

C-12

## 철도차량 화재규모 산출방법 조사

이덕희, 정우성, 박원희, 이철규  
한국철도기술연구원

## Study for the Fire Size of Trains

Lee Duck Hee, Jung Woo Sung, Park Won Hee, Lee Cheul Kyu  
Kore Railroad Research Institute

### 1. 서론

철도차량은 터널이나 지하철 운행구간에서 발생 할 수 있는 화재에서 가장 규모가 큰 화원에 해당된다. 따라서 철도차량의 화재규모는 역사나 터널구간의 배연용량 산정이나 터널 구조물의 내화성능 설계시 가장 중요한 고려 요소가 된다. 본 연구는 철도차량의 화재규모를 산출하기 위하여 제시되고 있는 몇 가지 접근방법에 대한 소개와 이를 이용한 국내 철도차량의 화재부하 평가 사례 등을 소개하고자 하는 것이다.

### 2. 본론

철도시설안전기준에 관한규칙(건설교통부령 제476호, 2005.10.27)과 철도시설안전세부기준(건설교통부고시 제2006-395호, 2006.9.22)에 의하면 2005년 10월 이후 신설 또는 개량되는 철도터널이나 역사 등의 철도시설물에 대하여 의무적으로 안전성 평가를 수행하도록 정하고 있다. 이때 시설물의 안전성 평가 보고서에서 검토되어야 할 화재시나리오 중 가장 심각한 수준은 철도차량에서의 방화와 같이 대규모의 화재가 발생할 경우에도 인명이 안전하게 대피할 수 있음을 증명하는 것이라고 하겠다. 이때 대상 시설공간의 화재 및 피난해석을 위해서는 해당 구간에 운행하게 될 철도차량에서 발생 가능한 최대 화재규모에 대한 신뢰할 만한 정량적 데이터가 요구된다. 철도시설안전세부기준의 7조 1항 3호에는 철도차량에 대하여 최소 10MW 이상의 화재규모를 가정하도록 제한하고 있다. 그러나 철도차량의 화재규모를 정확하게 얻기란 그리 쉬운 일이 아니다. 본 연구는 그동안 국내외에서 검토되어 왔던 철도차량의 화재규모 산출에 관한 자료를 정리하고 바람직한 방법론을 선정할 수 있도록 제안하고자 하는 것이다.

철도차량으로부터 발생하는 화재규모를 실험적으로 평가한 대표적인 사례는 바로 EUREKA 프로젝트이다. EUREKA 프로젝트는 스페인 SP-Fire Technology를 중심으로 수행한 유럽 공동 화재실험으로 노르웨이 북부에 위치한 2.3 킬로미터의 구리광산에서 수행되었다. 산소소비량 분석법을 이용하여 철도차량의 화재규모가 평가 되었으며 도시간 일반 객차에 대한 평가 결과는 13.5 MW와 12MW급의 최대 화재규모를 보여주었다. 알루미늄 차체로 제작된 도시철도차량의 경우 35MW(산소소비량 분석법)와 24MW(엔탈피법; CO<sub>2</sub>/CO 질량유량 사용)을 나타내었다. 좌석수가 적은 알루미늄 차량

의 최고 화재규모가 상대적으로 더 크게 나타난 것은 차량 구조의 내화성능과 차량내 환기조건이 전체 차량의 화재성장 곡선에 미치는 민감성을 보여 주는 시험 결과라고 할 수 있겠다. 일본에서 수행한 화재시험에 대한 결과는 일반적으로 철도차량이 10MW-20MW 급의 화재규모를 보여준다고 하였다. 대구지하철 화재사고에 대한 평가 역시 실험적으로 정확하게 평가되지는 않았지만 최소 20MW급 이상의 화재가 지속되었다고 보는 것이 일반적인 견해다. Ingason(2007)에 따르면 그동안 수행되어온 철도차량 화재규모에 대한 시험결과 최대 화재규모는 약 7 -43 MW 정도의 범위를 가진다. 이는 철도차량마다 사용된 구조나 재료가 다르기 때문이기도 하지만 무엇보다도 환기조건이 각기 달랐기 때문이라는 지적이다. 철도차량의 경우 충분한 과잉 연료이기 때문에 결국 환기 지배형 화재가 되므로 도어나 창문의 개폐가 중요한 시험결과의 편차요인이라는 것이다. 이와 같이 철도차량의 화재실험이나 화재사고에 대하여 추정된 보고 값은 상당한 폭의 편차를 가진다. 하물며 설계단계에서 예측하는 경우라면 이 추정 값과 실제 값의 오차는 더욱 커질 것으로 우려할 만하다. 철도차량 화재규모 추정방법의 신뢰성 확보가 절실히 요구되는 대목이다.

