수직갱이 설치된 터널내 화재시 연기거동에 관한 실험적 연구

이 성 룡, 유 홍 선*†, 김 충 익*
중앙대학교 기계공학부 대학원, *중앙대학교 기계공학부

An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with a Vertical Shaft

Sung Ryong Lee, Hong Sun Ryou*†, Choong Ik Kim*
Graduate School, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea
**Department of Mechanical Engineering, Chung-Ang University, Seoul 156-756, Korea*

(Received April 16, 2003; revision received December 18, 2003)

ABSTRACT: The present paper concerns a smoke movement in a tunnel fire with a vertical shaft. The model tunnel measured 13.4 m long, 0.4 m wide and 0.4 m high. The cross section is 1 : 20 of a full scale tunnel. Ethanol was used as a fuel. The fire size in model tests varied from 1.35 kW to 13.37 kW, which corresponds to full scale fires of 2.41 to 23.91 MW. Smoke front velocity and temperatrue were decreased due to the vertical shaft install. Temperature was reduced maximum about 20℃ at ceiling and about 23℃ at vertical position. CO concentration was reduced as the vent width widened. When vent width was more than 15 cm, CO concentration was not reached 100 ppm. Descent degree of the smoke layer was confirmed through the visualization.

Key words: Tunnel fire(터널화재), Smoke movement(연기거동), Natural ventilation(자연환기), Vertical shaft(수직갱)

기 호 설 명

H_c : 연소열 [MJ/kg]
L : 터널 길이 [m]
$\dot{m}$: 연료증발량 [kg/s]
$\dot{Q}$: 발열량 [kW]
T : 온도 [K(℃)]
t : 시간 [s]
v : 속도 [m/s]

그리스 문자

ρ : 밀도 [kg/m^3]

하첨자

amb : 주위
F : 실물모델
M : 축소모델

† Corresponding author
Tel.: +82-2-820-5280; fax: +82-2-813-3669
E-mail address: cfdmec@cau.ac.kr

1. 서 론

현재 국내 철도에서는 지하철을 제외하고는 방재설비가 설치된 사례는 없는데 이는 철도교통이

갖는 높은 안전성과 기존의 철도터널의 길이가 대부분 짧아서 그 필요성이 중요하게 인식되지 않았기 때문이다. 그러나 터널이 장대화되면서 그 필요성이 증가하고 있다. 국내의 경우 방재설비 적용기준이 없으며 외국의 경우 공통적으로 적용 가능한 법규 기준 없이 특성에 따라 필요한 방재시설을 계획하고 있다.

1999년 3월 24일 프랑스와 이탈리아를 연결하는 몽블랑 터널에 화재가 발생하여 41명이 사망하였다. 이 화재는 연장 11.4 km의 터널 중앙부에서 마가린과 밀가루를 실은 트럭에 화재가 발생하였는데 화재진압에만 약 50여 시간이 소요되었고, 차량 33대가 손상되었으며, 터널 내부 온도는 1,000℃에 달하였다. 이탈리아측 연기제거 팬의 역회전으로 인해 화재가 확대되어 사망자 대부분이 질식사하였다. 몽블랑 터널화재와 같이 적절한 배연설비 및 운용이 이루어지지 않는다면 대형 인명사고를 초래할 수 있다.

터널내 연기거동을 파악하기 위해서는 실제 터널 내에서의 실험이 가장 효과적이지만 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있어 축소터널 실험과 수치해석을 이용하여 임계속도 및 배연효과에 관한 연구가 주로 이루어지고 있다. Ribot et al.[1]은 천장벤트가 있는 터널 내에서 수치해석을 실시하여 연층의 속도와 벤트의 효율을 실험결과와 비교하였다. Ingason et al.[2]은 배기구가 설치된 모형터널 실험을 실시하여 환기속도와 배기구의 위치변화에 따른 영향을 파악하였다. Vauquelin and Megret[3]는 배기구가 설치된 터널에서 배기구의 위치와 모양에 따른 기계배연의 효과를 파악하기 위해 축소모형 실험을 실시하였다.

