

철도터널 화재 시 구난역 내의 연기거동에 대한 수치해석 연구

Numerical Investigation on Smoke Behavior in Rescue Station for Tunnel Fires

홍사훈* 유홍선** 이성혁***
Hong, Sa Hoon Ryou, Hong Sun Lee, Seong Hyuk

ABSTRACT

The present study performed numerical investigation to analyze the smoke behavior in the rescue station by using the commercial CFD code (FLUENT Ver 6.3). The present study adopted a 10MW ultrafast mode for simulation, and it also used the MVHS(Modify Volumetric Heat Source) model modified from the original VHS(Volumetric Heat Source) model in order to treat the product generation and the oxygen consumption under the stoichiometric state. In addition, the present simulation includes the species conservation equation 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.

1. 서 론

최근 철도의 고속화와 산악지형이 많은 국내의 지형적인 특성에 따라 15Km 이상의 초장대 철도 터널 건설의 수요가 날로 증가 되고 있는 추세에 있다. 이런 장대 터널설치는 지역 간의 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:41명), 타우에른 터널 화재(사망:12명), 2000년 오스트리아 산악 터널 화재(사망:155명), 2001년 고타르 터널 화재(사망:약 11명)등[1]에서 알 수 있듯이, 터널 화재가 발생할 경우 터널 내부의 고립된 공간적 특성으로 인해 화재로부터 발생하는 열 및 연소 생성물은 승객의 대피에 있어 심각한 문제를 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 중요 시 되고 있다.

터널 화재에 대한 수치해석 및 축소모델을 이용한 연구는 국내·외로 활발히 진행 중에 있다. 국내에서는 이성룡 등은 축소실험을 통하여 터널 내 화재 발생 시 연기의 거동과 온도 분포 등을 측정 하였고 [2], 양성진 등은 사갱에 대하여 화재연기의 제연 거동을 수치해석 기법을 사용하여 연구 하였다[3], 또한 Kevin B.는 2001년 미국 Howard Street Tunnel에서 실제 발생 했던 터널 화재에 대해 FDS를 이용하여 연기 거동 및 온도 분포 등을 해석함으로써 터널 화재에 대한 자료로써 활용하도록 하였다[4].

* 중앙대학교 대학원 기계공학과, 석사과정

E-mail : tkgn32@hanmail.net

TEL : (02)823-5332 FAX : (02)814-9476

** 중앙대학교 기계공학부 교수 정회원

*** 중앙대학교 기계공학부 부교수

본 연구의 목적은 철도 터널 화재 발생 시 인명 피해와 직접 연관인 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 구난역설계에 반영 하도록 하는데 있다.

2. 본 문

2.1 해석 형상

본 연구에 적용 된 철도 터널은 단선 병렬 터널로써 구난역 전체의 길이가 약 280m, 터널간 거리는 28m, 각 터널의 폭은 약 9.5m이고, 대피를 위한 교행로(Cross-passage)는 40m 간격으로 총 6개가 설치되어 있으며, 대배기구(Exhaust fan)는 50m 간격으로 각 터널에 4개씩, 총 8개가 설치되어 있다. 교행로의 중간에는 2m × 2m 크기의 방화문이 설치되어 있으며 사고 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 포함 시켰으며 열차의 형상은 길이 200m, 폭 4m로 열차의 형상에 가깝게 표현 하였다. 방화문의 위치 및 대배기구의 위치는 그림 1에 표현 되어 있다. 시뮬레이션을 위한 형상은 Pro-engineer Wildfire 2.0을 이용하여 3차원으로 실제와 가깝게 구현 하였다. 격자는 ICEMCFD10.0을 이용하여 구성하였으며 3차원 hexahedral과 tetrahedral이 혼용 되어있는 hybrid 격자로 구성 되었다. 격자는 총 100만개의 cell로 구성 되었다.

