

FDS를 이용한 경량철도 지하역사의 피난허용시간 연구

김치훈 · 이덕희 · 정우성

한국철도기술연구원

A Study on ASET(available safe egress time) for Subway Station of Light Weight Railcar Using FDS

Kim, Chi Hun · Lee, Duck Hee · Jung, Woo Sung

KRRI

요 약

본 연구에서는 무인운영이 예정되어 있는 경량철도 지하역사 화재 시 안전대책을 강구하기 위하여 다양한 시나리오의 화재상황을 모사하여 FDS 사용코드를 이용해 화재유동현상을 분석하였다. 해석경계조건은 전동차 내부공간을 포함한 지하 3개 층과 설계에 반영된 환기설비를 적용하였으며, 약 500만 개의 격자를 34개 블록으로 나누어 계산하였다. 비상탈출 동선을 파악하여 주요 위치에서 피난경로상의 각 층 바닥으로 부터 1 m 높이의 한계온도와 연기층의 도달시간을 시나리오 별로 분석하여 보았다.

Keyword : FDS(Fire Dynamics Simulation); ASET(Available Safe Egress Time)

1. 서 론

경량전철시스템은 중전철에 비해 소량으로 1편성이 구성되고 무인운전과 자동운전이 가능 하도록 설계, 개발 되어진 운송시스템 차량이다. 본 연구는 전체 시스템 중 전동차량과 역사구조를 연계한 시스템에서 화재가 발생했을 때 연기층과 온도의 도달시간을 기준으로 시범 분석하였다. 경량전철차량은 내부공간과 환경의 이점을 극대화 하기 위해 차량간의 구획이 없는 광폭개웨이식 내부구조를 가지고 있다. 그러나 광폭개웨이식 내부구조는 화재의 연기확산과 온도의 전파가 빠르게 진행된다는 것을 알 수 있다(김치훈, 2010) 이러한 사실을 바탕으로 역사 내 차량화재를 가정하여 피난동선에 대해 각 층의 연기층과 온도 도달시간을 수치해석 기법인 FDS ver 5.4(Fire Dynamics Simulator, NIST) 상용코드를 이용하여 피난허용시간을 분석하였다. 여기서 얻어진 분석방법은 경량전철시스템에 대한 안전성 관리를 위한 목적으로써 활용될 수 있으며, 이를 통하여 무인자동운전 시스템의 안전성에 대한 개선을 도모하고 신뢰를 확립하고자 한다.

2. 본 론

2.1 모델링 및 수치해석 조건

본 연구의 수치해석 대상 모델역사는 외부로 나가는 지하1층에 위치한 계단의 깊이가 10.89 m 이다. 그림 1과 같이 승강장을 포함한 3개 층의 지하구조로 승강장의 깊이가 65 m로 일반전동차 보다 작은 승강장을 적용하고 있다. 모델링의 각 층은 화재발생에 의한 연기의 빠른 확산을 방지하기 위하여 각 층과 층 그리고 해당 층의 면적에 의해 계획설계된 제연벽(천정부: 0.6m)을 모사하였다. 약 4,526,000개의 격자로 모델링 되었으며, 병렬처리계산을 하기 위해 34개의 Multi mesh로 나누어 모델링하였다. 각 격자의 크기는 0.2 m로 하였으며 승강장 설계상의 스크린 도어를 가정하여 터널풍의 영향은 없는 것으로 설정하였다. 도면을 분석 과정을 거쳐 각 층의 제연/환기구를 설계된 제연용량을 설정하였다.

2.2 화원설정 조건

다양한 화원 시나리오를 적용하기 위해 그림 3, 4와 같이 1.5 MW 와 10 MW, 두 가지 화원 모델을 적용하였다

첫째, 그림 3의 발열량은 경량철도차량만을 대상으로 한 수치해석 데이터를 적용하였다(김치훈, 2010). 표 1의 물성치(Quantiere J. G, 1998)를 바탕으로 식(1)과 (2)에 의해 계산되었으며, 4리터 휘발유의 질량 감소율을 해석에 적용하여 얻어진 경량철도차량의 발열량 결과 데이터이다.

