

## 지하역사에서 화재발생시 자연풍 및 강제배연의 유무에 따른 열 및 연기거동 특성 연구

### Study on Heat and Smoke Behavior Due to the Natural Wind and the Forced Smoke Ventilation for the Fire in an Underground Subway Station

장희철 · 김태국\*† · 박원희\*\* · 김동현\*\*

Hee-Chul Chang · Tae-Kuk Kim\*† · Won-Hee Park\*\* · Dong-Hyeon Kim\*\*

중앙대학교 기계공학부 대학원, \*중앙대학교 기계공학부,

\*\*한국철도기술연구원 궤도·토목 연구본부

(2005. 1. 17. 접수/2005. 3. 4. 채택)

#### 요 약

본 연구는 지하역사 승강장 가판대에서 화재발생시 자연풍의 영향과 강제배연시스템의 작동 여부에 따른 열과 연기의 유동특성을 알아보기 위하여 수치해석을 수행하였다. 해석 조건으로는 1) 자연풍이 없고 배연설비도 가동되지 않는 경우, 2) 자연풍은 불고 있으나 배연설비는 가동되지 않는 경우, 3) 자연풍은 없으나 배연설비가 가동되는 3가지 경우이다. 수치해석의 결과 자연풍이 역사의 길이 방향으로 불고 있을 경우에는 길이방향으로 화재의 확산이 빠르게 진행되며 열과 연기가 승강장에 급속하게 확산되어 피난에 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 배연설비가 가동될 경우 지하역사 승강장으로 열과 연기가 보다 빠르게 전파되었지만 호흡안전 높이까지 열 및 연기가 도달하는 데에는 배연설비를 작동하지 않는 경우에 비하여 훨씬 많은 시간이 소요되었다. 그리고 화재발생위치에서 자연풍이 불어오는 지하공간영역에서는 배연설비의 제연효과가 하류 측의 영역에 비하여 보다 크게 나타나는 것을 알 수 있었다. 배연설비의 작동은 연기와 열을 동시에 외부로 배출시키는 역할을 하여 승객의 시야 확보 및 피난 시간을 확보하여 주는 것으로 나타났다. 해석조건에서 가장 큰 차이를 보이는 조건2)와 조건3)에서 화재구역 내의 온도차는 약 2배 차이를 보였으며, 화재지점에서 200 m 지점의 연기농도분포도 약 6배 정도의 차이를 보였다.

#### ABSTRACT

In this study effects of the natural wind and the forced smoke ejection by operating the exhaust fan are studied numerically to examine the flow characteristics of the smoke and heat generated from a fire on the platform of an underground subway station. Three different situations, including 1) the case with no natural wind and no exhaust fan operation, 2) the case with natural wind but no exhaust fan operation and 3) the case with no natural wind but exhaust fan operation, are considered for the numerical analyses. The numerical results show that the natural wind causes a rapid spread of the fire along the tunnel resulting in rapid spread of the smoke and heat over the platform which affects the escape. The operation of the exhaust fan also results in the rapid spread of smoke and heat over the platform, but the time required for reaching the safe escaping height of the smoke layer with the exhaust fan operation is much longer than that without the exhaust fan operation. The numerical results also show that the required capacity of the exhaust fan becomes larger when the effect of the natural wind is included.

**Keywords:** Exhaust fan, Fire, Natural wind, Smoke ventilation, Underground space

† E-mail: kimtk@cau.ac.kr

## 1. 서 론

최근 도시의 구조는 생활여건의 변화와 편의성의 추구에 따라 변모하고 있으며, 산업의 발전과 경제 성장 등에 따라서 새로운 기능과 활동에 적합한 공간과 시설을 필요로 하게 되었다. 도시의 과밀화, 평면적인 토지 공간이 부족하게 됨에 따라 도시공간의 효율적인 이용이 요구되면서 지하공간의 활용이 증가되는 추세이다. 국내 대부분 지하철의 역사 및 본선 터널은 긴 폐쇄공간과 유사하므로 초기 화재 진압이 매우 중요하며, 충분한 제연시스템이 설치되지 않을 경우에는 피난계단 등 피난경로가 연기를 확산시키는 굴뚝효과를 일으킬 가능성이 매우 높다. 또한 외부로부터의 산소 공급이 제한될 수 있기 때문에 시간의 경과에 따라 연소상태가 불안정하여 대량의 연기 및 유독가스를 발생시킬 수 있는 상황이다. 이때 지하역사에 설치된 제연시스템의 작동과 본선의 길이방향으로 불어오는 자연풍의 영향으로 화재가 확산될 가능성이 매우 높다.

