

철도차량화재곡선의 특성분석

이덕희 · 박원희 · 정우성 · 김치훈

한국철도기술연구원

Characteristics of the Train Car Fire Curve

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

Korea Railroad Research Institute

요 약

철도차량의 화재 시 방출되는 열방출률 곡선은 철도터널 설계 시 방재규모를 결정하는 중요한 인자이다. 하지만 이 열방출률 곡선은 차량에서 발생할 수 있는 화원의 시나리오 및 터널복사나 주변유동과 같은 환경변화에 따라서 다른 특성을 가진다. 따라서 이를 포괄할 수 있도록 대표선도로 표준화된 화재곡선을 선정하여 터널의 설계화재로 사용하게 된다. 본 논문은 실물화재 시험 및 FDS를 이용한 철도차량 화재시뮬레이션과 ISO 9705 설비를 이용한 간단한 화재시험 등의 결과를 분석하여 플래시오버 전 후 단계에서 나타나는 철도차량의 화재곡선 특성을 분석하고 림코너 시험설비를 이용하여 프리플래시오버 단계의 화재곡선 추정 방안을 제시하였다.

1. 서 론

국토해양부에서 부령으로 제정된 철도차량안전기준에관한규칙의 제6조 2항과 철도차량안전기준에관한지침(국토해양부 고시 제2007-278호) 별표12로 요구하고 있는 철도차량 화재위험도 평가 기준의 적용에 따라 국내에서 신규 제작되는 철도차량은 위험도평가를 수행하여야 한다. 철도차량의 경우에는 차량에서 발생할 수 있는 위험수준을 계산하는 것과 더불어 차량의 화재 시 발생하는 열방출률 곡선을 산출하여야 할 필요가 있다. 철도시설안전기준에관한규칙(국토해양부령 제4호)의 요구에 의하여 1km 이상의 터널에서 시행되고 있는 터널의 안전성 분석에 철도차량의 화재규모를 포함하여 계산을 하여야 하기 때문이며 이에 관한 자료를 철도차량 분야에서 담당해주어야 하기 때문이다. 화재가 발생했을 때 대상물로부터 발생하는 열방출률(단위시간당 열에너지 방출량)을 시간에 따라 표시한 그래프를 화재곡선이라고 부르는데 이는 가연물의 난연성 정도, 구조적인 특성과 환기량 및 화재의 초기 화원 조건에 따라서도 각기 다른 형태를 보이는 것으로 알려져 있다. 철도차량의 경우에도 기존 연구에서 알려진 화재곡선은 Table 1과 같이 차량과 화재 조건에 따라 매우 다른 형태를 나타 내었다. 따라서 객관성 있는 터널의 안전성 평가를 위

해서는 적절한 방법론에 기반한 철도차량별 표준화재 곡선의 선정 방법이 요구된다.

2. 본론

2.1 철도차량 화재곡선의 특징적인 요소

철도차량 화재곡선의 경우에도 일반적인 화재곡선의 형상을 따른다. 표준화재 곡선은 터널의 방재 디자인에서 고려되는 설계화재로도 사용되고 있는데 다섯 가지 요소로 구성된다. 우선 첫 번째는 플래시오버 시간이다. 플래시오버 시간은 화재가 급속하게 전면적인 화재로 전환되는 시점으로 초기 화원의 크기와 철도차량 내장재의 난연성, 초기 환기조건 등에 따라 달라지는데 화재안전성 평가에서 사용되고 있는 승객이 인내할 수 있는 한계조건에 결정하는 중요 요소이다. 정량적 위험도평가방법이 일반적으로 한계조건까지의 시간을 이용하여 사망자를 판정하는 방법론을 사용하고 있기 때문에 중요성이 매우 크다. 룸코너 시험(ISO 9705 Room-Corner Fire Test)에서 플래시오버 발생을 판정하는 기준은 구획내부에서의 열방출율(HRR.)이 1MW 이상, 바닥의 열유동이 25 kW/m²에 도달하는 시간이나 화염이 문밖을 빠져나가는 시간 등의 다양한 판정 방법을 제시하고 있지만 열방출률 그래프를 기준으로 볼 때는 1MW에 도달할 때를 기준으로 플래시오버 시간을 판정하는 방법을 활용하는 것이 가장 분별력이 있다고 할 수 있다.

