

## 객차 화재발생시 승강장 배기방식에 따른 화재 및 피난모사 연구

장희철 1, 윤경범 2\*, 박리진 3, 김태국 4\*\*, 박원희 5\*\*\*, 김동현 6\*\*\*, 손봉세 7\*\*\*\*  
중앙대학교 대학원 1, 3, 중앙대학교 학생 2\*, 중앙대학교 기계공학부 4\*\*,  
한국철도기술연구원 5\*\*\*, 6\*\*\*, 경원대학 소방시스템학과 7\*\*\*\*

### Study on Fire and Evacuation Characteristics of a Passenger Train Fire for Different Operations of the Platform Ventilation System

Hee-Chul Chang 1, Kyung-Beom Yoon 2\*, Lee-Jin Park 3, Tae-Kuk Kim 4\*\*,  
Won-Hee Park 5\*\*\*, Dong-Hyun Kim 6\*\*\*, Bong-Sei Son 7\*\*\*\*

Graduate School, Chung-Ang University 1, 3, Chung-Ang University 2\*, Mechanical  
Engineering Department, Chung-Ang University 4\*, Track & Civil Engineering Research  
Department 5\*\*\*, 6\*\*\*, Fire Protection System Engineering Department, Kyung-Won College 7\*\*\*\*

#### 1. 서론

최근 10여 년간 대표적인 지하철 화재로는 대구 중앙로역 방화사건(2003년), 오스트리아 Kitzseinhorn funicular 화재(2000년), 서울지하철 철산역에서 광명으로 이동하는 전철 내에서 방화(2005년) 등, 지하철 화재는 대형 인명손실과 막대한 재산피해 뿐만 아니라 화재진압과 구조의 큰 어려움이 있다. 도심의 대표적인 대중교통수단임을 감안할 때 지하철 화재는 시민들의 일상적인 안전에 매우 큰 위협요인으로 부각되고 있다. 화재로 인한 사망의 80% 이상이 유독가스에 의한 질식사이다. 특히 지하공간은 밀폐구조 형태를 보이며, 외부로부터의 산소공급이 제한될 수 있기 때문에 시간의 경과에 따라 연소상태가 불안정하여 대량의 연기 및 유독가스를 발생시킬 수 있음으로 인명피해는 더욱 클 것으로 예상된다. 지하철 화재에 대한 연구로는 제한된 열방출율의 풀화재를 이용한 지하철 승강장에서의 화재 열거동특성을 검토한 바 있으며<sup>1)</sup>, 지하역사에서 화재 발생으로 인한 연기 및 열 유동의 분석 및 화재영향평가를 위하여 수치해석적 방법을 사용하였다<sup>2,4)</sup>. 본 연구는 지하철역사 내 열차 화재발생시 배기운전조건에 따른 화재특성 예측을 목적으로 수치해석을 수행하였다. 연구결과에 의하면 고려된 연구조건 중 전구역에서 배기하는 방식이 제연에 가장 효과적인 것으로 나타났다.

#### 2. 본론

##### 2.1 연구 대상 지하철 역사 및 열차 개요

본 연구는 서울 지하철 4호선 수유역에 화재가 발생한 열차를 고려하여 수치해석을 수행하였다. 수유역사 특징은 다음과 같다. 크기(16.0m\*185.0m\*5.5m), 상대식(지하역)상·하단 직선 승강장 구조이며, 지하 1층 대합실 지하 2층 승강장으로 구성되어 있다.

비상계단은 승강장에 길이방향 좌·우에 각각 1개씩 설치되어 있다. 환기실은 대합실 양 끝단에 각각 위치하며, 동일한 성능의 상·하부배기가 설치되어 승강장 길이방향의 좌·우측으로 나뉘어 배기를 제어한다. 열차(4.5m\*19.5m\*3.4m)는 10량으로 편성되었다.