해외 주요 터널 화재사례를 살펴보면, 일본 영단지하철(1968), 미국 펜센트럴 철도 허드슨강 하저터널(1969), 프랑스 국유철도(1971), 일본 국철북륙선 북륙터널(1972), 스페인 국유철도 콘고치나스터널(1978), 미국 샌프란시스코만 고속철도(1979), 일본 근철동 대판선 생구터널(1987), 영불 해협터널(1996) 등, 과거의 대규모적인 화재 사례 중 차량의 전기계통에서 발화되는 사례가 대부분이며, 일반적으로 터널은 폐쇄적인 공간으로 볼 수 있기 때문에 발화시에는 연기에 의하여 화재발생지점으로 쉽게 진입할 수 없다.<sup>1)</sup>

국내에서는 2003년 2월 18일 대구 지하철 1호선에서 승객의 방화로 인한 화재가 발생하여 192명의 사망자와 148명의 부상자를 낸 사건이 발생하였다. 위에서 살펴본 해외 주요 터널에서 가장 큰 인명피해를 보였던 일본 국철북륙선의 30명에 비해 대구 지하철 화재는 6배 이상의 인명피해를 주었다. 이처럼 지하공간에서의 화재 발생은 바로 인명피해로 연결된다.

지하철 및 터널관련 국내·외의 화재 특성 연구를 살펴보면, 박외철<sup>2)</sup>은 대구지하철역 제연설비의 풍량을 알아보기 위하여 화재의 크기와 배기의 풍량을 변화시켜 Simulation을 수행한 결과 NFPA 130에 규정된 대피로의 온도를 60°C 이하로 유지하기 위해서는 화재크기가 2MW일 때 2.4 m<sup>3</sup>/s이상의 배기 풍량이 필요하다는 해석 결과를 얻었으며, 차철연<sup>3)</sup>은 CFD 해석을 통해 지하공간에서 팬의 성능 결정에 관한 연구를 수행하였다. 이성룡<sup>4)</sup>은 터널의 축소모델을 이용하여 배기구의 위치에 따라 연기선단이 터널출구에 도달하는

시간을 측정하는 자연배기 실험을 수행하였다. 정진용<sup>5)</sup>은 3차원 아트리움 공간 내에서 화재 발생시 복사가 고려된 연기의 거동을 알아보기 위하여 자체 개발한 SMEP(Smoke Movement Estimating Program) field 모델을 사용하여 수치해석결과와 실험결과를 비교하였다. 윤명오<sup>6)</sup>는 지하공동구에서 유독가스로 인한 소화의 어려움을 토대로 소방 설비가 일정온도에서 제대로 작동하는지의 여부를 실제 공동구 모형과 Simulation을 통하여 검증하였다. O. Vauquelin<sup>7)</sup>은 터널 내에 2대의 적출환기구의 duct 위치를 변화시켜 제연효과를 비교하는 수치해석을 수행하였고, Yasushi Oka<sup>8)</sup>은 응급상황설비 설계에 사용되는 Thomas의 경험식을 대신할 새로운 식을 제안하였다.

화재로 인한 사망의 80% 이상이 유독가스에 의한 질식사이다. 특히 지하공간은 밀폐구조이기 때문에 연기에 의한 인명피해는 더욱 높은 수치를 가질 것이다. 따라서 지하역사는 자연풍과 같은 변수를 고려하여 환기시설을 갖추어야 피난 시간확보는 물론 제연효과를 볼 수 있을 것이다.