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

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

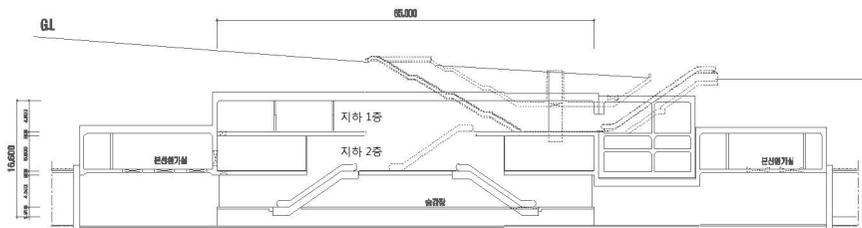


그림 1. 서동역사 종단면도

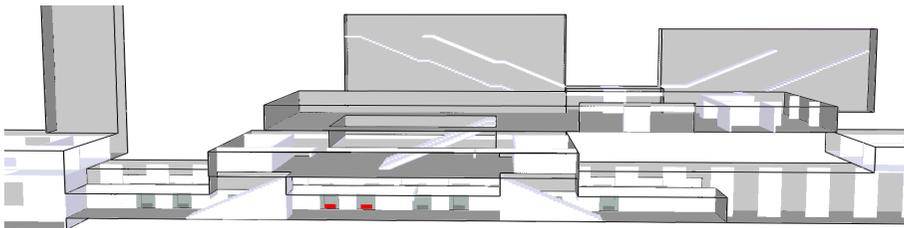


그림 2. 서동역사 모델링

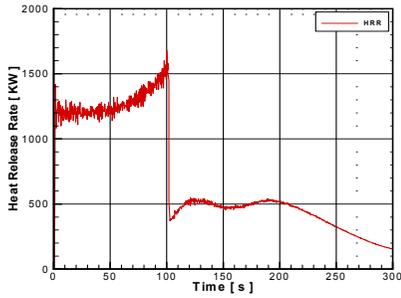


그림 3. 경량철도차량 가솔린 4리터 화원

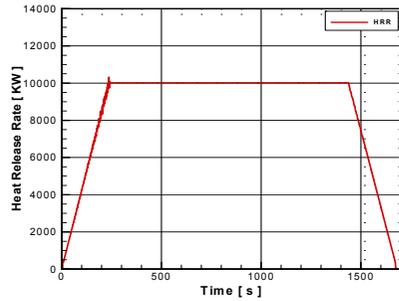


그림 4. 10 MW 화원

표 1. 가솔린 연료의 물성치

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

둘째, 최대화원 규모로 설정된 그림 4의 화원은 철도시설 안전세부기준 2장 제 7조 2항 (건설교통부고시 제 2006-395호)에 의하면 철도터널에서의 화원 규모를 10 MW로 규정하고 있다. 따라서 본 연구에서도 동일하게 적용하였으며 화재성장은 Ultrafast로 가정 하였다. 화원의 위치는 차량의 선단과 중앙으로 분류 하였다.

2.3 지배방정식 및 수치해석

수치해석에서는 현재 화재해석분야에서 널리 사용되고 있는 NIST의 상용코드인 FDS ver 5.4(USA, NIST)를 사용하였으며, 아래와 같은 지배방정식(Quintiere, J. G,1989)을 사용한다.

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

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

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h_i \vec{u} = \frac{d p_0}{dt} + \dot{q}'' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i \rho h_i D_i \nabla Y_i - \nabla \cdot \vec{q}_r \quad (6)$$

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

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

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

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

는 sub-grid scale(SGS) Reynolds stress이다.

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

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

FDS에서는 Smagorinsky model를 사용하여 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.

