

터널내 열차 화재시 효과적인 구난역 제연 설비를 위한 수치 해석 연구

양성진* · 원찬식** · 허남건*** · 차철현****

A Numerical Study on Effective Smoke-Control System of a Rescue Station in a Tunnel Fire

Sung-Jin Yang*, Chan-Shik Won**, Nahmkeon Hur*** and Chulhyun Cha****

Keywords : Fire simulation(화재시뮬레이션), Computational Fluid Dynamics(전산유체역학), Tunnel ventilation(터널환기), Smoke-control system(제연설비)

Abstract

In designing smoke-control system of rescue station in train tunnel, a purpose is to prevent a disaster by proposing the jet fan operation together with smoke-control curtain in tunnel fire. This study has investigated the relationship of the Heat Release Rate(HRR) and a adequate ventilation velocity to control the fire propagation in tunnel fire, and has improved the effect of the smoke-control curtain on preventing the flow of pollutants. In this study, Computational Fluid Dynamics(CFD) simulations with STAR-CD(ver 3.24) were carried out on predicting the fire spreading and the flow of pollutants, considering jet fan operations and effect of smoke-control curtain. Our simulation domain is the full scale model of the 'DAEGWALLYEONG' 1st tunnel. The results represent that ventilation operation can control the fire spreading and pollutants effectively to prevent a disaster.

1. 서론

최근 철도 계획은 기존의 단순한 지역 간 연결에 그치지 않고 철도의 주행성 향상과 동식물 생태 공간 단절 등으로 야기되는 환경 파괴 최소화를 위하여 노선 선정을 고려하는 추세이다. 그것은 우리나라와 같이 산악지형이 국토의 대부분을 차지하는 지형 특성상 장대 터널의 건설이 불가피함을 의미한다. 또 장거리 교통수단의 일환으로 고속 철도망의 확장을 고려해 볼 때 고속 철도 레일이 갖는 선형 조건은 매우 엄격하므로 앞으로의 장대 터널 건설 계획은 꾸준히 있을 전망이다. 하지만 터널의 반밀폐구조라는 특수성으로 인하여 터널 내에서 화재가 발생할 경우 기류의 확산이 원활하지 못하다는 단점이 있다. 결과적으로 화재연기로 인한 가시거리 감소, 유독성 가스의 확산 및 공기온도의 급격한 상승, 산소농도의 감소 등의 문제가 발생하게 되고 화재사고 시 승객의 생명을 심각하게 위협하는 결과를 초래한다. 일반적인 도로 터널의 경우에는 길이가 짧아 교통 환기력 및 자연 환기력에 의해서 환기가 충분히 될 수 있지만 철도 터널의 특성상 수 킬로미터에서 십여 킬로미터에 달하는 장대터널이 대다수이기 때문에 자연 및 교통 환기력 만으로는 원활한 기류의

소통을 기대하기 어렵다. 때문에 터널 화재 시 대량 인명피해를 막기 위해서는 터널내의 효과적인 제연설비가 필수적이며, 특히 15km 이상의 초 장대 터널에서는 열차에 의한 터널 탈출이 불가능하기 때문에 구난역 설치와 엄격한 제연 설비 확충이 필수적으로 요구된다. 이러한 필요성에 따라 여러 선진국들은 터널 내에서의 화재 발생 문제에 대해 중요성을 인식하여 많은 연구를 수행해 왔으며, 현재 활발히 진행 중이다. Casale[1] 등은 몽블랑 터널에서의 자동 환기 설비의 full scale 테스트를 수행하였고, Vauquelin[2] 등은 1:20의 축소 모형실험을 통해 연기가 환기구로 적절하게 빨려 들어가는 최소한의 환기 풍속을 고려해 confinement velocity라는 개념을 소개하였다. Hu[3] 등은 Fire Dynamics Simulator(FDS)라는 독자적인 CFD툴을 이용한 시뮬레이션을 통하여 각각의 종횡비를 갖는 터널 화재 상황 시 천정에서의 최대온도를 산출해 내었으며 적절한 환기 풍속을 예측하였다.

