

# 대심도 지하역사에서의 화재현상 연구

## The Study on Fire Phenomena in The Deeply Underground Subway Station

장용준\*\* □ 김학범\* □ 이창현\*\*\* □ 정우성\*\*\*\*  
Jang, Yong-Jun □ Kim, Hag-Beom □ Lee, Chang-Hyun □ Jung, Woo-Sung

**Key Words:** the deeply underground subway-station(대심도역), Fire Source(화원), Fire Size(화재크기)

### ABSTRACT

When the fire occur in the deeply underground subway station, the difficulties of passenger evacuation are expected because of many stairs to the exit. In this study, SOONGSIL-University station (7 line, 47m depth) is the one of the deepest subway stations of the each line in the Seoul metro. The numerical computational-simulation was performed for the fire driven flow in the subway station. Hot and smoke flow was analyzed from the simulation results. The proper plan of evacuation against fire was considered through the results.

The fire driven flow was simulated using FDS code in which LES method was applied. The Heat Release Rate was 10MW and the ultrafast model was applied for the growing model of the fire source. The proper mesh size was determined from the characteristic length of fire size. The parallel computational method was employed to compute the flow and heat eqn's in the meshes, which are about 10,000,000, with 6cpu of the linux clustering machine.

### 국문요약

대심도 역사에서의 화재 발생시 승객의 주 대피이동로인 계단이 매우 길기 때문에 피난의 어려움이 예상된다. 이에 본 연구에서는 서울 지하철 호선별 대심도 역사 중에서 하나인 송실대역(7호선, 47m)을 선정하여, 화재시물레이션을 수행하였고, 이를 통하여 열기류 및 연기의 거동을 분석하였고, 적절한 피난대책을 고찰하였다.

최근에 지하역사에서의 화재유동 시물레이션이 몇몇 기관에서 수행되고 있으나, 지하의 전역사에서 화재 유동 해석은 드물게 수행되어 왔다. 특히 지하 40m가 넘는 대심도 역사에서의 유동해석은 일반 PC로는 불가능하기 때문에 이에 대한 연구가 전무하였으나, 본 연구에서는 리눅스 클러스터(Linux cluster) 장비를 이용한 병렬처리방법을 적용하여 대심도 역사에서의 화재해석을 수행하였다.

화재유동해석은 화재전용 FDS code를 이용하였으며, 난류모델은 LES 기법을 적용하였다. 화원의 규모는 10MW이고, 성장모델은 Ultrafast model를 적용하였다. 적절한 격자크기는 화원의 특성직경을 통하여 산출하였다. 본 연구에 사용된 총 격자규모는 약 10,000,000개이다. 이는 일반 PC에서는 다루기가 불가능한 격자수이므로, 병렬처리방법을 적용하여 6 cpu 리눅스 클러스터 장비로 수치해석을 수행하였다.

E-mail : [kimhb31@krii.re.kr](mailto:kimhb31@krii.re.kr)

Tel : (031) 460-5676 FAX : (031) 460-5319

\* 책임저자, 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원

\*\* 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 선임연구원

\*\*\* 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 연구원

\*\*\*\* 한국철도기술연구원, 환경화재연구팀, 책임연구원

## 1. 서론

인구밀도가 높은 서울은 일찍이 교통 혼잡의 심각함을 해결하기 위하여 운송수단의 목적으로 지하철을 구축하여 왔다. 따라서 서울을 비롯한 수도권 일대에 많은 지하철 호선이 생기고 이로 인하여 필연적으로 지하 깊은 곳에 운영되는 대심도 역사가 생기게 되었다. 도표 1. 에서 보는 바와 같이 서울에서의 심도(深度)가 깊은 역사를 호선별로 정리하였으며, 특히 서울 도시철도공사에서 운영하는 5~8호는 40m 이상의 대심도 역사를 보유하고 있음을 알 수 있다. 이러한 대심도 역사는 화재 발생시 승객의 주 대피이동로인 계단이 매우 길고 가파르기 때문에 피난의 어려움이 예상된다.

