

# 지하철 객차 화재발생시 피난 시간에 대한 연구

## A study of evacuation time in a subway carriage fire

김승렬\*      노재성\*      노경철\*      유홍선<sup>†</sup>  
Kim, Seong-Ryul   Roh, Jae-Seong   Ro, Kyoung-Chul   Ryou, Hong-Sun

---

### ABSTRACT

Recently, the terror frequently has taken place for unspecified individuals as modern society is complicated. Especially, in case of a subway carriage fire as Daegu subway fire, because smoke spread path usually coincide with passenger's evacuation path, it will reduce visibility and can cause fatalities by asphyxiation.

This study performs not only fire simulation with CFAST V6 but also evacuation simulation with EXODUS V4 for the purpose of taking measures for passengers's life safety in subway fire. As a result of evacuation simulation without fire, evacuation times are 36 s for EXODUS V4 and simple hand calculation, and when fire is occurred fire, 101 persons evacuated in 32 s. Therefore, a countermeasure of evacuation in subway carriage fire is required to repression of fire and emergency exit.

---

### 1. 서론

최근 들어 불특정한 다수를 대상으로 방화에 의한 화재 사고가 많이 발생하고 있다. 특히 지하철에서의 화재는 공간적으로 제한되어 있고, 지하공간에서의 화재이기 때문에 탈출의 어려움이 있고 사람의 탈출방향과 연기의 전파 방향이 일치하게 되어 더 많은 인명피해가 발생할 수 있다. 대표적인 예로 대구지하철화재를 들 수 있다. 이 사건은 화재로 인해 발생하는 유독가스를 제대로 제어하지 못해 많은 사상자가 발생하였다. 이처럼 지하철 화재는 수많은 사상자를 초래하여 대형사고로 이어질수 있다. 그러므로 객차내 화재 발생시 화재진압 및 피난 대책에 대한 연구가 필요하다.

국외의 경우에 지하철 화재에 대하여 전철내의 객차와 객차사이의 벽을 터서 모든 객차가한개의 긴 객차처럼 연결하고 있어서 비상시 쉽게 탈출할 수 있도록 하였고, 터널내에 출입문 높이의 비상통로가 설치되어 있는 등 승객들의 피난을 빠른 시간안에 이루어질 수 있도록 대책을 마련하고 있다. 그러나 국내의 경우에는 역 중간에 비상 대피를 위한 조치 혹은 객차 내 화재진압 등의 방재 설비 혹은 비상 대피 대책 등이 마련되지 않다. 이러한 화재진압 장치 혹은 피난 대책을 수립하기 위해서는 승객들이 피난하는데 걸리는 시간을 파악하여, 이 피난 시간을 고려하여 피난 대책을 세우는 것이 중요하다. 국내에서는 오혁진[1] 등은 업무용 빌딩의 피난 성능을 검토하여 인명안전설계를 검증하였고, 박재성[2] 등은 지하철 역사의 피난안전성능확보를 위한 설계 기준을 제안하였다. 노재성[3]등은 지하철 역사내 화재발생시 승객들의 생명 안전에 대하여 화재 모델과 피난 모델을 사용하여 정량적 위험도 분석을 수행하였다.

---

\*중앙대학교 기계공학부대학원, 비회원

<sup>†</sup>중앙대학교 기계공학부 교수, 정회원

<sup>†</sup>교신저자 E-mail : cfdmec@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5280 FAX : (02)813-3669

이 연구에서 지하철 역사내 설치된 스크린 도어와 배연설비가 승객들의 생명 안전에 큰 영향을 주는 것을 정량적으로 분석하였다. 그러나 이러한 연구들은 실제 객차를 대상으로 피난시간을 예측한 사례가 없고, 또한 객차내 화재로 인하여 승객들의 피난 속도 저하 및 심리적 영향 등으로 인하여 많은 영향을 받음에도 불구하고, 이에 대한 영향을 고려하지 않아, 실제 객차에서 화재가 발생한 경우 승객들의 비상 피난에 대한 결과라고 보기에는 어렵다.

