

장대 터널 내 구난역의 열차 화재 시 제연을 위한 1D-3D 연계 해석

정 재 혁, 허 남 건^{*†}, 이 정 표^{**}, 김 진 곤^{***}

서강대학교 대학원, *서강대학교 기계공학과,

한국항공대학교 대학원, *한국항공대학교 항공우주 및 기계공학과

The 1D-3D Simulation for Smoke Ventilation in a Rescue Station of a Railroad Tunnel under the Fire

Jae Hyuk Jung, Nahmkeon Hur^{*†}, Jung-Pyo Lee^{**}, Jin Kon Kim^{***}

Graduate school, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

*Department of Mechanical Engineering, Sogang University, Seoul 121-742, Korea

**Graduate school, Korea Aerospace University, Gyeonggi-do 412-791, Korea

***Department of Aerospace and Mechanical Engineering, Korea Aerospace University,
Gyeonggi-do 412-791, Korea

(Received March 17, 2010; revision received August 2, 2010)

ABSTRACT: In the present study a 1D-3D numerical simulation was performed to analyze the fire safety in a rescue station of a long railroad tunnel equipped with a mechanical ventilation. The behavior of hot air was studied for the emergency operation mode of ventilation system in case of fire in the rescue station. The 1D simulation was carried out for entire tunnel region. Detailed 3D CFD simulation was performed for the rescue station area in the central region of the tunnel by using the result of the 1D simulation as the boundary condition of the 3D simulation. Various type of cross passage installation were evaluated for the prevention of smoke diffusion to suggest the optimized interval of the cross passages in the rescue tunnel.

Key words: Tunnel fire(터널화재), Ventilation(환기), Smoke control(제연), Flow analysis(유동 해석), Computational fluid dynamics(CFD, 전산유체역학)

1. 서 론

경제성장에 따른 인구 이동 및 화물 운송량의 증가에 따라 최근 고속 열차에 대한 필요성은 점차 부각되고 있다. 특히 전 국토의 약 70%가 산악 지형인 우리나라의 경우 열차의 고속화를 위하여 터널의 건설은 불가피하며 또한 터널은 점차 장대화

되고 있다.

열차의 터널은 그 특성상 다른 건축물들과는 달리 지역이 격리되어 있으며 그 내부는 폐쇄적이므로 터널 내에서 화재 발생 시 대량의 인명 피해가 일어날 수 있는 위험을 가지고 있다. 특히 최근 고속 전철을 위하여 건설되는 장대터널의 경우 그 길이가 10 km 이상으로 화재 열차의 자력 탈출이 불가능한 경우가 대다수이기 때문에 터널 내부에서 화재 발생 시 이를 대비하기 위한 적절한 소화 설비, 비상환기 시스템 및 인명 대피 장치가 필수적으로 요구된다.

† Corresponding author

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

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

철도망이 발달되어 있는 유럽의 경우 터널 환기 및 대피 시스템에 대한 개발의 필요성이 부각됨에 따라 실제 터널에서의 화재실험 및 다양한 수치해석적 연구가 활발히 진행되고 있다. Portmann et al.⁽¹⁾은 스위스의 Gotthard base 터널을 대상으로 적절한 환기 유속을 산출하기 위한 연구를 수행하였으며 두 구난역 사이의 비상정차가 매우 위험한 상황을 초래할 수 있다는 가능성을 보였다. Alexander et al.⁽²⁾은 폐쇄된 터널에서 액화 프로판 버너를 이용한 20 MW 급의 화재 강도에 대하여 전체 스케일의 실험을 수행하였으며 이를 수치해석 결과와 비교하였다.

국내에서도 화재 시 터널 내의 제연설비 성능을 평가하기 위한 다양한 연구들이 수행 되고 있다. Kang et al.⁽³⁾은 철도 터널 화재 시 임계 유속 전후의 대피 환경에 대하여 고찰하였다. 특히 Kim et al.⁽⁴⁾은 구난역과 같은 대피공간이 마련된 국내 최초의 초장대터널인 솔안터널(16.24 km)을 대상으로 피난로에서 승객 대피를 위한 적절한 저연장치의 배연성능을 1/48 축소 실험을 통하여 산출하고 이를 수치해석과 비교 및 검증 하였다.

