

지하역사 승강장 및 대합실 평상시/비상시 급·배기 환기 Large Eddy Simulation

장 용 준,* 류 지 민, 박 덕 신

한국철도기술연구원 에코시스템연구실

LARGE EDDY SIMULATION OF ORDINARY & EMERGENCY VENTILATION FLOW IN UNDERGROUND SUBWAY STATION

Yong-Jun Jang,* Ji-Min Ryu and Duck-Shin Park

EcoSystem Research Center, Korea Railroad Research Institute

The turbulent flow behavior of air supply and exhaustion in the Shin-gum-ho subway station is analyzed for ordinary and emergency state. The depth of Shin-gum-ho station is 43.6m which consists of the island-type platform(8th floor in underground) and a two-story lobby (first & second floor in underground). An emergency stairway connects between the platform and the lobby. Ventilation operation mode for ordinary state is set up as a combination of air supply and exhaustion in the lobby and platform, while for emergency state it is set up as a full air supply in the lobby and a full exhaustion in the platform. The entire station is covered for simulation. The ventilation diffusers are modeled as 95 square shapes of 0.6m×0.6m in the lobby and as 222 square shapes of 0.6m×0.6m and 4 rectangular shapes of 1.2m×0.8m in the platform. The total of 7.5million grids are generated and whole domain is divided to 22 blocks for MPI efficiency of calculation. Large eddy simulation(LES) is applied to solve the momentum equation and Smagorinsky model($C_s=0.2$) is used as SGS(subgrid scale) model. The time-averaged velocity fields are compared to experimental data and show a good agreement with it.

Key Words : 지하철(subway), 급기/배기(air supply/exhaustion), 평상시(ordinary state), 비상시(emergency state), LES(Large Eddy Simulation), 다중 블록(Multi-block), 병렬 계산(parallel computation)

1. 서 론

2003년 대구 지하철 방화 사건이후로 철도 이용 승객들의 안전도 향상을 위하여 “철도시설안전기준에 관한 규칙”(건설교통부령 제476호, 2005년 10월 27일)이 제정 고시되고, 이에 대한 세부 기준으로 “철도시설 안전 세부기준”(건설교통부고시 제2006-395호)가 고시되었지만, 더 많은 대중이 집중되고 있는 도시철도에 대한 화재안전 세부기준이 마련되지 않고 있으므로 이에 대한 대책이 절실하다.

1974년 지하철 1호선이 개통된 이후 30년이 넘게 현재 수

도권의 도심에는 10여 개의 지하철 노선이 운행되고 있다. 기존의 지하철 노선이 운행되고 있는 구간을 교차하는 신설 노선의 경우 더 깊은 곳을 통과해야 하며 또한 경사진 지형이나 하천을 통과하는 경우 심도는 더욱 깊어진다. 수도권 역사의 현황을 살펴보면 기존에 건설된 1~4호선 보다 이후에 건설된 5~6호선의 평균 심도가 더 깊은 것을 알 수 있다[1]. 새로 건설되는 지하철역사의 심도가 깊어짐에 따라 승객들이 가장 많이 집중되는 승강장에서의 환기 및 제연 설비는 평상시 및 비상시에 능동적으로 대응이 가능하도록 설계가 되어야 하며, 항상 설계조건을 만족시켜야 한다.

도시철도 지하철역사에서의 비상시/평상시 환기 상태는 여러 연구자에 의하여 지속적으로 수행되어 왔다. Jang et al.[1]은 지하철역사에서 열선유속계를 이용하여 평상시 및 비상시에 급·배기 풍량을 측정하였으며, Lee and Oh[2]는 도시철도 철도차량 주행에 따른 지하철역사 및 지하터널 속에서 열차풍의 거동

Received: August 28, 2013, Revised: September 30, 2013,
Accepted: September 30, 2013.

* Corresponding author, E-mail: jangyj@krri.re.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.3.072

© KSCFE 2013

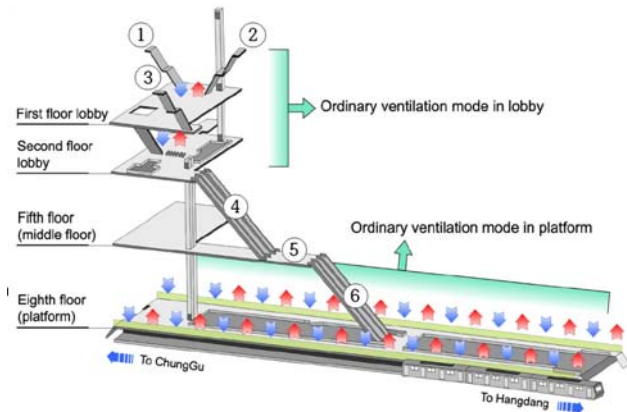


Fig. 1 Operating condition of ventilation for ordinary state in Shin-gum-ho station[1] (Blue;air supply/Red;exhaustion)

