

# 터널 화재시 연기 거동에 관한 실험적 연구

이성룡\* · 김충익\*\* · 유홍선\*\*

## An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires

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

**Key Words:** Tunnel(터널), Smoke movement(연기거동), Froude scaling(Froude 상사), Ventilation(환기), Visualization(가시화).

### Abstract

In this study, reduced-scale experiments were conducted to understand smoke movements in tunnel fires with the natural ventilation. The 1/20 scale experiments were conducted under the Froude scaling since the smoke movement in tunnels is governed by buoyancy force. Six cases of experiments(pool diameter is 6.5cm, 7.3cm, 8.3cm, 10cm, 12.5cm and 15.4cm), in which vertical vents positioned 1m from the fire source symmetrically, were conducted in order to evaluate the effect of the vent on smoke movement. In case of heat release rate under 2MW, smoke front reached to the tunnel exit about 20 sec delayed with ventilation and the smoke velocity was proportional to the power of the heat release rate. Temperature after the vent was lower than without vent. In case of 15.4cm pool, the temperature difference was about 50°C. It was confirmed that the thickness of smoke layer was maintained uniformly under the 35% height of tunnel through the visualized smoke flow by a laser sheet and the digital camcoder.

기호설명	subscript
$Q$ Heat release rate [kW]	$F$ Full scale
$H_c$ Heat of combustion [MJ/kg]	$M$ Model
$m''$ Mass loss rate [kg/m <sup>2</sup> s]	
$A$ Pool area [m <sup>2</sup> ]	
$m_{\infty}''$ Mass loss rate for a pool with an infinite diameter [kg/m <sup>2</sup> s]	
$k\theta$ Extinction-absorption coefficient [m <sup>-1</sup> ]	
$D$ Pool diameter [m]	
$V$ Velocity [m/s]	
$t$ Time [s]	
$L$ Length [m]	

### 1. 서론

우리나라의 경제성장과 더불어 교통수요도 급속하게 신장되었다. 이 경제사회의 활력유지와 문화의 발전과 복지의 향상을 도모하고 풍부하고 쾌적한 국민생활을 실현해 나가는데 간선도로망을 비롯한 사회자본의 정비와 이에 따른 원활한 교통의 확보는 도시상호간의 시간거리단축이 야기하는 종합적인 도시화뿐만 아니라 지역의 활성화촉진 등 조화가 잡힌 국토의 발전을 추진하는데도 대단히 중요한 역할을 지니고 있다.

우리나라는 국토의 약 70%가 저반이며 간선도로망의 정비에 있어서는 산맥 등의 지형적 장벽

\* 중앙대학교 기계공학부 대학원  
 \*\* 중앙대학교 기계공학부

을 극복하는 수단으로서 터널의 건설이 불가결한 것이다. 한편 도시에 집중하는 교통을 처리하기 위한 도시내의 도로망 정비에 있어서도 터널구조는 생활환경의 보전이나 토지의 입체적 활용에 의한 고도이용 등의 관점에서 유용한 구조형식이다.

터널내 화재 발생시 공간이 한정된 특수한 환경에 있으므로 발화점의 측정 곤란과 화재현장 접근 곤란으로 인해 신속한 조치를 취하지 않으면 2차적인 화재를 일으킬 수 있는 위험성이 있다. 2000년 스위스에서 발생한 터널을 통과하던 케이블 열차의 터널화재 경우처럼 발생빈도에 비해 대형참사를 초래하는 경우가 많다. 따라서 적절한 배연설비 및 피난대책의 수립이 필수적이지만 국내에서는 이에 대한 연구가 거의 진행되지 않고 있다.

Oka와 Atkinson은 화원의 크기, 모양, 위치를 변화시켜가며 축소터널 실험을 실시하여 임계속도에 관한 연구를 하였으며[1], Woodburn과 Britter는 터널 화재시 배기속도에 관한 수치해석을 실시하였으며[2,3], Chow는 Zone모델과 Field모델을 이용하여 터널 내에서 연기의 거동을 해석하였다[4,5]. Atkinson과 Wu는 터널 경사를 변화시켜가며 실험을 실시하여 임계속도와 관계 연구를 하였으며[6], Wu와 Baker는 서로 다른 단면을 가진 모형터널에 대하여 실험을 실시하여 수치해석 결과와 비교하였으며[7], 국내의 연구로는 김상훈 등이 축소모형 실험을 실시하여 연기의 거동을 해석하였으며 이를 수치해석 결과와 비교하였다[8].