2.2 지배방정식 및 해석 조건

본 시뮬레이션은 연속 방정식과 운동량 방정식, 에너지 방정식, 종의 보존방정식(species conservation equation)에 대해서 수치해석 하였다. 그에 대한 방정식은 다음과 같다.

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

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

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot (\vec{v} (\rho E + p)) = -\nabla \cdot \left(\sum_j h_j J_j \right) + S_h \quad (3)$$

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

난류 유동장 해석에 사용된 난류 모델은 부력 생성항이 포함된 수정 $\kappa-\epsilon$ 모델을 적용하였으며, 속도와 압력의 연결은 SIMPLE 알고리즘을 사용하였고 밀도변화는 비압축성 이상기체의 상태 방정식에 의해 계산 되었다. 해석은 범용 수치 해석 코드인 Fluent Ver.6.3를 이용하여 해석을 수행하였다.

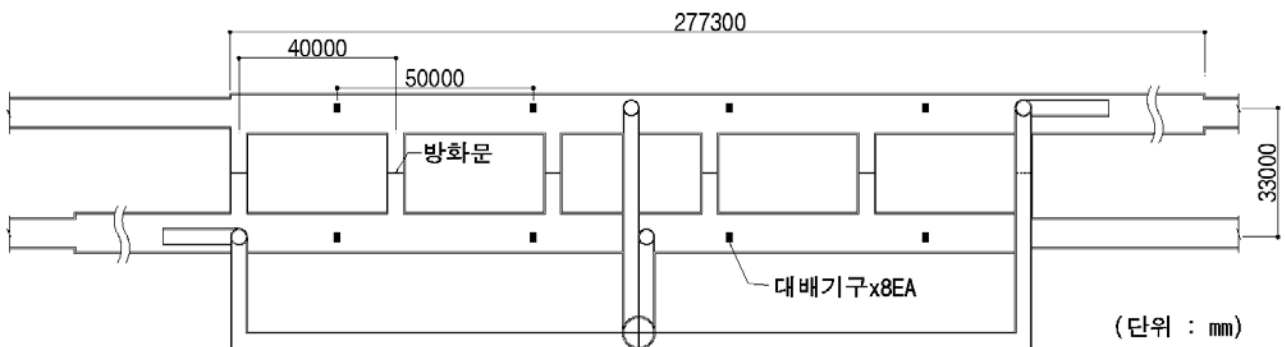


그림 1. 해석 터널의 크기

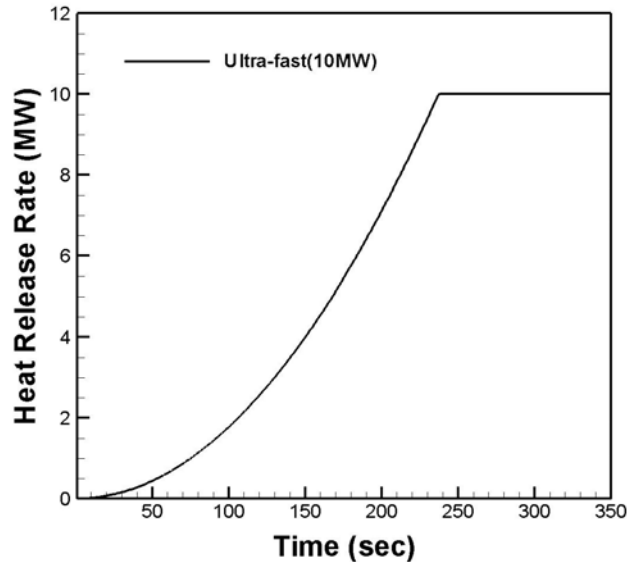


그림 2. 화재 시나리오

본 연구는 비정상 상태에서 1초의 시간 간격으로 화재 발생 이후 약 300초 동안의 화재 현상을 시뮬레이션 하였으며 본 연구를 위하여 Intel Xeon CPU Quad Core Processor 2.0GHz, 16GB RAM 사양의 컴퓨터를 병렬 처리하여 약 24시간의 처리 시간이 소요 되었다.

