

구난역을 갖는 철도 터널 내부의 연기거동 특성 Characteristics of Smoke Propagation in Railway Tunnels with Rescue Station

장원철 · 김동운 · 이성혁[†] · 유흥선

Won-Cheol Jang · Dong-Woon Kim · Seong-Hyuk Lee[†] · Hong-Sun Ryou

중앙대학교 기계공학부
(2008. 8. 4. 접수/2009. 8. 7. 채택)

요 약

본 연구의 목적은 구난역을 갖는 철도 터널 내부의 연기 거동 특성을 분석하는 것이다. 특히 화재 위치 변화에 따른 연기 전파 특성에 대해 수치해석을 수행하고 이때 해석 조건으로 사용되는 발열량은 터널 내 풀 화재(pool fire) 실험을 통해 결정된다. 사용된 연료는 n-heptane(C_7H_{16})이고, 각 변의 길이가 4cm 인 정사각형 풀을 이용하였다. 본 연구에서는 상용코드인 FLUENT(Ver.6.3) 를 사용하여 수치해석을 수행하였고 화원 생성 현상은 MVHS(Modified Volumetric Heat Source) 모델을 통해 모사되었다. 해석 결과, 연기가 터널을 따라 전파되면서 구난역까지 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었으며 따라서 배연시스템의 설치가 요구됨을 알 수 있다. 또한 교행로와 방화벽이 연기 제어에 기여함을 확인하였다.

ABSTRACT

The main objective of the present study is to investigate smoke propagation in railway tunnels with rescue stations. In particular, based on measurement of HRR (heat release rate) for pool fires formed at different locations, the influence of fire source location on smoke behavior is examined. The fuel is n-heptane and pool fires are generated with a square length 4cm. With the use of MVHS (Modified Volumetric Heat Source) model for fire source, extensive numerical simulations are performed by using the commercial code FLUENT (Ver.6.3) Predicted smoke temperatures and smoke propagation are discussed. From numerical predictions, it is found that ventilation systems may be necessary in the railway tunnels because the smoke moves along the tunnel, and consequently it enters the non-accident tunnel. It is also confirmed that the cross-passage and fire protection wall systems contribute to control the smoke.

Keywords : Modified VHS model, Rescue station, Tunnel fire, Smoke Propagation

1. 서 론

우리나라와 같이 대부분이 산악지형으로 이루어진 곳에서는 지형적 제한 때문에 터널이나 지하 공간 활용에 대한 관심이 증대되고 있다. 이미 국외에서 구난역을 적용한 사례를 보면 스위스의 Gottard Base 터널과 Lotschberg 터널, 일본의 Seikan 터널 등이 있으며, 국내에는 영동 출안 터널¹⁾과 원주~제천간 백운 및 박달터널, 원주~강릉 대관령터널 등이 계획 및 건설 중으로 구난역을 적용하였다. 하지만, 구난역 내부에서

화재 발생에 따른 방제대책을 체계적으로 설계에 적용하지 못하고 있다.

본 연구에서는 길이 350m, 높이 6.65m, 폭 9.0m의 2개의 터널과 40m 간격으로 길이 20m, 높이 4.2m, 폭 4m의 교행로로 연결된 구난역 터널을 1/35의 크기로 축소하여 모형 터널을 제작하였다. 모형 터널 내부의 화재 상황을 모사하기 위해서 자연배기 상태에서의 풀 화재(pool fire) 실험을 수행하였으며, 측정된 연료 증발량을 바탕으로 MVHS 모델의 화원생성항을 선정하여 사고터널 내부의 온도 및 연기거동과 함께 승객이 대피시 사용되는 교행로 내부의 연기 농도분포와 속도 분포를 예측하였다. 그 결과를 바탕으로 화원의 발달

[†]E-mail: shlee89@cau.ac.kr

상황을 분석하여 구난역 설계에 중요한 이론적 자료를 제공할 수 있다.