두 번째는 열방출률 곡선의 성장 기울기가 중요한 요소가 된다. 고전적으로 화재성장율을 느린성장율(Slow)과 빠른성장율(Fast) 및 매우빠른성장율(Ultra Fast)로 구분하고 있지만 철도차량에서 발생하는 화재의 경우 일반적으로 플라스틱 재료가 많은 이유로 인하여 매우빠른성장율 곡선에 비하여도 더 급격한 화재성장율을 보이는 것으로 나타났다. 이 성장률의 크기는 적절한 피난시간을 놓친 승객이 사망하게 되는 이유가 된다. 세 번째 특징적인 요소는 최대 열방출률 값이다. 최대 열방출률 값은 설계화재에서는 지속시간과 연결되어 하향 조정될 수 있다. 최대 열방출률의 80% 수준에서 설계화재 최대값을 정하는 방안과 화재규모 곡선에서 적분된 총 방출에너지로부터 계산하는 방법이 적절하다는 주장이 제기 된 바 있다. 다음은 화재규모가 줄어들기 시작하는 최성기 종료시간이 특징적인 요소가 된다. 열방출률이 최고점에서 하강하기 시작하는 시간을 최성기 종료 시간으로 정한다. 이 시간은 하강 곡선에서 최대값의 80% 수준을 통과하는 시간이나 화재시물레이션이나 실물화재 시험으로 구한 철도차량 열방출률 곡선의 마지막 피크점을 이용하여 선정할 수 있다. 이렇게 계산된 최성기 종료시간과 시작시간의 차이가 화재가 가장 활발하게 진행되는 최성기 유지시간이 된다.

마지막으로 특징적인 요소는 화재종료 시간이다. 화재 종료시간은 연소가 종료된 시점인데 잔염으로 인하여 화재가 장시간 유지되는 경우에 대한 처리방안을 결정할 필요가 있다. 기존의 연구사례에서는 실제 화재 종료시간과는 달리 약 100 - 200kW 이하의 열방출률은 무시하고 총에너지 방출량을 가만하여 종료시간을 산출하는 것을 확인할 수 있었다.

2.2 화재규모 곡선에 영향을 미치는 요소

철도차량의 화재곡선에 영향을 미치는 요소는 앞절에서 구분한 화재곡선의 특징요소와 연

관이 있다. 첫 번째 플래시오버 시간의 경우는 철도차량 내장재의 재료 및 난연성 정도와 화원 시나리오가 결정적인 영향 요소이다. 화원의 시나리오는 화원의 규모와 위치로 다시 세분될 수 있을 것이다. 연소조건에서 환기량이 충분한 플래시오버 이전의 상황은 연료의 특성이 지배하는 연료지배적 상황이 전개된다고 할 수 있겠다. 두 번째 요소인 화재성장곡선의 기울기는 초기에는 연료의 배치구조에 영향을 받는 것으로 판단된다. 철도차량의 화재에서 초기 연소의 발단이 되는 의자를 이용하여 화재시험을 수행한 결과 새마을 2인석 의자 1 세트와 2 세트의 화재곡선은 매우 다른 성장률을 보이는 것으로 나타났다. 특히, 의자 2 세트의 화재성장율은 단부에서 의자 및 내장판, 바닥재, 커튼 등을 모두 설치한 경우의 내장재 화재시험 (interior fire test) 및 새마을 철도차량 실물화재실험에서 측정된 초기 화재곡선과 거의 일치하는 것으로 평가되었다.

