

지하철 화재시 제연모드에 따른 열 및 연기 배출 특성 연구

A Study on Heat and Smoke Exhaust Characteristics from the Subway Fire for Different Ventilation Modes

장희철* · 윤경범** · 박원희*** · 김태국****

Chang, Hee Chul · Yoon, Kyung Beom · Park, Won Hee · Kim, Tae Kuk

Abstract

This study is focused on the numerical predictions for different smoke-control ventilation modes for the subway fire. Smoke-control ventilation mode in the domestic platform is that exhausting for the smoke detected zones while supplying air or stopping any ventilation for other zones in the platform. Three cases of smoke control ventilation modes are considered. First and second case are present running smoke control mode in Korea. The third is that smoke-control ventilation fans equipped in the platform are operated in first 4 minute(platform evacuation time, NFPA130) since then the fans equipped in the platform are stopped and the fans equipped in the tunnels are operated. Distributions of heat, carbon monoxide and visible range are compared at a height of 1.7m(passenger breath/sight height) above the platform. The numerical results show that air supply fan operation in the platform causes the smoke disturbance and a rapid spread of the smoke. The switch-operation with fans in both the platform and tunnel are better than operation with only platform fans in smoke rejection efficiency.

Key words : Subway fire, Switch mode, Tunnel, Underground station, Ventilation mode

요 지

본 연구는 지하철에서 화재발생시 최적의 제연모드 예측을 목적으로 수치해석을 수행하였다. 현재 국내 지하철 화재발생시 제연모드는 승강장 내 화재구역 배기, 비화재구역 급기 또는 정지로 설정 되어있다. 수치해석 조건은 2가지 국내 비상시 제연모드 및 발화 4분(승강장 피난허용시간, NFPA 130) 이전까지 승강장에서 배기를 하며, 발화 4분이 후 터널 배기로 전환되는 스위치모드의 3가지 경우에 대하여 비교 분석하였다. 승객 호흡높이(1.7m)를 기준으로 열, 일산화탄소 및 가시거리를 비교하였다. 수치해석 결과 급기팬 작동은 연기를 교란시키고 확산시킬 수 있으며, 또한 승강장 및 터널 제연모드로 작동할 경우 승강장의 제연모드로만 작동한 경우에 비하여 연기 배출에 효과적임을 확인할 수 있었다.

핵심용어 : 전동차 화재, 스위치 모드, 터널, 지하역사, 배연 방법

1. 서 론

2003년에 발생한 대구 지하철 방화사건을 계기로 지하공간에서의 화재의 위험성, 제연의 문제점이 크게 부각되었으며, 지하철이 대표적인 대중교통수단임을 감안할 때 지하철에서의 화재사고는 시민들의 일상적인 안전에 매우 큰 위협요인으로 부각되고 있다. 실제 운영되는 지하철 승강장에서 실물 화재실험으로 열 및 연기 거동 특성을 검토하기는 쉽지 않은 일이다. 그러므로 제한된 열방출율의 풀화재를 이용한 지하철 승강장에서의 화재 열거동특성을 Hasemi et al.(2004)이 검토한바 있으며, 국내에서는 가열된 연기를 이용한 화재연기거

동 실험이 (한국철도기술연구원, 2003; 박원희 등, 2007)에 의해 승강장에서 수행된 바 있다. 또한 (박원희 등, 2006; 장희철 등, 2005, 2006, 2007; Chow, 1996; Kai Kang, 2007) 등은 지하역사에서 화재발생으로 인한 열 및 연기유동의 영향 및 화재영향평가를 위하여 수치해석적 방법을 이용하였다.

화재발생시 연기 및 유독가스에 의한 질식사가 80%이상이며, 지하철의 승강장 및 터널은 매우 긴 폐쇄공간과 유사한 구조이므로 초기 화재진압을 하지 못할 경우 최적의 제연시스템을 이용하여 신속하게 연기와 유독가스를 외부로 배출시켜야 한다. 지하철의 배기시스템은 크게 역사와 터널에 설치되어있는 환기팬을 이용하여 비상시 설정되어있는 제연모드

*중앙대학교 대학원 박사수료 (E-mail: changheechul@hanmail.net)