따라서 본 연구에서는 CFAST V6[4] 와 EXODUS V4[5]를 동시에 수행하여 화재로 인한 피난속도 저하 등을 고려하여 피해의 정도를 예측하였고, 객차내 화재로 인한 피해를 최소화하기 위해 승객들의 피난 대책수립 혹은 객차내 방재 설비가 요구하는 피난 여유시간을 파악하는데 기본적 자료로 활용하고자 한다.

## 2. 시뮬레이션

### 2.1 화재 시뮬레이션

화재 시뮬레이션에 있어서 본 연구에서는 CFAST V6 를 사용하였다. CFAST V6는 내부공간을 동일한 검사체적으로 표현하여 2층의 영역으로 구분하고 그 평균값으로 표현하는 방법으로 연층 높이나 평균 발열량 처리 등을 매우 신속하게 하는 장점을 가지고 있고, 공간의 평균값을 취하는 문제로 인하여 공간내부의 가연물에 의한 연소 시 발생하는 현상의 간단한 예측은 가능하나, 설정 공간에 해당하는 바닥, 벽, 천장의 내장재가 독립적으로 연소에 가담하는 현상의 해석과 스프링클러(Sprinkler) 등에 대한 정확한 특성을 입력하기에는 어려움이 있다.

화재가 발생하였을 때 발열량은 시간에 대한 함수로 아래의 식으로 정의 된다.

$$\dot{Q} = at^2 \quad (1)$$

여기서  $\dot{Q}$ 는 발열량 [kw], t는 화재 성장의 특성시간 [s], a는 화재성장계수 [kw/s<sup>2</sup>]로 화원의 발열량이 1MW에 도달하는 특성시간에 따라 결정되는 수이다.

본 연구에서는 한 객차의 발열량은 소형차량 한 대가 타는 1MW로 설정하였고 화재 성장 모드는 Ultrafast로 가정하였다. 해석대상은 [그림 1]과 같이 19.5(W) × 3.12(D) × 4.18(H) m 크기의 한 객차를 모델링하였고, CFAST V6는 길이와 폭(L/W), 길이와 높이(L/H)의 비가 3보다 작아야 해석 결과의 신뢰성이 보장되므로 4개의 구역으로 나누어서 계산하였다.

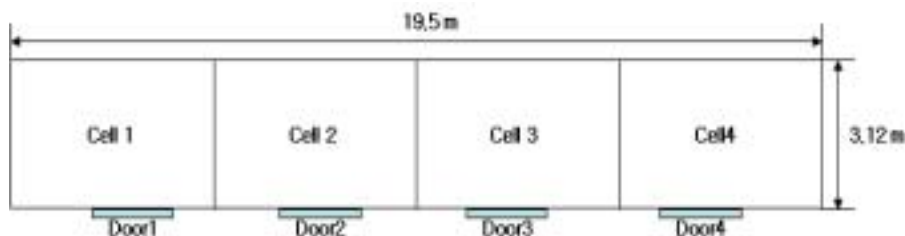


그림 1. 해석 대상

화원은 셀1에 위치하였고 화재발생 이후에 120초가 되었을 때 지하철의 문을 개방하도록 하였다. 120초라는 시간은 지하철 역간의 운행되는 시간이 약 2분이고, 지하철 운행 중에 화재가 발생시 차량의 정차시간과 승객들의 반응시간을 고려하여 설정하였다.

## 2.2 피난 시뮬레이션

피난 시뮬레이션은 EXODUS V4를 이용하였고 화재 시뮬레이션과 동일한 크기로 해석하였다.

EXODUS V4는 비상시와 평상시의 사람들의 움직임과 행동들을 평가하기 위해 사용되어지는 대표적인 피난 시뮬레이션 소프트웨어로써 다수의 사람과 사람, 사람과 구조물 그리고 사람과 환경의 상호작용에 대한 분석을 할 수 있다. 피난 대상자(Passenger), 움직임(Movement), 행동(Behavior), 유독성(Toxicity), 그리고 위험성(Hazard) 등 서로 연관된 다섯 개의 하위 모델로 구성된다.

