

# EXODUS 피난시뮬레이터를 이용한 대구지하역사화재 승객피난모델분석

## Analysis of Passenger Refuge Model Using EXODUS Refuge Simulator: Case of the Daegu Underground Station Fire

이창현\*, 장용준\*\*, 박원희\*\*, 김동현\*\*  
Chang-Hyun Lee, Yong-Jun Jang, Won-Hee Park, Dong-Hyeon Kim

---

### ABSTRACT

The study aims at analyzing an underground station refuge model using EXODUS, one of the refuge simulation programs. The model for simulation is the Daegu Subway (Joongang-ro station). The details of the accident are referred to as the simulation condition the refuge time of traveling from the 3<sup>rd</sup> basement platform to the 1<sup>st</sup> basement is mainly calculated, with passengers numbering 1,000 including 329 at car 1079, 320 at car 1080, and 360 who are not on board. Reference data is used to set up the position of passengers. CFAST fire simulator is also used, and a fast curve among the  $t^2$  growth curves, selected as fire growth scenario. The zone is divided into a total of 24 including 18 at the 3<sup>rd</sup> basement platform and 6 at the 2<sup>nd</sup> basement the 1<sup>st</sup> basement is excluded in the fire simulation, however.

---

### 국문요약

본 연구는 피난 시뮬레이션 프로그램 중 하나인 EXODUS를 사용하여 지하역사 피난모델분석에 그 목적이 있다. 이번 시뮬레이션에 사용된 모델은 대구지하철(중양로 역사)이다. 시뮬레이션 조건으로는 사고당시의 상황을 참고하여, 지하3층 승강장에서부터 지하1층까지의 피난시간을 중점으로 하였으며, 승객수는 열차탑승인원 1079호 320명, 1080호 320명, 열차 외 승객360명 총1000명의인원으로 시뮬레이션 하였고, 승객위치는 참고자료를 활용하였다. 화재시뮬레이션 부분은 CFAST 화재시뮬레이터를 이용하였다. 화재성장 시나리오로  $t^2$  성장곡선 중 fast곡선을 선택하여 진행하였고, ZONE은 총 24개로 지하3층 승강장 18개, 지하2층 6개로 나뉘었으며, 지하1층은 화재시뮬레이션에서 제외하였다. 화재 위치는 실제 화재발생 위치인 1079호 1호차로 하였으며 실제 사고타임테이블을 이용하여 가상 시나리오를 작성해 보았다. 총 시뮬레이션 시간은 1800s로 결정하였고, CFAST 결과값은 10초단위로 출력하였다. CFAST 결과값 중에서 ZONE별 상층부온도, 하층부온도, CO<sub>2</sub> 발생량을 사용하여EXODUS시뮬레이터에 적용시켜 진행하였다. 진행결과 각 출구별방출률, 사망인원, 최종피난인원, 사망 자위치, 정체 구간 등을 알 수 있었고, 이를 실제 대구지하철 사고와 비교분석하여보았다.

---

\*책임저자, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀

E-mail : changhy@krrri.re.kr

TEL : (031)460-5356 FAX : (031)460-5319

\*\*정회원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀

## 1. 연구배경 및 목적

현재 우리나라는 한정된 국토를 활용하기 위한 방안으로 지하공간의 활용에 관심이 모아지고 있다. 대표적으로 지하역사를 들수가 있는데 현재의 지하역사는 특히 지하상가와 연계되면서 항상 많은 인구가 상주하는 공간으로 쓰여지고 있다. 이에 따라 지하공간에 대한 안전대책의 필요성이 증대 되어지고 있는 것이 현실이다. 우리나라 최대의 참사중 하나인 대구지하철 사고는 이런 지하공간에 대한 이해부족으로 인한 안전대책 미비가 만들어낸 사고이다. 이에 본 연구는 피난 시뮬레이터중 하나인 EXODUS를 이용하여 대구지하철 사고를 피난 모델링하여 결과치 분석을 통하여 지하역사 최적설계를 위한 자료로 활용함에 그 목적이 있다.