**중앙대학교 대학원 석사과정

***정희원 · 한국철도기술연구원 궤도·토목연구본부 환경·화재연구팀

****정희원 · 중앙대학교 기계공학부 교수

로 작동하게 된다. 현재 국내에서 운행되고 있는 지하철은 화재 발생시 제연을 위하여 예상 제연구역이 설정되어 있으며, 화재 발생위치에 따라 배연 및 급기를 통하여 연기를 제어할 수 있도록 설계되어 있다. 국내 지하철 승강장 및 승강장에 정착된 열차에서 화재발생시 제연모드에 대하여 조사한 결과 예상 제연구역에는 배연을 그 이외에 구역에서는 환기장치를 정지 및 급기로 운전하도록 되어있었다. 승강장에서의 급기 및 배기구는 승강장 천장에 설치되어 있으므로, 화재연기가 전파될 수 있는 영역에서의 급기로 인해 고온으로 천장을 타고 성장하는 연기층의 교란으로 승강장에서 대피하는 승객들에게 피해를 입을 수 있다. 전국 5개 지역(서울, 인천, 대구, 광주, 부산)기존 지하철에서의 환기, 배연시설 및 제연모드에 대한 조사 및 지문결과를 분석한 결과 가장 일반적인 국내의 제연모드는 화재구역 배기, 비화재구역 급기/정지이며, 지역별 차이를 보이나 승강장배기와 터널배기를 혼용한 스위치모드에 대한 현장 적용성에 대한 연구가 진행 중에 있다(건설교통부, 2007). 그러나 아직까지 제연모드에 따른 성능검토가 미비하여 역사별 제연방식이 차이를 보인다. 따라서 본 연구에서는 현재 운영 중인 역사를 대상으로 실제승강장과 매우 유사하게 모델링하고 설계 제연풍량 등을 그대로 CFD(Computational Fluid Dynamics)해석에 적용하여 보다 현실적인 열 및 연기 배출 성능 검토를 할 수 있도록 하였다.

2. 화재시뮬레이션

2.1 해석대상 개요

본 연구의 해석대상 공간은 서울메트로 4호선 수유역 승강장(너비: 20.4 m, 높이: 6.0 m, 길이: 205.0 m)과 상·하행 방향의 일부 터널(너비: 8.0 m, 높이: 6.0 m, 길이: 10.0 m)을 고려하였다. 하행방향의 승강장에는 지하철(너비: 3.2 m, 높이: 4.3 m, 길이: 19.5 m × 10량)이 정착되어있으며, 차량 내장재 재료는 교체 차량으로 벽 및 천장: Aluminum, 의자 커버: Stainless Steel, 바닥: Synthetic Rubber(합성고무)이다. 기타 구조물은 내부 계단, 승강장 벽, 급·배기구(diffuser), 기둥, 제연 경계벽 등이 있다. 해석대상 역사의 특징은 다음과 같다. 정거장 층수는 지하 1층 대합실과 지하 2층 승강장으로 상대식(지하역) 상·하단 직선 승강장 구조이며, 내부 계단은 총 8개, 역사 환기실은 대합실 양쪽 끝단에 각각 1개 소씩 위치하며, 동일한 성능으로 승강장 길이방향으로 절반의 구역으로 나누어 급기 및 배기를 담당한다. 또한 터널의 배기구는 상·하행 승강장 끝단에서 각각 5 m 떨어진 지점에

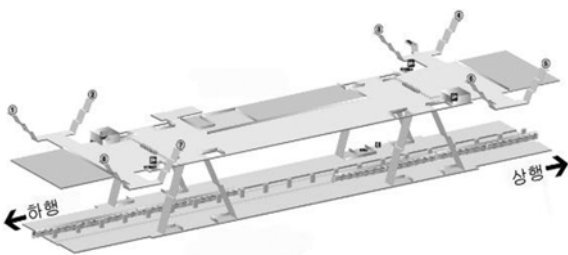


Fig 1. Skeleton drawing of the Suyou station

(4 m × 4 m)크기의 개착복선 상부수평형 환기실 구조 형태로 고려하였다. Fig. 1은 역사 개략도를 보여주고 있다.