## 2.1 디자인시나리오 법(Design Scenario Method)

디자인 시나리오 방법은 1975년대 미국의 메트로 차량에 적용된 이래로 가장 보편적으로 사용되어 왔다. 이 방법은 1971년과 1974년에 캐나다의 몬트리올 화재사고의 조사결과를 반영하여 만들어졌다. 즉 차량에 화재가 발생한 이후 20여분 만에 플래시오버가 발생하였으며 연소는 약 1시간 정도가 지속되었다는 결과에 기반하고 있다. 이에 따라 차량 한량이 연소할 때 발생하는 평균 열방출율(HRR)은 아래식과 같이 설정되었다.

$$\frac{\text{차량당 총화재부하}(MJ)}{\text{연소시간}(s)} = \frac{\text{차량당 화재부하}}{3600}(MW)$$

이 방법은 아틀란타, 발티모어, 버팔로와 홍콩의 터널 배연시스템 설계에도 사용되었다고 한다. 1979년에 샌프란시스코의 BART(bay area rapid transit)와 1976년의 토론토 메트로 화재사고에 대한 조사를 기반으로 1983년에 약간의 보정식이 제안되었다. 초기 화재규모( $Q_{mit}$ )를 0.7MW로 추정하고 초기화재가 발생한 차량으로부터 인접한 차량으로 화재가 전파되는 개념을 도입하였으며, 차량의 상부와 하부 바닥구조에 설정된 화재부하를 분리하여 다음과 같이 계산하도록 하였다. 표1에는 경과시간에 따른 차량별 화재의 진행 시나리오에 따른 최대 화재규모를 계산하는 방법을 소개하였다.

$$\begin{aligned} \dot{Q}_1 &= \text{초기화재 발생차량에서의 발열량} \\ &= \frac{\text{상부화재부하}(MJ) + \text{하부화재부하}(MJ) + 1/2 \text{ 바닥부열부하}(MJ) - Q_{mit} \times 1200(s)}{3600(s)} \end{aligned}$$

$$\dot{Q}_2 = \text{화재가전파된차량에서의 발열량} = \frac{\text{상부화재부하}(MJ) - Q_{mit} \times 1200(s)}{3600(s)}$$

경과시간(min)	차량번호	HRR(MW)	최대 HRR(MW)	비 고
0 - 20	1	$\dot{Q}_1$	$\dot{Q}_{init}$	1번차량 초기 연소
20 - 40	1 2	$\dot{Q}_1$ $\dot{Q}_{init}$	$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_{init}$	1번차량 플래시오버, 2번차량 초기연소
40 - 60	1 2 3	$\dot{Q}_1$ $\dot{Q}_2$ $\dot{Q}_{init}$	$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{init}$	2번차량 플래시오버, 3번차량 초기연소
60 - 80	1 2 3 4	$\dot{Q}_1$ $\dot{Q}_2$ $\dot{Q}_2$ $\dot{Q}_{init}$	$\dot{Q}_1 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{init}$	3번차량 플래시오버, 4번차량 초기연소
80 - 100	2 3 4 5	$\dot{Q}_2$ $\dot{Q}_2$ $\dot{Q}_2$ $\dot{Q}_{init}$	$\dot{Q}_2 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_2 + \dot{Q}_{init}$	1번차량 연소종료, 4 번차량 플래시오버, 5번차량 초기연소