도표 1. 서울 지하철 호선별 최대 심도 역

호선	역사	심도	관할기관
1	종로 3가역	13m	서울역->청량리 : 서울메트로
2	이대역	36m	성수->성수 : 서울메트로
3	충무로역	28m	지축->수서 : 서울메트로
4	회현역	23m	당고개->남태령 : 서울메트로
5	신금호역	44m	서울 도시철도공사
6	버티고개역	43m	
7	송실대입구역	47m	
8	산성역	56m	

### 1.1 연구배경

지하철의 승강장의 화재 관련 연구는 대구 지하철 화재(2003. 2월18일) 사건 이후로 지하철내에서 화재 발생시 승객의 안전을 위하여 많은 연구가 진행되었다. 장희철, 김태국, 박원희, 손봉세[3]연구 내용은 실제역사를 대상으로 유속 및 풍향 계측실험을 수행하고 이 자료를 바탕으로 프로그램을 검증하였으며 검증된 프로그램을 이용하여 팬의 운전조건에 따른 화재특성을 조사하였다. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국[4]와 장희철, 김태국, 박원희, 김동현[5] 연구에서도 유속경계조건을 실험으로 계측하였고, 이를 토대로 다양한 조건에 따른 열, 연기 거동특성을 수치해석방법으로 예측하였다. 박원희, 김동현, 장용준[6, 7]연구에서는 승강장에서 연기발생기와 열풍기를 이용하여 화재 연기를 구현하였다. 또한 연기의 거동을 캄코더를 사용하여 기록하였다. 이외에 유속계를 이용하여 유속 측정을 수행하였다. 경원대학 “도시철도공사 고심도 및 환승역의 화재영향평가” 최종보고서[1]에서는 대심도 지하역사 환승역의 화재영향평가를 통하여, 대피시간을 확보하기 위하여 보완해야 할 방재시설을 검토 하였다. 그러나 이러한 대심도 지하역사에 대한 연구는 방대한 공간으로 인하여 모든 공간에 일괄 동시 실측이 어려우며, 수치해석의 경우도 지하역사중 승강장에 국한되어 해석이 진행되었다. “도시철도공사 고심도 및 환승역의 화재영향평가”최종보고서[1]에서는 대심도 지하역사의 전체를 모델링하였으나, 모델링시 격자크기에 대한 충분한 논의가 이루어 지지 않았다. 이에 본 연구에서는 신뢰성 있는 데이터를 확보하기 위하여, 충분히 검토된 격자크기의 모델링으로 해석을 수행하고 계산된 결과를 토대로 대심도 역사에서의 화재, 열, 연기거동을 분석코자 한다.

### 1.2 송실대입구 역사의 개요

본 연구의 대상으로 송실대입구 역사를 선정하였다. 송실대입구 역사의 개략적인 모습은 그림 1.과 같

다. 그림에서 보는 바와 같이 승강장이 지하 6층에 있으며, 승강장은 상대식이다. 지하 3층은 기계실이기 때문에 승객은 이용이 안 되며, 접근이 불가능하다. 따라서 승객은 지하 2층에서 4층까지 계단이 매우 길어지기 때문에, 그림 2에서 보는 바와 같이 에스컬레이터를 주로 이용하고 있는 실정이다.

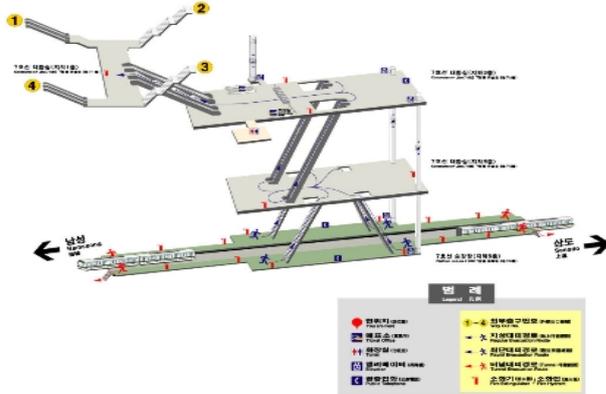


그림 1. 승실대 역사 안내도



그림 2. 승실대역 이용 승객모습

## 2. 본 론

### 2.1 모델링 및 경계조건

모델링시 이용된 S/W는 미국 NIST에서 개발한 FDS를 이용하여 수행하였다. FDS를 선정한 기준은 LES 난류모델 기법이 화염에 의한 유발된 대와의 시간에 따른 거동을 가장 잘 표현하기 때문이다. 본 연구에서는 또한 병렬계산처리기법을 적용을 위하여 클러스터 장비를 사용 하였는데 클러스터 장비의 구성도는 그림 3과 같다. 본 해석에 사용된 장비의 제원은 3.3GHz Dual CPU 6개(Core : 12개)를 사용하였다.



