

# 철도터널 화재 시 구난역 내의 연기거동에 대한 수치해석 연구

## Numerical Investigation of Smoke Behavior in Rescue Station for Tunnel Fire

홍사훈\* · 노경철\* · 유홍선\*\* · 이성혁†

Sa-Hoon Hong · Kyung-Chul Ro · Hong-Sun Ryou · Seong-Hyuk Lee

**Abstract** The present study deals with numerical investigation for smoke behavior in rescue station by using the commercial CFD code (FLUENT Ver 6.3). With the use of the MVHS(Modify Volumetric Heat Source) model modified from the original VHS(Volumetric Heat Source) model, a 10 MW mode was adopted for simulation and the MVHS model can describe the generation of product and the oxygen consumption at the stoichiometric state. In addition, the present simulation includes the species conservation equations for the materialization of heat source and the estimation of smoke movement. From the results, the smoke flows are moving along the ceiling because of thermal buoyancy force and as time goes, the smoke gradually moves downward at the vicinity of the entrance. Moreover, without using ventilation, it is found that the smoke flows no longer spread across the cross-passages because the pressure in the non-accident tunnel is higher than that in the accident tunnel.

**Keywords** : Tunnel Fire, Rescue Station, MVHS(Modified Volumetric Heat Source) Model, CFD(Computational Fluid Dynamics)

**요 지** 본 연구에서는 철도 화재 시 구난역에서의 화재 연기의 거동을 파악하기 위하여 상용코드를 사용하여 수치 해석 하였다. 화원의 모사와 화재로 인한 생성물의 거동을 예측하기 위해 stoichiometric 상태에서 연료 소모량에 따른 연소생성물의 생성률과 산소 소모율을 VHS 모델에 적용하고 종의 보존 방정식을 해석하는 MVHS 모델을 이용하였다. 해석결과 화재 연기는 온도에 따른 밀도 차에 의해 터널의 천장을 따라 이동 하였으며 열원으로부터 멀어지면서 하강 하는 형태를 확인 할 수 있었다. 또한 터널 내 공기는 화원으로 집중되었으며 비사고 터널과 사고 터널의 압력 차에 의해 화재연기는 별다른 환기 시스템 없이도 비사고 터널로 유입되지 않았다.

**주 요 어** : 터널화재, 구난역, MVHS 모델, 전산유체역학

## 1. 서 론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

최근 철도의 고속화와 산악지형이 많은 국내의 지형적인 특성에 따라 15km 이상의 초장대 철도 터널 건설의 수요가 날로 증가되고 있는 추세에 있다. 이러한 장대터널의 설치에 지역간의 교통 문제 해소 및 획기적인 수송시간 감축 측면에서 효율적이거나 화재 등과 같은 파국적인

상황 발생 시 수많은 인명 피해를 줄 수 있는 대형 참사로 연결 될 수 있는 위험성을 가지고 있다. 실제로 1999년 몽블랑 터널 화재 (사망:39명), 타우에른 터널 화재 (사망:12명), 2000년 오스트리아 산악 터널 화재 (사망:150명), 2001년 고타르 터널 화재 (사망:11명) 등[1]에서 알 수 있듯이, 터널 화재가 발생할 경우 터널 내부의 고립된 공간적 특성으로 인해 화재로부터 발생 되는 열 및 연소 생성물은 승객의 대피에 있어 심각한문제를 야기 시키며 대형 참사로 이어지게 함을 알 수 있다. 따라서 터널 내의 화재 발생 시 인명 및 재산 피해를 최소화 할 수 있는 철도 터널 방재 기술에 대한 적극적인 연구가 점차 중요시 되고 있다.