플래시오버 이후의 특징으로 볼 수 있는 발열량 규모는 연료의 특징과는 관계없이 환기량에 의하여 지배되는 것으로 알려져 있다. 이를 기반으로 창이 있는 닫힌 공간에서 발열량 규모를 예측하는 포스트 플래시오버 계산 모델이 식(1)과 같이 제안되기도 하였다.

$$\dot{Q}_{max} = \eta 1500 A_o \sqrt{h_o} \text{ ----- 식 (1)}$$

철도차량에서 환기구조는 출입문의 개방이나 창문파괴 현상과 연관되어 있다. 이와 더불어 철도차량의 화재가 개활지에서 발생하였는지 또는 터널안에서 발생하였는지도 환기량에 지배적인 요소가 될 것이다. 해석이나 실물화재 시험에서 이에 관한 부분을 적절하게 고려하지 않을 경우 매우 큰 편차를 보인다. 환기량과 더불어 차량의 주변 유동도 화재해석 곡선의 변형에 영향을 미친다. 이에 대하여는 EUREKA 프로젝트의 주변유동을 달리한 화재실험 결과에 의하여 확인할 수 있는데 최대발열량 규모로는 약 3배 정도의 차이가 나타나는 것을 확인할 수 있다.

2.3 룸코너 시험을 이용한 철도차량 플래시오버 시간과 초기 성장률의 예측

철도차량의 화재규모 곡선을 구하는 것은 실물화재 시험이나 CFD를 이용한 화재시뮬레이션 방법이 활용되고 있다. 하지만 실물화재 시험은 많은 비용과 시험 장소의 한정이라는 제한이 있고 화재시뮬레이션을 활용할 경우는 해석결과에 대한 신뢰성 검증이 문제가 된다. 상대적으로 매우 간단한 ISO 9705를 이용할 경우 산소 소비량법으로 차량 내장재에 대하여 플래시오버 시간과 화재성장율을 실차 화재곡선과 거의 같은 그래프를 얻어낼 수 있다. 이를 위하여 최소 의자 2세트의 화재 실험이 요구된다. 그림1은 의자 1세트 및 의자 2세트를 이용한 화재실험 장면이다.



그림 1 룸코너 설비를 이용한 새마을 의자의 화재실험 장면

철도차량 전체에서 발생할 수 있는 플래시오버 발생여부와 화염의 전파특성이나 화재거동을 파악하기 위하여 룸코너 설비를 이용한 내장재 화재시험이 수행되었다. 이때 열방출률 곡선과 연기 및 CO 및 CO₂ 발생량이 분석되었다. 화원은 동일하게 두세트의 의자 사이 동일한 장소에 위치하도록 하였다. 그림 3에는 의자 시험으로부터 얻어진 화재곡선을 그림4에는 내장재 화재시험으로부터 얻어진 화재곡선을 나타내었다. 화재규모가 계속 성장하는 경우 룸코너 설비의 시험 용량 한계로 인하여 3.5MW 인근에서 스프링클러를 이용하여 소화하였다. 의자의 경우 1세트와 2세트는 매우 다른 형상을 나타내는 것을 알 수 있으며 2세트의 경우 화재가 급속하게 성장하며, 최대 발열량은 1세트의 2배를 큰 폭으로 초과하는 것을 확인할 수 있다.