2.2 컴퓨터 모델링

해당 역사의 건축 도면, 답사 및 실제 계측을 통하여 승강장 및 지하철, 급·배기구(diffuser) 개수, 승강장 기둥, 내부 구조, 내부 계단 등 실제와 유사하게 모델링 하였다. 화재시뮬레이션을 위하여 사용된 프로그램은 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire Dynamic Simulator) V 4.07(K.B. McGrattan, G.P. Forney, 2006)을 이용하였다. 격자구성은 Fig. 2에 나타낸바와 같으며, 약 100만개로 생성하였으며, 대표적인 격자크기는 $\Delta x = 0.2$ m, $\Delta y = 0.5$ m, $\Delta z = 0.2$ m 간격으로 생성하였다. FDS는 Navier-stokes 방정식을 고려하며, 이 방정식의 확산 항들은 LES(Large Eddy Simulation) 계산으로 해결된다. 온도를 해석하기 위하여 복사열전달을 고려한 에너지방정식을 풀며, 복사열 전달방정식을 해석하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 사용하며, 화재의 모시는 혼합분율 연소모델(Mixture Fraction Combustion Model)을 이용하였다. 비화색가스 물성치는 FDS에서 제공하는 밴드모델을 이용한다.

2.3 수치해석 조건

본 수치해석에서 고려된 해석 대상의 개략도, 화재발생위치 및 화재/비화재 구역은 Fig. 3에 나타내었다. 초기 온도는 상온(20°C), 화재는 하행열차의 끝단을 기준으로 100 m 지점(5량)에 열차바닥에서 크기 1 m × 1 m로 발생한 것으로 설정하였다. 반응연료는 헵탄으로 선정하였는데 이는 FDS에서 제공하는 반응연료 중 발생하는 연기 거동특성 예측에 적당한 연료이기 때문이다. 헵탄은 메탄계 수소에 속하는 물질의 총칭으로 9종의 이성질체가 존재한다. 특히 n-헵탄이 대표적인데, 폭발연소하는 특징을 가진 기체이다. 화재 크기는 발화 5분 경과 후 최대 열방출량인 15 MW가 되는 것으로 설정하였으며, 화재성장 속도는 Power Law Relation(NFPA 92B, 2005)식을 사용하였다. Fig. 4는 시간에 따른 화재성장곡선과 터널 환기팬 작동시간을 보여주고 있다. 열차의 출입문은 승강장과 연결된 방향만 개방된 것으로 설정하였으며, 객차와 객차를 연결하는 문은 모두 개방되도록 하였다. 대합실과 연결된 내부 계단은 화재로 인한 유동을 고려하여 역시 개방된 것으로 설정하였다. 시뮬레이션 수행시간은 15분이다. 승강장 및 터널에 설치된 배기구의 풍량 및 유속을 Table 1에 나타내었다. 승강장의 비상운전 모드와 풍량은 화재발생과 동시에 작동되도록 설정하였으며, 터널에 설치된 배기구의 유속은 작동되는