각 피난자의 피난행위는 규칙 또는 자구학습에 의해 결정되는 학습과정이나 기준에 의해 결정되며, EXODUS V4내에서 시간과 공간의 단위는 2차원의 공간격자와 시뮬레이션 시간에 의해 측정된다. 혼잡도는 승차정원과 승차인원의 비율로서 본 연구에서는 혼잡도가 150% 인 240명을 가정하였다. 혼잡도 150%는 좌석에 모두 앉고 손잡이를 잡고 각 출입문에 8명이 위치해 있으며 중앙에 2열정도 있는 고밀집도이다. 혼잡도가 150%만 넘어도 중앙에 3열정도 승객들이 서 있어 꼼짝하기도 힘든 상태라고 할 수 있다.

총 240명의 승객들에 대한 각각의 속성은 [표 1]에 나타내었다.

표 1. 승객 모델에 대한 계산 조건

	속 성	입력 수치 범위
전체 승객 모델	이동속도	1.2~1.5 [m/s]
	반응시간	0~30 [s]
	몸무게	40~90 [kg]
	키	1.5~2.0 [m]
	인접한문	Nearest Door
	이동성	1

각 출구의 피난 방출률은 HMSO(The Building Regulation 1991)모델을 사용하였고, 실제적인 공간상의 특성을 고려하기 위해 출구에서의 피난자 방출율을 1.33 occ/m/s로 설정하고 ±5%로 여유를 주었다.

승객들의 최종 피난 시간은 마지막 승객이 출구로 완전히 빠져나가는 시점을 기준으로 가정하였고 승객들은 인접한 출구로 대피하게 된다.

본 시뮬레이션에서는 유독성의 모델인 Purser의 FED(Fractional Effective Dose)모델[6]을 사용하였고, 독성에 관한 식은 다음과 같다.

$$FIN=(FICO+FICN+FLD)\times VCO_2+FIO \quad (2)$$

여기서,

<i>FIN</i>	Fractional of an incapacitating dose
<i>FICO</i>	Fractional of an incapacitating dose of CO
<i>FICN</i>	Fractional of an incapacitating dose of HCN
<i>FLD</i>	Fractional of an irritant dose
<i>VCO<sub>2</sub></i>	Multiplication factor for CO <sub>2</sub>
<i>FIO</i>	Fractional of an incapacitating dose of low oxygen hypoxia

을 나타낸다.

승객들의 심리적인 행동인 극한행동(Extreme Behaviour), 조바심(Impatient) 등의 입력조건들은 화재상황

에서 어떠한 심리인지 정해진 기준이 없어 기본값을 사용하여 계산하였다.

본 연구에서는 화재로 인한 연기가 피난 시간에 미치는 영향을 파악하기 위해서 CFAST V6로부터 화재 시뮬레이션의 결과를 이용하여 피난 시뮬레이션에 적용하였고, 화재의 영향을 파악하기 위해 화재가 없는 일반적인 피난시간을 계산하였다.

### 3. 결과 및 고찰

객차내 화재의 영향없이 일반적인 상황에서 승객들이 얼마나 빨리 탈출할 수 있는지 미리 파악해 보기 위해서 간단한 수계식을 이용하여 피난 시간을 계산하였다.

화재가 발생하지 않은 일반적인 피난시간은 대부분의 피난 시뮬레이션 및 위험도 분석에서 기본적으로 사용하고 있는 MacLennand[7]의 피난속도 계산을 사용하였다. [그림 3]은 간단한 수 계산을 통하여 승객수 및 피난 방출률에 따른 피난시간을 계산하여 나타내었다. 계산된 피난 시간은 사람의 심리 상태 및 화재의 영향을 고려하지 않고 계산된 값이다.