2. 실험 및 수치해석방법

2.1 화원실험

축소모형 터널 내부에 비교적 설치가 간단하고 연소면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 풀 화재를 사용하여 실험을 실시하였다.²⁾ 사용된 연료는 n-heptane (C_7H_{16})이고, 각 변의 길이가 4cm인 정사각형 풀을 이용하였다. 발열량을 얻기 위하여 연료의 증발률과 연소열을 이용하여 단위면적당 발열량을 산정하였다. n-heptane 풀화재의 경우, 연소열은 $44,600\text{kJ/kg}^3$ 이고 발열량 산정에 이용된 식은 식 (1)과 같다.⁴⁾

$$\dot{Q} = m'' \cdot A \cdot \Delta H \quad (1)$$

$$m'' = \frac{\Delta W}{\Delta t \cdot A} \quad (2)$$

여기서 \dot{Q} 는 발열량, m'' 는 연료의 증발률, A 는 화원의 면적, ΔH 는 연료의 연소열을 나타낸다. ΔW 는 연료의 질량 변화량이고 이때 걸리는 시간은 Δt 이다.

축소모형 터널 내부의 화원 실험은 분해능이 0.01g 인 전자저울 위에 풀을 설치하여 3초 간격으로 연료의 증발률을 측정하였다. Figure 1과 Figure 2는 각각 평균증발률과 평균발열량을 나타낸다. 본 실험에서는 연료 증발률이 일정한 성질을 갖는 풀화재를 이용하였기 때문에 화재 초기에는 연료의 증발률이 일정하다. 하지만 시간 경과에 따라 화원자체의 화염에 의한 가열로 연료가 끓기 시작하면서 Figure 1과 Figure 2에서

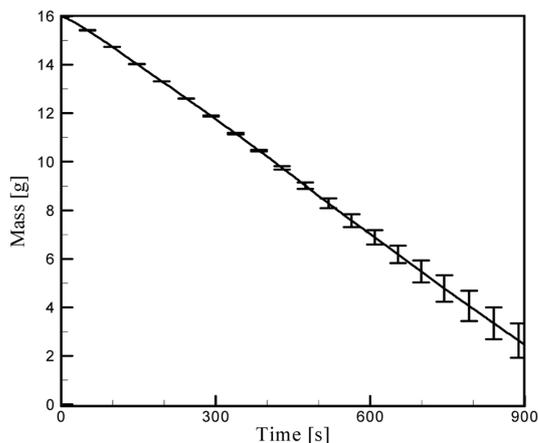


Figure 1. Measured mass burning rate of pool fire.

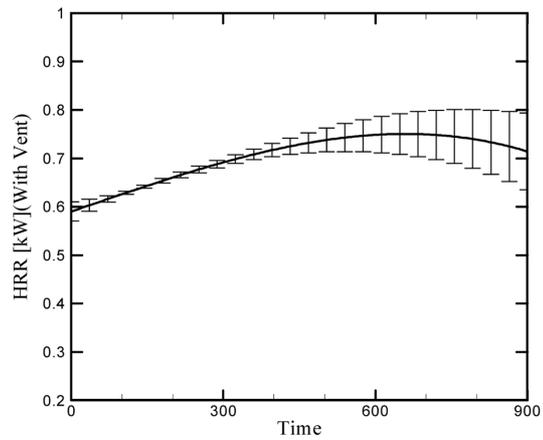


Figure 2. Measured HRR of pool fire.

보는 바와 같이 오차범위가 커지는 현상을 보인다. 이로 인해 연료의 증발률도 불규칙하게 증가하여 오차가 발생하는 것으로 판단된다. 실험에서 측정된 평균 발열량은 0.7kW이며 최대오차는 약 0.1kW이다.