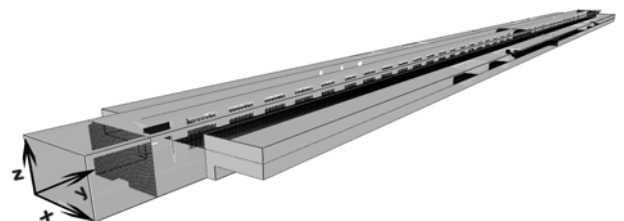


Fig 2. Grid system for numerical calculation



Fig 3. Zones and fire location on the platform

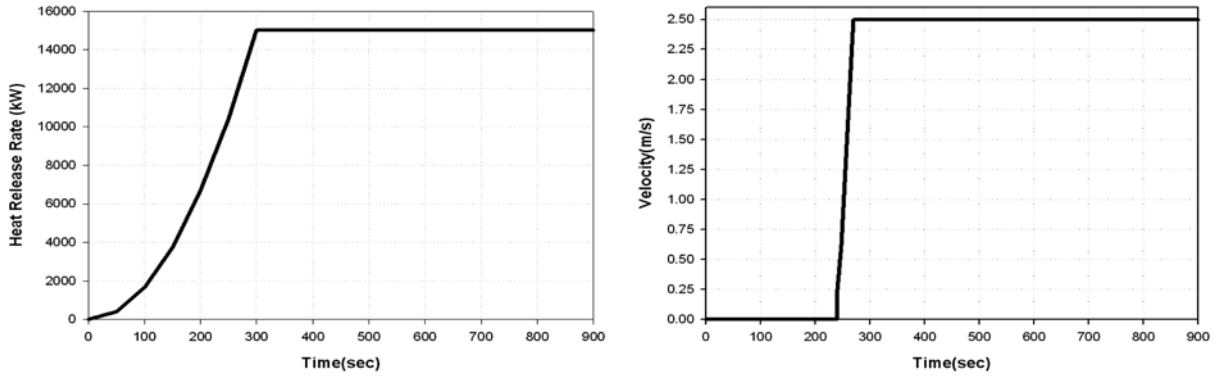


Fig 4. Fire growth curve and tunnel ventilation operation timeline

Table 1. Conditions for the smoke-control ventilation system

환기설비		유량(유속)	규격 및 수량
승강장급기	배기시/급기시	2,384CMM (3.748m/s)	0.25m × 0.4m (53 × 2개)
상부배기 (배기)		1,192CMM (3.942m/s)	0.6m × 0.7m (6 × 2개)
하부배기 (배기)		미작동	0.4m × 0.8m (41 × 2개)
터널 배기	국내 비상시 모드 (개방)	미작동	4.0m × 4.0m (1 × 2개)
	Switch mode(배기)	(2.5m/s)	

※상부배기: 승강장 선로부 상부에 위치하며(급/배기), 승강장 및 터널의 환기 및 배기를 위한 기계설비.

하부배기: 승강장 선로부 하단에 설치되어 열차의 정지로 인해 발생하는 열을 외부로 배출하기 위한 기계설비.

Table 2. Conditions for the numerical analysis

	화재 구역	비화재 구역	터널 환기팬
국내 비상시 모드 1 (Case1)	배기	급기	정지
국내 비상시 모드 2 (Case2)	배기	정지	정지
Switch mode (Case3)	~ 2 분	배기	정지
	2 ~ 4 분	배기	정지
	after 4 분	정지	정지

데 소요되는 시간을 고려하여 작동 30초 후 최고 유속인 2.5 m/s에 도달되도록 하였다. 이외 내부 구조물인 기둥, 지하철 내장재료 등은 2.1절에서 언급한 것과 동일하게 적용하였다. 제연모드에 따른 수치해석 조건은 Table 2과 같이 구분하여 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

비상시 제연모드에 따른 성능 예측을 위하여 승강장 바닥을 기준으로 1.7m 높이(피난자의 호흡 및 눈높이 고려)에 대하여 온도, 일산화탄소(CO, Carbon Monoxide) 및 가시거리

분포를 비교 분석하였다. Fig. 5는 point measurements의 위치와 area number의 정보를 나타낸다. 각 절에 나타난 평면도는 승강장 바닥 1.7m 높이이며, 그래프는 Fig. 5와 같이 상·하행방향 승강장의 중심라인으로 화재가 발생한 열차가 정차된 승강장의 중심선을 A_P, 상행방향 승강장 중심선을 B_P로 구분하였다. 화재시물레이션 결과를 수치로 뽑아내기 위하여 output의 area는 205 m(승강장길이)÷ 10 m(간격) × 2 (상대식승강장) 총42개로 구분되며, 모든 area 내에는 point measurement가 2.5 m, 5.0 m, 7.5 m로 고정되어있다(높이: 승강장 바닥 기준 1.7 m). 각 절에 나타난 그래프의 area는 3개의 point measurement에서 얻은 수치의 평균값이다.