본 연구실의 선행 연구로써 Yang et al.⁽⁵⁾은 장대터널에서 화재 시 연결통로 및 대피로에서의 제연성능을 평가하고 설계 지침을 만들고자 수치해석을 수행하였으며 연구를 통하여 터널 내 대피로 설계 시 적절한 진입 각도를 제시 했고 제연 팬의 설치 필요성에 대하여 확인시켰다.

본 연구에서는 중앙에 구난역이 1개 배치된 10 km 길이의 장대 터널에 대하여 구난역의 양쪽 단선 터널을 잇는 교행로 배치 간격에 따른 수치해석을 수행함으로써 화재 시 연기가 비화재 터널로 전파되

지 않고 화재 터널에서도 연기의 확산이 최소화 될 수 있는 적절한 설계 지침을 작성하고자 한다.

2. 열차 화원 및 안전기준

2.1 대피공간에 대한 안전기준

대피공간의 오염물질 허용치에 대하여 제정된 국내의 확실한 기준은 아직 없기 때문에 본 연구에서는 외국의 기준을 참고하여 교행로 및 터널의 안전성을 진단하는데 다음과 같은 사항을 적용하였다.

(1) 공기 온도 : 대피로는 보통 60°C~80°C 이하의 범위를 유지해야 하며^(6,7) 수 초 이내 대피가 가능한 경우는 60°C 이하, 그리고 6분 이상 대피 시간이 걸릴 경우는 평균온도 49°C 이하로 유지되어야 한다.⁽⁸⁾

(2) CO 농도 : 최대 수초 이내는 2000 ppm, 6분 이내는 1500 ppm, 15분 이내는 800 ppm 그리고 그 이상은 50 ppm 이하로 유지되어야 한다.⁽⁸⁾

2.2 열차 화원 및 발열량

HGV를 포함한 터널 내 화재 시 발생할 수 있는 HRR 10 MW를 ultra fast mode로 가정하여⁽⁹⁾ Fig. 1 과 같이 시간에 따라 모델링 하였다.

3. 수치해석

본 연구에서 사용된 해석 모델은 총 10 km의 길이를 갖는 장대터널로써 양방향 단선 터널이며 중앙에 화재 열차 정차를 위한 구난역이 설치되어있다. 각 터널은 폭 9.60 m, 높이 7.04 m의 단선 형태이며 중앙 구난역을 제외한 터널내 350 m 간격마다 비상 대피용 교행로가 있다. 또한 구난역의 내부에는 특정 간격으로 교행로가 설치되며, Table 1과

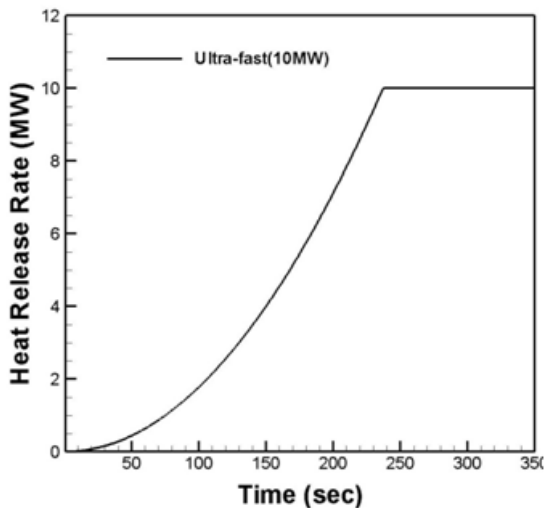


Fig. 1 Heat release curve in tunnel fire.

Table 1 Analysis cases for each interval of cross passages

Interval of cross passages	
30 m	
40 m	
50 m	

같이 열차 화재 시 교행로의 간격이 30, 40, 50 m로 변함에 따른 제연 효과를 수치해석을 통하여 분석하였다.

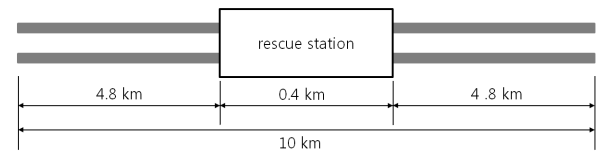
10 km 길이의 장대터널 전체를 3차원 CFD 솔버를 통하여 수치해석하기에는 막대한 계산 격자가 필요하게 되며 이에 따른 많은 계산시간과 자원이 소요되게 된다. 따라서 본 연구에서는 10 km의 전체 터널에 대한 1차원 해석 수행 후 1차원 해석의 결과를 경계조건으로 하여 터널 중앙의 구난역에 대해서만 세부 형상을 표현한 격자를 생성하여 3차원 수치해석을 수행하였다.

