

전동차 화재시 승강장 및 터널 환기실의 팬 작동에 따른 열 및 연기 배출 특성 연구

Study on Heat and Smoke Exhaust Characteristics for Different Operating Modes of Platform and Tunnel Fans during a Passenger Train Fire

장희철 · 김태국* · 손봉세** · 박원희***†

Hee-Chul Chang · Tae-Kuk Kim* · Bong-Sei Son** · Won-Hee Park***†

중앙대학교 대학원, *중앙대학교 기계공학부,
소방방재학과, *한국철도기술연구원 궤도·토목 연구본부
(2007. 12. 18. 접수/2008. 1. 4. 채택)

요 약

본 연구에서는 화재가 발생한 전동차가 지하철 역사에 정차된 상황에서 승강장과 터널에 설치된 환기팬 작동 유무 및 전환 시간에 따른 열 및 연기 배출 특성 예측을 위하여 수치해석을 수행하였다. 환기팬 작동 방식에 따른 온도, 일산화탄소 및 가시거리 분포를 피난자의 호흡높이를 1.7m로 고려하여 비교 분석하였다. 수치해석 결과 터널 환기팬 작동으로 인하여 승강장 내의 열 및 연기가 신속히 터널부로 배출되었다. 또한 피난 진행 중에는 승강장 환기팬을 작동하고 피난이 완전히 완료된 후 터널에 설치된 환기팬을 작동하는 것이 효과적인 배연방법임을 확인할 수 있었다.

ABSTRACT

This study is focused on the numerical predictions of heat and smoke exhaust characteristics in an underground subway station stopping a fire train. Various ventilation operating modes with the fan equipped the platform and tunnels are considered. Distributions of temperature, carbon monoxide and visibility at a height of 1.7 m(breath height) above the platform are analysed for different ventilation fan operation mode. The numerical results show that smoke and heat is rapidly removed through tunnel by operating the tunnels fans. We suggested that during evacuation of passengers is not completed, the ventilation system in the platform is activated. After completion of passenger evacuation tunnel fans are activated but the fans in the platform are stopped.

Keywords : Subway fire, Switch mode, Tunnel, Underground station, Ventilation mode

1. 서 론

지상 건축물 화재와 달리 지하공간에서의 화재는 외부로부터 산소공급이 제한될 수 있기 때문에 연소상태가 불안정하여 대량의 유독가스 및 연기를 배출할 수 있다. 화재로 인한 사망의 80% 이상이 연기에 의한 질식사임을 감안할 때 밀폐구조의 형태를 갖는 지하철 역사와 터널은 더욱더 연기와 유독가스에 의한 위협에 노출되어 있다고 할 수 있다. 국내의 경우 2003년에 발

생한 대구지하철 1호선 중앙로역 방화사건으로 인하여 376명의 사상자가 발생하였으며, 이 사건을 발단으로 지하철 역사 및 객차내부 화재발생시 관계자들의 피난 대처 능력, 초기 화재진압을 위한 소화 장비 및 인력, 전동차의 재료특성, 배연시스템의 작동 성능 등의 문제점으로 지적되었다. 특히 대도시의 대표적인 대중교통수단임을 감안할 때 지하철 화재는 시민들의 일상적인 안전에 매우 큰 위협요인임을 의심할 여지가 없으며, 이러한 문제점 해결을 위하여 산학연을 중심으로 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 실제 운영되는 지하철 역사, 터널 및 전동차 내에서 실물화재실험을

† E-mail: whpark@krii.re.kr

통한 열 및 연기 거동 특성 파악은 매우 제한적이고 위험하다. 국·내외 연구 동향으로는 제한된 열방출의 화재를 이용한 실물화재실험 등을 통한 지하철 승강장에서 화재 열·연기거동특성 연구¹⁾ 및 열 부력을 지닌 가열된 연기를 이용한 모의화재연기실험으로 화재 연기거동을 간접적으로 볼 수 있다.²⁾ 이러한 실험을 하기 위해서는 시간적, 경제적, 공간적인 조건이 충족되어야 하며, 관계기관 및 관계자들의 협조가 먼저 선행되어야 한다. 이와 같은 문제점의 대안으로 지하역사내 화재 발생으로 인한 연기 및 열유동의 분석 및 화재영향평가 연구는 수치해석을 통하여 많이 접근하고 있는 실정이다.³⁻⁸⁾ 본 연구의 시나리오는 화재가 발생한 전동차가 승강장에 주차되어 있는 상황을 고려하여 승강장 및 터널 환기실 팬의 작동 유무와 전환시간에 따른 열, 일산화탄소 및 가시거리분포 특성을 승객의 호흡높이를 기준으로 수치해석을 통하여 검토하였다.