지금까지의 연구들에서는 수직갱의 크기가 일정한 상태에서 연구가 수행되었다. 따라서 본 연구에서는 수직갱의 크기변화에 따른 터널에서 화재발생시 자연배기에 의한 배연효과를 평가하기 위해 축소터널 실험을 실시하였다. 수직갱 설치로 인한 연기감소 효과와 온도분포 등을 파악하여 터널설계시 방재계획의 수립과 방재시스템 설계에 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험터널

폭 8 m, 높이 8 m, 길이 268 m 크기의 실물 터널공간을 길이에 대해 1/20로 축소하였다. 축소터널은 폭 0.4 m, 높이 0.4 m, 길이 13.4 m이며 두께 10 cm의 투명아크릴을 이용하여 제작하였으며 화원부의 천장은 열에 의한 변형을 방지하기 위해 방화 석고보드를 이용하여 제작하였다. 수직갱이 설치된 터널의 경우, 수직갱의 길이(10 cm)와 높이(1 m)는 동일하지만 폭을 변화시켜 가면서 세 가지 경우(10 cm, 15 cm, 20 cm)에 대하여 실험을 실시하였다. 터널의 입구와 출구는 외부에 개방되어 있으며 터널 내부의 유동이 없는 상태에서 실험을 실시하였다. Fig. 1에 실험터널의 개략도를, Fig. 2에 수직갱의 단면도를 나타내었다.

2.2 실험장치

축소터널 내부의 온도변화와 연기선단의 이동속도를 측정하기 위하여 터널 천장 아래 2 cm 떨

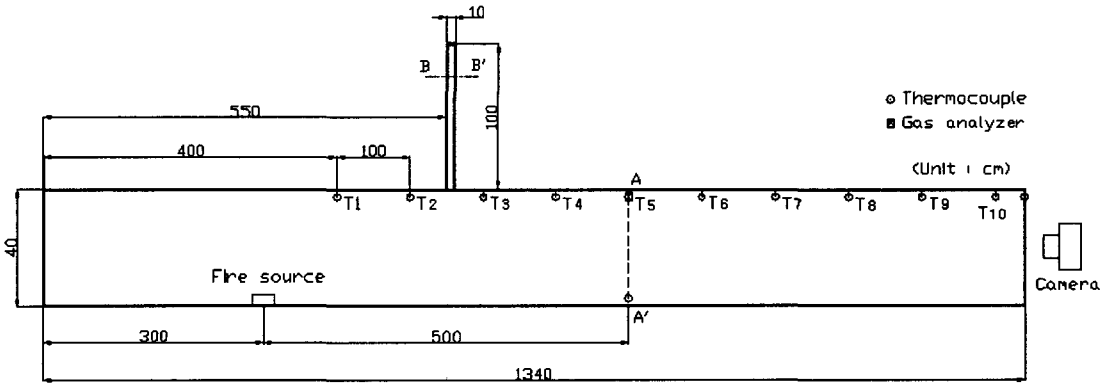

Fig. 1 Schematic of the model tunnel.

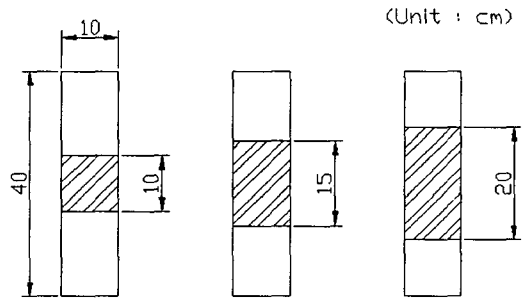

Fig. 2 Cross-section of the vertical shaft (B-B').