터널 화재에 대한 수치해석 및 축소 모델을 이용한 연

\* 책임저자 : 중앙대학교 기계공학부, 부교수  
E-mail : shlee89@cau.ac.kr  
TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

† 정회원, 중앙대학교 기계공학부

\*\* 정회원, 중앙대학교 기계공학부 정교수

구는 국내·외로 활발히 진행 중에 있다. 국내에서는 이성룡 등[2]은 축소 실험을 통하여 터널 내 화재 발생 시 연기의 거동과 온도 분포 등을 측정하였고, 양성진 등[3]은 사갱에 대하여 화재연기의 제연 거동을 수치해석 기법을 사용하여 연구하였다. 또한 McGrattan과 Hamins[4]는 2001년 미국 Howard Street Tunnel에서 실제 발생했던 터널 화재에 대해 FDS를 이용하여 연기 거동 및 온도 분포 등을 해석함으로써 터널 화재에 대한 자료로 활용하도록 하였다.

본 연구의 목적은 철도 터널 화재 발생 시 인명 피해와 직접 연관이 될 수 있는 구난역에 대하여 상용 수치해석 프로그램을 이용하여 터널 화재 시 연소 생성물의 거동 및 분포, 터널 내의 압력 등을 분석하여 그에 따른 제연 조건 설정 및 승객의 대피 방향을 설정 하고 보다 안전한 구난역 설계에 반영 하도록 하는 데 있다.

## 2. 수치해석

### 2.1 해석 모델

본 연구에 적용된 철도 터널은 단선 병렬 터널로 구난역 전체의 길이가 약 280m, 터널 간 거리는 33m, 각 터널의 폭은 약 9.5m이고, 배기구기는 50m 간격으로 총 8개가 설치되어 있다. 대피를 위한 교행로는 40m 간격으로 총 6개가 설치되어있으며, 교행로의 중간에는 2m x 2m 크기의 방화문이 설치되어 있으며 구난역의 외부 환기구에는 화재 발생 시 급기와 배기를 위한 4개의 팬이 설치되어 있다. 또한 화재가 발생하는 경우 연기의 거동은 열차에 의해 방해받게 되고 이를 고려하기 위해 터널 내부에 열차의 형상을 포함시켰으며 열차의 형상은 길이 200m, 폭 3.8m, 높이 4.5m로 표현하였다. 시뮬레이션을 위한 형상은 Pro-engineer Wildfire 2.0을 이용하여 3차원으로 실제와 가깝게 구현하였다. 격자는 ICEMCFD Ver.10.0을 이용하여 구성하였으며 3차원 hexahedral과 tetrahedral이 혼용 되

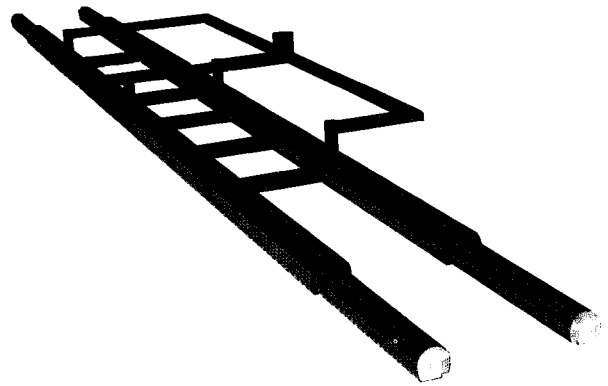


Fig. 2. Computational mesh of rescue station

어 있는 하이브리드 격자로 구성 되었다. 격자는 약 100만 개의 셀로 구성되었다.

### 2.2 지배 방정식 및 해석 조건

본 시뮬레이션은 연속 방정식과 운동량 방정식, 에너지 방정식, 종의 보존 방정식(species conservation equation)에 대해서 수치해석하였다. 각 방정식에 대한 식은 아래와 같다[5].