지하공간이라는 밀폐적인 특성은 연기 제어가 가장 중요한 요소이기 때문에 자연풍이 연기 제어에 미치는 영향과 배연기의 작동 유·무에 따른 연기와 열의 유동을 알아보기 위하여 본 연구에서는 서울시의 수유역을 연구 대상으로 고려하였다. 자연풍과 배연기가 작동하지 않았을 경우, 자연풍만을 고려하였을 경우, 자연풍은 없고 배연기가 작동하였을 경우의 3가지로 구분하여 연구하였다. 가상 화재발생지점은 당고개방면의 승강장 끝으로 부터 80 m 떨어진 지점으로 가정하였으며, 화재 강도 3MW, 화재 구역 2m×2m인 규모의 화재 발생을 고려하였다. 호흡높이인 1.5m~1.6m의 높이에서의 온도과 연기농도의 분포도를 분석하여 화재 발생시 자연풍과 배연설비의 영향을 살펴보았다.

## 2. 화재공기유동 수치해석

### 2.1 지하역사의 개요

본 연구에서는 지하철 4호선 수유역사를 고려하여 가상 화재 수치해석을 수행하였다. 수유역사의 특징은 상대식(지하역) 상, 하단 직선 승강장 구조이며, 정거장 층수는 지하 1층 대합실 지하 2층 승강장으로 구성되어 있다. 또한 연구 대상으로 선정된 수유역사는 다른 역사에 비해 자연풍의 영향을 많이 받는 특징이 있다. Fig. 1은 수유역사의 구조 및 가상 화재의 발생 위치를 나타내고 있으며, 비상계단은 좌·우 승강장에 4개씩 설치되어 있다. 그리고 3D-CAD를 이용하여 구

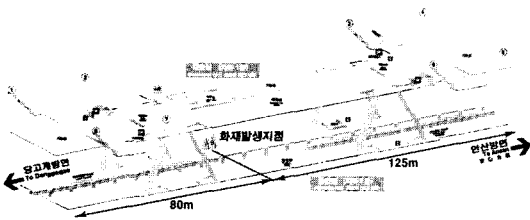


Fig. 1. Drawing of Suyou station of Seoul subway line 4 and the origin of a fire.

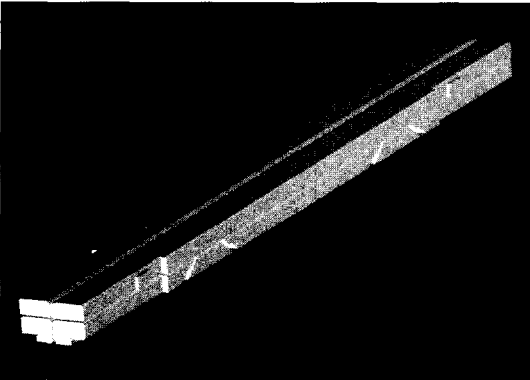


Fig. 2. 3-Dimensional modeled geometry of Suyou station of Seoul subway line 4.

축된 역사의 Modeling을 Fig. 2에 나타내었다.

2.2 지하역사의 개략도 및 화재 위치

지하역사의 크기(20.4 m×6.0 m×205 m)는 지하철공사에서 입수한 도면을 토대로 Modeling하였으며, 격자 구성은 Fig. 3에 나타난 바와 같이 균일하게 약 110만 개로 생성하였다. 지하철 4호선 수유역사의 횡단면도,

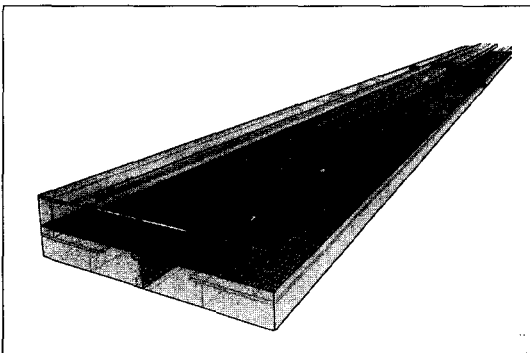


Fig. 3. Generation of the grid system for numerical calculation.

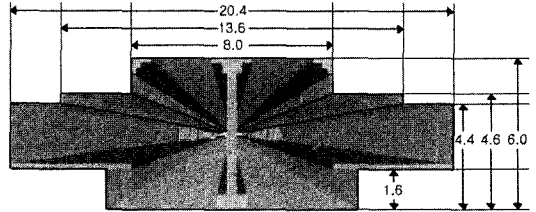


Fig. 4. Cross-sectional outline drawing of Suyou station.