국내에서도 터널내의 제연 설비의 성능을 위한 다양한 실험적 연구는 지속되어 왔다. 하지만, 터널화재 연구에 있어서 실제 터널에서의 화재실험은 매우 큰 규모와 비용이 필요하므로 수행하는데 어려움이 있다. 때문에 적은 비용으로 터널 내의 화재 및 연기 거동 현상을 연구하기 위하여 축소 실험 및 (CFD) 시뮬레이션을 통한 해석이 많이 이용되고 있는 실정이다[4]. 본 연구에서는 현재 건설 예정인 대관령 제 1관제 터널 내에서 화재 열차의 구난역 비상정차를 가정하였으며, 시간에 따른 구난역내 본선터널 및 대피 횡갱내의 유동과 열·오염물질의 확산 정도를 검토함으로써 적절한 환기 설비에 대한 기본 설계 자료를 마련하였다.

* 서강대학교 대학원, sershia@paran.com

** 서강대학교 산업기술연구소, ace@sogang.ac.kr

*** 서강대학교 기계공학과, nhur@sogang.ac.kr

**** 대상설비기술(주) enggroup@chollian.net

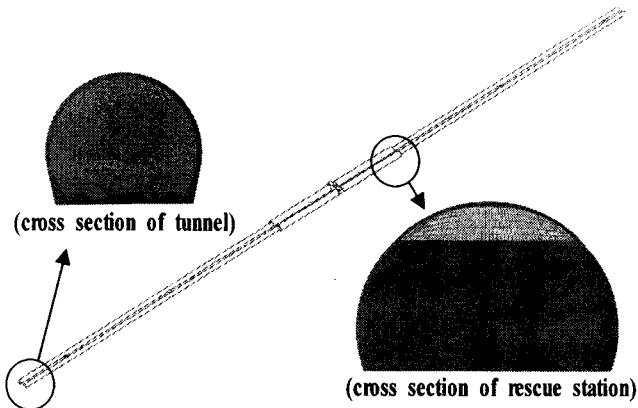


Fig. 1 Cross sectional mesh of tunnel and rescue station and scheme of whole tunnel feature

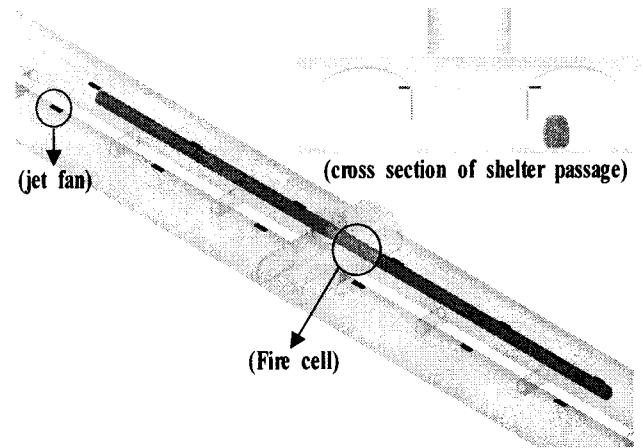


Fig. 2 Feature of whole rescue station and cross section of shelter passage

2. 수치해석

본 연구는 터널 내 진입한 열차가 화재가 발생하고 승객 대피를 위해 열차가 구난역에 비상 정차한 상황에서 화재로 인한 매연 및 열의 시간에 따른 거동을 주관심사로 한다. 이때 터널 내부에 축적된 매연과 고온의 열이 승객이 대피하게 되는 반대 쪽 비화재 터널방향으로의 침투를 방지하는 것이 제연 시스템의 목적이며, 이러한 목적 하에 수치해석을 수행함에 있어서 첫째로 구난역의 제연팬 가동 유무에 따른 열·오염물질의 확산 양상을 비교하였고, 둘째로 중앙 대피통로에 설치되어 있는 제연커튼의 오염물질 침투 억제 효과에 대해서 검토하였다.