그림 2 룸코너 설비를 이용한 새마을 내장재 조립체의 화재실험

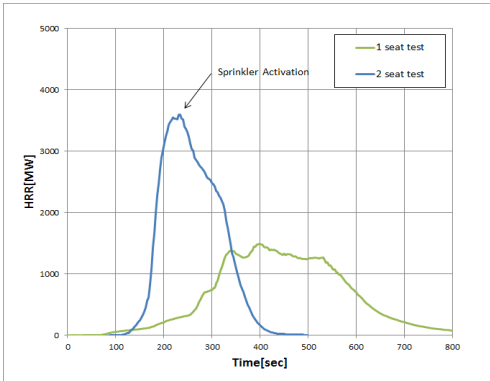


그림 3 새마을 의자 화재곡선

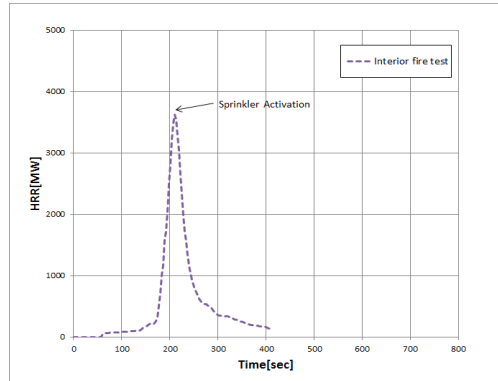


그림 4 새마을 내장재 조립체 화재곡선

그림 5에는 각 규모별 시험에서 구한 화재곡선을 비교하여 나타내었다. 이때 의자 2세트 및 차량의 단부 내장재 화재시험 곡선이 실차 화재시험에서 나타난 플래시오버 및 초기 성장률과 매우 근사한 형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 이는 플래시오버 이전의 열방출률은 가연재의 난연성 정도와 화원의 설정 및 화원 인근의 내장재 배치에만 영향을 받고 있는 연료지배형 화재이기 때문이다. 이러한 간단한 시험을 통하여 철도차량 실차의 화재곡선에서 중요한 요소가 되는 플래시오버 시간과 화재성장률을 구할 수 있음을 확인하였다.

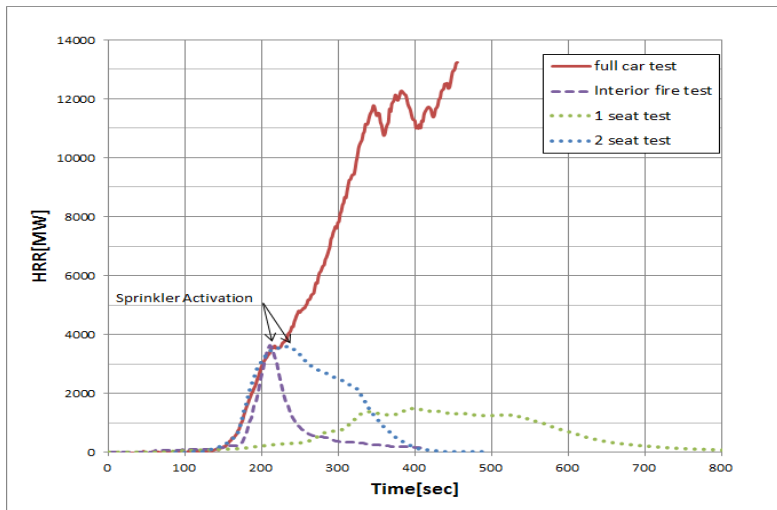


그림 5 시험규모에 따른 화재곡선의 비교

3. 결론

철도차량의 화재위험도 평가 및 철도터널 안전성 평가에 반드시 필요한 철도차량의 화재규모 곡선을 확보하기 위해서는 매우 비용이 많이 드는 실험화재 시험이나 화재시뮬레이션의 수행이 요구되는데 ISO 9705 설비를 이용한 간단한 화재시험을 통하여 실차 화재곡선의 중요요소인 플래시오버 시간과 초기 화재 성장률을 확보할 수 있음을 확인하였다. 이러한 간단한 시험 데이터를 확보할 수 있다면 시뮬레이션 결과의 검증에도 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국철도기술연구원의 철도종합안전기술개발사업 중 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Fires in Transport Tunnels, EUREKA-Project EU 499:FIRETUN, 1995
2. Duck-Hee Lee, Won-Hee Park, Woo-Sung Jung, Nathan White, Alex Webb and Jung-Ho Hwang, "Two cases of interior fire tests within ISO 9705 for railway passenger coach", 11th Fire & materials 2009, Fisherman's Wharf, San
3. ISO 9705 Fire tests - "Full-scale room tests for surface products"
4. 박원희, Nathan White, Alex Webb, 호주 철도차량 내장재 화재시험 소개, 대한기계학회 춘계학술대회 초록집, 2008
5. H.Ingason, "Model scale railcar fire tests", Fire Safety Journal 42(2007) pp.271-282
6. H.Ingason, "Correlation between temperatures and oxygen measurements in a tunnel flow", Fire Safety Journal 42(2007) pp.75-80
7. 이덕희, 정우성, 박원희, 이철규, "철도차량 화재규모 산출방법 조사", 한국소방방재학회 춘계학술대회 논문집, 2007
8. 이덕희, 김학범, 박원희, 강경민, 정우성 "철도차량 화재시 열방출률 곡선의 표준화 방안 연구", 한국철도학회 2010 춘계학술대회 논문집, 2010