

화재열차가 진입하여 정차하는 지하철 역사에서 제연을 위한 환기장치 운전에 대한 수치해석 연구

이 승 호, 허 남 건[†], 차 철 현^{**}, 류 홍 선^{***}, 김 동 현^{****}, 장 용 준^{****}
 서강대학교 대학원, [†]서강대학교 기계공학과, ^{**}대상설비기술(주), ^{***}중앙대학교 기계공학과, ^{****}한국철도기술연구원

A Numerical Study of Ventilation System Operation for Smoke Control in a Subway Station when a Train under Fire is Approaching

Nahmkeon Hur[†], Seung Ho Lee[†], Chulhyun Cha^{**}, Hong Sun Ryou^{***},
 Dong Hyeon Kim^{****}, Yong Jun Jang^{****}

Graduate school, Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul, Korea

[†]Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul, Korea

*^{**}Daesang Engineering Co., Ltd., Seoul, Korea*

*^{***}Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul, Korea*

*^{****}Track & Civil Engineering Research Department, Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Korea*

ABSTRACT: The platform screen door(PSD) is installed in the station of the Seoul Metro 9th line for passengers' safety and comfortable environment of the station. The track way exhaust system(TES) is also operated with PSD to exhaust heat released from train. TES can also be used for the purpose of the heat and smoke control in an emergency case of the carriage fire. When the fire is occurred, operation of TES is switched to the smoke exhaust mode form its normal ventilation mode. In the present study, a subway station of Seoul Metro 9th line is modeled, and a 3-D CFD simulation is performed to investigate effectiveness of designed TES in case of fire. A scenario that a train under fire is arriving the station is simulated for several possible operation modes of the TES using moving mesh technique. As a result, temperature and CO concentration distribution in the station is obtained for each operation modes of TES. The effectiveness of TES operation in case of fire is also discussed.

Key words: Fire Simulation(화재해석), Track Way Exhaust System(선로배기장치), Moving Mesh(이동격자), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학)

1. 서 론

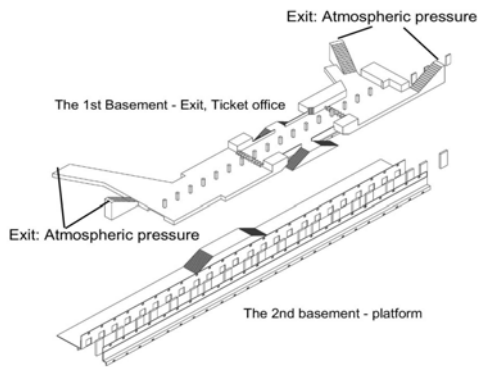
열차가 지하에서 운행될 때 많은 양의 열이 열차의 모터, 브레이크, 에어컨에서 발생한다. 터널

내에서 달리는 열차에서 발생한 열은 선로와 승강장의 온도를 상승시키므로 하절기 지하철의 쾌적한 환경을 위해서는 적절한 환기시스템이 필요하다. 이를 위하여 지하철 역사 내 선로의 상부와 하부에는 플랫폼의 공조를 위한 환기팬이 설치되어 있어서 플랫폼의 온도를 낮추고 역사내의 환경을 개선시킨다. 지하철 화재시 발생하는 열과 연기는 밀폐된 지하공간의 특성상 승객의 안

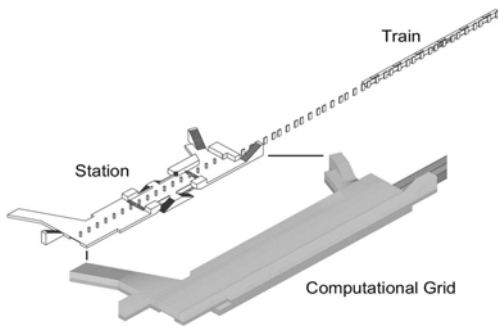
[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-705-8637; fax: +82-2-712-0799

