

철도차량 화재모델링에서의 재료별 연소특성 시험법 조사 Test Methods for FDS modeling for passenger trains

이덕희* 이철규* 정우성**

Lee Duck-Hee, Lee Cheul-Kyu, Jung Woo-Sung

ABSTRACT

The input data for the interior material of the train is one of the key points for enhancing the accuracy of fire simulation. In this study, we investigated the Fire Test Methods for the Fire Dynamic Simulator modeling for railroad passenger trains. We should get the thermal inputs such as ignition temperature, conductivity, specific heat, vaporization heat, effective heat release. With the simple conduction model for cone-calorimeter test, they could get more than HRR. Kinds of methodology were introduced for better thermal data for real material.

1. 서론

『철도차량안전기준에관한규칙』에서 요구하고 있는 “위험도평가” 규정에 따라 2007년 정부는 『철도차량안전기준에관한지침』 개정안에 철도차량의 화재위험도평가를 수행하도록 요구하고 있다. 이에 따라 철도차량의 제작 설계시 차량의 설계사양에 대한 정보를 기반으로 화재 위험도를 예측하여야 하는데 화재시뮬레이션 기법은 제작되지 않은 철도차량의 화재심각도를 예측할 수 있는 주요 수단으로 자리잡게 될 것으로 판단된다. 화재위험 예측에 시뮬레이션 기법을 동원하는 것은 매우 전통적이고 일반적인 접근법이다. 이는 화재 실험이 시험체의 소실에 의하여 재현이 어렵고, 시험체 자체의 준비와 화재시험시 발생하는 연소 생성물의 환경처리 등에 막대한 비용이 소요된다는 점으로 인하여 매우 제한적으로 시행되고 있는 점 때문이기도 하다. 전산해석을 이용한 화재시뮬레이션이 이러한 문제점을 해결해주는 장점이 있다고는 하지만 일반적인 열유체의 해석에 비하여 화재해석은 다양한 물질의 연소를 포함하므로 보다 복잡한 해석을 요구한다. 특히 철도차량과 같이 십여 가지 이상의 다양한 가연물질을 포함하고 있는 경우에는 그 복잡성은 더욱 심화될 것이다. 따라서 이러한 해석의 경우 해석에 포함되는 가연물질의 연소특성이 얼마나 정확하게 입력되는 가는 화재해석 전체의 신뢰성을 확보를 위하여 요구되는 가장 중요한 사항 중 하나에 해당한다. 최근 화재관리분야에 미국의 NIST에서 개발한 FDS(Fire Dynamic Simulator)가 활발하게 사용되고 있는데 많은 경우 가연재료의 물성치를 확보하는데 어려움이 있어 문헌값을 인용하여 수행하고 있어 해석 결과에 우려스러운 점이 있다고 보인다.

* 한국철도기술연구원 선임연구원, 정회원

** 한국철도기술연구원 책임연구원, 정회원

본 연구에서는 FDS에서 사용되는 가연재료 연소특성치 입력요소를 중심으로 철도차량 모델링에 요구되는 연소특성 시험방법을 조사하도록 하겠다.

2. 본론

FDS는 열방출율(HRRPUA ; Heat Release Rate per Unit Area) 설정에 의한 해석 방법과 기화열(Heat of Vaporization) 설정에 의한 해석방법이 병행되어 사용가능하다. 열방출율 설정에 의한 방법은 가연재료가 발화온도(Ignition Temperature)에 도달하면 새로운 전기로(Furnace)가 되는 것처럼 정해진 방출률로 열에너지를 방출하도록 설정하는 해석 방법이다. 이러한 해석은 화염에 의하여 물질로 환원되어 열분해에 참여하는 피드백(feed back) 과정을 해석하지 못한다는 한계를 가지게 되지만 요구되는 물질특성치가 적어 많이 활용되고 있다. 이러한 방식의 해석을 위해서는 재료별 발화온도와 열방출율(HRRPUA) 곡선이 필요하다. 반면, 기화열 방법에 의한 해석은 유효발열량(effective heat of combustion)과 기화열(heat of vaporization)을 이용한 열분해 모델을 사용함으로써 화염에 의한 피드백을 고려하도록 설정한다. 그러나 이 경우 과도한 열분해가 진전되지 않도록 최대연소율(maximum burning rate)을 지정하도록 하는 보정방안을 포함하여야 한다. 기화열 해석 방법을 적용하기 위해서는 발화온도, 유효발열량, 기화열, 연소율 등의 입력자료를 확보하여야 한다. 이때 연소율은 질량감소율(mass loss rate) 계측 값으로부터 도출된다.