2.2 화원 조건

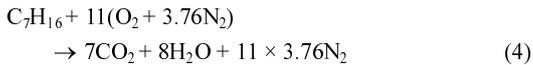
본 연구에서는 터널 내부에 화재 발생을 모사하기 위해서 MVHS 모델을 사용하였다. MVHS 모델은 주어진 발열량(\dot{Q})을 가정된 화염영역의 에너지생성량 및 질량생성량을 단위체적당 발열량 및 질량생성량으로 부가함으로써 화원을 모사하게 된다. 이를 위해서 축소모형 터널의 자연배기상태의 풀 화재 실험을 수행하였다. 실험을 통해 측정된 연료 증발률은 총발열량으로 환산하여 에너지생성량으로 대입하였다. 측정된 연료 증발률은 각 생성물의 화학종(species)의 질량생성률로 환산하여 화원의 질량생성량으로 대입하였다. 터널 내부에 생성되는 열량을 모사하기 위해서 실험을 통해 얻은 열량의 결과 값을 식 (3)과 같이 표현하였다.

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{V_F} \quad (3)$$

여기서 \dot{Q} 는 단위 시간당 발열되는 열량이며, V_F 는 가정된 화염의 체적이다. 가정된 화염 체적은 실험에 사용된 풀의 표면적(A)과 같은 $0.04 \times 0.04\text{m}^2$ 이고 화염의 높이(H_f)는 McCaffrey⁵⁾의 방법을 적용하여 0.135m로 설정하여 가정된 화염 체적을 설정하였다. \dot{q} 는 각 계산격자에 대하여 전체 반응의 에너지를 단위체적당 발생 열량으로 환산하여 에너지생성량으로 모사된다.

화재로 발생하는 연소생성물의 거동을 파악하기 위

하여 열원내 연소반응에 따른 각 생성물의 화학종의 단위체적당 질량생성률을 계산하여 이를 열원체적의 질량에 대하여 추가로 계산함으로써 농도장을 해석하였다. 시뮬레이션 연소반응의 경우 n-heptane에 대하여 완전연소로 가정하여 수치해석 하였다. 이때에 생성되는 CO₂가스 농도를 통해서 구난역 내부의 연기거동을 예측한다. 여기서 n-heptane의 완전연소 반응식은 식 (4)와 같다.



소모되는 연료의 연소율은 식 (5)와 같다.

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{Q}}{\Delta H} \quad (5)$$

여기에서, ΔH_C 연료의 연소열을 나타낸다. 완전연소 반응에서 연소되는 연료의 양에 대한 산소의 소모율은 다음 식 (6)과 같이 계산된다.

$$-\dot{m}_{O_2} = \dot{m}_F = \frac{v_{O_2} MW_{O_2}}{v_F MW_F} \quad (6)$$

MW와 v는 종의 분자량과 stoichiometric 상수를 각각 나타낸다. 따라서 체적열원 내 연료와 산소의 반응에 의해 생성되는 연소생성물의 생성률은 식 (7)과 같다.

$$\dot{m}_{P,i} = \dot{m}_F = \frac{v_{P,i} MW_{O_2}}{v_F MW_F} \quad (7)$$

측정한 발열량을 바탕으로 계산된 단위체적당 질량생성률을 각 계산격자에 대하여 적용하여 에너지생성률과 함께 물질의 생성과 소멸에 대해 질량평형을 맞추어서 가정된 화염 체적에 적용한다.⁶⁾

2.3 수치해석조건

본 연구는 실제 터널(영동터널 대상)의 크기를 1/35로 축소한 모형을 대상으로 한 실험 결과를 기초로 계산을 위한 입력 및 초기조건을 설정하였다. Figure 3과 같이 길이 10m, 높이 0.19m, 폭 0.26m의 단선터널을 구성하고 화재가 발생하는 사고터널 내에는 1.14m 간격으로 설치된 길이 0.57m, 높이 0.12m, 폭 0.114m의 교행로를 설치하며 화재 발생시 비사고 터널(구난역으로 표시됨)로 승객을 이동시키는 역할을 한다. 본 연구에서 사용된 총 계산격자의 수는 503,570개이며 상용 프로그램인 FLUENT(Ver.6.3)를 이용하여⁷⁾ 모형터널과 동일한 조건에 대하여 계산하였다.