2. 수치해석 방법

2.1 연구대상 개요

연구의 대상이 되는 역사는 Figure 1과 같은 구조의 서울지하철 4호선 수유역과 상·하행선 방향의 일부 터널을 이며, 특징을 간단히 요약하면 다음과 같다. 상대식(지하역) 상·하단 직선 승강장 구조이며, 지하 1층 대합실 지하 2층 승강장으로 구성되어 있다. 해석 대상의 크기는 승강장: 20.4 m[W]×205 m[L]×6 m[H], 터널: 8.0 m[W]×6.0 m[L]×10.0 m[H]×2(상·하행) 및 전동차: 3.2 m[W]×4.3 m[L]×19.5 m[H]×10량이다. 내부계단은 양쪽 승강장에 각각 4개씩 총 8개가 설치되어 있다. 환기실은 대합실 양 끝단 및 터널 상·하행 천장부에 각각 위치하고 있으며, 대합실 및 터널에 각각 동일한 성능의 팬들이 설치되어 환기 및 배기를 제어하게 된다. 차량 내장재 재료는 교체차량을 고려하여 벽과 천장: Aluminum, 의자 커버: Stainless Steel 및 바닥: Synthetic Rubber로 설정하였다. 기타 고려된 승강장 내 구조물로는 내부 계단, 승강장 벽, 환기구 디

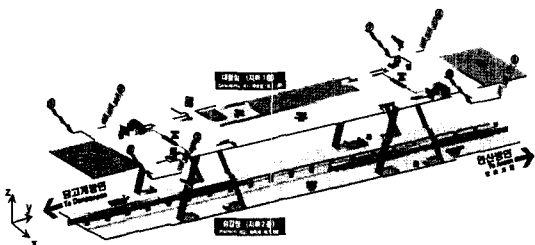


Figure 1. Skeleton drawing of the Suyou station.

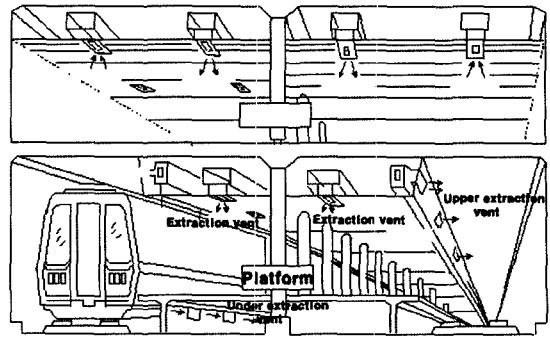


Figure 2. Outline of the ventilation system for an underground station.

Table 1. Conditions for the ventilation system

환기설비	유량(유속)	규격 및 수량
Extraction vent	2,384 CMM (3.748 m/s)	0.25 m×0.4 m (53×2개)
Upper extraction vent	1,192 CMM (3.942 m/s)	0.6 m×0.7 m (6×2개)
Under extraction vent	-	0.4 m×0.8 m (41×2개)
Flow from tunnel	(2.5 m/s)	4.0 m×4.0 m (1×2개)

퓨저, 기둥 및 제연 경계벽 등이다. 또한 터널의 배기구는 양쪽 승강장 끝단에서 각각 5m 떨어진 지점에 개착복선 상부수평형 환기실 구조 형식으로 크기는 4 m[W]×4 m[L]로 고려하였다. Figure 1과 같이 당고 개방면 승강장 상부 좌측 끝에 원점을 설정하였으며 승강장과 선로를 가로지르는 방향을 x축, 선로와 나란한 방향을 y축, 높이방향을 z축으로 설정하였다. Figure 2는 점식 승강장의 환기설비를 보여주고 있으며, 상대식 승강장도 동일한 원리이다. Table 1은 승강장 및 터널에 설치된 팬의 풍량과 디퓨저 규격 및 수량을 나타내었다.

