

## Fluent와 EXODUS를 이용한 승객피난 시뮬레이션

### The Passenger Evacuation Simulation Using Fluent and EXODUS

장용준<sup>†</sup> · 이창현\* · 박원희\*\* · 정우성\*\*\*

Yong-Jun Jang · Chang-Hyun Lee · Won-Hee Park · Woo-Sung Jung

**Abstract** The simulation analysis of fire-driven flow and passenger evacuation in Daegu subway station, Chung-Ang, have been performed. The first location of outbreak of fire is inside passenger car in the third basement in Chung-Ang station. The smoke flow in the second and third basement has been analyzed using FLUENT 6.2. The CO (carbon monoxide) and temperature distribution in the train units and station platform have been obtained and transferred to input data for evacuation simulation. The highest temperature in the train units was 1500K. For the simulation of passenger evacuation, EXODUS has been used for whole basements (level 1~level 3) in the station. Total number of people was assumed to be one thousand and 640 were placed inside train and 360 were placed outside train. In evacuation simulation, an average of 135 passengers were killed and an average time to evacuate takes 10min 19sec. The main evacuation routes used by passengers were investigated and the cause of death was identified by evacuation simulation.

**Keywords** : Passenger evacuation simulation, CFD, Mass fraction

**요 지** 2003년 대구지하철 중앙역에서의 화재사고로 인한 화재 유동 및 승객 피난시뮬레이션을 수행하였다. 화재의 발화 지점은 지하 3층의 객차 내이며, 지하 3층 및 2층의 화재 유동이 FLUENT 6.2를 이용하여 수행되었다. 객차 내 및 역사 내의 CO (이산화탄소) 및 온도의 분포가 분석되었으며, 이의 data가 피난 시뮬레이션 data로 사용되었다. 해석된 온도장중 가장 높은 온도는 1500k 이다. 승객 피난 시뮬레이션을 위하여 EXODUS가 사용되었으며, 객차 내에 640명, 역사 내에 360명의 승객이 분포하고 있는 것으로 가정하고 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과 총 135명이 사망하고, 평균 피난 시간은 10분 19초로 계산되었으며, 피난 경로들이 분석이 되었다.

**주요어** : 승객 피난 시뮬레이션, 전산유체역학, 질량분율

## 1. 서론

2003년 2월 대구지하철 화재 사고로 인하여 192명이 사망하고 148명이 부상을 당하였다[1]. 이 사건은 도심 한복판의 지하역사에서의 화재 사고라는 이유와 대형 참사라는 관점에서 국내뿐 아니라 국외에서도 비상한 관심을 집중시켰으며, 사전 초기에 진화 활동 및 승객 대피가 수행되었으면 참사를 막을 수 있는 인재였다.

지하철 화재 발생 시 피난의 효율을 극대화 시킬 수 있는 방안을 찾기 위해서는 사전 실험이 선행되는 것이 바람직하나, 실험 대상물의 축소 및 실제 조건에 가깝도록 상황을 재현시키는 것은 매우 어려우며, 경우에 따라서는 위험하거나 유독한 환경 등으로 실험 자체가 불가능한 경우가 존재한다.

따라서 이러한 한계 상황을 극복하기 위해서 최근 컴퓨터를 이용한 화재해석 기법이 발달되어 화재의 영향 및 발달 과정의 예측이 가능하게 되었다. 특히 지하역사라는 특수성 때문에 실제 화재 실험이 방대한 공간과 복잡한 구조로 인하여 제약 받는 반면 시뮬레이션 기술은 경제적으로나 시간적으로 커다란 장점이 있어 주목을 받고 있다[2].

또한 승객 피난 기법에 있어서도 실제적으로 승객을 동원한 대피 실험 보다는 컴퓨터를 이용한 대피 시뮬레이션 상용

† 책임저자 : 정희원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원  
E-mail : jangyj@krti.re.kr  
TEL : (031)460-5355 FAX : (031)460-5319

\* 정희원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 연구원

\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원

\*\*\* 정희원, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 책임연구원

code[3]들이 출현하여 가상의 화재 공간을 창출하고, 화재 시 자연적으로 발생하는 문제와 인위적으로 제기될 문제 등을 고려하여 승객들의 피난을 시뮬레이션 할 수 있도록 돕고 있다.

