

## 터널화재시 환기방식에 따른 연기거동에 관한 실험적 연구

이 성 룡, 정 진 용, 김 충 익\*, 유 흥 선\*\*

중앙대학교 기계공학부 대학원, \*중앙대학교 기계공학부

### An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires According to Ventilation Method

Sung Ryong Lee, Jin Yong Jeong, Choong Ik Kim\*, Hong Sun Ryou\*\*

Graduate School, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

\*Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea

(Received March 28, 2002; revision received July 19, 2002)

**ABSTRACT:** In this study, reduced-scale experiments were conducted to analyze smoke movement in tunnel fires according to ventilation method. The 1/20 scale experiments were carried out under the Froude scaling using gasoline pool fires ranging from 6.6 to 10 cm in diameter corresponding to total heat release rate from 0.714 to 2.5 kW. Temperatures near the ceiling were lowered by installing the vent, and much lowered by operating fan compared with the case without vent. In case of forced ventilation, the exhaust fan was more effective than the intake fan. Vertical temperatures at the upper part of the tunnel were also lowered by installing the vent. But, when suction fan was operated, temperatures at the lower part of the tunnel were higher than that without vent.

**Key words:** Tunnel fire(터널화재), Smoke movement(연기거동), Ventilation(환기), Froude scaling(Froude 상사).

#### 기 호 설 명

$A$  : 풀 면적 [ $m^2$ ]

$D$  : 풀 직경 [m]

$H_c$  : 연소열 [MJ/kg]

$L$  : 터널 길이 [m]

$\dot{m}''$  : 연료증발량 [ $kg/m^2s$ ]

$\dot{Q}$  : 발열량 [kW]

$T$  : 온도 [K(°C)]

$t$  : 시간 [s]

$\dot{V}$  : 체적유량 [ $m^3/s$ ]

$V$  : 속도 [m/s]

$z$  : 높이[m]

#### 그리스 문자

$\rho$  : 밀도 [ $kg/m^3$ ]

#### 상첨자

$k\theta$  : 소화-흡수계수 [ $m^{-1}$ ]

#### 하첨자

$\infty$  : 무한반경

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5280; fax: +82-2-813-3669

E-mail address: cfdmec@cau.ac.kr

*amb* : 주위  
*F* : 실물 모델  
*i* : 경계  
*M* : 축소 모델  
*top* : 열전대 최상부

## 1. 서 론

1829년 영국 리버풀시 교외에서 사상 최초의 철도 터널이 구축되었으며 1830년대에 파리에서 대규모의 하수도터널이, 1863년 런던에서는 세계 최초의 지하철이 개통되었다. 20세기에 들어서면서 도시들이 대형화되고 인구의 도시집중화 현상이 발생하였다. 이로 인해 도시로 집중되는 교통을 처리하기 위한 도시내 도로망 정비에 있어서도 지하공간은 생활환경의 보전이나 토지의 입체적 활용에 의한 고도이용 등의 관점에서 유용한 구조형식이다. 우리나라는 산악지대가 많기 때문에 간선도로망의 정비에 있어서 도로선형의 확보와 자연경관의 보전을 위해 터널의 건설이 활발히 진행되고 있다. 그러나 터널내에서 차량충돌 등 사고가 발생하였을 경우, 신속한 조치를 취하지 않으면 2차적인 화재를 발생시킬 위험성이 있다. 또한 공간이 한정된 특수한 환경에 있으므로 소방대원들이 화재현장에 접근하기 곤란하고, 발화점의 파악이 힘들어 화재가 확대되어 큰 재난이 될 가능성이 있다.