그림 3. Cluster 구성 개념

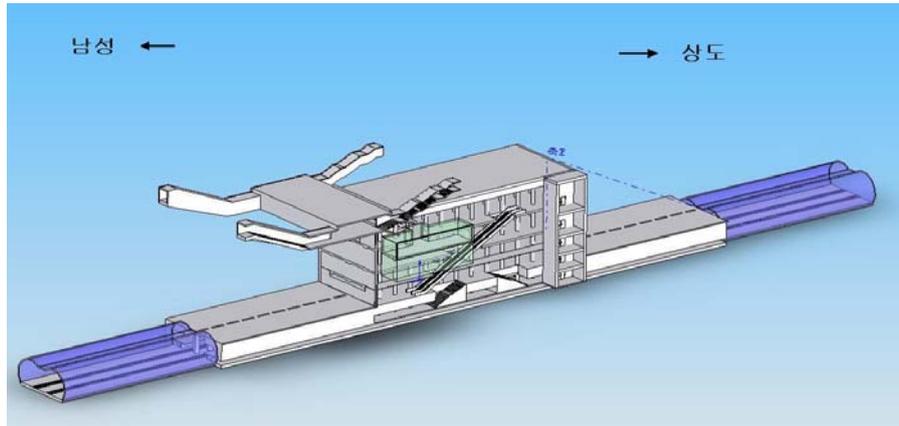


그림 4. 승실대 입구 역사의 3D CAD

그림 4.는 승실대 역사의 3D CAD 도면이다. 그림에서 보는 바와 같이 지하 3층은 승강장을 운영하기 위한 기계실이므로 일반승객의 접근이 차단되어 있어 모델링에서는 제외되었다.

격자크기는 화원의 거동이 표현될 수 있는 적절한 크기이어야 한다. FDS의 개발자인 McGrattan K.은 격자크기는 화원의 특성직경의 1/10배 이하여야 한다고 밝혔다[11]. 또한 화원의 특성직경은 Drysdale D.[12]에 의하면 식(1)으로 정의된다고 하였다. 본 연구에서도 식(1)을 사용하여 격자크기를 결정하였다.

$$D^* = \left( \frac{\dot{Q}}{\rho_0 T_0 C_{p0} \sqrt{g}} \right)^{\frac{2}{5}} \text{----- 식 (1)}$$

도표 2.은 각 해당 변수 값을 나타낸 것이다. 여기서 공기의 조건은 대기압의 10℃의 상태로 정의하였다. 대구 지하철 화재의 경우 발생한 날(2003. 2월18일)의 온도가 6.6℃로서 다소 낮기 때문에 본 연구에서는 대구화재와 같이 2 ~ 3월의 화재가 발생한다고 가정하였으며, 이는 통상의 화재빈도가 환절기(겨울->봄)에 크기 때문이며 10℃를 적정 대기온도로 가정하였다. 화원의 규모는 10MW로 하였다. 철도시설 안전세부기준(건설교통부고시 제2006 -395호) 2장 제7조 2항[10]에 의하면 철도터널에서의 화재해석은 10MW이상으로 규정하였기 때문에, 본 승강장도 해석 개념상 지하의 장대 철도터널이므로 10MW로 정의하였다.

도표 2. 화원의 특성직경을 구하기 위한 변수 값

항목	단위	값
온도	K	283.15K
밀도	kg/m <sup>3</sup>	1.1934
비열	kJ/kg·K	1.007
중력가속도	m/s <sup>2</sup>	9.81
HRR	kW	10,000

화원의 특성직경  $D^*$  는 계산결과 2.415m 이며, 화염 및 화염근방의 격자크기는 1/10인 0.2415m보다 작아야 한다. 따라서 본 연구에서는 화재가 발생하는 지하6층 승강장의 격자크기를 0.1m로 모델링 하였고 총 격자규모가 약 10,000,000개가 되었다. 병렬계산을 위하여 mesh Block을 41개로 나누었으며 실크기에 맞게 계단 및 에스컬레이터의 형상도 충분히 반영하였다.[그림 5.]