가연성 재료가 가지는 연소특성은 각각의 재료가 가지는 고유한 물질적 특성뿐만 아니라 첨가물이나 외피처리 또는 다른 재료와의 조립 등에 의하여 큰 폭으로 변화된다. SFPE에서 제공하는 화재방지공학 핸드북이나 Babrauskas에 의하여 제공된 핸드북(ignition handbook)등에 의한 섬유강화플라스틱(FRP)의 연소특성의 편차 사례를 표1에 소개하였다.

Properties	Value	Remark	Reference
thermal conductivity k(W/mK)	0.3	Polyester, FRP	Annon 2004g
	0.29	Polyester, glass filler(18-36%)	Tewarson et al. 1999
Density ρ (kg/m ³)	1950	Polyester, FRP	Annon 2004g
	1480-1730	Polyester, glass filler(18-36%)	Tewarson et al. 1999
Specific heat c(kJ/kgK)	1.51	Polyester, FRP	Annon 2004g
	1.2-2.3	Polyester, unsaturated	SFPE 2002 App. C Table C3
	1.1-1.3	Polyester, glass filler(18-36%)	Tewarson et al. 1999
	1.047	Polyester, chopped glass filler	Hilddo 1990 Table 2.3
Ignition Temperature(℃)	346-399	Polyester, glass fiber laminate	Hilddo 1990 Table 2.5
Heat of vaporization ΔH_v (kJ/kg)	1400-6400	Polyester, FRP	Tewarson 2002 Table3-4-7
	350-410	Polyester, unsaturated	Babrauskas 2003
Effective heat of combustion $\Delta H_{c,eff}$ (kJ/kg)	9300-19000	Polyester, FRP	Tewarson 2002 Table3-4-14
	13500	Wall Panel, FRP Cone Calorimeter Test average	Peacock and Braun 1999 Table D-6

표1. FRP polyester 재료의 연소특성 시험 사례(by Boon Hui Chiam, 2005)

시험조건이나 평가방법에 의해서 약간씩 차이가 있다는 점도 간과될 수 없다. 표1에서와 같이

재료의 연소특성 편차가 상당한 수준으로 나타날 수 있다는 점은 철도차량의 화재시물레이션에서 실측실험으로부터 얻어진 값을 사용하여야 한다는 사실을 확인해 준다.

2.1 발화온도(Ignition Temperature) 시험법

연소특성 데이터는 개별 시험으로부터 직접적으로 얻어지기도 하지만 근래에는 콘칼로리미터(ISO 5660) 시험이나 LIFT(ISO 5658-2) 시험을 이용하여 얻어진 측정값과 간단한 열전도 모델식을 적용하여 도출하기도 한다. 발화온도(ignition temperature)의 경우는 ISO 871, ASTM D 1929 등에 의한 개별시험이나 콘칼로리미터법을 활용한 시험법이 활용될 수 있다. ISO 871 시험은 1929년 Nicholas Steckin 에 의하여 제안된 전기로를 사용하여 시험한다. 3g 정도의 시편재료를 그림1과 같은 컵안에 넣고 설정된 온도에서 발화현상이 발생하는지를 관측한다. 발화가 생기지 않으면 온도를 변화시키면서 발화가 반복 시험한다. 시험은 시험체가 스스로 발화하는 자연발화온도(spontaneous ignition temperature) 평가와 상단에 점화염(pilot flame)을 준 상태에서 평가하는 인화온도(flash ignition temperature) 시험법으로 구분되어 수행된다.

