



## 대심도 지하역사에서 화원 위치에 따른 연기거동 특징 연구

김 학 범,<sup>\*1</sup> 장 용 준,<sup>1</sup> 이 창 현,<sup>2</sup> 정 우 성<sup>2</sup>

### THE STUDY ON THE CHARACTERISTICS OF FIRE DRIVEN SMOKE-FLOW FOR DIFFERENT FIRE-LOCATION IN DEEPLY UNDERGROUND SUBWAY STATION

H.B. Kim,<sup>\*1</sup> Y.J. Jang,<sup>1</sup> C.H. Lee,<sup>2</sup> and W.S. Jung<sup>2</sup>

본 연구에서는 대심도 지하역사에서 화원 위치에 따른 연기거동의 특징을 분석하였다. 전산수치해석에 FDS code가 사용되었다. 화재에 의한 유체거동을 모사하기 위하여 난류모델은 LES를 사용하였으며, 빠른 계산을 수행하기 위하여 병렬수치해석기법을 사용하였다. 본 연구를 통하여 대심도 역사에서 화재시 피난을 저해하는 화원의 위치에 대하여 검토하였다.

*In this study, Numerical simulations were performed to analyze the characteristics of fire driven smoke flow for different location of fire source in the deeply underground subway station with using FDS code. The fire driven smoke-flow which was simulated by using Parallel Computational Method for fast calculation and LES for turbulence model. In this research, the fire location to obstruct a suitable egress from the fire disaster were discussed*

**Key Words :** 대심도 지하역사(DUSS : Deeply Underground Subway Station), LES 난류모델(LES turbulence model), 연기거동(Fire driven smoke-flow), 화원위치(Fire location)

### 1. 서 론

수도권 일대에 지하철 역사 중에는 각 호선의 겹침 및 환승 또는 지형적인 원인으로 인하여 심도 40m이상의 대심도 지하역사가 있다[Table 1]. 이러한 대심도 지하역사는 승강장에서 지상까지의 경로가 매우 길기 때문에 화재 발생시 피난의 어려움이 예상된다. 또한 지하공간의 특성상 화재시 시야 확보가 쉽지 않다. 더욱이 지하철은 대중교통이므로 많은 승객이 이용한다. 따라서 대심도 지하역사에 화재관련 방재시설이 충분히 설치되지 않으면 화재에 많은 인명피해가 예상된다. 이에 따라 대심도 지하역사에서 화재가 발생하면 피해를 최소화 하기 위하여 화재에 의한 열, 연기 거동 특징을 분석하여야 하며, 분석된 내용을 토대로 제반 시설이 설치되어야 한다. 그러나 운영중인 지하철 승강장에서 실화재와 동일한

화재 실험을 수행하기는 쉽지 않다.

그러므로 지하승강장에서 제한된 조건하에서 연기발생기와 열풍기를 이용하여 화재시 연기거동을 구현하여 검토한 사례가[1] 있지만, 현실적으로 실험실험대신 전산해석에 의한 화재연구를 하고 있다. 이러한 전산수치해석 분야에서도 대심도 지하역사의 경우와 같이 형상이 클 경우, 모델링시 격자규모도 커지게 된다. 따라서 대심도 지하역사의 화재해석은 과도한 계산량으로 많은 시간과 컴퓨터 자원을 요구한다. 최근에는 이러한 문제를 극복하기 위하여 리눅스 클러스터 컴퓨터 및 병렬처리기법을 적용하여 대규모 모델에 대하여 빠른 화재해석이 가능함을 보이고, 이를 통하여 열 및 연기거동을 분석한 연구가 발표 되었다[2]. 이 외에도 이러한 전산해석기법을 적용하여 플랫폼 스크린 도어가 설치되었을 때 화재시 열, 연기거동에 주는 영향을 검토하거나[3] 승강장 및 대합실의 급기/배기시스템 가동시 연기거동의 특징을 연구하였다[4]. 본 연구에서도 빠른 계산을 위하여 병렬처리기법을 적용하였으며 대심도 지하역사에서 화재의 위치에 따라 열 연기거동을 분석하여 피난을 저해하는 화재위치를 검토하고 대심도 지하역사 승강장 운영을 위한 적절한 방재요건을 제공하고자 한다.

