

지하철 터널 내 운행 중 객차에서 화재발생시 제연풍량에 따른 열 및 연기 확산 예측 연구

Numerical Prediction of the Heat and Smoke Propagations for a Passenger Train Fire in an Underground Subway Tunnel for Different Extraction Flowrate

장희철* · 윤경범** · 박리진*** · 김태국**** · 박원희**** · 김동현****

Chang, Hee Chul · Yoon, Kyung Beom · Park, Lee Jin · Kim, Tae Kuk
Park, Won Hee · Kim, Dong Hyeon

Abstract

The purpose of this research is focussed on the numerical predictions of the heat and smoke propagations for a passenger train fire in an underground subway tunnel for different air supply and extraction flowrates. The analysis is performed for one of the stations on subway line #5 in Seoul under the emergency operation mode for different air supply and extraction flowrates. Five different the air supply and extraction flowrates are considered for the numerical analyses. The numerical results show that the air supply and extraction flowrates affect the smoke control performance significantly by improving the smoke removal performance for the balanced control of air supply and smoke extraction and for the unbalanced control with lager smoke extraction than air supply.

Key words : Extraction flowrate, Train, Fire, Underground subway tunnel

1. 서 론

대구 중앙로역 방화사건 이후 지하철화재에 위험성이 알려지게 되었으며, 또한 방화나 테러 등에 거의 무방비 상태로 노출되어 있기 때문에 언제 어디에서 화재가 발생할지 예상할 수 없으므로 철저한 대비책이 절실히 필요하다. 국내의 경우 대도시를 중심으로 지속적으로 지하철 역사 및 터널이 지속적으로 건설 중임으로 만약의 사태를 대비하여 다양한 화재 시나리오 구성이나 화재에 대비한 훈련이 필요하다. 실제 역사나 터널 또는 이와 동일한 환경의 실험공간에서 실화재 실험을 통한 화재특성 파악 및 데이터 분석을 통한 대책 수립이 가장 확실한 방법으로 사료되나 실제 운행 중인 역사 및 터널이나 건설 중인 공간에서 실제 화재를 발생시킨다는 것은 상당히 많은 위험요소가 있다. 따라서 열부력모의 화재실험을 통한 예측방법과 CFD를 이용한 연구가 활발히 진행되고 있다(Park, 2006)(Chang, 2006). 본 연구에서는 운행 중인 열차에서 화재가 발생하여 터널에 정차할 경우 터널에 설치된 급·배기구의 풍량에 따른 화재특성 예측을 목적으로 수행하였다.

2. 컴퓨터 화재 시뮬레이션

2.1 해석 대상 지하철 터널의 개요

본 연구에서는 서울지하철의 역사 및 터널을 대상으로 유사하게 모델링하였다. 역사 및 터널의 총 연장은

* 정회원·중앙대학교 기계공학부·박사과정

** 비회원·중앙대학교 기계공학부·석사과정

*** 정회원·중앙대학교 기계공학부·교수·E-mail: kimtk@cau.ac.kr

**** 정회원·한국철도기술연구원 궤도·토목연구본부 환경·화재연구팀

1,750m(L)로서 역사의 크기는 20m(W)×200m(L)×6m(H)이며, 역사와 역사사이의 터널연장은 해석영역이 너무 크기 때문에 다소 짧게 축소하여 9m(W)×810m(L)×6m(H)과 역사 끝단 터널은 270m(L)로 각각 고려하였으며, 열차는 4.5m(W)×19.5m(L)×3.4m(H)×10량으로 설정하였다. 역사와 역사사이의 기계 환기구는 3곳으로 200m간격과 양쪽 터널에 1곳씩 총 5개의 환기구를 배치하였으며, 환기구의 크기는 10m(W)×1.8m(H)로 화재가 발생한 열차의 반대편 벽에 측부형 구조로 고려하였다. 그림1은 해석대상의 개략도를 보여주고 있으며, 그림2는 본 수치해석에서 고려한 정상시 환기모드와 비상시모드를 보여주고 있다.