## 2. 연구 방법

본연구의 피난모델은 대구지하철 중앙로 역사이며, 실제CAD도면을 활용하여 지하 1, 2, 3층에 대한 Geometry를 나타 내었다(그림.1) 화재 영향 부분은 화재시뮬레이션인 CFAST를 이용하여 온도와 CO 만을 적용 시켰다. 실제 화재시뮬레이션을 이용한 부분은 사망자가 가장 많이 난 지하 3층 승강장 부분이며 특히 객차 부분을 더욱더 세분화 시켜 나누었다. ZONE은 총 24개로 나누었으며(그림2), 지하1층 부분은 화재영향을 고려 하지 않았고, 단지 피난 시간계산에만 적용 시켰다. 시뮬레이션조건은 대구지하철 화재사고의 연구자료와 각종 문헌등을 참고 하여 설정 하였다. 피난 시간은 단순피난(화재영향 고려 안함)과 화재피난으로 나누어 계산 하였고, 이에 따른 피난 시뮬레이션 결과로 각 출구별 방출률, 사망자 위치, 정체현상 위치, 등을 분석하여 개선요소에 대해 연구해 보았다.

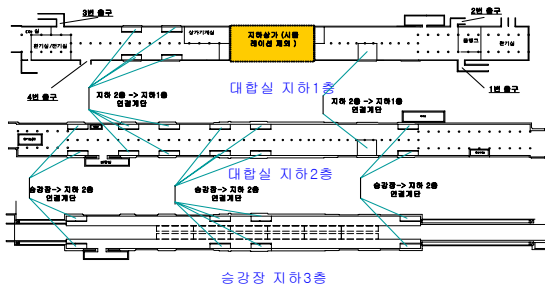


그림 1. 대구지하철 CAD 도면

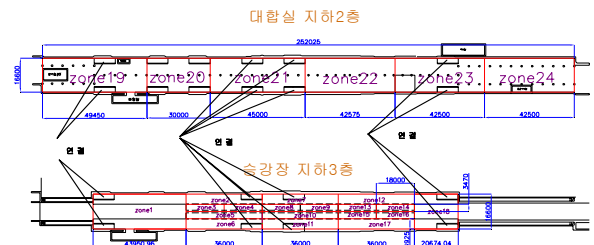


그림 2. 대구지하철 ZONE 설정

## 3. 시뮬레이션 조건 및 결과

본연구의 모든 시뮬레이션 조건은 실제 대구지하철 중앙로 역사 사고당시의 데이터를 활용 하였으며, 그밖에 알수 없는 데이터는 시뮬레이터(EXDOUS, CFAST) 의 Default 값을 사용하였다.

### 3.1 화재 시뮬레이션

(1) 사용 프로그램 : CFAST Ver.5.0 - Zone Model을 사용하는 대표적인 해석 공간에 대하여 상부의 뜨거운 공기층과 하부의 차가운 공기층으로 나누어 각층에서 온도나 가스 농도 등의 물리적 특성이 균일하다고 가정한다. 각 영역간의 상호작용에 의해 발생하는 과정들을 혼합, 물질전달, 복사 그리고 유체 유동 등에 대한 실험 관계식과 상미분 방정식을 계산하는 평균적인 결과를 얻어 낸다.

(2) 화재 시나리오 : 화재 해석시 가장 보편적으로 사용하는  $t^2$  - fire 성장 곡선을 따라 화재시뮬레이

션을 진행 하였으며, 화재 성장모드는 FAST 성장곡선을 따라 성장하는 가정하에 시뮬레이션을 진행 하였다.

$t^2$  - fire 성장 곡선과 사고차량의 발열량을 적용시키면 그림 4와 같은 결과를 얻을 수 있다.