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\vec{\tau}) + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2)$$

$$\frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \vec{J}_j + (\vec{\tau}_{eff} \cdot \vec{v})) + S_h \quad (3)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho Y_i) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} Y_i) = -\nabla \cdot \vec{J}_i + R_i + S_i \quad (4)$$

난류 유동장 해석에 사용된 난류 모델은 양성진 등의 사갱 화재 연구[3]와 김성찬 등의 실내 화재 연구[7]에서 화재 연기 거동해석을 위해 사용된 부력 생성항이 포함된

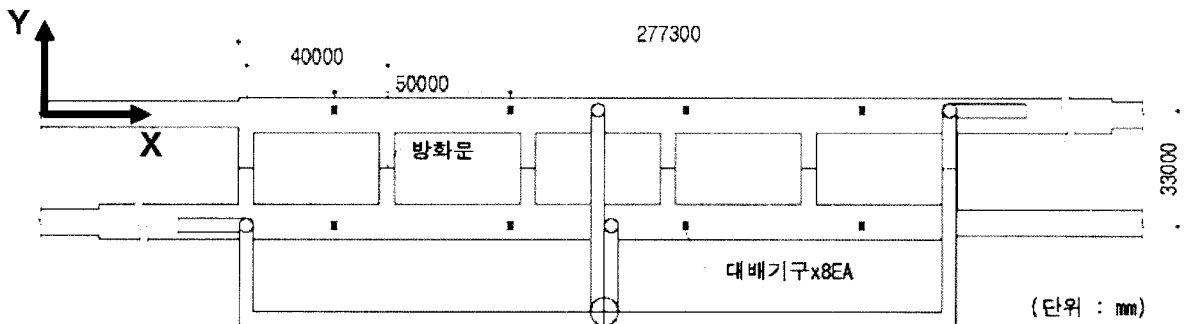


Fig. 1. The schematic of rescue station in railway tunnel

수정 k-ε 모델을 적용하였으며, 속도와 압력의 연결은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 밀도변화는 비압축성 이상기체의 상태 방정식에 의해 계산되었다. 해석은 범용 수치해석 코드인 Fluent Ver. 6.3을 이용하여 해석을 수행하였다.

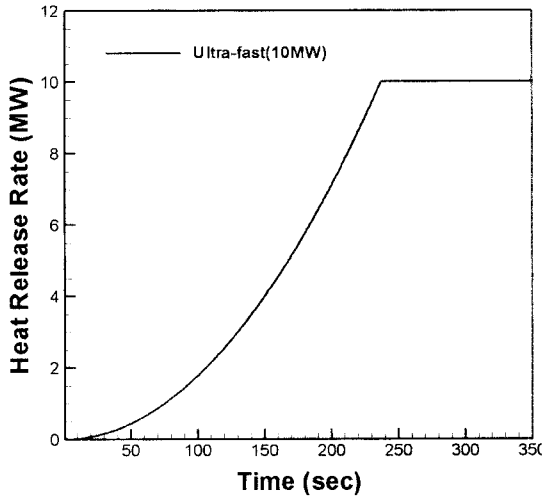


Fig. 3. Heat release rate with respect to time (ultra-fast mode)

본 연구는 비정상 상태에서 1초 간격으로 화재 발생 이후 약 300초 동안의 화재 현상을 시뮬레이션 하였으며 본 연구를 위하여 2.0GHz, 16 GB RAM 사양의 컴퓨터(Intel Xeon CPU Quad Core Processor)를 병렬 처리하여 약 24시간의 처리 시간이 소요되었다. 화재의 크기는 객차 1량이라는 것을 기준으로 하여 길이 20m, 단면적 20.6m<sup>2</sup>의 크기를 가지며 화재의 최대 화재 강도는 Eureka 499 fire test에서 German intercity passenger railway car에 대한 실험에서 구해진 화재 강도를 설계화재 강도로 적용하여 10 MW로 적용하였으며[6] 화재의 시나리오는 ultra-fast mode로 가정하여 시간에 따른 발열량은 다음 식에 의해서 얻어진다[8].

$$Q = \alpha \times t^2 \quad (\text{where } \alpha = 177.78 \text{ W/s}^2) \quad (5)$$

최대 발열량인 10MW는 화재 진행 후 약 237초 후에 발생하며 그 후 발열량은 10MW로 일정하게 열이 발생하는 것으로 구성하였다. 구난역의 입구와 출구는 대기압으로 처리하였으며 화재 발생 시 팬이 작동하지 못한 최악의 상황을 해석하기 위하여 팬이 위치한 외부 환기구 또한 대기압으로 처리하였다. 터널 내부의 벽은 콘크리트로 구성된 것으로 가정하여 단열 처리하였다. 화원의 위치는 Fig. 4와 같다.