표 1 디자인 시나리오 평가법에서의 차량간 연소전과 시나리오

1989년에 추가된 보정방안의 경우는 시대적으로 차량의 화재저항성이 상승된 것을 반영하여 초기 화재시간을 20분에서 30분으로 조정하였다. 2002년 이후에는 연소효율 개념을 도입하여 화재부하에 0.3 ~ 0.8 정도의 연소효율 값을 곱하여서 사용한다. 즉 차량내의 모든 재료가 완전하게 연소되지 않는다는 사실을 반영한 것이다. 이러한 방법으로 예측된 최근의 차량은 약 10MW 정도의 화재규모를 가진다. 디자인 시나리오 방법을 이용한 화재규모 예측은 그동안 가장 보편적으로 사용되어 왔으며 차량내의 연소 가능한 모든 재료를 고려할 수 있다는 포괄성과 계산의 간단함이라는 장점을 가진다. 이 방법은 또한 역사적으로 실재했던 화재사고에 대한 조사를 통하여 보완되어 왔기 때문에 현실성을 가지지만 동시에 화재사고가 발생하지 않았던 유형의 터널에서도 유효할 것인지 보증해줄 근거가 없다는 지적을 받고 있다.

## 2.2 합량법(Summation Method)

미국의 궤도교통시스템 화재안전 관리기준서(NFPA 130 - 2003)의 부록서에 소개된 이 방법은 1997년 Duggan에 의하여 주도적으로 제안되었으며 차량에 사용된 개별 재료에서 발생하는 발열량에 각 재료의 적용면적을 곱하여 합산하는 방법을 사용한다. 이 방법은 홍콩의 MTRC(Mass Transit Rail Corporation) 설계에 사용되었다. 이 방법을 적용하기 위해서는 개별 재료의 소형 시편을 이용하여 콘칼로리미터 시험을 수행하여 각각의 열방출율을 우선 평가하여야 한다. 이때 차량에 설치된 각 재료별 위치에 따라서 다른 열복사 조건의 설정이 요구되는데 이에 대하여 Duggan과 Peacock 등은 표2와 같이 제안하였다. 표 3에는 국내 지하철 구간에 운행하고 있는 전동차에 대하여 합량법과 유사한 방법론을 적용하여 화재부하를 평가한 사례를 나타내었다. 각각의 재료에 대한 발열량은 ISO 5660-1 방법을 적용한 콘칼로리미터 시험 결과를 나타내었다.

표면재료	노출조건(kW/m <sup>2</sup> )
누운 수평재료 - 바닥재, 의자 바닥	20 or 25
수직재료 - 벽, 의자 등받이	35
덮은 수평재료 - 천정재	50

표 2 콘칼로리미터 시험에서의 노출조건

Items	Material	Used kg/량	Test MJ/kg	Total MJ/량
내장판	G.R.P	970	12.2	11834
단열재	P.E	124.8	18.5	2309.5
바닥재	P.V.C	332.2	3.9	1295.6
의 자	Polyester Moquette	60	15.8	948
	P.U	55	19.1	1050.5
합 계		1,745		17,438

표 3 국내차량 합량법 유사평가 사례

합량법은 개별적인 재료들의 실측된 발열량 결과로부터 실증적으로 유추된다는 장점이 있지만 차량에 포함된 모든 재료가 동시에 연소된다는 불합리한 가정을 내포하게 된다. 다울링(Dowling) 등은 이에 대하여 분당 약 10% 정도씩 차량의 연소가 길이 방향으로 진행된다는 가정을 보정하여 사용하는 방안을 제안하였다. 또한 합량법의 경우 시편의 시험결과가 있는 경우에만 합산이 가능하기 때문에 시편 추출이 어려운 바닥하부의 오일재료나 구조물 내부의 심재 등에 대한 평가가 누락될 수 있다. 이에 대해서도 적절한 보정이 요구된다고 하겠다. 추가로 합량법의 경우 차량의 창문이나 도어의 개폐 상태 등에 대한 환기구조가 전혀 평가에 반영되지 않고 오직 재료적 특성에 의존한다는 점도 근본적인 한계도 지적될 수 있겠다. 이와 같은 이유에서 인지 NFPA 130의 2007년 개정판에는 합량법을 이용한 평가방법은 삭제되었다.