2.2 연구대상 모델링

수치해석을 위한 대상 모델링은 서울메트로에서 입수한 도면 및 기 수행한 실험을 위한 사전답사 등을 통하여 수집된 자료를 활용하였다. 수치해석을 위하여 사용한 프로그램은 화재 전용 해석 Field 모델 코드인 NIST(National Institute of Standards and Technology)에서 개발한 FDS(Fire Dynamic Simulator) V 4.06⁹⁾를 수정없이 사용하였다. FDS는 Navier-stokes 방정식을 고려하며, 이 방정식의 확산 항들은 LES(Large Eddy

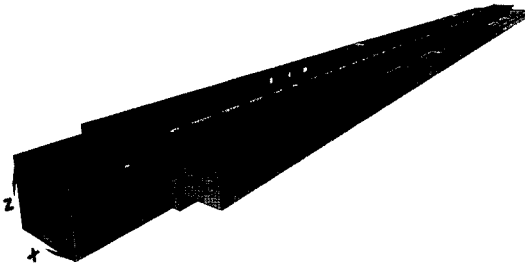


Figure 3. Grid system for numerical calculation.

Simulation) 계산으로 해결된다. 온도를 해석하기 위하여 복사열전달을 고려한 에너지방정식을 풀며, 복사열 전달방정식을 해석하기 위하여 유한체적법(Finite Volume Method, FVM)을 사용한다. 혼합분을 연소모델(Mixture Fraction Combustion Mode)로 연소현상을 예측할 수 있다. 비회색가스 물성치는 FDS에서 제공하는 밴드모델을 이용한다. 격자구성은 Figure 3에 나타난 바와 같이 약 100만개로 생성하였으며, 대표적인 격자크기는 $\Delta x = 0.2\text{ m}$, $\Delta y = 0.5\text{ m}$, $\Delta z = 0.2\text{ m}$ 간격으로 생성하였다. 2.1절에서 언급했던 승강장, 터널 및 전동차의 크기, 위치, 재료 특성, 기동 등은 실제와 유사하게 모델링하였다.

2.3 수치해석 조건

본 연구에서 고려한 수치해석 조건인 승강장 배연 후 터널 배연으로의 전환 시간을 발화 4분, 10분 및 모든 배연 시스템이 작동하지 않은 경우로 구분하여 열 및 연기확산 분포 예측을 목적으로 한다. 화재는 하행 방향의 승강장 끝단을 기준으로 100 m지점(전동차 5량 내)의 전동차 바닥에서 발생된 것으로 설정하였다. 반응연료는 헵탄, 화재는 발화 5분 경과 후 최대 열방출량인 15 MW가 되는 것으로 설정하였으며 화재성장 속도는 Power Law Relation¹⁰⁾ 공식을 사용하였다. Figure 4는 앞에 언급한 공식을 이용한 시간 경과에 따른 화재성장곡선을 보여주고 있다. 당고개 방향의 전동차의 출입문, 전동차 내의 연결문은 개방된 것으로 설정하였다. 또한 승강장과 대합실의 연결통로인 내부계단은 화재로 인한 유동의 변화가 매우 클 것으로 예상됨으로 역시 개방된 것으로 고려하였다. 초기 온도는 20 °C 이며, 기타 계단 등과 같은 구조물은 콘크리트로 설정하였다. 시뮬레이션 수행시간은 화재성장속도, 승객피난 시간 등을 고려하여 15분으로 하였다. 본 연구에서 고려한 승강장 및 터널 배기 방식을 Table 2에 나타내었다. 승강장의 배연 팬은 화재발생과 동시에 작동되도록 설정하였으며, 터널 천장에 설치된 환기팬이 최

Table 2. Condition for the numerical analysis

		Fire Compartment / Zone	Non-Fire Compartment / Zone	Tunnel
Case 1		Stop	Stop	Stop
Case 2	0~2 min	Exhaust	Stop	Stop
	2~4 min	Exhaust	Exhaust	Stop
	after 4 min	Stop	Stop	Exhaust
Case 3	0~2 min	Exhaust	Stop	Stop
	2~10 min	Exhaust	Exhaust	Stop
	after 10 min	Stop	Stop	Exhaust

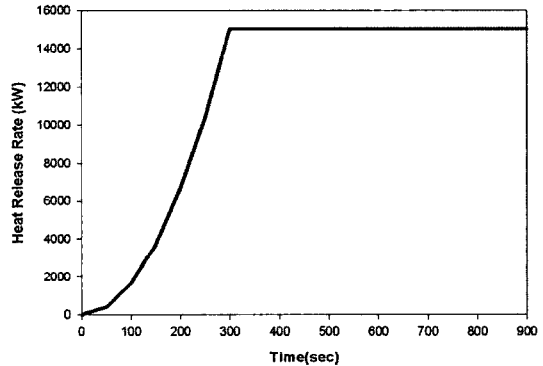


Figure 4. Fire growth curve considered.