화재의 크기는 객차 1량이 타는 것을 기준으로 하여 길이 20m, 단면적 20.6 m²의 크기를 가지며 화재의 발생 위치는 입구 쪽으로 편심 된 곳에 위치하였다. 화재의 최대 발열량은 10MW이고 화재의 오는 Ultra-fast mode로 가정하여 식 $Q = \alpha \times t^2$ ($\alpha = 177.78 \text{ W/s}^2$) 을 적용하였다. 최대 발열량인 10MW는 화재 진행 후 약 237초 후에 발생하며 그 후 발열량은 10MW로 일정하게 열이 발생하는 것으로 구성하였다. 화원의 위치 및 화원 위치에 따른 배기구의 조건은 그림 3과 같다.

2.3 화재 모델 (MVHS 모델)

본 연구에서는 화원을 모사하기 위해 화재영역으로 가정된 체적에 대하여 열원을 제공하여 화재 공간 내부의 열전달을 해석함으로써 화재 특성을 파악하는 체적 열원 (volumetric heat source, VHS) 모델을 적용하였다. 또한 stoichiometric 상태에서 연료 소모량에 따른 연소 생성물의 생성율과 산소 소모율을 물질 생성 및 소멸항으로 VHS 모델에 적용하고 종의 보존 방정식을 해석함으로써 화재 발생으로 인한 생성물의 거동을 동시에 예측 하였다.[5] 본 연구에서는 위 모델을 적용하기 위하여 화재에서 발생하는 연소를 완전 연소로 가정하고 연료를 메탄(CH₄)으로 가정하였다. 이에 따른 연소 반응식 및 단위 체적당 최대 발열량 연료 소모량에 따른 연소 생성물의 생성률, 산소 소모율은 다음과 같다.

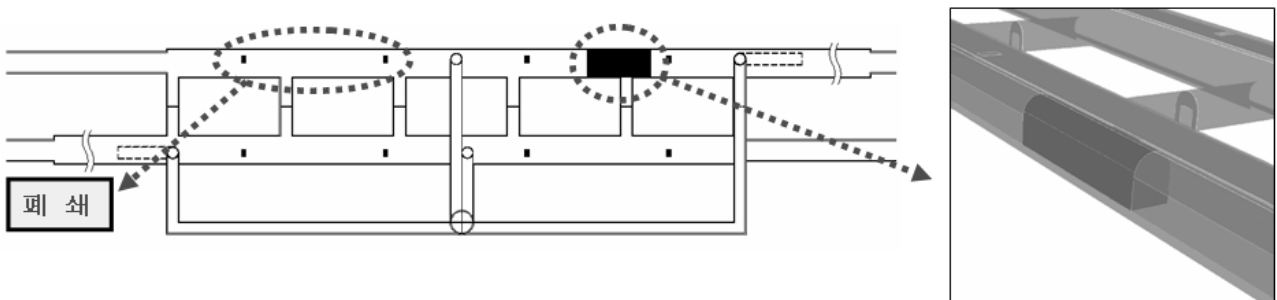


그림 3. 화재 위치 및 배기구 조건.

* 연소화학반응식 : $CH_4 + 2CO \rightarrow CO_2 + 2H_2O$

* 단위체적 당 최대 발열량 : $\dot{q} = 10MW / 413m^3 = 24213 (W / m^3)$

* 메탄의 연소열 : $50000 (kJ / kg)$

* 연소 소모량 : $\dot{m}_F = 24213 / 50000 = 0.48 (g / m^3)$

* 산소 소모율 : $\dot{m}_{O_2} = 0.48 \times (32 + 32) / (12 + 4) = 1.92 (g / m^3)$

* 연소 생성물의 생성율 : $\dot{m}_{CO_2} = 0.48 \times (12 + 32) / (12 + 4) = 1.32 (g / m^3 \cdot s)$