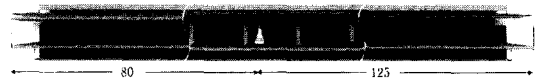


Fig. 5. Longitude-sectional outline drawing of Suyou station.

종단면도는 각각 Fig. 4 및 5에 나타내었다.

Fig. 1에서와 같이 화재지점은 안산방향으로 왼쪽 승강장, 당고개방향으로 80 m 지점, 안산방향으로 125 m 지점에서 발생하는 것으로 가정하였다. 화재 구역은 벽에서 0.1 m 떨어진 지점에 대략적인 가판대의 크기(2 m×2 m)로 설정하였다. 화재의 크기는 가판대에서 발생할 수 있는 화재 강도인 3 MW로 설정하였다.

2.3 수치해석 조건

지하역사의 환기 계통도는 Fig. 6과 같은 구조를 이루며, 평상시에 냉방급기는 승강장의 온도 조절에 사용되나 화재 발생시 배기구로 작동한다. 수평급기는 평상시나 화재시 항상 작동하며 역사의 끝부분에 각각 3개씩 위치하여 있으므로 화재발생시 큰 영향을 미치지 않을 가능성이 크다. 따라서 이번 수치해석에서는 수평급기는 닫힌 상태로 수행하였다. 배연시스템은 승강장의 길이방향으로 2대가 양쪽 승강장에 걸쳐서 연결되어 있다. 본 연구에서는 길이방향으로 2개의 배연시

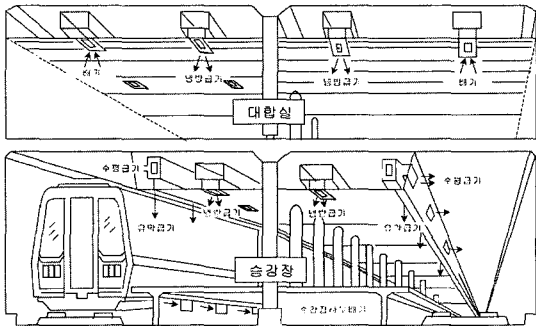


Fig. 6. Outline drawing of the ventilation system for a general underground station.

**Table 1.** Conditions for the numerical analysis

	해석조건
CASE1	자연풍(X), 배연시설(X)
CASE2	자연풍(O), 배연시설(X)
CASE3	자연풍(X), 배연시설(O)

스텝이 모두 작동하도록 하였다. 배연 및 자연풍의 영향에 따라 연기 및 열의 이동을 살펴보기 위하여 3가지 경우로 구분하여 수치해석을 수행하였으며, Case별 해석 조건은 Table 1에 표시하였다.

배연기의 규격은 0.2 m×0.3 m이며, 수량은 37×2개이다. 배연기 한 개당의 배연속도(V)는 다음과 같다.

$$V = (\text{풍량}/60s)/A \quad (1)$$

여기서, 풍량은 (1192CMM×2)이고, 단면적 A는 (0.06×74)이다. 0.06은 배연기 1개의 단면적, 74는 승강장의 배연기 총 개수이다. 위 식의 결과 배연속도는 8.94 m/s이며, 자연풍은 0.5 m/s로 당고개방향에서 안산방향으로 불고 있는 것으로 가정하였다. Table 2에 Case별 해석조건을 나타내고 있다. 비상계단은 총 8개가 설치되어 있다.