1 정회원, 한국철도기술연구원, 철도환경연구실

2 한국철도기술연구원, 철도환경연구실

\* Corresponding author, E-mail: kimhb31@krii.re.kr



## 2. 본 론

### 2.1 지배방정식 및 난류모델

해석에는 화재전용 code인 FDS(USA, NIST개발)가 사용되었다. FDS code 에서는 Low Mach Number Navier-Stokes를 지배방정식으로 사용하며, 다음과 같이 표현된다[8].

Conservation of Mass

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{u} = 0 \quad (1)$$

Conservation of Species

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot \rho Y_i \vec{u} = \nabla \cdot \rho D_i \nabla Y_i + \dot{W} \quad (2)$$

Conservation of Momentum

$$\rho \frac{\partial \vec{u}}{\partial t} + (\vec{u} \cdot \nabla) \vec{u} + \nabla \tilde{p} - \tilde{\rho} \vec{g} = \vec{f} + \nabla \cdot \tau \quad (3)$$

Conservation of Energy

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho h) + \nabla \cdot \rho h_i \vec{u} = \\ \frac{dp_0}{dt} + \dot{q}'' + \nabla \cdot k \nabla T + \nabla \cdot \sum_i \rho h_i D_i \nabla Y_i - \nabla \cdot \vec{q}_r \end{aligned} \quad (4)$$

Conservation of State

$$p_0(t) = \rho TR \sum_i \frac{Y_i}{M_i} \quad (5)$$

FDS code에서는 난류에 대한 계산방법이 LES기법과 DNS 등이 있다. LES는 운동량 방정식을 필터링(filtering)하여 얻었으며, 식은 다음과 같다[8].

Table 1 The deepest underground stations in the Seoul Metro & SMRT

호선	역사	심도	관할기관
1	중로 3가역	13m	서울메트로 (Seoul Metro)
2	이대역	36m	
3	충무로역	28m	
4	회현역	23m	
5	신금호역	44m	서울 도시철도공사 (SMRT)
6	버티고개역	43m	
7	송실대입구역	47m	
8	산성역	56m	

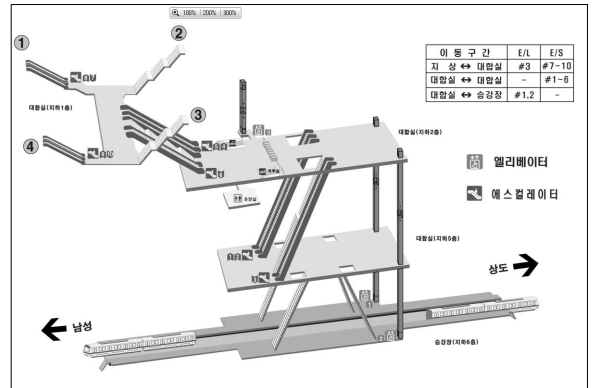


Fig. 1 The Guide map of Soongsil Univ. Station

$$\frac{D\bar{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \{ \bar{\tau}_{lam} - \bar{\tau}_{turb} \} \quad (6)$$

$$\bar{\tau}_{turb} = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j \quad (7)$$

여기서  $\bar{\tau}_{turb}$ 는 sub-grid scale(SGS) Reynolds stress이다.

$$\bar{\tau}_{turb} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \quad (8)$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (9)$$

여기서  $\nu_t$ 는 모델링이 되어야 하는데 FDS에서는 다음과 같은 범용적인 Smagorinsky model[8]를 사용하고 있다.

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \quad (10)$$

여기서,

$$|\bar{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (11)$$

$$\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (12)$$

그리고  $C_s = 0.2$  (FDS default 조건)을 사용하였다.

### 2.2 모델링 및 수치해석 조건

본 연구에서 전산수치해석 모델은 송실대 역사이다(Fig. 1). 모델링의 형상 크기는 폭 23.5m 길이 365m 깊이 47m이다.

