

# 철도터널 화재시 구난역 내의 연기거동에 미치는 배연효과에 관한 연구

## A Study on Ventilation Effects on Smoke Behavior in Rescue Station for Tunnel Fires

장원철\* · 김동운\* · 이성혁† · 유홍선\*\*

Won Cheol Jang · Dong Woon Kim · Seong Hyuk Lee · Hong Sun Ryou

**Abstract** The present study investigates the ventilation effects on smoke spreading characteristics in railway tunnels with the rescue stations. Experiments for tunnel fires were carried out for n-heptane pool fires with a square length 4 cm at different fire locations, and the heat release rates (HRR) were obtained by the measurement of burning rates. In addition, using the commercial code (FLUENT), the present article presents numerical results for smoke behavior in railway tunnels with rescue station, and it uses the MVHS (Modified Volumetric Heat Source) model for estimation of combustion products resulting from the fire source determined from the HRR measurement. As a result, it is found that smoke propagation is prevented successfully by the fire doors located inside the cross-passages and especially, the smoke behavior in the accident tunnel can be controlled through the ventilation system because of substantial change in smoke flow direction in the cross-passages.

**Keywords** : Modified VHS Model, Rescue Station, Tunnel Fire, Smoke Propagation

**요 지** 본 연구는 구난역을 갖는 철도 터널 내에서 화재가 발생하였을 때 연기 전파 특성에 미치는 배연효과를 다루고 있다. 터널 화재 실험은 4cm의 정사각형 형태의 n-heptane( $C_7H_{16}$ ) 풀화재(pool fires)에 대해서 수행되었고 다양한 화재 발생위치에 따른 발열량을 측정하였다. 또한, 본 연구에서는 상용코드인 Fluent(Ver.6.3)를 사용하여 구난역을 갖는 철도 터널 내의 연층 전파 특성을 분석하였으며, MVHS(Modified Volumetric Heat Source) 모델을 사용하여 화재에 의한 연소생성물의 농도 및 거동을 예측하였다. 해석 조건은 다양한 화재 발생 위치에 따라서 측정된 발열량을 이용하였다. 본 연구를 통해 교행로 내에 위치한 방화문에 의해 비사고터널로의 확산을 막을 수 있음을 보였고 특히, 배연시스템의 가동을 통해 유동방향을 변화시킴으로써 사고터널내의 연기 확산을 제어할 수 있음을 확인하였다.

**주요어** : Modified VHS 모델, 구난역, 터널화재, 연기거동

## 1. 서론

### 1.1 연구의 배경 및 목적

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 터

널, 일본의 Seikan 터널 등이 있으며, 국내에는 영동 솔안 터널[1]과 원주~제천간 백운 및 박달터널, 원주~강릉 대관령터널 등이 계획 및 건설 중으로 구난역을 적용하였다. 하지만, 구난역 내부에서 화재 발생 시 이에 따른 방재대책을 체계적으로 역 설계에 적용하지 못하고 있다.

본 연구는 구난역을 갖는 철도 터널 내에서 화재가 발생하였을 때 연기 전파 특성에 미치는 배연효과를 다루고 있다. 터널 내 화재 실험은 풀 화재(Pool Fire)를 대상으로 하였으며 연료는 n-heptane( $C_7H_{16}$ )을 사용하였고 4cm의 정사각형 풀을 사용하여 발열량을 측정하였다. 본 연구에서는 상용코드인 Fluent(Ver.6.3)를 사용하여[2] 구난역을 갖는 철도 터널 내의 연층 전파 특성을 분석하였으며 MVHS(Modified

책임저자 : 중앙대학교, 기계공학과, 부교수  
E-mail : shlee89@cau.ac.kr

TEL : (02)820-5254 FAX : (02)814-9476

\* 중앙대학교, 기계공학과, 석사과정

\*\* 중앙대학교, 기계공학과, 정교수

Volumetric Heat Source) 모델을 사용하여 화재에 의한 연소생성물의 농도 및 거동을 예측하였다. 해석 조건은 다양한 화재 발생 위치에 따라서 측정된 발열량을 이용하였다. 본 연구를 통해 교행로 내에 위치한 방화문을 통해 비사고 터널로의 확산을 막을 수 있음을 보였고 특히, 배연시스템의 작동을 통해 유동방향을 변화시킴으로써 사고터널내의 연기 확산을 제어할 수 있음을 확인하였다.

## 2. 실험 및 수치해석방법

### 2.1 화원실험

축소모형 터널 내부에 비교적 설치가 간단하고 연소면적이 일정하여 발열량 산정이 용이한 풀 화재를 사용하여 실험을 실시하였다[3]. 사용된 연료는 n-heptane이고, 각 변의 길이가 4cm인 정사각형 풀을 이용하였다. 발열량을 얻기 위하여 연료의 증발률과 연소열을 이용하여 단위면적당 발열량을 산정하였다. n-heptane 풀 화재의 경우, 연소열은 44,600kJ/kg이고 발열량 산정에 이용된 식은 다음과 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,  $\Delta H$ 는 연료의 연소열을 나타낸다.  $\Delta W$ 는 연료의 질량 변화량이고  $\Delta t$ 는 시간간격이다.