터널안에 화재가 발생하였을 경우 열에 의한 손상 이외에 독성가스에 의해 사고가 확대되고

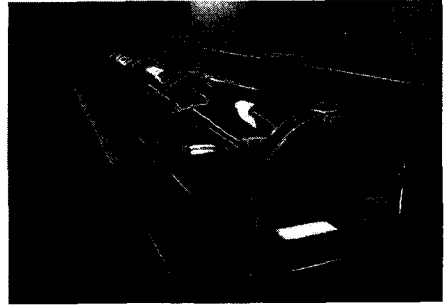


Fig.1 Photograph of the reduced tunnel

피해가 커질 수도 있으므로 적절한 환기설비를 갖추지 않은 경우 대형 인명사고를 초래할 수 있다. 터널의 환기방식에는 크게 자연환기와 기계 환기방식으로 나눌 수 있다. 터널의 길이가 짧은 경우 별도의 배기시설 없이 자연배기만으로 충분히 배기가 가능하지만 터널 연장이 1km 이상의 장대터널인 경우 적절한 배연설비가 필요하다.

터널이라는 공간의 특성상 소방활동보다는 연기의 제어가 더욱 중요한 인자이므로 본 연구에서는 수직 배기구가 설치된 모형터널을 제작하여 화원의 크기를 변화시켜가며 실험을 실시하였다. 배기구 설치에 따른 배기의 효과와 연기의 거동을 해석하여 터널 방재계획의 수립과 방재시스템 설계시 기초자료로 제공하고자 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험 터널

터널 내에서의 화재성상에 관한 실험에 사용된 터널은 폭 8m, 높이 8m, 길이 180m 크기의 실물 터널 공간을 길이에 대해 1/20으로 축소시켜 폭

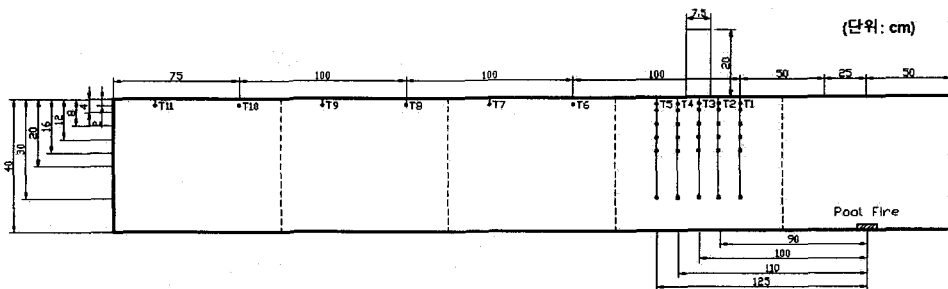


Fig.2 Schematic of the model tunnel and the position of thermocouples

0.4m, 높이 0.4m, 길이 1m의 내부공간에 1cm의 두께를 갖는 투명 아크릴로 모형을 제작하여 9개의 모형을 연결하였으며, 내경 7.5cm, 높이 20cm의 배기구를 화원으로부터 1m 떨어진 곳의 양쪽에 대칭으로 위치시켜 화원의 지름을 6.5cm부터 15.4cm까지 변화시켜가며 축소실험을 실시하였다. 열에 의한 변형을 방지하기 위해 화원부의 모형은 강철로 제작하였다. 축소 터널의 사진을 Fig.1에 나타내었다.

## 2.2 실험 장치

축소 터널 내부에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 0.32mm 두께의 T-타입(구리-콘스탄탄, 측정범위: -270~400℃) 열전대를 설치하였다. 터널 중앙에 화원이 위치하므로 대칭이라 가정하고 터널 한쪽 부분의 내부에만 천장 아래에서의 연기전과 속도를 측정하기 위해 천장아래 2cm 위치에 11개(T1~T11), 배기구 주변의 수직온도 분포를 측정하기 위해 5곳에 높이방향으로 25개(T12~T36)의 열전대를 설치하였으며 터널의 개략도와 열전대의 측정위치를 Fig.2에 나타내었다.