2.1 해석 모델

본 연구의 해석모델은 Fig. 1과 같이 총 길이가 2km의 양방향 터널에 대하여 수치해석이 수행되었다. 각 터널은 각각 폭 9.60m 높이 7.04m의 단면형태이며 터널내 350m 간격마다 비상 대피용 횡갱이 있다. 터널의 중앙에 400m 길이의 구난역이 설치되어 있으며, 구난역 중심부 대피 횡갱을 중심으로 40m 간격으로 4개씩 총 9개의 대피 횡갱이 자리 잡고 있다. Fig. 2는 구난역의 모습과 화재난 열차가 구난역 중앙부에 정차한 상황을 나타낸다. 열차 중앙부위의 핑크색 차량은 화재가 발생한 화재격자를 나타내며, 터널 상단부에는 환기팬을 확인할 수 있다. 열차의 길이는 총 200m이며, 해석영역으로는 양방향의 본선터널과 구난역 내부의 유동영역을 고려하였다. 총 해석격자는 3,640,000개로 구난역을 포함한 터널 및 열차의 솔리드 부분이 640,000개이며, 터널 내부의 유체격자는 3,000,000개이다.

수치해석을 수행함에 있어서 상용 프로그램인 STAR-CD V3.24을 사용하였으며, 본 연구실에서 보유하고 있는 Intel Xeon 2.4GHz 8CPU Linux cluster를 사용하여 하나의 해석에 약 6일의 계산시간이 소요되었다.

2.2 수치 해석 방법

터널 내 유동의 지배 방정식으로는 3차원 압축성 시간 평균 Navier-Stokes 방정식이며, 표준 $k-\epsilon$ high Reynolds 모델을 사용하여 난류 유동을 고려하였고, 또한 SIMPLE Algorithm을 사용하여 비압축성 유동 해석을 수행하였다. 유동장의 대류항과 확산항의 처리는 MARS scheme을 적용하였으며, 시간 차분법은 완전 암시기법(fully implicit method)을 사용하였다. 터널 내부 구난역 상부와 횡갱에 각각 설치된 제연팬의 운전은 해당격자에 momentum source를 적용해 각각의 팬 용량에 해당하는 풍량을

반영하였으며, 열차는 중앙 부분에 화재 격자를 마련해 시간에 따른 Enthalpy 증가를 선형적으로 적용하였다.

2.3 제연 해석 조건

본 연구에서는 구난역내 화재가 발생한 열차가 정차했을 때를 기점으로 해석이 시작된다. 총 400m길이의 구난역 중앙 부분에서 화재 발달이 시작되며, 화재 강도는 Fig. 3에서 나타낸 바와 같이 시간에 따른 일차곡선으로 증가하여 화재 발생 후 10분 후에 5MW로 최대 발달한다. 그 이후에는 6분동안 5MW로 일정하게 유지되어 해석시간은 총 16분이 된다. 화재가 발생한 부분은 열차의 중앙차량으로 가정하였으며, 열차 한량의 체적 $198m^3$ 이 전소하는 것으로 고려되었다.

화재가 발달함에 따라서 해당하는 시간당 열량은 Enthalpy와 Source term으로 처리하여 화재격자에 체적 분으로 각각 적용되었다. 화재가 발달함에 따라서 터널 내 온도는 높아지게 되며 화재격자에서 배출되는 매연의 농도를 무차원화된 1로 가정하여 Scalar term에 적용했고, 확산이 일어남에 따라 1에 대한 상대값으로 터널 내 매연농도를 나타내었다. 본 연구에서는 총 3가지 해석이 실행되었는데, 첫째로는 모든 제연팬 가동을 하지 않은 조건에서의 화재 시 유동과 열·매연의 확산을 검토해 보았고, 두 번째로는 동일한 화재 발달 조건에서 구난역 6.7m상부와 대피 횡갱 2.4m상부에 설치되어 있는 제연팬 가동 시 유동과 열·매연의 확산을 검토해 보았다. 세 번째로는 위와 동일한 제연팬 가동 하에서 구난역 중앙 대피갱에 제연 커튼을 설치하여 오염물질의 화재 반대 터널로의 유입을 억제하는 기능으로서의 제연 커튼의 효과를 검증해보았다.