E-mail address: nhur@sogang.ac.kr



(a) Computational model showing the platform and upper floor of the platform



(b) Computational Model

Fig. 1 Computational domain of the station with a train

전을 위협하는 가장 큰 요인이 되므로 화재상황에서 열과 연기의 확산을 억제하는 것은 매우 중요하다. 이러한 열과 연기의 확산을 억제하기 위한 여러 가지 방법중 하나로 위에서 언급한 평시의 환기시스템을 이용하여 제연에 적용하는 경우를 고려해 볼 수 있다. 지하철 역사와 같은 밀폐된 공간에서의 화재는 초기 단계에서의 진화와 환기시스템의 제연 효율성이 인명 및 경제적 피해를 최소화 하는 데에 있어 매우 중요한 역할을 한다. 따라서 평시의 환기시스템의 급/배기 장치의 가동방식을 효율적으로 제연이 될 수 있도록 전환하여 운전함으로써 지하철 화재시 발생하는 열과 연기에 의한 피해를 최소화한다. 따라서 본 연구는 환기시스템의 수치적 모델링과 그 해석을 통하여 효율적인 제연이 이루어 질 수 있는 운전방식을 제시하고자 한다. 지하철 화재의 수치해석 관한 여러 가지 연구가 선행되었다. 그중 Miclea 와 McKinney¹는 PSD가 설치된 역사에서 열차에 화재가 발생하는 CFD 시뮬레이션을 수행하였고, 비상상황의 급기/배기팬의 효과를 보여주

었다. Lunity등²은 홍콩의 지하철을 예로 화재에 관한 연구를 수행 하였다. 이 연구는 연기배출장치의 위치 배열이 승객들의 대피하는데 걸리는 시간을 확보하는데 중요하다는 점을 설명하였다. Mendoca³는 런던 지하철의 CFD 모델을 통하여 열차의 화재 발생시 기계적 배기의 효과를 시뮬레이션하였다. 또한 TES가 설치된 지하철 역사의 화재발생시의 수치해석에 관한 선행 연구가 Hur등^{4,5}에 의해서 수행되었다. 이 연구에서는 비정상상태의 해석이 수행되었으나 열차의 움직임이 제외되었기 때문에 열차의 움직임으로 인해 발생하는 피스톤 효과에 의한 유동은 고려되지 않았다. 선행연구의 결과에 따르면 상부급기/하부배기 방법이 평시 환기에 더 효과적이고, 상부배기/하부급기가 화재 제연에 효과적임을 알 수 있다. 본 연구에서는 이동격자 방법을 이용하여 열차의 움직임을 고려하였고, 다양한 환기 방식의 화재시 환기 효율을 수치해석을 통하여 예측, 비교하였다.

2. 수치해석 방법

Fig. 1은 서울 지하철 9호선 역사의 수치해석을 위한 모델과 해석 격자를 나타내었다. 해석에는 약 300만개의 직육면체 격자가 사용되었다. 계산에 사용된 모델은 역사 전체를 고려한 것으로, 지하1층에는 지상부 출입구와 개찰구 등을, 지하2층에는 승강장과 선로부를 모델링하였다. 지하1층과 2층은 4개의 계단으로 연결되어 있으며 1층은 중간부분의 기둥, 지상부로 통하는3개의 출입구와 1개의 외부출입구로 구성되어있고 2층은 선로부의 6개의객차, 두 선로사이의 기둥, PSD, 환기구로 구성되어있다. 두 선로중 한쪽에만 열차가 들어오는 상황이 고려되었으므로 반대쪽 선로부분의 PSD 는 닫혀있는 것으로 가정하였다. Fig. 2는 환기시스템의 급기/배기 방법을 표현한 개략적인 도식이다. 본 연구에서는 총 8 가지 급기/배기 방법이 연구되었다. 화재가 발생하기 전에는 선행연구⁴에서 가장 효율적인 환기 방식으로 증명된 상부급기/하부배기(이후 OSUE Over platform Supply / Under platform Exhaust)방법으로 급기/배기가 이루어지고 화재 열차가 진입된 후로는 도시된 8가지 방법으로 급기/배기방식이 전환된다. 단 첫 번째 경우에는 상