### 2.3 전산 시뮬레이션법(Fire Simulation Method)

철도차량과 같이 공간 규모가 확장된 경우에도 화재시뮬레이션을 이용한 화재규모 산출방법이 사용되는 것은 컴퓨터를 이용한 전산해석 기술의 획기적인 발전이 있었기에 가능해진 것이다. 철도차량의 화재규모 계산에 전산해석 방법이 시도된 것은 1991년 Hettinger와 Barnett에 의하여 포스트 플래시오버 해석코드 COMPF2(Babrauskas 1979)가 사용된 것에서 시작된다. 근래에는 NIST에서 보급한 FDS(Fire Dynamic Simulator)를 비롯하여 SmartFire 등의 화재해석 코드가 철도차량의 화재해석에도 사용되고 있으며 해외의 경우 많은 엔지니어들이 선호하고 있는 것으로 보인다. 그러나 복잡한 난류와 열전달 모델 뿐만 아니라 다양한 복합재료의 연소모델이 얽혀있는 철도차량의 화재현상을 전산모사 방법을 통하여 근사하게 해결하는 것은 아직까지는 많은 한계가 있는 것으로 보인다. 이는 전산모사 방법이 근본적으로 복잡한 현실에 비하여 매우 간결하게 수학적 모델화된 계산식을 풀어가는 방법을 따르기 때문이다. FDS가 아직까지는 직교 격자나 한 가지 물질의 연소식만을 채용하고 있다는 것은 이와 같은 지나친 간결화의 사례이다. 따라서 화재 시뮬레이션법을 이용하는 경우는 해석결과에 대한 검증(verification) 과정을 거쳐서 얻어진 결과를 유효화하도록 권고되고 있다. 우리나라의 경우 해석결과의 유효성을 검증할 수 있는 실험적 기반시설이 취약한 반면 IT 산업과 영상매체 기술이 상대적으로 발전한 것에 고무된 탓에 때론 시뮬레이션 해석 방법론이 근거 없이 신뢰를 얻게 되는 편향이 있다고 생각된다.

## 2.4 실규모 화재시험법(Real Scale Fire Test Method)

실제 크기의 화재시험을 통한 철도차량의 화재규모 시험법은 차량의 구조적 특성과 재료적 특성을 포괄하며 다른 방법에서 누락될 수 있는 요소를 총체적으로 반영할 수 있다는 점에서 가장 신뢰할 만한 방법으로 인정되고 있다. 그러나 실규모의 화재시험은 상당한 물질적 비용과 시간적 노력이 소요되므로 매우 제한적으로 수행되고 있다. 철도차량의 경우는 무엇보다도 장방향의 길이가 20미터를 초과하는 구조적 특이성 때문에 이를 평가할 수 있는 대형 발열량계가 존재하지 않는다는 문제점을 가지고 있다. 이러한 한계로 인하여 기존의 철도차량에 대한 화재시험의 경우에도 대형 연돌방식의 열량계로 모델화된 터널 내부에서 화재시험을 수행하거나(Ingason), 노천시험을 하면서 복사계 그리드(Flux Grid)를 이용하여 간접적으로 측정하는 방법을 사용하여 왔는데 이 경우 정형화된 열량계에 의한 평가방법에 비하여 불확도(Uncertainty)가 심각하게 증가하는 단점이 있다고 하겠다. 이와 같이 실차규모의 화재시험이 정교하게 수행되기가 매우 어려운 점으로 인하여 중형 칼로리미터(Furniture Calorimeter)를 이용하여 의자나 도어, 벽체 등 부분적인 조립체 단위로 발열량을 평가하는 방법도 활발하게 활용되어 왔다. 중형시험의 평가결과는 앞서 기술된 다양한 방법론의 중간 값이나 검증값으로 사용된다.

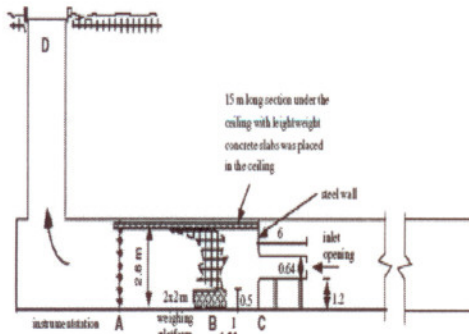


그림 1 터널 시험법(Ingason)

