

지하철 승강장 화재에 대한 배기장치 운전방식의 변화에 따른 제연 특성 연구

장희철 1, 윤경범 2, 김태국 3*, 박원희 4**, 손봉세 5***
중앙대학교 대학원 1, 2, *중앙대학교 기계공학부 3, **한국철도기술연구원 4,
***경원대학 소방시스템학과 5

Study on Smoke Extraction Performance for Different Operation Modes a Fire on the Subway Platform

Hee-Chul Chang 1, Kyung-Beom Yoon 2, Tae-Kuk Kim 3*,
Won-Hee Park 4**, Bong-Sei Son 5***
Graduate School, Chung-Ang University 1, 2, *Chung-Ang University 3,
**Track & Civil Engineering Research Department 4,
***Fire Protection System Engineering Department, Kyung-Won College 5

1. 서 론

최근 대구 중앙로역 방화사건(2003년), 오스트리아 Kitzseinhorn funicular 화재(2005년), 광명역으로 이동 중인 전철 내의 방화(2005년) 등 국내 뿐 아니라 국외에서도 지하철 화재가 지속적으로 발생하였다. 지하철 화재는 지하공간이라는 환경적인 특성상 화재진압과 구조에 큰 어려움이 따르기 때문에 사고발생시 대형 인명손실과 막대한 재산피해로 이어질 가능성이 매우 높다. 지하철이 도시의 대표적인 대중교통수단임을 감안할 때 지하철 화재는 시민들의 일상에 매우 큰 위협요인이 되고 있다. 특히 지하철의 역사 및 분선 터널은 긴 폐쇄공간과 유사한 구조이며, 폐쇄공간은 외부와의 산소 유출입에 상당한 시간이 소요될 수 있다. 따라서 적절한 제연운전모드 및 충분한 제연시스템이 설치되지 않을 경우 화재발생시 피난경로가 연기를 확산시키는 굴뚝효과를 일으킬 수 있으며, 연소상태가 불안정하여 다량의 연기 및 유독가스를 발생시킬 수 있다. 화재로 인한 사망의 80% 이상이 유독가스에 의한 질식사임을 감안하면 지하공간에서의 인명피해는 더욱 클 것이다. 최근 국내외적으로 이러한 문제점의 심각성을 인식하고 피해를 최소화하기 위하여 지하철역사 및 터널부에 화재발생시 화재·피난특성, 열 및 연기거동 영향 등의 실험적·수치적 연구가 활발히 진행 중이다¹⁻⁵⁾. 본 연구는 실험을 통하여 측정된 풍량, 풍향 및 유속 등을 시뮬레이션에 그대로 적용하여 지하철역사 승강장에 화재발생시 현재 광주시의 상무역에서 운영 중인 비상시의 배기방식과 이 역사에서 비상시를 고려한 또다른 배기 방식을 적용하였을 때의 다른 열 및 연기거동 특성 예측을 목적으로 수치해석을 수행하였다.

2. 본론

2.1 연구 대상 지하철 역사 및 열차 개요

본 연구는 광주 지하철 상무역을 연구대상으로 고려하여 수치해석을 수행하였다. 상무역사 특징은 다음과 같다. 상대식(지하역) 상·하단 직선 승강장 구조이고, 승강장의 크기는 38.0m[W]*112.0m[L]*6.0m[H], 지하 1층 대합실 지하 2층 승강장으로 구성되어 있으며, 비상계단은 승강장에 4개가 설치되어 있다. 환기실은 대합실 양 끝단에 각각 위치하고 있으며, 동일한 성능의 공기조화기, 상·하부배기가 설치되어 승강장 길이방향의 좌·우측으로 나뉘어 환기 및 배기를 제어하게 된다. 열차의 크기는 2.65m[W]*18.2m[L]*4.0m[H]*4량 총 72.6m[L]로 편성되었다. 연구 대상 지하철 역사의 개요도 및 격자 구성도를 그림 1과 2에서 각각 보여주고 있다.