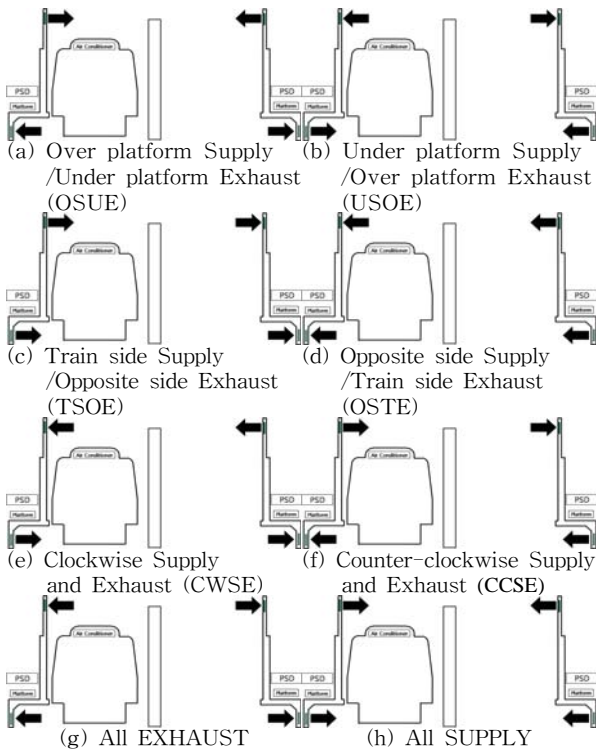


Fig. 2 Schematic diagrams of the TES exhaust/supply schemes

부급기/하부배기방식이 계속 유지된다. 환기시스템의 급기관과 배기관에 직접 유속을 부여하였고, 각각 48개의 급기관과 배기관이 선로부의 양쪽에 열차의 길이 방향으로 배열 되어있다. 급기와 배기의 팬 용량은 각각 1900CMM 으로 같게 설정하였다. 열차가 도착할 때 피스톤 효과에 의해 발생하는 열차 진행방향으로의 유동을 고려하기 위해 이동격자를 포함하는 비정상상태의 시뮬레이션을 수행 하였다. 화재는 4번째 객차에서 발생하고 화재가 발생한 열차는 Fig. 3의 운행곡선에 나타난 속도에 따라 이동하며 승강장에 진입한다. 본 연구에서는 계산에 걸리는 시간을 줄이기 위하여 열차의 이동은 정지 전 25초 동안만 고려하였다. 화재가 발생한 객차는 완전히 전소되고, 화재의 크기는 Fig. 4에 나타난 화재 발달곡선을 따라 열차 정지 후 120초 동안 20MW 까지 발달한다. 화재가 발생한 객차는 높은 온도로 인하여 창문이 깨지기 때문에 모든 창문은 열려진 상태를 가정하고 승객의 대피를 위하여 PSD는 모두 개방된 상태로 가정하고 수치해석을 수행하였다. 열차가 정지할 때 환기모드(OSUE)로 운전되던 팬은 그 속도를 점차 줄이기 시작하고

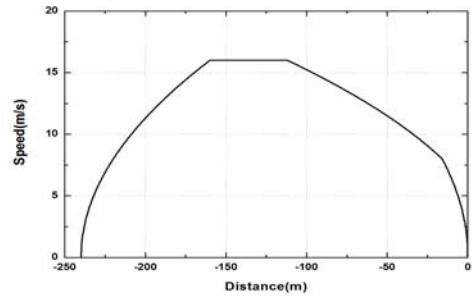


Fig. 3 Train operation curve

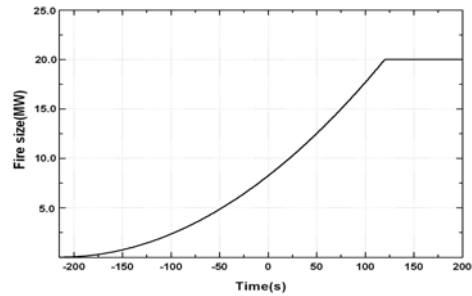


Fig. 4 Fire size development curve

완전 정지까지는 40초가 소요된다. 완전히 정지한 팬은 반대 방향으로 운전되기 시작하며 그 속도가 최대로 발달할 때 까지는 10초가 소요된다. 본 연구에서는 수치해석을 수행하기 위하여 상용 유동해석 프로그램인 STAR-CD V3.26⁶을 사용하였고 압력보정 알고리즘은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였으며 난류 모델은 $k-\epsilon$ High Reynolds Number 모델을 적용하였다.