축소모형 터널 내부의 화원 실험은 분해능이 0.01g인 전자저울 위에 풀을 설치하여 3초 간격으로 연료의 증발률을

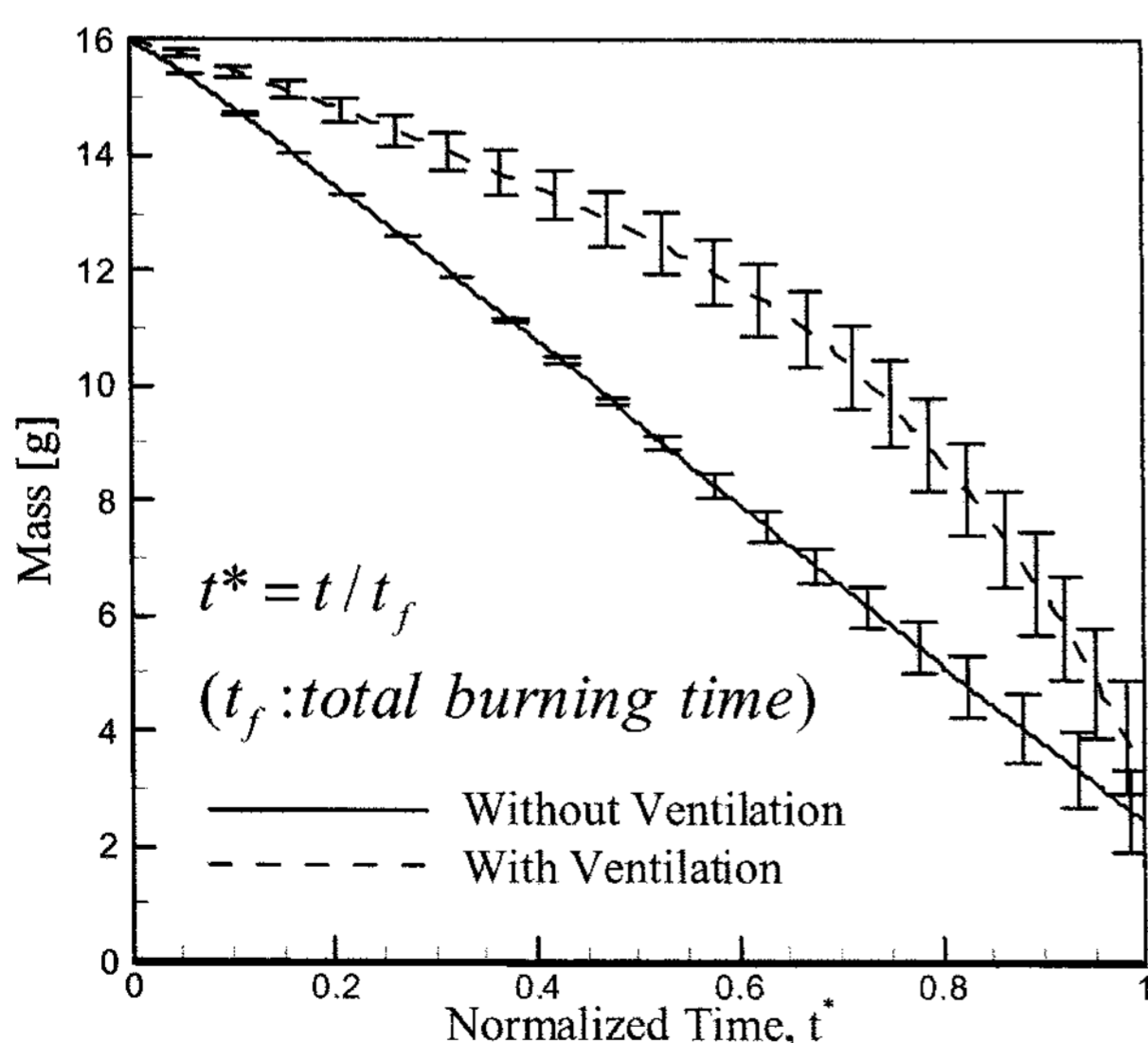


Fig. 1. Measured mass burning rates of pool fire with and without ventilation

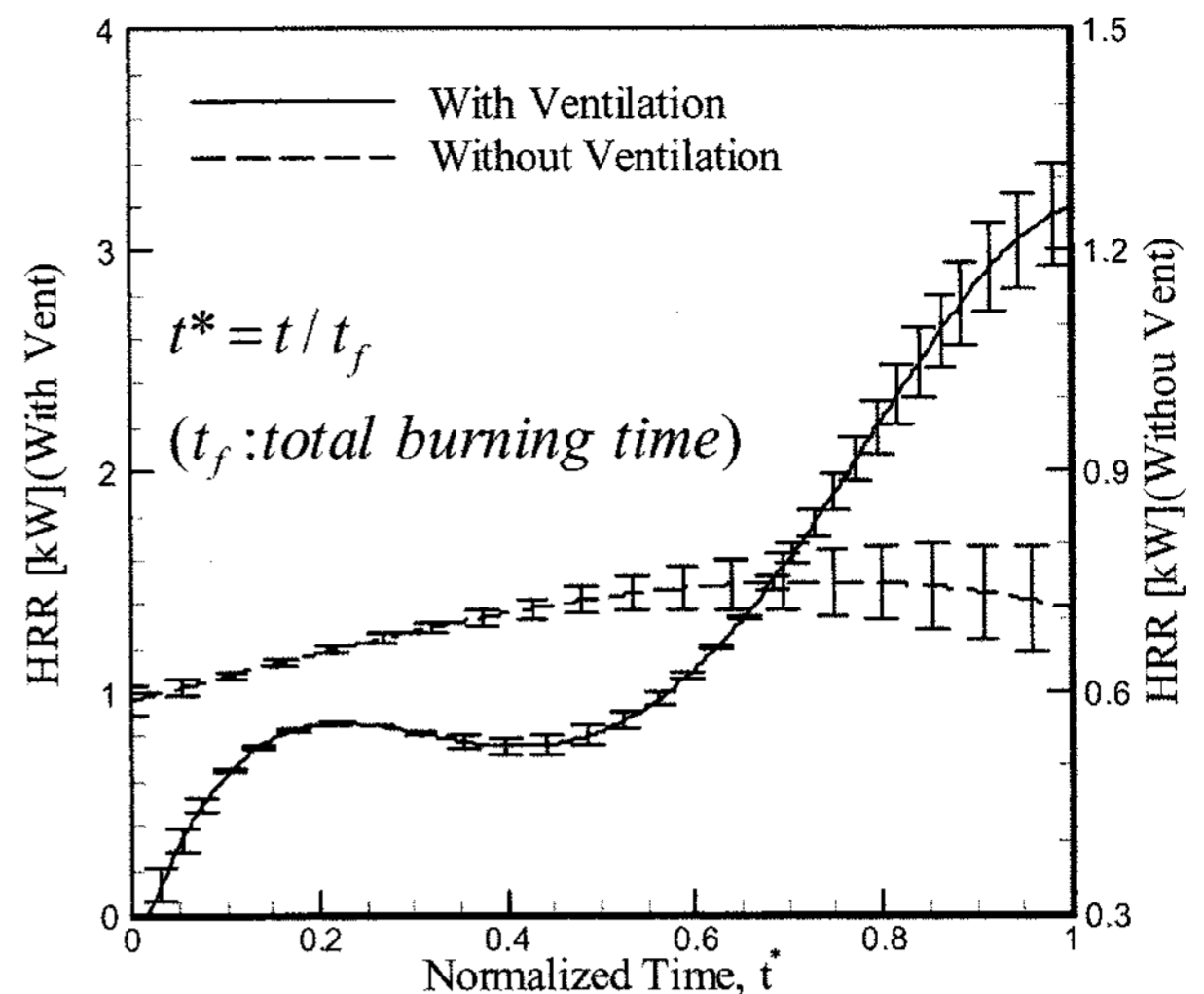


Fig. 2. Measured HRR of pool fire with and without ventilation

측정하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 터널 내부에 배기장치 작동시키지 않는 조건과 배기장치를 작동시키는 두 조건에서 풀 화재의 평균 증발률과 평균발열량을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이 시간이 지날수록 오차범위가 커지는 현상을 보인다. 본 실험에서는 풀 화재를 이용하였기 때문에 화재 초기에는 연료 증발률이 일정하다. 하지만 시간이 점점 지나면 화원자체의 가열로 연료가 끓기 시작하며, 그 결과 연료감소량의 증가와 함께 오차 범위가 급격히 증가한다.

배기장치가 작동하지 않는 경우 화원 지속시간은 900초이고, 배기장치가 작동할 경우 화원 지속시간은 400초이다. 서로 다른 시간을 같이 표현하기 위해서 화원 지속시간을 1로 설정하여 그림의 화원 발생 시간을 표현하였다. 그림에서 보는 바와 같이 배기가 작동하지 않는 경우 풀 화재의 연료 증발률은 일정한 특성을 가지며 평균 발열량은 0.7 kW로 오차 범위는 0.1kW이다. 배기장치 작동 시 화원 주위의 공기가 화원으로 유입되어 연료 증발률의 증가와 함께 발열량이 커지고 있다. 실험 측정 오차범위는 0.4kW로 공기 유입으로 인한 화재성장은 배기장치가 작동하지 않는 경우보다는 오차범위가 증가하고 있다.

### 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 터널 내부에 발생하는 풀 화재조건에 대한 자연 배기 및 강제 배기 조건에 대한 실험을 수행하였다. 실험을 통해 측정된 연료 증발률은 총발열량으로 환산되어 에너지생성량으로 대입하였다. 측정

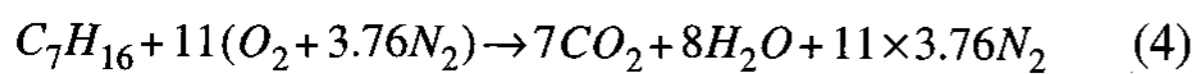
된 연료 증발률은 각 생성물의 화학종(species)의 질량생성률로 환산하여 질량생성률로 대입하였다.

화재로부터 생성되는 열량을 모사하기 위해서 축소터널 실험을 통해 얻은 열량의 결과 값을 다음과 같이 표현하였다.

