



## 지하철 축소모형 객차화재 수치해석적 연구

김 동 운,<sup>\*1</sup> 박 원 희,<sup>1</sup> 김 치 훈,<sup>1</sup> 정 우 성,<sup>1</sup> 이 덕 희<sup>1</sup>

### SIMULATION STUDIES ON A REDUCED-SCALE SUBWAY COACH FIRE

K.W. Kim,<sup>\*1</sup> W.H. Park,<sup>1</sup> C.H. Kim,<sup>1</sup> W.S. Jung<sup>1</sup> and D.H. Lee<sup>1</sup>

*In this study, fire behavior for subway coach fire in the 1/10 reduced scale model is analyzed using numerical analysis method (FDS). The size of the reduced model coach is 1.9 m long, 0.290 m high and 0.235 m. The simulation is carried out only one-sided four doors of the coach are opened. A fire source is the n-heptane pool fire with a mean heat release rate 2.33 kW. Smoke temperature, heat release rate and mass loss rate for the model are calculated.*

**Key Words :** 지하철 객차화재(Subway Coach Fire), 축소모형(Reduced-scale)

#### 1. 서 론

다른 이동수단에 비해 환경적인 측면 및 높은 수송효율로 인해 철도 산업은 크게 증대되어 왔다. 이와 관련하여 철도 산업의 기술발전은 빠른 성장을 가져왔으나, 철도 이용의 안전성은 아직도 논란의 여지가 되고 있는 실정이다. 특히, 철도 화재사고의 경우, 철도 시설물의 높은 공공성으로 인해 쉽게 대형사고로 이어지는 특성이 있다. 여러 국내의 철도 화재 사고의 경험으로부터 철도 화재의 사고를 방지하는 대책들이 계획되어 있지만, 철도차량 자체 및 지하공간과 같은 제한적 공간성으로 인한 많은 잠재적인 화재 위험성을 내포하고 있다. 이러한 문제점의 인식으로 인하여 철도 화재를 대상으로 하는 연구가 이미 많이 진행되어 왔고, 대부분 터널 및 역사와 같은 철도 시설물 화재와 철도 차량 대한 화재 현상에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 철도 차량에 대한 화재 경우, 차량의 제원 및 내장계가 매우 다양하여 이로 인한 많은 어려움이 따르기 때문에 보다 많은 화재연구가 필요하다. 철도 차량에 대한 화재 연구로는 1984년 NBS(National Bureau of Standard)에서 실시한 Amtrak의 여객차량 시험[1]과 1991년 EUREKA 499 test[2] 프로그램이 진행되었다. 축소 모형을 이

용한 화재 연구로는 1994년 Peacock[3]와 Haukur Ingason[4]는 축소모형 철도 차량을 이용하여 내장계의 종류와 환기조건에 따른 발열량 변화에 대해 연구하였다.

본 연구에서는 실물 지하철의 크기를 1/10로 축소된 모형을 이용하여 객차 내부 화재발생시의 열방출율과 질량소모율 및 온도측정을 통한 화재전파 양상에 대하여 분석하였고 수치해석을 수행하여 실험의 결과와 비교분석하였다.