$\dot{m}_{H_2O} = 0.48 \times 2 \times (2 + 16) / (12 + 4) = 1.08 (g / m^3 \cdot s)$

3. 결과 및 분석

그림 4.는 30sec 시간간격으로 사고터널 내의 연소생성물의 분포를 보여주는 그림이다. 본 연구에서 화원 모델로 적용 한 MVHS 모델의 경우 화재 시 발생하는 연소현상을 완전 연소로 가정하게 되고 이 때 발생하는 연소생성물은 CO_2 와 H_2O 로 국한하게 된다. 본 연구에서는 CO_2 의 분포를 통해 화재 시 발생하는 연소생성물의 거동을 예측 하였다.

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 하강하는 연소 생성물의 형태를 볼 수 있다.

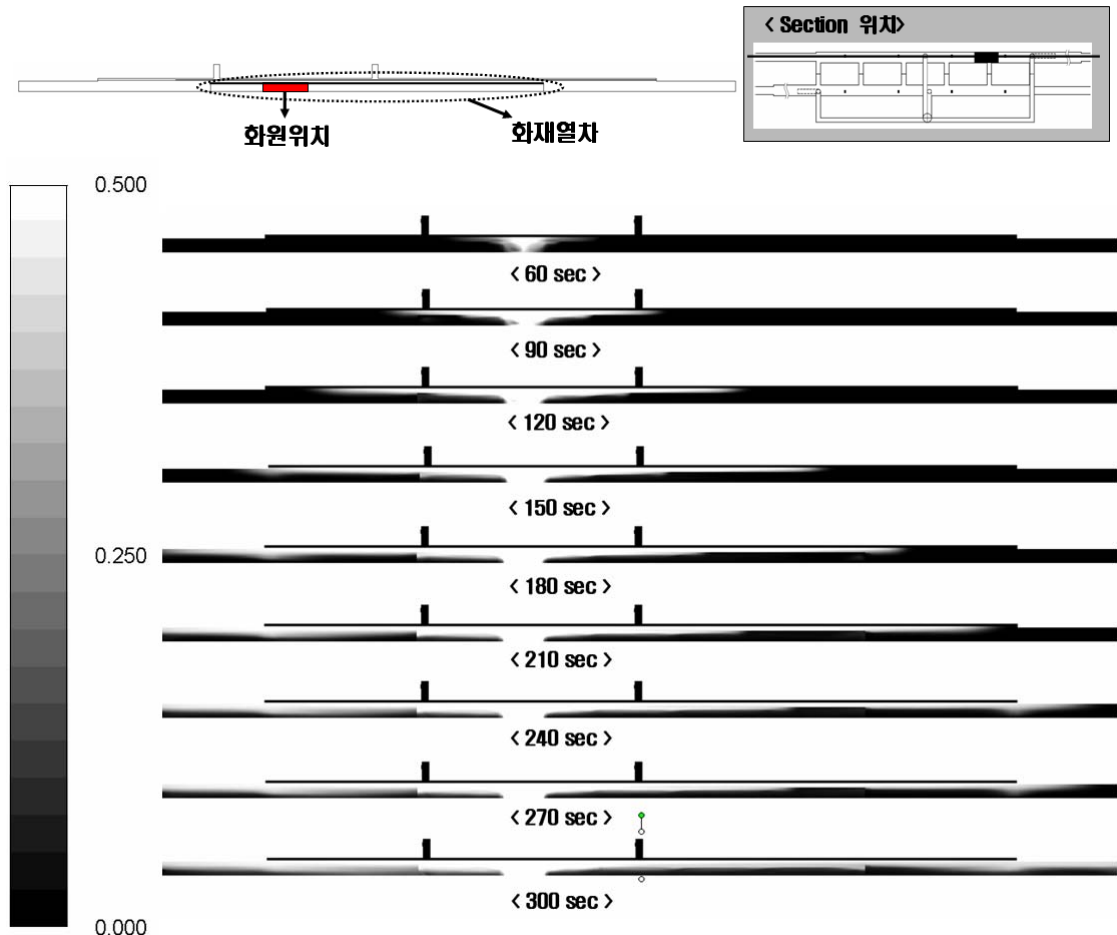


그림 4. 시간에 따른 연소 생성물의 분포

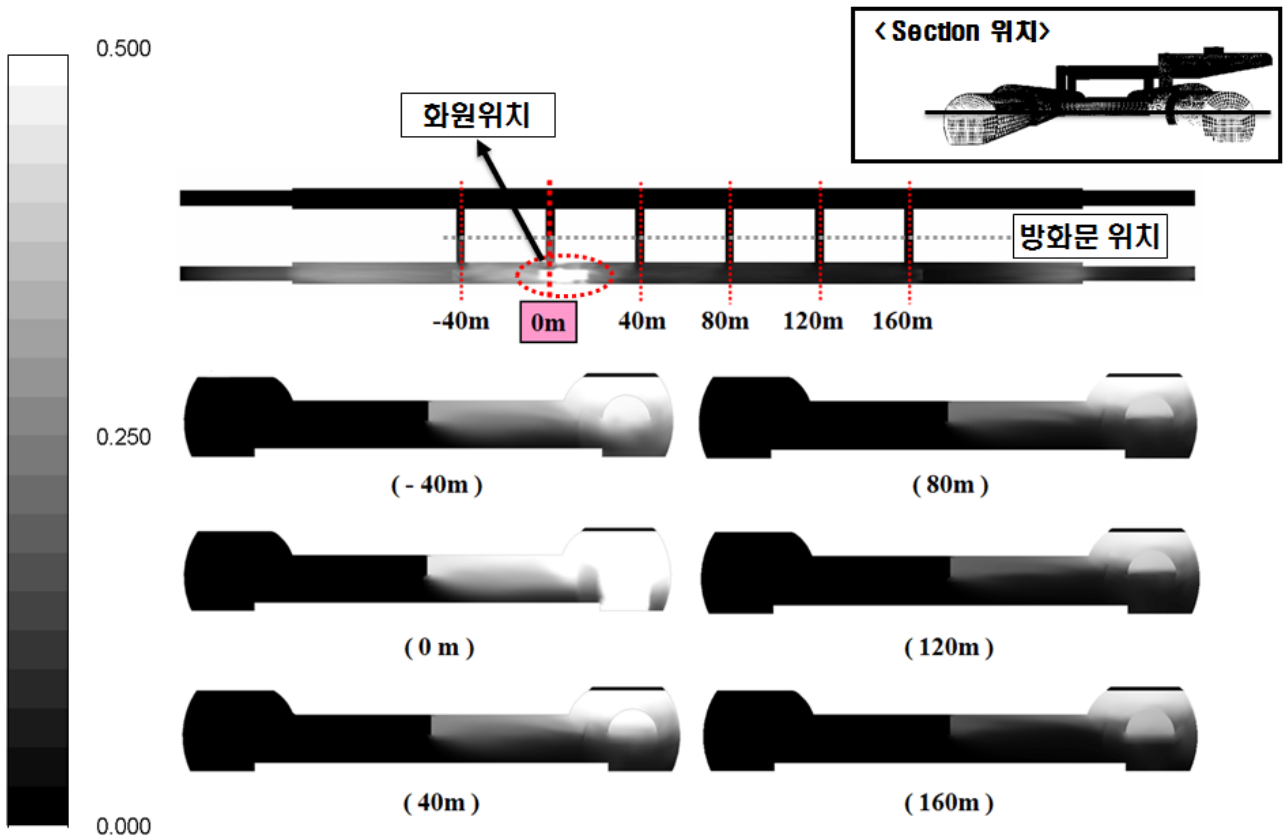


그림 5. 300초경과 후 교행로에서의 연소 생성물 분포