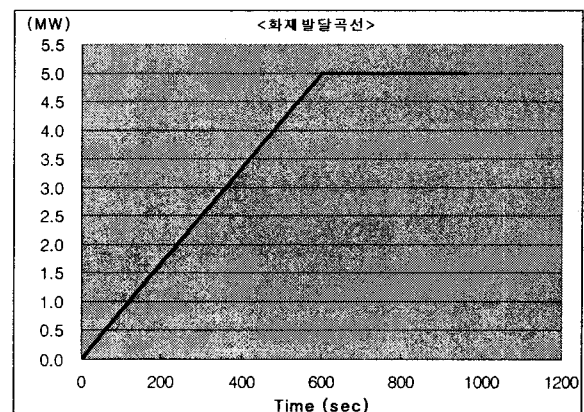


Fig. 3 Graph of transient fire growth

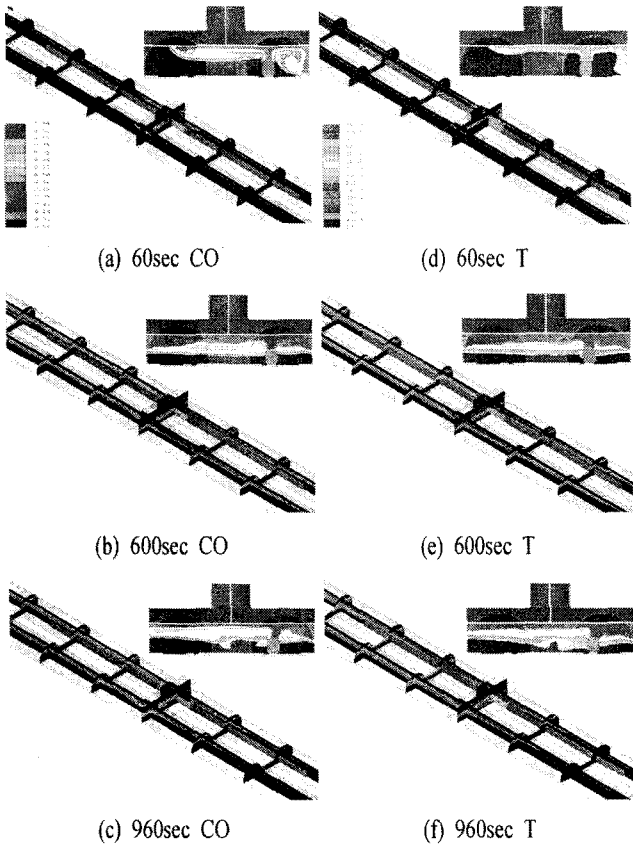


Fig. 4 Smoke concentration distribution and temperature distribution inside the rescue station without jet-fan operating