### 2.3 화원 모델

본 연구에서는 화재영역으로 가정된 체적에 대하여 열원을 제공하고 화재 공간 내부의 열전달을 해석함으로써 화재 특성을 파악하였다. 또한 화재 발생으로 인한 연소 생성물의 거동을 동시에 예측하기 위하여 stoichiometric 상태에서 연료 소모량에 따른 연소 생성물의 생성률과 산소 소모율을 물질 생성 및 소멸항으로 체적 열원 모델에 적용하고 종의 보존 방정식을 해석하는 수정된 체적 열원 모델(MVHS 모델)을 사용하였다[7]. 본 연구에서는 위 모델을 적용하기 위하여 화재에서 발생하는 연소를 완전 연소로 가정하고 연료를 메탄(CH<sub>4</sub>)으로 가정하였다. 이에 따른 연소 반응식, 단위 체적 당 최대발열량, 연료 소모량에 따른 연소 생성물의 생성률, 산소 소모율은 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Important parameters for simulation

연소 화학 반응식	$CH_4 + 2CO \rightarrow CO_2 + 2H_2O$
단위 체적 당 최대 발열량	$\dot{q} = 24213 (W/m^3)$
메탄의 연소열	50000 (KJ/Kg)
연소 소모량	$\dot{m}_F = 0.48 (g/m^3 \cdot s)$
산소 소모율	$\dot{m}_{O_2} = 1.92 (g/m^3 \cdot s)$
연소 생성물의 생성률	$\dot{m}_{CO_2} = 1.32 (g/m^3 \cdot s)$ $\dot{m}_{H_2O} = 1.08 (g/m^3 \cdot s)$