어진 위치에 길이방향을 따라 1 m 간격으로 11개를 설치하였으며, 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에 높이방향으로(A-A') 8개의 K-타입 열전대를 설치하여 수직온도 분포를 측정하였다. 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에 가스분석기(testo 435)를 설치하여 CO 농도를 측정하였으며 터널 출구에 카메라를 설치하여 연층을 가시화하였다.

2.3 축소법칙

터널 내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude No.가 가장 중요하며 이에 따라 본 축소실험에서는 'Froude' Scaling[4]을 사용하였다.

축소터널과 실제 터널의 온도, 밀도, 시간, 속도, 발열량 사이의 관계는 다음 식과 같다.

$$T_M = T_F \tag{1}$$

$$\rho_M = \rho_F \tag{2}$$

$$\frac{t_M}{t_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \tag{3}$$

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

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

2.4 화 원

한 변의 길이가 6~18 cm의 정사각형 화원을 사용하였으며, 가연물질로 순도 95%의 에탄올(C_2H_5OH)과 가솔린의 두 가지 연료를 사용하였다. 터널 입구로부터 3 m 떨어진 곳에 화원을 설치하였으며 로드셀을 이용하여 연료의 증발량을 측정하였다. 풀화재의 경우 발열량은 다음 식에 의해 얻어진다.

$$\dot{Q} = H_c \dot{m} \tag{6}$$

여기서 에탄올의 연소열은 26.8 MJ/kg이다.

화원이 커질수록 준정상상태 도달시간이 증가하였으며 최대 약 200초 후 정상상태에 도달하였다. 발열량과 환산발열량을 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Fire size of the ethanol pool fire

Hydraulic diameter (cm)	Fuel quantity (g)	$\dot{Q}_M$ (kW)	$\dot{Q}_F$ (MW)
6	25	1.35	2.41
6*	25	2.71	4.85
8	35	2.69	4.81
10	50	4.17	7.47
12	65	6.12	10.95
14	85	9.00	16.09
16	120	10.83	19.37
18	170	13.37	23.91

* Gasoline pool fire

3. 실험결과 및 고찰

3.1 연기선단 전파속도

터널 내에 화재가 발생하면 연기가 상승하여 천

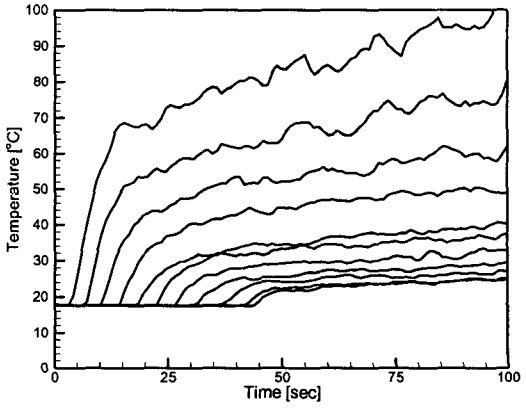

Fig. 3 Temperature records under the ceiling.

Table 2 Velocity of the smoke front

Vent width (cm)	Section	Distance (m)	Velocity of smoke front (m/s)
Without vent	T1~T2	1.5	0.31
	T2~T3	2.5	0.27
	T3~T4	3.5	0.25
	T4~T5	4.5	0.24
	T5~T6	5.5	0.23
	T6~T7	6.5	0.22
	T7~T8	7.5	0.20
	T8~T9	8.5	0.18
	T9~T10	9.5	0.17
10	T1~T2	1.5	0.31
	T2~T3	2.5	0.27
	T3~T4	3.5	0.24
	T4~T5	4.5	0.21
	T5~T6	5.5	0.19
	T6~T7	6.5	0.16
	T7~T8	7.5	0.14
	T8~T9	8.5	0.11
	T9~T10	9.5	0.08
15	T1~T2	1.5	0.32
	T2~T3	2.5	0.27
	T3~T4	3.5	0.23
	T4~T5	4.5	0.20
	T5~T6	5.5	0.17
	T6~T7	6.5	0.13
	T7~T8	7.5	0.10
	T8~T9	8.5	0.07
	T9~T10	9.5	0.04
20	T1~T2	1.5	0.31
	T2~T3	2.5	0.25
	T3~T4	3.5	0.21
	T4~T5	4.5	0.16
	T5~T6	5.5	0.12
	T6~T7	6.5	0.07
	T7~T8	7.5	0.02
	T8~T9	8.5	0.01
	T9~T10	9.5	-

