

지하철 역사에서 화재발생시 배연 팬의 운전조건에 따른 화재특성 연구

장희철¹, 김태국^{2*}, 박원희^{3**}, 손봉세^{4***}

중앙대학교 대학원 1, 중앙대학교 기계공학부 2*,

철도기술연구원 궤도토목연구본부 3**, 경원대학 소방시스템과 4***

Study on fire characteristics for different exhaust fan operating conditions in subway station

Hee-Chul Chang 1, Tae-Kuk Kim 2*, Won-Hee Park 3**, Bong-Sei Son 4***

Graduate School, Chung-Ang University 1, Mechanical Engineering Department, Chung-Ang
University 2*, Track & Civil Engineering Research Department, Korea Railroad Research Institute
3** Fire Protection System Engineering Department, Kyung-Won College

1. 서 론

화재로 인한 사망원인 중 60%이상 질식사이며, 지하철 역사와 같은 폐쇄적인 공간의 경우 연기 및 유독가스로 인한 인명피해는 더욱더 높을 것이다. 기존의 지하철 역사 및 터널 화재는 전기누전·합선으로 발생하였으나, 최근에는 방화로 인한 화재가 지속적으로 증가하고 있다. 대표적인 국내 방화사고 사례는 대구지하철 중앙로역(2003년, 150여명 사망)사고와 서울지하철 철산역에서 광명으로 이동하는 전철 내에서 방화(2005년, 차량 3량 전소 및 터널 피해)가 발생하였다. 지하철 역사에서 화재발생시 열 및 연기 거동에 영향을 미치는 요인은 개방된 공간에서의 화재에 비하여 한정되어 있으며, 다음과 같이 요약할 수 있다. 비상계단의 유속 및 풍향, 터널연결부의 유속 및 풍향, 배기구 및 급기구의 유속, 그리고 배연 및 급기 팬의 운전조건으로 구분할 수 있다. 최적의 배연효과를 얻기 위해서 이러한 환경적인 요인을 충분히 검토하여야 효율적이고 신뢰도 있는 결과를 도출할 수 있을 것이다¹⁾. 기수행된 연구로는 승강장에서 화재발생시 열 및 연기의 거동특성을 예측하기 위하여 제한된 열방출율을 이용한 실물화재실험이 수행되었으며²⁾, 연기발생장치와 열풍기를 이용한 연기유동 가시화 실험을 통한 연기의 거동특성을 파악할 수 있게 되었다³⁾. 실규모실험은 고비용, 실험회수의 제한 등의 제약을 많이 받기 때문에 비교적 다양한 가정을 이용하여 실제실험에서 얻기 어려운 세부적인 데이터를 얻을 수 있는 장점을 갖는 수치해석적 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁾.

본 연구는 실제역사를 대상으로 유속 및 풍향 계측실험 자료를 바탕으로 프로그램을 검증하였으며, 검증된 프로그램을 이용하여 계측 유속 및 풍향을 배연의 경계조건으로 사

용하여 배연 팬의 운전조건에 따른 화재 특성을 비교분석하였다.

2. 본 문

2.1 연구 대상 지하철 역사의 개요

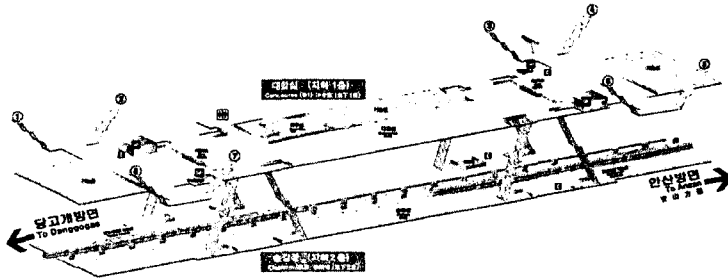


그림 1. 지하철 역사 구조

본 연구의 대상 역사의 구조는 국내에서 일반적인 형태이다. 역사는 승강장-대합실 및 대합실-외부로 연결된 비상계단 각각 4개씩 설치되어 있으며, 상·하단 직선 승강장(상대식)구조로 구성되어 있다. 환기실은 그림 1에서와 같이 대합실 양 끝단에 각각 위치하고 있으며, 동일 성능의 공기조화기, 상·하부 배기팬이 설치되어 승강장 길이방향의 중심을 기준으로 상·하로 나뉘어 냉방, 환기 및 배기를 제어한다. 승강장에 설치된 승강장급기(0.25m*0.4m) 106개, 상배배기(0.6m*0.7m) 12개 및 하부배기(0.4m*0.8m) 82개로 구성되어 있다.