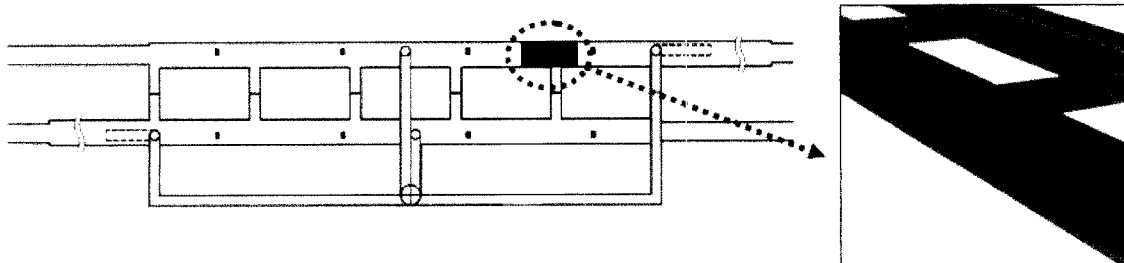


Fig. 4. The fire source position

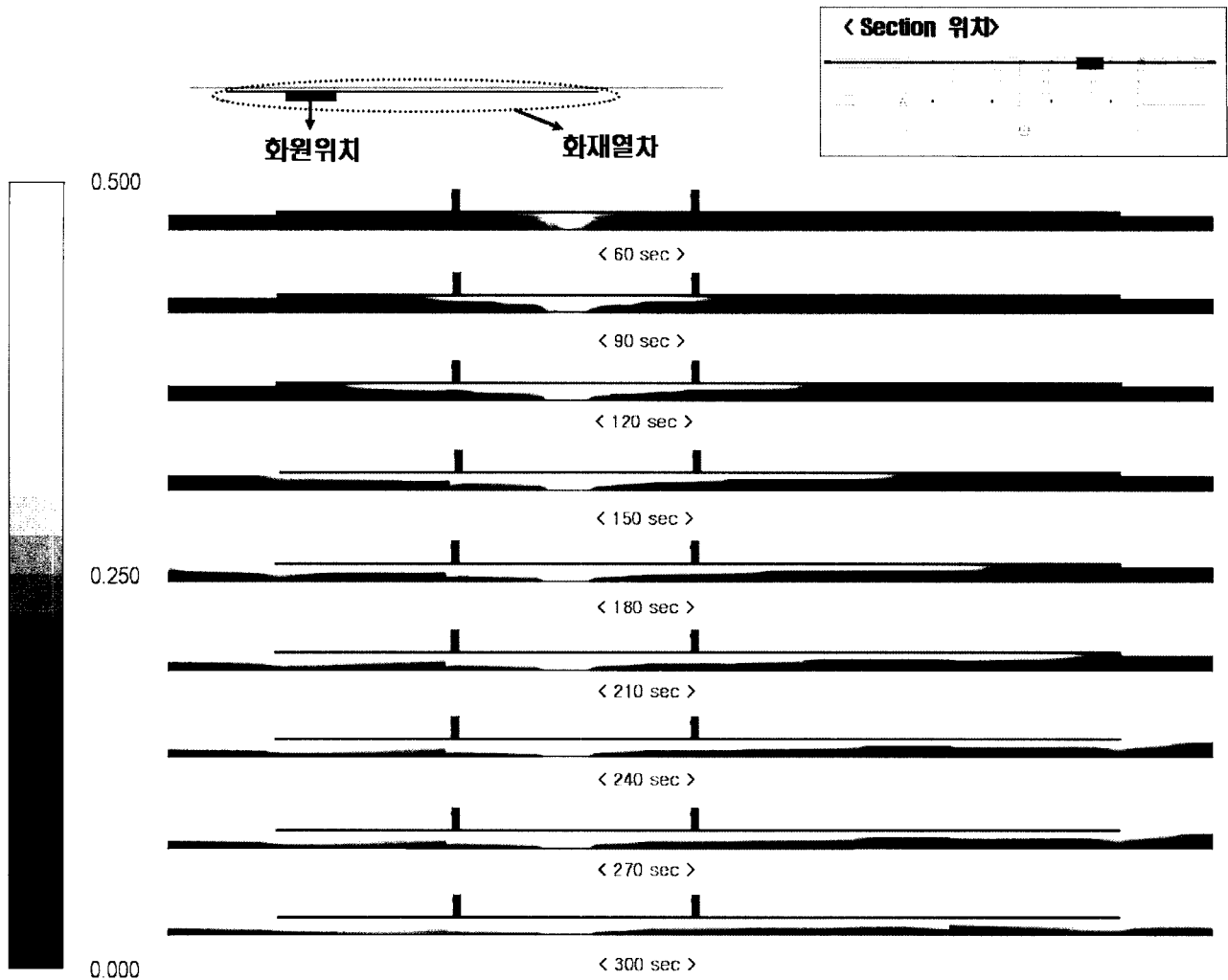


Fig. 5. The temporal behavior of smoke propagation with respect to time in fire tunnel

### 3. 결과 및 분석

Fig. 5는 30초 간격으로 사고 터널 내의 연소 생성물의 분포를 보여주는 그림이다. 본 연구에서 화원 모델로 적용한 MVHS 모델의 경우 화재 시 발생하는 연소현상을 완전 연소로 가정하게 되고 이 때 발생하는 연소 생성물은 CO<sub>2</sub>와 H<sub>2</sub>O로 국한한다. 본 연구에서는 CO<sub>2</sub>의 분포를 통해 화재 시 발생하는 연소 생성물의 거동을 예측하였다.

화재 위치에서 발생한 연소 생성물은 열원에 의해 온도가 상승하게 되고 이로 인한 공기의 밀도 차에 의해 터널의 상부로 상승하게 된다. 연소 생성물은 열부력 및 열차의 유동 방해로 인해 천장을 따라 주변으로 퍼져 나가는 기류를 형성하게 되고 열원으로부터 멀어지면서 연소 생성물의 온도는 서서히 떨어지고 이에 따라 연소 생성물은 하강 하게 된다. 화재 연기는 화재 발생 후 약 210초 후 화재 터널을 가득 채우게 되고 240초부터 터널의 입, 출구 근처에서 하

강하는 연소 생성물의 형태를 볼 수 있다.