터널 화재에 대한 연구로서, Kumar<sup>(1)</sup>는 터널 화재에 대한 현상을 물리적이고 화학적인 과정에 대한 기초적인 설명과 함께, 통풍 효과와 터널 방재의 평가 및 설계를 위한 간단한 수학적 모델들을 적용했으며, Fletcher<sup>(2)</sup>는 통풍장치가 설치된 터널에서  $k-\epsilon$  모델을 사용하여 field 모델링 관점에서 풀 화재가 발생하였을 때 연기거동에 대하여 수치해석하였다. 화재시 역기류를 방지하기 위한 임계속도에 관한 연구결과 발열량이 작은 화재의 경우 임계속도가 발열량의 1/3승에 비례하지만 화염 높이가 터널 높이 이상이 되는 경우 발열량에 무관하다는 것을 보여주었다.<sup>(3-5)</sup> 또한 수치해석을 이용하여 터널화재시 배기속도와 연층온도 분포를 해석하였다.<sup>(6-9)</sup> 국내의 연구로는 김상훈 등<sup>(10)</sup>이 축소모형 실험을 실시하여 연기의 거동을 해석하였으며 이를 수치해석 결과와 비교하였으며, 이성룡 등<sup>(11,12)</sup>은 수평 환기구를 설치하

여 환기구의 설치효과와 환기구의 위치변화에 따른 연기의 거동에 관한 축소실험을 실시하였다.

터널 안에서 화재가 발생하였을 경우 열에 의한 손상 이외에 독성가스에 의해 사고가 확대되고 피해가 커질 수도 있으므로 적절한 배연설비를 갖추지 않은 경우 대형 인명사고를 초래할 수 있다. 비상용 시설은 터널내에서 화재 및 사고가 발생한 경우 그 피해를 최소화할 목적으로 터널 연장 및 교통량에 따라 구분하여 설치한다. 비상용 시설로는 통보·경비설비, 소화설비, 피난 유도설비, 기타 급수전 및 물분무설비 등의 비상용 시설이 있으며 배연설비는 환기시설에 준하여 사용되고 있다. 이와 같이 환기시설을 화재발생시 배연시설로 사용하기 위해 보다 많은 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 환기구가 설치된 터널내 팬의 사용 유무와 팬가동 방향에 따른 배연효과를 평가하기 위하여 환기구가 설치된 모형터널을 제작하여 실험을 실시하였다. 환기구 설치에 따른 배연효과와 연기의 거동을 해석하여 터널 방재계획의 수립과 방재시스템 설계시 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험터널

터널 내에서의 화재성상에 관한 실험에 사용된 터널은 폭 8m, 높이 8m, 길이 180m 크기의 실물 터널공간을 길이에 대해 1/20로 축소하였다. 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 1m의 내부 공간에 1cm의 두께를 갖는 투명 아크릴로 모형을 제작하여 9개의 모형을 연결하였다. 내경이 7.5cm, 높

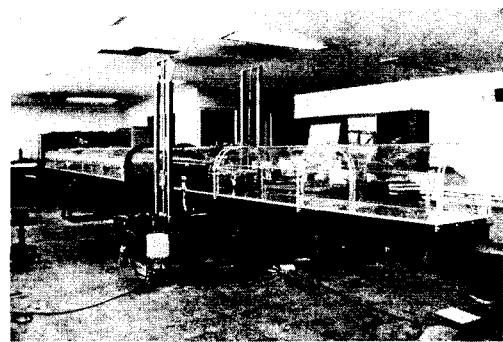


Fig. 1 Photograph of the reduced tunnel.

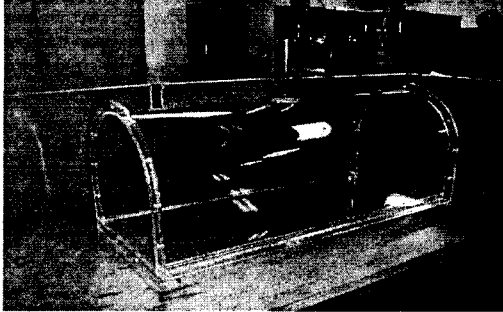


Fig. 2 Photograph of the vent section.

이 0.6 m의 환기구를 화원으로부터 3 m 떨어진 곳에 위치시키고, 화원의 지름을 6.6 cm부터 10 cm까지 변화시켜 가며 축소실험을 실시하였다.

열에 의한 변형을 방지하기 위해 화원부의 모형은 강철로 제작하였다. 축소터널과 환기구부 모형의 사진을 Fig. 1과 Fig. 2에 나타내었다.

