Scale to Predict the Heat Release Rate of Railcar

Kim, Chi Hun · Lee, Duck Hee · Park, Won Hee · Jung, Woo Sung
KRRRI

요 약

본 연구에서는 철도차량의 실물화재에 대한 열방출율을 축소모형으로 예측하기 위해 실험적인 조건들을 연구하였다. 축소모형의 크기는 지하철 전동차의 1/10 스케일을 적용하여 길이 1.89m, 너비 0.295m, 높이 0.235m 이며 15mm의 석고보드를 사용하였다. 축소모형의 실험적 조건으로는 한쪽 면만 개방한 4개의 개구부 환기조건과 3mm, 6mm의 종이 내장재를 이용하여 열방출율을 예측하여 보았다.

1. 서론

화재는 가연재료 종류와 공간 형상에 의해 착화 그리고 성장 시작단계의 프리플래시오버(Flashover)단계와, 이후 가연재료의 종류에 무관하게 시스템 내로 유입되는 산소 유량에 의한 환기 지배형 시스템으로 변화함에 따라 포스트플래시오버(Post-Flashover)에 도달하게 된다. 포스트플래시오버 모델은 환기적요소를 이용하여 화재의 강도를 예측하는 모델로서 여러 선행연구에서 철도차량에 적용하여 화재강도를 계산하고 실물화재시험결과와 비교분석을 통해 신뢰성 있는 데이터를 구축하고 있다(Hedenfelk.1999; EUREKA Project EU499.1995). 하지만 이러한 실물화재시험은 대규모 시험설비와 비용 등의 제약조건으로 인해 축소모형을 이용하여 간단한 방법으로 화재강도를 예측하는 연구가 진행되고 있다(Ingason.2007). 본 연구는 한쪽 방향이 긴 내부공간과 대량의 환기조건 가진 철도차량 대한 열방출율을 예측하기 위해 각기 다른 환기조건에 대해 비교분석실험을 진행하였다.

2. 이론 고찰

포스트플래시오버(Post-Flashover)는 화재성장이 시스템 내로 유입되는 공기의 유량에 의해 결정되는데, 이때의 공기유량 \dot{m}_a 는 식(1)과 같이 표현 된다.

$$\dot{m}_a = \rho_a \delta \sqrt{g} A_0 \sqrt{h_0} \tag{1}$$

여기서 ρ_a 는 공기의 밀도, δ 는 실험에 의한 값으로 포스트플래시오버의 경우

HRR - 식(3)	Time - 식(4)	Energy - 식(5)	mass - 식(6)
$\dot{Q}_F = \dot{Q}_M \left(\frac{L_F}{L_M} \right)^{5/2}$	$\dot{t}_F = \dot{t}_M \left(\frac{L_F}{L_M} \right)^{1/2}$	$\dot{E}_F = \dot{E}_M \left(\frac{L_F}{L_M} \right)^3 \frac{\Delta H_{C,M}}{\Delta H_{C,F}}$	$\dot{m}_F = \dot{m}_M \left(\frac{L_F}{L_M} \right)^3$

0.13(Babrauskas.1981), h_0 은 환기구의 높이, A_0 은 환기면적을 타다낸다. 시스템 내로 유입 되는 산소 1 kg이 연소될 때 생성되는 열에너지 13.1×10^3 KJ과 0.231의 산소의 질량분율을 적용한 즉, $13.1 \times 10^3 \times 0.231 \times \dot{m}_a$ 는 다음 식(2)와 같기 때문에 환기적요소인 $A_0 \sqrt{h_0}$ 를 알면 최대발열량을 계산할 수 있다(Ingason. 2007).

$$\dot{Q}_{\max,c} \approx 1500 A_0 \sqrt{h_0} \quad \text{식(2)}$$

식 (4)~(7)은 각각 발열량, 시간, 에너지 그리고 질량에 Froude Scaling technique(Quintiere. 1989) 관한 스케일로 다음과 같이 나타낸다. 여기서 L은 길이, M은 축소모형 비율, F는 실물크기 비율이며 시간에 대한 스케일은 분 또는 초단위이다. 에너지 스케일의 경우 단위는 MJ 또는 GJ로 나타낸다. m은 가연체의 질량으로써 kg 단위로 나타낸다. 하지만 축소모형을 이용한 상사해석은 재료의 열관성(Thermal inertia)과 복사효과(Radiation Effect)에 대해서는 상사의 한계를 가진다고 알려져 있다(Ingason.2007).