그림 5.는 300초경과 후 사람이 숨 쉬는 높이와 같은 약 1.5m 높이 및 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 -40m와 0m의 교행로의 경우 시간이 지남에 따라 지속적으로 공급되는 연소 생성물에 의해 벽면을 타고 방화문 근처까지 밀려 내려오는 현상을 볼 수 있으나 방화문으로 부터 공급되는 외부 공기에 의해 비사고 터널로 연소 생성물이 넘어 가지 못함을 확인할 수 있다. 방화벽을 기준으로 비사고 터널 부로 화재 연기가 넘어가지는 않지만 화재 위치와 가까운 사고터널 쪽의 교행로에는 사람이 숨쉬는 높이까지 화재 연기가 분포하고 있는 것을 확인할 수 있으며 이는 승객 대피 시 문제를 야기 시킬 수 있을 것으로 사료된다.

그림 6.은 화재위치와 가장 가까운 교행로(0m)에서의 속도벡터를 보여 주는 그림이다. 공기의 유동은 외부의 공기가 비사고 터널에서 사고 터널로 방화문을 통해 지속적으로 유입되고 있는 것을 확인할 수 있다. 이때 공기의 유입속도는 약 1.5m/s이다. 연소 생성물은 터널의 천장 및 교행로의 상부를 따라