### 2.2 실험장치

축소터널 내부에서의 온도변화를 측정하기 위하여 0.32 mm 두께의 T-타입 열전대를 설치하였다. 온도센서를 갖고 있는 DT730-T 스크류 터미널과 데이터 수집 보드인 DT3003-PGL을 사용하여 열전대로부터 들어오는 데이터를 얻었다. 데

이터 수집 소프트웨어인 HP VEE를 사용하여 프로그래밍한 전압을 온도로 변환시켰다. 천장 아래에서의 연기전과 속도를 측정하기 위해 천장 아래 2 cm 위치에 19개(T1~T19), 환기구 주변의 수직온도 분포를 측정하기 위해 환기구 전후 1 m 위치에 높이 방향으로 12개(T20~T31)의 열전대를 설치하였으며 터널의 개략도와 열전대의 측정 위치를 Fig. 3에 나타내었다. 팬으로 CPU용 냉각 팬을 사용하였으며 디지털 마노미터로 유량을 측정한 결과 유량은 0.00644 m<sup>3</sup>/s이었다. 환기구 하단으로부터 20 cm 떨어진 동일위치에 배기팬과 급기팬을 각각 설치하였으며 화재발생 감지시간을 고려하여 화재발생 30초 후 팬이 가동하도록 하였다.

### 2.3 화 원

실험에 직경이 다른 4개의 화원(6.6 cm, 7.3 cm, 8.3 cm, 10 cm)을 사용하였으며 가연물질로 휘발유를 사용하여 모형터널의 입구에서 3.5 m 떨어진 곳에 화원을 설치하였다. Pool 화재의 경우 발열량은 다음의 식에 의해 얻어진다.<sup>(13)</sup>

$$\dot{Q} = H_c \dot{m}'' A \quad (1)$$

여기서, 휘발유의 경우  $\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}''(1 - e^{-k\theta D})$ ,

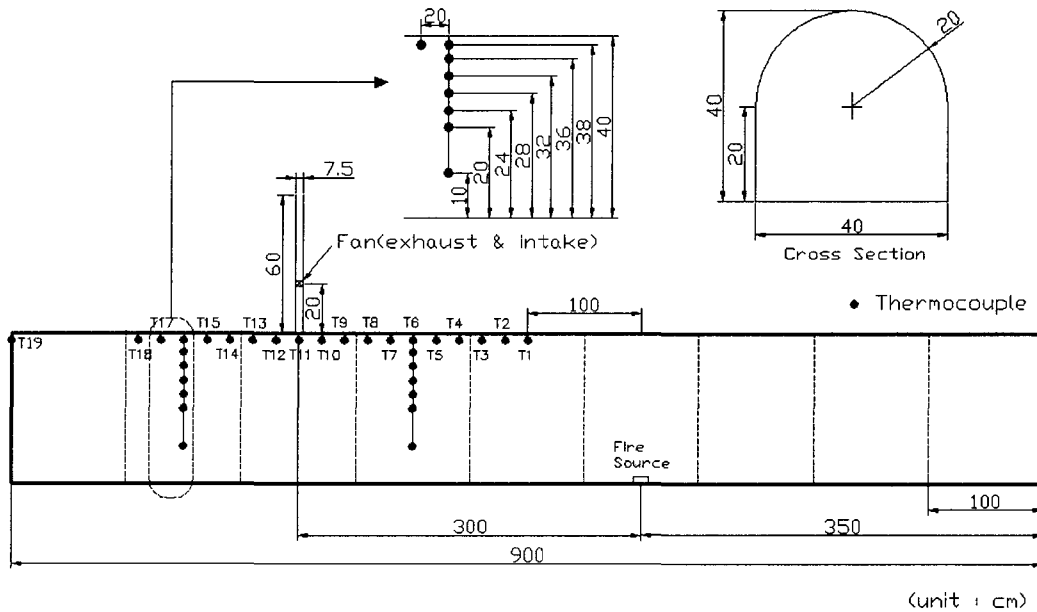


Fig. 3 Schematic of the reduced tunnel and the position of thermocouples.