발화온도 시험을 위한 초기의 규격에는 열유속을 변화시키면서 측정하는 방법도 포함되어 있었다고 한다. 그러나 0.025m/s에서 가장 열악한 조건이 된다는 것이 밝혀지면서 유속은 고정되게 되었다고 한다. 이밖에도 Masarik는 가염조건을 불꽃으로 하는 경우와 전기적인 스파크로 하는 경우, 내측 튜브를 세라믹과 스테인리스 스틸로 하는 경우, 시편용 컵을 니켈과 스테인리스 스틸로 바꾸는 경우 등에 대한 디자인 연구 결과를 보좌하기도 하였다. 이러한 결과로 미루어 보아도 현재 규격화된 시험법은 비교적 적절하게 선정된 것으로 이해되고 있다. 그림1과 표2에 발화온도 시험기의 연소로 구성도와 시험결과 사례를 나타내었다.

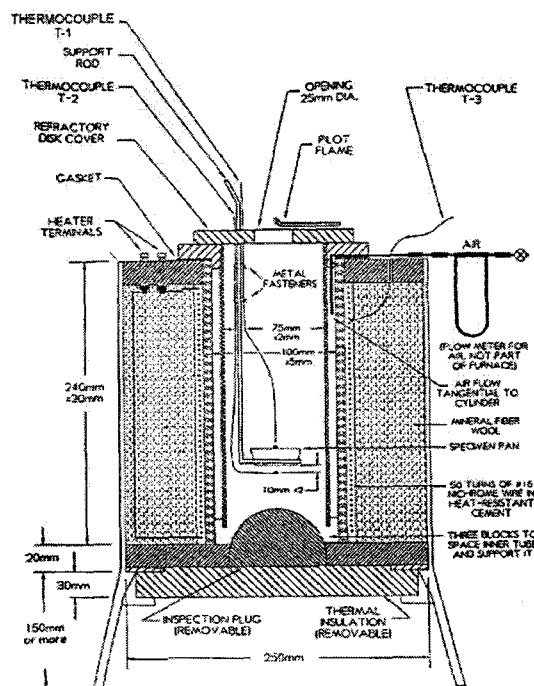


그림1. 발화온도 시험기 구성도(ISO 871)

Substance	Ignition Temp.(°C)	
	Piloted	Auto-ignition
epoxy resin	315	429
polycarbonate	522	550
polychloroprene rubber(Neoprene)	307	390
polyester, FRP	346-394	447-488
polyethylene	340-430	350-450
PMMA	280-300	450-462

표2. 발화온도 시험사례(from ignition handbook)

2.2 콘칼로리미터(Cone-Calorimeter) 시험으로 부터의 계산법

콘칼로리미터 시험법은 1982년 현 NIST(National Institute of Standards and Technology)의 전신에 해당하는 NBS(National Bureau of Standards)에서 Babrauskas와 Parker, Swanson 등에 의하여 개발되었다. 이 시험은 연소재료로부터 방출되는 발열량 측정을 목적으로 온도 변화를 측정 하였던 기존의 측정법이 가지는 한계를 근본적으로 전환하여 산소소모율 측정 방법을 이용한 시험기이다. 이 방법은 측정위치를 줄임으로써 화재시험의 공간적 한계를 극복하게 하였으므로 대형 칼로리미터 시험법에도 활용되고 있다. 이 시험 장치는 콘 형태의 열복사 히터, 산소분석 장치, 유량조정이 가능한 배연시스템, 연기농도 평가를 위한 레이저, 시편의 질량감소를 측정하기 위한 로드셀 장치 등으로 구성되어있다.