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

여기서  $Q$ 는 단위 시간당 발열되는 열량이며,  $V_F$ 는 가정된 화염의 체적이다. 즉, 화염의 체적은 실험에 사용된  $0.04 \times 0.04 \text{m}^2$ 의 풀 표면적(A)과 McCaffrey[5]의 방법을 적용하여 구한 화염의 높이( $H_f$ ),  $0.135\text{m}$ 를 이용하여 가정하였다.  $q$ 는 각 계산격자에 대하여 전체 반응의 에너지를 단위체적당 발생 열량으로 환산하여 에너지생성률로 모사된다.

화재로 발생하는 연소생성물의 거동을 파악하기 위하여 열원 내 연소반응에 따른 각 생성물의 화학종의 단위체적당 질량생성률을 계산하고 이를 열원체적의 질량에 대하여 추가로 계산함으로써 농도장을 해석하였다. 연소반응의 경우 n-heptane에 대하여 완전연소로 가정하였다. 여기서 n-heptane의 완전연소 반응식은 식 (4)와 같다.



소모되는 연료의 연소율은 식 (5)와 같다.

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

여기에서,  $\Delta H_C$ 는 연료의 연소열을 나타낸다. 완전연소 반응에서 연소되는 연료의 양에 대한 산소의 소모율은 식 (6)과 같이 계산된다.

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

$MW$ 와  $v$ 는 종의 분자량과 완전연소반응 상수를 각각 나타낸다. 따라서 체적열원 내 연료와 산소의 반응에 의해 생성되는 연소생성물의 질량생성률은 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 연구에서는 실제 터널의 크기를 1/35로 축소된 모형

을 모델화하여 실험한 결과를 바탕으로 입력조건 및 초기조건을 설정하였다. 수치해석을 위해 Fig. 2와 같이 길이 10m, 높이 0.19m, 폭 0.26m를 갖는 두 개의 터널과 터널 사이에 1.14m의 간격으로 길이 0.57m, 높이 0.12m, 폭 0.114m의 교행로를 503,570개의 격자로 구성하였다. 수치해석은 상용 프로그램인 FLUENT(Ver.6.3)을 이용하여 모형터널과 같은 각 조건에 대하여 계산하였다.

초기 조건으로 계산영역은 대기압에 대해서 계산되었으며, 초기 온도는 실험에서 측정된 초기 온도값을 적용하였다. 해석모델에서 터널 외벽 조건은 두께가 2mm인 철이 외부와 열교환이 일어나고 있는 실험 조건에 대해서 벽면 경계조건을 부여하였다.

터널 내 화재 위치에 따른 영향을 알아보기 위해서 Fig. 3과 같이 터널 중앙화재와 터널입구에서 2m 떨어진 지점에서 화재를 발생시켜 수치해석 하였다. 배연 효과를 알아보기 위해서 화원을 기준으로 가장 가까운 곳에 위치한 터널 천장의 댐퍼를 열어 사고터널의 배기를 실시하였다. 배기 장치의 배기유량을 결정하기 위해서는 실제 터널의 배기유량(110cms)을 Froude 수 상사하여[7] 적용하였으며, 그 결과 축소터널의 배기유량은  $1.53 \times 10^{-2} \text{cms}$ 로 계산된다.

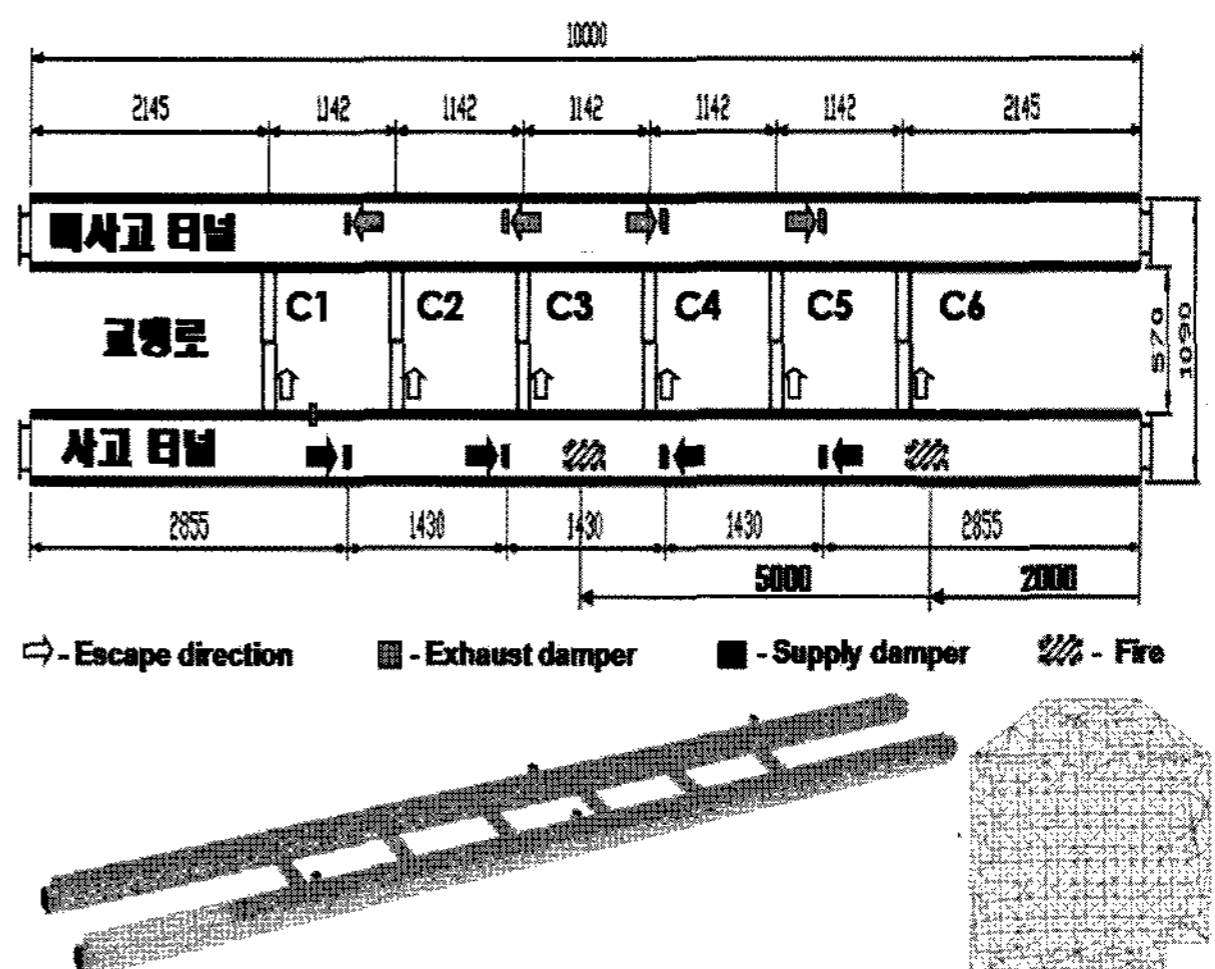


Fig. 3. Schematics of the modeled railway tunnel

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 터널 중앙에서 화재가 발생한 경우

터널 중앙의 자연배기 조건에서 실험을 실시하여 얻은 화원 결과를 바탕으로 임의의 체적 내 열원 및 연기질량을 발생시켜 열확산 및 연기유동에 대한 3차원 비정상 유동해석을 수행하였다. Fig. 4는 터널 천장으로부터 5mm 높이의 온도분포를 예측한 값과 실험을 통해 측정된 온도값을

비교하였다. 장치의 작동 여부와 상관없이 화재발생 후 초기단계(50초)에서 실험을 통해 측정된 온도가 예측된 결과 값 보다 높게 나타난다. 이것은 터널경계면에서 발생하는 열전달에 의해 나타나는 오차로 시간이 지나면서 전반적으로 잘 일치하고 있다.