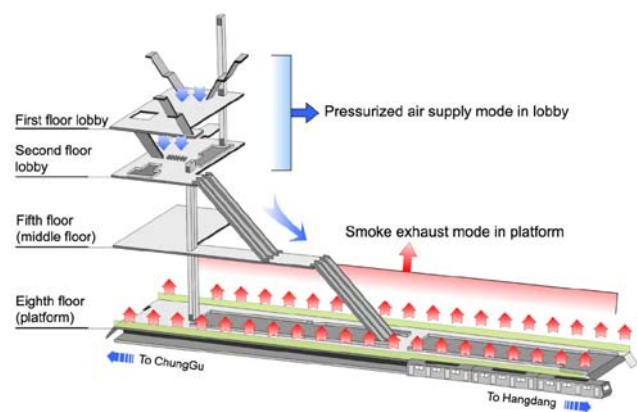


Fig. 2 Operating condition of ventilation for emergency state in Shin-gum-ho station[1] (Blue;air supply/Red;exhaustion)

을 기술하였다. Lee et al.[3]은 지하철 열차풍이 터널 수직구에 미치는 영향을 수치적으로 해석하였으며, 열차풍의 유무에 따라 수직구에 미치는 영향이 큰 것으로 조사되었다. Kim et al.[4]은 지하철도 차량의 역사 진입 및 출발에 따른 열차풍 풍량을 실험적으로 산정하고 비교하여 분석하였다. Kim[5]은 도시철도 환경개선 및 화재 방재를 위한 스크린 도어 시스템의 최적 설계 기술 개발을 위하여 1/20 scale의 지하철 터널 축소모형 실험을 수행하였다.

지하역사에서 화재시 화재 연기 유동에 관한 연구도 다양하게 수행되어왔다. Son and Chang[6]은 지하철 터널에서 화재가 발생한 경우 역사와 환기실의 위치에 따른 화재 특성을 k-ε 난류모델을 사용하여 수치해석적으로 분석하였다. Hwang and Edwards[7]는 화재로 인한 뜨거운 성층 기류 및 연기 유동의 특성을 연구하였으며, 터널에서의 역기류(back-layer) 현상에 대하여 조사하였다. Hwang and Wargo[8]는 터널에서의 뜨거운 성층 기류에 대하여 실험적으로 조사하였다. Woodburn and Britter[9,10]는 터널에서 화재로 인한 유동 현상에 대하여 시뮬레이션을 수행하였다. Jang et al.[11]은 터널에서의 역기류 화재유동을 LES(대와류 모사기법) 및 RANS 기법을 이용하여 계산하여 비교하였다. 실험 결과와의 비교를 통하여 LES 기법이 역기류의 행동을 예측하는데 뛰어나다는 사실을 보였다. Fletcher et al.[12]은 터널 화재 유동을 실험적으로 조사하였으며, 동일한 환경에서 부력항을 고려한 k-ε 난류모델을 이용하여 수치적 결과와 비교하였다. Gao et al.[13]은 Fletcher et al.[12]이 실험한 동일한 환경에서 LES 기법을 이용하여 계산하여 실험 결과와 비교하여 분석하였다. Jang et al.[14]은 대심도 역사에서 화재시 뜨거운 열기류 해석 및 제연 설비 가동에 따른 연기 분포를 조사하였다. Jang et al.[15]은 2003년 대구 지하철 화재 상황을 모델하여 화재 및 승객 피

난 시뮬레이션을 수행하였으며 당시의 상황과 비교 검토하였다.

본 연구에서는 기존의 대심도 도시철도 지하역사에서 평상시 및 비상시(화재시)의 환기 및 공기급 배기 유동을 수치적으로 해석하고 실험 결과와 비교 분석하였다. 대심도 역사로서 기존의 역사중 가능한 최대 심도를 가지는 역사를 선정하도록 하였다. 신금호 역사는 5호선 역사 중 43.6 m의 최대 심도를 가지는 역사로서 지하 8층의 섬식 승강장과 지하 1,2층의 대합실 및 승강장으로 연결되는 1개의 통로를 가지고 있다. 평상시 및 비상시 환기 및 제연 모드에 따라 대합실과 승강장의 천정에 설치된 각각의 환기구에 적용된 급배기 용량으로 실험 값[1]을 입력하였으며, 실험 조건과 동일하도록 본선 터널 제연 팬은 가동시키지 않았다. FDS (Fire Dynamics Simulator by NIST, USA)의 LES 기법을 이용하여 수치해석을 하였으며, MPI 기능을 이용하여 병렬 계산을 수행하였다.