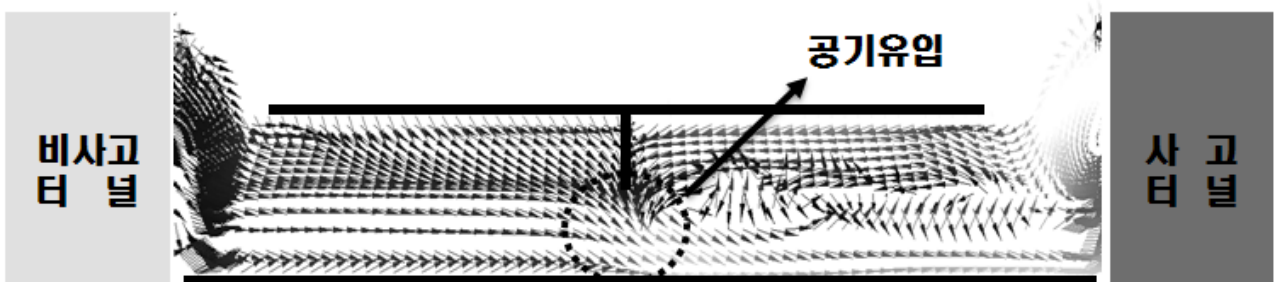


그림 6. 교행로에서의 공기의 속도 벡터

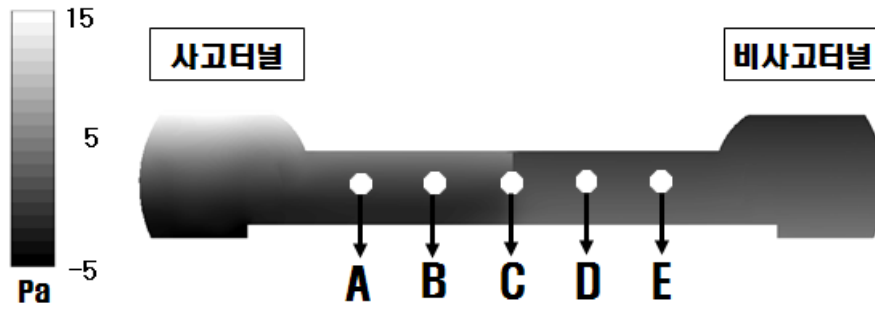


그림 7. 교행로에서의 압력 분포

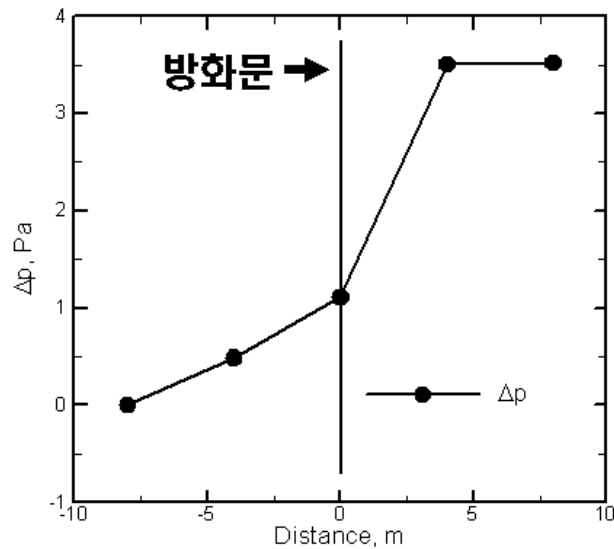


그림 8. 교행로에서의 압력차 그래프

이동하다가 방화벽에 의해 이동이 차단되게 되고 방화벽에 의해 차단된 공기는 하부로 내려오게 되지만 방화문 근처에서 화재 방향으로 유입되는 공기들에 의해 다시 사고 터널로 빨려 들어가고 있는 것을 확인할 수 있다.

그림 7.은 교행로(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. 그림 8.은 약 1.5m 높이에서 화재 위치와 가장 가까운 A지점을 기준으로 교행로 내의 압력 분포를 그래프로 보여 주는 그림이다. 방화문을 기준으로 비사고 터널의 압력이 더 높음을 볼 수 있으며 A지점과 E 지점은 약 3.5 Pa의 압력 차이가 있음을 확인할 수 있다. 이러한 압력 차이로 인해 사고 터널의 연소 생성물은 비사고 터널로 전파 되지 않는 것으로 사료 된다.

4. 결론

본 연구는 수정 된 체적 열원 모델(MVHS 모델)을 적용 하여 상용 수치해석 프로그램인 FLUENT를 이용하여 구난역 화재 시에 발생하는 화재 현상을 시뮬레이션 하였다.

- (1) 화재 발생 시 열원에 의해 온도가 높아진 화재 연기는 열부력에 의해 터널의 천장을 따라 이동하는 기류를 형성하고 비사고 터널로는 화재연기가 전파 되지 않음을 확인할 수 있었다.