3. 축소모델 제원 및 측정

열분해가스는 롬코너(ISO 9705)설비로 샘플링하여 산소소모량법을 이용하여 발열량을 측정한다. 발열량 측정설비 외에도 축소모형 내부의 열유동을 측정하기 위한 K-type thermo couple 9개 설치하였으며, 축소모형 차량은 내부공간의 길이가 1.9 m, 너비 0.295 m, 높이 0.235 m의 15 mm 석고보드 이용하여 실물전동차량을 대상으로 1:10 스케일 제작하였다. 실험에 대한 철도차량 축소모델의 환기조건은 표 1과 같으며 0.185 m의 높이 (h_0)를 동일하게 하였고 너비를 4단계로 분류하여 환기면적에 대한 발열량 실험을 진행하였다. 사용된 초기 화원의 발열량은 표 2와 같이 Haptane(Quintiere, 1998)의 물성치를 기준으로 하여 0.23KW로 설정하였다. 이것은 CEN/TS 45545규격에서 권하는 75 KW의 화원(김치훈,2010)을 식(4)에 적용해 스케일화 한 것이다. 약 0.9cm × 0.9cm의 Pool pan은 화재의 성장속도가 가장 빠른 모형차량 내부 코너부에 위치 시켰다. 그림 1과 같이 실험 A의 환기조건은 실물전동차의 개구부의 총 면적조건이며, D는 한 방향의 문 4개를 개방한 면적을 가정 한 것이다. 나머지 실험조건 B, C는 최대와 최소 환기조건의 사이에서의 영향을 관찰하기 위한 조건이다.

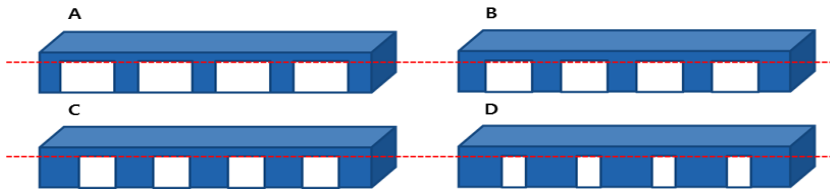


그림 1. 환기조건에 따른 축소모델

표 2. 환기면적(A_0) 조건

	height(m)	Wide(m)	Area/door(m ²)	Total Area(m ²)
A	0.185	0.34	0.0625	0.25
B		0.27	0.050	0.20
C		0.20	0.035	0.15
D		0.14	0.025	0.10

실물화재에서 최대열방출 도달시간을 예측해 보기 위해 3 mm와 6 mm 골판지를 CASE D의 조건에서 실험하였다. 그림 3은 시간스케일 식(5)를 적용해 실물화재시험 그림 2의 최대열방출을 도달시간($HRR_{peak,F}$: 540초=> $HRR_{peak,M}$:170초)과 비교한 결과 3 mm(HRR_{peak} :210초)가 6mm(HRR_{peak} :300초)보다 근접한 것으로 관찰되었다. 3 mm 골판지를 CASE A~D의 환기조건에 진행되었다. (F:Full scale, M:Reduced Scale Model)

4. 실험결과

실험 A의 경우 0.25 m²의 환기면적으로 포스트플레이시오버 모델의 예상값과 3.1배 작은 것으로 나타났다. 실험 B는 2.6배, C는 1.8 그리고 D는 1.4배 차이로 실험값이 낮게 측정되었고 환기면적이 커질수록 이론적 예측값과 차이가 커지는 것으로 나타났다. 그림 4는 환기면적이 작은수록(D=0.10m²) 최대열방출 값에 빨리 도달하는 하는 것을 알 수 있다. 실험조건 A(0.25m²)~D(0.10m²)의 각 환기면적에 대한 실열방출을 측정값은 환기면적이 최대 2.5배 조건에서의 실험에도 불구하고 큰 변화가 없는 것을 보였다.