2. 수치해석적 연구

2.1 지하역사 모델링 및 환기 모드

본 연구의 해석 대상인 신금호 역사는 Fig. 1 및 2와 같이 지하 8층으로 이루어져 있으며, 지하 1,2층의 대합실과 지하 8층의 승강장으로 연결되는 통로가 한 개가 존재한다. 평상시 (Fig. 1 참조)에는 대합실 및 승강장에서 환기구를 통하여 급배기가 조화롭게 유지되는 반면, 비상시(Fig. 2 참조)에는 대합실에서는 가압 외부 공기가 유입되고, 승강장에서는 배기 모드가 작동된다. 승강장은 총 222개의 정사각형(0.6 m×0.6 m) 환기구와 4개의 직사각형(1.2 m×0.8 m) 대배기구로 모델되었다(Fig. 3 참조). 대합실 1,2층 천정의 환기구는 94개의 정사각형으로 모델하였으며, 각각의 규격은 0.6 m×0.6 m이다 (Fig. 4 참조).

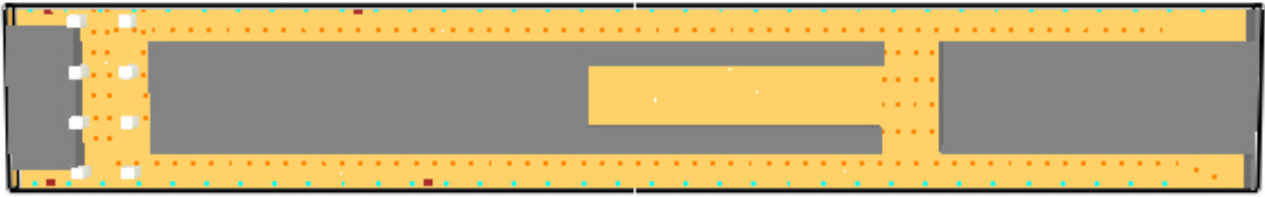


Fig. 3 Diffuser and pole (white) arrangement in the platform of Shin-gum-ho station (4 red rectangular shapes are largest)

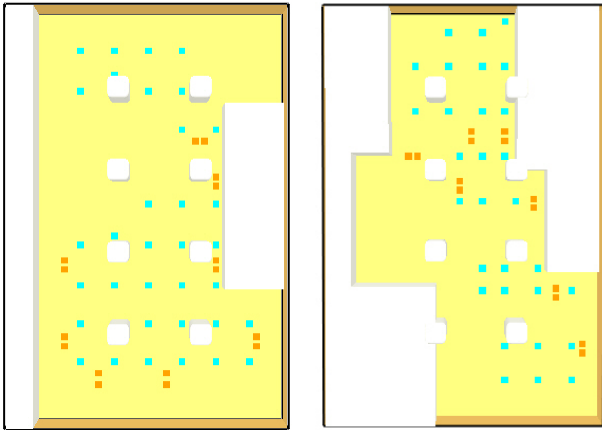


Fig. 4 Diffuser and pole (white) arrangement of the first floor lobby (left) and of the second floor lobby (right)

Fig. 4에서 하늘색 환기구는 급기, 붉은색 환기구는 배기를 담당하지만 비상시에서는 모두 급기를 담당한다[1]. Table 1에서 해석 조건을 정리하였다. Case 1는 평상시 환기 모드이며 대합실 및 승강장에서 급기와 배기가 조화를 이루고 있고, Case 2는 비상시 환기모드이며 대합실에서는 외부공기를 가압하고 있으며 승강장에서는 배연 모드가 가동된다.

2.2 지배방정식 및 수치기법

신금호 역사 전체를 대상으로 유동해석을 수행하기 위하여 FDS 코드의 LES 기법을 사용하였으며, Navier-Stokes 방정식을 필터링(filtering)하여 운동량 방정식을 아래와 같이 얻었다 [16,17].

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

Table 1 Simulation cases according to the operating conditions

Case		Ventilation mode
Case 1	Ordinary state	Ordinary ventilation for platform and lobby (See Fig. 1)
Case 2	Emergency state	Exhaustion for platform /Air supply for lobby (See Fig. 2)

τ_{ij} 는 sub-grid scale(SGS) stress 으로서 다음과 같이 표현된다.

$$\tau_{ij} = \bar{U}_i \bar{U}_j - \overline{U_i U_j} \quad (2)$$

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

$$\bar{S}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

여기서 U_i 는 평균 유속 속도성분, δ_{ij} 는 크로네커 델타, ν_t 는 난류점성계수이며 모델링 되어야 한다. LES 기법에서는 Smagorinsky model[16]을 사용하고 있다.

$$\nu_t = (C_s \bar{\Delta})^2 |\bar{S}| \quad (5)$$

$$|\bar{S}| = (2S_{ij}S_{ij})^{1/2} \quad (6)$$

$$\bar{\Delta} = (\Delta x \Delta y \Delta z)^{1/3} \quad (7)$$

여기서 Smagorinsky 상수 $C_s = 0.2$ 가 적용되었다.