본 연구에서는 화재현장인 대구 지하철 중앙로역과 동일한 공간 구조에서 FLUENT 6.2[4]의 CFD기법을 이용하여 화재 유동 시뮬레이션을 수행하였으며, 이의 결과를 building-EXODUS[3]를 이용한 승객 피난 시뮬레이션과 연계하여 지하철 폐쇄공간에서의 화재가 승객들의 피난방법에 어떻게 영향을 미치는가를 과학적으로 조사하였고, 대구지하철 실제 data와 비교 분석하였다.

## 2. 시뮬레이션 모델 구성

시뮬레이션 대상으로는 Fig. 1에서처럼 대구지하철 중앙로역 지하 1층의 지하상가 및 대합실, 지하 2층의 역 대합실, 지하 3층의 승강장으로 구성되어 있다. 지하 3층의 승강장에서 지하 2층 역 대합실로의 이동통로는 총 8개의 에스컬레이터 또는 계단이 있으며, 지하 2층 역 대합실에서 지하 1층 지하상가로의 이동통로는 총 5개의 연결계단이 있다. Fig. 1에서 각 층별 특징 및 이동통로를 도식적으로 나타내었다.

사고 차량은 지하 3층 승강장에 위치하고 있으며, 객차의 길이는 약 18m 이며, 높이는 약 4m이고 출입문은 양면에 각각 4개가 있다. 객차가 상행 및 하행에 각각 6량이 정차하고 있는 것으로 간주하고 화재유동 및 승객피난 시뮬레이션을 수행하였다.

화재유동 시뮬레이션 공간으로는 지하 3층 및 2층을 대상으로 하였으며, 승객피난 시뮬레이션 공간으로는 지하 3층 ~ 1층 전 공간을 대상으로 하였다. 따라서 지하 1층 까지 대피한 승객은 생존한 것으로 판단하였다. 또한 지하 1층의 대합실에서 지하 2층의 지하상가로 연결되는 계단부분은 화재 시 방재셔터로 인하여 출입이 통제되므로 시뮬레이션에서 제외되었으며, 일반인 통제구역 또한 제외되었다.

대구지하철 사고 당시 정확한 탑승 인원은 알 수 없으나[1], 지하철 상행 및 하행 객차에 각각 320명씩 탑승하고 있는 것으로 추정하여 총 640명의 인원이 전동차에 탑승하고, 전동차의 승강장 및 대합실에 360명이 있는 것으로 가정하여 총 1000명의 승객을 대상으로 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 2는 각 객차에 예상 탑승인원을 나타내고 있으며[1], 최초의 발화지점은 하행 승강장의 1호 칸 이었다. 이러한 조건을 가지고 화재 유동 및 승객 피난 시뮬레이션을 수행하였다.

Fig. 3은 실제 사고 현장에서 발생한 객차 내에서 사망한 승객수를 나타내고 있는 것으로 총 140명이었고, 전동차외에서 사망한 승객은 지하 3층 승강장에서 27명, 지하 2층 역 대합