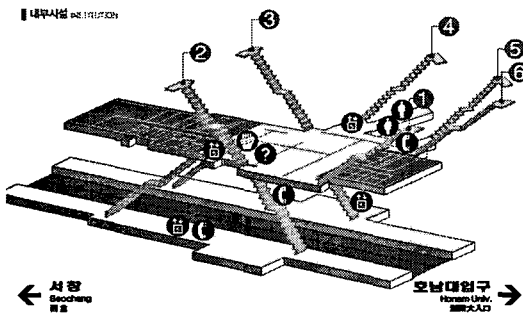


그림 1. 역사 개요도

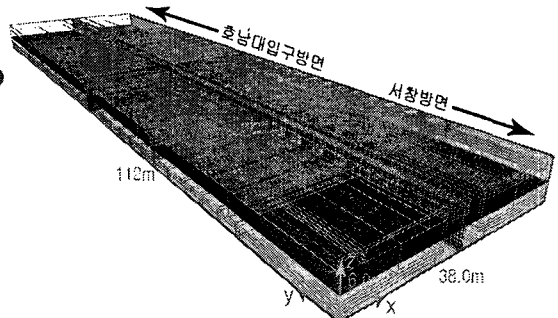


그림 2. 격자 구성도

2.2 연구대상 지하철 역사의 배연 방식 및 풍량측정 실험

본 연구에서 고려된 상무역사는 그림 3과 같이 2개의 제연구역으로 나뉘어 급·배기가 가동된다. 각 가능한 배기방식을 적용하였을 경우 그림 4(a)와 같이 52개의 승강장 레지스터의 풍량을 측정하였다. 측정한 데이터로부터 배기팬의 성능 비율을 산출하여 A구역의 상부배기와 B구역의 급·배기 풍량을 환산하였으며, 그림 4(b,c)에 레지스터 측정 유속결과를 보여주고 있다.

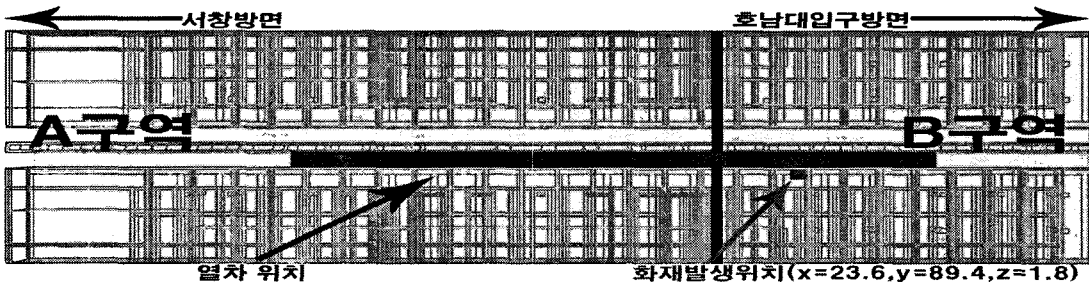


그림 3. 화재발생위치 및 제연시스템 구역

2.3 3차원 열 및 연기유동 시뮬레이션

본 시뮬레이션에서는 상무역사 구조와 열차 모형을 유사하게 모델링 하였으며, 제연풍량, 풍향, 터널부의 유속 등은 측정된 데이터를 그대로 적용하였다. 격자구조는 약 108만개로 생성하였으며, 열차가 역사 내에 정차된 것으로 가정하였다. 승강장 끝단, 터널이 시작되는 지점에서 시간의 경과에 따른 유속 변화를 그대로 고려하였고, 수치해석을

위하여 사용된 소프트웨어는 미국 표준 연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) Version 4.06⁶⁾이다. 해석에 사용된 지배방정식은 연소방정식, 화학종보존방정식, 운동량보존방정식, 에너지보존방정식 및 점성응력항은 LES(Large Eddy Simulation)를 사용하고 있다. 연소현상을 해석하기 위하여 혼합분을 연소모델(Mixture Fraction Combustion Model)을 채용하였다. 복사열전달은 유한체적법(Finite Volume Method)을, 비회색가스 물성치는 FDS에서 제공하는 밴드모델을 이용한다.