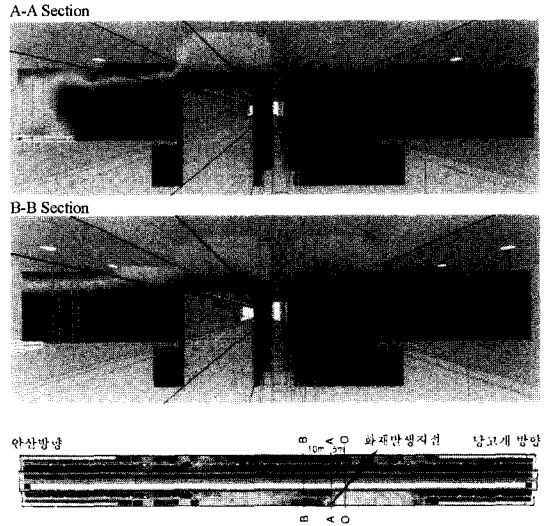
본 수치해석을 위하여 FDS에서 해석한 지배방정식으로는 연소방정식, 화학종보존방정식, 운동량보존방정식 에너지보존방정식이 있으며 점성응력항은 LES(Large Eddy Simulation)를 사용하였다. 여기서 점성응력항은 연소현상을 해석하기 위하여 혼합분율 연소모델(Mixture Fraction Combustion Model)을 이용하였으며, 복사열전달 방정식은 유한체적법(Finite Volume Method)을 이용하여 해석하였으며, 비회색가스물성치는 FDS에서 제공하는 밴드모델을 이용하여 해석하였다. 초기온도는 20°C이며, 계단은 공기 유동 방향이 수시로 변화하기 때문에 Open된 것으로 설정하였다. 또한 지하역사 벽의 열전달의 조건은 단열상태로 고려하였으며 시간의 경과에 관계없이 열차의 표면온도는 초기의 온도로 일정하게 유지되는 것으로 가정하였다. 화재하중은 FAST FIRE로 가정하였으며, 내부에는 기타 가연성물질이 없는 것으로 가정하였다.

**Table 2.** Conditions for the extraction system and the natural wind

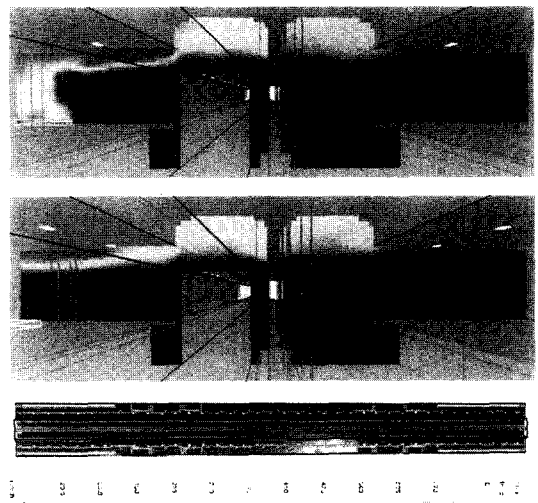
배연기 규격	0.2 m×0.3 m
배연기 수량	37×2개
배연 속도	8.94 m/s
자연풍 속도	0.5 m/s

### 3. 수치해석 결과 및 고찰

자연풍과 배연기의 유·무에 따른 3가지 Case에 대하여 온도와 연기의 분포를 시뮬레이션하기 위하여 FDS 4.0을 이용하여 수치해석을 수행하였다. 시뮬레이션은 Fig. 8에 표시된 바와 같이 지하역사에 열차가 정지해 있는 것을 고려하여 수행하였다. 지하역사의 길이방향으로 5 m 간격의 40개 지점을 지정하여 100초 단위로 600초까지의 온도 분포와 연기 분포를 비교하



**Fig. 7.** Selected section view(A-A, B-B).



**Fig. 8.** Temperature contours of the surface of 1.5 m above the platform floor and selected sections (A, B), (Case 1, t=300sec).

였다. Fig. 7은 화재지점과 온도 및 연기분포를 살펴볼 수 있는 Section의 위치를 나타내고 있다.

**3.1 Case 1 (자연풍 X, 배연 X)**

수치해석의 결과 승강장에서 높이가 올라갈수록 온도와 연기분포가 급증하였으며, 승강장 바닥에서 1.5 m 높이지점의 온도가 2.5 m 높이지점의 온도보다 약 10 배 가량 높게 나타났다. 이 때 화재발생지점의 천장부분의 온도는 최고 670°C까지 상승하였다. 승강장높이 1.5 m 지점의 온도가 50°C까지 상승하는데 약 500초가 소요되었다. 화재발생지점에서 정차되어 있는 열차는 반대편 승강장의 승객들에 대하여 피난 시간을 확보해 주었으며, 화재지점에서 당고개방향으로 10 m 지점에 비상계단의 자연배기로 인하여 온도와 연기 농도분포가 안산방향에 비해 낮게 나타났다.