3. 결과 및 고찰

본 연구는 열차가 역사에 진입할 때 피스톤 효과에 의해 발생하는 열차 이동방향의 유동을 함께 고려하기 위하여 열차를 모사한 계산격자를 열차의 운행조건을 따라 이동시켜 선행 연구보다 실제 상황에 가까운 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 5는 열차가 진입할 때 승강장의 온도분포에 대해서 나타내고 있다. 그림에서 확인할 수 있듯이 4번째 객차에서 화재가 발생하고 객차가 승강장에 진입함에 따라 고온이 확산되어 가는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 다양한 환기방식을 적용하였을 때에 열차 정지 후 100초 이후에 승강장의 온도분포와 연기(CO)의 분포에 대해서 나타내었고, 화재 열차와 인접한 PSD를 통하여 확산되는 열을 확인 하였다. 또한 화재시 승객의 대피로로 이용되는 계단에서의 시간에 따른 열의 확산에 대해 나타내었다.

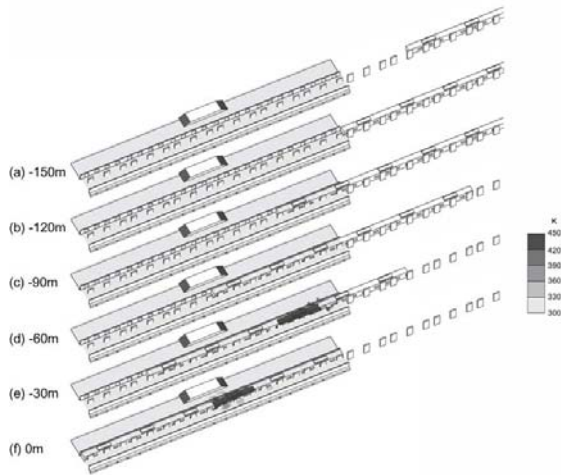


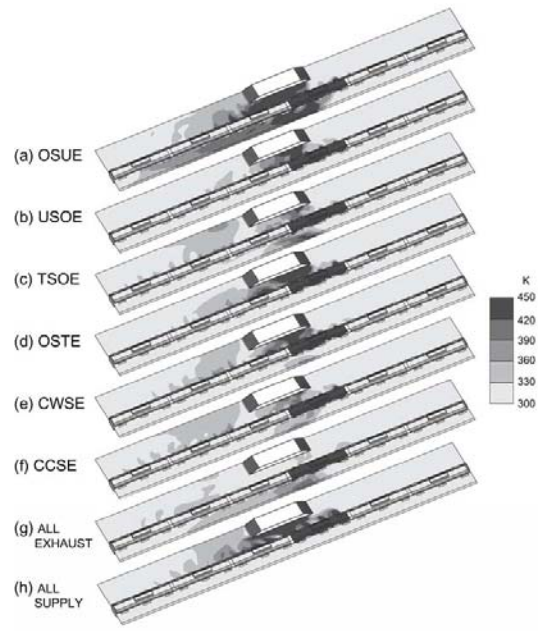
Fig. 5 Evolution of the temperature distributions as a train on fire approaches the station