초기 조건으로 계산영역은 대기압하에서 계산되었으

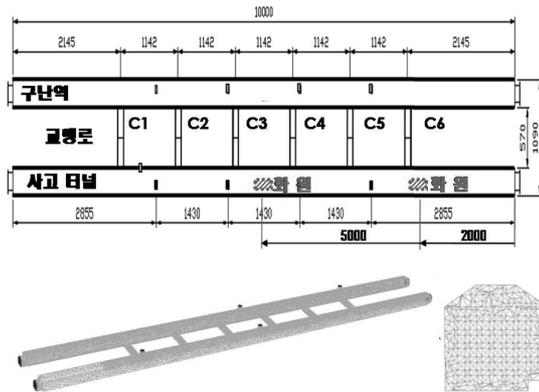


Figure 3. Schematics of the modeled railway tunnel.

며, 초기 온도는 각 실험 Case에서 측정된 값을 적용하였다. 특히, 해석모델에서 터널 외벽에서는 두께가 2mm인 철을 통해 외부와의 열전달을 고려한 조건을 사용하여 해석하였다.

터널 내 화재 위치에 따른 영향을 알아보기 위해서 Figure 3과 같이 터널 중앙화재와 터널 입구에서 2m 떨어진 지점의 화재에 대해서 해석하였다.

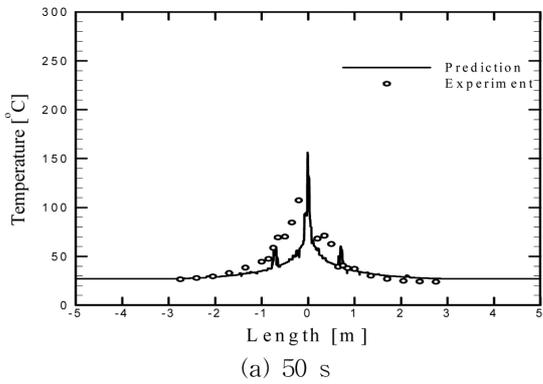
3. 결과 및 고찰

3.1 터널 중앙에서 화재가 발생한 경우-Case 1

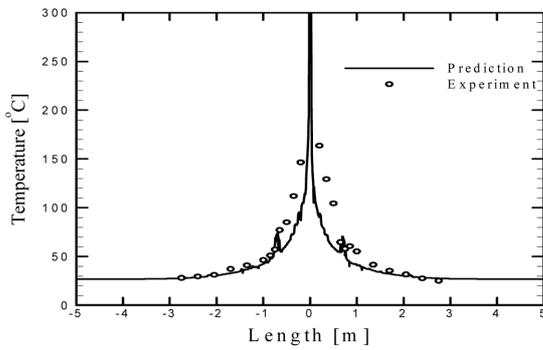
터널 중앙에서 화재가 발생하였을 경우 실험을 통해 얻은 화원 데이터를 바탕으로 입구의 체적 내 열원 및 연기 질량의 열확산 및 연기유동에 대한 3차원 비정상 유동해석을 수행하였다.

실험 측정값과 예측 결과를 비교하였다. 그림에서 실험 측정값이 예측 결과보다 다소 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이것은 수치해석 결과에 경우 벽면을 통해 외부와 전도되는 열량이 크게 나타나고 있으며, 특히 화재 발생 초기(50초)에서 낮게 나타나고 있어 터널경계면에서 발생하는 열전달의 오차는 시간이 경과하면서 전반적으로 줄어들게 된다. 계산된 결과와 측정된 값을 바탕으로 터널 내부 상황을 확인해 본 결과 화원으로부터 3m 떨어진 지점으로는 열원이 도달하지 않으며, 이 지점은 C1과 C6 교행로에 해당한다.

