

# 광폭 갱웨이 전동차량내 화재거동에 대한 수치해석적 연구

## A Simulation Study on Fire Behavior in The Wide Gangway Train

김치훈†                  이덕희\*                  김동운\*                  정우성\*                  박서현\*  
Chi-Hun Kim              Duck-Hee Lee              Dong-Woon Kim              Woo-Sung Jung              Seo-Hyun Park

---

### ABSTRACT

The wide gangway train have different indoor without the gate door to the most trains. in gangway train of structure without the section, heavy casualties are possible to occur by quite smoke movement in fire. in this study, fire behavior and smoke movement were analyzed as the locations and kinds of fire source by using FDS simulation tool. the model train size of 9 m × 2.4 m × 2.4 m was serially constructed of six cars.

---

## 1. 서론

사회기반시설이 빠르게 발전하고 변화하는 현대사회에서 인원과 자원을 효율적으로 운·수송하는 것은 현재의 경제성장에 큰 역할을 차지해왔다. 철도인프라는 국토를 만나질 생활권으로 만들 만큼 큰 변화를 가져 왔으며, 에너지 소비와 탄소배출 등의 친환경적 문제가 부각되면서 선진국 진입의 필수요소로 주목 받고 있다. 철도의 인프라가 모든 지역경제로 활성화됨에 따라 이용률도 크게 증가하였으나 화재와 같이 예상치 못한 안전대책의 미비로 많은 인명과 재산손실이 발생하고 있다. 따라서 철도 안전에 관한 많은 연구가 국내외적으로 이루어졌고 지금도 진행되고 있다.<sup>1</sup> 본 연구는 광폭 갱웨이 경량철도차량에 대하여, 화원의 규모와 위치를 변경하면서 수행한 화재해석 결과에 대한 고찰이다. 광폭 갱웨이식 철도차량은 일반차량과는 달리 차량과 차량 사이에 출입문이 없는, 즉 내부공간이 일체화된 구조의 전동차이다. 차량간의 구획이 없는 내부공간은 화재가 발생 경우 연기와 온도의 확산속도가 빨라 그에 따른 위험요소가 클 것이라 예상된다. 본 연구에서는 위험요소인 연기와 온도의 거동현상을 수치해석을 통해 분석해 보았다. 수치해석 기법으로는 FDS ver 5.4(Fire Dynamics Simulator, NIST) 상용코드를 이용하였다.

## 2. 본론

### 2.1 해석조건

본 연구에서의 해석 대상 모델은 길이 9.14 m × 넓이 2.4 m × 높이 2.4 m인 차량을 총 6량, 총 길이 59.76 m로 모델링하였다. 차량간 갱웨이는 넓이 1.2 m, 높이 2.1 m 이며, 외부로 통하는 출입문은 넓이 1.028 m, 높이 1.9 m 으로 구성하였다. 내부 구조는 그림1의 a와 같으며, 반자높이는 2.2 m 이다. 격자의 수는 953,600개로 그림 1과 같이 설정하였다. 해석시간은 300초로 설정되었으며, 한쪽 방향 출입문을 개방한 환기조건의 영향을 검토하기 위해 1, 2분의 시간 설정을 하였다. 창문의 경우 800 °C

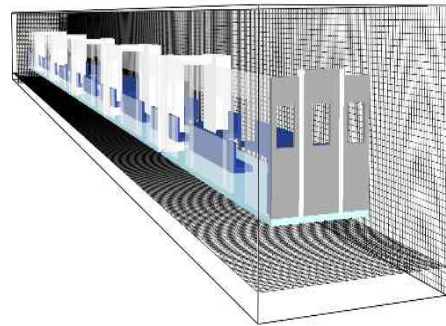
---

† 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경, 연구원  
E-mail : kch4234@krti.re.kr  
TEL : (031)460-5294 FAX : (031)460-5279  
\* 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실

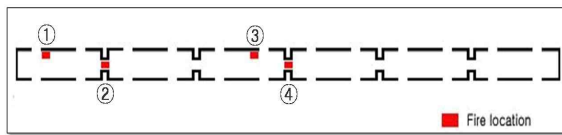
도달 시 개방하여 실제 화재현상에서의 환기조건 변화를 모사되도록 설정하였다. 연기층과 온도의 측정은 각 차량의 중앙 바닥면으로 부터 높이 1 m 에서 측정하였다. 객차내의 초기 온도는 20 ℃로 설정