고 유속인 2.5 m/s에 도달하는데 소요되는 시간을 30 초로 설정하였다.

3. 결과 및 고찰

승객 피난을 고려하여 승강장 및 터널에 설치된 환기팬을 전환하여 열 및 연기를 외부로 배출시키는 비상시 작동 방식을 Switch mode라 한다. 현재 국내의 설정 모드인 승강장에서의 배연만을 고려한 경우 및 Switch mode로 작동할 경우의 제연 성능 비교를 기 수행 하였으며, 제연에 좀 더 효과가 좋을 수 있음을 확인할 수 있었다. 이와 같은 수치해석의 결과를 바탕으로 환기팬이 전혀 작동하지 않은 경우와 승강장에서 터널로 배연 시스템이 전환되는 시간차에 의한 열, 연기 및 가시거리 분포 특성이 승객 피난에 미치는 영향 예측을 위하여 호흡높이를 1.7 m로 고려하여 비교하기로 한다. 결과 그림은 승강장 바닥 높이 1.7 m에서의 단면도를 보여주고 있으며, 그래프는 승강장 내부 구조물 등을 고려한 승강장의 정중앙 지점이며, 그래프에 표시된 Area는 다음과 같이 설정하였다.

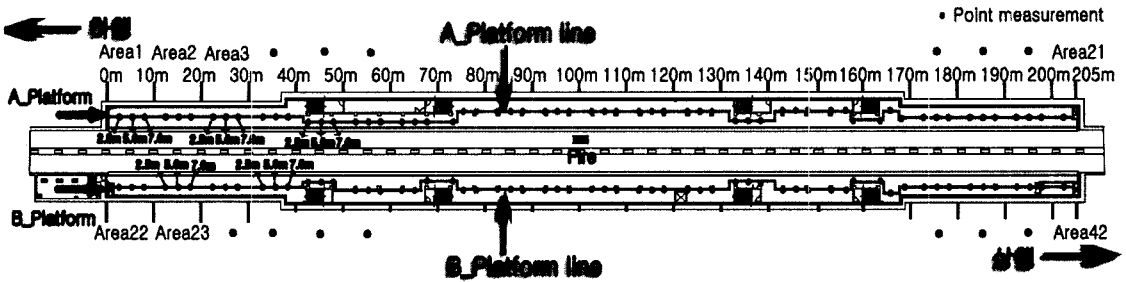


Figure 5. Points(locations) for measurement on the platform.

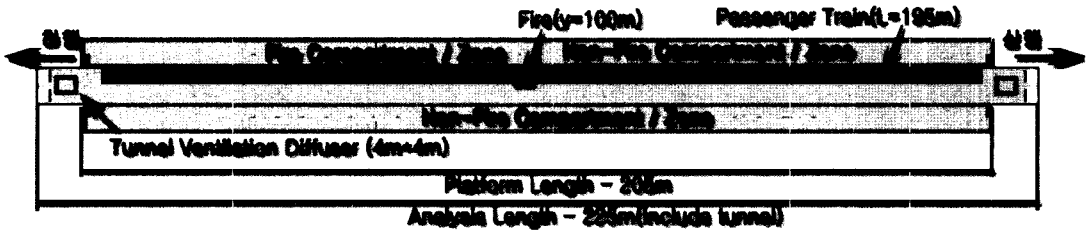


Figure 6. Zones and fire location on the platform.