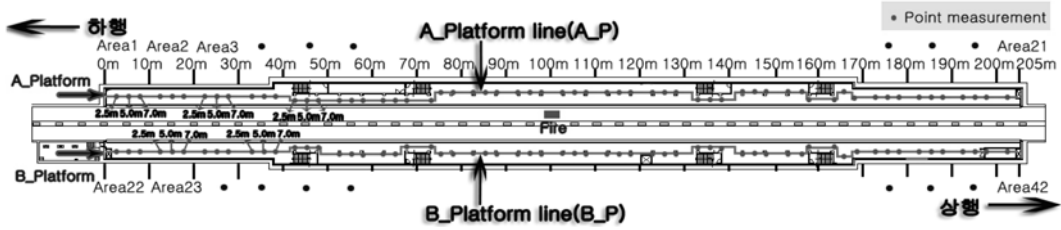


Fig 5. Points(locations) for measurement on the platform

3.1 열 확산 분포

Fig. 6의 좌측 3개의 단면 그림들은 승강장 바닥 기준 1.7m(호흡 및 시야높이고려)에서의 온도 분포로써 좌측 3개 그림 모두 화재구역은 동일하게 승강장 배기를 수행하며, 비화재 구역은 승강장 급기, 정지 및 승강장과 터널 배기를 전환된 제연방식의 결과 그림이다. 우측의 그래프는 상행(B_P)·하행방향(A_P)으로 구조물을 고려한 승강장의 중심 라인(승강장 바닥 기준 1.7m) 평균값이다. 화재성장속도는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 시간이 경과함에 따라 열 발생량이 급격히 증가하는 지수함수의 형태로 표현된다. 화재가 발생하여 최대 발열량에 도달하기까지의 화재성상의 파악은 매우 중요하다. 하지만 본 절의 주된 목적은 승강장 및 터널에 장착된 팬들의 제연 운전에 따른 열확산 특성을 분석하는 것이므로 최대 발열량(300초, 15 MW)에 도달하여 120초경과 후(발화 420초)의 그림과 그래프를 Fig. 6에 나타내었다. 발화 420초 후 승강장 기준높이의 온도분포로 터널 환기팬이 작동한 경우가 가장 높고 비화재 구역을 제연하지 않았을 경우가 가장 낮은 온도 분포를 보였으며, 최대 약 40°C의 차이를 나타내었다.

주요 시간대별 온도분포 특성은 다음과 같다. 화재가 발생

하여 240초 경과한 후 전동차 내부의 열 분포는 비화재 구역에서 급기를 수행한 경우가 가장 빠르게 확산 되었다. 화재가 최대발열량에 도달하기 이전 시간인 240초 이내에서는 비화재 구역을 급기 운전한 경우가 화재주변의 온도가 높게 나타나며, 비화재 구역을 정지시킨 경우 열이 좀 더 넓게 확산되었다. 발화 240초 후 급기운전은 B_P 승강장으로 열을 확산시키며, 비화재 구역에서 제연을 수행하지 않은 경우 상행방향으로 열확산이 빠르게 진행되었다. 최대발열량에 도달하여 유지되는 발화 300초 이후 A_P 승강장 내에서는 급기운전을 수행한 경우가 다소 낮은 온도분포를 보인 반면, B_P 승강장 내의 온도분포는 반대의 경향을 보이며, 시간의 경과함에 따라 온도차이가 조금씩 커지는 것을 확인할 수 있다. 발화 480초 이후 해석이 종료되는 900초 까지 A_P 승강장은 터널 환기팬을 작동한 경우가 가장 높은 온도분포와 비화재 구역을 급기로 작동한 경우가 가장 낮은 온도분포를 보인 반면, B_P 승강장 내에서는 정반대의 경향을 보였다.

3.2 CO 확산 농도 분포

Fig. 7의 좌측 3개의 단면 그림들은 승강장 바닥 기준 1.7m(호흡 및 시야높이고려)에서의 CO 분포로써 좌측 3개

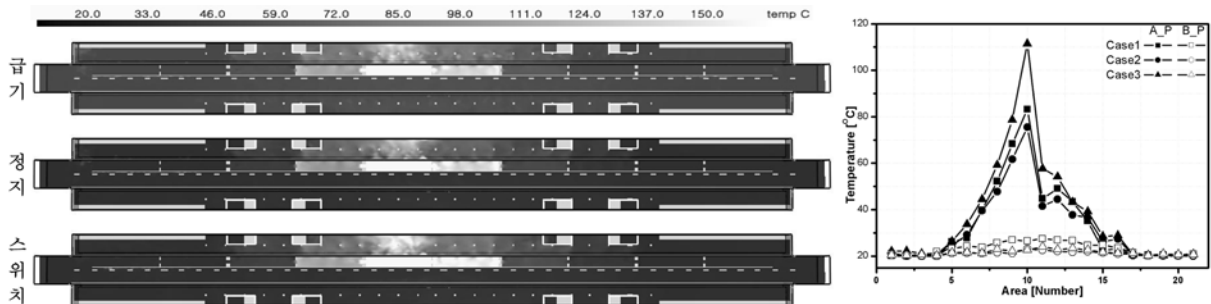


Fig 6. Temperature contours at 1.7 m above the platform floor and temperature distributions along A_P and B_P lines at 1.7 m high above the platform floor(t = 420sec)