2.2 승강장 유속 및 풍향 계측

본 실험은 모든 지하철 운행이 종료 후 2차례 실시하였다. 승강장의 유속 및 풍향을 평상시 및 비상시의 2가지 운전모드에 대하여 측정하였다. 승강장 길이방향으로 시점·종점 환기실에서 동일한 풍량의 팬이 작동함으로 승강장 길이방향으로 좌·우 대칭이며, 또한 승강장의 선로와 선로 중심선을 기준으로 대칭이라고 가정할 수 있다. 그러므로 그림 2에 표시된 Zone 4, 5, 6에 위치한 급·배기구의 유량을 계측하였으며, 승강장위 비교지점에 대하여 유량 및 풍향은 그림 2와 같이 한쪽 승강장에서만 측정을 실시하였다. 승강장에서 유속 계측시 모든 측정점에서 동시에 유속을 파악하여 유동장을 파악하여야 하지만 계측장비의 부족으로 인하여 6개의 Zone을 구분하여 순차적으로 유속을 측정하였다. 팬의 운전 등으로 인한 승강장에서의 유동을 정상상태로 가정이 이러한 측정 방법을 타당하게 할 수 있다. 유속 및 풍향은 열선유속계, 풍향계 및 향을 이용하여 측정하였다. 계측 위치는 계단, 터널연결부 및 승강장 비교지점의 3가지로 구분하였으며, 좌표는 다음과 같다 (그림 3참조). 계단부-(x=1.4, y=44.0, 142.0, z=3.3, 3.9, 4.2), 터널연결부-(x=7.0, 8.2, y=0.0, 205.0, z=2.4, 3.0, 3.3), 승강장위 비교지점(x=3.8, 5.0, y=10.0, 27.0, 41.0, 55.0, 71.0, 91.0, 111.0, 131.0, 146.0, 175.0, 195.0, z=3.3, 3.9, 4.2).

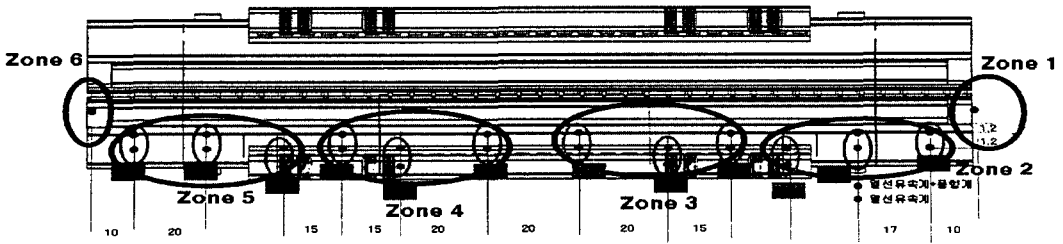


그림 2. 승강장의 측정 포인트

2.3 평상시 모드의 유동장 시뮬레이션 결과와 비교를 통한 프로그램 검증

본 연구에서 사용한 프로그램은 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire Dynamics Simulation) Version 4.0⁵⁾이며, 신뢰도 검증을 위하여 평상시 운전모드일 때 승강장위 비교지점에서 측정한 유속과 평상시 모드에 측정한 급·배기구의 유속, 계단부의 유속과 풍향, 터널부의 유속, 풍향 및 측정 온도를 시뮬레이션의 경계조건에 적용하여 계산한 결과인 승강장위 비교지점의 유속을 비교하여 프로그램을 검토하였다. 승강장 위쪽의 비교지점에서의 수치적 모델링의 유속과 측정 유속(v-Velocity)의 경향이 매우 유사하게 나타남을 확인할 수 있었다. 이와 같은 결과로 화재의 특성을 파악하는데 신뢰도를 높일 수 있을 것으로 판단된다. 그림 4는 승강장 비교지점의 실측값과 시뮬레이션의 결과값을 비교한 그래프를 보여준다.