3.1 열차정차 100초 후의 온도 및 연기(CO)분포

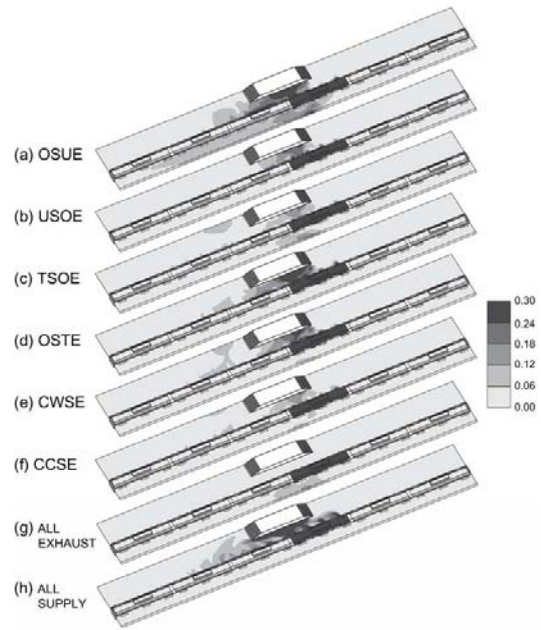
Fig. 6은 화재 열차가 승강장에 도착한 이후의 온도 및 연기 분포에 대하여 나타내었다. 승강장 바닥으로부터 1.5m 상단부에서 측정하였고 열차가 도착하고 100초 후의 분포에 대하여 측정하였다. 본 연구에서 해석을 수행한 8가지 화재시의 환기 방식에 대한 비교를 해보면, 모든 환기구에서 급기가 이루어 졌을 때(ALL SUPPLY)에 다른 환기방식으로 전환했을 때 보다 온도 및 연기의 분포가 높게 나타나는 것으로 확인할 수 있었다. 이는 화재 열차로부터 발생하는 열과 연기가 어느 환기구로도 외부로 빠져나가지 않고 선로로 퍼져거나, 열린 PSD를 통하여 승강장으로 퍼져나가기 때문이다. 그리고 모든 환기구에서 배기가 이루어졌을 때(ALL EXHAUST)에 다른 모든 방식으로 환기가 전환되었을 때보다 승강장으로의 열 및 연기의 확산이 적게 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 환기구에서 급기가 이루어 졌을 때와는 반대로 모든 환기구를 통해 화재 열차에서 발생하는 열과 연기가 외부로 빠져나가기 때문이다. 따라서 열차 화재시에 모든 환기구를 통하여 배기가 이루어지는 것이 가장 효율적인 환기 방법임을 알 수 있었다.

3.2 승강장에서의 열의 확산

본 연구에서는 화재 열차에서 발생하는 열의 확산을 화재열차 주변 승강장의 시간에 따른 온



(a) Temperature



(b) CO concentration

Fig. 6 Contours of the temperature and CO concentration distribution in the platform at 100 sec after the train stop for various TES operation modes

도의 변화를 비교하였다. Fig. 7에 나타난 바와 같이 화재가 발생한 객차의 4개의 출입문으로부터 1m, 승강장 바닥으로부터 1.5m 떨어진 위치에서 온도 측정이 이루어졌다. Fig. 8에는 열차가 정차하는 시간으로부터 100초까지의 승강장에서의 온도 변화를 나타내었다. (a)OSUE→OSUE의