Figure 5는 CO₂가스 농도분포를 시간에 따라 나타낸 결과이다. 피난 시 사람의 호흡선 높이를 예측하기 위해서 실제터널의 교행로 바닥면으로부터 1.5m에 해당하는 높이를 Froude 수 상시⁸⁾를 적용하여 축소터널의 교행로 바닥면으로부터 4cm 높이를 설정하였다. 그 결과 화원에서 가장 멀리 떨어진 C1과 C6 교행로를 통

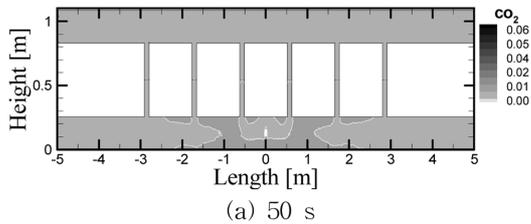


(a) 50 s

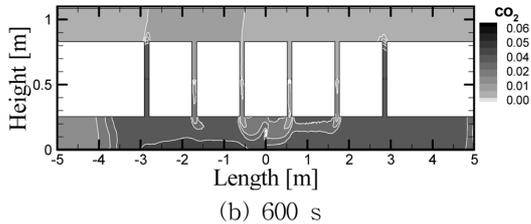


(b) 300 s

Figure 4. Comparison of estimated ceiling temperature with measurement for case 1.



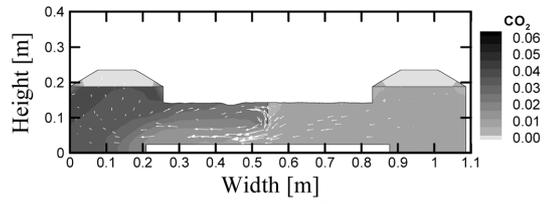
(a) 50 s



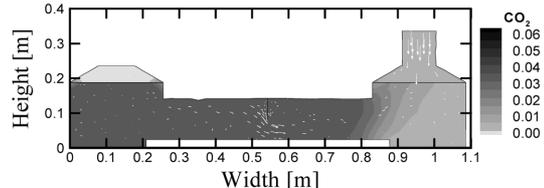
(b) 600 s

Figure 5. Predicted CO₂ distribution for case 1.

해서 CO₂ 가스가 구난역로 넘어가는 것을 확인할 수 있었으며, Figure 4(a)와 Figure 4(b)에 나타난 온도분포를 통해서 화원으로부터 3m 떨어진 C1과 C6 교행



(a) at C4



(c) at C6

Figure 6. Predicted CO₂ distributions and flow velocities inside the cross-passage at 600s.

로가 위치한 곳은 열원이 도달하지 않으며, 교행로 내부의 연층이 하강하여 교행로 전면에 분포되고 하부에 개방된 구난역으로 유입된다. 그 결과 사고 터널에서 발생하는 연기로부터 구난역은 위협받으며 사고 터널 내 환기 시스템 운영이 필요할 것으로 판단된다.

Figure 6은 600초일 때, 교행로 내 중앙단면에 대한 CO₂가스 농도분포와 속도분포를 나타낸다. 화원과 가까운 곳에 위치한 C4 교행로의 경우, 화염으로부터 발생한 열원의 뜨거워진 연기는 부력의 영향으로 상승하면서 상부에 위치한 방화벽에 막혀 구난역에 영향을 주지 못하고 있다. 또한 하부에 개방된 방화문을 통해서 구난역의 차가운 공기가 유입됨을 알 수 있다. 그 결과 자연배기에 의해서도 화재로부터 안전함을 예측할 수 있는 반면에, C6 교행로의 경우 화원의 열원의 영향을 받지 않는 교행로의 경우 연층이 하강하여 전면에 분포하게 된다. 그 결과 하부에 개방된 방화문을 통해서 CO₂가스가 유입됨을 확인할 수 있다.

3.2 터널 입구 쪽 화재-Case 2

본 연구는 터널 입구 쪽 화재 발생시 연기거동 특성을 분석하기 위해 입구에서 2m 떨어진 위치에서 측정된 실험 결과를 기초로 수치해석을 수행하였다. Figure 7은 터널 천장 온도분포에 대한 수치해석 결과를 실험 결과와 비교한 것이며 해석결과와 실험값이 서로 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다.