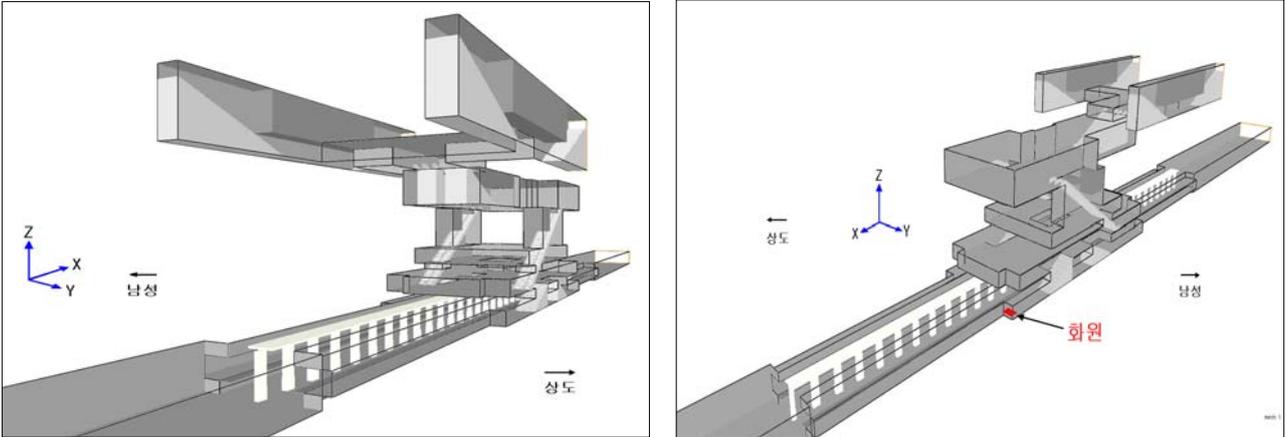


그림 5. 승실대 입구역 모델링

대심도 역사에서 제연 성능보다는 순수 화재에 의한 열, 유체 거동을 파악하고자 하였기 때문에 화재 시 가동되는 제연모드는 설정하지 않았다. 따라서 환기시설은 가동되지 않게 된다. 향후 추가 연구에서는 각 제연모드 또는 급배기 환기시설이 가동된 상황에서도 해석을 진행할 예정이다. 화원위치는 승강장에서 화재가 발생한 경우 수직으로의 확산도가 크면서, 화원 및 연기에 의해 대피가 난이하게 하는 곳을 선정하였는데, 주 대피로인 계단과 가까운 곳을 선정하였다. 또한 상대식 역사에서 신문판매대 및 매점이 설치되어도 인적동선이 원활하게 하기 위하여 넓은 공간에 설치될 가능성이 큰데, 승실대입구역사의 승강장은 계단이 시작되는 곳이 신문판매대나 매점이 설치할 수 있을 만큼 공간이 넓다. 화원의 연료는 연기발생 시험에 많이 사용되는 헵탄으로 정하였다. SOOT 와 CO의 YIELD값은 FDS의 Default 조건으로 연기발생을 위해 불완전연소로 설정하였다.

화재의 성장곡선은 UltraFast mode로 가정하였다. 총해석 시간은 530초이다. 외부조건은 대기압으로 하였다.

## 2.2 난류 모델 및 지배방정식

FDS코드의 LES기법의 경우, 운동량 방정식을 필터링(filtering)하여 얻었으며, 식은 다음과 같다.[11,13]

$$\frac{D\bar{U}_i}{Dt} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \nu \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) - \tau_{ij} \right\} \text{----- 식 (2)}$$

$$\tau_{ij} = \overline{U_i U_j} - \bar{U}_i \bar{U}_j \text{----- 식 (3)}$$

여기서  $\tau_{ij}$ 는 sub-grid scale(SGS) stress이다.

$$\tau_{ij} - \frac{1}{3} \delta_{ij} \tau_{kk} = -2\nu_t \bar{S}_{ij} \text{----- 식 (4)}$$

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left( \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \text{----- 식 (5)}$$

여기서  $\nu_t$ 는 모델링이 되어야 하는데 FDS에서는 다음과 같은 범용적인 Smagorinsky model[11]를 사용하고 있다.

여기서,

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \text{ ----- 식 (6)}$$

$$|\bar{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \text{ ----- 식 (7)}$$

$$\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \text{ ----- 식 (8)}$$

그리고  $C_s = 0.2$  (FDS default 조건)을 사용하였다.