모델링시 격자의 크기는 화원의 거동이 표현될 수 있는 적

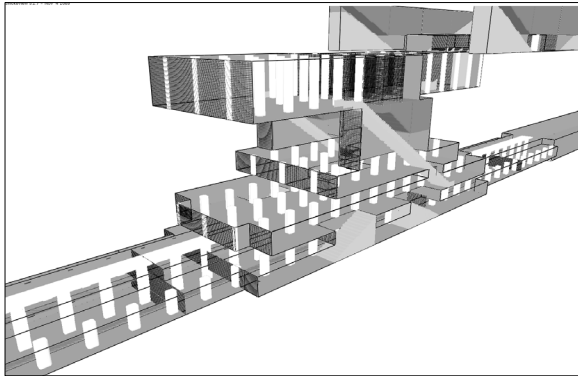


Fig. 2 A FDS model : Grid generation

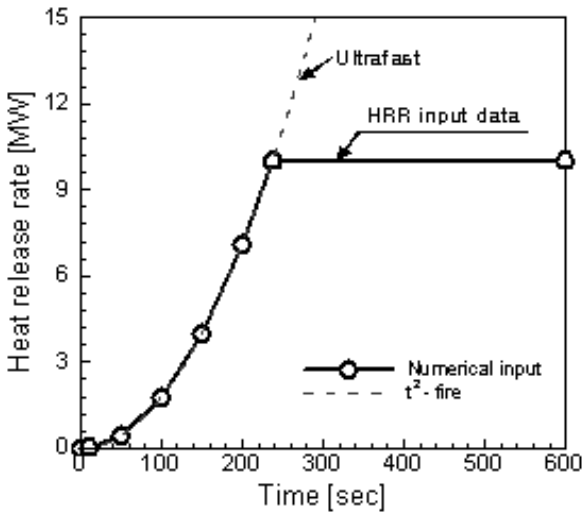


Fig. 3 Ultra fast mode for fire

절한 크기이어야 한다. 본 연구에서는 식 (13)의  $D^*$ 에 비하여 격자크기를 1/10배 이하로 설정하였다. Table 2는 식 (13)에 해당하는 입력변수 값이다. 계산결과 근거로 사용된 격자의 크기는 0.2m보다 작게 하였다. 병렬처리방법을 위하여 41개의 Multi mesh로 모델링하였다. 본 해석에 사용된 총 격자수는

Table 2 Input data for a suitable grid size

항목	단위	값
온도	K	283.15K
밀도	kg/m <sup>3</sup>	1.1934
비열	kJ/kg · K	1.007
중력가속도	m/s <sup>2</sup>	9.81
HRR	kW	10,000

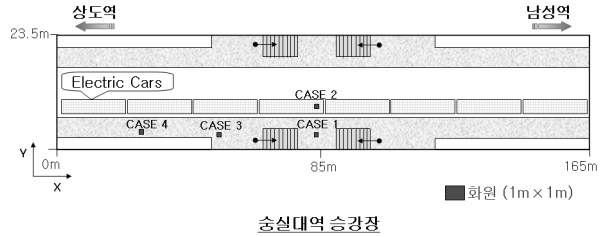


Fig. 4 Fire locations for case-studying

10,369,526개이다(Fig. 2).

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_0 T_0 C_{p0} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \quad (13)$$

대기의 조건은 대기압의 10℃로 정의하였다. 이는 대구 지하철 화재가 발생한 시기(2003. 2. 18)를 근거로 하여 설정하였다. 최대 화원의 규모는 철도시설 안전세부기준(건설교통부 고시 제2006-395호) 2장 제7조 2항[6]에 의하면 철도터널에서의 화재시나리오는 10MW이상으로 규정하였다 따라서 본 연구에서도 동일하게 적용하였다 화재 성장은 Ultrafast로 가정하였다(Fig. 3).

선로부 양끝단 및 계단으로 통한 외부는 모두 대기압 조건으로 하였다. 선로부 끝단에서의 지하터널풍은 배제하였다. 이는 화원의 위치만을 변수로 하기 위함이다 연구에서 설정된 화원의 위치를 Fig. 4에서 적색 사각형으로 나타내었다. 총 4개이며, 각 각에 대한 내용을 Table 3에 정리하였다.

CASE 1, CASE 3, CASE 4는 승강장내에 전동차가 없는 경우이며, CASE 2는 전동차에서 화재가 발생한 경우이다 전동차의 화재는 전동차 전체가 전소되는 것보다는 전동차내부에서 화재가 발생된 경우로 한정하였다. 이는 객차에서 빠져나온 연기 및 고온의 열기류의 거동을 파악하기 위함이다

모든 경우에 대하여 화재 발생후 500초까지 계산을 수행하였다.