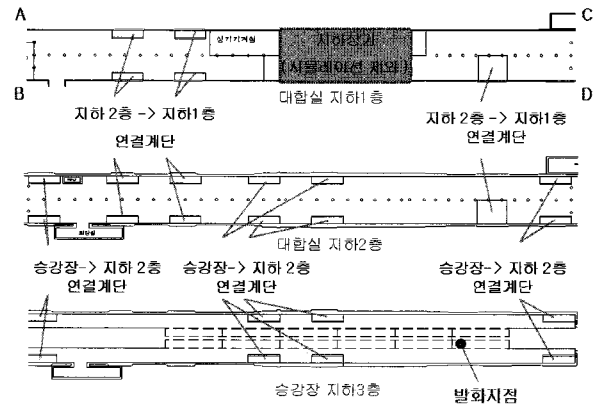


Fig. 1. Analysis space for simulation in Daegu subway station

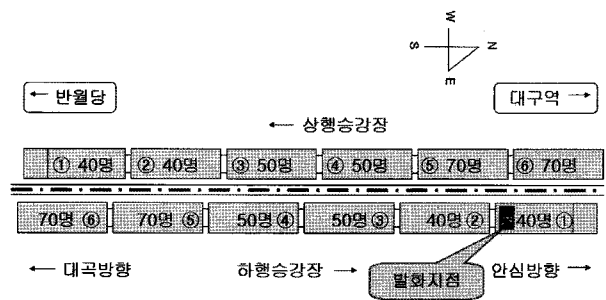


Fig. 2. Expected boarding passenger at each unit

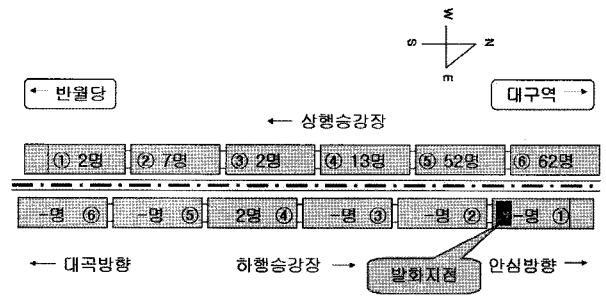


Fig. 3. The number of deaths at each unit in Daegu subway station

실에서 19명의 사상자가 발생하였다.

## 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

### 3.1 화재유동 시뮬레이션

대구 지하철 화재 유동 시뮬레이션을 수행하기 위하여 상용 CFD 코드인 FLUENT 6.2[4]를 사용하여 지하역사 전동차내부에서의 화재발생 시간에 따른 지하철 역사 내부의 온도분포 및 일산화탄소의 분포를 해석하고 이를 EXODUS[3]의 입력 데이터로 활용하였다.

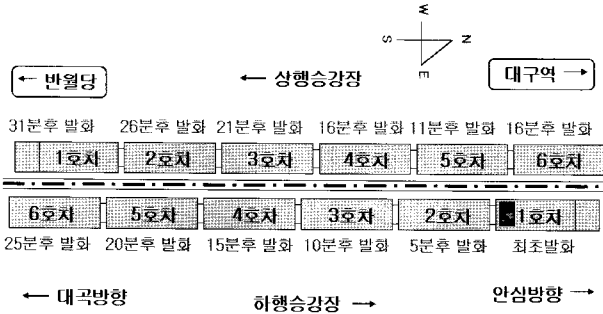


Fig. 4. Scenario for outbreak of fire in passenger car used in CFD simulation

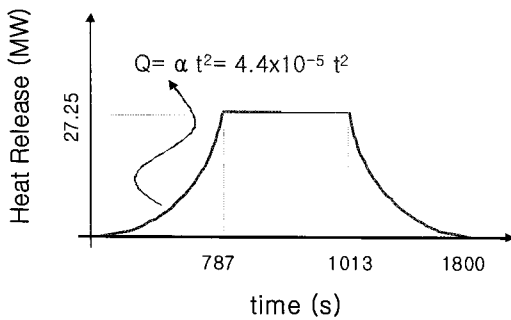


Fig. 5. Applied heat release rate at each unit

EXODUS의 입력조건으로 사용되는 지하역사 온도 및 일산화탄소의 농도를 나타내기 위하여 Fig. 1의 지하 2층과 3층을 24개의 zone으로 구분하였으며, 다시 각각의 zone을 1.5m 높이를 기준으로 상부영역과 하부영역으로 나누어 총 48개의 zone을 생성시켰다. 객차와 객차 사이의 통로는 열려 있는 것으로 가정하였다. 객차별 화재 진행 순서를 결정하기 위하여 Fig. 4에서처럼 객차별 발화 시간에 대한 시나리오를 구성하였다. 즉 최초의 발화지점인 하행 1호차를 기준으로 발화 5분 후에 하행 2호차에 착화가 진행되고, 발화 10분 후에는 하행 3호차에 착화가 되며 순차적으로 하행 6호차에는 발화 25분 후에 착화되는 것으로 가정하였다. 그리고 상행차량에 대하여 5호차에는 발화 11분 후에 착화가 되며, 최종적으로 상행 1호차는 발화 31분 후에 착화되는 것으로 시나리오를 구성하였다.