표 1. 사고차량의 발열량

- 사용 프로그램  
**CFAST (Zone fire model, NIST)**

- 발열량  
 $t^2$  - fire  $\dot{Q} = \alpha t^2$

표. 화재 성장 모드

Mode	Fire growth time [sec]
Ultrafast	75
Fast	150
Medium	300
Slow	600

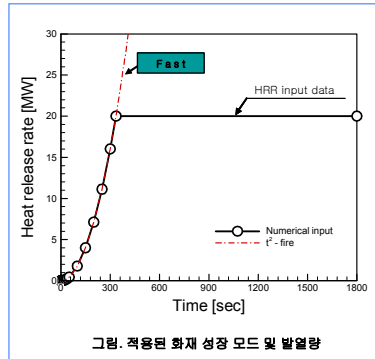


그림. 적용된 화재 성장 모드 및 발열량

항목	사고차량			
	재질	적용량	시편발열량	량당발열량
내장판	F.R.P	970	12.2	11834
단열재	폴리에틸렌(P.E FOAM)	124.8	18.5	2309.5
바닥재	P.V.C	332.2	3.9	1295.6
의자	폴리에스테르	318	15.8	5024.4
계	1745		20464	

그림 3. 적용된 화재 성장모드 및 발열량

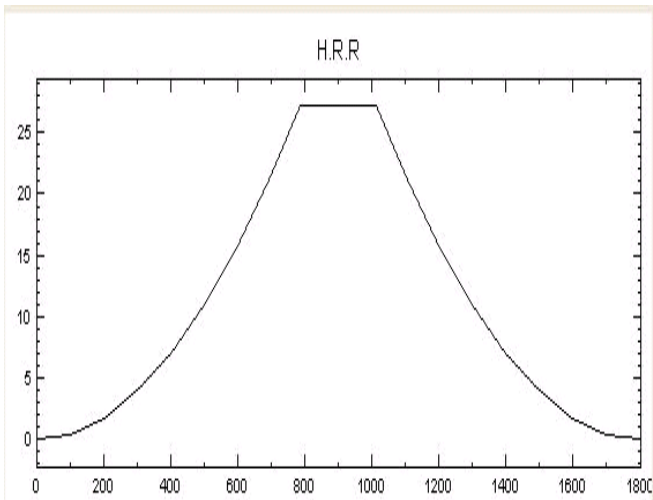


그림 4. 시간에 따른 발열량 (Fast 곡선)

(a) 발열량 ( Fast )

=> 1MW =  $150^2$ (sec)

(fast) =  $4.4 * 10_{(fast)}$

$2[t^3/3] + t^2 (t_2 - t_1) \quad t_2 = 1800 - t_1$

=>  $t_1^2 [1800 - (4t_1/3)] = 20464 \text{ MJ}$

$t_1 = \text{약 } 787 \text{ (sec)}$

$Q = 4.4 * 10_{787}^2$

=  $27.25 \text{ MW}$  (1량당 발열량)

Co발생량에도 적용 시킬수 있으며 다음과 같은 계산 과정을 거치면 1량당 Co 발생량을 구할수 있다.

b) Co 량 (Fast)

$Co \ t_1^2 [1800 - (4t_1/3)] = 104.7 \text{ kg/량}$

$Co = 2.25 * 10_{\text{kg/S}}^2 \quad m = 0.139 \text{ kg/량}$

여기서 계산된 값들은 CFAST를 이용하여 화재해석 하는데 이용되어진다. CFAST 시뮬레이션 시간은 피난 시간을 고려하여 1800s로 설정 하였고, 10s 단위로 데이터 결과값을 출력하였다. CFAST의 기본

조건은 표2. 와같이 하였으며, 스프링쿨러나 기타 소방시설의 작동은 대구지하철 사고 조사문헌을 참조하여 작동되어지지 않는 것으로 하였다.

Zone은 모두 24개로 하였으며, 각 존의 크기는 문헌에 나와 있는 사망자 위치를 참조 하여 관심부분은 세밀하게 설정하였고 그 밖의 부분은 임의로 나누었다. 특히 화재가 발생한 전동차를 위주로 Zone을 설정 하였다. 화재 전과순서 및 시간은 그림 6과 같은 사고발생 타임 테이블을 활용하였으며 결과는 그림 7,8번과 같다.