3.1 1D 시뮬레이션

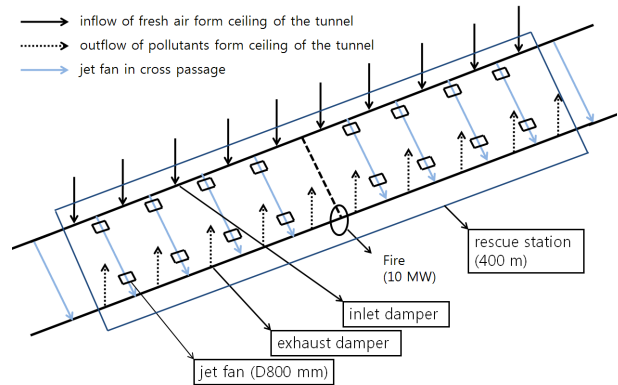
본 연구에서는 구난역을 포함한 10 km 길이의 장대 터널 전체에 대한 1D 시뮬레이션을 위하여 상용 소프트웨어인 SES(Subway Environment Simulation)를 사용하였다. SES는 터널 내 제연이나 환기에 대한 전산해석을 수행하기 위하여 사용되는 프로그램으로서, 터널에서 발생할 수 있는 여러 사건에 대해 유동, 온도, 및 습도 등의 물성치를 계산할 수 있다. 3D CFD 시뮬레이션에 앞서 SES를 이용한 전체 터널 구간에서의 1D 시뮬레이션을 통한 구간 별 유동분포를 구하였다.

1D 시뮬레이션에서는 Fig. 2와 같이 10 km의 터널 전체 영역에 대하여 구난역에서의 환기 시스템 및 화재 열차의 위치와 발열량이 경계조건으로써 고려되었다. 열차의 화재는 구난역의 중앙에 열차 1량(20 m)에서 발생하는 것으로 선정하였으며, 이때의 발열량 HRR은 10 MW로 설정하였다. 총 해석 시간은 500 sec, 그리고 해석 시간스텝은 0.1 sec로 하였다.

구난역 내 화재 열차 정차 시 터널 천장부에 20개의 가압댐퍼가 설치되어 있어, 흡·배기 팬에 의



(a) Analysis model for 1D simulation



(b) Boundary conditions

Fig. 2 Schematic diagram of the 1D simulation for entire tunnel region.

하여 화재 터널에서는 배기가 이루어지고 비화재 터널에서는 외부의 신선한 공기가 흡입된다. 또한 구난역 내 위치하는 교행로를 통한 비화재 터널로의 화재 연기 유입을 차단하기 위하여, 각 대피횡경에는 화재 터널 방향으로 제트팬이 작동하도록 하였다. 댐퍼 유속은 8.33 m/s, 제연팬 유속은 6.6 m/s로 설정하였다. 구난역 내의 교행로의 간격이 30, 40, 50 m로 변함에 따른 각 지점의 유속 및 유량 결과는 Table 2와 같으며, 이 해석결과는 이후 3D 시뮬레이션의 경계조건으로 적용된다.

1D 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 터널 천장부의 급배기 팬 및 교행로를 통한 강제 환기에 의하여 비화재 터널에서는 구난역 경계에서 외부 터널로 공기가 빠져나가며 화재 열차가 정차한 터널에

Table 2 Analysis results for each interval of cross passages from the 1D simulation; results of 1D simulation are used for boundary conditions of 3D simulation in a next step

Interval of cross passages	Inflow velocity at the interface between tunnel and rescue station		Inflow rate of fresh air from ceiling of the tunnel	Outflow rate of pollutants from ceiling of the tunnel
	Safe tunnel	Tunnel with fire		
30 m	-0.32 m/s	0.31 m/s	492.07 CMS	497.36 CMS
40 m	-0.71 m/s	0.72 m/s	494.08 CMS	496.00 CMS
50 m	-0.66 m/s	0.72 m/s	492.15 CMS	496.11 CMS

서는 구난역 경계에서 외부 터널로부터 공기가 유입됨을 알 수 있다.