$H_c=43.7$  MJ/kg,  $\dot{m}_\infty''=0.055$  kg/m<sup>2</sup>s,  $k\theta=2.1$  m<sup>-1</sup>이다.

증발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소효율을 0.7로 고려하여 발열량을 계산하였다.<sup>(14)</sup>

2.4 축소법칙

터널내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude No.가 가장 중요하며 이에 따라 본 축소실험에서는 'Froude' Scaling을 사용하였다.

축소터널과 실제 터널의 온도, 밀도, 시간, 속도, 체적유량, 발열량 사이의 관계는 다음 식과 같다.<sup>(15)</sup>

$$T_M = T_F \tag{2}$$

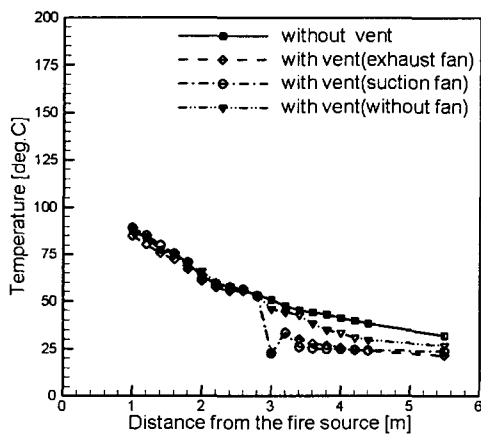
$$\rho_M = \rho_F \tag{3}$$

$$\frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \tag{4}$$

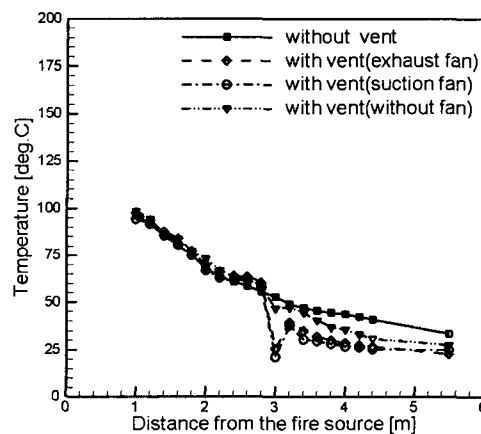
$$\frac{\dot{V}_M}{\dot{V}_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2} \tag{5}$$

$$\frac{\dot{Q}_M}{\dot{Q}_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2} \tag{6}$$

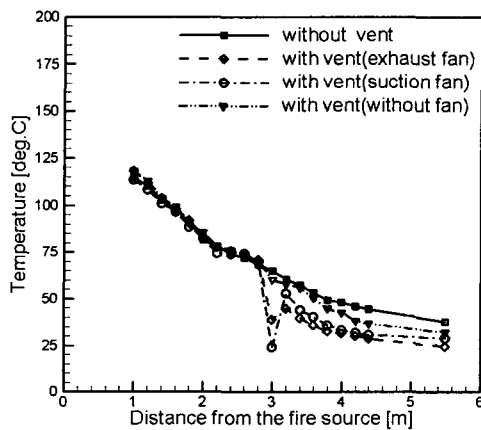
축소 법칙에 따라 축소 모형의 발열량과 실제 터널에서의 발열량으로 환산한 값을 Table 1에 나타내었다. 실험 터널팬의 유량을 실제 터널팬



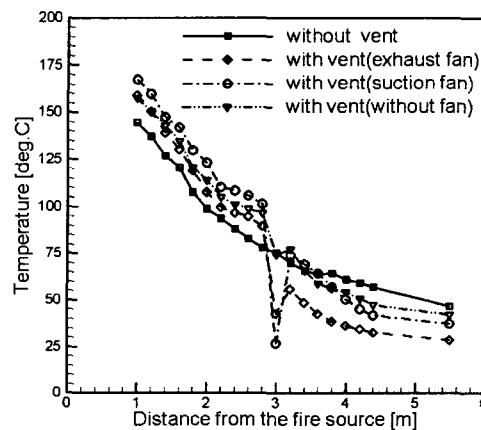
(a) 0.714 kW fire



(b) 1.0 kW fire



(c) 1.46 kW fire



(d) 2.5 kW fire

Fig. 4 Ceiling temperature distributions in the tunnel at 200 s.