2.4 시나리오 구성

시나리오는 화원의 위치와 제연팬의 작동 유무 등 피난허용시간에 영향을 미치는 환경 요소를 고려하여 분류하였다. 시나리오 분류는 표 2과 같이 분류 하였으며 피난동선을 따라 각 층의 바닥면으로 부터 높이 1 m에서 연기층과 온도가 도달하는 시간을 분석하였다. 각 동선에 따른 측정지점은 그림 5 ~7과 같다.

표 2. 화재시나리오

정차위치	화원위치	화원종류	제연팬가동	시나리오
승강장	차량선단	10MW	성공	A
			실패	B
		1.5MW	성공	C
			실패	D
	차량중앙	10MW	성공	E
			실패	F
		1.5MW	성공	G
			실패	H

2.5 모델해석 결과

표 3은 각 층의 바닥면에서 1m 높이의 천정부 연기층이 도달한 시간을 나타내며 a~m 은 그림 5~7의 각 층 측정위치를 의미한다. 모든 시나리오의 연기층과 온도의 도달시간을 비교 분석한 결과 연기층은 각 층에 다양한 분포와 도달시간을 보여주는 반면 온도의 위험요소는 그림 8과 9에서 확인할 수 있듯이 화원에서 가까운 계단만 80~100℃ 정도의 온도를 나타내며 지하 2층에서는 그림. 9와 같이 30~40℃로 온도차가 크게 나타나지 않았다. 그리하여 대상모델의 화재위험성 인자를 연기층의 도달시간을 기준으로 피난허용시간을 분석하여 보았다. 연기층의 도달시간을 비교한 결과, 지하 2층의 h, i 경우 그림 1과 같이 지하 1층과 Open공간으로 이루어져 연기의 확산이 이루어지지 않았다. 맞은편 승강장 또한 스크린도어에 의해 연기 확산이 이루어 지지 않았다. 차량의 선단과 중앙화원의 위치에 따른 영향은 지하2층과 1층의 연기확산 시간을 비교한 결과 큰 영향이 없는 것으로 나타났다. 1.5 MW 화원의 경우 제연팬을 동작 유무에 따라 연기확산 따른 피난허용시간에 크게 영향을 미치는 것으로 나타났으나, 10 MW 화원의 연기확산은 큰 지연효과를 나타내지 못 하는 것으로 분석된다. 지하 1, 2층을 연결하는 Open공간을 통해 가장 가까운 j, l 출구가 연기층의 이동결로인 것을 확인할 수 있었다. 출구 3, 4의 k와 m의 연기층 높이는 약 1.2~1.5 m로 계산되었다. 도시철도 정거장 및 환승편의시설 보완설계지침(도시철도 정거장 및 환승편의시설 보완설계지침, 2009) 승객이 4분(240초) 내에 승강장에서 벗어나고, 6분 이내에 연기나 유독가스로부터 안전한 외부출입구를 벗어나도록 하는 대피를 규정하고 있다. 시나리오 B-계단2와 C-계단1, E-계단2의 연층도달시간이 155 sec와 15 sec, 178 sec로 승강장 피난에 영향을 미치게 됨으로 피난시간에 고려해야 할 것으로 판단된다. 외부출입구피난 또한 지하 1

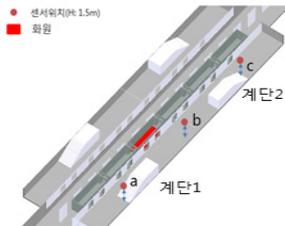


그림 5. 승강장

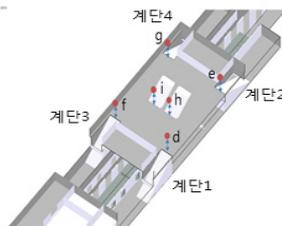


그림 6. 지하 2층

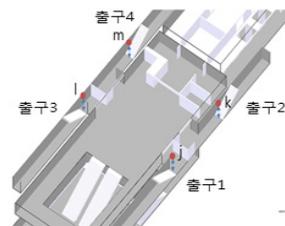


그림 7. 지하 1층

표 3. 연기층 도달시간(단위: sec)