### 3. 전산수치해석 결과

본 해석에서는 HRR이 Ultrafast 성장 시나리오를 따르므로

Table 3 The case for numerical experiment

	CASE 1	CASE 2	CASE 3	CASE 4
화원위치	승강장 중앙위	승강장 중앙 상당 전동차안	승강장 계단 근처	계단에서 떨어진 승강장위
전동차	없음	있음	없음	있음



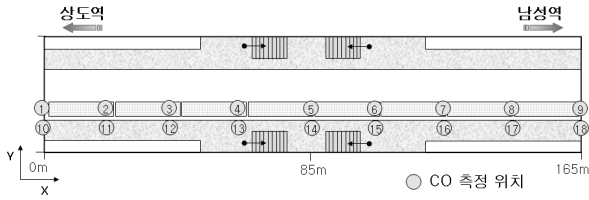


Fig. 7 CO measurement points

에서는 선로부 터널 끝단까지 확산되었음을 알 수 있다 Fig. 6은 CASE 4를 제외한 CASE 1-3 까지 역사 Y=14m 단면에서의 온도 분포를 비교한 것이다. CASE 3은 화원이 상도역 방향에 있기 때문에 승강장 상부에도 동일한 방향으로 온도분포를 보이고 있다. 대합실 내부는 CASE 3의 경우 고온의 기류가 넓게 분포되고 있음을 알 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6에서 연기와 온도확산 패턴이 유사함을 알 수 있다. Fig. 7은 승강장 6층의 CO 측정 포인트를 나타낸다. 각 측정위치는 천정 하단이다. 따라서 1~ 9번은 선로부 바닥을 기준으로 Z=6.18m(Y=14.2m) 이고, 10~ 18 측정점들의 높이는 승강장의 높이에 제한을 받으므로 Z=4.32m(Y=17.5m)이다. Fig. 8은 Fig. 7에 해당하는 위치에 따라 CO 농도의 변화량을 시간에 따라 나타낸 것이다.

Fig. 8에서 보면 CASE 1과 CASE 4의 CO농도가 상대적으로 높다. 이러한 결과는 CASE 2와 CASE 3 경우 CO가 대합실로 유출되었음을 판단할 수 있다. CASE 1과 CASE 2를 비교하여 보았을 때 CASE 1의 CO농도 최대치는 선로부나 승강장 부가 유사하지만 CASE 2의 경우 선로부가 높게 나타난다. 이 역시 승강장으로 유입된 CO가 대합실로 유출된 것으로 판단된다. CASE 3과 CASE 4의 경우 화재가 발생한 승강장 위치에서 최대 CO 농도값을 보이고 있다.

각 CASE의 CO농도가 최대값이 나타난 위치와 화재가 발생한 위치가 전반적으로 일치한다. 다만, CASE 1의 경우 화재 초기에는 발생한 위치와 동일한 곳이 최대값이나 시간이 지나면서 점차 선로부 천정의 CO농도가 높게 유지됨을 알 수 있다. 이는 선로부 높이 방향의 형상이 높기 때문에 고온의 CO가 유입되면 천정에서 장시간 유지되는 것으로 판단된다

#### 4. 결 론

대심도 역사에서 화원의 위치에 따른 해석을 수행하였다. 각 위치는 승강장 중앙, 승강장 중앙에 해당하는 전동차 안 계단 근처, 계단의 원거리 이다. 본 해석을 통하여 전동차 안에서 화재가 발생한 경우 승강장 중앙에 화재가 발생한 경우보다 대합실로 연기의 확산이 상대적으로 빠른 것을 확인할 수 있었으며, 이는 중앙의 계단 벽이 상대적으로 연기 확산을