- 발열량

콘칼로리미터의 발열량 계산은 대체로 산소소모율을 이용한 다음 수식에 의하여 결정된다.

$$q(t) = \left(\frac{\Delta h_c}{r_o} \right) (1.10) C \sqrt{\frac{\Delta p}{T_e}} \frac{X_{O_2}^0 - X_{O_2}}{1.105 - 1.5 X_{O_2}}$$

여기서 $\Delta h_c/r_o$ 는 단위질량의 물질이 연소할 때 발생하는 발열량으로 순수한 메탄의 경우 12.54 kJ/g, 산소의 경우 13.1 kJ/g의 상수이며 배연 덕트 내부의 오리피스에서의 압력차(Δp)와 가스온도 및 산소소비량($X_{O_2}^0 - X_{O_2}$)에 의하여 결정된다. 순수한 메탄을 연소시켜서 측정되는 산소 소비량 계산을 통하여 시험기의 신뢰성을 검증하도록 설계되었으며 하였으며 이에 대한 보정치를 C 값으로 반영하도록 하였다. 따라서 위의 식에 나타난 각 요소들을 어느 정도 정확하게 측정할 수 있는가가 이 장치의 신뢰성을 결정하는 요인이다. 때로 일산화탄소나 수증기의 농도를 포함하여 계산하는 방법을 사용하기도 한다.

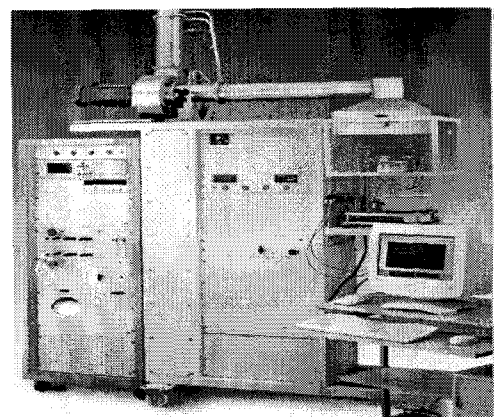
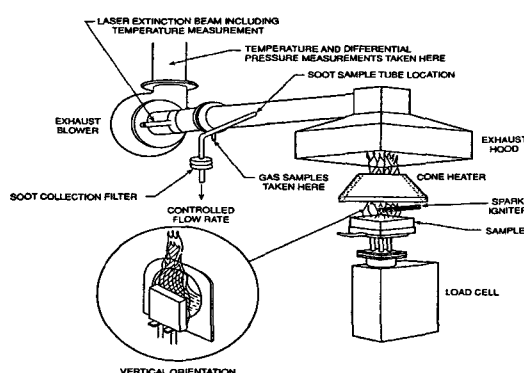


그림2. 콘칼로리미터 구성도 및 장비 사례

콘칼로리미터법을 이용하면 한 번의 실험으로 HRR 이외에도 유효발열량, 연소율, 발화특성, 연기 및 독성가스 등을 평가할 수 있는 이점이 있다. Peacock와 Braun(1999)에 의하면 철도차량에

서 발달단계의 화재는 $20 \sim 25 \text{ kW/m}^2$ 의 열방출에 노출되고 최성기에는 $50 \sim 75 \text{ kW/m}^2$ 에 이른다고 보고하였다. Duggan(1997)은 바닥재는 $20 \sim 25 \text{ kW/m}^2$ 벽체부는 35 kW/m^2 천정부는 50 kW/m^2 에 해당한다고 제안하였다. 따라서 열방출을 도출을 위한 재료의 연소조건 설정시 재료의 설치 형태에 따라 콘히터의 복사열을 적절하게 설정하는 것이 시험 데이터의 활용성을 높이는 방법이 될 것이다.

- 발화온도

콘시험으로부터 발화온도를 산출하는 방법은 Grenire(1997), Janssens(1993) 등에 의하여 제안되었는데 반복계산(iteration)을 이용한 수치적 방법으로 아래의 수식을 푸는 것으로 구하도록 제안하였다.

$$\epsilon \dot{q}_{cr}'' = h_c (T_{ig} - T_{\infty}) + \epsilon \sigma (T_{ig}^4 - T_{\infty}^4)$$

여기서 ϵ 는 표면방출계수, \dot{q}_{cr}'' 임계발화열류량, σ 는 스테판-볼츠만상수($5.67 \times 10^{-11} \text{ kW/m}^2\text{K}^4$)