### 3. 해석결과

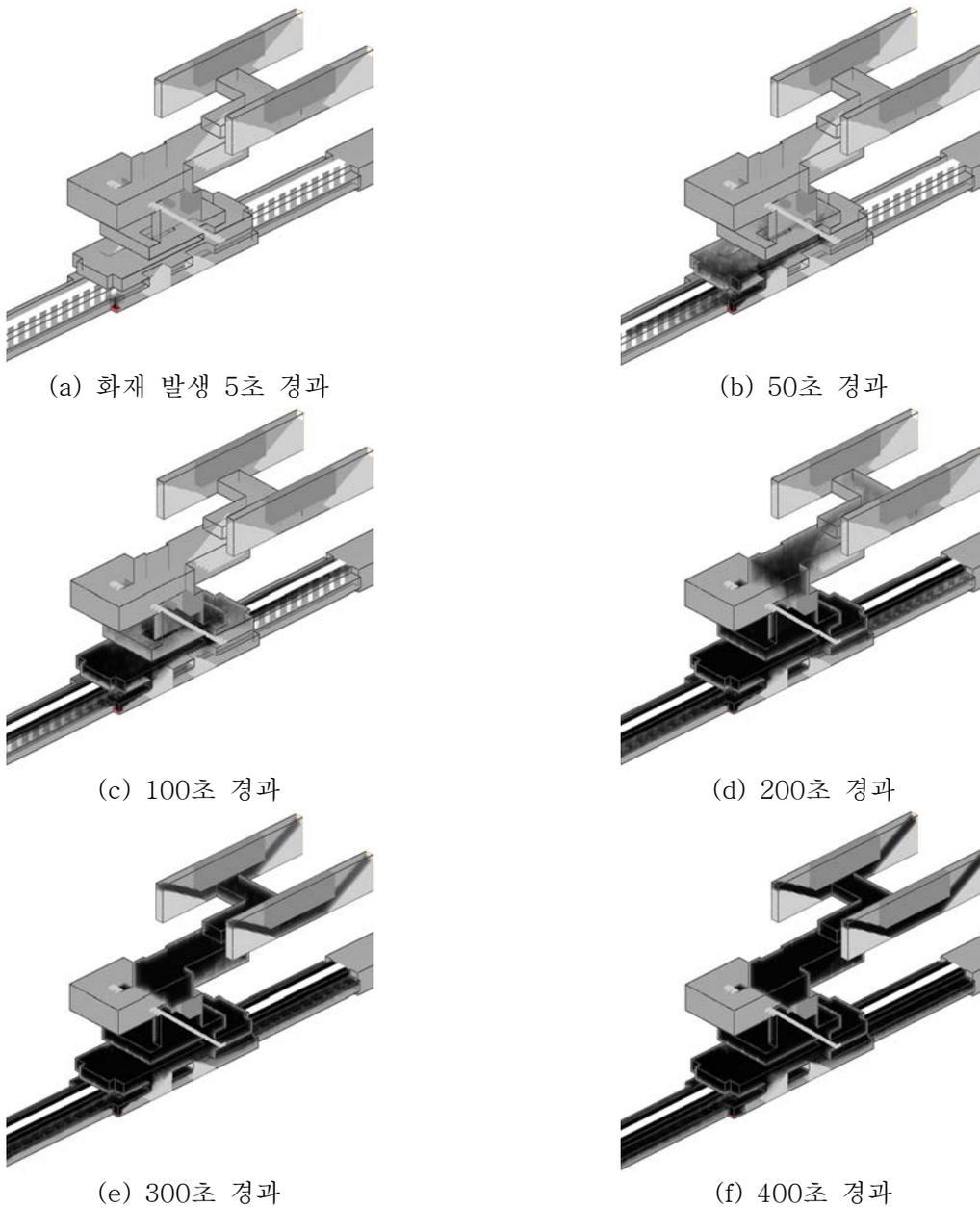


그림 6. 송실대입구역 화재발생시 시간에 따른 연기 거동

대심도 역사의 승강장에서 화재발생후 시간에 따른 연기거동을 그림 6에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 약300초(5분 경과)시 연기가 이미 지상까지 확산됨을 알 수 있다. 이는 대심도 역사가 비록 일반 저심도 역사에 비하여 지하로 수 ~ 수십미터 깊지만, 연기의 확산이 지연되지 않음을 알 수 있다.