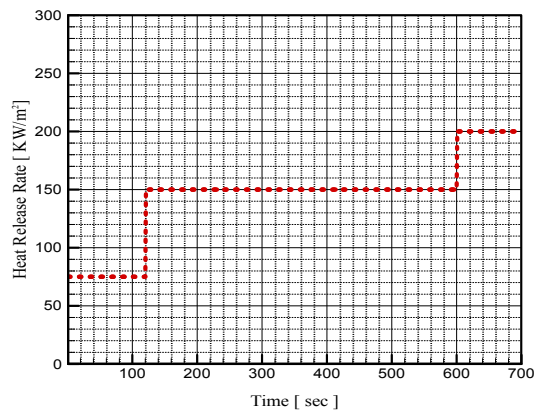
a. 차량 내부 모델링



b. 갱웨이 차량 해석 공간 설정



c. 화원의 위치



d. 표준화원

그림 2. 갱웨이 전동차량 내부와 화원

하였다.

## 2.2 화원설정 조건

다양한 화재발생 원인을 분석하기 위해 3가지의 화원으로 분류해 해석을 진행하였다. 화원의 위치는 그림 1의 c와 같이 설정하였다.

첫째, 가솔린 화원의 발열량은 도표 1의 물성치<sup>3</sup>를 바탕으로 식(1)과 (2)에 의해 계산되었다. 화원 면적은 0.5 m<sup>2</sup>로 발열량은 1092 kW/m<sup>2</sup>이며, 4리터 휘발유의 질량 감소율을 고려하여 연소시간을 약 100 초로 설정하였다.

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

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

둘째, 표준화원의 설정은 CEN/TS 45545-1 ANNEX A의 화원설정기준에 따라 75 kW의 화원이 120초 동안 지속되다 이후 150 kW로 성장되는 화원 시나리오이다. 화원 면적은 휘발유화원과 동일한 0.5 m<sup>2</sup> 이며 그림 1의 d와 같다.

셋째, 케이블 화재 화원은 전력, 통신케이블 등에서 발생 가능한 화재의 위험성을 분석하기 위해 그

표 1. 가솔린 연료의 물성치

· Fuel	Gasoline
· Mass Loss Rate ( $\dot{m}''$ )	50 ~ 60 g/m <sup>2</sup> ·s
· Specific Gravity	0.72~0.76
· Effective Heat of Combustion ( $\Delta H_c$ )	43.7 kJ/g
· Maximum Heat Release Rate per Unit Area ( $\dot{q}''$ )	2185 kW/m <sup>2</sup>



그림 3. 케이블 발열량 실험

림 2와 같이 ISO 5660<sup>4</sup> 실험을 통하여 전력 케이블의 발열량을 측정하였다. 실험결과 156kW/m<sup>2</sup>의 발열량이 측정되었으나 실제 차량의 배전반 내에 설치된 케이블 부피를 고려하여 그림 2의 그래프와 같이 측정값의 약 3배인 46 kW/m<sup>2</sup>의 최대 발열량을 적용하였다.<sup>5</sup>

### 2.3 수치해석의 이론

수치해석에서는 현재 화재해석분야에서 널리 사용되고 있는 NIST의 상용코드인 FDS ver 5.4를 사용하였으며, 이 코드는 아래와 같은 지배방정식을 사용한다.<sup>6</sup>

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

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

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

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

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

난류에 대한 계산방법은 LES(Large Eddy Simulation) 기법과 DNS(Direct Numerical Simulation)가 있으며, 이 중 LES는 운동량 방정식을 아래 식과 같이 나타낸다.<sup>6</sup>

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

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

는 sub-grid scale(SGS) Reynolds stress이다.

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

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

FDS에서는 Smagorinsky model를 사용하여 아래와 같이 모델링한다.