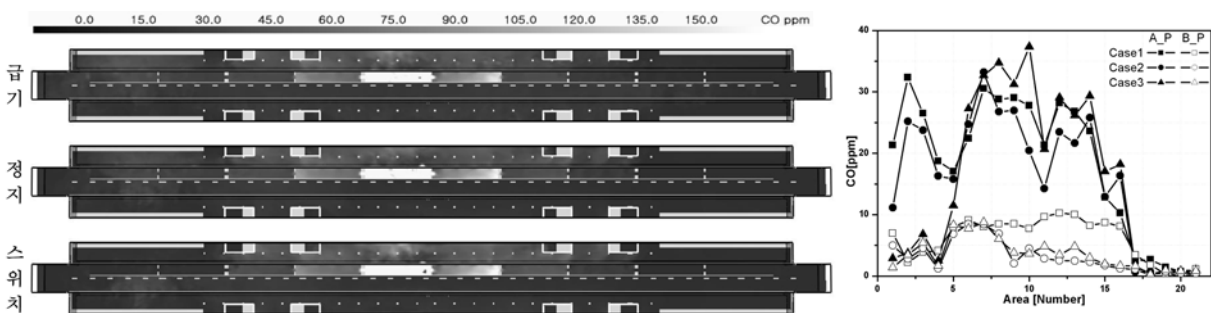


Fig. 7. Carbon monoxide contours at 1.7 m above the platform floor and carbon monoxide distributions along A_P and B_P lines at 1.7 m high above the platform floor(t = 420sec)

그림 모두 화재구역은 동일하게 승강장 배기를 수행하며, 비화재 구역은 승강장 급기, 정지 및 승강장과 터널 배기를 전환된 제연방식의 결과 그림이다. 우측의 그래프는 상행(B_P)·하행방향(A_P)으로 구조물을 고려한 승강장의 중심라인(승강장 바닥 기준 1.7 m) 평균값이다. 화재성장속도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 시간이 경과함에 따라 CO 발생량이 급격히 증가하는 지수함수의 형태로 표현된다. 화재가 발생하여 최대 발열량에 도달하기까지의 화재성상의 파악은 매우 중요하다. 하지만 본 절의 주된 목적은 승강장 및 터널에 장착된 팬들의 제연 운전에 따른 연기(CO)확산 특성을 분석하는 것이므로 최대 발열량(300초, 15 MW)에 도달하여 120초경과 후(발화 420초)의 그림과 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 발화 420초 후 승강장 기준높이의 CO분포로 상·하행방향 승강장 끝단부에서 switch mode로 제연시 CO를 터널부로 빠르게 배출시켜 낮은 농도분포를 보이며, 급기를 수행한 경우에 B_P 승강장으로 CO가 확산됨을 확인할 수 있다.

주요 시간대별 CO 분포 특성은 다음과 같다. 발화 180초 이내 승강장내 CO 분포는 비화재 구역 급기를 수행한 경우가 가장 빠르게 확산되며, 전 승강장구역 배기로 작동된 경우(전환 방법, switch mode)가 초기 제연효과가 가장 높게 나타났다. 발화 240초 이후 상·하행방향의 CO 분포가 제연모드에 따라 큰 차이를 보이기 시작하는데 화재발생위치에서 상행방향(비화재 구역)은 제연을 하지 않은 경우 및 하행방향(화재구역)으로는 급기를 수행한 경우에서 CO가 빠르게 호흡높이로 하강되며, 상행방향은 switch mode 및 하행방향은 급기를 수행한 결과가 가장 낮은 CO농도 분포를 보였다. 발화 360초 이후 상행방향으로는 switch mode 및 하행방향으로는 급기를 수행한 경우에서 좀 더 높은 CO농도 분포를 보이며, 상행방향으로는 급기 또는 미작동시 및 하행방향으로는 switch mode로 제연할 경우에 다소 낮은 CO농도 분포를 나타내었다. 이후 수치해석이 종료되는 900초 이내 시간에서도 A_P 승강장 하행방향 및 B_C 승강장 양방향으로 급기를 수행한 경우가 다소 높은 CO농도 분포를 보이며, 상·하행방향 승강장 끝단구간에서는 비화재 구역에서 제연을 전혀 하지 않은 경우가 CO농도가 급격히 증가됨을 확인할 수 있다.