205 m(승강장 총 길이) ÷ 10 m(간격) × 2(상대식승강장) = 총 42개의 Area로 구분되며, 모든 Area 내부에는 결과를 수치로 뽑아내기 위한 Point measurement가 높이 1.7 m를 기준으로 길이방향으로 2.5 m, 5.0 m, 7.5 m 지점에 각각 설정하였다. 따라서 고려된 Point의 총 개수는 122개이며, 각 Area 내부의 3개 Point를 평균하여 그래프에 표시하였다(Figure 5 참조). 화재가 발생한 전동차가 정차된 승강장을 A_Platform으로 반대편을 B_Platform으로 구분하였으며, 그래프 및 본문에는 A_P와 B_P로 명칭하기로 한다. 상·하행은 승강장 정중앙을 중심으로 구분하며, 하행방향: $y = 0 \sim 102.5$ m, 상행방향: $y = 102.5 \sim 205$ m이며, 화재발생 위치는 $y = 100$ m이다. Figure 5는 화재발생 위치, 상·하행선 방향, Area 및 Point measurement view를 보여주고 있으며, Fire Compartment/Zone과 Non-Fire Compartment/Zone의 구분은 Figure 6과 같다.

3.1 열 확산 분포

발화 180초 이후 환기팬 작동 여부에 따른 열확산의 차이를 보이기 시작하며, 팬의 작동은 전동차 내부 및 승강장으로의 열확산을 지연시키는 것을 확인할 수 있다. 환기팬이 미작동시 상·하행 방향으로 유사하게 열이 확산된 반면, 화재발생과 동시에 팬이 작동한 하행방향(Fire Compartment/Zone)으로 열이 더 빠르게 확산되는 경향을 보였다. 발화 270초 후 하행방향의 일

부구간($y = 70 \sim 90$ m)에서는 터널 환기팬 작동(4분)으로 온도가 급격히 상승된다. 이와 같은 결과는 터널 환기팬 작동이 열을 호흡높이로 빠르게 하강시킬 수 있음을 보여준다. 발화 330초 후 화재가 발생한 전동차 내부의 온도가 대피로 한계 온도인 60°C를 초과하기 시작하고 화재주변은 발화 240초 후 터널 환기팬이 작동하였을 경우에서 가장 높은 온도 분포를 보이며, 이외 승강장 및 전동차 내부의 온도는 환기팬 미작동할 경우, 두 번째가 터널 환기팬이 작동하는 경우이며, 승강장 환기팬이 작동한 경우가 가장 낮은 온도분포를 나타내었다. 발화 후 600초 이내에서 환기팬 작동은 상·하행방향의 승강장 끝단 구간($y = 0 \sim 40$ m, $160 \sim 205$ m)으로의 열 확산을 지연에 매우 효과적임을 확인할 수 있다. 국내 많은 역사의 내부계단이 승강장 끝단에 위치함으로 환기팬 작동의 안전에 피난에 직결됨을 확인할 수 있다. 또한 터널 환기팬이 10분 후 작동되는 경우도 4분 후 작동한 경우와 동일하게 열이 빠르게 호흡높이로 확산됨을 보인다. Figure 7, 8은 발화 690초 후 온도 분포를 보여주고 있다. 환기팬 미작동이 가장 높은 온도분포를, 10분 후 터널 환기팬이 작동한 경우가 가장 낮은 온도 분포의 경향을 나타내고 있다. 이후 시뮬레이션이 종료되는 900초 사이에서 A_P 승강장 끝단으로 갈수록 10분 후 터널 환기팬이 작동한 경우가 4분 후 작동한 경우의 온도보다 상승되는 경향을 보였다.

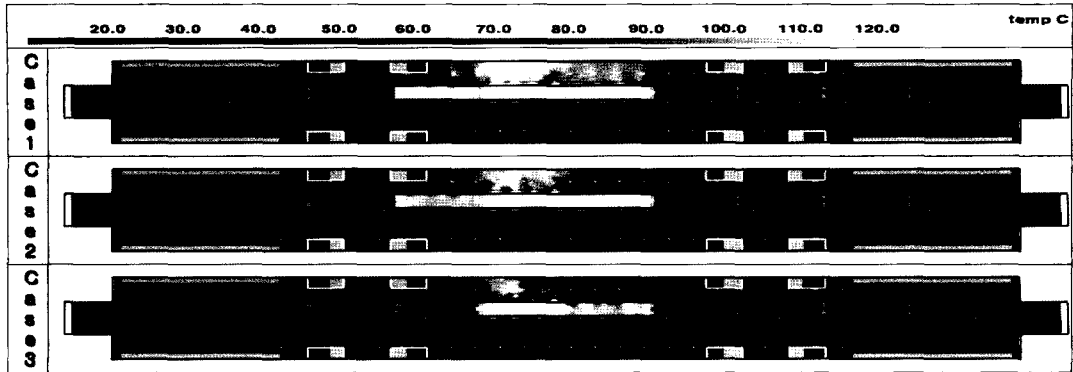


Figure 7. Temperature contours at 1.7 m above the platform floor (t = 690 sec).