D(cm)	$Q_M$ (kW)	$Q_F$ (MW)
6.5	0.714	1.276
7.3	1.0	1.79
8.3	1.46	2.629
10	2.5	4.482
12.5	4.77	8.572
15.4	8.46	15.489

**Table.1** The model and full-scale heat release rates in each pool

Q[kW]	with vent		without vent	
	$t_{T11-T5}$ [s]	$V_{front}$	$t_{T11-T5}$ [s]	$V_{front}$
0.714	20.2	0.149	14.44	0.208
1.0	18.78	0.16	14.01	0.214
1.46	16.686	0.181	12.4	0.241
2.5	14.488	0.208	11.1	0.27
4.77	10.875	0.276	8.92	0.336
8.46	9.675	0.31	6.9	0.435

**Table.2** Reaching time from T5 to T11 and average velocity of smoke front

Laser 시스템과 Laser Light Sheet Probe를 이용하여 연층의 가시화를 실시하였으며 이를 디지털 캠코더를 이용하여 녹화하여 시간에 따른 연층의 이동을 관찰할 수 있도록 하였다.

## 2.3 화원

실험에 직경이 다른 6개의 화원(6.5cm, 7.3cm, 8.3cm, 10cm, 12.5cm, 15.4cm)을 사용하였으며 가연물질로 휘발유를 사용하여 모형 터널의 중앙에 화원을 설치하였다. Pool 화재의 경우 발열량은 다음의 식에 의해 얻어진다.[9]

$$Q = H_c \times m'' \times A$$

$$\text{여기서, } m'' = m_{\infty}'' (1 - e^{-k\theta D})$$

휘발유의  $H_c=43.7\text{MJ/kg}$ ,  $m_{\infty}''=0.055\text{ kg/m}^2\text{s}$ ,  $k\theta=2.1\text{ m}^{-1}$ 이다.

중발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소효율을 0.7로 고려하여 발열량을 계산하였다.

## 2.4 축소 법칙

터널 내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude No.가 가장 중요하며 이에 따라 본 축소실험에서는 'Froude' Scaling을 사용하였다. 축소모델과 실제 터널의 발열량  $Q_M$ 과  $Q_F$ , 속도  $V_M$ 과  $V_F$ , 시간  $t_M$ 과  $t_F$  사이의 관계는 다음 식과 같다.[10]

$$\frac{Q_M}{Q_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{5/2}$$

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

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

축소 법칙에 의해 축소 모형의 발열량과 실제 터널에서의 발열량으로 환산한 값을 Table.1에 나타내었다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

터널내 화재가 발생하면 높은 온도로 인한 주위의 공기와의 밀도차에 의한 부력으로 인해 주

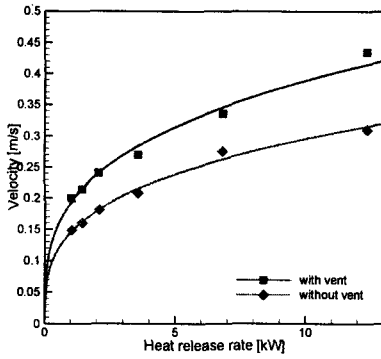


Fig.3 Ceiling jet velocity

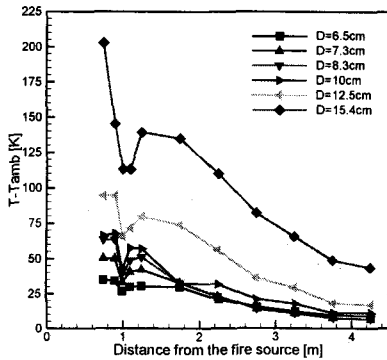


Fig.4 Longitudinal temperature distributions in the tunnel at 100sec

위 공기의 유입이 이루어져 연기가 상승해 천장에 도달한 후 천장을 따라 천장제트를 형성하며 수평방향으로 이동한다.

화재 발생시 피난시간의 확보는 인명 구조에 매우 중요한 인자이다. 따라서 화재 발생 후 연기 선단이 터널 출구에 도달하는 시간을 계산하

기 위해 천장에 수평방향으로 설치된 열전대의 온도 반응시간을 연기 선단의 위치로 간주하여 T1에서 T11까지 연기선단이 도달하는데 걸린 시간과 배기구 통과후 연기선단의 평균이동속도를 Table.2에 나타내었다. 배기구를 설치하지 않은 경우에 비해 최대 약 6초가 지연되었으며 이것은 환산시간으로 약 26초가 지연된다.