3.3 가시거리 분포

Fig. 8의 좌측 3개의 단면 그림들은 승강장 바닥 기준

1.7 m(호흡 및 시야높이고려)에서의 가시거리 분포로서 좌측 3개 그림 모두 화재구역은 동일하게 승강장 배기를 수행하며, 비화재 구역은 승강장 급기, 정지 및 승강장과 터널 배기를 전환된 제연방식의 결과 그림이다. 우측의 그래프는 상행(B_P)·하행방향(A_P)으로 구조물을 고려한 승강장의 중심라인(승강장 바닥 기준 1.7 m) 평균값이다. 화재성장속도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 시간이 경과함에 따라 연기 발생량이 급격히 증가하는 지수함수의 형태로 표현된다. 화재가 발생하여 최대 발열량에 도달하기까지의 화재성상의 파악은 매우 중요하다. 하지만 본 절의 주된 목적은 승강장 및 터널에 장착된 팬들의 제연 운전에 따른 가시거리분포를 분석하는 것이므로 최대 발열량(300초, 15MW)에 도달하여 120초경과 후(발화 420초)의 그림과 그래프를 Fig. 8에 나타내었다. 발화 420초 후 승강장 기준높이의 가시거리분포로 A_P 승강장은 비화재 구역을 급기 및 정지는 유사한 경향 보이며, switch mode로 제연할 경우 상·하행방향 승강장 끝단의 가시거리가 가장 길게 나타났다. B_P 승강장 내에서는 급기 운전할 경우 가장 넓은 구간에서 가시거리가 짧아지는 것으로 나타났다.

주요 시간대별 가시거리 분포 특성은 다음과 같다. 발화 후 비화재 구역을 급기로 작동한 경우 가시거리가 가장 먼저 감소 및 화재발생 주변에 국한되어 급격히 감소되는 경향을 보인 반면, 이외 제연방식에서는 승강장 길이방향으로 서서히 감소되는 경향을 나타내었다. 발화 210초 후 A_P 승강장 내 상행방향으로는 급기를 수행한 경우와 하행방향으로는 비화재 구역에서 제연을 하지 않은 경우에서 가시거리가 감소된 것으로 나타나며, B_P 승강장 내에서의 가시거리는 거의 변화가 없었다. 발화 240초 이후 A_P 승강장 상행방향으로는 급기를 수행한 경우 다소 넓은 가시거리를 유지한 반면, 하행방향 및 B_P 승강장 내의 가시거리는 반대의 경향을 나타내었다. 발화 330초 후 모든 제연모드에서 A_P 승강장 화재발생지점을 기준으로 상·하행방향으로 각각 약 40 m구간 내의 가시거리가 10 m 이하로 감소되며, B_P 승강장은 급기를 수행한 경우에서 가시거리가 급격히 감소됨을 확인할 수 있다. 발화 390초 후 A_P 승강장 하행방향의 전 구간에서 급기로 작동된 경우 10m이하로 가시거리가 감소되며, 승강장 끝단 구간에서는 switch mode로 제연할 경우가 가장 가시거리가 길게 나타났다. 450초~690초 사이에서는 급기 운전시

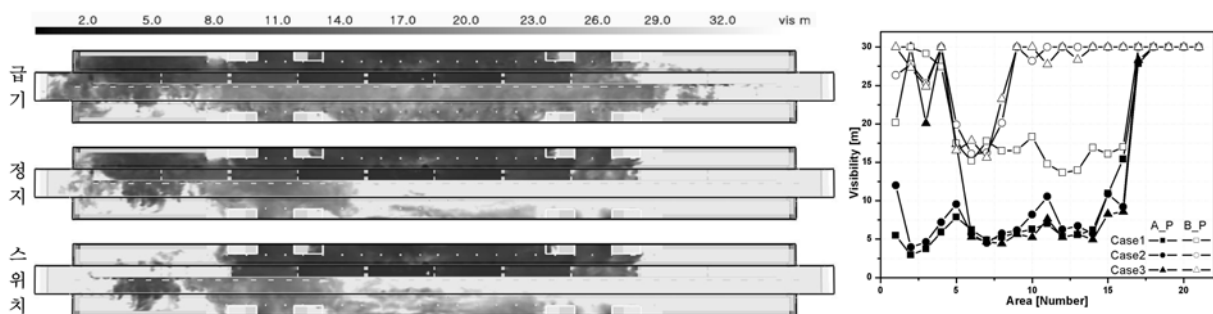


Fig. 8. Visibility contours at 1.7 m above the platform floor and visibility distributions along A_P and B_P lines at 1.7 m high above the platform floor(t = 420sec)

양쪽 승강장에서 가시거리가 가장 짧은 것으로 나타났으며, switch mode로 작동한 경우에 가장 긴 가시거리를 유지하며, 특히 터널에 인접한 승강장 끝단의 가시거리가 길게 나타났다.