장에 도달한 후 천장을 따라 터널 길이방향으로 전파된다. 연기선단의 전파속도는 대피자들의 대피시간과 밀접한 관련이 있다. 따라서 본 연구에서는 화재발생 초기 수직갱 설치 유무에 따른 연기선단의 이동속도를 비교하였다. Fig. 3에 시간경과에 따른 천장 아래 2 cm 위치에 설치된 열전대들의 온도변화를 나타내었다. 열전대들이 연기선단과 만나면서 온도가 순간적으로 수직상승하는 것을 확인할 수 있다. 이 위치를 연기선단의 도달위치로 간주하여 열전대간의 온도상승 시간차를 계산하여 연기선단의 이동속도를 계산하였다. Table 2에 6.12 kW 화재에 대하여 수직갱 설치에 따른 연기선단의 이동속도를 비교하였다. 화원에서 멀어질수록 연기선단의 이동속도가 감소하는데, 이는 연기가 가지고 있는 열에너지의 손실과 천장과의 마찰 등으로 인해 부력이 감소하기 때문이다. 수직갱을 설치함으로 인해 연기선단의 이동속도가 감소하며, 수직갱의 폭이 증가할수록 수직갱으로의 열방출량 증가로 인해 연기선단의 이동속도가 더욱 감소한다. 연기가 출구에 도달하는 데 걸린 시간을 Table 3에 나타내었다. 수직갱 설치로 인해 연기의 출구 도달시간이 지연되며 수직갱의 폭이 15 cm인 경우 연기의 도달시간이 약 2배가 지연된다. 수직갱의 폭이 20 cm인 경우 연기가 출구에 도달하지 않는다.

Table 3 Reaching time to the tunnel exit of smoke front (6.12 kW fire)

Vent width (cm)	Reaching time to the tunnel exit (sec)
Without vent	44.6
10	61.5
15	85.3
20	-

3.2 연층의 수평온도 분포

터널 내에는 화재시 발생하는 열, 빛, 연기로 화재발생을 검출하는 화재감지기가 설치되어 있다. 이중 열감지기가 가격이 가장 저렴하고 오작동률도 가장 낮다. 열감지기는 일반적으로 천장이나 천장 가까이 설치하여 화재에서 발생하는 대류열에너지를 감지한다. 따라서 천장 아래 연층의 온도분포를 파악하는 것이 중요하다. 본 연구에서는 시간경과에 따른 천장에서의 온도를 측정하였다. Fig. 4에 수직갱이 없는 경우 화재발생 250초 후 발열량 변화에 따라 천장에서의 온도분

포를 나타내었다. 발열량이 증가함에 따라 천장에서의 온도가 증가하고 있으며 연기가 진행하면서 천장으로의 열전달과 하부의 차가운 공기와의 혼합 등으로 인해 화원에서 멀어질수록 온도가 감소하고 있다.

Fig. 5에 화재발생 250초 후 6.12 kW 화재에 대하여 수직갱 설치시의 천장에서의 온도분포를 비교하였다. 수직갱을 설치함으로 인해 수직갱을 통과한 연기의 온도가 감소하며 수직갱의 폭이 증가할수록 온도감소 효과가 증가한다. 수직갱 설치로 인해 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에서 천장에서의 온도가 최대 약 20℃가 감소하며 수직갱의 폭이 20 cm인 경우 화원으로부터 10 m 떨어진 위치에서 주위공기의 온도와 비교하여 온도가 발생하지 않고 있다. 연기의 이동은 화원에서 발생한 고온의 열을 보유한 가스의 이동이므로 이를 통하여 연기가 출구에 도달하지 않는 것을 확인할 수 있다.