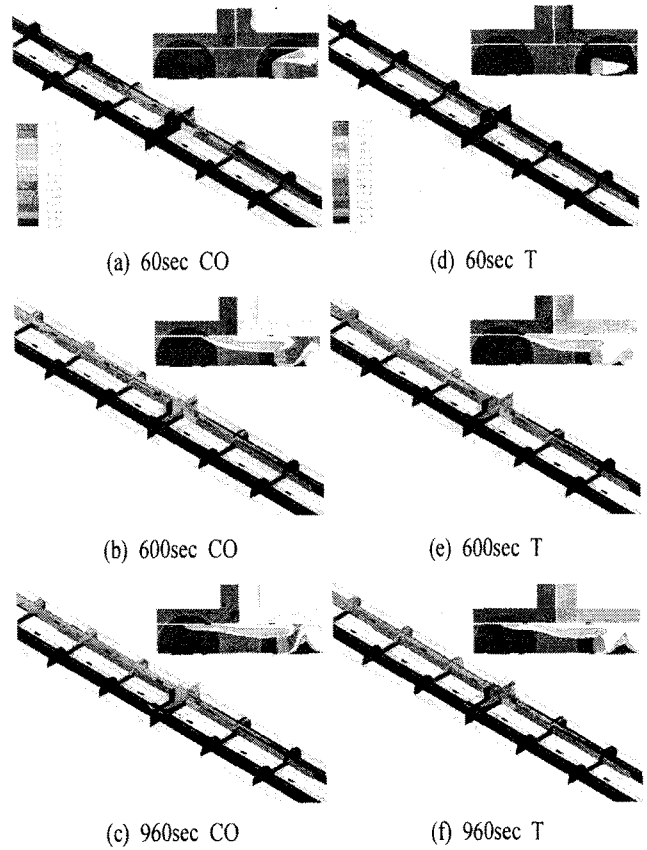


Fig. 5 Smoke concentration distribution and temperature distribution inside the rescue station under jet-fan operating condition

3. 수치 해석 결과

3.1 제연팬 미가동시 유동과 열·오염물질 확산

구난역 중앙에 화재가 발달하기 시작 10분에 5MW의 최대 화재강도에 이르고 그 후 6분 동안 5MW의 일정한 화재강도를 적용하여 열·오염물질에 대한 3차원 비정상 유동 해석을 수행하였다. 제연팬을 가동하지 않은 상황에서 터널 내부에 화재가 발생하는 경우에 터널 내 열·오염물질의 확산 양상이 Fig. 4에 나타나 있다. 화재가 발달함에 따라 횡관을 따라서 반대편 비화재 터널에까지 넓게 걸쳐서 오염물질이 침투하고 열로 인한 온도 상승이 있음을 알 수 있다. 이는 열차 화재 발생 시 화재터널 반대편으로 대피하여 맞은편에서 오는 열차를 이용하여 위험지역을 탈출하도록 고안된 구난역의 설계목적상 제연설비가 보안되어야 함을 확인할 수 있다. 10분 이후에 구난역의 중앙 부분에서 유동이 터널 좌측으로 길게 발달함을 관찰 할 수 있는데, 그것은 터널이 20.4% 경사져 있어 좌측 방향으로 부력의 영향을 받는데서 기인하는 것이다.

3.2 제연팬 가동시 유동과 열·오염물질 확산

위와 동일한 화재발달 조건에서 제연팬을 가동시켜 열·오염물질의 확산을 검토하였다. 구난역 6.7m상부에는 양쪽 터널에 40m 간격으로 20개의 35.3CMS 용량의 제연팬이 설치되어 있으며 중앙 대피 횡관을 포함한 총 9개의 대피 횡관에는 11.52CMS 용량의 제연팬이 설치되어 있다. 화재 터널 제연팬은 배기를 하고 비화재 터널 쪽에서는 배연을 적용했으며, 대피 횡관에서는 화재터널 쪽으로 가압시킴으로써 제연 해석을 수행하였다. 그 결과를 Fig. 5에 나타내었는데, Fig. 5(a)에서 알 수 있듯이 화재 발달 초기에는 대피 횡관에 설치된 제연팬의 가압으로 인하여

오염물질이 화재 터널 쪽에서 정체되어 있는 바람직함 거동을 보여준다. 하지만 Fig. 5(b)에서는 화재 터널 쪽의 제연팬을 통해서 오염물질이 배기되고 구난역 상부에 설치되어 있는 수직관을 통하여 밖으로 배출되는 등 제연 거동이 의도한 방향으로 이루어졌음에도 불구하고 화재가 최대화재 강도 5MW로 발달함에 따라서 중앙 대피관 천정을 통해 비화재 터널 쪽으로 오염물질이 소량 침투하는 것을 확인 할 수 있으며, Fig. 5(c)를 통해 알 수 있듯이 화재 강도가 더 이상 발달하지 않아도, 부력의 효과로 인하여 대피 터널 방향으로 계속적인 오염물질 침투가 지속됨을 알 수 있다.