객차 1량당 화재 규모도 매우 중요한 입력인자이며 본 연구에서는 객차 1량 당 화재규모를 Fig. 5에서처럼 약 27MW로 추정[5]하여 이를 전 객차에 적용하였다.

지하철 역사의 환기 시스템은 화재발생으로 인하여 작동불능 상태로 가정하였으며, 수치해석에 사용된 해석영역은 Fig. 6과 같다. 사용된 격자수는 약 264만개이며, 육면체 격자와 사면체 격자를 혼합하여 사용하였다. Fig. 7은 지하 3층 승강

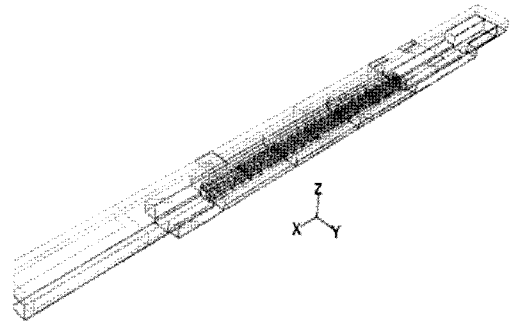


Fig. 6. Overall geometry for CFD analysis

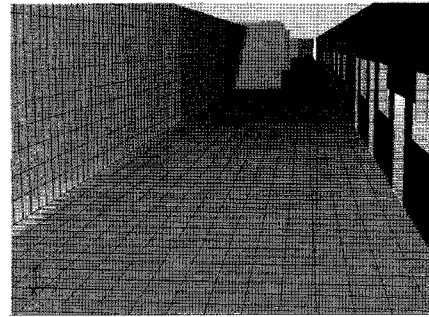


Fig. 7. Grid distribution for station platform in the third basement

장에서 표면 격자 분포를 보여주고 있다.

화재유동 해석 결과는 다음과 같다. EXODUS의 입력조건으로 사용되는 화재시간에 따른 일산화탄소의 질량분율(mass fraction) 변화 및 온도의 변화를 24개의 zone에서 공간 평균값으로 나타내었으며, 본 논문에서는 대표적으로 발화 지점인 하행 승강장에 정차된 열차의 1호 칸(Fig. 2 와 Fig. 3 참조)에서 해석 결과를 나타내었다.

Fig. 8은 하행승강장 1호 칸(발화지점)에서 화재시간에 따른 일산화탄소(CO)의 변화분포를 나타내고 있다. 화재의 성장곡선과 유사하게 일산화탄소의 공간평균값이 증가되는 특징을 보여준다. 일산화탄소의 최대 질량분율은 화재발생 5분 후에 약 2,000ppm, 13분 후에 약 7,650ppm을 나타내고 있으며, 화재발생 37분 후에는 감소하게 된다. 일산화탄소가 공기 중에 6,400ppm 이상일 경우 15분 내에 승객이 사망[6]하는 것으로 조사되었으므로 7,650ppm은 승객들에게 매우 치명적인 것을 알 수 있다.

Fig. 9은 같은 위치의 하부영역에서 화재시간에 따른 온도의 변화분포를 나타내고 있으며, 일산화탄소의 질량분율 변화 분포와 매우 흡사한 패턴을 보이고 있다. 최대 증가 온도는 화재발생 13분후에 약 1500K까지 증가하는 것으로 조사가 되었으며, 이는 철의 용융점에 근사한 것이다. 화재발생 35분 이후에 온도가 다시 감소하고 있다.