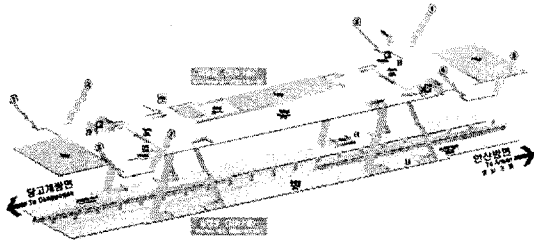


그림 1. 열차 개요도



그림 2. 열차 단면도

### 2.2 3차원 열 및 연기유동 시물레이션

본 시물레이션에서는 수유역사, 열차 및 풍량을 실물을 그대로 적용하였다. 격자구성은 약 96만개로 생성하였다. 수치해석을 위하여 사용된 소프트웨어는 미국 표준 연구소 (NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) Version 4.06<sup>5)</sup>이며, 해석에 사용된 지배방정식은 연소방정식, 화학종보존방정식, 운동량보존방정식, 에너지보존방정식 및 점성응력항은 LES(Large Eddy Simulation)를 사용하고 있다. 연소현상을 해석하기 위하여 혼합분율 연소모델 (Mixture Fraction Combustion Model)을 채용하였다. 복사열전달은 유한체적법(Finite Volume Method)을, 비회색가스 물성치는 FDS에서 제공하는 밴드모델을 이용한다.

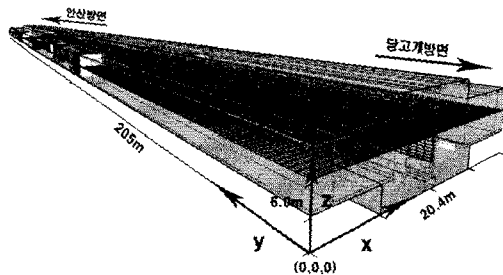


그림 3. 격자 구성도 및 역사크기

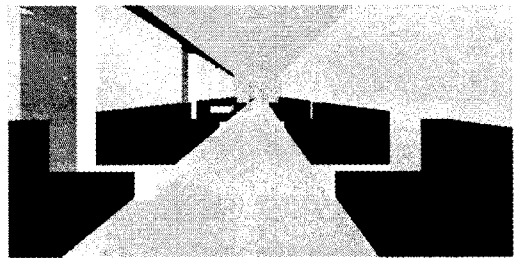


그림 4. 열차 내부 모습

시물레이션의 경계조건은 표1과 같다. 화재지점은 그림 5와 같이 당고개방면 선로의 첫 번째 객차 내부에서 발생한 것으로 가정하였으며, 4개의 제연구역으로 나뉘며 최적의 제연운전 방법에 따른 화재 특성을 예측하려 한다. 열차가 정차된 승강장의 출입구만 개방된 것으로 가정 하였으며, 모든 결과는 승강장 및 열차 바닥을 기준으로 1.5m 높이(중심 호흡높이)를 기준으로 비교 분석하였다.

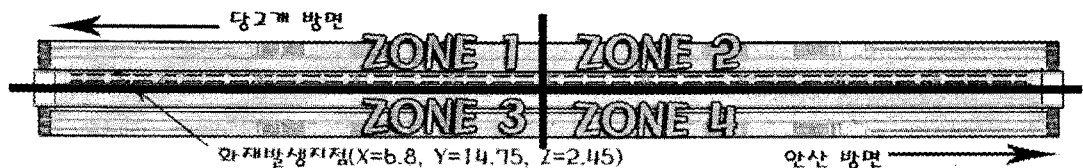


그림 5. 화재발생지점 및 Zone view

표 1. 수치해석 조건<sup>6)</sup>

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
초기 온도    화재 하중	20 CENTIGRADE    35MW(Pick 도달 시간 5분[300초])			
화재 위치    화재 면적	첫 번째 열차 의자 위    0.5m*1m			
화재 성장속도	Power Law Relation $Q=at^2$ ( $a=1.56$ )			
상부배기    승강장급기	3.942 m/s    3.198m/s			
터널연결부, 계단    하부배기	Open    Close			
시뮬레이션 수행시간	600초(10분)			
차량 재료특성	벽·천장(Aluminum), 의자(Stainless Steel), 바닥(Synthetic Rubber)			
승강장 배기방식	Zone 1,2,3,4 모두 배기	Zone 1 배기 Zone 2,3,4 멈춤	Zone 1 배기 Zone 2,3,4 급기	Zone 1,2 배기 Zone 3,4 멈춤