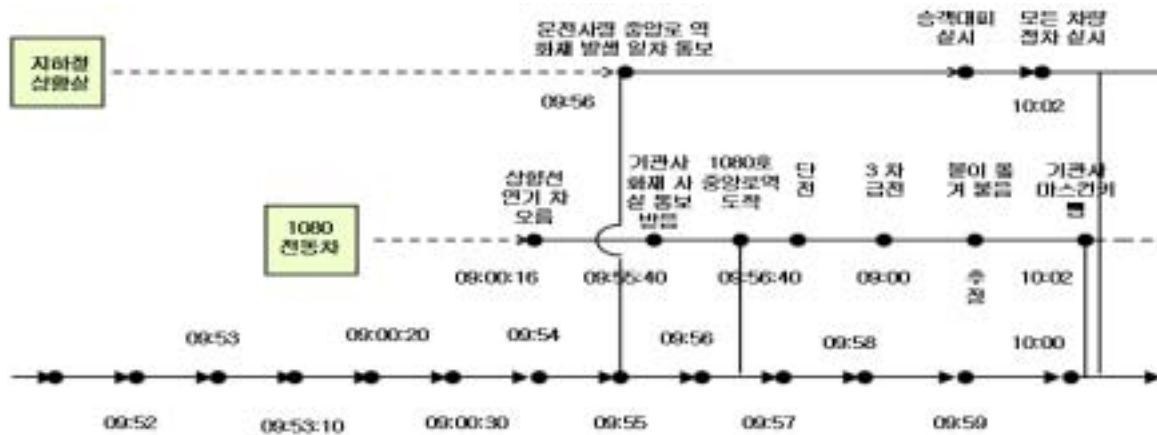


그림 6 . 사고발생 타임 테이블

표 2. Simulation Environment

Simulation Times		Ambient condition		exterior	
Simulation Time	1800s	Temperature	20°C	Temperature	20°C
Text Output Interval	50s	Pressure	101300 Pa	Pressure	101300 Pa
Smoke View Output	10s	Relative Humidity	50%	Wind Speed	0m/s