승강장의 제연방식에 따른 열 및 연기거동 특성 예측을 위하여 배연장치가 작동되지 않을 경우, 화재발생 구역 배기 반대편 급기와 화재발생 구역 배기를 고려하여 수치해석을 수행하였다 해석조건을 표 1에 나타내었으며, 그 중 화재구역 배기 나머지 구역 정지인 화재 운전모드는 광주지하철 상무역에서 화재발생시 제연 시나리오이다.

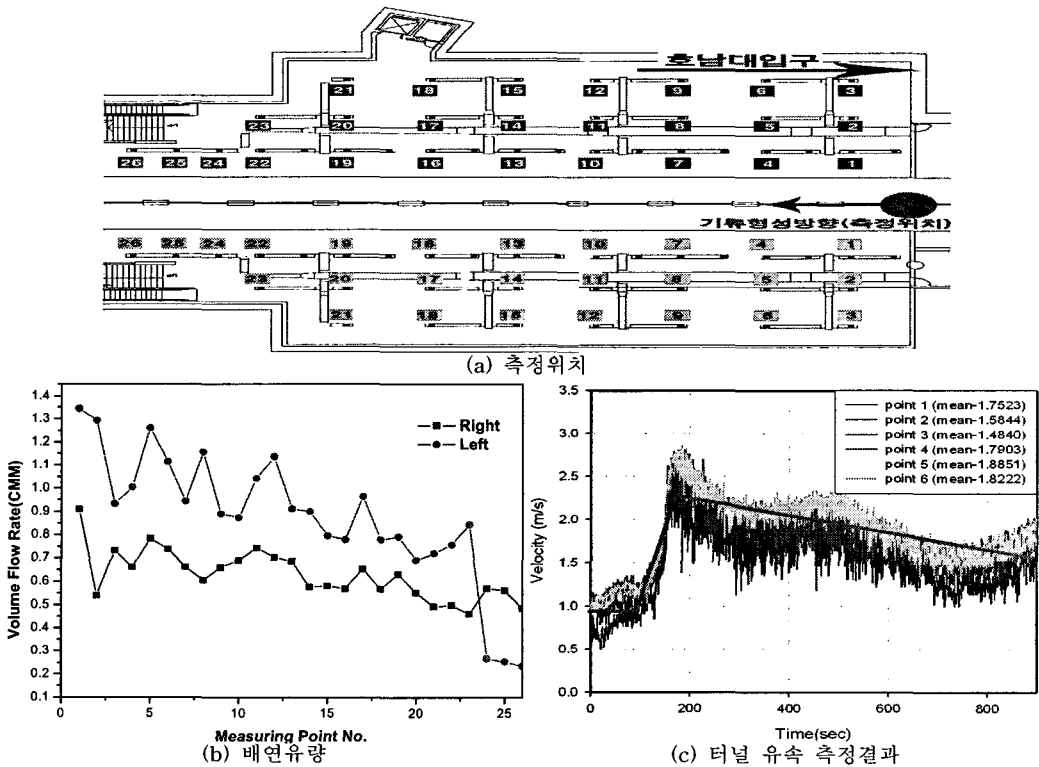


그림 4. 상무역 배연유량, 기류 측정위치 및 결과

표 1. 수치해석 조건

	화재구역만 배기	급·배기 혼용	전 구역 정지
초기 온도 화재 하중	20°C 0.2MW(Pick 도달 시간 10초; 실험화재하중)		
화재 위치 화재 면적	승강장(x=24.1m, y=89.9m, z=1.8m) 1m*1m		
화재 성장속도	Power Law Relation $Q=at^2$ ($\alpha=2$)		
터널연결부, 계단 하부배기	Open Close		
시뮬레이션 수행시간	900초(15분)		
승강장 배기방식	A구역정지 B구역배기	A구역급기 B구역배기	A구역정지 B구역정지