#### 2. 실험방법 및 수치해석 방법

##### 2.1 실험방법

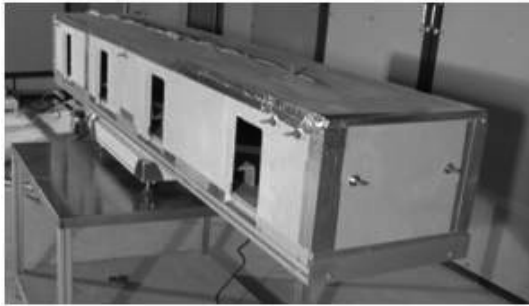
###### 2.1.1 축소모형

본 실험에서는 실물 지하철 객차의 크기를 1/10로 축소된 모델을 사용하였다. 축소모형 객차는 불연재를 사용하여 길이 1.900 m, 넓이 0.290 m, 높이 0.235 m의 크기로 제작하였다. 축소모형 객차 내장계는 두께 0.003 m인 일반합판을 사용하여 Fig.1과 같이 천장, 바닥, 객차의 단부 및 승객의자를 제작하여 축소모형 객차에 설치하였다. 또한 승강장과 연결된 4개의 출입문 위의 위치에는 0.045 m x 1.9 m, 반대면에는 0.09 m x 1.9 m의 면적의 내장계가 설치하였다. 좌석은 두 가지 종류가 설치되었는데 긴 좌석의 경우, 앉는 면적은 0.055 m x 0.313 m 이고, 등받이와 받침대의 면적은 0.04 m x 0.313 m 이다. 갱웨이 부근에는 작은 좌석은 앉는 면적이 0.055 m x 0.134 m 이고, 등받이와 받침대의 면적은 0.04 m x 0.134 m

1 한국철도기술연구원 철도환경연구실

\* TEL : 031)460-5859

\* Corresponding author, E-mail: wooni53@krii.re.kr



(1) The experimental model



(2) Photo of inside of reduced model

Fig. 1 A reduced model

이다.

### 2.1.2 실험장비

축소모형 객차 화재실험시 화재의 거동을 파악하기 위하여 Fig.2와 같이 모형객차 내부에 사용범위가 -200 ~ 1250인 K-type 열전대를 총 11개를 설치하여 객차 내부의 국부적인 온도를 측정하였다. 또한 ISO 9705 Room corner test[5] 장비를 이용하여 3.5 m<sup>3</sup>/s로 흡입되는 연소가스 중 산소의 소모량을 측정하여 축소모형 객차의 열방출율을 측정하였다. 화재시 질량감소를 측정은 초당 1g의 분해능을 가진 전자저울을 사용하였다.

### 2.1.2 실험방법

헵탄의 경우, 연소열은 44.6 kJ/g[6]이므로 식(1)과 식(2)에 의해 시간에 따른 화원의 이론 발열량을 구할 수 있으며, 이때 화원의 평균 발열량은 약 2.33 kW이다.