3.2 3D 시뮬레이션

구난역에 대한 3D 시뮬레이션을 수행하기 위하여 상용 소프트웨어인 STAR-CD V3.26을 사용하였다. 구난역 및 교행로, 화재열차의 세부적인 형상을 표현하기 위하여 약 315만 개의 계산격자가 사용되었으며 이를 해석하기 위하여 옴테론 2.4GHz 4 CPU 리눅스 클러스터를 사용하여 약 3일의 시간이 소요되었다. Fig. 3에 나타낸 것과 같이 구난역 내 화재 시 작동되는 제연 시스템에 따라 해석 조건을 지정하였으며 자세한 해석모델 및 계산격자의 형상은 Fig. 4와 같다.

Fig. 4에 나타낸 1D-3D interface 영역에서는 Table 2에 나타낸 1D 시뮬레이션의 결과를 각 해석 케이스에 따라 3D 시뮬레이션에서 경계조건으로 사용하였다. 구난역 내 정차한 열차로부터 화재 발생 후 15분간의 변화를 비정상상태 유동해석을 통하여 시뮬레이션 하였다. 이를 위하여 시간간격을 iteration 당 1초로 설정하였으며 총 900 스텝 계산을 수행하였다.

각 교행로 간격에 따른 수치해석 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 화재 열차를 기준으로 한 수직

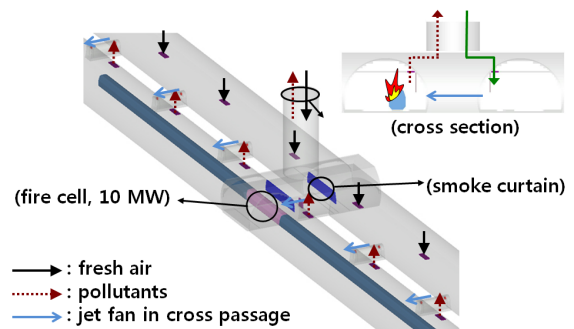


Fig. 3 Schematic of smoke ventilation system in the rescue station.

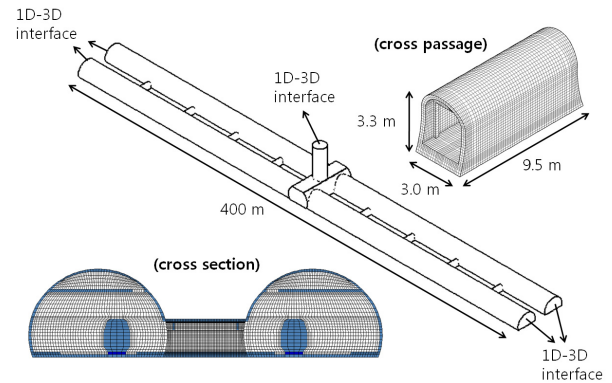


Fig. 4 Computational mesh of the rescue station for 3D simulation.