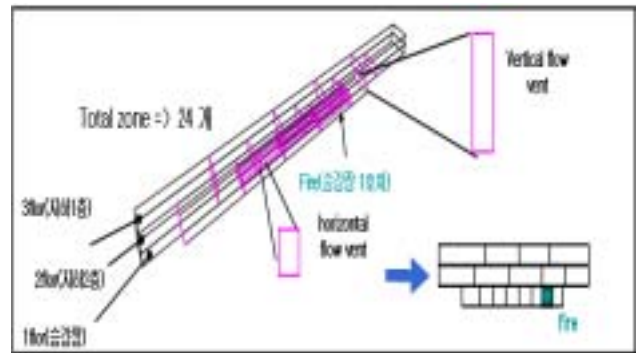


그림 5. Cfast Smoke View

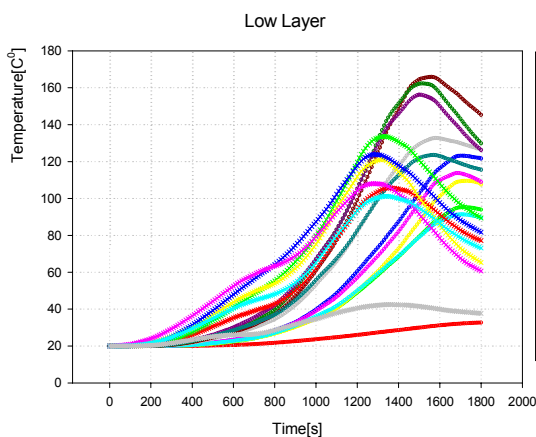


그림 8. Lower Temperature

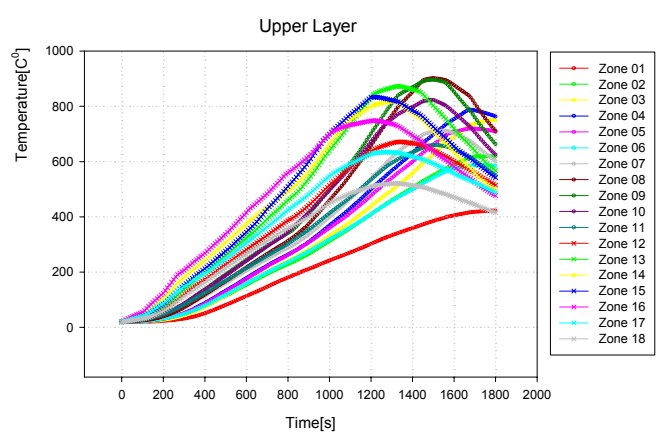


그림 7. Upper Temperature

### 3.2 피난 시뮬레이션 (EXODUS)

CAD 도면을 이용하여 대구지하철 역사의 형상을 시뮬레이션 하였으며, 단순 피난과 CFAST 결과값을 이용한 화재피난 2개로 나누어 시뮬레이션을 실시하였다. 인원수는 출구에서 가장 멀고 사망자가 가장 많이 발생한 전동차 안의 인원만을 문헌을 참고하여 640명으로 설정 하였고(그림 9,10) 성별이나 나이, 신체적 조건, 지형의 친숙도, 등은 프로그램상의 Default값을 활용하여 설정하였다.

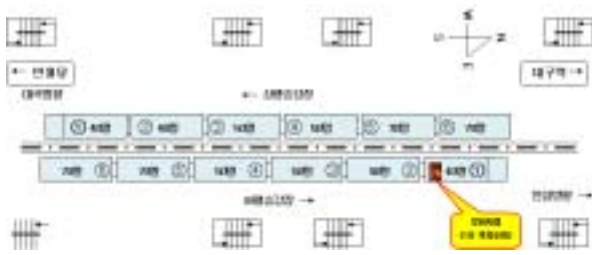


그림 9. 전동차 예상탑승인원



그림 10. 전동차 문 개폐상황

#### 1)단순피난



그림 11. 지하3층 승강장부터출구까지 피난경로

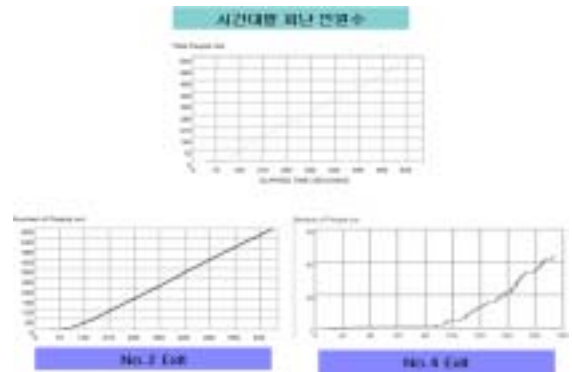


그림 12. 각 출구 시간대별 피난인원수

단순피난 시뮬레이션 결과 그림 11에서 보는바와 같이 전동차의 문 개폐여부가 피난 속도에 큰 영향을 주는 것을 알수 있다. 또 그림 11,12에서 보는 바와 같이 승객피난시 자신의 위치와 가까운 출구로만 피난하려하기 때문에 3층지하 승강장에서 지하1층 출구까지의 최단거리 경로의 특정계단과 출구에서만 병목현상이 심해지는 것을 볼 수 있었다. 시뮬레이션 결과 최종 피난자가 출구를 빠져나간 시간이 11분 31초였다. 참고로 지하승강장부터 출구까지 최단거리는 120m 이고 최장거리는 171m 이다. 이는 각각 건강한 성인 남자인 경우 2분, 3분 정도의 피난시간이 소요된다. 이결과를 보면 병목현상을 해결하는 일이 피난시간에 가장 큰 영향을 끼친다는 것을 알수 있다.