Fig. 5는 CO<sub>2</sub> 가스 농도분포를 시간에 따라 나타낸 결과이다. 피난 시 사람의 호흡선 높이를 예측하기 위해서 실제터널의 교행로 바닥면으로부터 1.5m에 해당하는 높이를 Froude 수 상사를 적용하여[7] 축소터널의 교행로 바닥면으로부터 4cm 높이를 설정하였다. 그 결과 화원에서 가장 멀리 떨어진 C1과 C6 교행로를 통해서 CO<sub>2</sub>가스가 비사고터널로 넘어가는 것을 확인할 수 있었으며, Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)에 나타난 온도분포를 통해서 화원으로부터 3m 떨어진 C1과 C6 교행로가 위치한 곳은 열원이 도달하지 않으며 연층은 하강하여 교행로 전면에 분포되면서 하부에 개방된 비사고터널로 유입된다. 그 결과 사고터널에서 발생하는 연기로부터 비사고터널은 위협받을 수 있으며 사고터널 내 환기 시스템 중 배기장치의 운영이 필요할 것으로 판단된다.

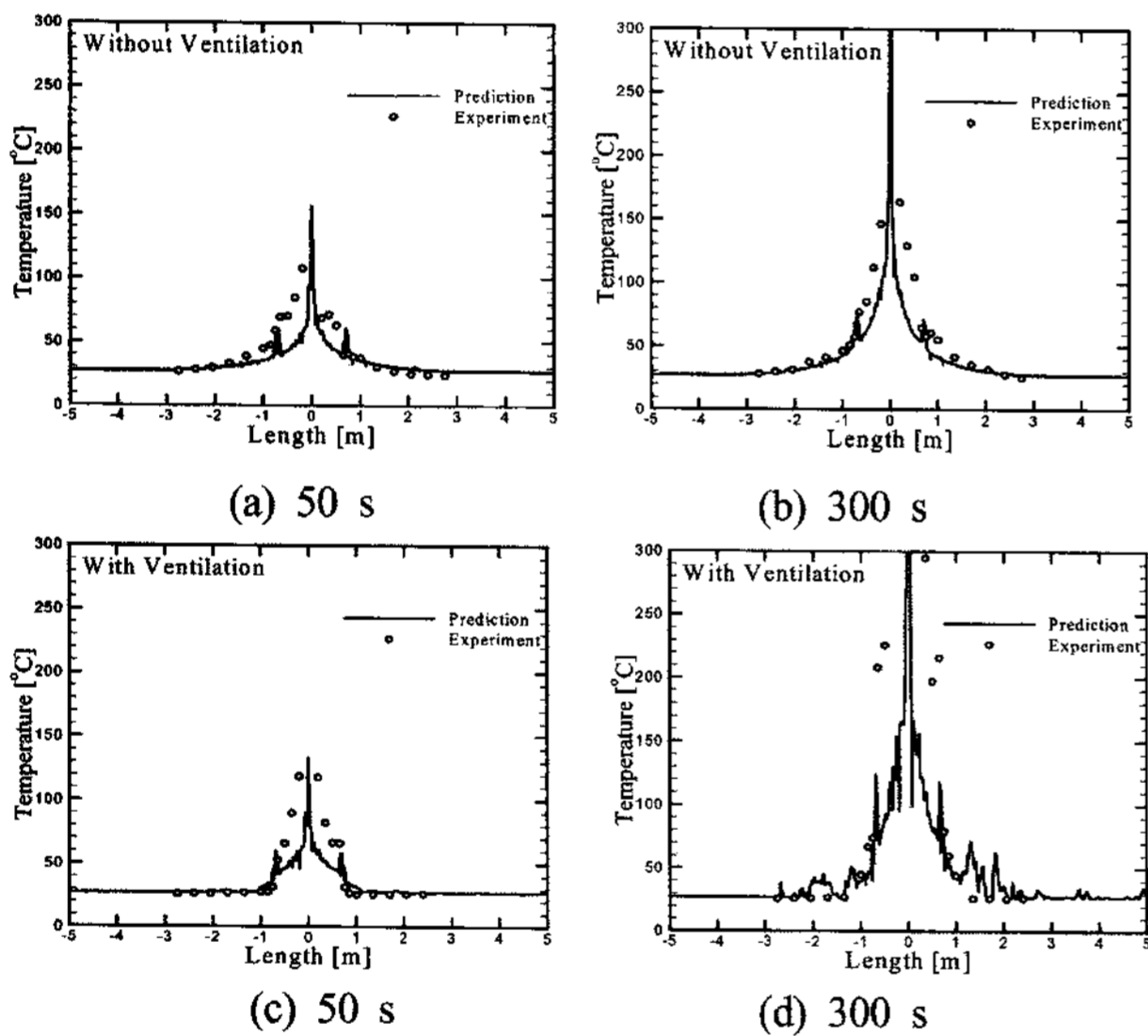


Fig. 4. Comparison of estimated ceiling temperature with measurement

Fig. 6은 배기장치 작동 시 화원 부근으로만 연소 생성물이 존재한다. 이것은 배기장치 작동으로 상부에 설치된 댐퍼를 통해서 외부로 유출되고 있으며, 터널내부의 연층이 하강하지 않고 있어 호흡선 높이까지는 영향을 주지 못하고 있다.

Fig. 7은 배기장치가 작동하지 않는 경우 화재 발생 후 600초일 때의 결과이다. 교행로 내 CO<sub>2</sub>가스 농도분포 및 속도분포를 나타낸다. 화원과 가까운 곳에 위치한 C4 교행로의 경우, 화염으로부터 발생한 열원에 의해 뜨거워진 연