3. 결과 및 고찰

실험 조건과 동일하게 설정하기 위해 화재하중을 0.2MW로 하였고, 열차가 선로에 정착한 것으로 설정하였다. 실험시 측정된 터널연결위치의 풍향 및 풍속을 동일하게 적용하였으며, 결과는 터널의 바닥기준 3.2m 높이(승강장의 바닥 기준 1.6m 높이) 위치에서의 온도, 연기농도 및 가시거리 분포의 결과를 비교하였다.

3.1 온도 분포 비교

모든 승강장 배기방식에서 열차에 의한 열확산의 차단과 측정시 다소 높게 나타난 기류의 유속 영향으로 화재가 발생한 반대편 승강장의 B구역은 온도가 거의 상승하지 않았다. 기류는 20°C로 유입되기 때문에 온도를 하강시킬 뿐만 아니라 기류막을 형성하여 전동차의 전두부로의 열 확산을 차단하였다. A구역은 정지시키고 B구역은 배기시킨 경우(화재구역 배기)와 A, B 모두 정지시킨 경우(전 구역 정지)의 온도분포는 거의 차이를 보이지 않았다. 이와 같은 결과는 승강장에 설치된 레지스터의 계측된 유속이 터널 시점에서 계측된 유속에 비하여 최대 10배 이상 높게 나타났기 때문으로 사려된다. A구역을 급기한 경우(급·배기 혼용)에서는 다른 두 경우(화재구역 배기 및 전 구역 정지)와 비교하여 급기로 인한 유동의 교란으로 서창방면의 승강장 끝단에서의 온도분포가 낮았다. 화재지점을 제외한 구역에서 400초와 600초 사이에 급·배기 혼용한 경우가 가장 높은 온도분포를 나타내었으며 B구역의 승강장 벽 주위에서 온도 상승이 빠르게 진행되었다. 그림 5는 선로바닥 기준 $z=3.2m$ 에서 화재가 발생한 후 500초경과 후의 화재가 발생한 승강장의 온도분포를 보여주고 있다.

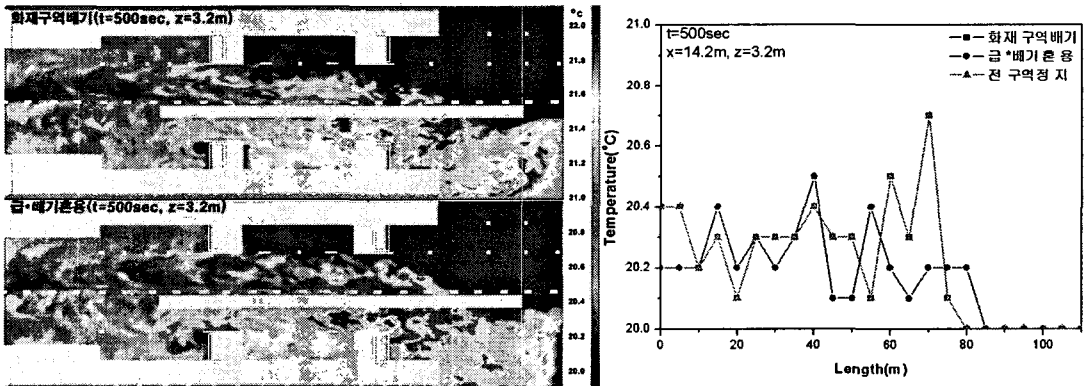


그림 5. 화재가 발생한 승강장 온도분포($t=500sec, z=3.2m$)