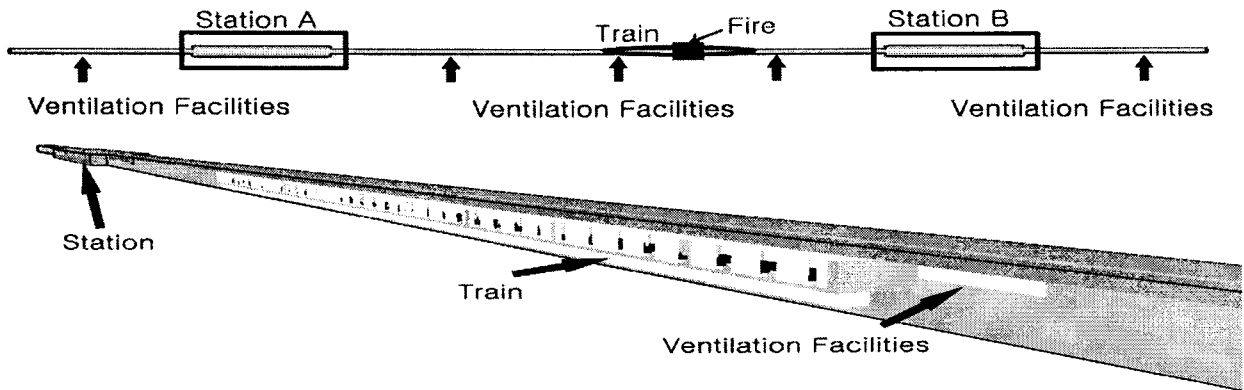


그림 1 해석대상의 평면도 및 3-D view

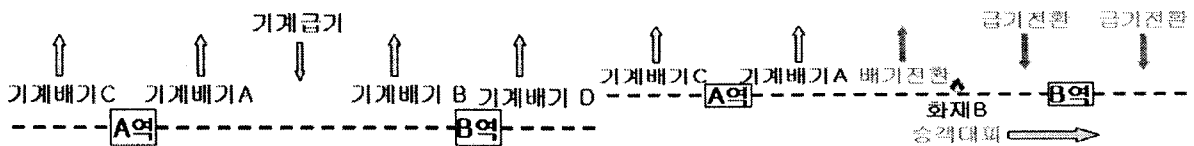


그림 2 터널환기 정상시 모드 및 비상시 모드

2.2 해석프로그램

본 연구에서 사용된 소프트웨어는 미국 표준 연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)에서 개발된 FDS(Fire Dynamics Simulator) Version 4.06(McGrattan, 2005)을 사용하였으며, 열차의 내부의 재료 특성을 database에 추가하여 시뮬레이션을 수행하였다. 열차 내부는 벽·천장(Aluminum), 의자(Stainless Steel), 바닥(Synthetic Rubber)로 구성하였으며, 이외 구조물은 콘크리트로 고려하였다. 격자 구성은 균일하게 약 103만개로 대표적인 격자크기는 $\Delta x=0.25m$, $\Delta y=1.0m$, $\Delta z=0.3m$ 간격으로 생성하였다.

2.3 수치해석방법

화재시뮬레이션의 경계조건은 다음과 같다. 초기 온도는 20.0℃, 지하역사 벽의 열전달의 조건은 단열상태, 수치해석 수행 시간은 15분으로 설정하였다. 화재가 발생한 열차의 양쪽 출입문이 모두 개방된 것으로 설정하였으며, 화재지점은 그림1의 A역사방향의 터널 끝단을 기준으로 970m(L)지점의 좌석 위에서 발생한 것으로 하였다. 화재의 크기의 15MW로 적용하여 발화 6분경과 후 최대 열방출량에 도달하며, 이후 열방출량이 유지되는 것으로 설정하였다. 시간에 따라 발생하는 열량은 Power Law Relation(NFPA 92B)공식을 사용하였다. 급·배기 풍량은 표1과 같이 서울지하철 5호선에서의 최소, 최대 풍량을 적용하였다.

표 1 수치해석 조건

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4	Case 5
급기 풍량	1000 CMM	4000 CMM	1000 CMM	4000 CMM	0 CMM
배기 풍량	1000 CMM	4000 CMM	4000 CMM	1000 CMM	0 CMM