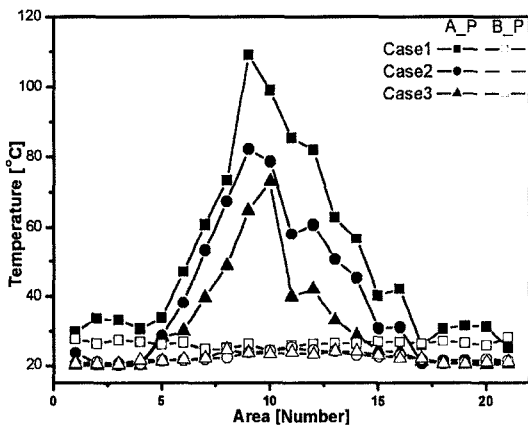


Figure 8. Temperature distributions along A-Platform and B-Platform lines at 1.7 m high above the platform floor (t = 690 sec).

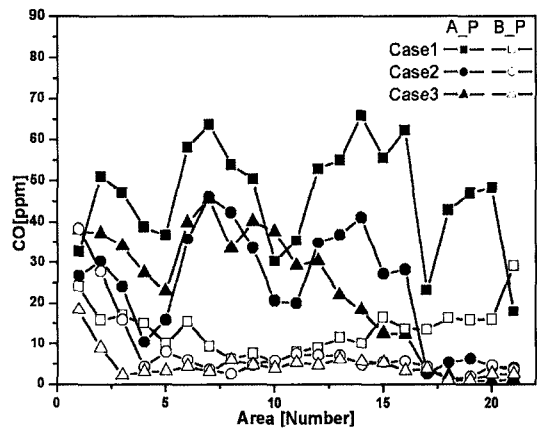


Figure 9. Carbon monoxide distributions along A-Platform and B-Platform lines at 1.7 m high above the platform floor (t = 690 sec).

3.2 CO 확산 농도 분포

발화 150~240초 사이에서 환기팬 작동으로 CO농도가 높게 나타난 구간(y = 50~70 m)을 제외하고 승강장

전 구간 및 전동차 내부는 환기팬 미작동시가 높게 분포함을 확인할 수 있다. 또한 화재발생과 동시에 환기팬이 작동한 화재지점기준 하행방향으로 확산이 좀 더

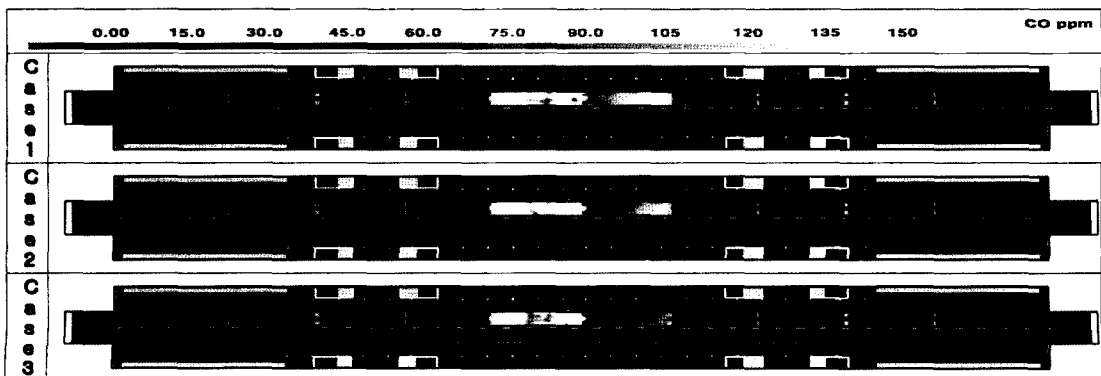


Figure 10. Carbon monoxide contours at 1.7m above the platform floor (t = 690 sec).