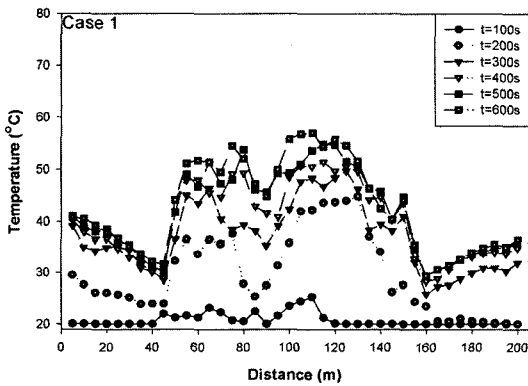


Fig. 9. Temperature distributions along lines of 1.5 m high of the platform floor and 5.3 m from the side wall of fire platform for various times (Case 1).

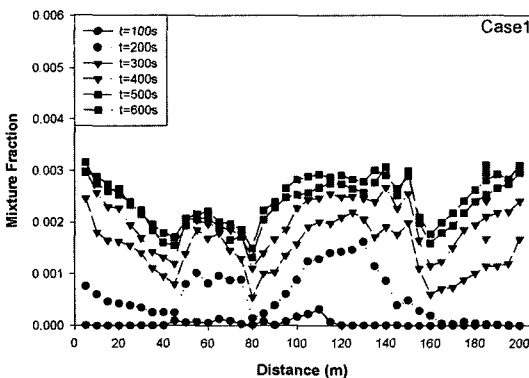


Fig. 10. Concentration distributions along lines of 1.5 m high of the platform floor and 5.3 m from the side wall of fire platform for various times (Case 1).

**3.2 Case 2 (자연풍 O, 배연 X)**

자연풍이 당고개방향에서 안산방향으로 0.5 m/s의 속도로 불고 있는 것으로 가정하였다. 자연풍이 유속을 0.5 m/s로 고려하여 해석한 결과에 따르면 자연풍의 영향으로 Case 1과 비교해 볼 때 열과 연기의 확산을 촉진 시키게 됨을 알 수 있다. 300초 경과 후 부터 화재지점에서 안산방면의 승강장 역사 끝 부분의 연기농도 분포가 크게 증가하는 것으로 나타났다. 600초 경과 후 화재구역 내의 온도가 Case 1과 비교하였을 때 20°C 높게 나타났다. 평균적인 온도와 연기분포를 Case 1에 비교했을 때 큰 폭으로 상승하였다. 화재발생구역 내에서 온도가 50°C까지 올라가는데 300초가 소요되었

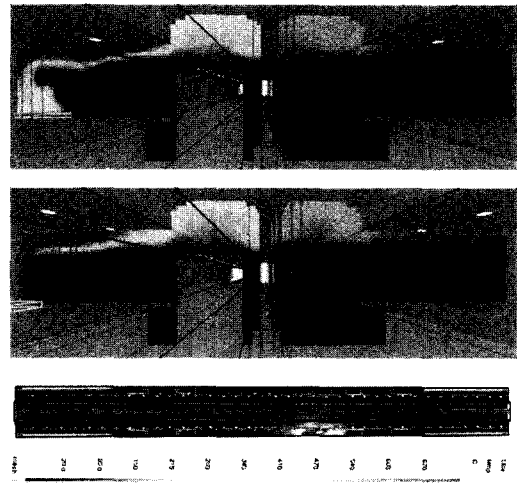


Fig. 11. Temperature contours of the surface of 1.5 m above the platform floor and selected sections (A, B), (Case 2, t=300 sec).