역사의 크기는 20.4m*205.0m*6.0m로 실제 역사와 동일하게 모델링하였으며, 그 외 계단, 기둥 및 급·배기구의 수와 위치 등도 도면 및 현장답사를 통하여 그대로 적용하였다. 격자의 구성은 균일하게 93만개로 형성하였다. 승강장의 좌표, 크기 및 승강장 격자 구성은 그림 3과 같다.

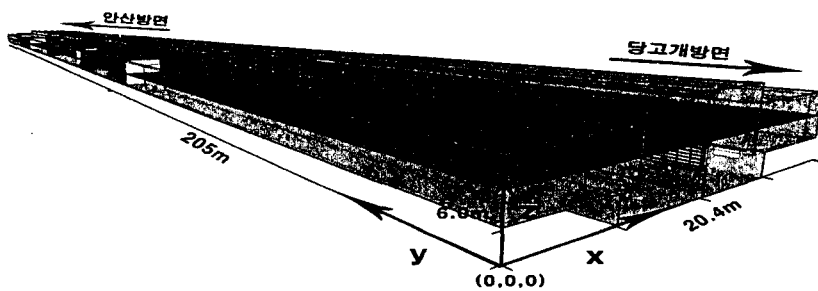


그림 3. 승강장 크기, 좌표 및 격자구성

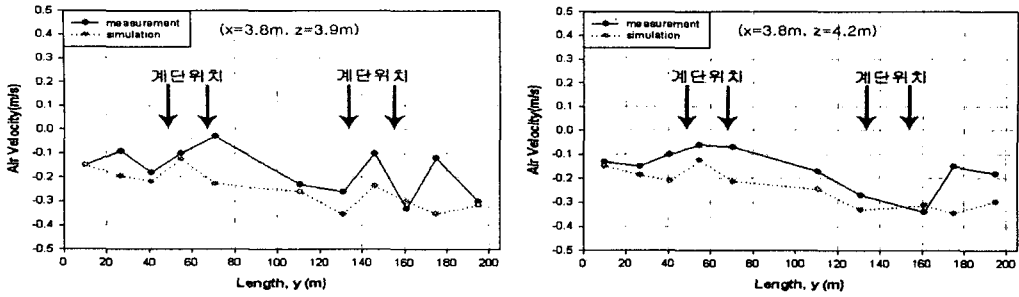


그림 4. 승강장 길이방향의 평균 유속

2.4 화재발생시 배연 팬의 운전조건에 따른 화재특성 연구를 위한 수치해석

본 연구의 대상인 역사의 구조 및 모델링에 대한 설명은 앞의 2.3절에 나타내었다. 본 절에서는 가상의 화재를 고려하여 배연 팬의 운전 조건에 따른 화재특성을 파악하기 위하여 경계조건으로 계측시 평균온도(19.5℃), 자연풍은 (y=0m)에서 (y=205m)의 방향으로 계측 평균유속인 1.335m/s로 일정하게 불도록 하였으며, 계단 및 한쪽 터널연결부 (y=205m)는 화재로 인한 열 및 연기 유동 방향의 변화를 고려하여 개방된 것으로 설정하였다. 배연 유량은 급·배기구에서 계측한 유속을 그대로 적용하였고, 벽의 열전달은 단열상태로 설정하였다. 화재구역은 (x=2.6, y=30.0, z=1.9)지점에 일본지하철 역사 매점 크기 (x=2.2, y=3.0)를 사용하였다. 화재의 크기는 일본에서 수행한 실험의 결과를 적용하여 발화 10분경과 후 최대 열방출량인 12MW가 되는 것으로 설정하였다⁶⁾. 또한 시간에 따라 발생하는 열량은 Power Law Relation공식을 이용하였고, 배연 팬은 발화 30초경과 후부터 가동되도록 하였으며, 수치해석 시간은 15분이다.