Table 1 The model and full-scale heat release rate in each pool

D (cm)	$\dot{Q}_M$ (kW)	$\dot{Q}_F$ (MW)
6.6	0.745	1.333
7.3	1.0	1.79
8.3	1.46	2.629
10	2.5	4.482

의 유량으로 환산하면 11.52 m<sup>3</sup>/s가 된다.

3. 실험결과 및 고찰

터널내 화재가 발생하면 높은 온도로 인한 주위 공기와의 밀도차에 의한 부력으로 인해 주위

공기의 유입이 이루어져 연기가 상승해 천장에 도달한 후 천장을 따라 천장제트를 형성하며 터널의 길이 방향으로 전파된다.

터널 내에는 화재시 발생하는 열, 빛, 연기로 화재발생을 검출하는 화재감지기가 설치되어 있으므로 천장 아래 연층의 온도분포를 파악하는 것이 중요하다. 따라서 본 연구에서는 시간경과에 따른 천장에서의 온도분포를 측정하였다.

화재발생 200초 후 천장 아래 2 cm에서 화재발열량에 따른 터널 길이 방향의 온도분포를 Fig. 4에 나타내었다. 환기구를 설치함으로써 환기구 통과 후 연층의 온도가 감소하였으며 팬을 가동한 경우가 가동하지 않은 경우에 비해 온도 감소 효과가 우수한 것을 확인할 수 있다. 1kW 이하 화재의 경우 팬 가동 방향에 관계없이 비슷