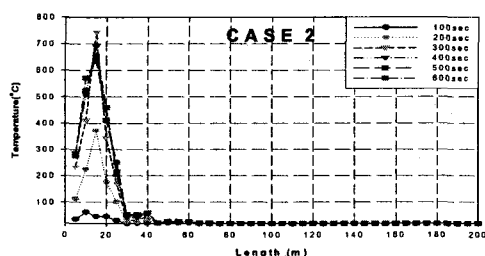
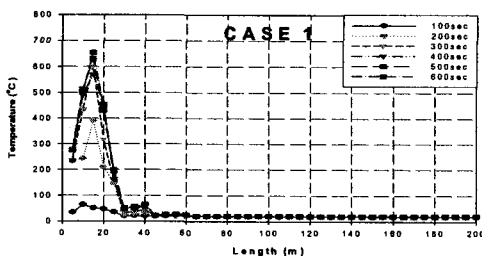
### 2.3 피난 시뮬레이션

본 연구에서 사용한 SIMULEX는 건물 및 터널, 지하철 등의 화재발생시 인간의 심리인자 및 행동특성을 감안한 2차원 피난대피시뮬레이션 전용코드이다. CAD와 인터페이스가 가능함으로 수유역사의 CAD도면을 이용하여 승강장으로부터 피난 완료시간을 계산 하였다. 대피인원 산정은 NFPA 130을 참조하여 수유역사의 승·하차인원으로 오전 7~8시를 기준으로 15분간 대기인원(283명)과 열차수용인원(160명\*10량\*2) 3,200명, 총 3,483명으로 시뮬레이션을 수행하였다. 발화 후 바로 화재를 인지하고 피난이 이루어지도록 설정하였으며, 피난 인원은 열차 내부와 승강장에 고르게 분포시켰다. 인원구성은 성인 남자 35%, 성인 여자 40%, 어린이 15% 및 노인 10%로 설정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 온도 비교

열차가 정차된 승강장(x=5.0m)의 온도는 모든 Case에서 화재가 발생한 첫 번째 객차 부분을 제외하고 시뮬레이션이 수행된 600초 동안 NFPA 130에 규정된 대피로 온도인 60℃를 초과하지 않았다. 모든 Case에서 y=10.0m 지점이 최고온도를 보였으며, Case1의 경우 다른 Case와 비교하여 91℃로 약 7~8℃정도 높았으며 60℃에 도달하는 시간도 가장 빨랐다. 객차 내(x=7.85m)에서는 모든 경우 100초와 300초 사이에 가장 큰 폭으로 상승하였고 세 번째 객차 이후로 화재에 의한 온도상승이 거의 없는 것으로 나타났다. 최고온도는 Case4에서 760℃로 나타났으며, 다른 Case에서는 최고온도가 y=15.0m지점에서 나타난 반면 Case3은 급기의 영향으로 y=10.0m지점에서 나타났다. 열차가 정차된 반대편 승강장(x=15.4m)에서는 열차에 의한 열 차단으로 인해 온도의 상승폭이 매우 작아 대피로 온도기준 이하의 온도분포를 나타냈고 모두 배기를 한 경우 가장 안정적인 분포를 나타냈다. Case2와 Case4는 매우 비슷한 온도분포를 보였으며, 급기에 의한 대류효과로 Case3가 200초 이후 가장 큰 온도 변화를 보였다.



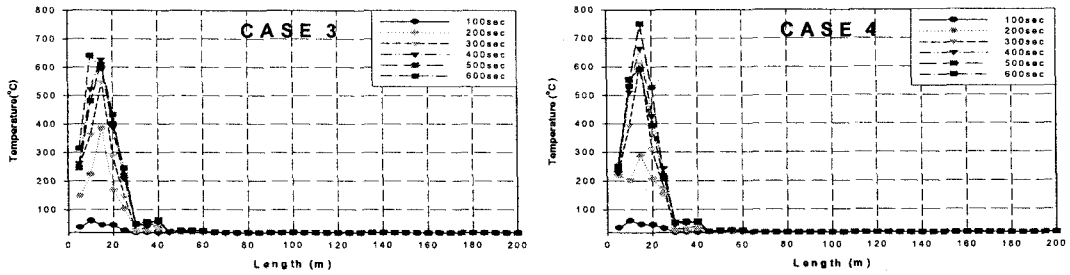


그림 6. 화재가 발생한 열차 내부 온도 분포(y축 기준, x=7.85m, z=3.3m)