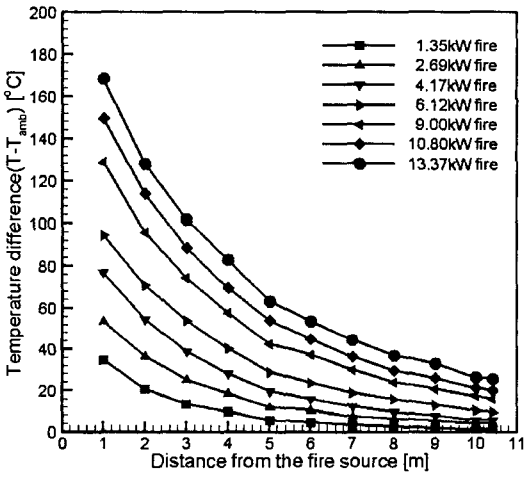

Fig. 4 Longitudinal temperature distribution under the ceiling with fire size (without vent).

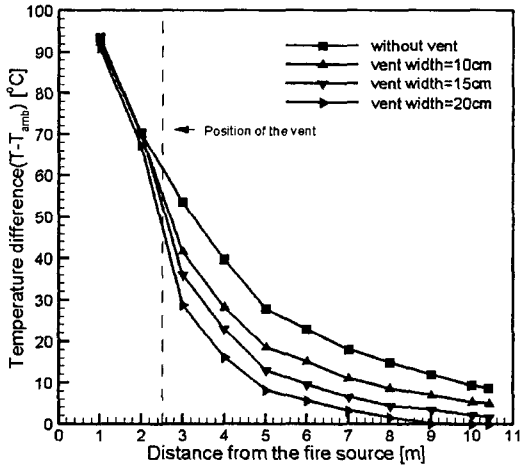

Fig. 5 Longitudinal temperature comparison under the ceiling with vent size (6.12 kW fire).

3.3 터널 내부 수직온도 분포

피난시 연층의 하강 정도는 유독가스로 인한 대피자의 안전 및 시계장애로 인한 심리적 압박과 불안감을 증가시킬 수 있다. Fig. 6에 수직갱이 없는 경우 화재발생 250초 후 발열량 변화에 따라 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에서 수직온도 분포를 나타내었다. 터널 내부의 수직적인 온도분포는 출구로 배출되는 상부의 뜨거운 연기층, 상부의 뜨거운 연기와 하부의 차가운 공기의 혼합이 일어나는 혼합영역, 하부의 차가운 공기층으로 나뉘는 것을 온도구배를 통하여 확인할 수 있다. 천장으로의 열전달 및 마찰로 인해 온도의 최대값이 최상부에서 나타나지 않았다.

Fig. 7에 6.12 kW 화재에 대하여 수직갱 설치시

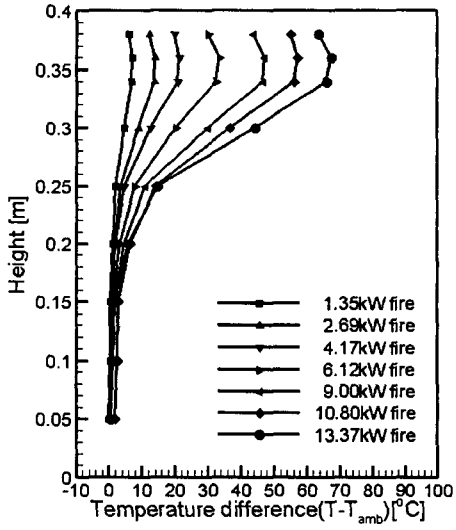

Fig. 6 Vertical temperature distribution with fire size (without vent).