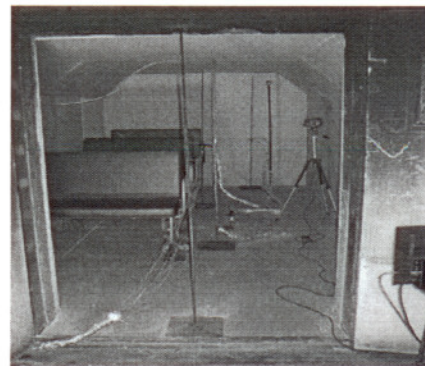


그림 2 객차모형화재시험(CSIRO)

철도차량의 독특한 공간적 특성을 화재시험에 반영하고자 하는 노력은 다울링(CSIRO, 호주) 등에 의하여 시도되었다. 우리는 이와 같은 그들의 시도를 발전적으로 평가하였고 건설교통부의 철도종합안전기술개발사업 중 “철도화재안전성능 평가 및 사고방지 기술개발” 연구보고서를 통하여 그림3과 같이 철도차량의 구조에 적합한 실대형 화재시험설비를 제안하였다.

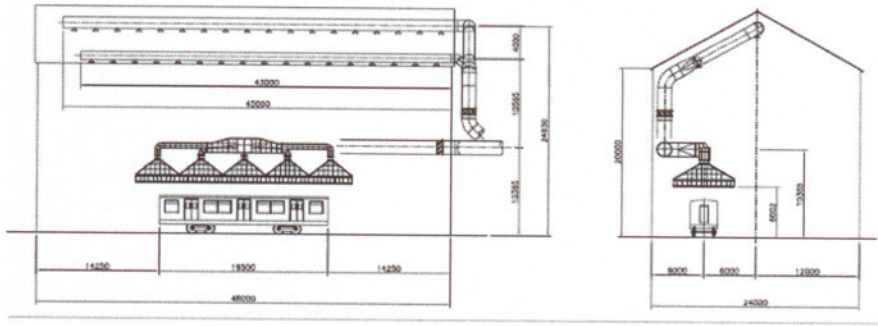


그림 3 철도차량 전용화재시험설비 개요도

### 3. 결론

본 연구를 통하여 철도터널이나 역사시설물의 배연용량을 포함한 방재설비의 규모를 산정하기 위하여 제공되어야 하는 철도차량의 화재규모를 산출하는 방법론을 조사하였다. 전통적으로 사용되어온 디자인 시나리오 설계방법의 경우 보편적이고 간단한 계산법을 이용하고 있지만 재료의 연소거동을 반영하지 못하는 한계가 있었다. 합량법의 경우에는 시편에서 제공받기 어려운 문제, 차량의 공간 구조적 특성이 반영되지 않는 문제와 소형 시험이 수행되지 않은 재료를 포함하지 못하는 문제, 모든 재료가 동시에 연소되는 것으로 가정된 한계를 보정해야 하는 어려움이 있었다. FDS로 대표되는 화재시뮬레이션을 이용한 방법의 경우는 모델링이 가지는 근본적인 간결화의 한계를 극복하는데 요구되는 검증과정의 중요성을 지적하였다. 철도차량 정도의 복잡성을 가지는 대상에 대하여 화재 시뮬레이션을 수행하는 경우라면 아직까지 상당기간의 실험적 보완 검증의 과정이 필요하다고 판단된다. 이와 같은 한계를 극복하기 위해서는 철도차량에 적합한 구조의 화재시험 설비의 개발이 요구된다고 하겠다.

### 4. 참고문헌

1. Boon Hui Chiam "Numerical Simulation of a Metro Train Fire" Department of Civil Engineering University of Canterbury
2. Hauker Ingason, "Model scale railcar fire tests" Fire Safety Journal 42 (2007)
3. Hauker Ingason, "Correlation between temperatures and oxygen measurements in a tunnel flow" Fire Safety Journal 42 (2007)
4. Stephen R. Turns "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications" McBraw-Hill Book Co. 1999
5. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd, Edition
6. Vytenis Babrauskas, Ignition Handbook, FSP FSPE
7. ISO 5660-1, 2(2001), "Reaction-to-fire test-heat release, smoke production and mass loss rate-Part 2. Smoke production rate(dynamic measurement)