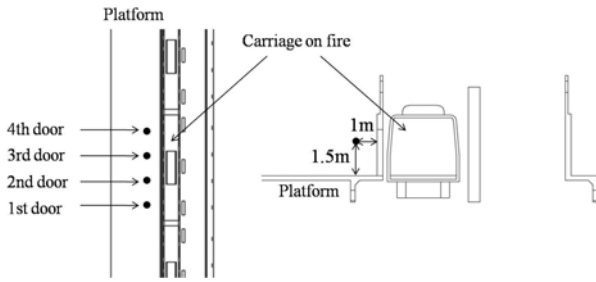


Fig. 7 Monitoring points at the platform

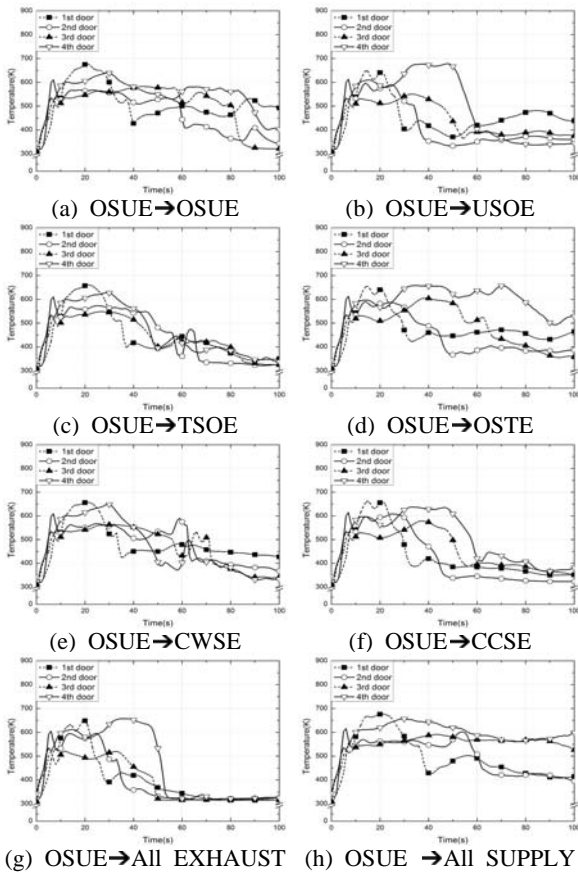


Fig. 8 Evolution of the temperature at some locations in the platform

경우에는 평시의 환기 방식을 유지하는 경우이고, 그 외에는 모두 열차가 정차한 후 40초동안 환기방향의 방향이 바뀌는 환기팬의 가동을 멈추고 그 후 10초 동안 반대 방향으로 다시 가동시켜 총 50초 후에는 모든 환기팬이 정상적으로 가동된다. 그렇기 때문에 열차가 정차하고 50초까지는 모든 환기 방식으로 전환하였을 때 승강장에서 높은 온도가 유지되지만 50초가 지난 후에는 온도분포에 급속한 변화가 생기는 것을 볼 수 있다. 위의 그래프를 비교해 보면 평시의 환기방

식(OSUE)에서 화재시에 모든 환기구에서 배기가 이루어 졌을 때(ALL EXHAUST)승강장에서의 온도가 가장 낮게 유지되었다. 승강장으로의 열 및 연기가 잘 확산되지 않았던 이유와 동일하게 화재열차에서 발생하는 열이 승강장으로 확산되기 전에 환기구를 통해서 대부분 빠져 나가기 때문이다.

3.3 비상구에서의 열의 확산

화재시 승강장과 외부로 연결된 계단은 승객 대피로로서 이용된다. 따라서 계단으로 연결된 비상구에서의 온도분포는 승객의 안전한 대피를 고려할 때 매우 중요하다. 본 연구에서는 Fig. 7에 나타난 바와 같이 승강장에서 지하 1층으로 올라가는 두 개의 계단과 지하1층에서 지상부로 연결되는 3개의 출입구에서의 시간에 따른 온도 변화를 측정하였다. 측정위치는 사람의 키를 고려하여 바닥으로부터 1.5m의 높이로 설정하였다. Fig. 8은 화재시 8가지의 환기 방식을 적용하였을 때, 각 비상구에서의 시간에 따른 온도변화를 나타내었다. A지점과 B 지점의 온도분포를 보면 열차가 도착하면 A지점 보다 B지점의 온도가 빨리 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 화재가 발생한 객차가 A지점 보다는 B지점에 더욱 가까이 위치해서 화재열차에서 발생하는 열이 더욱 빨리 도달하기 때문이다. 그리고 열차가 역사로 진입함에 따라 발생하는 열차풍에 의하여 B지점에서의 온도가 열차가 도착하고 30초 후에 가장 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. C지점과 D지점을 비교해보면 D지점이 승강장과 연결된 통로로부터의 거리가 더 멀기 때문에 열이 더 늦게 확산 되는 것을 볼 수 있다. 각 비상구에서의 온도변화를 보면 이전 절의 결과와 동일하게 모든 환기구에서 배기가 이루어지는 경우에(ALL EXHAUST) 온도 증가가 가장 느리게 나타났다. 따라서 화재시에 승객의 안전한 대피를 고려할 때 ALL EXHAUST 환기 방식이 가장 효율적인 환기 방식임을 알 수 있다.