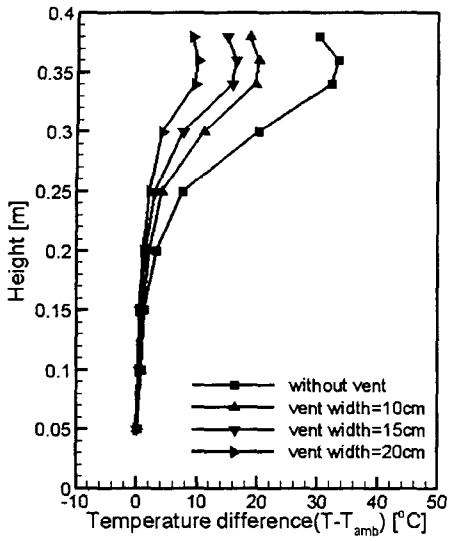

Fig. 7 Vertical temperature comjparison with vent size (6.12 kW fire).

의 효과를 파악하기 위해 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에서 화재발생 250초 후 수직온도 분포를 비교하였다. 수직갱을 설치함으로 인해 터널 상부에서의 온도가 수직갱을 설치하지 않은 경우와 비교하여 최대 약 23℃ 감소한다. 터널 하부영역에서는 온도가 거의 일정한데 출구로 배출되는 뜨거운 연기층이 터널 절반 높이 이하로는 하강하지 않기 때문이다. 이는 가시화를 통해서도 확인할 수 있다. Fig. 8에 수직갱의 폭이 20 cm인 경우 화재발생 300초 후 가시화를 통한 사진을 나타내었다. 연층이 하강하여 약 20 cm 높이에서 일정하게 유지되며 연기가 터널 출구로 배출되지 않는다. 하강하는 연기가 하부로 유입되는 차가운 공기와 혼합되어 재유입되는 현상이 발생하며 수직갱이 없는 경우 화재발생 약 250초 후부터는 터널 내부가 연기로 가득차게 된다. Fig. 9에 수직갱이 없는 경우 화재발생 300초 후 터널 내부의 가시화 사진을 나타내었다. 터널 내부가 연기로 가득 차 시계확보가 되지 않는 것을 확인할 수 있다.

3.4 CO 농도 분포

화재발생시 화염 자체보다는 유독가스가 인체에 더욱 치명적이다. 따라서 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에 가스분석기를 설치하여 CO 농도

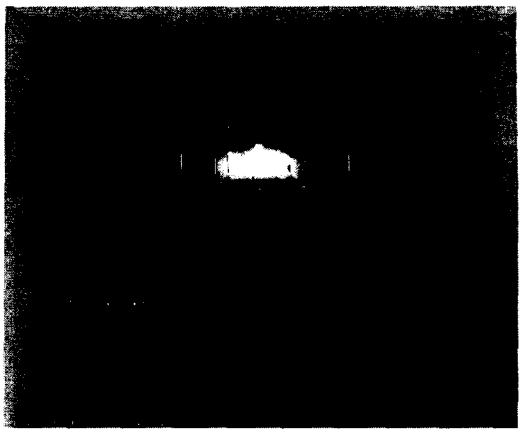

Fig. 8 Photograph of the tunnel interior (vent width = 20 cm).

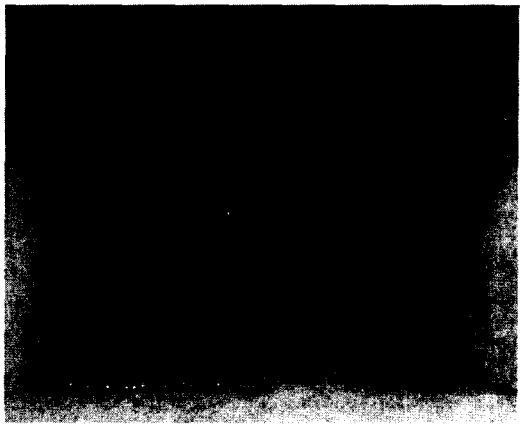

Fig. 9 Photograph of the tunnel interior (without vent).