화원의 크기가 커짐에 따라 천장 제트의 속도는 발열량의 멱승에 비례하며 그 함수는 다음과 같으며 Fig.3에 나타내었다.

$$V_{front} = \alpha \cdot Q^\beta$$

여기서  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 실험상수로서 본 연구에서 얻어진 값은 배기구가 없는 경우  $\alpha$ 는 약 0.145이며  $\beta$ 는 약 0.309 정도의 값을 얻었고 배기구가 있는 경우  $\alpha$ 는 약 0.192이며  $\beta$ 는 약 0.306 정도의 값을 얻었다.

화재발생 100초 후 천장아래 2cm에서 터널 길이방향의 온도분포를 Fig.4에 나타내었다. 배기구를 통과하면서 연기가 가지고 있는 열이 방출되고 외부에서 찬공기가 유입되며 천장과 바닥과 열전달 등으로 인하여 배기구 통과 후 온도가 감소하기 때문에 연기의 이동속도가 감소하게 된다.

Fig.5는 화재발생 100초 후 배기구로부터 25cm 떨어진 위치에서 각 화원에 대하여 수직온도 분포를 배기구 설치전과 비교하였다. 그림에서 천장 부근의 뜨거운 연기층, 중간 부분의 혼합영역, 그리고 바닥 부근의 차가운 공기층의 세 개의 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 배기구를 설치함으로 인해 배기구를 통한 뜨거운 연기의 배출과 함께 외부의 차가운 공기의 유입으로 인해 15.4cm의 화원의 경우 최대 50℃ 이상

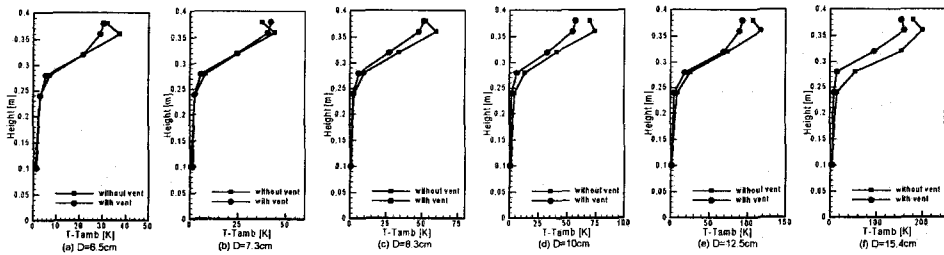


Fig.5 Vertical temperature comparisons with various diameters

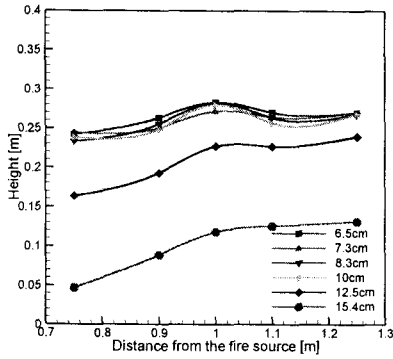
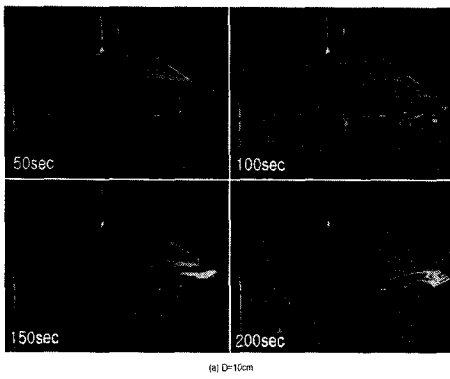
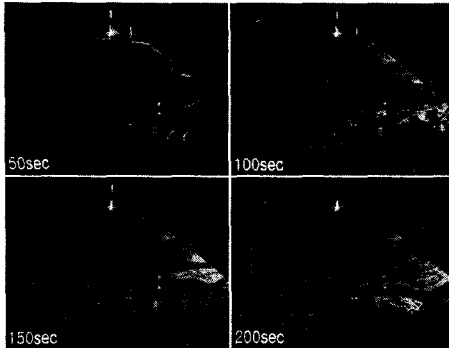


Fig.6 Interface of hot smoke layer around the vent



(a) D=10cm



(b) D=12.5cm

Fig.7 Photographs of a smoke movement process in the tunnel around the vent

온도 감소 효과가 있는 것을 확인할 수 있다.