빠르게 나타났다. 발화 270초 이후 상행방향 전 구간 및 전동차 내부의 CO확산은 환기팬 미작동, 4분 후 터널 환기팬 작동 그리고 10분 후 터널 환기팬 작동 순으로 넓고 높은 농도분포를 보이며, 하행방향으로는 매우 불규칙한 분포를 보이지만, y=0~40m구간 내에서는 터널 환기팬이 작동될 때 CO농도가 가장 낮은 것으로 나타났다. Figure 9, 10은 발화 690초 후 내고 있다. 이후 시뮬레이션이 종료되는 900초 사이에서 A_P 승강장 끝단으로 갈수록 10분 후 터널 환기팬이 작동한 경우가 4분 후 작동한 경우의 온도보다 상승되는 경향을 보였다.

CO가 확산 분포를 보여주고 있다. 환기팬 미작동한 경우가 가장 넓은 구간에 농도도 높게 나타났으며, 상행방향 및 B_P 하행방향은 발화 4분 후 터널 환기팬이 작동한 경우가 높은 농도분포를 A_P 하행방향으로는 발화 10분 후 터널 환기팬이 작동한 경우가 높은 CO농도 분포를 보여주고 있다. 발화 10분 후 작동한 터널 환기팬으로 CO가 빠르게 승강장 전역으로 확산되는 경향을 나타내었다. 발화 810초 후 CO가 터널 환기팬의 작동시간에 상관없이 유사한 농도분포를 보여주었으며, 환기팬을 고려하지 않은 경우에 비하여 CO 농도는 낮고 확산 구간분포도 좁게 나타났다.

3.3 가시거리 분포

발화 240초 이내 환기팬 미작동시 화재발생위치를 기준으로 상·하행 방향으로 유사한 가시거리를 보인 반면 환기팬 작동한 경우 화재발생과 동시에 작동된 화재구역(하행)으로 기류가 형성되어 가시거리에 더 크게 영향을 미치는 것을 확인할 수 있다. 발화 240초 이후 여전히 환기팬 미작동시에 가장 가시거리가 짧게 나타났으며, 승강장 환기팬에서 터널 환기팬으로 전환

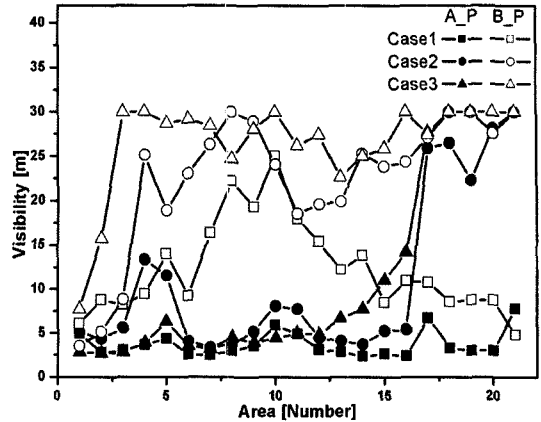


Figure 12. Visibility distributions along A-Platform and B-Platform lines at 1.7 m high above the platform floor (t = 690 sec).

되어 작동한 경우가 승강장 환기팬이 지속적으로 작동한 경우에 비하여 좀 더 가시거리가 짧아짐을 확인할 수 있다. 화재발생시 승강장 및 터널 환기팬 작동은 상·하행방향 승강장 끝단 구간 내의 가시거리를 확보하는데 매우 효과적인 것으로 나타났다. 발화 600초 이전 거의 모든 승강장 내에서 가장 넓은 가시거리를 유지했던 승강장 환기팬이 작동한 경우에서 터널 환기팬으로 전환 작동되면서 발화 4분 후 터널 환기팬으로 전환 작동한 경우와 시간경과에 따라 유사한 가시거리 분포의 경향을 보여준다. Figure 11, 12는 발화 690초 후 수치해석 조건에 따른 가시거리 분포특성을 보여주고 있다. 그림에서 나타낸바와 같이 환기팬 미작동의 경우 작동한 경우에 비교하여 가시거리의 차이가 매우 큰 것을 확인할 수 있으며, 터널 환기팬의 전환 작동 시간에 따른 가시거리의 분포는 상·하행방향 및 A, B_P에 따라 차이를 보였다.