- (2) 공기의 속도 벡터를 통해 교행로 및 구난역의 입, 출구로부터 유입된 공기는 화재 발생 위치로 이동하는 것을 확인할 수 있었다.
- (3) 교행로 내의 압력 차이는 방화벽을 기준으로 사고터널과 비사고터널에서 약 3.5 Pa의 차이를 가지므로 별다른 환기 시스템의 작동 없이도 화재 연기는 비사고터널로 유입 되지 않을 것으로 사료 된다.

후 기

본 논문은 철도안전기술 개발사업(T305C1000005-05C0100-00512)에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. A. Beard, and R. Carvel(2004). “The handbook of tunnel fire safty”
2. 양성진, 허남건, 유홍선, 김동현, 장용준 (2008). “철도터널 화재 시 연결통로 및 대피로 제연을 위한 수치해석 연구”, 설비공학논문집, 제20권, 제 1호, pp.1-10
3. 이성룡, 정진용, 김충익, 유홍선 (2002), “터널 화재시 환기방식에 따른 연기거동에 관한 실험적 연구” 설비공학논문집, 제 14권, 제 9호, pp.12-18
4. McGrattan, K. B.; Hamins, A. (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. 김성찬, 이성혁 (2006), “ 수정된 체적열원모델을 이용한 실내 화재의 연기농도 예측”, 설비공학 논문집 제 18권, 제4호, p.12-18
6. FLUENT Ver. 6, “User's Guide”, ANSYS Inc, 2006