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

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

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

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

## 2.4 화재 시나리오 구성

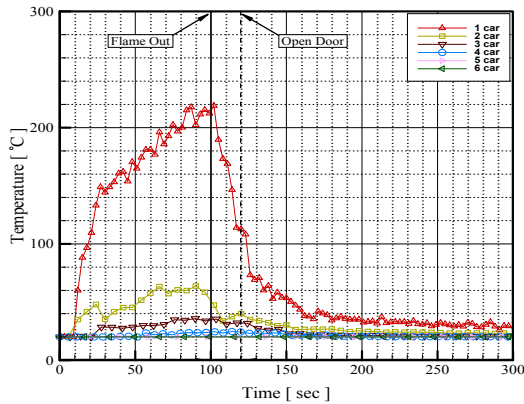
해석모델의 화재시나리오는 화원의 위치와 종류, 출입문 개방 조건 등 인명피해에 영향을 미치는 환경요소를 고려하여 분류하였다. 출입문의 개방은 기관사가 비상경보체계에 의해 화재가 발생한 차량을 선로 또는 승강장에 정착시키는 초동조치 시간을 고려한 것이다. 시나리오 분류는 도표 2와 같이 분류하였으며 한계거주도달시간으로 바닥면으로부터 높이 1m에 연층높이가 도달하는 시간을 분석하였다.

## 2.5 해석 결과

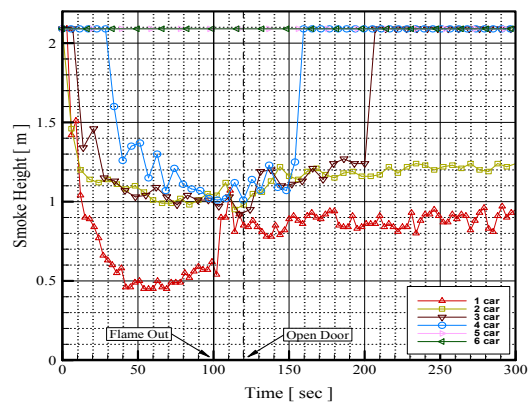
제한적인 공간구조를 가진 전동차량 내에서 인명피해에 가장 영향을 미치는 위험요소는 온도와 연기이다.<sup>7</sup> 본 연구에서는 화재발생 시 갱웨이식 전동차량에서의 화재거동현상을 분석하기 위해 각 차량의 중앙 바닥면으로부터 1 m 높이에서 온도와 연기의 특성을 분석하였다. 온도 도달시간은 시나리오C가 14~70초, D는 14~125초로 1번 차량에서만 1m에 도달하였다. 온도 보다 연기에 의한 한계거주도달시간이 빠르게 나타남으로 연기로 인한 위험성이 더 크다는 것을 알 수 있다. 시나리오 간의 분석에서는

표 3. 화재발생 시나리오

차 량	화원 위치	화원 종류	문 개방 (우측문)	화재해석 분류번호
선단차량	문 앞 의자	가솔린 4ℓ	1분후 개방	A
			2분후 개방	B
	연결 통로	가솔린 4ℓ	1분후 개방	C
			2분후 개방	D
		표준화원	1분후 개방	E
			2분후 개방	F
		전선 화재	1분후 개방	G
			2분후 개방	H
중간차량	문 앞 의자	가솔린 4ℓ	1분후 개방	I
			2분후 개방	J
	연결 통로	가솔린 4ℓ	1분후 개방	K
			2분후 개방	L
		표준화원	1분후 개방	M



b. 온도 변화



b. 연기층 하강 높이의 변화

그림 4. 시나리오 D의 온도와 연기변화

C, D의 경우 연기층이 불과 8초 만에 도달하여 가장 연기 확산이 빠른 시나리오로 나타났다.

화원의 종류에서는 표 3의 D, E, F를 보아 가솔린 4리터의 연기확산속도가 가장 빠르게 나타났다. 동일화원규모에서는 연결통로에 위치한 경우의 연기확산이 빠르게 나타나는 것을 볼 수 있다. 특히 1번 차량과 2번 차량의 연결통로에서 화재가 발생한 경우에는 승객이 인근 차량으로 피난하는 것이 불가능함으로 1번 차량에 연기의 유입을 지연시킬 수 있는 대안이 필요할 것으로 보인다. 그림 3의 b와 같이 출입문의 개방과 함께 연기층의 높이가 올라감에 따라 화재발생 시 초기대응이 얼마나 중요한지를 보여주고 있다.