주위 공기와 온도차가 5°C인 지점을 방출되는 뜨거운 연기층으로 간주하여 배기구 주위의 뜨거운 연기층의 경계를 Fig.6에 나타내었다. 배기구

통과후 연기층의 두께가 약 20% 감소하는 것을 확인할 수 있었고 12.5cm의 화원의 경우 방출되는 연기층의 두께가 터널높이의 약 33% 부근에서 일정하게 유지되었으며 가시화에 의한 결과와 비교적 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig.7에 10cm와 12.5cm의 화원에 대하여 가시화를 통하여 시간의 경과에 따른 배기구 주위의 연기 거동을 나타내었다. 화재가 발생하게 되면 연기는 부력에 의해 상승한 후 터널 길이방향으로 천장제트를 형성하며 이동하여 출구로 빠져나가게 되며 출구로부터 차가운 공기의 지속적인 유입으로 인하여 화재발생 약 1분 후부터는 뜨거운 연기층의 높이가 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 배기구를 통한 열에너지의 손실에 의한 연기의 속도저하로 인하여 배기구 통과후 연층의 두께는 다시 증가하게 되며 12.5cm의 화원의 경우 터널의 약 35%까지 뜨거운 연기층이 하강하는 것을 확인할 수 있다. 약 1분 후부터 부력을 잃고 하강하는 연기는 출구로부터 유입되는 차가운 공기에 의해 다시 안쪽으로 유입되기 시작하여 터널 내부가 연기로 가득차게 되는 것을 확인할 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 터널내 화재 발생시 축소실험을 실시하여 자연배기에 의한 연기의 거동과 온도분포 등을 연구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 배기구를 설치하여 자연배기를 실시함으로써 배기구 통과 후 연기 전파속도의 지연과 온도 감소의 효과를 얻을 수 있다.
2. 배기구를 설치함으로써 인하여 발열량이 2MW 이하인 경우 연기선단의 출구 도달 시간이 약 20초가 지연가능하며 15MW의 발열량의 경우 약 50°C 이상의 온도 감소효과를 얻을 수 있다.
3. 화원의 크기가 증가함에 따라 연기선단의 이동속도가 발열량의 약 0.3승에 비례하여 증가함 ( $V_{front} = a \cdot Q^{0.3}$ )을 보여주고 있다
4. 배기구 통과 후 방출되는 뜨거운 연기층의 두께가 약 20% 감소하였으며 화재발생 약 1분후

부터 연기층의 두께가 터널 높이의 약 33%에서 일정하게 유지되었다.

5. 가시화를 통하여 연기의 시간에 따른 이동을 확인할 수 있었고 방출되는 연기층의 두께가 터널 높이의 약 35%에서 일정하게 유지되었으며 화재발생 약 1분후부터 유입되는 차가운 공기와 함께 하강하는 연기가 재유입되어 터널내부가 연기로 가득차게 된다.

6. 수직 배기구가 설치된 터널에서 발열량의 변화에 따른 터널내 온도분포를 파악하여 터널내 방재계획과 배연시스템의 설계시 정성적인 자료로 제공될 수 있다.

flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity", Fire Safety Journal, Vol.35.

- (8) 김상훈, 김성찬, 김충익, 유홍선, 2000, "터널 내에서 화재 발생시 연기 거동에 대한 연구", 한국화재 소방학회지, 제14권, 제2호.
- (9) V. Babrauskas, 1998, "The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering", U.S.A.
- (10) J.G. Quintiere, 1989, "Scaling Applications in Fire Research", Fire Safety Journal, Vol.15.

## 후기

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-1-304-001-2) 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사드립니다.

## 참고문헌

- (1) Yasushi Oka, Graham T. Atkinson, 1995, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", Fire Safety Journal, Vol.25.
- (2) P.J. Woodburn, R.E. Britter, 1996, "CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part I", Fire Safety Journal, Vol.26.
- (3) P.J. Woodburn, R.E. Britter, 1996, "CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part II", Fire Safety Journal, Vol.26.
- (4) W.K. Chow, 1996, "Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model", Tunneling and Underground Space Technology, Vol.11, No.2.
- (5) W.K. Chow, 1998, "On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation", Tunneling and Underground Space Technology, Vol.13, No.3.
- (6) G.T. Atkinson, Y. Wu, 1996, "Smoke Control in Sloping Tunnels", Fire Safety Journal, Vol.27.
- (7) Y. Wu, M.Z.A. Bakar, 2000, "Control of smoke