- $k\rho c$

만약 시험체가 열적으로 두꺼운 재료라면 열적으로 얇은 재료와 구분되어 평가된다. 콘칼로리미터 시험법으로부터 $k\rho c$ 나, $k\rho\delta$ 값을 계산하는 방법역시 Grenire(1996), Janssens(1993)에 의하여 제안되었다. 열적으로 두꺼운 재료(thermally thick)에서 총열전달계수(total heat transfer coefficient) h_{tot} 를 구하고 이를 이용하여 다시 $k\rho c$ 를 구하는 방법은 아래식과 같다.

$$h_{tot} = \frac{\epsilon \dot{q}_{cr}''}{(T_{ig} - T_{\infty})} \quad k\rho c = h_{tot} \left[\frac{1}{0.73 \text{slope} \dot{q}_{cr}''} \right]$$

여기서 \dot{q}_{cr}'' 은 발화가 생기는 콘히터의 최소열류량을 의미한다. 기울기(slope)는 열류량과 발화시간의 연관정도를 의미한다. 열적으로 얇은재료(thermally thin)라면 열전도율 C는 필요가 없을 것이며 Mikkola와 Wichman(1989)에 의하여 아래와 같이 제안되었다.

$$k\rho\delta = \frac{1}{\text{slope} (T_{ig} - T_{\infty})}$$

- 기화열(Heat of vaporization)

콘시험으로부터 ΔH_v 를 구하는 방법은 Quintiere(1993)에 의하여 제안되었다. 여기서 기울기는 콘히터의 노출플럭스와 \dot{q}_{peak}'' 사이의 관계식으로부터 도출된다.

$$\Delta H_v = \frac{\Delta H_{c,eff}}{\text{slope}}$$

위에서 소개한 특성 이외에도 콘칼로리미터 시험에 의하여 예측된 질량감소율(mass loss rate)은 FDS 모델링에서 최대연소율을 설정하는 지표가 된다. 앞서 언급한 바와 같이 이 값은 열분해

모델을 사용하는 계산에서 과도한 열분해과정을 방지하는 역할을 한다.

2.3 비열 측정 ; DSC & TGA

DSC(differential scanning calorimeter)는 고분자재료의 비열, 유리화 온도(Glass Transition, Tg), 산화안정성, 녹는점, 결정화온도 등을 평가하는 기초 열특성 분석기이다. 관련규격은 DIN 53765, ASTM D 3418 등이 있으며 판히터 위에 한쪽 접시에만 측정물질을 넣고 양쪽을 같은 온도로 올리면서 기준접시에 비하여 시험물질을 담은 접시에 추가로 들어간 열에너지를 분석하는 방법을 사용한다. TGA(thermogravimetric analyser)는 열무게분석법이라는 열적 작용에 의하여 질량의 변화를 측정함으로써 물질내 화학조성량, 비열 등을 측정하는 장비이다. ASTM E 914, ASTM E 1131 등의 시험규격에 따른다. 다만, DSC나 TGA는 미량분석을 위하여 사용되는 장비로써 균질한 물질에만 적용 가능한 한계를 가진다.