5. 결론

각 실험조건 A(0.25m²)~D(0.10m²)에 대한 실열방출을 측정값은 환기면적이 최대 2.5배 조건에서의 실험에도 불구하고 큰 변화가 없었다. 이것은 실험에서 사용된 전동차 축소모

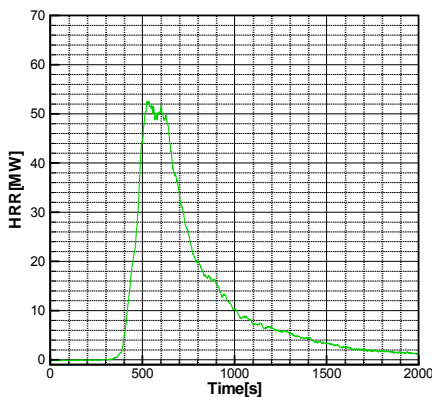


그림 2. 전동차 실물화재시험 발열량
(한국철도기술연구원, 2011)

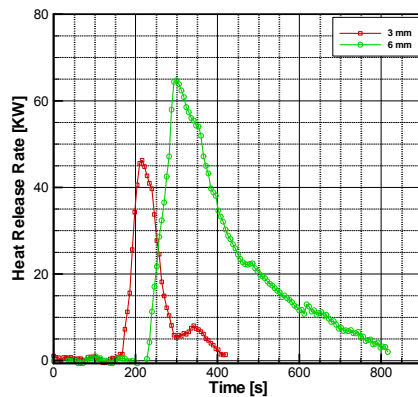


그림 3. 3mm과 6mm내장재 발열량

형의 공간구조(길이 1.9m, 너비 0.295m, 높이 0.235m)와 내장재료의 면적(1.71m²)을 기준으로 환기면적이 D(0.10m²)이하로 되어야만 환기지배형 시스템에 도달한다는 뜻이 된다. 그림 4의 그래프에서는 작은 환기면적에 의해 내부 천정에서 열분해된 가스의 온도상승이 빠르게 유도됨에 따라 최대열방출율에 도달하는 시간이 앞당겨지게 된다. 앞으로 본 실험의 실험조건 D(0.10m²)보다 작은 환기조건의 추가적인 실험을 통하여 환기면적과 가연재료 단면적 간의 상관관계를 정립하고, 환기지배형 포스트플래시오버 환기조건에 대한 추가 실험을 하고자 한다.

표 4. 포스트플래시 오버 예측모델과 실험결과 비교

Test no.	Heat Release Rate[KW]			
	A	B	C	D
Opening area(m ²)	0.25	0.20	0.15	0.10
Theory	161.3	129	96.8	64.5
3 mm(average)	51.5	50	54.7	45.6
6 mm(average)	none	none	none	65.3

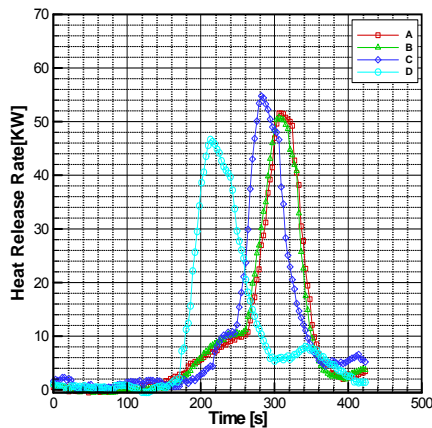


그림 4. 실험 A~D의 측정된 평균발열량

참고문헌

1. S. S. e. V., "Fires in transport tunnels: Report on full-scale tests," EUREKA-Project EU499:FIRETUN, Düsseldorf, Germany, 1995
2. Peacock R., Bukowski R., Jones W., Reneke P., Babrauskas V., Brown J., "Fire safety of passenger Trains," NIST Technical Note 1406, 1994
3. Haukur Ingason, "Model scale railcar fire tests," Fire Safety Journal, Vol. 42, pp. 271-282, 2007
4. ISO 9705, "Fire tests-Full-scale room test for surface products," 1996