본 절에서는 계측한 유속 및 풍향을 배연경계조건으로 적용하여 가상의 화재를 고려한 배연 팬이 운전조건에 따른 화재특성을 비교하였다. 환기 및 배연의 제어는 시점환기실에서 (Section1, Section3) 및 종점환기실에서 (Section2, Section4)의 환기 및 배연을 각각 제어하게 된다. Section1에서 화재가 발생한 경우 최적의 배연 팬의 운전조건을 예측하기 위하여 4개의 Section에서 동시에 배연이 이루어지는 Case1, Section1에서 배연이 이루어지고 나머지 Section에서는 평상시와 같이 냉방급기로 작동할 경우인 Case2, 마지막으로 Section1에서만 배기를 하고 나머지 Section에서는 아무런 작동을 하지 않는 Case3로 구분하여 화재의 특성을 비교하였다.

표 1. 수치해석 조건

		Case1	Case2	Case3
승강장급기 풍량	배기	515.6CMM	128.9CMM	257.8CMM
	급기	-	386.7CMM	-
상부배기 풍량		293.28CMM		
자연풍		1.335m/s(y=0 → y=205)		

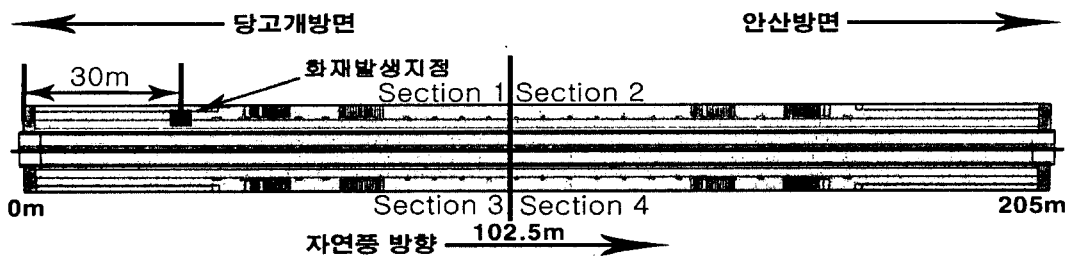


그림 5. 승강장 구역

3. 결과 및 고찰

3.1 승강장의 열 및 연기 분포 비교

화재발생시 내부공기온도의 상승은 크게 전도, 대류 및 복사에 의한 복합적인 열전달 현상을 통합하여 이루어지며, 대류에 의한 기류상승은 정상적으로 호흡을 하는데 많은 어려움을 주며, 더운 가스층과 화원으로 부터의 복사열은 직접적인 피부의 화상이나 정신적인 쇼크 등을 일으킬 수 있다.

승강장 길이(y축)방향의 중심호흡높이($x=5.5$, $z=3.3$)의 온도분포는 화재지점($y=30$) 및 화재지점에 인접한 터널연결부($y=0$)를 제외하고 모든 Case에서 대체로 균일하게 나타났으며, 발화 900초 후에 평균 80℃ 내외로 나타났다. 화재구역 내의 최고온도는 Case2의 900초와 Case3의 800초에서 210℃ 까지 상승하였으며, Case1의 경우 800초에서 140℃ 로 비교적 낮은 온도를 보였다. 또한 화재지점에 인접한 터널연결부($y=0$)에서는 Case1의 900초와 Case3의 800초에서 약 225℃ 로 나타났으며, Case2에서 약 138℃ 로 상대적 낮은 결과를 보였다. 이러한 결과는 열이 천장을 따라 거동하다가 승강장 끝단의 벽을 타고 빠르게 전달됨으로 하부 온도 상승요인이 된다. 승강장 높이(z축)방향의 온도는 상부로 올라갈수록 온도가 급격히 증가함을 확인할 수 있었으며, 천장부에서 최고 온도는 Case2에서 약 1100℃ 까지 상승하였다. NFPA(National Fire Protection Association) 130에 규정된 대피로의 온도인 60℃ 에 도달한 시간은 모든 Case에서 500초 이내로 ($y=0$)지점에서 가장 빨리 상승하였으며, 열에 의한 피해를 입지 않기 위해서는 최소한 500초 이내에 피난이 이루어져야 함을 확인할 수 있었다.