### 3.2 연기농도 비교

열차가 서있는 승강장(x=5.0m)의 연기농도는 화재발생지점을 기준으로 길이방향(y축 방향)의 전(y=10m) 후(y=40m)에 높은 연기농도로 나타났다. 특히 모든 Case에서 y=10m지점에서 가장 높은 연기농도를 보였으며, 각각 Case1-300초, Case3-500초, Case4-400초, Case2-600초에 도달하였다. 모든 Case에서 비상계단의 자연배기에 의해 연기농도가 감소하는 경향을 보였다. 75m~205m구역에서는 400초경과 후 모든 ZONE에서 배기를 한 Case1이 가장 낮았으며, ZONE 1에서만 배기하고 나머지 구역에서는 급기를 실시한 Case3에서 가장 높은 연기농도 분포를 보였다. 객차 내의 연기농도의 최고점은 모든 Case에서 y=15.0m지점에 나타났으며, 가장 많은 연기를 배출한 시간은 Case1-400초, Case4-500초, Case2, 3-600초이다. 연기농도의 최고점에서 가장 높은 연기농도 분포를 나타낸 Case1이 가장 낮은 연기농도 분포를 나타낸 Case4의 경우보다 약 78% 높았다. 열차가 서있는 반대편 승강장(x=15.4m)은 온도분포와 마찬가지로 열차가 정차된 승강장과 객차 내에 비해 낮은 연기농도 분포를 보이며, 모두 배기를 실시한 경우 가장 낮은 연기농도 분포를 나타냈다. Case1, 2, 4는 비슷한 연기농도분포 경향을 나타냈지만 급기를 실시한 Case3은 400초 이후 승강장 전방에 걸쳐 높은 연기농도분포를 보였다.

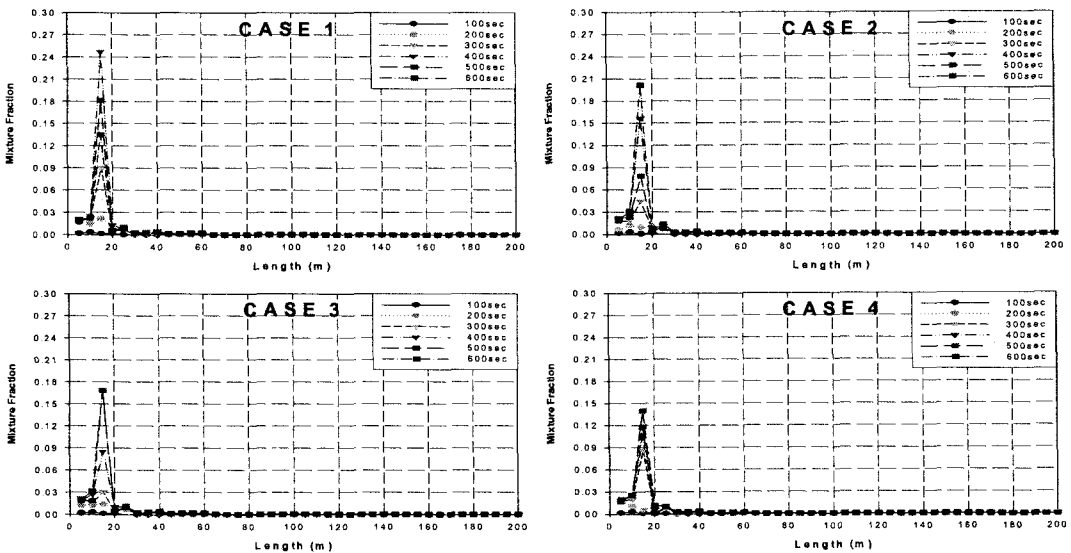


그림 7. 화재가 발생한 열차 내부 연기농도 분포(y축 기준, x=7.85m, z=3.3m)