Figure 8은 교행로 바닥면에서 높이 4cm(실제터널 높이 1.5m)에 시간에 따른 CO₂가스 농도 분포이다. 배기장치가 작동하지 않는 경우, 화원에서 발생한 열원

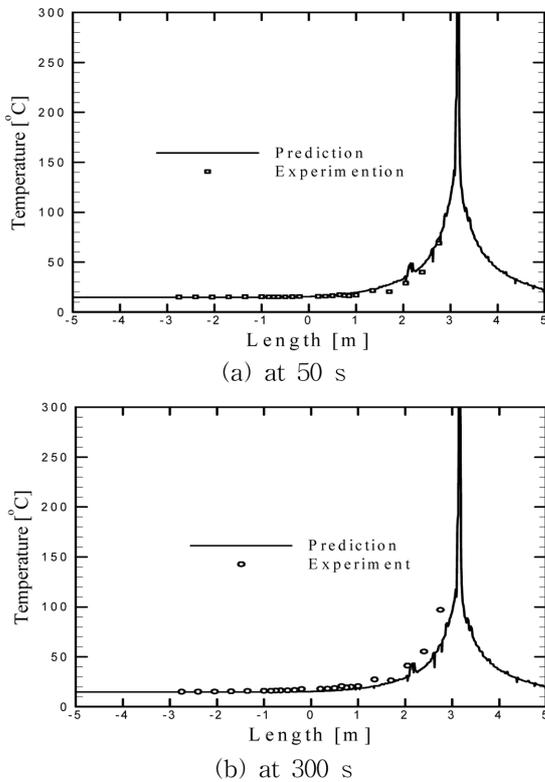


Figure 7. Predicted and measured ceiling temperature for case 2 at different times.

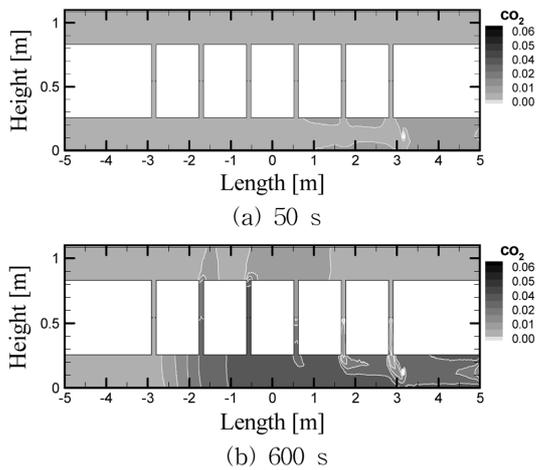


Figure 8. Predicted CO₂ distributions for case 2 at different times.

이 도달하는 교행로의 경우 연층이 상부에 위치하여 상부의 방화벽에 막혀 구난역에 영향을 주지 못하고

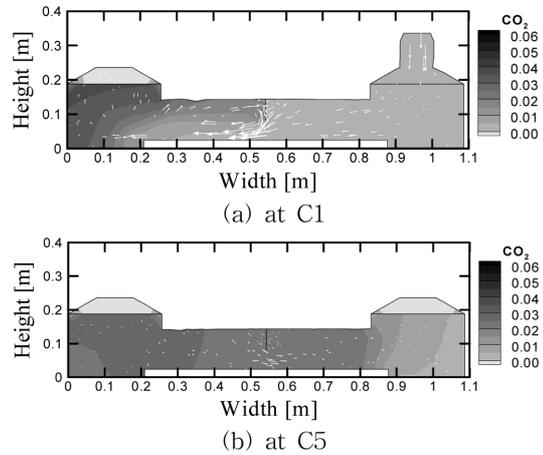


Figure 9. The estimation of CO₂ distributions and flow velocities inside the cross-passage at 600s for case 2.

있으나, 화원에서 발생한 열원이 도달하지 않는 C4 교행로의 연층이 전면에 분포하고 있어 하부에 개방된 방화문을 통해서 구난역으로 유입되고 있다. 그 결과 화원과 가까운 곳에 위치한 교행로보다 화원으로부터 멀리 떨어진 교행로에 대해서 화재 방재 설계 및 배기 장치의 운영이 고려되어야 한다.