또한 본 연구에서와 같이 화재 위치가 계단 가까운 지점에 있으면 연기의 확산이 빨라서 승강장에서 1차 구난공간인 대합실까지 대피시간, 그리고 대합실에서 지상까지 대피시간, 긴 계단을 통한 대피등을 감안하면 대피가 난이함을 알 수 있다. 따라서 대심도 역사의 승강장에서의 화재시 연기 및 열기류가 1차 대피공간의 대합실로 유입이 지연될 수 있는 제연성능을 갖춘 급배기 시설을 갖추어야 할 것으로 판단된다. 그림 7.은 시간에 따른 기류의 온도변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 화재발생후 50초까지는 고온의 온도가 승강장 및 상부 대합실로 유입이 이루어지지 않고 있으나 100초 후에는 고온의 열 기류가 대합실로 유입이 원활하게 이루어지고 있으며, 따라서 연기거동과 마찬가지로 단기간에 상부 대합실 방향으로 고온의 열기류도 빠르게 확산되는 것을 알 수 있다.

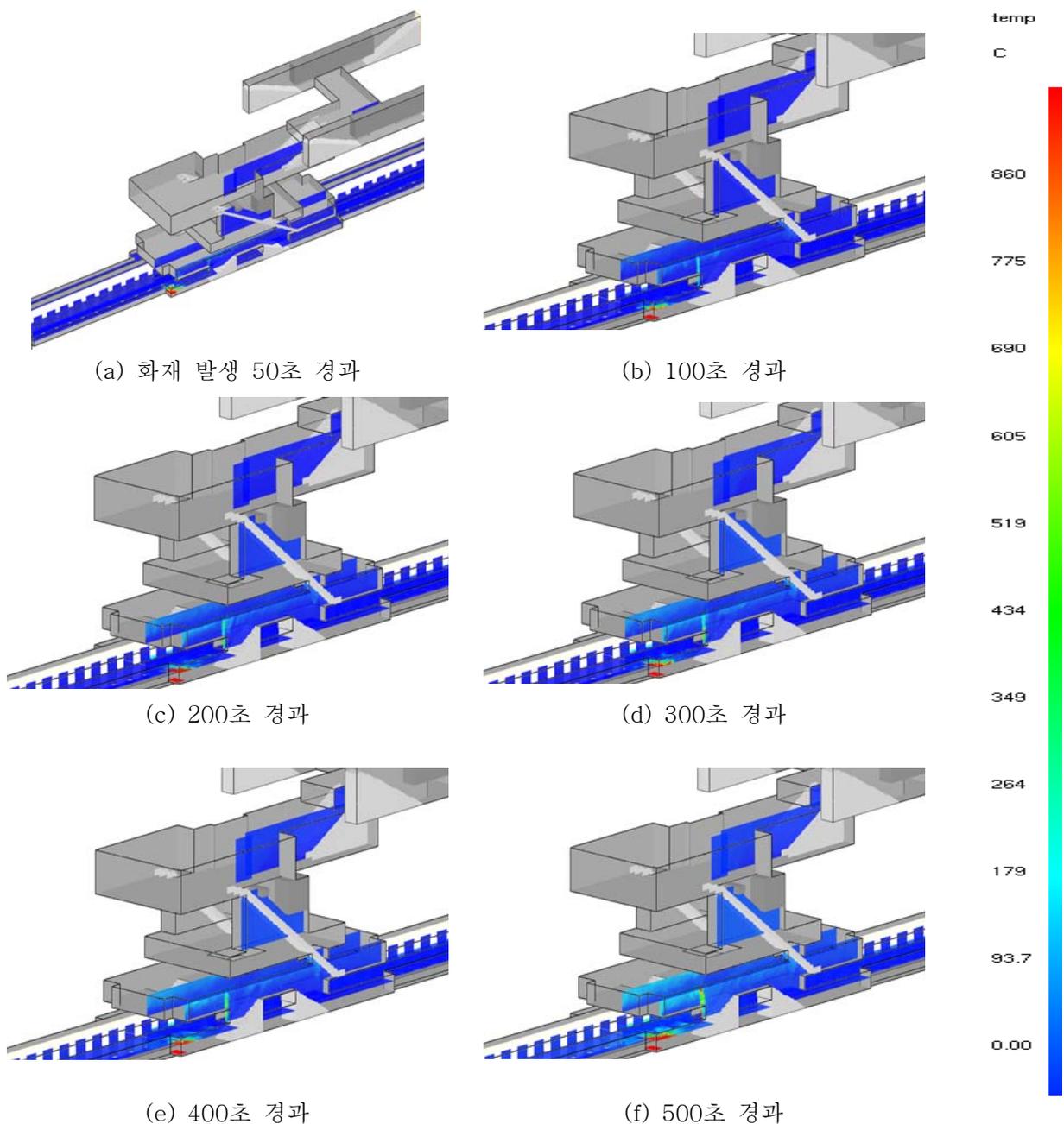


그림 7. 시간에 따른 온도 변화

#### 4. 결론

대심도 역사 전체의 해석을 수행하기 위하여 병렬처리기법을 적용하였으며, 장비의 제원은 3.3GHz Dual CPU 6개(Core : 12개)를 사용하였다. 따라서 격자수는 약10,000,000개로 매우 많지만 계산시간을 크게 줄일 수 있었으며, 향후 대심도 역사같은 대규모 형상에 대한 해석이 가능하게 되었다. FDS code의 LES 난류기법을 이용하여 수행하였다. 해석결과 승강장내에서 화재가 발생한 후 300초에 외부까지 연기가 확산되는 것을 확인 할 수 있다. 대심도 역사는 깊이가 다른 역에 비하여 월등히 깊지만, 연기가 외부까지 확산하는데는 깊이와 무관하게 빠르게 확산되는 것을 알 수 있다. 따라서 긴 계단으로 인한 대피의 어려움등이 예상되므로 보다 적극적인 제연성능을 확보해서 연기 및 고온의 열 기류 확산을 지연할 수 있어야 한다.

#### 후 기

본 연구는 한국철도기술연구원의 철도종합안전기술개발사업중 “철도화재 안전성능 평가 및 사고방지 기술개발”과제의 지원에 의하여 수행된 결과이며 이에 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. 경원대학(2005년), “도시철도공사 고심도 및 환승역의 화재영향평가 -여의나루역의 7개역 화재영향평가 용역-”, 최종보고서, 서울특별시 도시철도공사