3. 결과 및 고찰

본 연구에서는 PSD가 설치되어 있는 서울 지하철 9호선 역사에 화재열차가 진입할 경우 여러

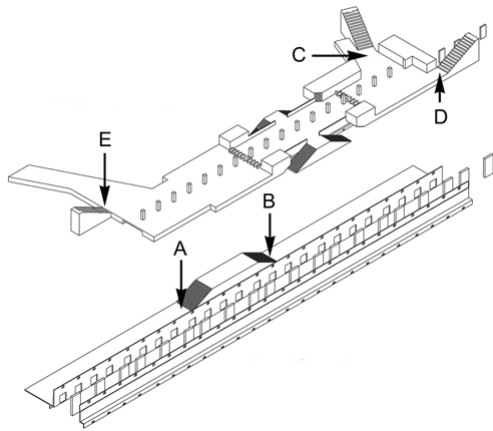


Fig. 10 Monitoring points at the stairway

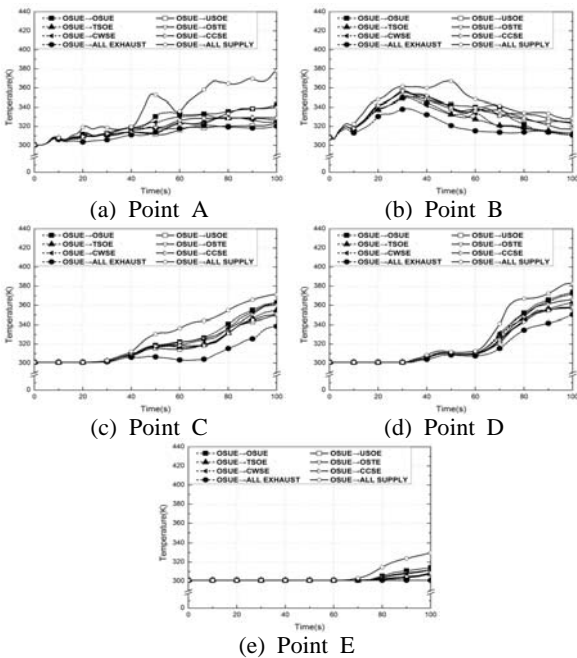


Fig. 11 Temperature distribution at the monitoring point (A~E)

가지 환기 방식을 적용하여 환기 효율에 대한 수치해석을 수행하였다. 비압축성 난류 유동에 대한 3차원 해석을 수행하였고 열차의 움직임을 고려하기 위하여 이동격자 방법을 적용하였다. 보다 정확한 해석 결과를 위하여 서울 지하철 9호선 전체 역사를 모델링하여 해석 영역으로 설정하였다. 평시에 가장 효율적인 환기 방식인 OSUE 환기 방식에서 화재가 발생하였을 때에 OSUE 환기 방식을 유지하는 경우와 7가지의 다른 환기방식으로 전환하는 경우에 대하여 수치해석 수행하였다. 수치해석 결과 열차 화재가 발생하였을 경우 ALL EXHAUST 환기방법을 적용

하였을 때에 승강장에 열 및 연기가 확산되는 것이 가장 잘 방지되었다. 또한 화재 객차 주변에서의 온도가 ALL EXHAUST 환기방법을 적용하였을 때에 가장 느리게 증가하는 것을 확인할 수 있었으며 승객의 대피로에서의 온도 증가를 고려해 봤을 때에도 ALL EXHAUST 환기방법이 가장 효율적인 방법이었다.

후기

본 연구는 한국철도기술연구원 미래철도기술개발사업(T305C1000005-05C0100-00512)의 지원의 일환으로 이루어졌으며 이에 감사드립니다.

참고 문헌

1. Miclea, P.C. and McKinney, D.M., 2000, "CFD simulation of vehicle fire in a station equipped with platform screen doors," 10th International symposium on Aerodynamics and Ventilation of Vehicle Tunnels, pp.305-322.
2. Lunity, A., Yau, R. and Tang, D., 2000, "CFD simulation of underground station fires a Hong Kong Example," Tunnel and Underground Station Fires, pp.45-54.
3. Mendonça, F.G., 1995, Investigation into the interaction of a carriage fire and station ventilation system in a bored tunnel station, Computational Dynamics Ltd.
4. Hur, N., Won, C.-S., Jegal, K. and Cha, C., 2003, "A numerical simulation of the Trackway Exhaust System (TES) for underground station of Seoul 9th line: Ventilation operation and smoke exhaust operation in case of a carriage fire," 11th International symposium on aerodynamic and ventilation of vehicle Tunnels, pp.231-242.
5. 박종택, 원찬식, 허남진, 2004, "선로부 TES를 갖는 지하철 역사내 화재의 수치 해석," 제 3회 한국유체공학학술대회 논문집, pp.727-730.
6. STAR-CD V.3.26 User Guide, 2004, Computational Dynamics Ltd.