3. 수치해석 결과 및 고찰

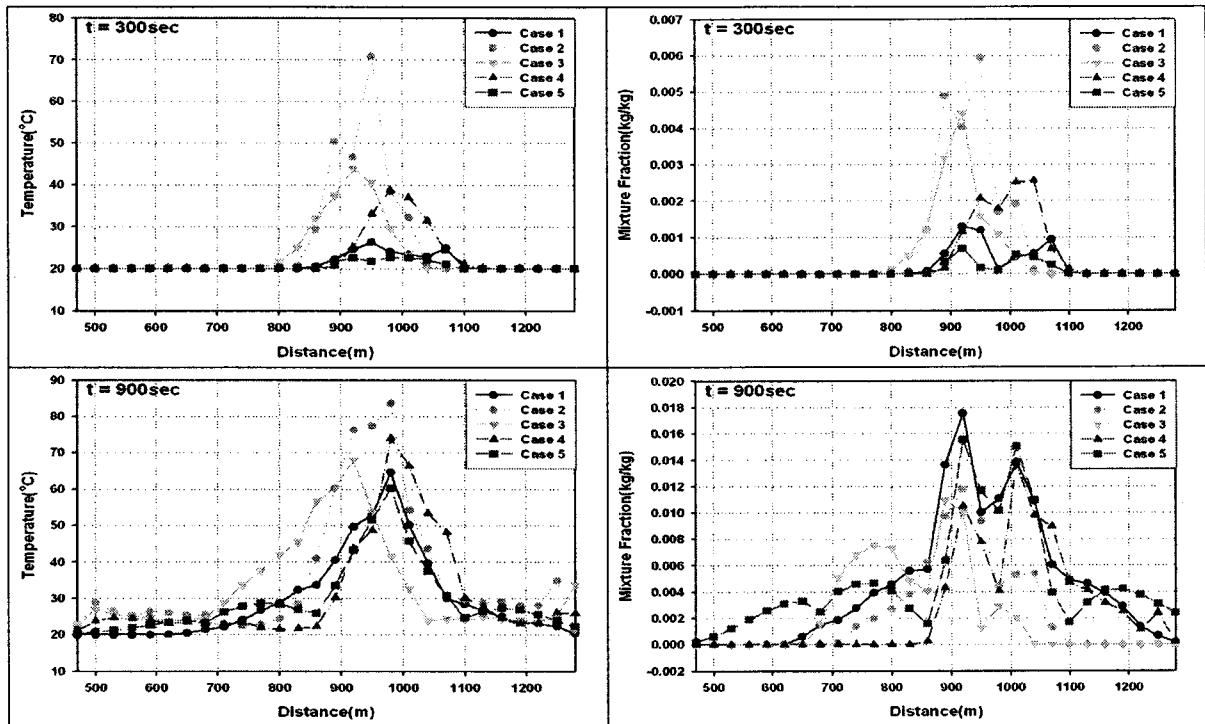
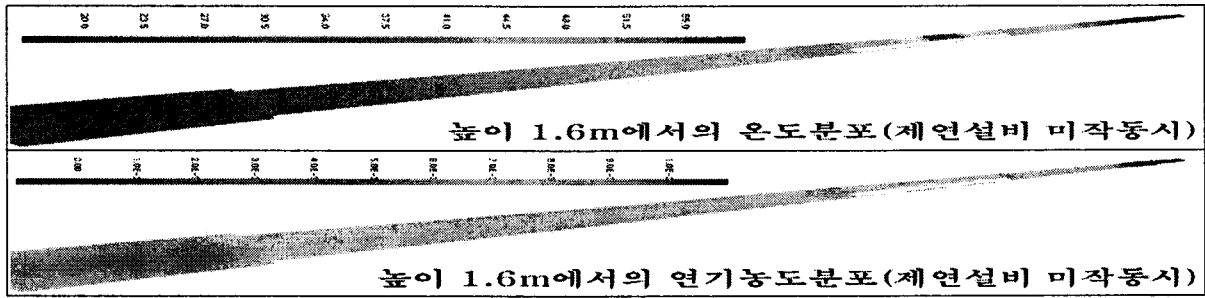


그림 4. 터널길이방향(y축)의 온도 및 연기농도분포(화재 반대편 선로 중앙, 높이:1.6m, t=300, 900sec)

3.1 온도 비교

터널바닥기준 호흡높이($z=1.6m$)에서 case5의 경우 화재가 발생한 열차지점 양쪽 방향으로 최고온도인 $60^{\circ}C$ 도달되는 면적이 case1,2,3,4에 비해 가장 넓었고, 화재가 발생한 터널구간 전체와 A, B역사까지 열의 영향이 미침을 확인했다. case1,2,3은 열차를 중심으로 A역사로 향하는 터널내의 온도가 높게 나타났고, 이 구간에서 case2,3이 case1보다 확산 속도가 빨랐다. case1,2,3 모두 B역사로 향하는 터널 내에는 열 확산이 없었다. case4는 case1,2,3과 반대로 화재 열차를 중심으로 B역사로 향하는 터널내의 온도분포가 높게 나타났으나 B역사로 열이 확산속도가 case1,2,3에 비하여 다소 느리게 진행되었다. 열차바닥기준 호흡높이($z=3.3m$)에서 case2,4,5 모두 터널구간 전체와 A, B역사에까지 온도의 영향을 보였고, 특히 case5가 가장 높은 온도분포를 나타냈다. case1은 터널 길이방향으로 767.5m(L)에서 1172.5m(L)지점까지, case3은 767.5m(L)에서 985m(L) 지점까지 열이 확산됨을 보였다. B역사의 좌측 끝단에서는 case2가 case1,3에 비해 열확산 속도가 빨랐고, case2에서 발화 480초 후 B역사의 좌측 끝단에서 부분적으로 $52^{\circ}C$ 정도의 온도분포를 보였으나 발화 510초 후에는 B역사의 온도가 낮아지고 터널구간에서 온도가 상승함을 보였다. 발화 780초 후 case4에서는 터널로 향하는 B역사 끝단에서 화재가 발생한 터널구간으로 제유입되지 않으나 반대편으로 점차 온도가 상승함을 확인할 수 있었다. case5의 경우 450초 후 화재가 발생한 열차의 양쪽 끝부분까지 NFPA 130에 규정된 대피로 온도인 $60^{\circ}C$ 를 초과하며 발화 900초 후에는 A, B역사까지 $28^{\circ}C$ 정도로 상승함을 보였다.