2. 장희철, 윤경범, 김태국, 박원희(2005), “자연풍 및 배기운전조건이 섬식 지하역사 승강장 위의 화재에 미치는 영향”, 중앙대학교 기술과학연구소 논문집, pp.37-48
3. 장희철, 김태국, 박원희, 손봉세(2005), “지하철 역사에서 화재발생시 배연 팬의 운전조건에 따른 화재특성 연구”, (사)한국화재소방학회, 서울특별시소방학교 공동추계학술논문발표회, PP234-240
4. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국(2006), “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치연구(I) -실험적 접근-”, 한국화재소방학회 논문지, 제20권, 제3호, PP 9-14
5. 박원희, 김동현, 장희철, 김태국(2006), “지하철 역사 승강장 화재발생시 열/연기 거동 분석을 위한 실험 및 수치연구(II) -수치적 접근-”, 한국화재소방학회 논문지, 제20권, 제3호, PP 15-20
6. 박원희, 김동현, 장용준(2007), “지하역사에서의 화재연기거동 실험”, 한국철도학회논문집, 제10권, 제1호, PP. 67-73
7. 박원희, 김동현, 장용준(2007), “광주지하철 지하역사에서의 열부력 연기화재 실험”, 한국철도학회 추계학술논문발표회 PP.345-348
8. “도시철도 규칙” 건설교통부령 412호, 2004년 12월 개정
9. “철도시설 안전기준에 관한 규칙” 건설교통부령 제476호 2005년 10월27일
10. “철도시설 안전세부기준” 건설교통부고시 제2006 -395호
11. Kevin McGrattan, Bryan Klein, Simo Hostikka, Jason Floyd(2007), “Fire Dynamics Simulator(Version 5) User's Guide”, NIST Special Publication 1019-5
12. Drysdale, D(1998), “An Introduction to Fire Dynamics”, 2nd edition, John Wiley & Sons
13. 김학범, 장용준, 정우성, 박원희(2007), “LES(FDS code)기법 및 RANS의 난류모델을 사용한 터널 화재 유동 전산모사의 비교고찰”, 대한기계학회 추계학술대회, PP 1642-1647