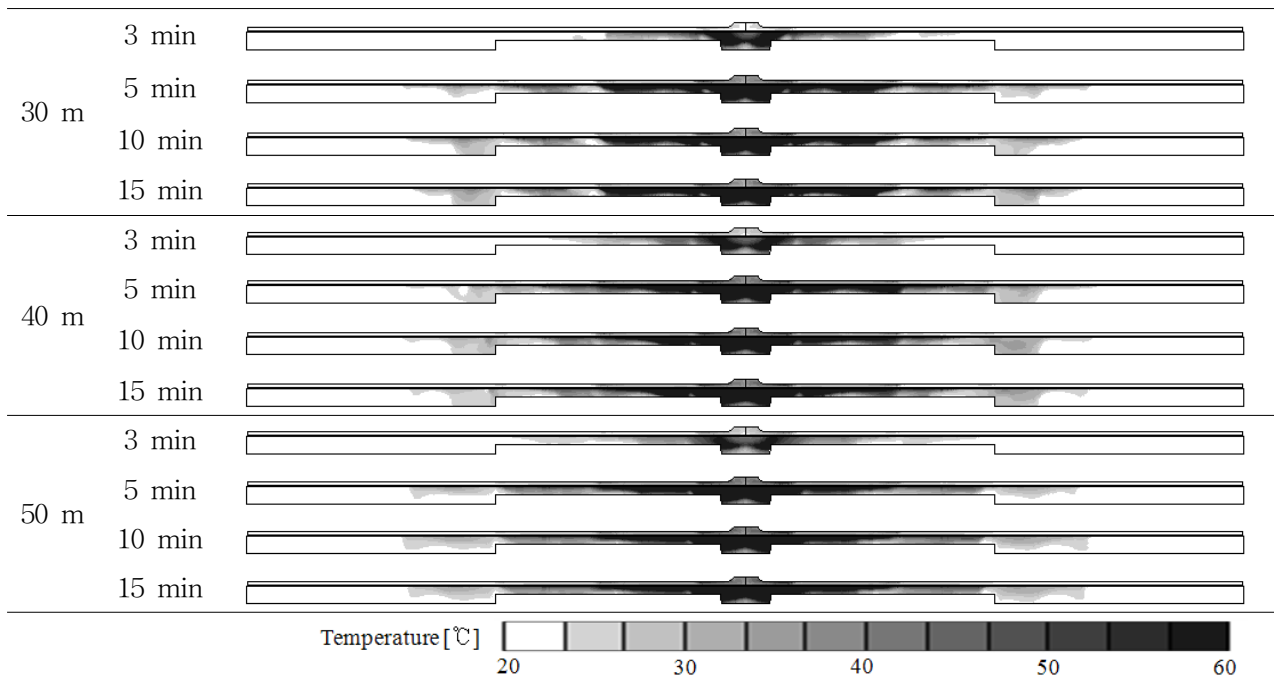


Fig. 5 The effect of the interval of cross passages on the temperature distribution with time at the vertical section which passes through the train and fire.