Fig. 6은 300초 경과 후 사람이 숨 쉬는 높이와 같은 약 1.1m 높이 및 각 교행로에서의 연소 생성물의 분포를 보여주는 그림이다. 연소 생성물의 경우 방화벽을 기준으로 사고 터널 내에서만 넓게 존재하며 방화벽을 기준으로 비사고 터널로는 전파 되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한 이때의 교행로 내의 연소 생성물 분포를 보면 대부분의 연소 생성물은 높은 온도로 인해 터널의 상부에 존재하고 있음을 확인할 수 있다. 화재 위치와 비교적 가까운 위치에 있는 x축 기준 -40m와 0m의 교행로의 경우 시간이 지남에 따라 지속적으로 공급되는 연소 생성물에 의해 벽면을 타고 방화문 근처까지 밀려 내려오는 현상을 볼 수 있으나 방화문으로부터 공급되는 외부 공기에 의해 비사고 터널로 연소 생성물이 넘어 가지 못함을 확인할 수 있다. 방화벽을 기준으로 비사고 터널로 화재 연기가 넘어가지는 않지만 화재 위치와 가까운 사고터널 쪽의 교행로에는 사람이 숨 쉬는 높이

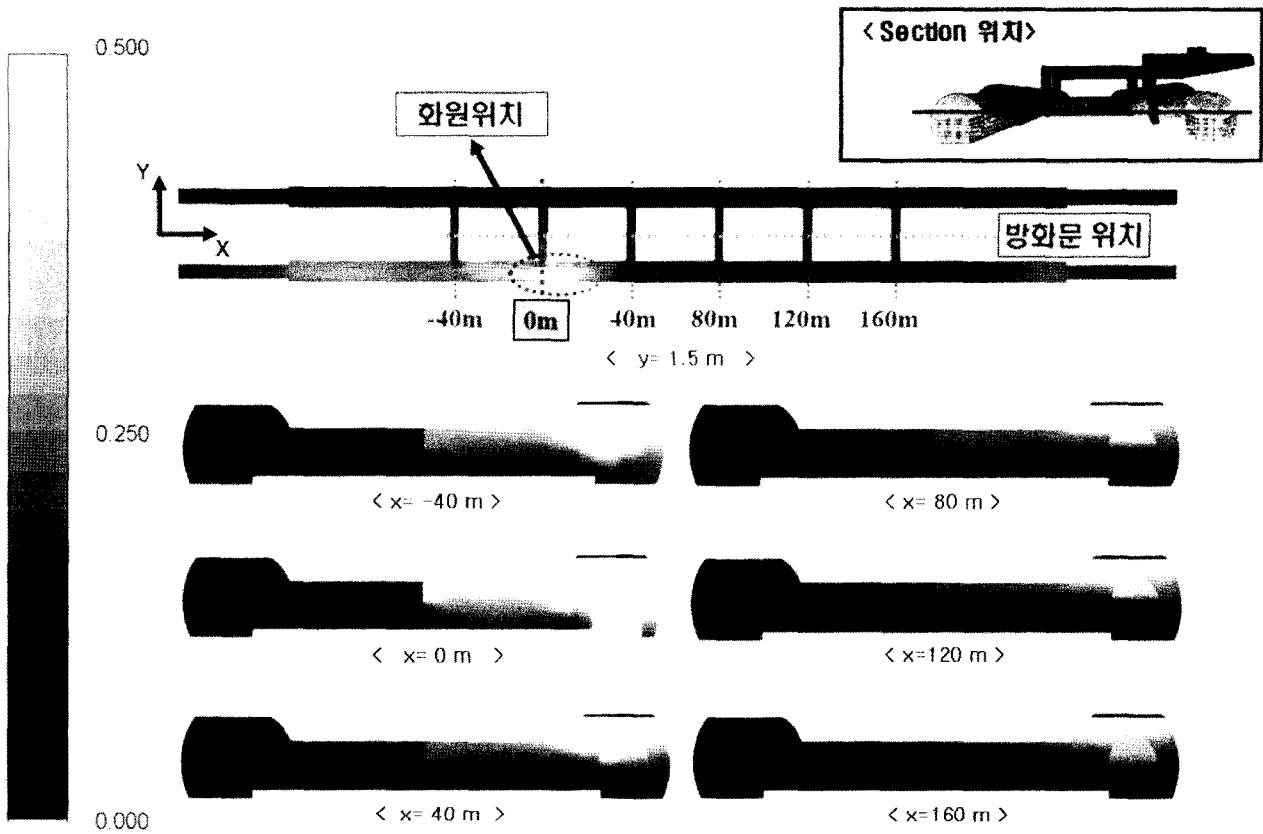


Fig. 6. The CO<sub>2</sub> distributions at several cross-passages after 300 sec

까지 화재 연기가 분포하고 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 승객 대피 시 문제를 야기시킬 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 7은 화재위치와 가장 가까운 교행로(x=0m)에서의 속도벡터를 보여 주는 그림이다. 