$$Q = m'' \cdot A \cdot \Delta H \quad (1)$$

$$m'' = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot A} \quad (2)$$

## 2.2 수치해석 방법

### 2.2.1 지배방정식 및 수치해석

수치해석에서는 현재 화재분야에서 널리 사용되고 있는 NIST의 상용코드인 FDS를 사용하였으며, 이 코드는 아래와

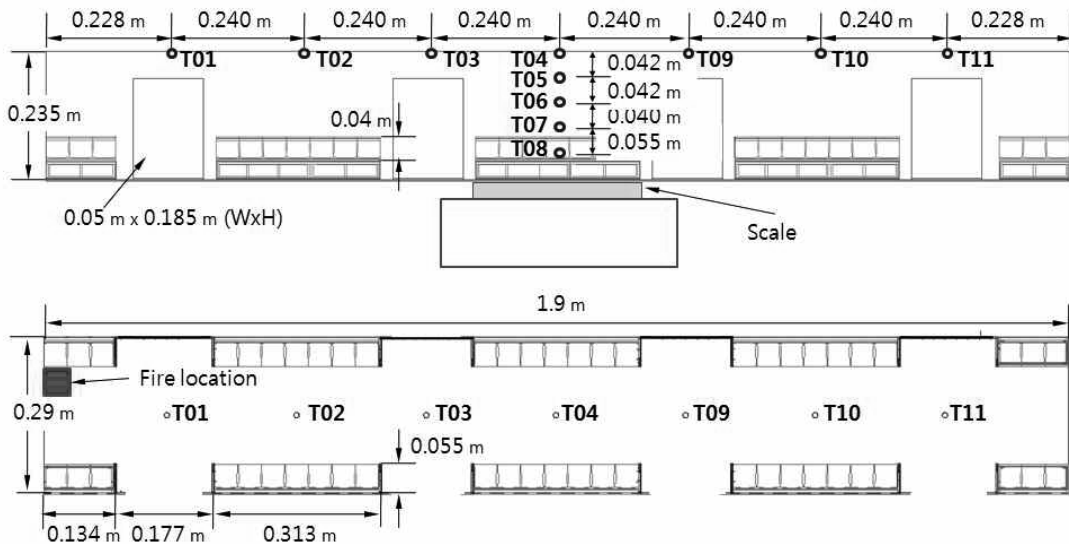


Fig. 2 Thermocouple arrangements and fire location

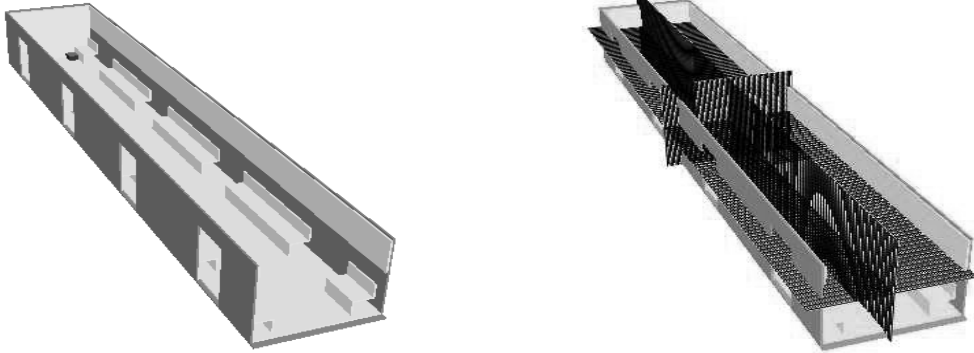


Fig. 3 Computational model

같은 지배방정식[7]을 사용한다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{W} \quad (4)$$

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nabla \tilde{p} - \tilde{\rho} \vec{g} = \vec{f} + \nabla \cdot \tau \quad (5)$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h_i \vec{u} = \frac{dp_0}{dt} + \dot{q}'' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i \rho h_i D_i \nabla Y_i - \nabla \cdot \vec{q}_r \quad (6)$$

$$p_0(t) = \rho TR \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad (7)$$

난류에 대한 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation)기법과 DNS(Direct Numerical Simulation)가 있고, 이 중 LES는 운동량 방정식을 아래 식[7]과 같이 나타낸다.

$$\frac{D \bar{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \bar{\tau}_{lam} - \bar{\tau}_{turb} \} \quad (8)$$

$$\bar{\tau}_{turb} = \bar{U}_i \bar{U}_j - \bar{U}_i \bar{U}_j \quad (9)$$

는 sub-grid scale(SGS) Reynolds stress이다.

$$\bar{\tau}_{turb} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \bar{\tau}_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (10)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

Table 1 Modeling conditions

	Plywood interior	Gypsum board
Temperature	20 °C	20 °C
Density	570 kg/m <sup>3</sup>	860 kg/m <sup>3</sup>
Specific Heat	1.3 kJ/kg · K	0.84 kJ/kg · K
Conductivity	0.172 W/mK	966.18 W/mK

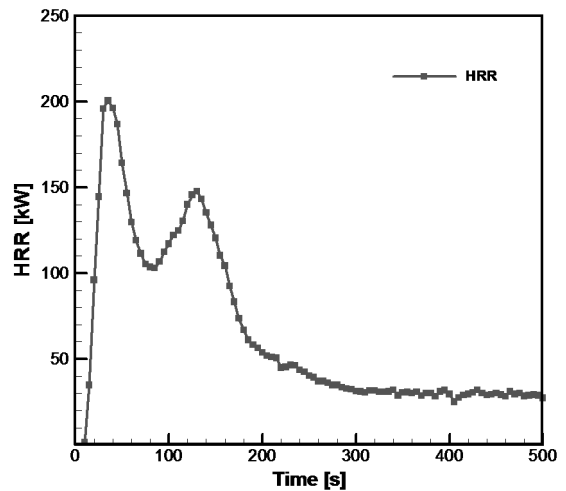


Fig. 4 Heat release rate of plywood species of 0.1 m x 0.1 m

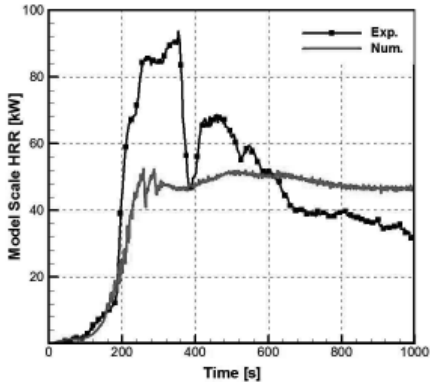


Fig. 5. Heat release rate comparison between experiment and FDS simulation

FDS에서는 Smagorinsky model를 사용하여 는 아래와 같이 모델링한다.