3.3 제연커튼 설치·제연팬 가동시 유동과 열·오염물질 확산

앞서 해석했던 동일한 화재발달 조건과 제연팬 가동 조건하에서 제연 커튼을 설치하였고 해석을 수행하였다. 제연 커튼은 배기와 배연 팬 바로 옆에서 중앙 대피 횡관을 사이로 양쪽 터널에 대칭으로 설치되어 있으며, 커튼의 크기를 구난역 제연팬 위치에서 지상 3.3m위치까지 고려하였고 솔리드 격차처리 하여 해석에 반영하였다. 그 결과는 Fig. 6에 나타나 있는데, Fig. 6(b), (c)을 통해서 알 수 있듯이 설치된 제연 커튼의 영향으로 더 이상 오염물질이 대피 터널 쪽으로 침투하지 않음을 살펴 볼 수 있으며, 최대 화재 발달 후 6분간 오염물질의 거동은 거의 같은 양상을 보여 화재 제연이 안정적으로 적절하게 운용되고 있음을 알 수 있다. Fig. 7에서 나타난 결과물은 위와 같은 해석 조건에서의 해석 결과인데, 승객들의 호흡높이를 고려하여 바닥에서 2.1m 높이의 오염물질의 확산과 온도 분포를 터널 위에서 내려다 보는 시점으로 나타낸 것이다. 화재가 최대강도 5MW로 발달하고 지속 되는 동안 화재 터널에서 반대 방향의 대피 터널로 유입되는 오염물질이 전혀 나타나지 않음을 쉽게 확인 할 수 있다.

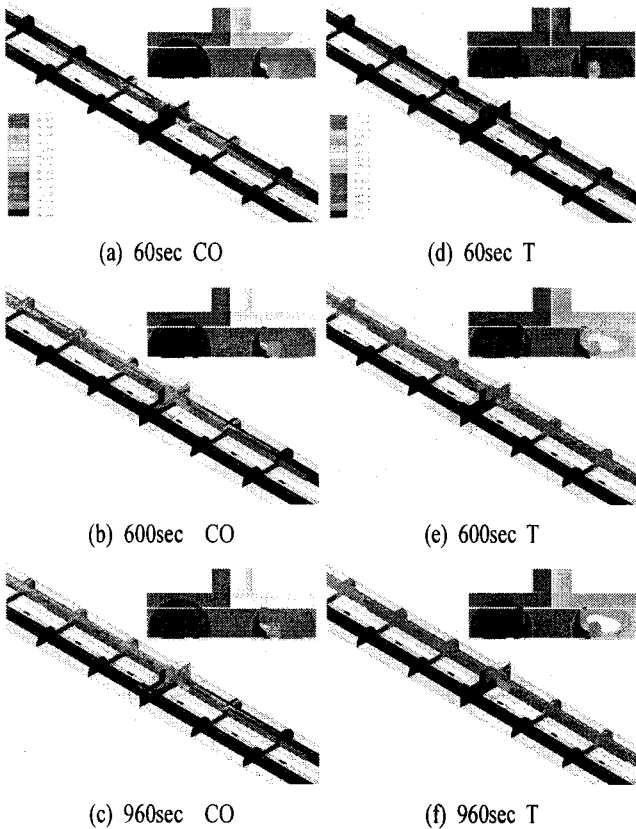


Fig. 6 Smoke concentration distribution and temperature distribution inside the rescue station with smoke management curtain under jet-fan operating condition