Figure 9는 600초일 때, 교행로 내 중앙단면에 대한 CO₂가스 농도분포와 속도벡터를 나타낸다. 화원과 가까운 곳에 위치한 C1 교행로의 경우, 화원에서 발생한 열원에 의해 뜨거워진 연기는 부력의 영향으로 상승하면서 상부에 위치한 방화벽에 막혀 구난역에 영향을 주지 못하고 있다.

또한 하부에 개방된 방화문을 통해서 비사고터널의 차가운 공기가 사고터널로 유입되고 있어 화재로부터 안전함을 확인할 수 있다. 반면에, C5 교행로의 경우 발생한 열원의 영향이 도달하지 않으며, 교행로 전면에 분포하게 된다. 그 결과 하부에 개방된 방화문의 속도벡터 및 CO₂가스 농도분포를 통해서 연기가 구난역 내부로 유입됨을 확인할 수 있다.

4. 결 론

터널 화재의 수치해석을 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

- 1) 화원에 의해서 생성된 연소생성물의 연기 분포를 확인하였을 때 화원에서 멀리 떨어진 교행로를 통해서 CO₂ 가스가 사고 터널로 전파되고 있어 사고지점 부근의 교행로 보다는 멀리 떨어진 교행로가 위험할 수

있으며, 그 결과 배기 시스템 작동으로 터널 내부에 연소 생성물을 환기시켜야 할 것이다.

2) 화원에 의해서 생성된 연소생성물의 연기 분포를 확인하였을 때 화원에서 멀리 떨어진 교행로의 경우 열원이 도달하지 않으며, 연층이 교행로 전면에 분포하면서 구난역로 연기가 유입되고 있다. 반면에 화재 부근의 교행로의 경우 화원에 의해 뜨거워진 연기는 부력의 영향으로 상승하면서 상부에 위치한 방화벽에 막혀 구난역에 영향을 주지 못하고 있다.

3) 본 연구에서는 열원 및 연기발생량을 함께 예측하여 터널 내부의 연기거동을 예측하였다. 기존의 온도 예측값을 통해서 확인한 CO₂ 농도분포를 통해서 예측한 결과와 차이가 있었으며, 온도 예측으로만 판단하는 것에는 상당한 위험이 수반될 것으로 판단된다.

4) 본 연구는 실험과 수치해석을 통해서 연기거동특성을 예측하기 위해서 터널 내부의 풀화재 실험을 적용하였다. 그 결과를 바탕으로 수치해석의 예측 결과를 검증하였다. 향후 보다 실제에 부합하는 큰 화원을 사용한 실험 및 수치해석 연구가 진행되어야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 논문은 철도안전기술 개발사업(T305C10000 05-05C0100-00512)에 의해 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

참고문헌

1. F. Tarada, R. Bopp, S. Nyfeler, K.-S. Jegal and D.-S. Kim, "Ventilation and Risk Control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea", The First International Conference on Major Tunnel and Infrastructure Projects, pp.22-24(2000).
2. S.R. Lee, C.I. Kim and H.S. Ryou, "An Experimental Syudy of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation", Journal of Korean Institute of Fire Science & Engineering, Vol.15, No.1, pp.1-6(2001).
3. J.G. Quintiere, "Chap 6 Burning Rates", Principles of Fire Behavior, pp.101-127(1998).
4. O. Megret and O. Vauquelin, "A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics", Fire Safety Journal, Vol.34, pp.393-401(2000).
5. B.J. McCaffrey, "Flame Height", SFPE Handbook of Fire Protection Engineering 2nd ed., Chap.1-31(1995).
6. S.C. Kim and S.H. Lee, "Numerical Prediction of Smoke Concentration in a Compartment Fire by Using the Modified Volumetric Heat Source Model", Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering, Vol.18, No.4, pp.344-350(2006).
7. ANSYS Inc., FLUENT Ver. 6 User's Guide(2006).
8. J.G. Quintiere, "Scaling Application in Fire Research, Fire Safety Journal", Vol.15, pp.3-29(1989).