4. 결 론

본 연구는 승강장에 정착된 지하철에서 화재발생시 최적의 제연모드 예측을 위하여 국내 비상시 작동되도록 설정되어있는 2가지 제연모드인 승강장 내 화재구역 배기, 비화재 구역 급기 또는 정지 및 발화 4분(승강장 피난허용시간, NFPA 130) 이전까지 승강장에서 배기를 하며, 4분 이후부터 터널 배기로 전환되는 스위치모드의 3가지 경우에 대하여 승객 시야와 호흡높이를 1.7m로 고려하여 열, 일산화탄소 및 가시거리를 비교·분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 급기 팬이 작동할 경우 연기를 교란시키고 빠르게 하강시킬 수 있기 때문에 화재발생시 비화재구역에서 급기운전에 대한 신중한 검토가 필요하다.
- (2) 터널 기계 환기실의 대용량 팬 작동은 승강장 내의 열 및 연기를 빠르게 터널에 설치된 배기구를 통하여 배출시킴을 승강장 내의 온도 및 CO농도의 평균값이 낮아짐으로 확인할 수 있다.
- (3) 터널의 대용량 팬 작동으로 전환 후 화재발생 주변 기준높이(1.7 m)로 열 및 CO가 빠르게 확산되기 때문에 승객이 모두 승강장에서 피난이 완료된 후 터널 배기가 작동되어야 할 것이다.

참고문헌

건설교통부 (2007) 기존운영 도시철도의 환기 및 화재안전 개량대책 기술개발. 연구보고서, 건설교통부.
 박원희, 김동현, 장용준 (2007) 지하역사에서의 화재연기거동 실험. 한국철도학회논문집, 한국철도학회, 제10권, 제1호, pp. 67-73.
 박원희, 김동현, 장희철, 김태국 (2006) 지하철 역사 승강장 화재

발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (I) - 실험적 접근-. 한국화재소방학회 논문집, 한국화재소방학회, 제20권, 제3호, pp. 9-14.
 장희철, 김태국, 박원희, 김동현 (2005) 지하역사에서 화재발생시 자연풍 및 강제배연의 유무에 따른 열 및 연기거동 특성 연구. 한국화재소방학회 논문집, 한국화재소방학회, 제19권, 제1호, pp. 80-86.
 장희철, 김태국, 박원희, 김동현 (2006) 지하철 역사 승강장 화재 발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구 (II) - 수치적 접근-. 한국화재소방학회 논문집, 한국화재소방학회, 제20권, 제3호, pp. 15-20.
 한국철도기술연구원(2003) 도시철도시스템의 안전방재 능력 향상 방안 연구. 제3편, 차량안전기준/내장재/표준역사, 한국철도기술연구원.
 Chow, W. (1996) Simulation of tunnel fires using a zone model. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 221-236.
 Hasemi, Y. et al (2004) 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, pp.797-804
 Hee-Chul Chang, kyoung-Beom Yoon, and Tae-Kuk, Kim (2007) Numerical Study on Effects of the Heat Release Rate from Underground Subway Platform Fire on the Heat and Smoke Behavior. *ITA-AITES World Tunnel Congress*, 5-10 May, Prague, Czech Republic.
 Kai Kang (2007) A smoke model and its application for smoke management in an underground mass transit station. *Fire Safety Journal*, Vol. 42, No. 3, pp. 218-231.
 K.B. McGrattan, G.P. Forney (2006) *Fire Dynamics Simulator (Version 4.07) - User's Guide*. NIST Special Publication 1019, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
National Fire Codes, Guide for smoke movement system in malls, atria and latge area. NFPA 92B, 2005 Edition.

◎ 논문접수일 : 2008년 02월 29일
 ◎ 심사의뢰일 : 2008년 03월 04일
 ◎ 심사완료일 : 2008년 04월 14일