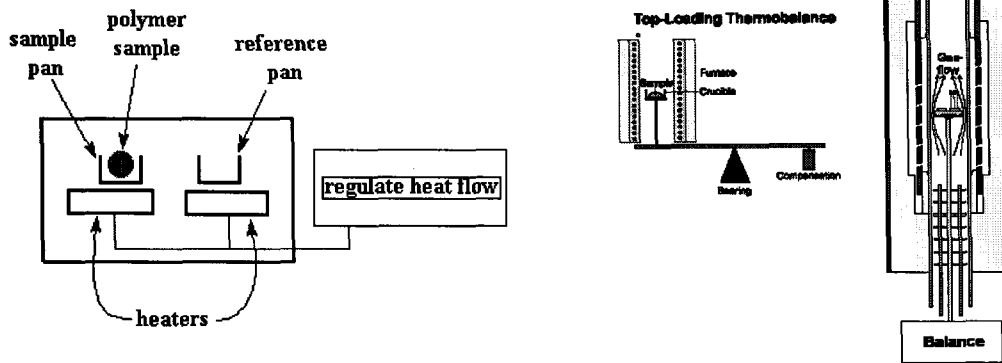


그림3. DSC 및 수직형 TG 시험 개념도

2.4 열전도율 시험법

열전도율을 평가하는 방법은 시료의 종류와 열전도도에 따라 다양하다. 크게 세가지 방법으로 분류되며 다음과 같은 시험규격에 따른다. 평판법은 ISO 8301, ISO 8302, ASTM F 433, ASTM E 1530, ASTM E 1225, 열선법은 ASTM C 1113, ASTM D 5930, ISO 8894-1, ISO 8894-2 레이저법은 ASTM E-1461, DIN 30905의 관련규격을 참조하라. 평판법의 경우에도 열전도도 정도로부터 사용하는 계측기의 종류에 따라서 다시 Heat Flow meter, Guarded Heat Flow meter, Guarded Hot Plate 방법등이 구분되어 사용된다.

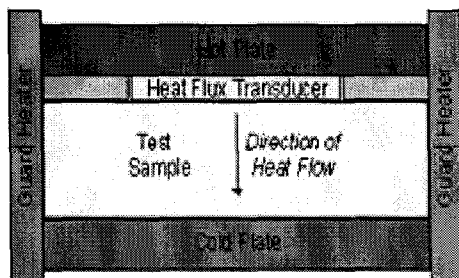


그림4. Guard Heater 평판법 개념도

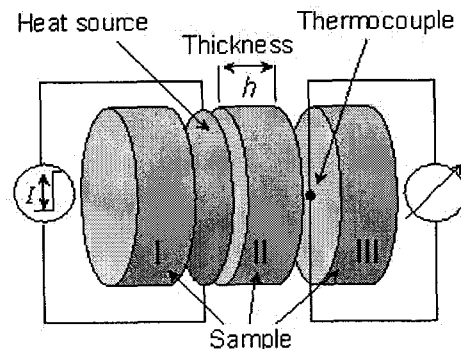


그림5. STEP-WISE Transition Method 법 개념도

3. 고찰

철도차량의 화재시물레이션을 수행하기 위하여 요구되는 가연재료의 연소특성과 이를 측정할 수 있는 시험방법을 조사하여 보았다. 이 중에서 DSC나 TGA와 같이 미세량을 대상으로 하는 시험설비는 실제 차량에 사용되고 있는 비균질적이고 복합적인 조립체계를 가지는 재료에 대하여 적용하기에는 한계가 있는 것으로 보인다. 이러한 문제를 극복하기 위하여 콘칼로리미터 시험이나 이를 응용한 시험결과로부터 유추해석 하는 방안이 활발하게 제안되고 활용되고 있는 것으로 보이며 이에 대한 보완적 연구가 요구된다. 실물에 대한 근거 있는 시험결과를 활용하거나, 보다 엄밀한 추적성을 가지고 있으며 다양성이 해결된 시험 데이터베이스가 확보되어야 보다 신뢰할 수 있는 철도차량 화재해석이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 건설교통부에서 지원하는 철도종합안전기술개발사업의 일환으로 추진 중인 “철도화재 안전성능평가 및 사고방지 기술개발”의 지원으로 이루어졌음을 밝히며 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Stephen R. Turns "An Introduction to Combustion : Concepts and Applications" McBraw-Hill Book Co. 1999
2. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 3rd, Edition
3. Vytenis Babrauskas, Ignition Handbook, FSP FSPE
3. Seung Han Lee "Material Property Estimation Method Using a Thermoplastic Pyrolysis Model" Thesis for degree of master in Wrocester Polytechnic Institute, 2006
4. ISO 5660-1, 2(2001), "Reaction-to-fire test-heat release, smoke production and mass loss rate-Part 2. Smoke production rate(dynamic measurement)
5. Boon Hui Chiam "Numerical Simulation of a Metro Train Fire" Department of Civil Engineering University of Canterbury