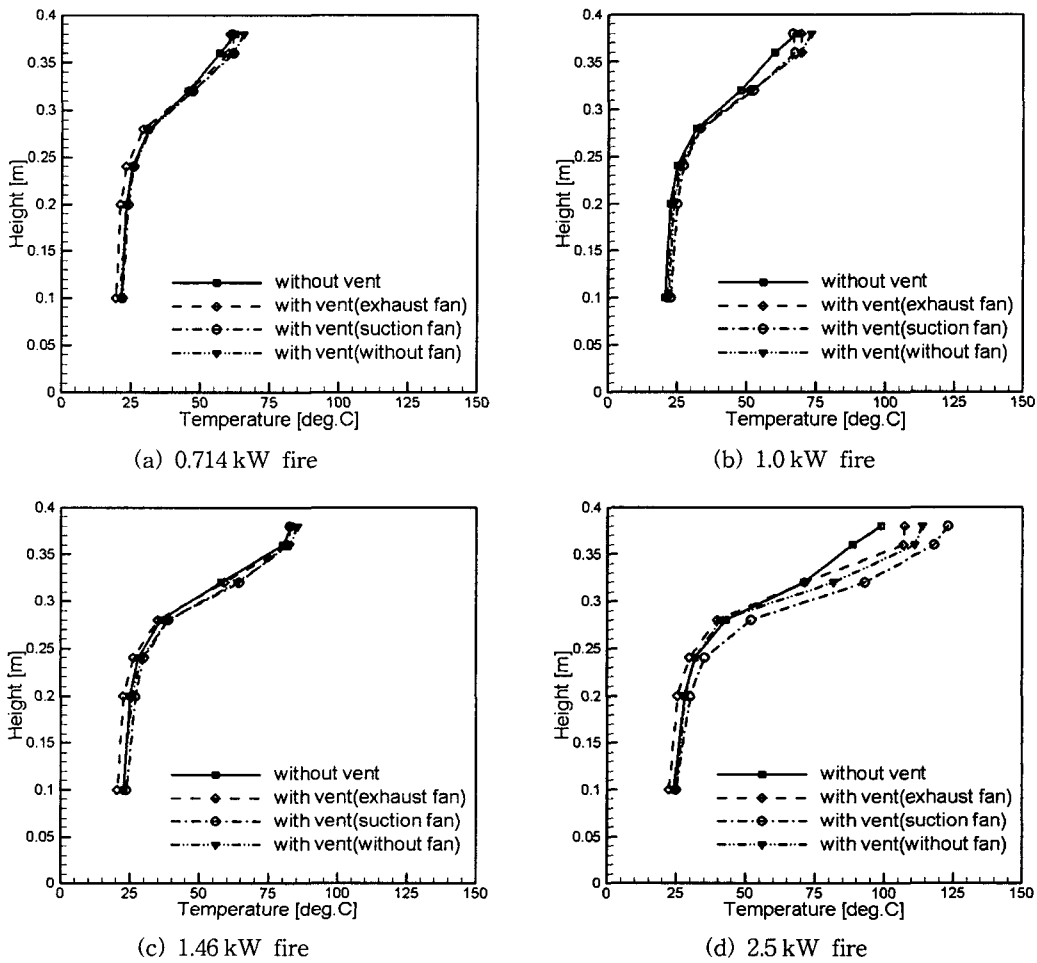


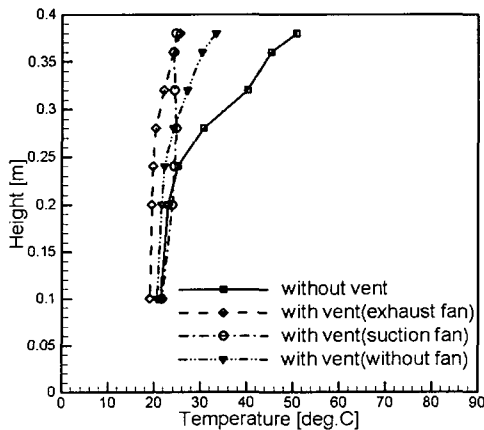
Fig. 5 Vertical temperature distributions 1 m upstream from the vent at 200 s.

한 효과를 얻었으나 1.46 kW 이상 화재의 경우 배기팬을 가동한 경우가 급기팬을 가동한 경우보다 온도감소 효과가 우수하다. 이는 배기팬을 가동하는 경우 터널 하부의 차가운 공기가 함께 환기구로 유출되면서 뜨거운 연기와 혼합으로 인해 연층의 온도가 더 감소하는 것으로 사료된다. 2.5 kW 화재에서 환기구 통과 전 천장에서 온도가 환기구 설치 전에 비해 상승하는 것을 확인할 수 있는데, 화원으로 공급되는 공기량의 증가와 휘발유가 끓어오르는 현상으로 인해 오히려 화재를 확대시킬 위험성을 내포하고 있으므로 이에 대한 고려가 필요하다.

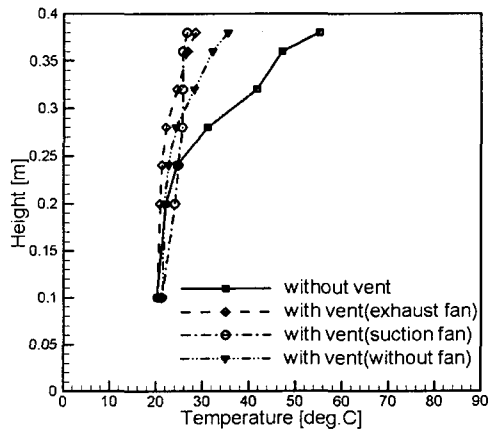
피난시 연층의 하강 정도는 유독가스에 의한 대피자의 안전 및 시계장애로 인한 심리적인 측면에서도 상당한 영향을 끼친다.

Fig. 5에 화재발생 200초 후 환기구 상류 1 m에서의 화재발열량에 따른 수직온도분포를 나타내었다. 1.46 kW 이하 화재의 경우 환기구 설치 전과 비교하여 거의 차이가 없으나 2.5 kW 화재에서는 환기구를 설치함으로 인해 오히려 온도가 증가하였다. 터널 하부에서의 온도감소 효과는 배기팬을 가동한 경우, 가장 좋은 효과를 보이고 있으며 급기팬을 가동한 경우, 하부온도가 오히려 증가하여 대피시 장애요인으로 작용할 위험성이 있다.