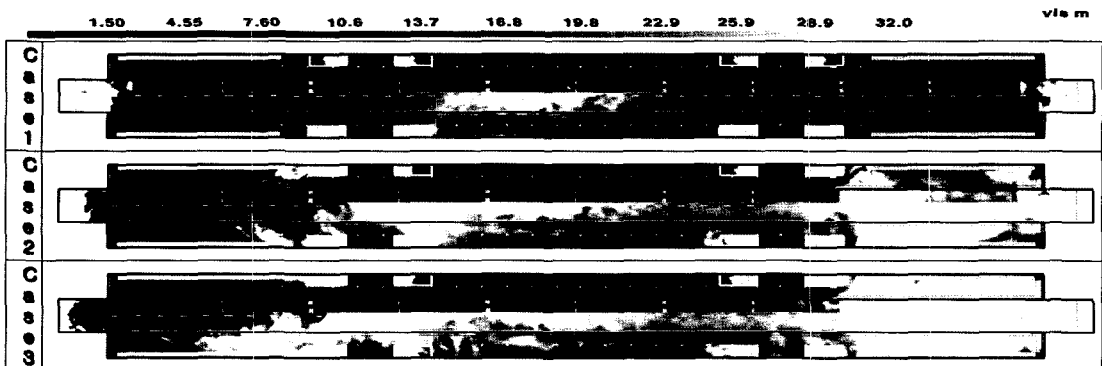


Figure 11. Visibility contours at 1.7 m above the platform floor (t = 690 sec).

4. 결 론

본 연구는 화재가 발생한 전동차가 승강장에 정차된 경우 배연 운전모드에 따른 열, 일산화탄소 및 가시거리 분포 차이를 비교 분석하여 최적의 배연방식 선정을 목적으로 한다. 이를 위하여 전혀 배연을 하지 않은 경우, 승강장에서 4분 및 10분 배연 후 터널에서 배연으로 전환하여 수행한 경우의 3가지로 구분하여 비교 분석하였다. 일반적으로 승강장 배연에서 터널 배연으로의 전환은 승객 피난이 진행 중일 경우 승강장 천장부에 설치된 배기구를 통하여 배연을 수행하며, 피난이 완료된 후 터널에 설치된 환기팬을 작동하여 보다 신속하게 연기를 배출하는 것이다. 승객 피난시 직접적인 영향을 미치는 열, 일산화탄소 및 가시거리 분포를 호흡높이를 1.7 m로 고려하여 검토하였으며, 결론을 간단히 요약하면 다음과 같다.

1) Switch mode의 전환시간에 관계없이 배연을 전혀 하지 않은 경우에 비하여 열 및 일산화탄소를 외부로 빠르게 배출시키며, 또한 가시거리 확보가 유리한 것으로 나타났다.

2) 터널 팬이 작동은 승강장 끝단 구간의 열, 일산화탄소 배출 및 가시거리를 확보하는데 매우 효율적으로 나타났다.

3) 피난이 완료되지 않은 시점에서 터널 환기팬의 작동은 열 및 일산화탄소를 호흡높이로 빠르게 전파시킬 수 있음으로 승객이 승강장에서 완전히 탈출 후 작동되어야 할 것이다.

참고문헌

1. Y. Hasemi, S. Moriyama, D. Nam, S. Tanaka, N. Okazawa, and W. Ding, "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(2004).

2. 한국철도기술연구원, "도시철도시스템의 안전방재 능력 향상 방안 연구, 제3편 차량안전기준새장재/표준역사"(2003).
3. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국, "지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구(I) -실험적 접근-", 한국화재소방학회 논문지, Vol.20, No.3, pp.9-14(2006).
4. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현, "지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치 연구(II) -수치적 접근-", 한국화재소방학회 논문지, Vol.20, No.3, pp.15-20(2006).
5. 장희철, 김태국, 박원희, 김동현, "지하역사에서 화재 발생시 자연풍 및 강제배연의 유무에 따른 열 및 연기 거동 특성 연구", 한국화재소방학회 논문지, Vol.19, No.1, pp.80-86(2005).
6. H.-C. Chang, K.-B. Yoon and T.-K. Kim, "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(2007).
7. W.-H. Park, D.-H. Kim, and H.-C. Chang, "Numerical Predictions of Smoke Movement in a Subway Station under Ventilation", ita2006-extend Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.21, No.3/4, pp.304(2006).
8. K. Kang, "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(2007).
9. K. McGrattan, "Fire Dynamics Simulator (Version4) Technical Reference Guide", NIST(2005).
10. National Fire Codes, "Guide for Smoke Movement System in Malls, Atria and Latge Area", NFPA 92B, 2005 Edition.