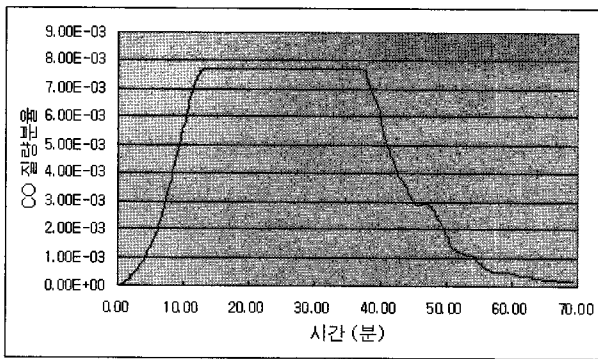


Fig. 8. CO mass fraction in the first unit (the first location of outbreak of fire) with increasing time

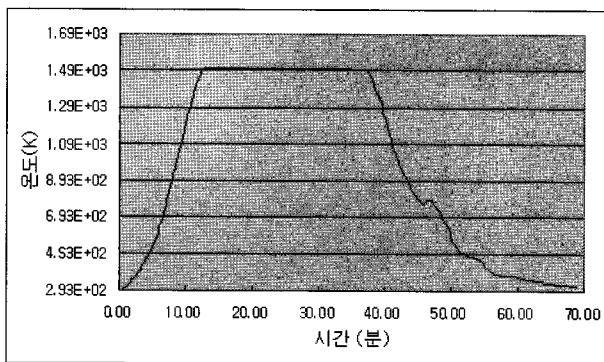


Fig. 9. Temperature distribution in the first unit with increasing time

Fig. 10은 화재가 발생하고 15분경과 후 지하 3층에서 발화 객차인 1호 칸 주변의 온도 분포를 나타내고 있다. 하행 방향에 정차한 객차를 따라 차례로 화재가 옮겨 붙고 있는 것이 확인이 되고 있으며, 바로 옆에 정차하고 있는 상행선의 객차에도 화재가 전파되고 있다.

Fig. 11은 같은 시간 지하 2층의 역 대합실에서의 온도분포를 나타내고 있으며, 양쪽 계단을 따라 지하 3층에서의 화재 열 및 연기가 지하 2층으로 확산되고 있는 것이 확인되고 있다.

### 3.2 승객피난 시뮬레이션

FLUENT의 결과를 EXODUS의 입력 데이터로 활용하여, 승객피난 시뮬레이션을 수행하였다. EXODUS에서 정확한 사망자 수를 계산하기 위해서는 통계학적인 방법을 사용하여 앙상블 평균(ensemble average)을 구하는 것이 추천된다[3]. 이것을 위하여 10회 이상의 시뮬레이션을 수행하여야 하지만 PC의 성능이 이를 좇아가지 못하므로, 5회를 수행하여 이를 평균한 값을 취하였다.

EXODUS에서 피난 시뮬레이션을 수행하기 위해서 온도, CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>, 등의 값이 필요하지만, 본 연구에서는

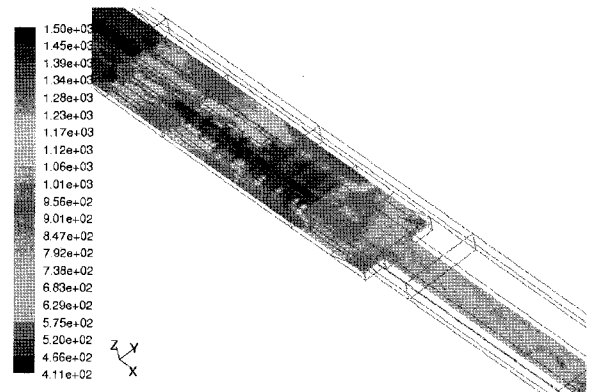


Fig. 10. Temperature distribution for station platform in the third basement after 15 min. of outbreak of fire

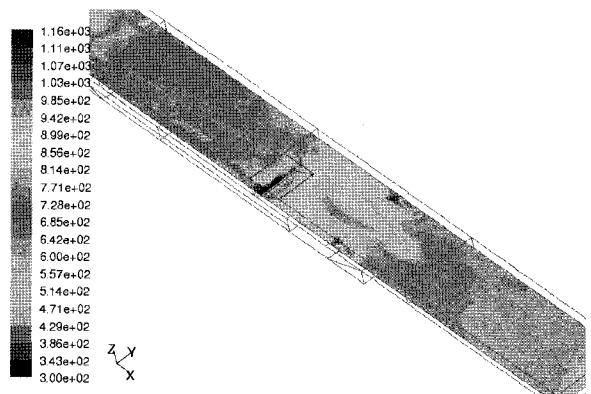


Fig. 11. Temperature distribution for station platform in the second basement after 15 min. of outbreak of fire