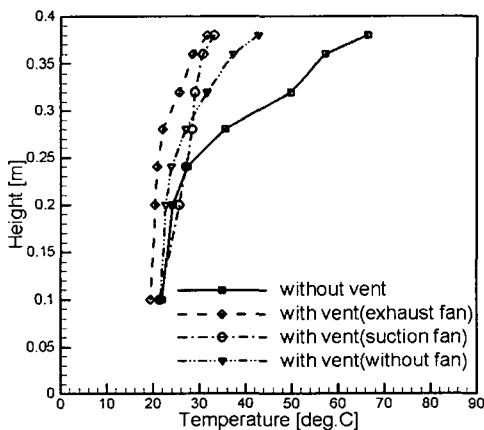
Fig. 6에 화재발생 200초 후 환기구 하류 1 m에서의 화재발열량에 따른 수직온도 분포를 나타내었다. 환기구를 설치함으로 인해 터널 상부에서 온도감소 효과를 얻을 수 있으며, 배기팬을 가동한 경우가 가장 우수한 효과를 보이고 있는



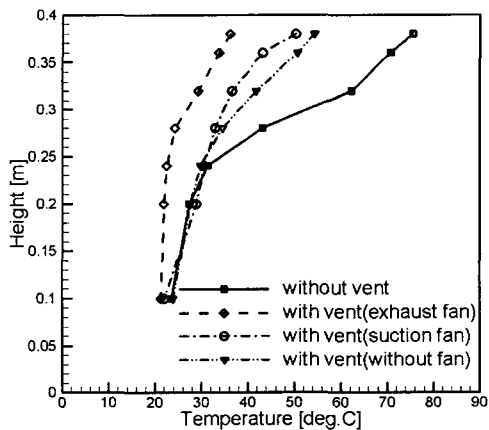
(a) 0.714 kW fire



(b) 1.0 kW fire



(c) 1.46 kW fire



(d) 2.5 kW fire

Fig. 6 Vertical temperature distributions 1 m downstream from the vent at 200 s.

며 이러한 효과는 발열량이 증가할수록 더욱 커진다. 터널 하부에서는 환기구 상류에서와 마찬가지로 급기팬을 가동한 경우 온도가 다른 방식에 비해 높은 것을 확인할 수 있다.

연층의 존재영역을 추정하는 방법으로 Cooper 등은 N퍼센트법을 사용하였다.<sup>(16)</sup>

$$\Delta T_{ref}(t) = \max [ T(z_{top}, t) ] - T_{amb}(z_{top}) \quad (7)$$

$$T(z_i, t) - T_{amb}(z_i) = N \Delta T_{ref}(t) / 100 \quad (8)$$

N값의 설정에 관해 Cooper 등은 약 10% 부근부터 15%가 적정하다고 하였다. 본 연구에서는 N값으로 10%를 사용하였다.

2.5kw 화재에 대하여 N퍼센트법을 이용한 환기구 상류 1m에서의 연층의 경계 높이를 Fig. 7에 나타내었다. 팬을 가동하지 않은 경우와 배기팬을 가동한 경우의 연층 경계 높이는 환기구가 없는 경우에 비해 상승하지만 급기팬을 가동한 경우, 연층의 경계 높이가 하강하여 대피자의 시계를 방해할 위험성이 있다. 급기팬을 가동한 경우 연층의 경계 높이가 약 0.2m까지 하강하였다. 연기거동을 녹화하여 분석한 결과, 연기가 터널 천장을 따라서 배출되는 연층의 두께는 점차적으로 감소되었으나 벽면과의 마찰 및 열전달, 환기구로의 열전달, 터널 하부로 유입되는 차가운 공기와의 혼합 등으로 인해 연기의 속도가 저하된다. 또한 부력감소로 인한 연층의 하강이 발생하게 되고, 화재발생 약 1분 후부터 하강하는 연기

는 하부에서 유입되는 공기와 함께 재유입되어 터널 내부도 연기로 가득차게 되는 것을 확인할 수 있다. N퍼센트법을 이용한 경우, 배출되는 연층의 경계 높이만 결정되었으며 재유입되는 연기의 유무를 파악할 수는 없었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 축소실험을 통하여 터널내 화재 발생시 배연방식에 따른 연기의 거동과 온도분포 등을 측정하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같다.