공기의 유동은 비사고 터널의 배기구로부터 외부의 공기가 유입하여 비사고 터널에서 사고 터널로 방화문을 통해 지속적으로 유입되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이 때 공기의 유입속도는 약 1.5m/s이다. 연소 생성물은 터널의 천장 및 교행로의 상부를 따라 이동하다가 방화벽에 의해 이동이 차단되게 되고 차단된 공기는 하부로 내려오게 되지만 방화문 근처에서 화재방향으로 유입되는 공기들에 의해 다시 사고 터널로 빨려 들어가고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 화재위치와 가장 가까운 교행로(x=0m)에서의

압력 분포를 보여 주는 그림이다. 사고 터널의 경우 공기의 상승으로 인해 터널의 상부에서 높은 압력을 보이고 있으며 화원 근처에서 낮은 압력 분포를 나타내고 있다. Fig. 9는 약 1.5m 높이에서 사고 터널과 가장 가까운 A지점을 기준으로 화재 위치에서 가장 근접한 교행로(x=0m)와 가장 먼 교행로(x=160m) 내의 압력 차이를 그래프로 보여 주는 그림이다.

방화문을 기준으로 비사고 터널의 압력이 더 높음을 볼 수 있으며 A지점과 E지점의 압력 차이는 가장 가까운 교행로의 경우 약 3.5Pa, 가장 먼 교행로의 경우 약 0.8Pa의 압력 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 압력 차이로 인해 사고 터널의 연소 생성물은 비사고 터널로 전파되지 않는 것으로 사료 된다.

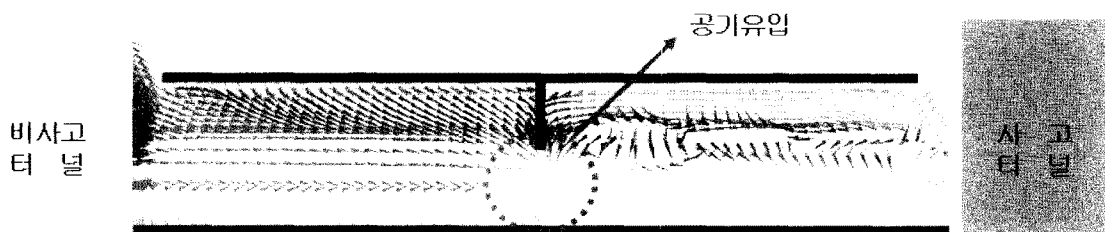


Fig. 7. The velocity vectors in cross-passage (x=0 m)

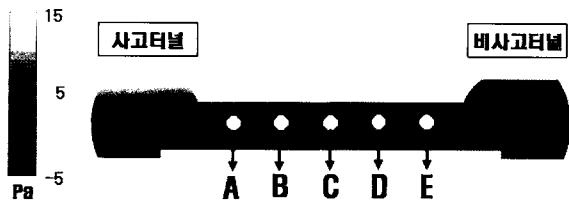


Fig. 8. The distribution of pressure at cross-passage (0m)