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \quad (12)$$

$$|\bar{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (13)$$

$$\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (14)$$

여기서, FDS default 조건인  $C_s = 0.2$  값으로 하였다.

### 2.2.1 해석모델

Fig. 3과 같이 화재시험에 사용된 축소모형 객차와 동일한 제원으로 격자수 138,600개의 해석모델을 설정하였다. 본 해석에서는 화재발생시 화원 주변의 내장재 표면온도가 350℃에 도달하면 해당 내장재에서 콘 칼로리미터로 측정된 발열량이 발생한다. Fig. 4는 콘 칼로리미터로 측정된 합판목 시편의 열방출율을 나타낸다. 또한 총 해석 시간은 1000초이며 그 외의 모델링 조건은 Table 1과 같다.

## 3. 결 과

Fig. 5는 실험과 FDS 해석 결과를 비교 분석한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 실험에서의 발열량은 약 100 kW까지 상승한다. 또한 급격하게 상승 후 발열량이 감소하고 다시 상승하는 목재화재의 특징인 double hump 현상이 보인다. 이것은 내장재의 표면 연소 후 발생하는 Char에 의해 연소를 지연시키는 효과를 나타내나 Char가 제거되면 다시 연소가 활발히 이루어져 다시 발열량이 상승하는 것으로 판단되며 이와 더불어 축소모형 객차 출입문을 통하는 환기가 직접적인

영향을 주는 것으로 사료된다.

FDS 해석에서는 열방출율이 실험과 유사하게 상승하나 실험값의 절반 가량 도달한 후 지속적으로 연소하는 것을 알 수 있다. 이것은 화재발생시 지하철 객차 출입문을 통하여 내부로 유입되는 공기의 양이 FDS에는 정확하게 모사가 이루어지지 않았기 때문에 실험값에 비해 낮게 나타난 것으로 판단된다.

따라서 고체 열분해를 고려한 해석 모델과 계산영역에 대한 적합성 등의 추가적인 연구가 필요하다.

## 후 기

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행중인 “철도종합 안전기술 개발사업” 중 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발” 과제로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

- [1] 1984, Peacock, R., Braun, E, "Fire tests of amtrak passenger rail vehicle interiors," *National Bureau of Standards Technical Note 1193*.
- [2] 1995, Studiengesellschaft Stahlanwendung e V., "Fires in transport tunnels: Report on full-scale tests," *EUREKA Project EU499 FIRETUN*, Düsseldorf, Germany.
- [3] 1994, K, R., Bukowski, R., Jones, W., Reneke, P., Babrauskas, V. and Brown, J., "Fire safety of passenger Trains," *NIST Technical Note 1406*.
- [4] 2007, Haukur, I., "Model scale railcar fire tests," *Fire Safety Journal*, Vol.42, pp.271-282.
- [5] 1996, ISO 9705, *Fire tests-Full-scale room test for surface products*.
- [6] 1998, Quantiere, J.G., *Principles of fire behavior*, New York, Delamer.
- [7] 1989, Quintiere, J.G., "Scaling Application in Fire Research," *Fire Safety Journal*, Vol.15 pp.3-29.
- [8] 1992, Drysdale, D., *An introduction to fire dynamics*, New York, Wiley.
- [9] 2008, Lei, Z., Nicholas, A., Dembsy, "Measurement uncertainty analysis for calorimetry apparatuses," *Wiley InterScience, Fire and Materials*, Vol.32, pp.1-16.
- [10] 2004, Jang, J.S., Noh, K.C., Oh, M.D., "Experiment on the relationship between the indoor CO2 concentration and local mean air age," *The society of air-conditioning and refrigerating engineers of KOREA*, Winter conference, pp.351-356.