3.2 연기농도분포 비교

터널바닥기준 호흡높이($z=1.6\text{m}$)에서 case1,4,5는 열차주위에서 가장 높은 연기분포를 보였으며, case4가 가장 빠르게 연기가 확산됨을 보였다. 터널 내 정차된 열차와 A역사 사이의 터널 중간부분에서 case3 가장 많은 연기분포를 보였다. case1의 경우 발화 690초 후 터널 길이방향 470m(L)~875m(L)구간이 875m(L)~1280m(L)에 비하여 높은 연기분포를 나타냈다. case4의 경우 발화 450초 후 화재가 발생한 터널 내 정차된 열차와 B역사 사이에 높은 연기농도분포를 보였으나, B역사 내부까지는 영향을 미치지 못했다. case5의 경우 발화 630초 이후에 화재가 발생한 터널 내 정차된 열차를 중심으로 A, B역사 내부로 연기가 빠르게 확산되며 case1,2,3,4에 비해 화재가 발생한 터널구간에 가장 높은 연기농도분포를 나타냈다. 열차바닥기준 호흡높이($z=3.3\text{m}$)에서도 case5 연기 확산시간이 가장 빠르고, 연기분포 면적도 가장 넓음을 확인하였다. 발화 630초 이후 A, B역사로 연기가 빠르게 확산됨을 보였고, B역사에서 보다 넓은 구역에 영향을 미쳤다. case1, 4는 화재지점을 기준으로 B역사의 좌측 끝단에 높은 연기분포를 보였는데, case1의 경우에는 발화 660초 이후, case4는 발화 900초 이후에 터널로 제유입되는 되었다. case2, 3은 터널 내 열차의 우측 끝단에서부터 A역사로 향하는 터널의 중간부분까지 연기분포의 영향을 보였다.

4. 결 론

본 연구에서는 운행 중인 열차내부에서 화재가 발생하여 터널부에 정차하였을 경우, 터널 환기설비의 비상대처 방법에 따라 전환되었을 경우 서울지하철 5호선의 최소와 최대의 제연풍량과 제연설비가 작동하지 않았을 경우의 5가지로 구분하여 화재 특성 예측을 위한 수치해석을 수행하였다. 해석 대상으로는 두 개의 역사, 역사와 역사 사이의 터널과 양쪽 터널의 일부를 고려하였으며, 터널 바닥 및 객차 바닥을 기준으로 호흡높이인 1.6m에 대하여 열 및 연기농도분포를 비교하여 보았다.

터널바닥기준 호흡높이($z=1.6\text{m}$)에서 case1,2,3의 경우 해석 수행시간이 종료되는 900초 이내에서 B역사로 향하는 터널구간에 열의 확산이 없으며, 이와 같은 결과는 터널 내 열차에서 화재발생시 대피경로인 B역사로 향하는 터널구간의 안정성을 증명하고 있다. 열차바닥기준 호흡높이($z=3.3\text{m}$)에서 case2의 경우 발화 480초 후 B역사의 좌측 끝단에서 부분적으로 52°C 로 상승하였으나 NFPA 130의 규정에 만족하는 결과이다. case4는 열차를 중심으로 B역사로 향하는 터널 내에서 온도가 높게 나타나며, case1,2,3과 대조적인 경향을 보였다. 또한 급·배기를 하지 않은 case5의 경우 case1,2,3,4에 비하여 상대적으로 높은 온도를 나타냈다.

열차바닥기준 호흡높이($z=1.6\text{m}$)에서 case5의 경우 case1,2,3,4에 비해 화재가 발생한 터널구간과 A, B역사에까지 연기가 넓게 분포하였으며, 그 다음으로 case4가 연기가 넓게 분포되었지만 A, B역사 내부까지 확산되지 않음을 확인하였다. 열차바닥기준 호흡높이($z=3.3\text{m}$)에서 case1과 case4는 화재지점을 기준으로 B역사의 좌측 끝단에 연기농도가 분포하였으나 660초와 900초 이후 터널로 제유입됨을 확인할 수 있었다.

감사의글

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

참고문헌

1. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국, “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (I) -실험적 접근-”, 한국화재·소방학회, 제20권, 제3호, pp9-14 (2006)
2. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현, ‘지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (II) -수치적 접근-’, 한국화재·소방학회, 제20권, 제3호, pp15-20 (2006)
3. K. B. McGrattan, “Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide”
4. National fire codes, “Guide for smoke movement system in malls, atria and large area.” NFPA 92B, 2005 edition. (2005)