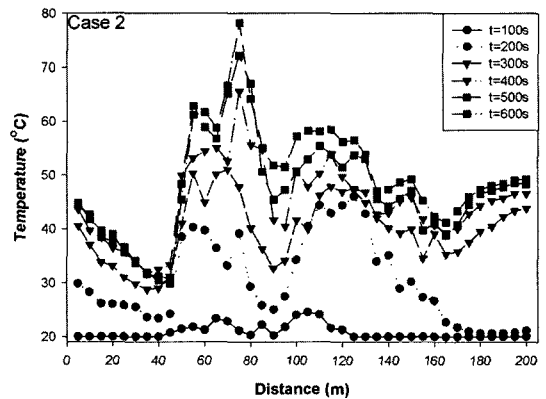


Fig. 12. Temperature distributions along lines of 1.5 m high of the platform floor and 5.3 m from the side wall of fire platform for various times (Case 2).

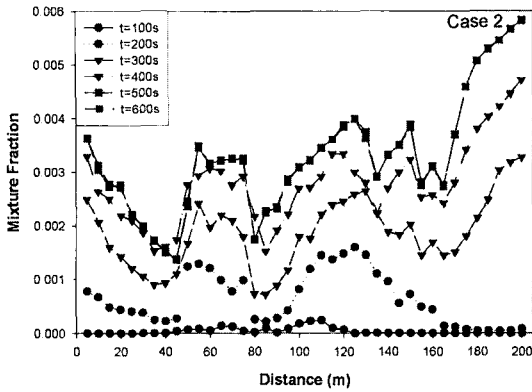


Fig. 13. Concentration distributions along lines of 1.5 m high of the platform floor and 5.3 m from the side wall of fire platform for various times (Case 2).

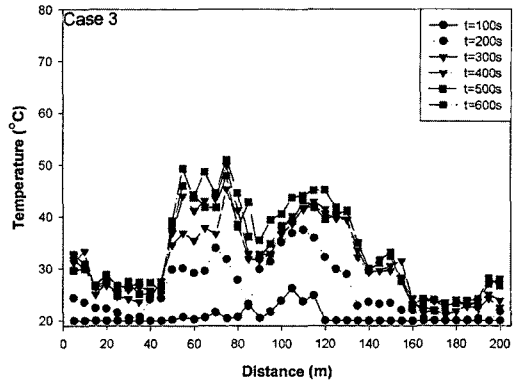


Fig. 15. Temperature distributions along lines of 1.5 m high of the platform floor and 5.3 m from the side wall of fire platform for various times (Case 3).

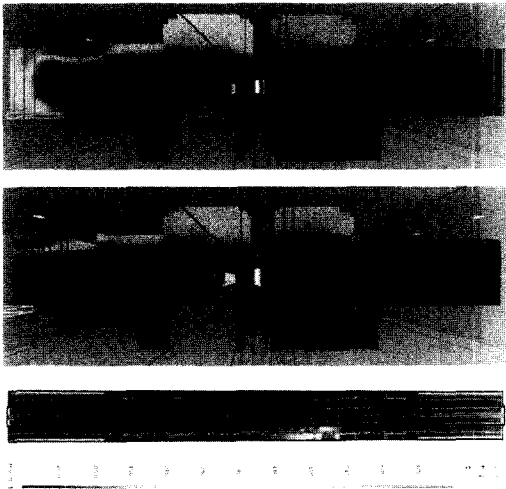


Fig. 14. Temperature contours of the surface of 1.5 m above the platform floor and selected sections (A, B), (Case 3, t=300 sec).

으며, 600초 경과 후 78°C까지 상승하였다.

### 3.3 Case 3 (자연풍 X, 배연 O)

배연시스템이 8.94 m/s의 배연속도로 가동되는 것으로 가정하였다. 배연설비의 작동은 연기와 열을 동시에 외부로 배출시키는 역할을 하였다. 화재발생구역에서 자연풍의 영향을 받는 Case 2와 비교하였을 때 화재발생 600초 후 온도가 28°C 낮게 나타났으며, 연기농도분포가 가장 크게 나타났던 안산방향의 역사 끝단의 연기농도는 Case 2와 비교하였을 때 약 6배 정도 낮게 나타났다. 자연풍이 영향이 없고 배연시스템의 8.94 m/s의 배연속도로 가동될 경우 600초 이내에서

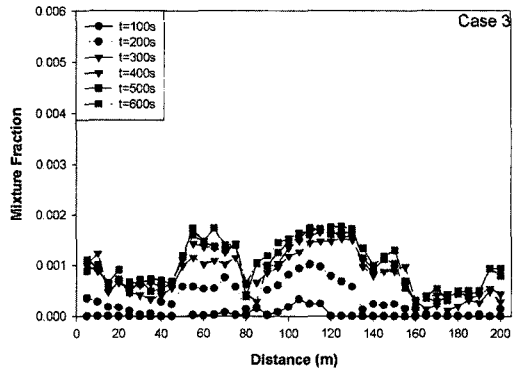


Fig. 16. Concentration distributions along lines of 1.5 m high of the platform floor and 5.3 m from the side wall of fire platform for various times (Case 3).