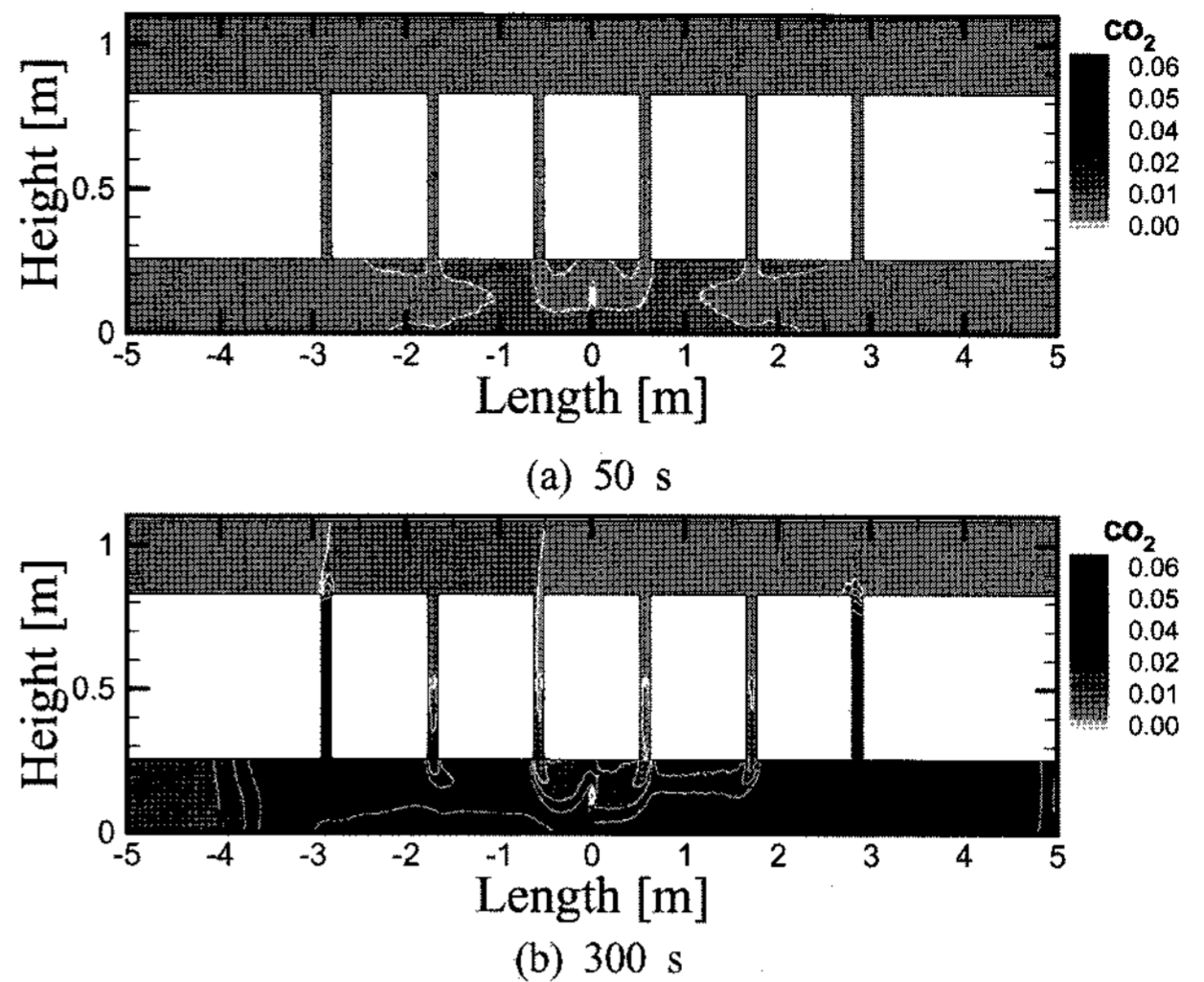


Fig. 5. Predicted CO<sub>2</sub> distribution without ventilation

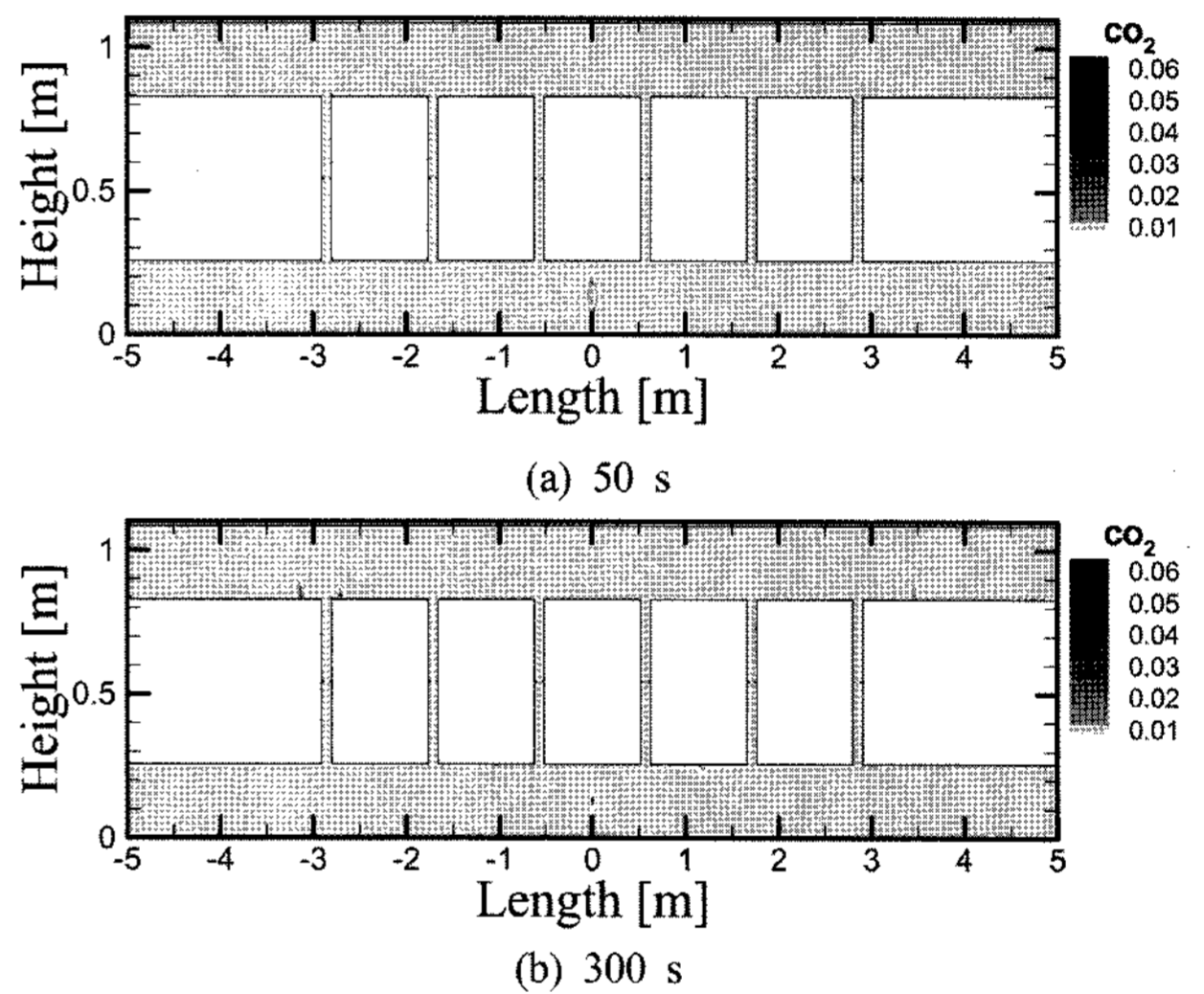


Fig. 6. Predicted CO<sub>2</sub> distribution with ventilation

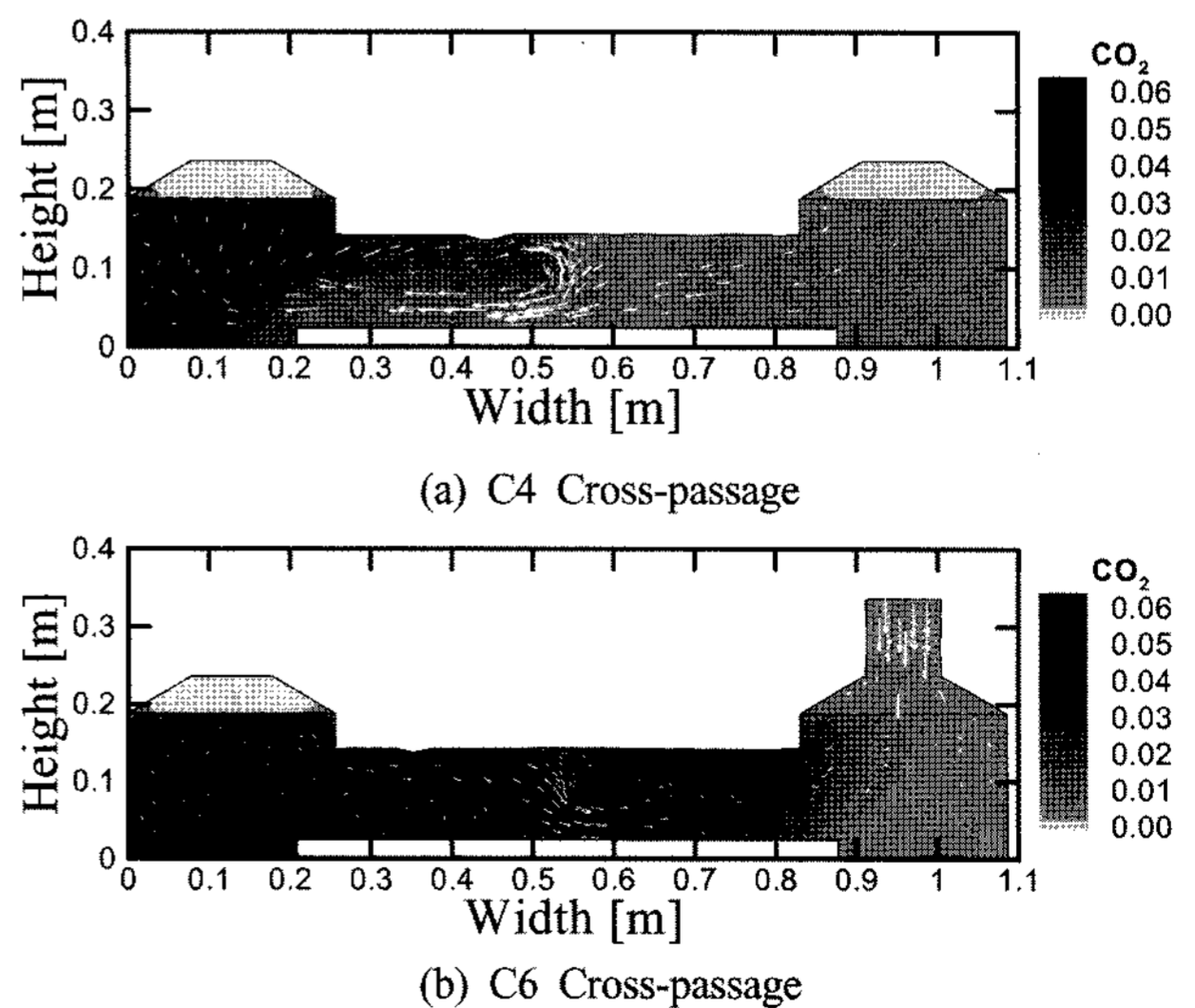


Fig. 7. Predicted CO<sub>2</sub> distributions and flow velocities inside the cross-passage at 600 s (without ventilation)

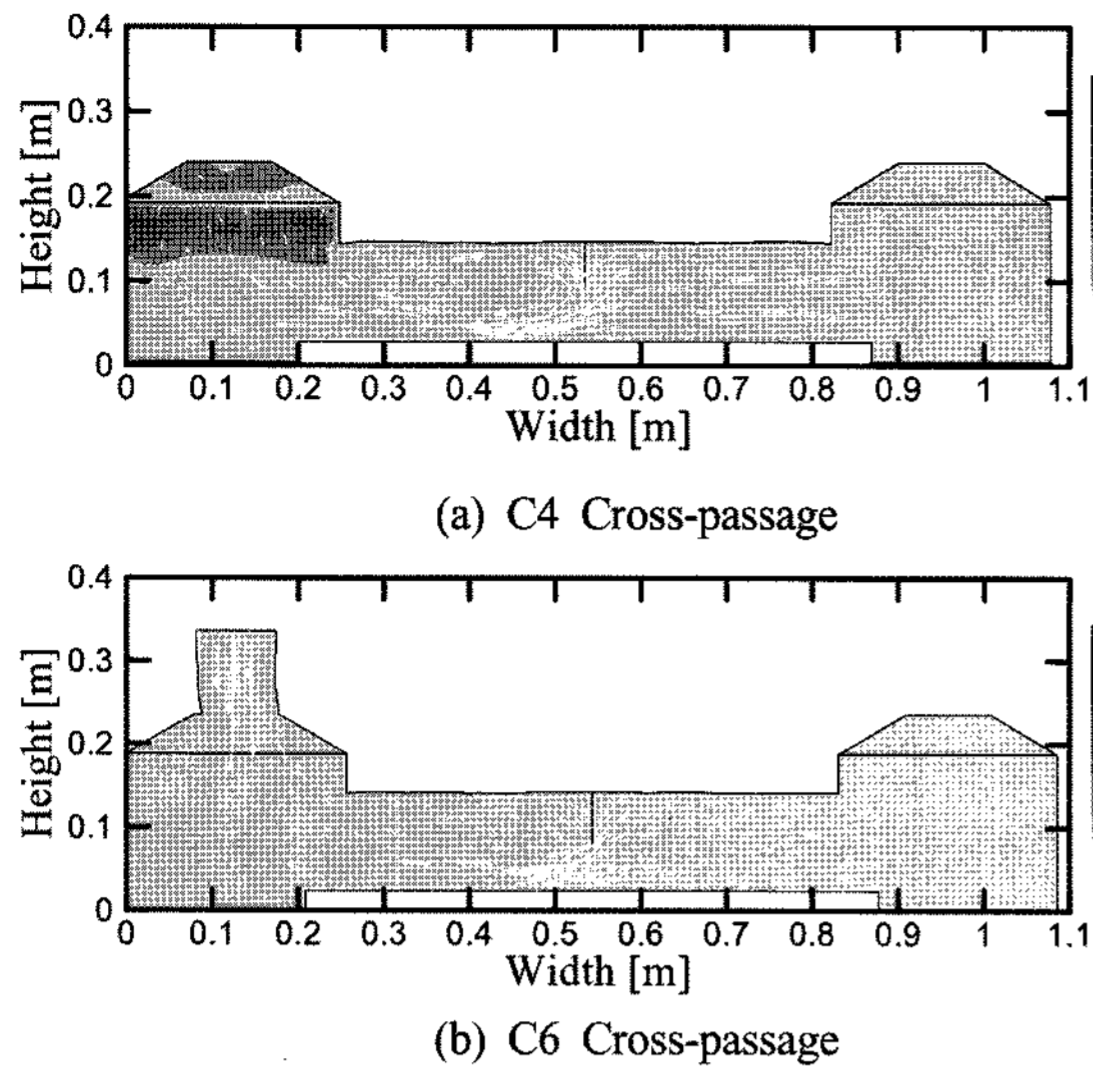


Fig. 8. Predicted CO<sub>2</sub> distributions and flow velocities inside the cross-passage at 600 s with ventilation