연기 농도분포는 자연풍 방향의 승강장끝단($y=205$)지점에서 가장 높게 나타났으며, 화재지점을 제외한 ($y=0\sim y=70$)까지의 중심호흡높이($z=3.3$)에서는 자연풍의 영향 및 계단과 같은 구조물로 인하여 비교적 낮은 분포를 보였다. 발화 500초 후부터 ($y=70$)지점에서 ($y=205$)방향으로 급격히 증가하였다. 화재구역 내의 승강장바닥을 기준으로 1.5m높이에서 연기 농도분포는 Case2가 Case1에 비하여 약 7배 높았다. ($y=150$)에서 급격히 감소하는 이유는 계단($y=150\sim 160$)으로 인한 연기유동의 방해를 받는 것으로 판단된다. 승강장 너비 방향(x축)으로는 화재가 발생한 건너편 승강장의 벽면에서 높은 연기 농도분포를 보였다.

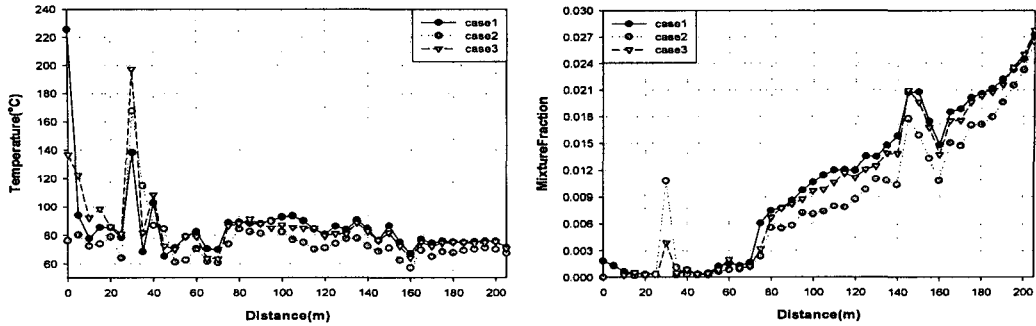


그림 6. 승강장 길이방향(y)의 온도 및 연기분포(x=5.0, z=3.3)

3.2 승강장의 가시거리 및 유독가스 분포

독성에 의한 피해는 미소당량복용량(Fractional Equivalent Dose)을 기준으로 하며, 그양은 사망 혹은 질식을 일으키는 수치이다. NRC(National Research Council of Canada)의 거주자 생명안전 성능기준은 다음과 같다. CO:1400ppm이하, CO₂:5~6%이하, O₂:10~15%이상을 기준으로 한다. 화재시 대량으로 생산되는 CO₂의 경우 CO와 매우 유사한 분포 상태를 보였으며, O₂의 경우는 반대의 경향을 보였다. 화재지점에서는 Case2에서 가장 유독가스에 노출되었으나, 그 외 중심호흡높이(z=3.3)에서는 다른 Case에 비하여 안정적인 분포를 나타내었다.

일산화탄소의 경우는 승강장 1.5m높이(z=3.3)에서 화재발생 800초 이후에 자연풍 방향 승강장 끝단(y=205)에서 5%이상으로 상승 하였으며, 이 지점을 제외한 나머지 구간(y=0~y=205)에서는 900초 내에서 5%를 초과하지 않았다. 일산화탄소의 경우 중심호흡높이(z=3.3)을 기준으로 승강장 전역에서 안전기준인 1400ppm에 이하로 나타났다.

산소의 경우 승강장 1.5m높이(z=3.3)를 기준으로 화재발생 700초 후에 급격히 산소농도가 감소하였으며, 모든 Case에서 발화 700초 후에 15%이하로 떨어졌다. 화재지점을 기점으로 자연풍방향의 승강장 끝단이 자연풍 반대방향의 승강장 끝단에 비하여 최대 2배 이상의 차이를 보였다. 화재발생 구역에서는 Case3에서 유일하게 발화 700초 이후에 15%로 떨어졌으며, 나머지 Case에서는 19%이상을 유지하였다. 승강장 높이(z축) 및 승강장 너비(x축)를 기준으로 비교한 결과 Case1의 산소농도가 가장 높았으며, Case2가 가장 낮은 분포를 보였다.