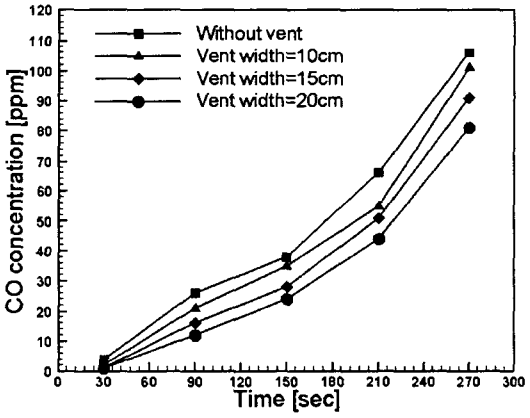

Fig. 10 CO concentration with vent size.

를 측정하였다. 이 경우 가연물질로 가솔린을 사용하였다. Fig. 10에 CO 농도를 비교하였다. 수직갱이 없는 경우 화재발생 270초 후 CO 농도가 106 ppm에서 수직갱 폭이 20 cm인 경우 81 ppm으로 최대 25 ppm이 감소하였다. 국내 터널의 CO 허용기준은 100 ppm 이하로 규정하고 있다. 수직갱이 설치되지 않은 경우 약 260초 후, 수직갱의 폭이 10 cm인 경우 약 270초 후 100 ppm에 도달한다. 수직갱의 폭이 15 cm 이상일 때는 100 ppm을 초과하지 않는다.

4. 결 론

본 연구에서는 수직갱이 설치된 터널 내에서 화재발생시 축소실험을 실시하여 수직갱 설치로 인한 연기의 거동과 온도분포 등을 연구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 수직갱을 설치함으로 인해 연기선단의 출구도달 시간을 지연시키고 터널 내부의 온도감소의 효과를 얻을 수 있다.

(2) 6.12 kW 화재에 대하여 수직갱의 폭이 20 cm 경우, 화원으로부터 5 m 떨어진 위치에서 수직갱이 설치되지 않은 경우와 비교하여 천장 아래 2 cm 위치에서 약 20℃, 높이방향을 따라서 최대 23℃ 온도가 감소한다.

(3) 수직갱 설치로 인해 CO 농도가 감소하며 수직갱의 폭이 15 cm 이상일 경우 100 ppm을 초과하지 않는다.

(4) 가시화를 통하여 수직갱의 폭이 20 cm의 경우 연기가 터널 출구에 도달하지 않으며 연층의 높이가 터널 높이의 약 50%에서 일정하게 유지된다.

(5) 수직갱이 설치된 터널 내에서 발열량 변화에 따른 터널내 온도분포를 파악하여 터널 방재계획과 배연시스템의 설계시 정성적 자료로 제공될 수 있다.

참고문헌

1. Ribot, B., Chasse, P. and Gay, B., 1999, Numerical simulations of smoke extraction by roof vents in a tunnel: Comparion with experimental tests analysis of physical phenomena, Porceeding of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Excape from Tunnels, pp. 169-179.
2. Ingason, H., Hagglund, B. and Werling, P., 1999, Effects of ventilation on smoke spread in tunnels, Porceeding of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Excape from Tunnels, pp. 407-416.
3. Vauquelin, O. and Megret, O., 1999, Experimental study of exhaust trap efficiency, Porceeding of the First International Conference on Tunnel Fires and One Day Seminar on Excape from Tunnels, pp. 453-461.
4. Quintiere, J. G., 1989, Scaling applications in fire research, Fire Safety Journal, Vol. 15, No. 1, pp. 3-29.