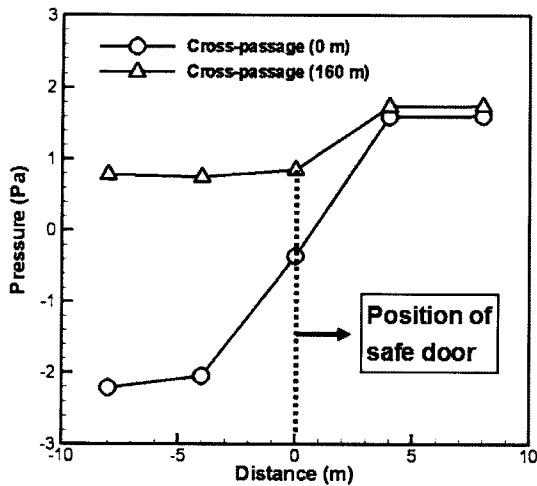


Fig. 9. The difference of pressure at cross-passage

#### 4. 결론

본 연구는 수정된 체적 열원 모델을 적용하여 상용 수치 해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 구난역 화재 시에 발생하는 화재 현상을 시뮬레이션 하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 화재 발생 시 열원에 의해 온도가 높아진 화재 연기는 밀도 차에 따른 열부력에 의해 터널의 천장을 따라 이동하고 열원에서 멀어짐에 따라 점차 하강하는 기류를 형성하는 것을 확인 할 수 있었다.

(2) 공기의 속도 벡터를 통해 Cross-passage 및 구난역의 입, 출구로부터 유입된 공기는 화재 발생으로 인한 국부적인 압력 저하로 인해 화재 위치로 집중하는 것을 확인하였다.

(3) Cross-passage 내의 압력 차이는 방화벽을 기준으로

사고 터널과 비사고 터널에서 약 0.8~3.5Pa의 차이를 가지므로 환기 시스템의 작동 없이도 화재 연기는 비사고 터널로 유입 되지 않았지만 사고 터널 내의 화재 연기는 피난을 위한 연기의 하강 높이인 1.5m 이하로 예측되기 때문에 안전한 대피를 위하여 환기 시스템의 운용이 필요 할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 논문은 철도안전기술 개발사업 (T305C1000005 - 05C0100-00512)에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다. 또한, 이 논문은 2008년도 중앙대학교 우수연구자 연구비 지원에 의한 것임.

#### 참고 문헌

1. A. Beard, R. Carvel (2004), "The Handbook of Tunnel Fire Safty", Thomas Telford.
2. 이성룡, 정진용, 김충익, 유홍선 (2002), "터널 화재 시 환기방식에 따른 연기거동에 관한 실험적 연구", 설비공학논문집, 제14권, 제9호, pp.12-18.
3. 양성진, 허남건, 유홍선, 김동현, 장용준 (2008), "철도터널 화재 시 연결통로 및 대피로 제연을 위한 수치해석 연구", 설비공학논문집, 제20권, 제 1호, pp.1-10.
4. Kevin B. McGrattan, Anthony Hamins (2003), "Numerical Simulation of the Howard Street Tunnel Fire, Baltimore, Maryland, July 2001" 2004 BFRL Publications, NISTIR 6902; NUREG/CR-6793; NRC Job Code J5414; p 42.
5. FLUENT Ver. 6 (2006), "User's Guide", ANSYS Inc.
6. H. Ingason, S. Gustavsson, M. Dahlberg (1994), "Heat Release Rate Measurements in Tunnel Fires", SP Swedish National Testing and Research Institute, SP Report 1994:08, Boras, Sweden.
7. 김성찬, 이성혁 (2006), "수정된 체적열원모델을 이용한 실내 화재의 연기농도 예측", 설비공학논문집, 제18권, 제4호, p.12-18.
8. James G. Quintiere (1998), "Principles of Fire Behavior", Delmar Publishers.

접수일(2008년 5월 16일), 수정일(2008년 10월 27일),  
제재확정일(2009년 2월 13일)