기는 부력의 영향으로 상승하면서 상부에 위치한 방화벽에 막혀 비사고터널에 영향을 주지 못하고 있다. 또한 하부에 개방된 방화문을 통해서 비사고터널의 차가운 공기가 유입됨을 알 수 있다. 그 결과 배기장치가 작동하지 않는 경우에 대해서도 화재 안정성을 확보한다. 하지만 비교적 화원에서 멀리 떨어진 C6 교행로의 경우 화원으로부터 발생한 열원의 영향을 받지 않고 있어 교행로 내부의 연증이 하강하여 전면에 분포하게 된다. 그 결과 하부에 개방된 방화문을 통해서 유입됨을 속도벡터의 방향 및 CO<sub>2</sub>가스 농도 분포를 통해서 확인할 수 있다.

Fig. 8은 배기장치가 작동 시 화재 발생 후 300초의 결과이다. 화원과 가까운 곳에 위치한 C4 교행로의 경우 교행로 높이까지 연증이 도달하지 못하고 있다. 이 결과는 터널 천장에 위치한 댐퍼로부터 연소생성물이 외부로 유출되고 있어 C4에서 C6의 모든 교행로에 영향을 주지 못하고 있다.

### 3.2 터널 입구 영역에서 화재가 발생한 경우

터널 입구 쪽에서 2m 떨어진 지점으로부터 화재가 발생했을 경우에 대해서 실험에서 얻은 화원 실험 결과를 바탕으로 해석을 수행하였다. Fig. 9는 터널 천장의 온도분포를 실험결과와 수치해석의 결과와 잘 맞고 있어 예측결과를 검증하고 있다.