- (1) 터널내 환기구를 설치함으로써 연층의 두께가 감소하며 또한 환기구를 지나며 연층 온도도 감소한다.
- (2) 강제 급기팬을 설치하였을 경우, 발열량이 증가함에 따라 화원이 확대되고 터널 하부에서 연층의 두께와 온도가 증가하여 오히려 화재확대 및 피난장애 등의 위험성을 나타낸다.
- (3) 강제 배기팬을 설치하였을 경우, 자연 배기나 강제 급기팬을 설치하였을 때보다 연층의 온도감소 효과와 배연 효과가 더욱 향상된다.
- (4) 따라서 터널내 환기구를 설치하고 화재발생시 강제 배기팬을 가동하는 것이 가장 효과적이다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업(M10113000012-01A2-90000600) 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. Kumar, S., 1992, Fire Development and Smoke Spread in Tunnels - Some Modelling Consideration, Crown.
2. Fletcher, D. F. and Kent, J. H., 1994, Numerical Simulations of Smoke Movement from a Pool Fire in a Ventilated Tunnel, Fire Safety Journal, Vol. 23, pp. 305-325.
3. Oka Yasushi and Atkinson, Graham T., 1995, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safety Journal, Vol. 25, pp. 305-322.

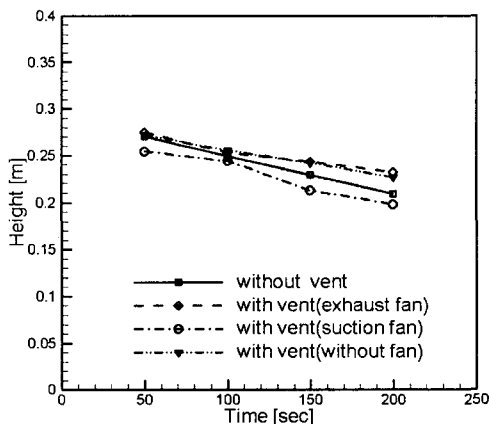


Fig. 7 Elevation of smoke interface according to N percent rule.

4. Atkinson, G. T. and Wu, Y., 1996, Smoke Control in Sloping Tunnels, *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 335-341.
5. Wu, Y. and Bakar, M. Z. A., 2000, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity, *Fire Safety Journal*, Vol. 35, pp. 363-390.
6. Woodburn, P. J. and Britter, R. E., 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part I, *Fire Safety Journal*, Vol. 26, pp. 35-62.
7. Woodburn, P. J. and Britter, R. E., 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part II, *Fire Safety Journal*, Vol. 26, pp. 63-90.
8. Chow, W. K., 1996, Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 221-236.
9. Chow, W. K., 1998, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 271-275.
10. Kim, S. H., Kim, S. C., Kim, C. I. and Ryou, H. S., 2000, A Study of Smoke Movement in Tunnel Fires, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 14, No. 2, pp. 21-32.
11. Lee, S. R., Kim, C. I. and Ryou, H. S., 2001, An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation, *J. of Korean Institute of Fire Sci. & Eng.*, Vol. 15, No. 1, pp. 1-6.
12. Lee, S. R., Park, H. T., Kim, C. I. and Ryou, H. S., 2002, An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation, *Korean Journal of Air-Conditioning and Refrigeration Engineering*, Vol. 14, No. 3, pp. 247-253.
13. Babrauskas, V., 1998, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, U.S.A.
14. Megret, O. and Vauquelin, O., 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, *Fire Safety Journal*, Vol. 34, No. 4, pp. 393-401.
15. Quintiere, J. G., 1989, Scaling Applications in Fire Research, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 3-29.
16. Cooper, L. Y., Harkleroad, M., Quintiere, J. and Rinkinen, W., 1982, An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios, *Journal of Heat Transfer*, Vol. 104, pp. 741-749.