LES 기법과 함께 벽면 근처(near-wall)에서의 유동을 해석하기 위하여 본 연구에서는 벽 법칙을 적용하였다. 벽 근처의 층류 저층(viscous sublayer) 및 log-law 지역에서 Werner Wengle wall law[18,19]을 적용하여 유동 변수를 계산하였다. 기타 경계조건으로는 대합실 1층에서 외부로 나가는 3개의 출구(Fig. 1의 ①,②,③) 방향으로는 압력경계조건(open)을 적용하였다. 승강장에서 스크린 도어(PSD)는 평상시 및 비상시 실험 조건과 동일하게 닫혀 있는 조건으로 시뮬레이션을 수행하였다. 공조기 조건은 Table 2에서처럼 평상시 및 비상시에 Jang et al.[1]이 측정한 실험 결과와 동일한 조건을 적용하였다.

Table 2 Ventilation rate in lobby and platform[1]

Case		Flow rate (m^3/h)	
		Supply air	Exhaustion
Case 1	Lobby	47,316	-33,980
	Platform	33,968	-76,190
Case 2	Lobby	42,126	-22,561
	Platform	0	-276,094

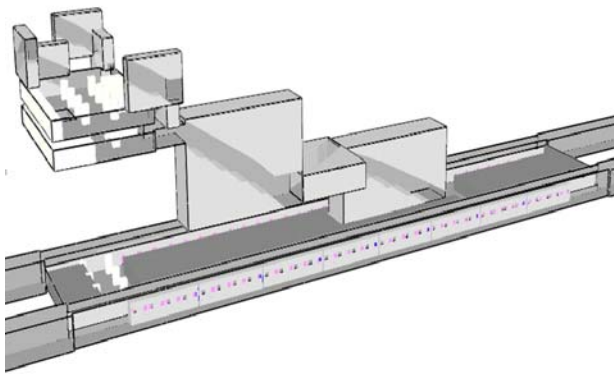


Fig. 5 22 blocks and grid structures of Shin-gum-ho subway station for calculation

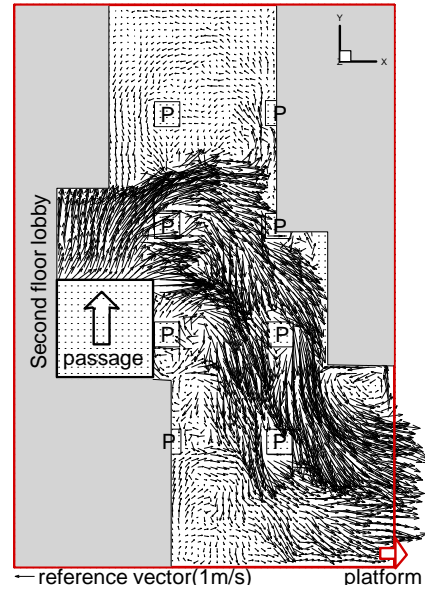


Fig. 7 Velocity vector (every other vector) distribution in the second floor lobby (800sec) - emergency state/P=Pole

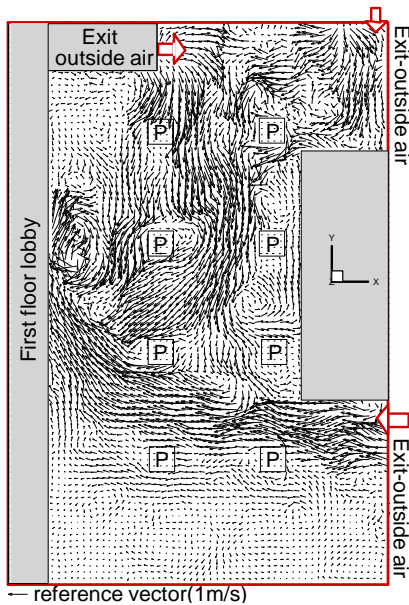


Fig. 6 Velocity vector distribution in the first floor lobby ; every other vectors (800 sec) - emergency state/P=Pole

2.3 해석격자

신금호 역사 전체 8층의 환기 유동을 해석하기 위하여 Fig. 5와 같이 역사를 총 22개의 다중 블록으로 분할하여 각각의 블록이 LINUX기반의 MPI를 통하여 데이터를 주고받도록 하였다. 총 사용된 격자수는 7,500,000개이며, 10개의 dual core CPU를 이용하여 병렬 계산을 수행하였다. 계산 시간은 시간 평균 속도의 residual <math>< 10^{-5}</math> (800sec)까지 계산하였다.