가시거리에 대한 영향은 화재발생시 발생하는 다양한 연소가스, 연기 등에 의한 피난에 중요한 인자로서 시계가 확보되지 않을 경우 엄청난 인명피해를 유발할 가능성이 있다. 선진국에서는 시계에 대한 안전성능이 마련되어 있으며, 캐나다의 경우 연기층의 높이가 2.1m이하 일 때 가시거리 10m이하를 기준으로 삼는다. 모든 Case에서 발화 500초 후에 10m이하로 나타났으며, 자연풍 방향의 승강장 끝단(y=205)에서 가장 시야 확보가 어렵다. 발화 600초 후에는 (y=70~y=205)의 구간 내의 시야가 10m이하로 나타났으며, 화재가 발생한 반대편 승강장에서는 유일하게 배기로 작동되는 Case1이 시계 확보에 가장 효과적으로 나타났다.

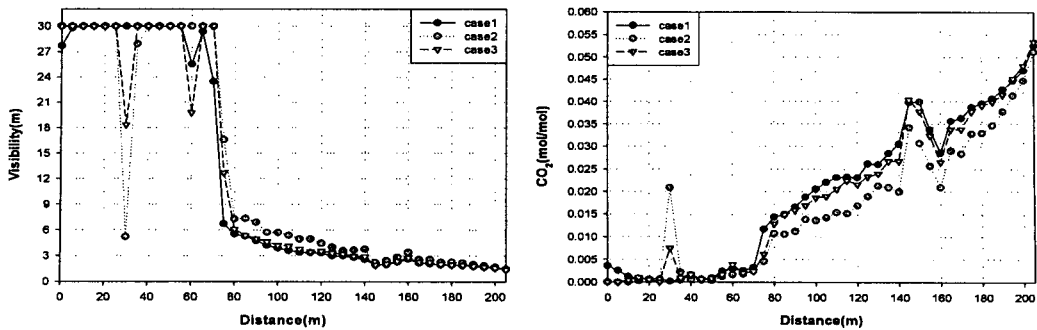


그림 7. 승강장 길이방향(y)의 가시거리 및 CO₂ 농도 분포(x=5.0, z=3.3)

4. 결 론

본 연구에서는 화재발생시 배연팬의 운전조건에 따른 화재의 특성을 예측하기 위하여 지정한 위치의 계측값과 시뮬레이션의 결과값을 비교함으로써 프로그램의 신뢰도를 검증 하였으며, 실측한 유속을 시뮬레이션의 경계조건으로 사용하여 기존의 역사에서 가상의 화재를 고려한 수치해석적 연구를 수행하였다. 배연팬의 운전조건은 4개의 구역에서 동시에 배기를 할 경우, 화재지점의 구역에서만 배기를 하고 그 외 구역에서는 급기를 할 경우, 그리고 마지막으로 화재지점의 구역에서만 배기를 하고 나머지 구역에서는 아무런 작동을 하지 않을 경우에 대하여 열, 연기, 가시거리 및 독성가스의 분포를 비교분석하였다. 수치해석 결과, 배연팬의 풍량이 다소 낮아 운전조건에 따른 화재의 특성이 큰 차이를 보이지는 않았으나, 화재구역의 배연 풍량이 다른 경우보다 2배가량 높았던 경우에서 가장 효율적인 제연효과를 볼 수 있었으며, 화재구역만 배기를 하고 나머지 구역에서 급기를 할 경우가 가장 비효율적인 것으로 나타남을 확인 할 수 있었다.

참고문헌

1. 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)
2. 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)
3. 김동현 등 “도시철도시스템의 안전방재 능력 향상 방안 연구, 제.” 제3편 차량안전기준/내장재/표준역사 (2004)
4. 박외철 “대구 지하철역 제연의 문제점과 대책, II.배기방식 제연설비의 풍량”, 한국화재·소방학회논문집, 제17권 제4호, pp105-110 (2003)
5. McGrattan K. "Fire Dynamics Simulator (Version 4) Technical Reference Guide"
6. 일본 총무성 소방청 “지하 철도 화재 대책 토론회 보고서” (2004)