### 3.3 산소함유량 및 가시거리 비교

승강장 전역을 기준으로 산소 함유량이 Case1, 4, 2, 3 순으로 높게 나타났다. 비상계

단 주변의 산소함유량은 자연배기 및 공급으로 높게 나타났으며, 열차 내 화재 주변을 제외한 나머지 구간에서 산소함유량이 10% 이상을 유지하였다. 화재가 완전히 성장하는 300초 이후 산소 함유량이 급격히 감소하였고 Case 1, 4에서 화재가 발생한 방향의 승강장에서는 화재지점에서 45m(y=60m) 떨어진 지점까지 산소 함유량이 변화가 컸으며, 이후에는 완만한 변화를 보였다. 그러나 Case 3, 4에서는 160m 떨어진 지점까지 산소함유량이 크게 떨어졌다. 열차 내부에서도 45m 이후 함유량이 21%를 유지하였다. 가시거리도 산소함유량이 유사하게 화재발생지점에서 45m(y=60m) 떨어진 지점까지 열차 내부 및 열차가 정차한 승강장에서 시야가 급격히 좁아졌다. 열차가 정차된 승강장에서는 화재구역은 배기 그 외 지역은 급기를 수행한 Case 3에서는 105m~140m까지 시계가 다른 Case 비하여 약 5~10m 방해를 받는 것으로 나타났다. 또한 열차가 정차된 반대편 승강장에서는 모든 Case에서 600초 동안 30m의 시야를 확보할 수 있었다.

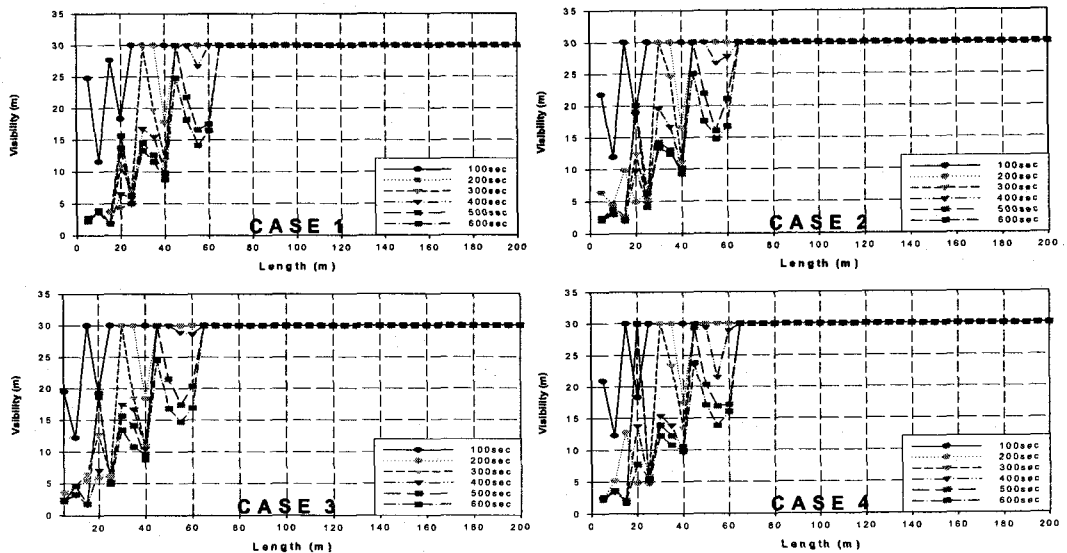


그림 8. 화재가 발생한 열차 내부 가시거리 분포(y축 기준, x=7.85m, z=3.3m)

### 3.4 피난시물레이션 결과

열차 내부와 승강장에 대기하던 피난인원 3,483명이 승강장에서 대합실로 피난을 완료하는 시간은 4분 17.6초로 나타났다. 열차 출입구와 비상계단 입구에서 심한 병목현상이 일어났다. NFPA 130의 규정에 따른 피난인원 3,483은 승강장 및 객차 내부를 가득 메웠으며, 시물레이션 결과는 NFPA 130 피난허용시간인 4분을 약 17.6초(38명) 초과하였다. 열 및 연기유동 시물레이션의 결과에서도 안전하게 피난을 할 수 있는 결과이다.