3. 해석 결과 및 고찰

평상시 대합실에서 급기되는 공기는 47,316 m³/h, 배기되는

공기는 33,980 m³/h이며, 비상시(화재시) 대합실에서는 급기가 42,126 m³/h, 배기가 22,561 m³/h이다(Table 2). Fig. 6은 비상시 대합실 중간 높이에서 유동 현상을 보여주고 있다. 외부 계단(Fig. 1의 ①,②,③)으로부터 유입되는 공기가 대합실 천정의 가압 공기 및 기둥과 간섭이 되면서 복잡한 유동 현상을 보이고 있다. 기둥 전면에서는 유동 충돌 현상과 기둥 후면에서는 와류림이 발생되고 천정에서 공급되는 가압 공기와 간섭하면서 곳곳에서 작은 와류들이 관찰된다. 왼쪽 중앙 벽면 근처에서는 대합실 2층으로 내려가는 연결 통로가 있어서 시계 방향의 큰 와류가 발생하는 현상을 볼 수가 있다. 이는 흥미롭게도 마치 하수구에서 물이 내려가는 구조와 흡사하다. Fig. 7은 평상시 대합실 2층에서 유동 현상을 보여주고 있다. 1층으로부터 연결통로를 통하여 쏟아져 내려온 유동이 2층의 외벽 및 기둥과 충돌하고 다시 가압 공기와 간섭하며 다양한 크기의 와류들을 생성시키고 있다. 오른쪽 하단의 승강장으로 내려가는 유일한 연결통로쪽으로 유동이 집중되고 그곳에서 유속의 크기(2 m/sec)도 최대로 증가한다. 평상시 대합실 유동 현상도 비상시와 비슷한 현상을 보이고 있어서 여기서는 생략하였다. Fig. 8은 대합실 1,2층에서 비상시 초기의 급기 유동 분포를 나타내고 있다. 공조기의 위치는 Fig. 4에서 아래 부분 벽 근처이다. 대합실 내부로 빠른 유속의 가압 공기가 천정으로부터 분사되는 것을 확인할 수 있다. (역사 유동해석에 있어서 공조기의 급배기를 고려한 연구는 흔하지 않다.) 가압 공기에 의하여 천정으로부터 바닥까지의 대형 와류가 생성되는 것을 볼 수 있다. 이 와류는 시간이 지남에 따라 외부 공기가 승강장까지 이동하며 생성하는 대류 유동에 의하

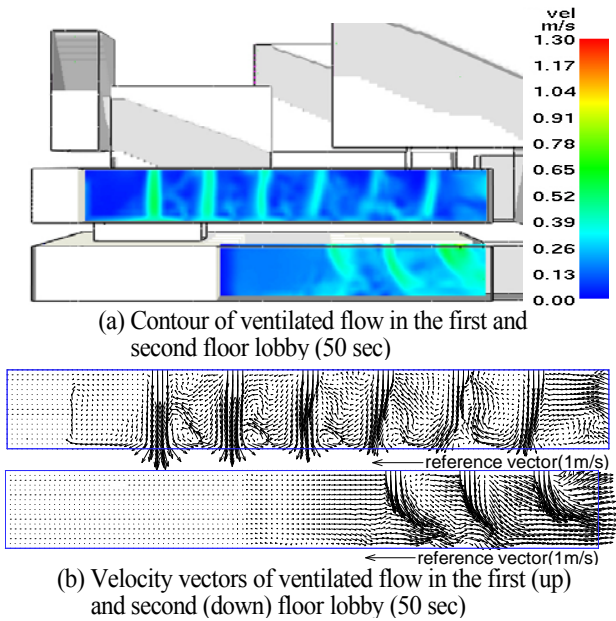


Fig. 8 Contour and velocity vectors of ventilated flow in the first and second floor lobby (50 sec) - emergency state

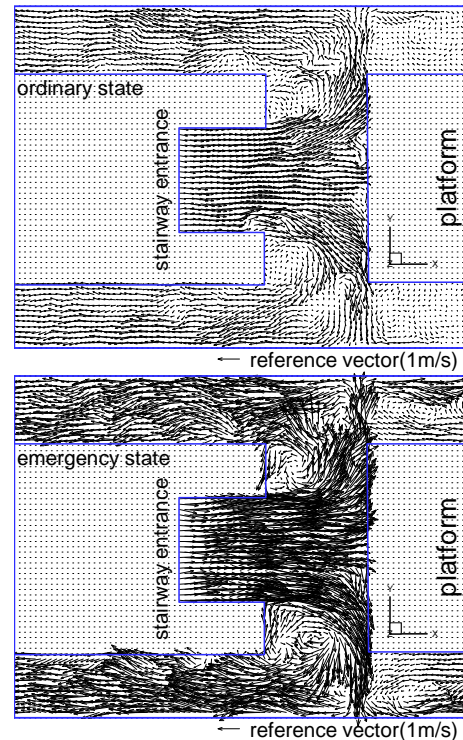


Fig. 10 Comparison of velocity vectors (every other vector) in the platform between ordinary(up) and emergency (down) state (800 sec)