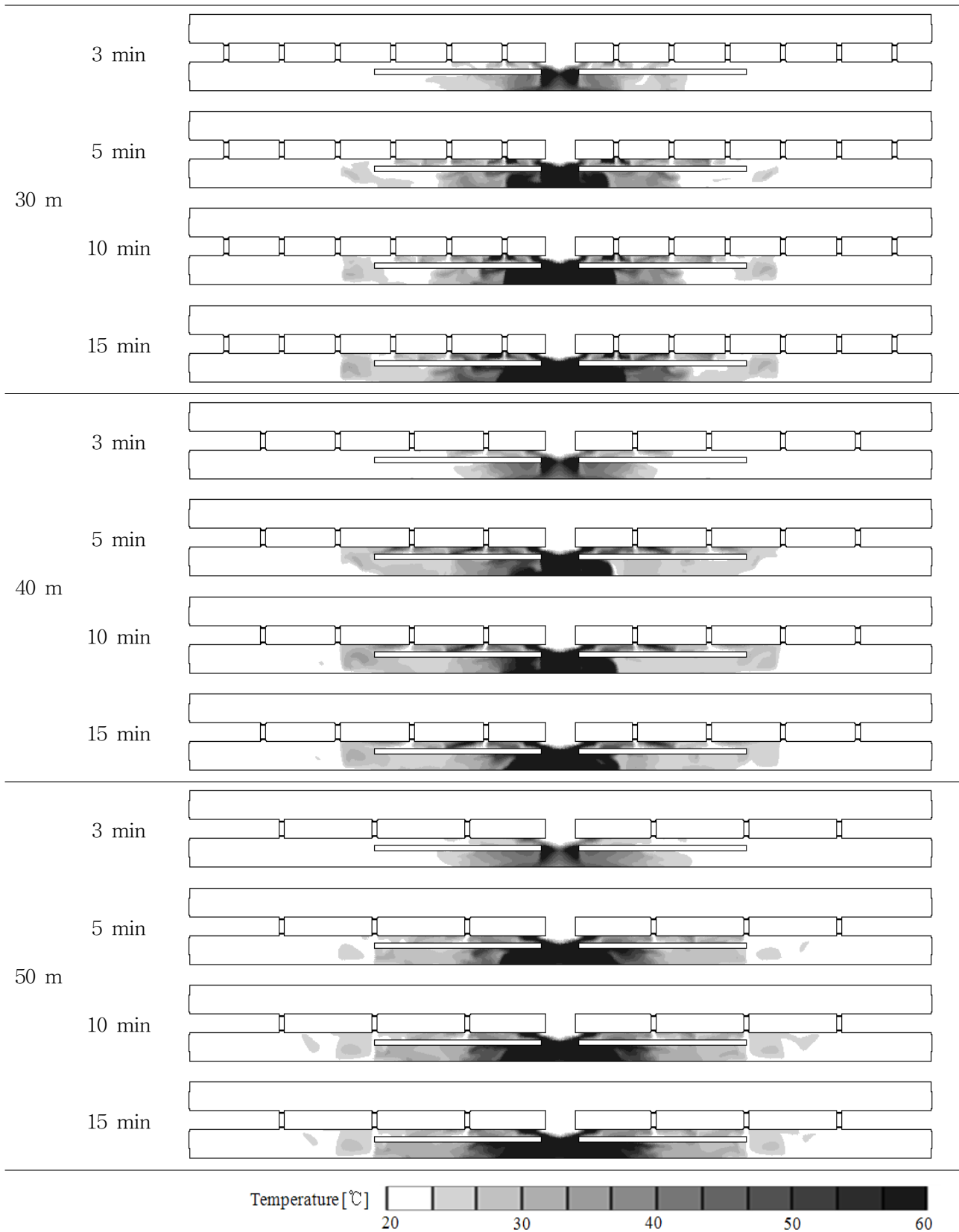


Fig. 6 The effect of the interval of cross passages on the temperature distribution with time at the horizontal section which passes through the train and fire.

단면을 나타낸 Fig. 5를 보면 화재 위치에서 뜨거워진 공기는 상승하여 터널 천장을 타고 좌, 우로 확산되며 약 5분의 시간이 경과된 후부터 유사한 고온 공기의 분포가 나타난다. 교행로 간격에 따른 확산 정도의 비교 결과 인체에 치명적일 수 있는 약 50°C 이상의 고온 공기는 교행로 간격이 가장 짧은 30 m 케이스에서 구난역 내 가장 먼 곳까지 확산됨을 확인할 수 있다.

Fig. 6에서는 교행로의 간격 별 시간에 따른 온도 분포를 수평 단면에서 나타내었다. 교행로 간격과 무관하게 모든 해석 케이스에서 비화재 터널로의 고온 공기의 유입은 나타나지 않았으며 이는 교행로에 제트팬 설치 시 공기의 역류 등에 의한 화염원으로 부터의 오염 물질이 비화재 터널로는 유입되지 않음을 보여준다. 따라서 교행로를 통해 비화재 터널로 대피하기 위한 본 구난역의 설계는 타당하다고 할 수 있다. 교행로 간격에 따라 간격이 30 m일 때 가장 먼 곳까지 50°C 이상의 고온 공기가 확산되며 간격이 40 m일 때 가장 작은 영역으로 확산된다. 이 결과의 원인은 Table 2의 1D 해석결과로부터 확인할 수 있다. 교행로 간격이 40 m인 경우 다른 경우에 비해 화재 터널 양쪽 경계로부터 유입되는 공기의 속도가 빠르다. 공기의 유입속도가 차이가 나는 원인은 제트팬이 설치된 교행로의 설치 간격에 따른 개수의 변화에 있다고 판단된다. 교행로를 통하여 화재 터널로 유입되는 공기의 양에 따라 화재 터널의 경계로부터 유입되는 공기의 속도가 영향을 받으며 이는 고온 공기의 확산에 영향을 미친다. 각 교행로 간격에 따른 화재 열차 주위의 유동 분포를 Fig. 7에 나타내었다. 교행로의 간격 및 위치, 구난역 내 정차한 화재 열차의 상호 간섭으로 인하여 교행로의 간격에 따라 열차 주변에 다른 유동 분포

를 보이며 교행로의 간격이 40 m인 경우 그림의 열차 주변에서 왼쪽에서 오른쪽 방향으로 흐르는 유동이 형성됨을 확인할 수 있다. 이는 구난역 외부로부터 화재 방향으로 지배적인 유동이 형성됨을 의미한다. 이러한 유동 방향은 화재위치로부터의 연기 및 고온 공기 등의 확산을 억제시킨다.