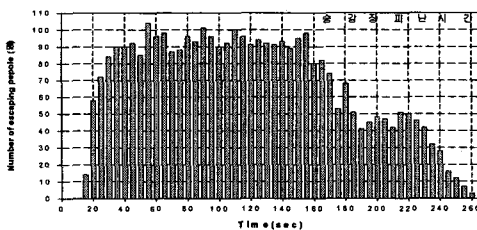


그림 9. 시간대별 승강장 피난인원

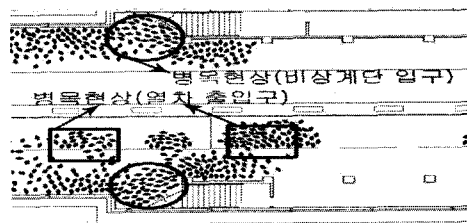


그림 10. 위치별 병목현상

## 4. 결론

본 연구는 역사 내 열차 화재발생시 승강장의 배기 운전방식에 따른 화재 및 피난특성을 파악하기 위하여 NIST에서 개발한 FDS v4.06과 Simulx를 이용하였다. 실제 역사와 유사하게 모델링을 하였으며, 풍량은 팬이 100% 성능으로 작동되는 것으로 가정하였다. 4개의 제연구역으로 구분하여 전 구역 배기, 화재지점만 배기 나머지 정지, 화재지점 배기 나머지 급기 및 화재지점 승강장 배기 반대편 승강장 정지로 구분하여 열, 연기, 가시거리 및 산소농도 분포를 높이 1.5m(중심호흡높이)를 기준으로 비교하였다. 피난시물레이션은 NFPA 130을 기준으로 피난인원 산정하여 피난시간을 계산하였다.

화재발생지점에서 열차 길이방향으로 전후 15m 까지 열 및 연기의 확산이 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있었으며, 화재지점과 인접한 승강장 부분을 제외하고 그 외 승강장에서는 피난 가능 온도인 60 *CENTIGRADE* 이하이며, 열차 내부의 최고 온도는 760 *CENTIGRADE*, 열차가 정차된 반대편 승강장에서는 열차가 열의 거동을 막는 효과로 24 *CENTIGRADE* 이하로 나타났다.

화재가 완전히 성장하는 300초 이후에 급격히 연기농도가 높아졌으며, 전 구역 배기를 할 경우에 가장 효과적이며, 화재구역은 배기 나머지 구역에서 급기를 할 경우가 가장 비효율적으로 나타났다.

승강장 전 구역을 기준으로 산소 함유량이 Case1, 4, 2, 3 순으로 높게 나타났다. 비상계단 주변의 산소함유량이 자연배기 및 공급으로 다소 높았으며, 열차가 정차된 반대편 승강장에서는 가시거리 및 산소함유량에 큰 변화가 없었다. 가시거리는 산소함유량과 유사하게 화재발생지점에서 45m(y=60m) 떨어진 지점까지 열차 내부 및 열차가 정차된 승강장에서 시야가 급격히 좁아졌으며, 이후에는 안정적으로 나타났다.

## 감사의 글

건설교통부가 출연하고 한국건설교통기술평가원에서 위탁시행 한 2003년도 건설핵심기술연구개발사업인 “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업” (03산화연C03-01)에 의한 것임

## 참고문헌

1. Hasemi, Y. et al. “Research needs on the fire safety of subway station fire disasters, regulations, research efforts and recent smoke movement tests in subway stations in Japan,” 6th Asia-Oceania Symposium on Fire Science and Technology 17-20 March, pp797-804 (2004)
2. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현 “지하역사에서 화재발생시 자연풍 및 강제배연의 유무에 따른 열 및 연기거동 특성 연구”, 한국화재·소방학회 논문집, 제19권, 제1호, pp.80-86 (2005)
3. 장희철, 김태국, 박원희, 손봉세, “지하철 역사에서 화재발생시 배연 팬의 운전조건에 따른 화재특성 연구”, 2005년도 공동추계학술논문발표회 발표논문집, pp234-240 (2005)
4. 박외철 “대구 지하철역 제연의 문제점과 대책, II.배기방식 제연설비의 풍량”, 한국화재·소방학회 논문집, 제17권 제4호, pp105-110 (2003)
5. K. B. McGrattan, “Fire Dynamics Simulator(Version.4) Technical Reference Guide”
6. National fire codes, “Guide for smoke movement system in malls, atria and large area.” NFPA 92B, 2005 edition. (2005)