Fig. 10은 교행로 바닥면에서 높이 4cm(실제터널 높이 1.5m)로 화재 발생시 교행로를 통해서 피난하는 사람의 호흡선에 높이에 대해서 CO<sub>2</sub>가스 농도분포를 확인하였다. 배기장치가 작동하지 않는 경우, 화원에서 발생한 열원이 도

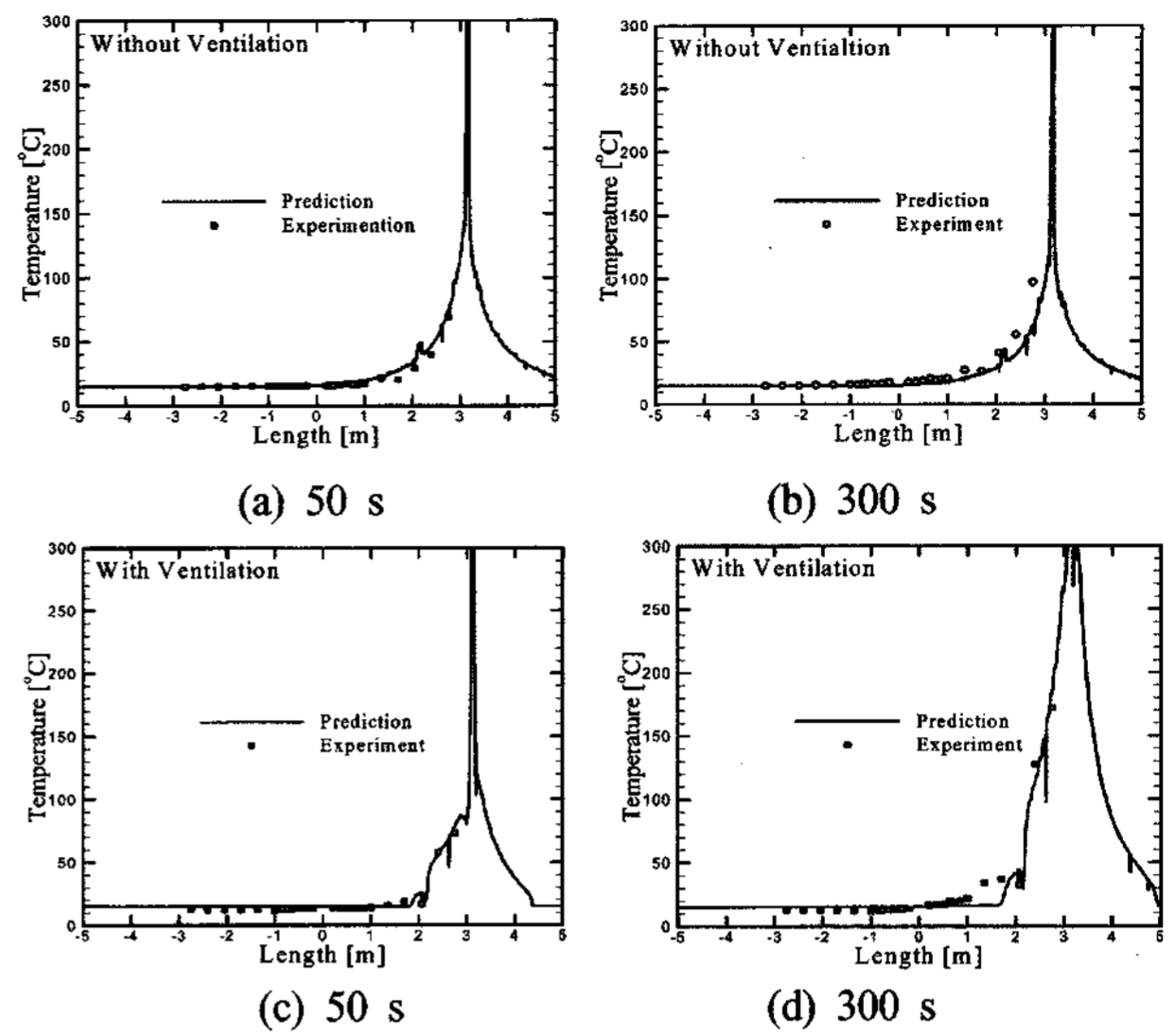


Fig. 9. Comparison of estimated ceiling temperature with measurement

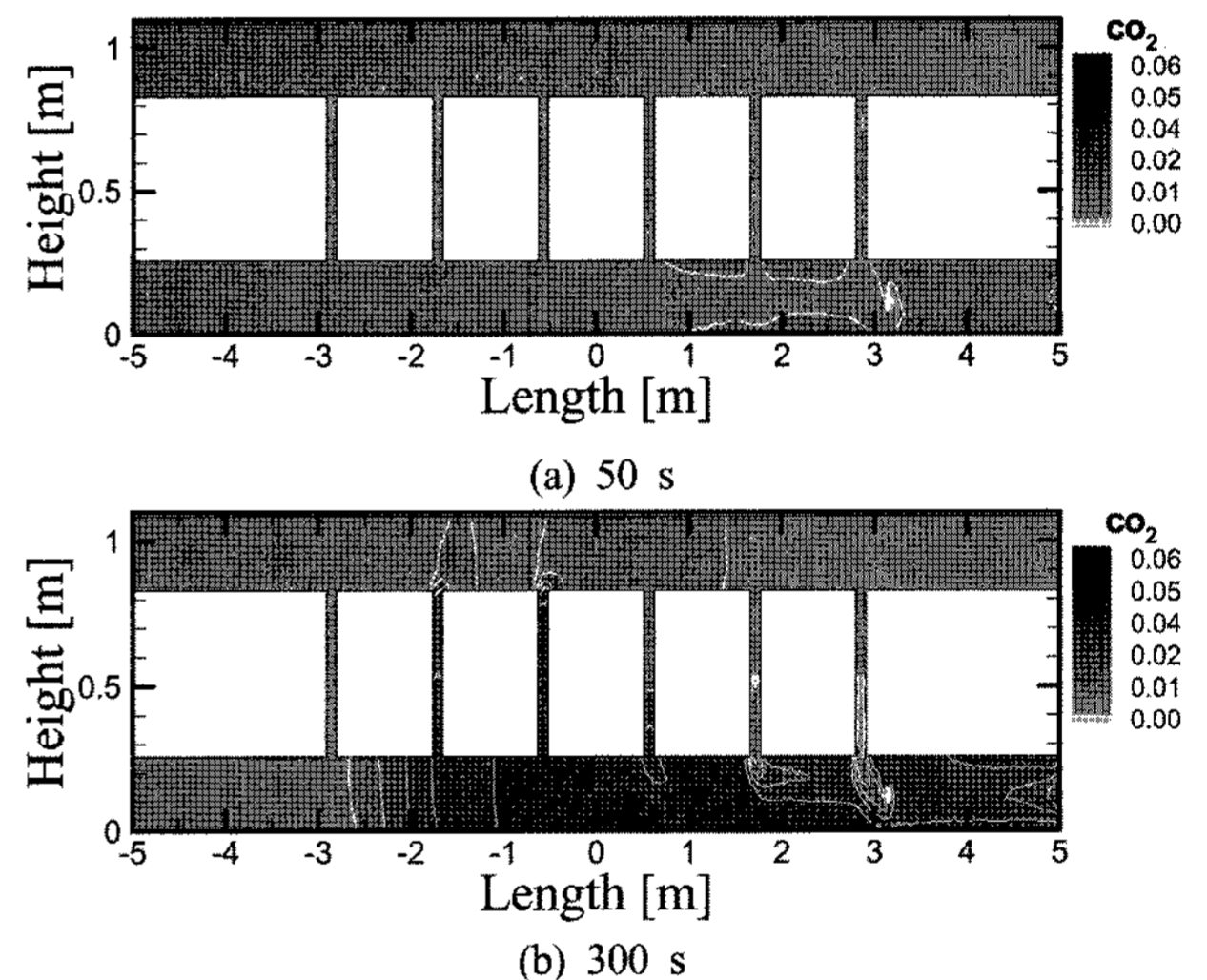


Fig. 10. Predicted CO<sub>2</sub> distribution without ventilation

달하는 교행로의 경우 연증이 상부에 위치하여 상부의 방화벽에 막혀 비사고터널에 영향을 주지 못하고 있으나, 화원에서 발생한 열원이 도달하지 않는 C4과 C5 교행로의 연증이 전면에 분포하고 있어 하부에 개방된 방화문을 통해서 비사고터널로 유입되고 있다. 그 결과 화원과 가까운 곳에 위치한 교행로보다 화원으로부터 멀리 떨어진 교행로에 대해서 화재 방재 설계 및 배기장치의 운영이 고려되어야 한다.