FLUENT 결과로부터 온도 분포와 일산화탄소(CO) 분포량만을 가지고 피난 시뮬레이션을 수행하였다. EXODUS에서는 승객들의 각각의 특성을 매우 자세히 지정할 수가 있는데 성별, 나이, 신장, 행동특성, 승객위치, 보행속도, 승객들의 반응 시간 등을 지정할 수 있다. 이를 위하여 EXODUS에서 추천하는 값(default)을 사용하였다. 또한 피난 방향을 어떻게 설정하는가에 따라 사망자 수가 매우 다르게 결정이 되는데, 본 연구에서는 가장 가까운 출구를 찾아서 탈출 하도록 설정하였다.

Table. 1에서 5회의 시뮬레이션 결과 및 평균값을 나타내었다. 평균 피난시간은 10분 19초이고, 평균 사망자는 135.4명(대구화재사고 : 192명 사망) 이었다. Fig. 12에서 보이는 것처럼 대부분 사망자의 위치는 상행 승강장에 정차한 열차의 4, 5, 6호 칸 (Fig. 2 참조)에 탑승하고 있는 승객 및 그 주변이었으며, 양쪽 계단에서도 사망자가 발생하였다. 이는 대구 지하철 화재 사고 때와 흡사한 결과(Fig. 3 참조)로써 시뮬레이션이 성공적으로 수행된 것을 입증하는 결과이다.

Table 1. Average number of deaths and evacuation time

시뮬레이션 횟수	No.1	No.2	No.3	No.4	No.5
피난시간 (평균 : 10분 18.8초)	10분 16초	10분 21초	10분 16초	10분 22초	10분 19초
사망자 (평균 : 135.4명)	136명	139명	136명	131명	135명

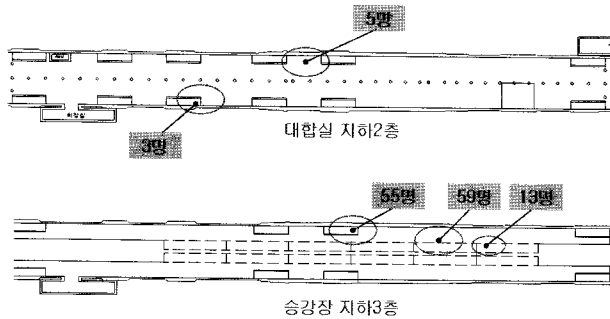


Fig. 12. The location and the number of deaths in passenger evacuation simulation

Number of people out

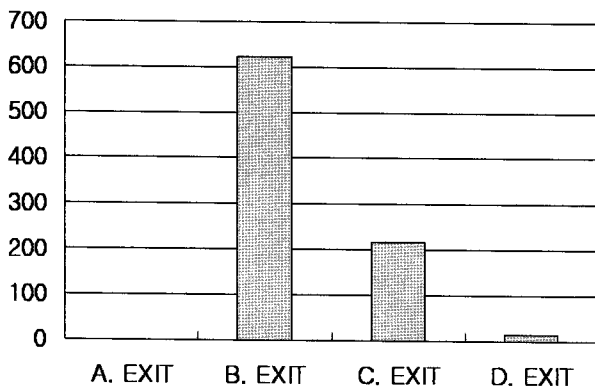


Fig. 13. Number of people out according to exits

시뮬레이션에서는 승객들이 지하 1층 지하상가까지 도달하면 생존한 것으로 간주하였다. Fig. 13은 지하 1층 탈출구에 따른 탈출 승객 수이다. A 탈출구(Fig. 1 참조)로는 전무하였고, B 탈출구로는 623명으로 가장 많은 승객들이 사용하였으며, C 탈출구로는 217명, D 탈출구로는 25명이 탈출하였다. B 탈출구로 가장 많은 승객들이 탈출하게 된 원인은 화재가 최초로 발생한 지점으로부터 가장 먼 쪽의 탈출구이므로 승객들이 화염과 연기에 쫓겨 B 탈출구로 달려간 것으로 판단된다. 또한 C 탈출구도 상당수의 승객이 사용하였으나, 대부분 화재 발화 초기에 이루어진 탈출이었고, 화재가 성장한 후로는 C 탈출구를 사용하지 못한 것으로 분석되었다.