NFPA 130에 규정된 대피로의 온도인 60°C 보다 낮게 나타났다.

자연풍이 없고 8.94 m/s의 배연속도 작동하였을 때 승객이 피난할 수 있는 충분한 시간을 확보하여 주는 것으로 볼 수 있으며, 배연시스템의 작동은 승강장 전체적으로 온도와 연기분포를 큰 폭으로 낮출 수 있는 것으로 나타났다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 상대식 지하역사의 승강장에서 화재가 발생하였을 경우 자연풍과 배연시설의 작동 유무에 따른 열유동과 연기유동의 특성 변화에 대한 화재 연구를 수행하였다.

1. 승강장 바닥 면으로부터의 높이에 따라 연기농도와 온도의 변화가 매우 크게 나타나고 있음을 알 수

있었다.

2. 자연풍의 유속을 0.5 m/s로 고려하여 해석한 결과에 따르면 자연풍의 방향으로 열과 연기의 확산을 촉진시키게 됨을 알 수 있었다.

3. 배연시설의 작동은 연기와 열을 동시에 외부로 배출시키는 역할을 하여 승객의 피난 시간을 확보하여 주었다.

4. 화재발생위치에 자연풍이 불어오는 지하공간영역에서는 배연설비의 제연효과가 하류 측의 영역에 비하여 크게 나타나는 것을 알 수 있었다.

5. 화재발생지점에서 정차되어 있는 열차는 반대편 승강장의 승객들에 대하여 피난 시간을 확보해 주는 역할을 하고 있는 것으로 나타났다.

6. 비상계단이 설치되어 있는 지점에서는 자연배기로 인하여 온도와 연기농도분포가 낮게 나타났다.

7. 자연풍이 불지 않고 제연시스템이 8.94 m/s로 가동될 경우 자연풍이 불고 제연시스템이 작동하지 않는 경우보다 온도는 30°C 낮게 나타났으며, 연기농도분포는 약 6배 낮게 나타났다.

## 감사의 글

본 연구는 지하공간 환경개선 방재기술연구단의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 차철현, 김진국, “지하철 터널에서의 제연”, 공기조화·유동공학, Vol. 28, No. 6, pp.425-432(1999).
2. 박외철, “대구 지하철역 제연의 문제점과 대책 II. 배기 방식 제연설비의 풍량”, 한국화재·소방학회 논문지, Vol. 17, No. 4, pp.105-110(2003).
3. 차철현, “지하철 터널에서 환기실과 환기구의 계획”, 설비저널, Vol. 30, No. 7, pp.29-34(2001).
4. 이성룡, 김충익, 유홍선, “터널 화재시 자연 배기에 의한 연기 거동에 관한 실험적 연구”, 한국화재·소방학회, Vol. 15, No. 1, pp.1-6(2001).
5. 정진용, 유홍선, 홍기배, “아트리움에서 화재 발생시 복사가 고려된 연기 거동에 대한 수치해석 연구”, 한국화재·소방학회, Vol. 15, No. 1(2001).
6. 윤명오, 고재선, 박형주, 박성은, “지하공동구 화재 실험 및 시뮬레이션에 의한 화재 실험 예측 평가”, 한국화재·소방학회, Vol. 15, No. 1(2001).
7. Ovauquelin, O. Megret, “Smoke Extraction Experiments in Case of Fire in a Tunnel”, Fire Safety Journal, 37, pp.525-533(2002).
8. Yasushi Oka, Graham T. Atkinson, “Control of Smoke Flow in Tunnel Fires”, Fire Safety Journal 25, pp.305-322(1995).