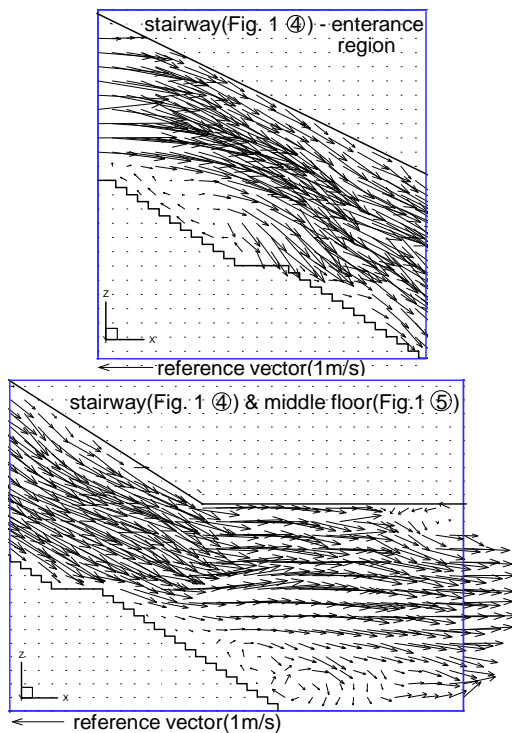


Fig. 9 Velocity vectors (every other vector) in the stairway ; entrance region (up) and middle floor region (down) - emergency state (800 sec)

여 악화되고 외부 유동과 혼합되어 승강장으로 이동된다. 대합실 2층에서는 승강장으로 통하는 계단 입구방향으로 공조

기의 급기 유동이 편향되는 것이 관찰된다. Fig. 9는 비상시 대합실 계단에서 속도 벡터를 나타내고 있다. 2층 대합실에서 승강장 방향으로 하강 이동하는 입구의 계단 바닥에서는 유동 박리 현상이 발생하며, 와류들이 공이 계단을 구르듯이 아래로 이동하다가 주 유동흐름에 합류하게 된다. 중간층에서는 유동 박리로 인하여 아이 키 크기의 와류를 발생시키며 승강장으로 이동하게 된다. 속도 벡터의 크기는 약 1 m/sec 내외이다. Fig. 10은 승강장에서 평상시 및 비상시 대합실로부터 계단을 통하여 승강장으로 이동되는 유동의 벡터이다. 계단을 통하여 승강장으로 진입된 유동은 전면에 설치된 벽에 충돌하고 방향이 전환되어 승강장 중앙지역으로 확산된다. 계단쪽으로는 큰 와류가 발생하고 승강장의 모든 PSD가 닫혀 있는 까닭으로 PSD를 따라서 계단 반대 방향으로 이동한다. 계단 반대 방향에는 대배기구가 설치되어 있어 비상시에는 일반 배기구의 40배 이상의 유량을 흡입한다(Fig. 3 참조). 평상시에는 대배기구가 작동을 하지 않기 때문에 비상시만큼 빠른 유속이 발생하지 않는다. Fig. 11은 승강장에서 급/배기 유동과 계단을 통하여 내려온 대류와의 혼합 현상을 보여주고 있다. 평상시에는 급기 유동이 대류와 혼합되는 현상을 보여주고 있지만 비상시에는 승강장 전체에서 배기 모드로 변경되므로 천정의 공조기로 승강장의 공기가 흡입되고 승강장 전

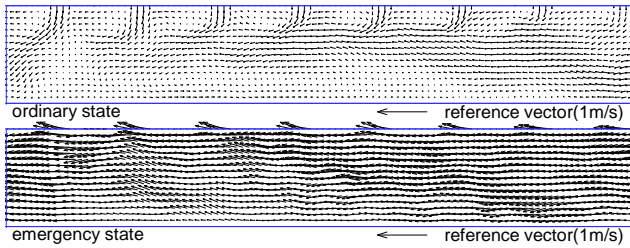


Fig. 11 Velocity vectors of ventilated flow in the platform (800 sec) - ordinary state (up) & emergency state (down)

체가 계단으로부터 이동된 대류에 의하여 지배되는 것을 볼 수 있다.