Cumulative number of deaths

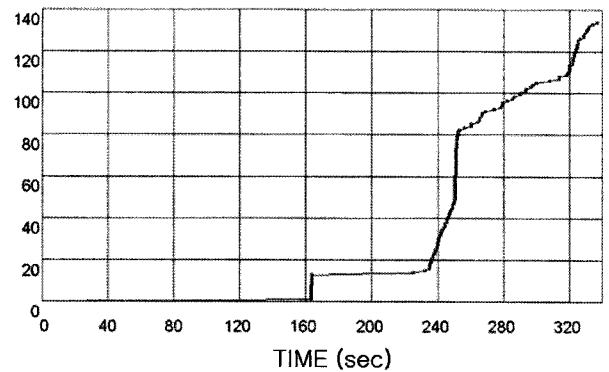


Fig. 14. Cumulative number of deaths according to time

Fig. 14는 시간에 따른 사망자 누적 수이다. 누적 그래프를 보면 170초대에서 사망자가 발생하였으며, 230초에서 250초 사이에 사망자가 급속히 증가하는 것이 보인다. 이는 발화 객차의 반대편에 정차된 전동차의 객실 문이 완전히 개방이 되지 않아 제한된 출구로 인하여 객차안의 승객들이 좁은 공간으로 몰리면서 한꺼번에 사망하였기 때문이다.

250초 이후에도 사망자 수가 계속하여 증가하고 있는데 이는 승강장에서 지하 2층으로 탈출하고자하는 승객들이 계단으로 몰리면서 많은 사망자를 발생시켰기 때문이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 2003년 발생한 대구 지하철 화재 사고의 장소인 중앙로역과 동일한 공간 구조에서 FLUENT의 CFD기법을 이용하여 화재 유동을 분석한 후, 이의 결과를 EXODUS와 연계시켜 승객 피난 시뮬레이션을 수행함으로써 지하철 폐쇄 공간에서의 화재가 승객들의 피난방법에 어떻게 영향을 미치는지를 과학적으로 조사하였고, 대구지하철 실제 data와 비교 분석하였다. 또한, EXODUS를 이용한 승객피난 시뮬레이션에서는 객차 안에 있는 것으로 추정되었던 640명[1]의 인원 중에서 대부분 사망자가 발생하였으므로, 객차 밖의 역사 내의 인원에 대하여는 고려를 할 필요가 없었으나, 이들의 피난 경로도 분석하고자 역사 내에 360명이 존재하였던 것으로 가정하여 총 피난 인원을 1000명으로 가정하여 피난 시뮬레이션을 수행하였다.

화재유동 해석 결과 화재 발생 13분 후 치사량의 일산화탄소가 화재 발생 객실을 점령하였으며, 15분후에는 화재가 최초로 발생한 쪽의 객실 모두를 거의 전소시키고 반대 방향의 전동차로 이미 화염이 전파되고 있었다. 또한 화재 유동 시뮬레이션을 통하여 지하 3층으로부터 지하 2층으로의 화염 전

파가 어떠한 경로를 통하여 이동되는지를 확인할 수 있었다.

FLUENT의 화재 유동 해석 결과를 EXODUS에 입력 시켜 승객피난 해석을 한 결과 사망자의 위치 및 사망자 수(135.4명)가 대구 지하철 사고 data(192명)에 접근하는 것으로 조사가 되었다. 또한 해석 결과에서는 승객들이 화재 사고 시 주로 사용하게 되는 피난 통로를 확인 할 수 가 있었고, 사망 원인도 추정하여 볼 수 있었다. 따라서 이러한 시뮬레이션 도구를 잘 이용 할 수 있으면 승객 피난 통로의 최적설계 및 취약부분(dead end)을 제거할 수 있는 설계 도구로 활용될 수 있는 것으로 판단된다.