#### 2)화재피난

화재피난시 승객들은 단순피난보다 더 복잡한 환경적 영향을 받게 된다. 단순피난에서는 위험지역에서 안전한 출구에까지의 거리또는 내부 출입구의 개폐상태, 승객밀집도등을 고려하여 피난시간을 계산하였다면, 화재피난에서는 이밖에 유독물질과 화재온도, 연기발생으로 인한 가시거리 제한이 더해져 피난시간을 고려해야 한다. 실제로 EXODUS시뮬레이터는 이러한 조건들을 시뮬레이션에 반영하여 계산할 수 있다. 예를들면, 가시거리가 1m 이하로 떨어지게 되면 1.2m/s에서 1.5m/s의 보통사람들의 보행속도

가 0.4m/s에서 0.5m/s 로 떨어진다. 또 이러한 원인들로 인하여 피난시간이 지연되어 위험지역에 오래 머무르게 되면 사망자까지 표현된다.

EXODUS에서는 이러한 위험환경조건에 대해서 CFAST를 이용하여 입력할수 있으며, 다음의 간단한 공식에 의해 반영된다.

이것은 모든 Hazard 값에 적용되며, 본 연구에서는 온도(°C) 와 CO(ppm) 값에 적용시켜 진행 하였다.

$$\text{Hazard} = \text{initial Hazard} + mt^p$$

where m = the Gradient  
t = Time(s)  
p = Power

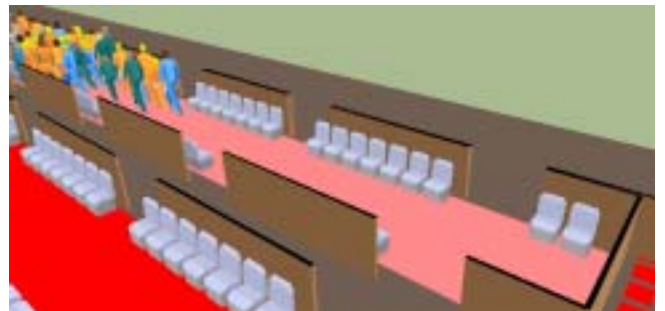
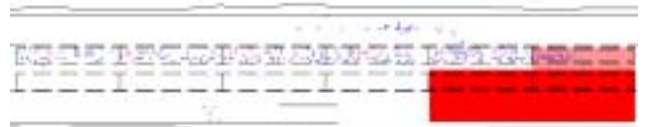


그림 13. 1079호 1호객차 화재 발생 (10sec)

그림 14. 1080호 객차로 화재 전파 (365sec)

화재피난 시뮬레이션 결과(그림 13,14) 총 피난시간은12분 3초로 단순피난때보다 1분여정도 차이가 남을 알 수 있었다. 생각보다는 근소한 차이를 보였으며, 이는 화재영향으로 인한 피난속도 지연보다 승객들이 피난시 한곳으로 밀집되어 생기는 병목현상이 더 크게 피난시간에 영향을 준다는 것을 알수 있었다.(그림 15,16,17) 승객피난시 출구 이용은 단순피난과 마찬가지로 2번출구와 4번출구만을 이용하여 피난하였으며 이로 인하여 승객들이 한곳으로 몰리면서 정체현상이 생기면서 피난시간이 지연되었다.

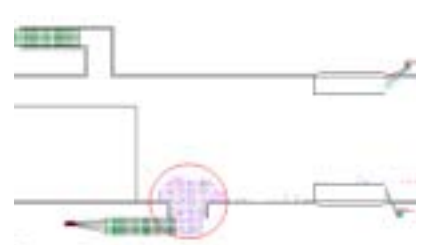
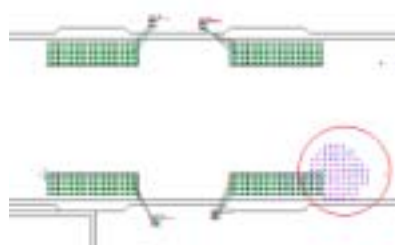
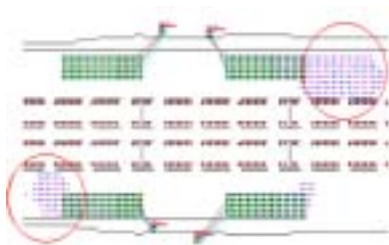