측정 위치	승강장			지하 2층				지하 1층				
	a	b	c	d	e	f	g	j	k	l	m	
	계단1	중앙	계단2	계단1	계단2	계단3	계단4	출구1	출구2	출구3	출구4	
시 나 리 오	A	·	101	432	68	110	129	357	310	·	287	·
	B	·	·	155	53	80	125	169	199	·	150	·
	C	15	68	·	58	109	·	·	·	·	-	·
	D	·	·	·	37	58	73	143	189	·	133	·
	E	508	·	178	75	133	163	213	300	526	273	·
	F	·	·	408	112	98	176	242	·	·	·	·
	G	·	·	242	·	129	·	·	·	·	·	·
	H	·	·	365	83	61	·	·	357	·	350	·

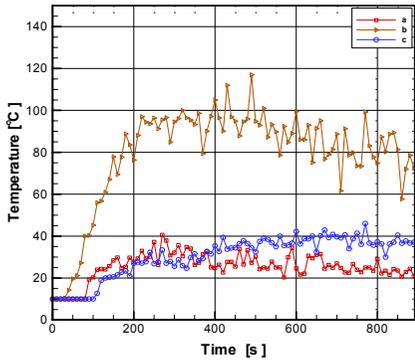


그림 8. 승강장(scenario B)

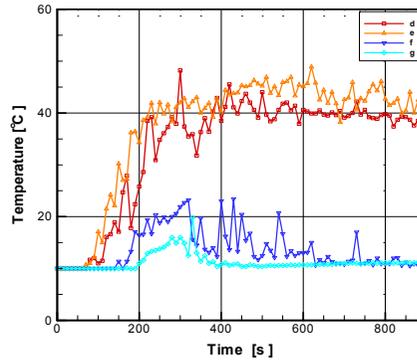


그림 9. 지하 2층(scenario B)

층의 경우 출구1과 3이 모든 시나리오에서 6분(360초) 이내에 도달하여 피난활동에 영향을 미칠 것으로 판단된다.

3. 결론

본 연구는 경량전철 시스템의 안전성에 대한 개선과 확립을 위해 차량과 역사를 연계하여 피난허용시간 대해 다양한 시나리오를 수치해석으로 분석하였다. 차량의 선단에서 발생한 연기확산이 중앙차량 보다 지하 2층으로 더욱 빠르게 확산되었다. 제연팬 동작 유무에 따른 지연효과는 1.5MW 화원인 C-D, G-H에서 확산이 지연되는 효과를 보였으나 대화원(10MW)에서는 큰 영향을 미치지 못하였다. B와 C, E 시나리오의 경우 승강장 피난규정(4분)에 영향을 미치며, A~H시나리오의 경우 외부출입구를 벗어나는 규정(6분)에 모두 영향을 미치는 것으로 나타났다. 이러한 분석 결과에 따라, 제연 및 환기 성능 개선과 제연벽 길이와 배치에 대한 추가적인 연구가 요구된다.

감사의 글

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

참고문헌

1. 김치훈, 이덕희, 김동운, 정우성, 박서현(2010) “광폭 갱웨이 철도차량내 화재거동에 대한 수치해석적 연구”, 2010 한국철도학회 춘계학술대회
2. Quantiere J. G.(1998.), Principles of fire behavior, New York, Delamer,
3. 철도시설안전기준에 관한 규칙 제4조, 철도시설안전세부기준(2006)
4. Quintiere, J. G.(1989), "Scaling Application in Fire Research, " Fire Safety Journal, Vol.15 p.3-29.
5. 도시철도 정거장 및 환승편의시설 보완설계지침 3장, (2009)