4. 결 론

본 연구에서는 장대 터널 내 화재 열차 진입 시 안전한 인명의 대피를 위해 설계되는 구난역에 대하여 구난역 내 설치되는 교행로의 간격에 따른 고온 공기의 거동을 수치해석을 통하여 연구하였다. 10 km에 달하는 장대터널의 전체 영역을 시뮬레이션하기 위하여 1D~3D 연계 해석기법이 도입되었으며 전체 터널영역에 대한 1D 시뮬레이션 후 결과를 구난역 영역에 대한 3D 시뮬레이션의 경계조건으로써 사용하였다. 본 해석기법을 통하여 장대 터널과 같이 규모가 큰 영역의 시뮬레이션을 위한 시간과 자원을 절약할 수 있었으며 본 해석기법은 터널 외의 다른 수치해석에도 적용할 수 있다.

본 연구에서 수행된 시뮬레이션의 결과 구난역 내부의 제트팬이 설치된 교행로의 간격이 변함에 따라 화재 터널에서의 공기의 거동에 차이가 있음을 확인하였다. 수치해석 결과에 따르면 교행로를 통한 공기의 유입 및 외부 터널과 구난역의 경계로부터 유입되는 유량의 차이에 따라서 교행로의 간격이 40 m일 때 인체에 치명적인 50°C 이상의 고온공기가 가장 덜 확산된다. 고온 공기의 확산 범위의 차이는 화재 열차에서 인명 대피 시 대피 가능한 시간 및 대피 영역의 결정에 있어서 중요한 인자가 될 수 있다. 따라서 본 건구의 결과는 장대 터널 내 구난역 설계 시 참고자료로 활용될 수 있다고 사료된다.

후 기

본 연구는 건설교통부가 출연하고 한국철도기술연구원에서 위탁 시행한 철도안전기술개발 사업의 일환으로 수행된 것입니다. 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. Portmann, D. and Shaha, J., 2002, Optimal use

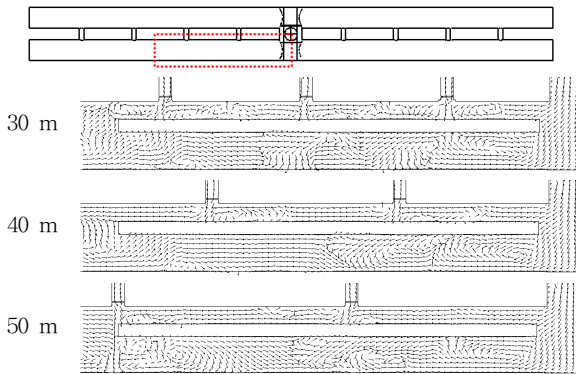


Fig. 7 The effect of the interval of cross passages on the flow directions.

- of jet fans in the Gotthard base tunnel near the portals to support the emergency ventilation, International Tunnel Forum.
2. Alan, P. and Alexander, D., 2006, Movement of smoke in tunnels : A comparison of theory and practice, Computational Wind Engineering, pp. 585-588.
 3. Kang, S. Y., Kim, K. H., Cho, Y. J., Lee, J. H. and Oh, M. D., 2000, Evaluation environment in a railroad tunnel on fire(in Korean), Proceedings of the SAREC 2000 Winter Annual Conference, pp. 181-187.
 4. Kim, D. H. and Park, W. H., 2006, Experiment by reduced scale models for the fire safety of a rescue station in very long rail tunnel in Korea, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 21, pp. 303-313.
 5. Yang, S., Hur, N., Ryou, H. S., Kim, D. H. and Jang, Y. J., 2008, Numerical simulation of smoke ventilation in rescue route and cross passage of railroad tunnel(in Korean), Korean Journal of Air-conditioning and Refrigeration Engineering, Vol. 20, No. 1, pp. 1-10.
 6. Meacham, B. J., 1998, Evolution of performance-based codes and fire safety design method, NIST, GCR 98-761, p. 65.
 7. Chow, W. K. and Li, S. M., 1999, Safety requirement and regulations reviews on ventilation and fire for tunnels in the Hong Kong special administrative region, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol. 14, pp. 18-20.
 8. NFPA 130, 2000, Standard for fixed guide way transit and passenger rail systems, National Fire Protection Association, USA.
 9. Korea Institute of Construction and Transportation Technology Evaluation and Planning, 2009, Internal report, pp. 30-31.