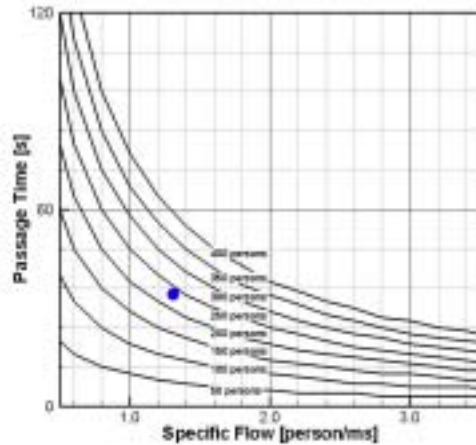


그림 3. 피난방출률에 대한 피난 시간

피난자 방출률이 1.33[person/ms]일 때, 혼잡도 150%인 240명이 피난하는데 걸리는 시간은 약 36초 정도 소요되는 것을 확인 할 수 있다.

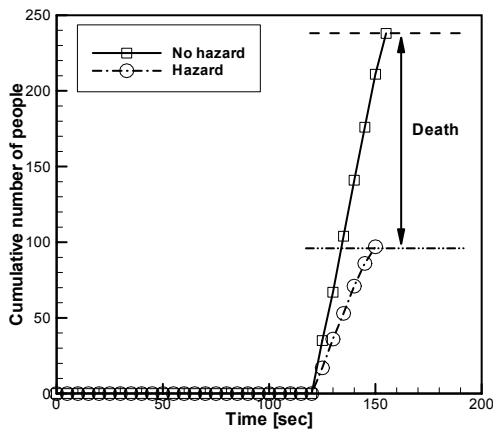


그림 4. 시간에 따른 피난자 수

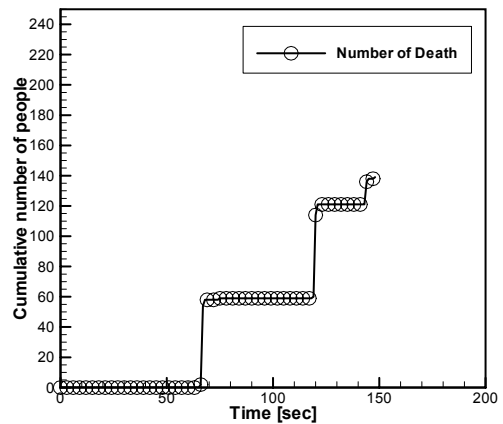


그림 5. 시간에 따른 사망자 수

[그림 4]는 EXODUS V4를 이용하여 화재의 영향을 고려하였을 경우와 고려하지 않았을 경우에 대하여 시간에 따라 피난에 성공한 사람수를 나타낸 그림이다. 화재의 영향을 고려하지 않은 경우에는 MacLennand 수계산식을 이용한 결과와 같이 객차 문 개방 후 약 36초 동안에 객차 안에 있는 240명의 승객들이 모두 피난하게 된다. 반면에 화재의 영향을 고려한 피난 시뮬레이션 결과에서는 화재로 인한 열 및 연기의 독성으로 인해 탈출속도의 저하 및 사망자가 발생하게 된다. [그림 4]에서 보는 바와 같이 240명의 승객들이 모두 탈출에 성공하지 못하고 33초 동안에 101명만이 객차 문으로 나오게 되는 것을 알 수 있다. 이 기간동안에 탈출 방출율은 2배 이상 감소하게 되어 화재의 영향을 고려한 피난 시뮬레이션 결과는 화재의 영향을 고려하지 않은 결과와 상당히 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있다. [그림 5]는 화재의 영향을 고려하였을 경우 시간에 따른 사망자 수를 나타낸 그림이다.

[그림 5]에서 139명의 사망자는 66초부터 147초까지 발생하였으며 이를 통해 사망자는 120초 이후에 탈출 시간의 지연으로 탈출하지 못하여 사망 한 것으로 사료된다. [그림 6]은 시간에 따른 연층 높이를 나타낸 그림이다. 그림에서 보는 바와 같이 연기층은 화재 발생 약 45초 이후부터 위험 높이인 1.8m에 도달하게 되고, 그 이후 객차 문이 열릴 때까지 계속 하강하는 것을 볼 수 있다. 이러한 결과를 통해 승객들은 약 45초 이후부터 위험한 상태에 놓기에 될 것으로 생각된다.