### 3. 결론

본 연구는 광폭 갱웨이 경량철도차량에 대하여 화원의 규모와 위치를 변경하여 화재해석 결과에 대해 고찰한 것이다. 표 3의 결과 데이터에 의해 연기의 확산속도가 가장 빠른 화원은 가솔린4리터, 시나리오는 C와 D이다. 동일화원규모에서는 연결통로에서 가장 빠른 것으로 나타났다.

### 감사의 글

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

표 4. 1m 높이에 연층이 도달한 시간

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1car	·	114 ~141	8 ~300	8 ~300	20 ~76	15 ~145	22 ~67	19 ~129	56 ~83	44 ~136	34 ~81	35 ~137	·
2car	25 ~44	·	9.3 ~62	9 ~128	31 ~63	28.2 ~124	50 ~63	49 ~122	21 ~36	·	16 ~61	17 ~137	48 ~67
3car	44 ~66	48 ~124	18 ~63	21.6 ~125	·	103 ~120	·	80 ~125	·	·	7 ~61	7 ~158	18 ~62
4car	·	·	50 ~67	51 ~125	·	·	·	·	·	·	11 ~61	9 ~123	26 ~64
5car	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	56 ~60	59.4 ~122	·
6car	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	54 ~68	53 ~140	·

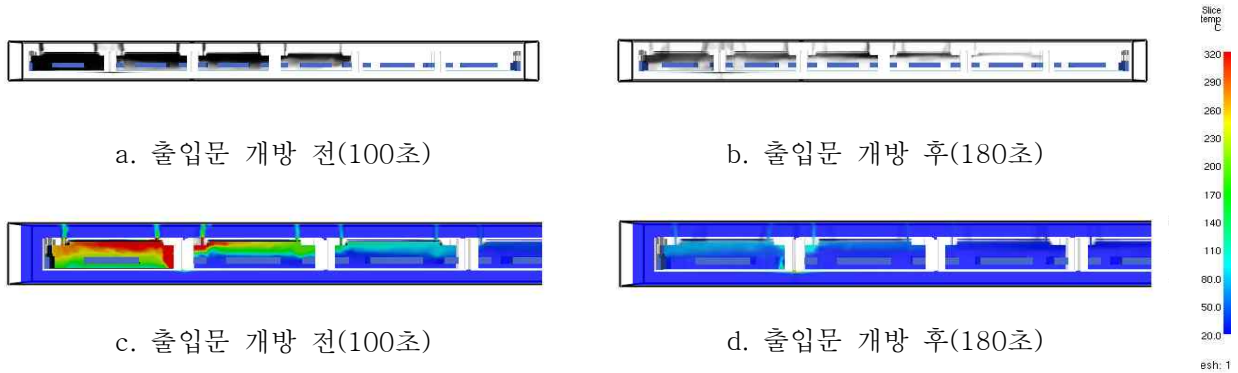


그림 5. 시나리오 D의 연기와 온도 분포 시뮬레이션

### 참고문헌

1. Peacock R., Braun E, "Fire tests of amtrak passenger rail vehicle interiors," National Bureau of Standards Technical Note 1193, 1984
2. Studiengesellschaft Stahlanwendung e V., "Fires in transport tunnels: Report on full-scale tests," EUREKA Project EU499 FIRETUN, Düsseldorf, Germany, 1995
3. V Babrauskas, Ph.D, "Ignition Handbook of SFPE", 2003
4. ISO 5660-1, Reaction to fire test—Heat release, smoke production and mass loss rate—Part 1 : Heat release rate(Cone calorimeter method), 2003
5. Stephen J Grayson, "Fire Performance of Electric Cables", 2000
6. Quintiere, J. G., "Scaling Application in Fire Research, " Fire Safety Journal, Vol.15 p.3-29, 1989
7. V. Babrauskas, R. G. Gann, B. C. Levin, M. Pabo, R. H. Harris, R. D. Peacock, and S. Yasa , "A methodology for obtaining and using toxic potency data for fire hazard analysis", Fire Safety Journal **31**, 345-358, 1998
8. Quantiere J. G., Principles of fire behavior, New York, Delamer, 1998.