3.2 연기농도 비교

연기농도 분포에 있어 터널부의 빠른 유속과 낮은 배기 풍량으로 화재지점 배기한 경우와 전 구역 정지한 경우는 차이가 거의 없었으며, 급·배기 혼용한 경우와 비교하여 상대적으로 계단과 계단사이에 연기 농도가 빠르게 높아짐을 보였다. 열차와 계단벽 사이의 좁은 공간을 통과함에 따른 와류의 형성으로 화재가 발생한 승강장의 계단과 계단 사이에 높은 연기농도 분포를 나타냈다. 서창방면의 승강장 끝단은 측정시 다소 높게 나타난 기류의 영향으로 승강장과 비교하여 선로의 연기농도가 낮았다. 열차는 화재가 발생한 반대편 승강장으로의 연기의 확산을 차단하는 역할을 한 반면, 화재가 발생한 승강장에서는 연기의 하강을 가속시켰다. 기류와 열차에 의한 영향으로 화재가 발생한 반대편 승강장의 B구역은 시뮬레이션 수행동안에 연기농도의 변화가 거의 없음을

확인하였다. 그림 6는 선로바닥 기준 $z=3.2m$ 에서 화재가 발생한 후 500초경과 후의 화재가 발생한 승강장 연기농도분포를 보여주고 있다.

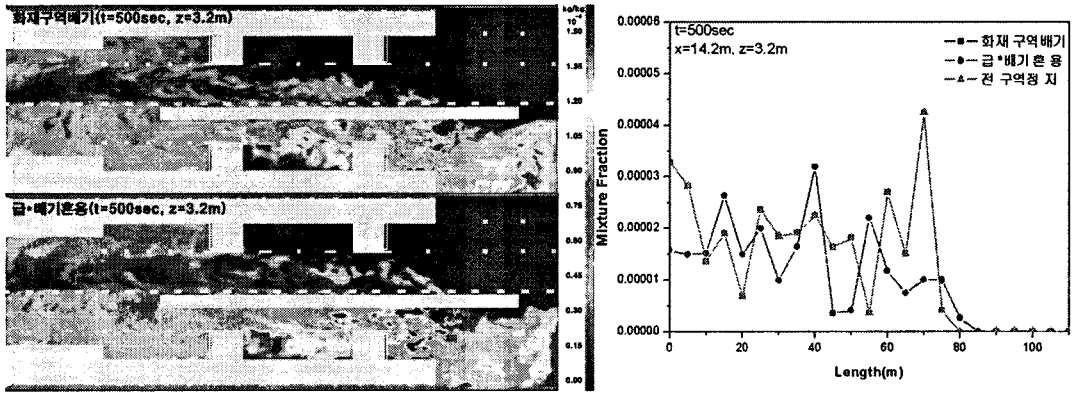


그림 6. 화재가 발생한 승강장 연기농도분포(t=500sec, z=3.2m)

3.3 가시거리 비교

수치해석을 수행한 모든 해석조건에서 열차가 화재확산에 전혀 영향이 없다는 가정 하에 열차에 의한 연기의 차단과 터널부에서 형성된 기류는 화재지점의 반대편 승강장 B구역의 가시거리 확보가 유리한 것으로 나타났다. 그러나 화재가 발생한 승강장 방향의 계단과 계단사이, 화재지점 및 호남대입구 방향의 승강장 끝단은 가시거리가 빠르게 감소하였다. 화재가 발생한 승강장의 맞은편 A구역의 계단과 서창방향의 승강장의 끝단 사이에서는 승강장과 비교하여 선로의 가시거리의 변화가 작았으며, 벽에 의한 연기의 하강으로 벽의 주변에서 가시거리가 줄어들었다. A구역은 급기, B구역은 배기한 경우(급·배기 혼용) 400초경과 후 화재지점 주위에서 가시거리가 급격히 감소하였으나, 다른 두 경우(화재구역 배기 및 전 구역 정지)와 비교하여 상대적으로 더 오랜 시간 넓은 시야를 확보할 수 있다. 화재구역 배기 및 전 구역 정지한 경우는 기류의 빠른 유속이 승강장의 배기량에 비해 매우 크기 때문에 온도 및 연기분포와 마찬가지로 거의 차이를 보이지 않았다. 그림 7은 선로바닥 기준 $z=3.2m$ 에서 화재가 발생한 후 500초경과 후의 화재가 발생한 승강장의 가시거리 분포를 보여주고 있다.