**참고 문헌**

1. 홍원희(2004), "2.18 대구지하철 화재조사 연구백서", 경북대학교 건축학과 도시환경설비연구실.
2. 장용준, 박원희(2007), "철도터널 화재 유동에 사용되는 FDS code의 적용성 분석", 한국철도학회논문집, 제10권, 제2호, pp.224-230.
3. Galea, E. R., Gwynne, S., Lawrence, P.J., Filippidis, L., Blackshields, D. and Cooney, D. (2004), "buildingExodus V4.0 user guide technical manual". University of Greenwich.
4. FLUENT Inc. (2005), "FLUENT 6.2 user's Guide"
5. 이덕희(2005), "서울 지하철 전동차 내장재 교체에 따른 화재안전도 평가", 한국철도기술연구원
6. 현성호, 김영수, 김정환, 오규형, 이창우, 조 경(2001), "화재원론", 도서출판 동화기술

**부 록**

(1) EXODUS에서의 유독성 모델에 의한 사망자 수 또는 피난행동에 대한 의식 불능 상태의 계산방법은 다음과 같다. 즉, 유독성 물질의 흡입량의 정도에 따라 사망을 판정하는 Fraction Effective Dose(FED)모델을 사용한다. FIH + FIN의 값이 1에 가까워지면 의식 불능 상황(또는 사망)으로 판정한다.

$$FIH = FIHr + FIH_c = \left( \frac{q^{1.33}}{D_r} \times t \times 60.0 \right) + (t \times 2.0 \times 10^{-8} \times T^{3.4} (T \text{ } ^\circ\text{C}))$$

T: 온도(°C), q: radiative flux(kW/m<sup>2</sup>)

FIH : 신체가 대류열과 복사열에 노출된 정도

Dr : 신체에 미치는 복사열의 양

$$FIN = (FICO + FICN + FLD) \times VCO_2 + FIO$$

$$FICO[ppm] = 3.317 \times 10^{-5} \times CO^{1.036} \times RMV \times \frac{t}{PID}$$

$$FICN[ppm] = e^{(HCN/43)} \times \frac{t}{220}$$

$$FIO = \frac{t}{e^{\{(8.13 - 0.54 \times (20.9 - O_2)\}}}}$$

$$FICO_2 = \frac{t}{e^{\{6.1623 - (0.5189 \times CO_2)\}}}$$

$$VCO_2 = e^{(CO_2/5.0)}$$

FIN : O2, HCN, CO, CO2의 조합이 신체에 축적된 정도  
VCO2 : CO2에 노출로 인한 신체내의 Hyperventilation 영향의 정도

FICO2 : 신체내에 CO2의 축적된 정도

FIC : 모든 비활성 기체에 순간적 노출정도

FLD : 신체내에 비활성 기체의 축적된 정도

(2) 피난시간에 중요한 영향을 미치는 EXODUS 피난 모델의 주요 개인별 입력 인자는 연령이나 성별에 따라 개인적 특성이 모두 다르기 때문에 EXODUS에서는 개인별 입력 인자의 범위를 지정해 무작위로 값을 입력 할 수 있다. 다음 표는 이렇게 무작위로 입력되어진 한 사람의 특성을 나타낸 것이다.

Attribute	Input Value
Gender	male
Age	25year
Height	1.80
Weight	80.000kg
Status	Occupant
Response	0.0s
Mobility	1.0
Agility	5
Fast Walk Speed	1.5m/s
Walk Speed	90% of Fast Walk Speed
Leap Speed	80% of Fast Walk Speed
Crawl Speed	20% of Fast Walk Speed
Up - Stair Speed	0.67m/s
Down-Stair Speed	1.01m/s
RMV (Respiratory Minute Volume)	221m/s
PID (Personal Incapacitation Dose)	30
Drive	10
Patience	1000
Target exit	Near
Familiarity	Near

(2007년 11월 22일 논문접수, 2008년 1월 10일 심사완료)