4. 결 론

본 연구에서는 건설 예정인 대관령 제1관제 터널을 대상으로 화재 시 구난역을 주 관심 영역으로 제연 거동에 대한 수치해석을 수행하여 제연 팬의 가동과 제연 커튼이 미치는 효과에 대해서 검토하였으며, 아울러 이에 대한 다양한 가시화를 통해 효과적으로 그 결과를 확인하였다. 열차 터널은 도로 터널에 비해 길이가 길기 때문에 자연 환기력 만으로는 효과적인 환기 효과를 기대하기 어려운 것이 사실이다. 때문에 터널 화재를 대비하여 내부에 적절한 제연 설비를 구축하는 것이 필요한데, 본 연구를 통하여 화재 터널 쪽에서 적절한 배기로 오염물질을 외부로 방출시키고 비화재 터널 쪽에서의 배연과 신선한 외부 공기를 가압하는 방식의 제연 팬 운용이 터널내 제연에 효과가 있음을 검토하였고, 더불어 오염물질이 대피 횡행으로의 침투를 적극적으로 방지하기 위해 제연 커튼의 설치가 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

후 기

본 연구는 (주)대상설비기술의 지원으로 수행되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

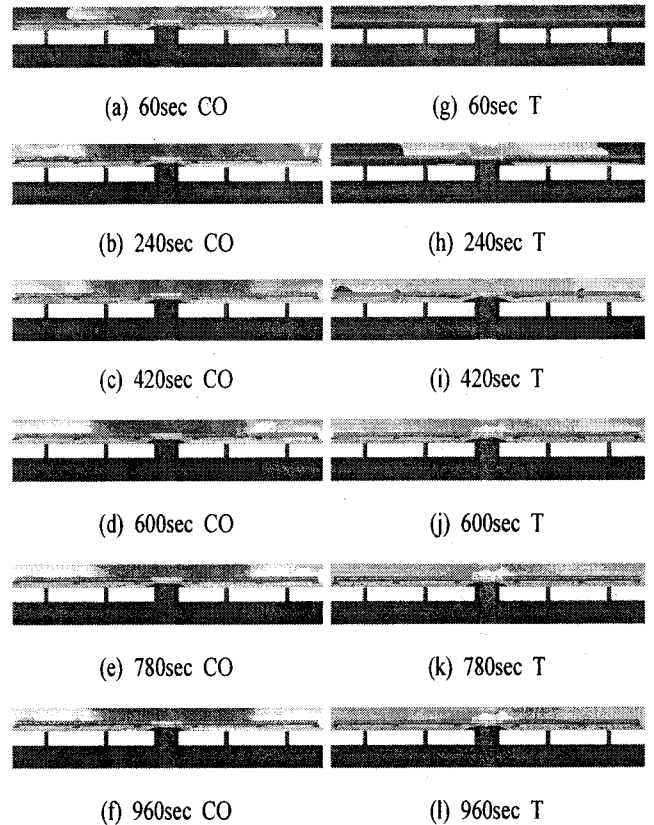


Fig. 7 Smoke concentration distribution and temperature distribution inside the rescue station with smoke management curtain under jet-fan operating condition on view of 2.1m height

참고문헌

- [1] Casale, E., Houseaux, B., Weatherhill, A., Guigas, X. and Marlier, E., 2002, "Full scale fire tests performed in the Mont-Blanc tunnel-Evaluation of the efficiency of the fully automatic ventilation responses," Fourth international conference on tunnel fires, TMI, Basel.
- [2] Vauquelin, O. and Telle, D., 2005, "Definition and experimental evaluation of the smoke "confinement velocity" in tunnel fires," Fire safety Journal, Vol.40, pp.320-330.
- [3] Hu, L.H., Huo, R., Peng, W., Chow, W.K. and Yang, R.X., 2005, "On the maximum smoke temperature under the ceiling in tunnel fires," Tunnelling and Underground Space Technology.
- [4] 김동현, 박원희, 2006, "초장대터널 구난역의 화재안전에 대한 축소모형 실험," 한국철도기술, 57호, pp.21-29.
- [5] 박중택, 원찬식, 허남건, 차철현, 2005, "도로터널 환기/제연 시스템 시뮬레이션," 한국전산유체공학회 추계학술대회 논문집, pp.207-212.
- [6] 유지오, 2005, "도로터널 제연설비 설계기준 동향," 설비저널, 제34권, 제3호, pp.27-35.