Fig. 11은 배기장치 작동하는 경우 모든 교행로에서 CO<sub>2</sub>가스가 유입되지 않는 것을 확인할 수 있다. 또한, Fig. 9(c) Fig. 9(d)의 결과에서 화원으로부터 1.5m 지점까지 열이 확산되고 있으며, 화원으로부터 1.3m 떨어진 지점에 위치한

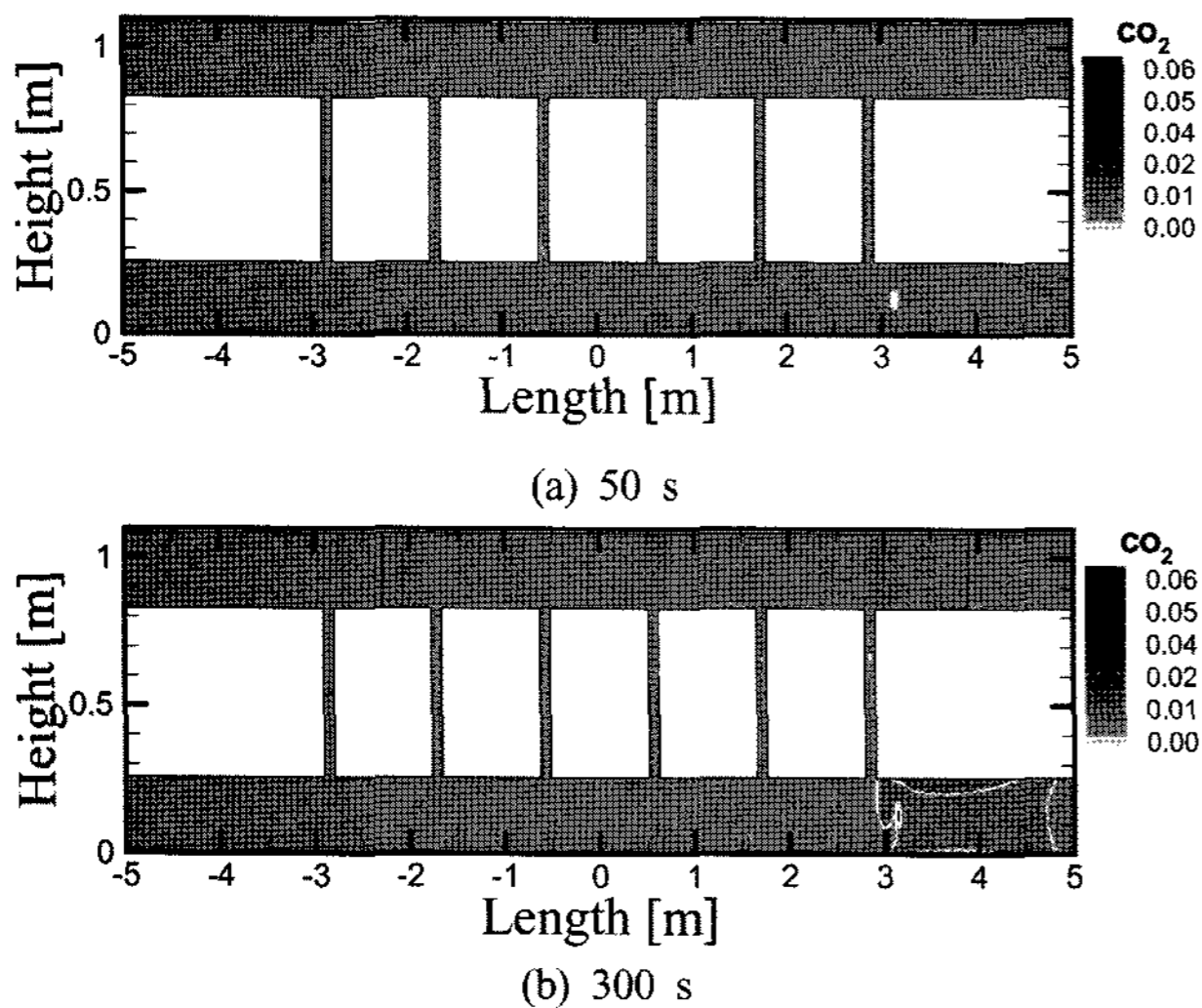


Fig. 11. Predicted CO<sub>2</sub> distribution with ventilation

댐퍼를 통해서 화원의 열 및 연기가 댐퍼 부근 이상으로 확산되지 않는 것을 확인하였다.

#### 4. 결 론

본 연구 결과를 통해 얻어진 결론은 다음과 같다.

1) 화원에 의해서 생성된 연소생성물의 연기 분포를 확인하였다. 화원에서 멀리 떨어진 교행로를 통해서 CO<sub>2</sub>가스가 사고 터널로 전파되고 있어 사고지점 근처의 교행로 보다는 멀리 떨어진 교행로가 위험할 수 있으며, 그 결과 배기 시스템 작동 설계 및 방재 시설 설치가 필요로 한다.

2) 화재 발생 시 터널 내부에 배기장치를 작동시켜 배연의 효과를 확인해본 결과 배기장치 작동 시 상부에 위치한 댐퍼를 통해서 연소생성물이 외부로 유출되고 있으며, 부력에 영향으로 상승한 연층은 하강하지 못하고 터널 천장에만 위치하게 된다. 또한, 교행로에 형성된 속도벡터를 통해서 비사고터널의 차가운 공기가 사고터널로 유입되고 있어 사고터널의 배기장치 작동만으로도 화재 안정성을 확보할 수 있었다.

3) 화원에 의해서 생성된 연소생성물의 연기 분포를 확인하였을 때 화원에서 멀리 떨어진 교행로에서 연층이 교행로 전면에서 분포하면서 비사고터널로 연기가 유입되고 있다. 이 결과는 사고지점 근처의 교행로보다는 멀리 떨어진 교행로가 위험할 수 있으며 이에 대한 배기 시스템 작동 설계 및 방재 시설 설치가 필요로 한다. 이러한 기초 연구결과를 토대로 향후 통기력 및 열차풍에 대한 환경적인 영향을 고려한 연구가 추진될 필요가 있다.

#### 후 기

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

#### 참 고 문 헌

1. Fathi, T., Rudolf B., Samuel N., Jegal K. S. and Kim D. S. (2000). "Ventilation and Risk Control of the Young Dong Rail Tunnel in Korea," The First International Conference on Major Tunnel and Infrastructure Projects.
2. FLUENT Ver. 6, (2006). "User's Guide," ANSYS Inc.
3. Zhou, X. C. and Gore, J. P. (1995). "Air Entrainment Flow Field Induced by a Pool Fire," Combustion and Flame, Vol. 100, No. 1, pp.52-60.
4. Megret, O. and Vauquelin, O. (2000). "A Model to Evaluate Tunnel Fire Characteristics," Fire Safety Journal, Vol 34, pp.393-401.
5. McCaffrey, B. J. (1995). "Flame Height," SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, 2nd ed., pp.1-31.
6. Kim, S. C. and Lee, S. H. (2006). "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.
7. Quintiere, J. G. (1989). "Scaling Application in Fire Research, Fire Safety Journal," Vol.15, No.1, pp.3-29.

접수일(2008년 5월 16일), 수정일(2008년 6월 20일), 게재확정일(2008년 6월 20일)