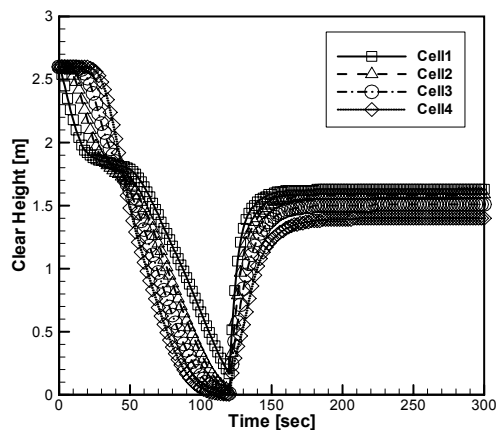


그림 6. 각 셀의 시간에 따른 연층높이

[그림 5]와 [그림 6]의 결과에서 보는 바와 같이 화재를 고려한 피난 시뮬레이션 결과를 통해 객차 문 개방 이후 사망자가 발생한 이유는 피난 과정 중 약 30초 동안 유독가스와 연기층의 영향이 가장 컸던 것으로 판단된다. 이러한 결과를 통하여 화재로 인한 영향을 최소화 할 수 있는 제연설비 또는 화재진압시스템 등이 필요하며, 승객들이 안전하고 빠르게 탈출할 수 있도록 36초 이상의 피난시간을 확보해 줄 수 있어야 한다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 한 객차내에 화재 발생시 발생하는 유독가스나 연기를 고려하여 동시에 화재시뮬레이션과 피난 시뮬레이션을 수행하였다. 본 연구에서 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 한 객차의 시뮬레이션을 통해 화재가 발생하지 않은 피난 시간은 약 36초이고 화재발생시 139명의 사망자가 발생하였고 문의 개방 이후에 101명의 피난 시간은 약 32초로 확인 되었다. 결론적으로 유독가스와 연기에 따라 피난 시간에 영향을 받으므로 일반적인 피난시간인 36초를 유지하기 위한 비상탈출구나 연기를 제어 할 수 있는 제연설비를 설계를 검토 할 필요가 있다.

2) 지하철은 제한된 터널에서 운행하기 때문에 운행 중 화재가 발생하면 비상탈출구가 없기 때문에 더욱이 36초의 피난 시간만에 탈출이 어렵다. 따라서 비상정차 후 터널중앙에서 신속하게 대피할 수 있는 피난로 설치 등의 피난대책을 수립하는 것이 매우 중요하다.

후기

본 연구는 서울시 산학연 협력사업 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

1. 오혁진, 백승태, 김우석, 이수경(2003년), “업무용 빌딩의 피난 성능 검토에 관한 연구” 한국화재·소방학회, 제 17권 제 3호
2. 박재성, 윤명오, 이용재(2003년), “地下鐵 驛舎의 救難 安全 性能 確保를 위한 設計基準에 관한 研究”
3. Jae Seong Roh, Hong Sun Ryou, "Quantitative Risk Analysis using CFD in Subway Station Fire", Reliability Engineering and system safety(submitted)
4. Richard D. Peacock, Walter W. Jones, Paul A. Reneke, Glenn P. Rorney(2005), "CFAST-Consolidated Model of Fire Growth and Smoke Transport(Version 6) User's Guide"
5. E.R. GALEA, S.GWYNNE, P.J.LAWRENCE, L.FILIPPIDIS, D.BLACKSHIELDS and D.COONEY(2004) "BuildingEXODUS V 4.0 USER GUIDE AND TECHNICAL MANUAL"
6. David Purser, "Behavioural impairment in smoke environments", Toxicology, 1996.
7. SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2003, 3rd edition, Society of Fire Protection Engineers and National Fire Protection Association.