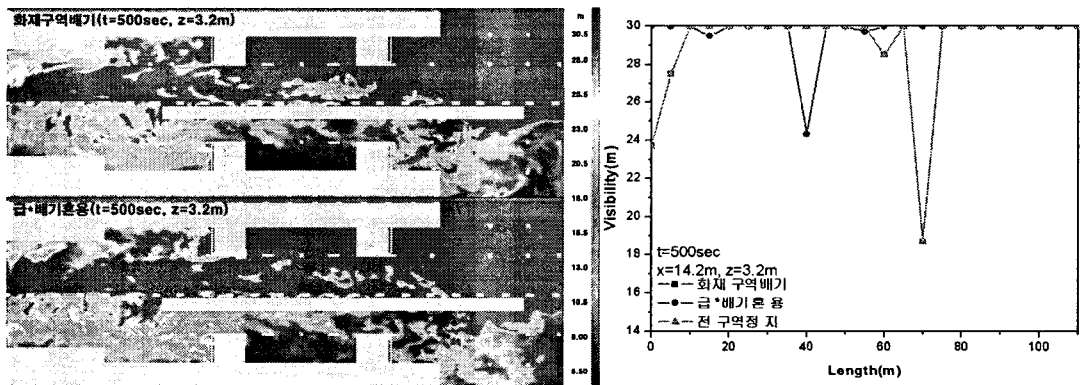


그림 7. 화재가 발생한 승강장 가시거리 분포(t=500sec, z=3.2m)

4. 결론

본 연구는 역사 내 승강장 화재발생시 승강장의 배기 운전방식에 따른 열 및 연기의 거동특성을 파악하기 위하여 NIST에서 개발한 FDS v4.06을 이용하였다. 광주시 상무역의 실제 역사와 유사하게 고려하여 모델링을 하였으며, 실험과 동일하게 열차가 역사에 정차된 것으로 설정하였다. 풍향 및 유속은 실험을 통해 측정된 데이터를 적용하였다. 해당 역사는 승강장 길이 방향으로 2개의 제연구역으로 구분되며, 화재모드로 현재 운전 중인 화재지점만 배기 나머지 정지, 화재지점 배기 나머지 급기 및 전 구역 정지의 3가지로 구분하여 열, 연기 및 가시거리 분포를 높이 선로 바닥 기준 3.2m(승강장 바닥 1.6m-호흡높이)를 기준으로 비교하였다.

열차에 의한 열 및 연기의 차단은 화재가 발생한 승강장의 맞은편 승강장으로의 열 및 연기의 확산을 지연시켰으며 시계가 감소되는 것을 막아주는 역할을 하는 것으로 나타났다. 실험 시 계측된 배기유속이 터널부에서 형성된 기류에 비해 매우 낮으며, 실험에서 사용된 가스소비량을 계산하여 얻어진 열방출량인 0.2MW로 고려대상이 승강장이라는 대공간에 비하여 다소 낮기 때문에 화재지점을 배기함에 따른 열, 연기 및 가시 거리에 대한 영향을 확인할 수 없었다. 화재지점을 제외한 영역을 급기하는 경우 화재지점만 배기, 모두 정지시킨 경우에 비해 화재지점과 기류가 불어오는 상류측 승강장 끝단을 제외한 영역에서 열 및 연기의 확산 지연시키는 것을 확인할 수 있었다.

감사의 글

“지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업”의 일환으로 시행되었으며 이에 감사드립니다.

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·소방학회논문집, 제17권 제4호, pp105-110 (2003)
5. 차철현, 김진국 “지하철 터널에서의 제연”, 공기조화·유동공학, 제28권 제 6호, pp.425-432 (1999)
6. 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)