그림 15. 지하3층 병목현상

그림 16. 지하2층 병목현상

그림 17. 지하1층 병목현상

## 7. 결론

시뮬레이션 결과 승객들은 피난상황 발생시 안전지역으로의 가장 가까운 경로를 택하는 것을 볼 수 있다. 이로인하여 특정 계단 및 통로, 출구로 피난인원이 밀집되는 현상이 일어났다. 본 연구에서 사용된 대구지하철 중앙로 역사의 경우 지하3층 중앙계단 부분과 지하 2층 대합실 중앙계단, 지하1층 대합실 2번, 4번 출구에서 병목현상이 벌어졌다. 특히 2번 출구의 경우 지하3층 승강장 대부분의 지역에서 가장 가까운 출입구이기 때문에 더욱 심하게 승객들이 몰리는 현상을 볼 수 있었다. 이 같은 문제점을 해결하기 위해서는 물론 소방시설이나 비상구 표시, 등 소방안전대책이 필요하겠지만, 그것보다는 역사의 거주인원을 파악하여 친편일률적인 출입구나 통로, 계단 너비를 사용하기 보다는 피난동선을 고려하여 주피난로의 출입구나, 통로를 더 크게 만들어서 이러한 병목 현상을 줄일 필요가 있다. 또 지하역사의 특성상 화재시 채광이나, 연기로 인하여 가시거리가 극히 제한되기 때문에 피난로에 장애물이 될 수 있는 것들을 가능한 제거 해야만 한다. 장애물에 의한 피난로 재설정만은 피난시간의 증가에 큰 원인이 될 수 있다. 본연구의 결과에서 보는바와 같이 건물이용만을 위한 설계도 중요하지만, 피난동선을 고려한 설계도 필히 고려되어야 할 것이다.

본연구의 한계로 화재해석에서 사용된 CFAST시뮬레이터가 100m이상의 구역을 해석하기에는 적합하지 않아 합리적인 해석값을 얻을수는 없었다. 그리하여 화재영향으로 인한 피난시간계산에서 오차가 생긴 것으로 보인다. 따라서, 다른 화재해석 프로그램과 연계하여 활용하는 방안을 찾아보아야 할 것이며, 향후 화재이외에 다른 환경적 요인에 대해서도 검토해 보아야 할 것이고, 계속적 연구가 필요할 것이라 판단된다.

## 참고문헌.

1. 대구지하철 화재 조사 백서, 경북대학교 도시환경설비 연구실
2. 김영일 외 (2001) “할인점 지하매장의 피난성능 개선에 관한 연구” 한국화재소방학회논문지, 제15권 1호 , pp.93-99
3. 전규엽 외 (2003) “대구지하철화재 생존자 행동패턴과 피난로 설계시 적용방법 연구” 한국화재.소방학회 추계학술논문발표회논문집, pp.367-373
4. 김운형, 윤명오(2000) E. R Galea, “EXODUS 피난모델의 검토”, 한국화재소방학회:학술대회지, 화재·소방학회 춘계학술대회 논문집 , pp.96-100
5. 김운형, 윤명오,(1999) “피난모델의 검토 - SIMULEX”, 한국화재소방학회, 추계학술발표회 논문 초록집 , pp.155-160
6. Galea, E. R & Galparsoro, J. M. P.(1993) "EXDOUS: An Evacuation Model for Mass Transport Vehicles(1993)" UK CAA Paper 93006, CAA London
7. Woon Hyung Kim, Rui Hu, Hong Kim(1999.11) "A Occupant Load Density and Computer Modeling of Evacuation Time in Office Building", 1st conference of the Association of Korean-Japanese Safety Eng. Society, Korea