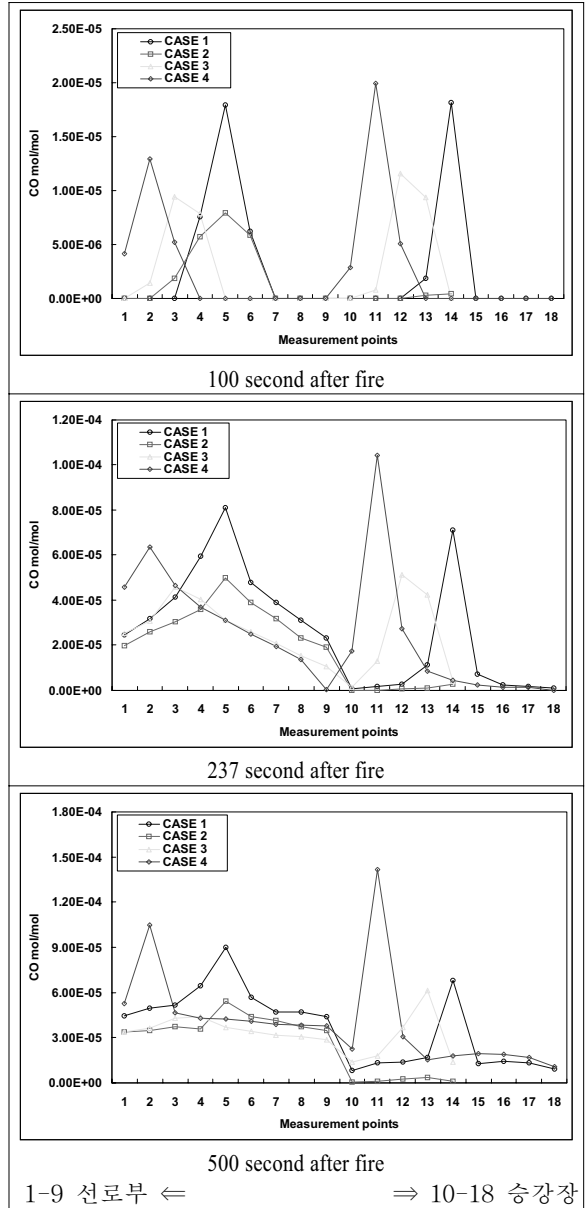


Fig. 8 Transient CO concentration along to the points

차단 한 것으로 판단된다. 계단 근처의 화재는 연기 및 CO가 대합실로 빠른 확산이 됨을 알 수 있다. 따라서 계단 근처의 화재 발생시 대합실로의 피난이 쉽지 않을 것으로 판단된다.

또한 계단 근처에는 화재 원인이 될 수 있는 시설을 설치하지 말아야 할 것으로 판단된다. CASE 1과 CASE 2와 같이 중앙에서 화재가 발생한 경우 대칭적인 확산을, X 방향으로 한쪽으로 치우친 CASE 3 과 CASE 4의 경우, 화재가 발생한 방향으로 선로부 터널에서 연기가 빠른 확산이 됨을 알 수



있었다. 따라서 선로부 터널 방향으로의 피난시에는 위해서는 화재 위치에 따른 구간별 제연배연이 요구된다.

## 후 기

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

## 참고문헌

- [1] 2007, 박원희, 김동현, 장용준, “지하역사에서의 화재연기 거동 실험,” *한국철도학회논문집*, 제10권, 제1호, pp.67-73.
- [2] 2008, 장용준, 김학범, 이창현, 정우성, “대심도 지하역사에서의 화재현상 연구,” *한국철도학회 춘계학술대회*, p.302.
- [3] 2008, 장용준, 김학범, 이창현, 정우성, “대심도 지하역사에서의 화재시 플랫폼 스크린 도어에 의한 열 연기거동 영향 분석,” *대한기계학회 추계학술대회*, pp.1984-1989.
- [4] 2008, 장용준, 김학범, 이창현, 정우성, “대심도 지하역사에서의 화재시 급배기 동작유무에 따른 열 연기 거동 분석,” *한국철도학회 추계학술대회*, pp.66-72.
- [5] 2004, “도시철도 규칙,” *건설교통부령 제412호*, 12월 개정.
- [6] 2005, “철도시설 안전기준에 관한 규칙,” *건설교통부령 제476호* 10월27일.
- [7] 2006, “철도시설 안전세부기준,” *건설교통부고시 제2006-395호*.
- [8] McGrattan, K., Klein, B., Hostikka, S. and Floyd, J., *Fire Dynamics Simulator User's Guide*, NIST.
- [9] 1989, Drysdale, D., *An Introduction to Fire Dynamics*, 2nd edition, John Wiley & Sons.