Fig. 8의 대합실에서의 급기 속도 벡터와 비교하면 평상시 승강장의 급기의 유속(량)이 3배 정도 적은 것을 볼 수 있다. Table 3은 Jang et al.[1]에 의한 실험 결과와 동일한 조건에서 수행된 시뮬레이션 결과를 비교한 것이다. 비교 장소로는 Fig. 1에서처럼 역사 전체 대류의 주 유동 방향의 중요 지점을 선정하였다. ①,②,③는 외부 계단출입구, ④는 승강장으로 내려가는 첫 번째 계단, ⑤는 중간층(지하 5층), ⑥은 승강장으로 내려가는 마지막 계단 이다. 속도 추출 지점은 각 장소의 중간 지역에서 벽으로부터 가장 먼 지점이다. 평상시(case 1) 외부 계단출입구에서는 속도 계산 값이 실험값에 비하여 10~16% 낮거나 높게 예측되었으며 ④,⑥의 계단에서는 18~20% 정도 높게 예측되었다. 중간층 ⑤에서는 실험 결과와 거의 일치하는 값을 보이고 있다. 특히 ⑤에서 유동 통과 단면적이 줄어들어 유속이 증가하는데 이러한 경향이 계산 결과에 잘 반영이 되어 있다. 비상시(case 2) 외부 계단출입구의 ①,③에서는 실험 결과와 3~4%의 차이를 보이지만 ②에서는 20%의 차이를 보이고 있다. 이는 ②지역의 외부 출입구로 유입되는 풍압의 변동이 본 계산에서는 미반영이 되었기 때문이라고 추측된다. 실험 조건에서도 외부 출입구 밖의 압력 변동 및 유속 상황은 예측되지 못하였다[1]. 승강장으로 안내하는 ④,⑥의 계단 및 중간층 ⑤에서의 예측 결과는 실험 결과와 5~8% 미만의 차이를 보였다. 위의 각각의 지점에서 실험 결과와 계산 값이 차이가 있는 것은 PSD와 벽과의 틈새로 빠

Table 3 Comparison of experimented and simulated flow rates in Shin-gum-ho station

Section (See Fig. 1)	Case 1		Case 2	
	Experiment [1] (m/sec)	Present results (m/sec)	Experiment [1] (m/sec)	Present results (m/sec)
Exit (①)	0.41	0.477	1.093	1.05
Exit (②)	0.503	0.417	0.743	0.896
Exit (③)	0.497	0.449	0.99	0.959
Stairway (④)	0.353	0.43	0.927	0.978
Middle floor (⑤)	0.51	0.491	1.16	1.06
Stairway (⑥)	0.347	0.41	1.04	0.957

져나가는 유량을 해석상에서 고려하는 것이 쉽지 않기 때문 이고 또한 외부 출입구 밖의 풍압 및 풍속의 변동이 계산에 포함되지 않은 까닭으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 지하역사 8층 전체의 공조기의 급/배기를 포함한 시뮬레이션 결과가 실험 결과와 최대 20% 미만의 오차를 보이고 있는 것은 도시 철도 역사 공조기 설계 및 풍량 예측에 있어서 FDS를 이용한 LES 시뮬레이션 기법이 적절한 방법이 될 수 있다는 것을 보이고 있는 것으로 판단된다. 따라서 역사 화재 안전 대책 연구시 역사 화재 실험이 불가능한 경우에 화재시뮬레이션 연구가 어느 정도 신뢰도를 가지고 있는지를 정량적으로 판단 할 수 있는 근거가 마련되었다고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 대심도 도시철도 지하역사에서 평상시 및 비상시(화재시)의 환기 및 공조기 급/배기 유동을 수치적으로 해석하였다. 대심도 역사로는 서울 5호선 신금호 역사를 모델화 하였으며, 평상시 및 비상시 환기 및 제연 모드에 따른 역사의 유동 형태를 FDS 코드의 LES 기법 및 MPI를 이용한 대용량 병렬 계산을 이용하여 해석하였다. 해석 결과는 Jang et al.[1]의 실험 결과와 비교하여 분석하였다.

대합실 1,2층에서는 외부에서 유입되는 공기와 대합실 천정의 가압 공기 및 기동과의 간섭을 통하여 유동 충돌, 와류림 및 와류유동 등의 복잡한 유동 현상을 보이면서 승강장 방향으로 이동하게 된다. 승강장으로 통하는 계단에서는 와류들이 계단을 구르듯이 아래로 이동하다가 중간층에서는 대규모 와류가 발생하는 것이 발견되었다. 승강장에서는 계단을 통하여 이동된 대류 유동이 승강장의 외벽과 충돌로 대형 와류를 발생시키고 PSD를 따라 계단 반대편으로 빠르게 이동한다. 따라서 화재 발생시 계단으로 피난하는 승객들에게는 계단으로부터 외부의 신선한 공기를 공급받게 된다. (화재 연기가 계단으로 올라가는지 여부는 화재의 크기와 관련이 있으며, 이에 대한 화재유동 해석이 별도로 필요함) 외부 계단, 중간층 및 연결 계단 등 중요 위치에서 유속의 크기를 실험 결과와 비교한 결과 3~20% 이내의 오차를 가지고 실험 결과에 근접한 것으로 조사되었다. 본 연구는 역사 화재시설 계획시 화재시뮬레이션 연구가 어느 정도 신뢰도를 가지고 있는지를 정량적으로 판단할 수 있는 근거를 제공할 수 있으리라고 판단된다.

후 기

본 연구는 2013년도 한국산학연합회 기업부설연구소 지원 사업 중 “건설분야 성능 설계를 위한 오프소스 기반 전산유

채해석 서비스 시스템 개발”의 연구비 지원으로 수행되었으며, 지원에 감사를 드립니다.

References

- [1] 2012, Jang, Y.-J., Lee, H.-S. and Park, D.-S., "Experimental Study for the Capacity of Ordinary and Emergency Ventilation System in Deeply Underground Subway Station," *Journal of The Korean Society for Railway*, Vol.15, No.6, pp.579-587.
- [2] 1989, Lee, J.-H. and Oh, M.-D., "Train wind in the subway tunnel," *Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.27, No.2, pp.109-114.
- [3] 2010, Lee, J.-H., Juraeval, M. and Song, D.-J., "A Numerical Analysis of The Train Wind in The Ventilation System of Subway Tunnel," *2010 Spring Conference for Korean Society for Computational Fluids Engineering*, pp.212-215.
- [4] 2004, Kim, S.-D., Song, J.-H. and Lee, H.-K., "Estimation of Train-Induced Wind Generated by Train Operation in Subway Tunnels," *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol.16, No.7, pp.652-657.
- [5] 2008, Kim, J.-Y., "Development of Optimum Design Technology of Platform Screen Door Systems for the Environment Improvement and Disaster Prevention of Urban Railway," *2008 Winter Conference & Annual Meeting of the Society of Air-condition and Refrigerating Engineers of Korea*, pp.84-87.
- [6] 2008, Son, B.-S. and Chang, H.-C., "Numerical Prediction of Fire Characteristics of Passenger Train Fire in an Underground Subway Tunnel, Depending on Change of Location of Ventilation Facility," *Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering*, Vol.22, No.5, pp.1-8.
- [7] 2005, Hwang, C.-C. and Edwards, J.-C., "The Critical Ventilation Velocity in Tunnel Fires-A Computer Simulation," *Fire Safety Journal*, Vol.40, pp.213-244.
- [8] 1986, Hwang, C.-C. and Wargo, J.-D., "Experimental Study of Thermally Generated Reverse Stratified Layers in a Fire Tunnel," *Combustion and Flame*, Vol.66, pp.171-180.
- [9] 1996, Woodburn, P.-J. and Britter, R.-E., "CFD Simulations of a Tunnel Fire-Part I," *Fire Safety Journal*, Vol.26, pp.35-62.
- [10] 1996, Woodburn, P.-J. and Britter, R.-E., "CFD Simulations of a Tunnel Fire-Part II," *Fire Safety Journal*, Vol.26, pp.63-90.
- [11] 2009, Jang, Y.-J., Kim, H.-B., Kim, J.-H. and Han, H.-Y., "Comparative Study on The Numerical Simulation for The Bake-Layer of The Tunnel Fire-Driven Flow with LES and RANS," *Transactions of the KSME (B)*, Vol.33, No.3, pp.156-163.
- [12] 1994, Fletcher, D.-F., Kent, J.-H. and Apte, V.-B., "Numerical Simulations of Smoke Movement from a pool fire in a ventilated tunnel," *Fire Safety Journal*, Vol.23, pp.305-325.
- [13] 2004, Gao, P.-Z., Liu, S.-L., Chow, W.-K. and Fong, N.-K., "Large Eddy Simulation for Studying Tunnel Smoke Ventilation," *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol.19, pp.577-586.
- [14] 2009, Jang, Y.-J., Kim, H.-B. and Chang, C.-H., "The Numerical Simulation of Fire Driven Smoke and Heat Flow in the Deeply Underground Subway Station using a Linux Clustering Computer," *Proceedings of The KSME Spring Annual Meeting KSME 09TE063*.
- [15] 2008, Jang, Y.-J., Lee, C.-H., Park, W.-H. and Jung, W.-S., "The Passenger Evacuation Simulation Using Fluent and EXODUS," *Journal of The Korean Society for Railway*, Vol.11, No.1, pp.95-100.
- [16] 2010, McGrattan, K., McDermontt, R., Hostikka, S. and Floyd, J., "Fire Dynamics Simulator (Version 5) User's Guide," NIST.
- [17] 2007, Jang, Y.-J. and Park, W.-H., "The Applicability Analysis of FDS code for Fire-Driven Flow Simulation in Railway Tunnel," *Journal of The Korean Society for Railway*, Vol.10, No.2, pp.224-230.
- [18] 1991, Werner, H. and Wengle, H., "Large-eddy simulation of turbulent flow over and around a cube in a plate channel," *8th Symposium on Turbulent Shear Flows.*, pp. 155-168.
- [19] 2011, Jang, Y.-J., "Analysis of Vortex Shedding Phenomena Around Pantograph Panhead for Train Using Large Eddy Simulation," *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.16, No.2, pp.17-23.