

# 터널 화재시 자연 배기에 의한 연기 거동에 관한 실험적 연구 An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation

이성룡<sup>†</sup> · 김충익\* · 유홍선\*

Lee, Sung-Ryong<sup>†</sup> · Kim, Choong-Ik\* · Ryou, Hong-Sun\*

중앙대학교 기계공학과 대학원

\*중앙대학교 기계공학부

(2000. 12. 12 접수/2001. 01. 11 채택)

## 요 약

본 연구는 터널내 화재발생시 자연 배기에 의한 연기의 거동을 해석하기 위하여 축소모형 실험을 수행하였다. 터널내 연기의 유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude scaling에 의해 실물 터널을 1/20로 축소 한 모형터널에서 실험을 수행하였으며 배기구의 위치변화에 따른 영향을 평가하기 위하여 화원으로부터 각각 1 m, 2 m, 3 m 떨어진 곳에 배기구를 대칭으로 위치시켜 세 가지 경우에 대해 실험을 실시하였다. 지름이 4.36 cm인 화원의 경우, 배기구의 위치에 관계없이 배기구 통과 후 연층의 온도가 배기를 실시하지 않은 경우와 비교하여 약 7~8°C 낮게 유지되었다. 지름이 5.23 cm인 화원의 경우, 배기구가 화원에 가까울수록 배기구 통과 후 연기의 평균속도가 감소하였으며 최대 3.86초가 지연되었다. CASE 1에서는 배기구 통과 후 천장에서 약 8°C, 수직온도가 약 7°C 감소하였으며, CASE 2에서는 천장과 수직온도가 약 3°C 감소하였으며, CASE 3에서는 각각 약 2°C가 감소하였다. 레이저와 디지털 캠코더를 이용하여 배기구 주위의 연기 유동을 가시화하여 화재발생 약 1분 후부터 연층의 두께가 터널높이의 25%이하로 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있었다.

## 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. Three cases of experiments, in which a natural vent location varied from 1 m, 2 m and 3 m from the fire source symmetrically, were conducted in order to evaluate the effect of the position of ventilation systems on smoke movement. In case of a pool whose diameter is 4.36 cm, the temperature of smoke layer passed through the vent was maintained 7~8°C less than that of smoke layer without a vent. In case of a pool whose diameter is 5.23 cm, the average velocity passed through the vent was decreased when it was close to the fire source. And the maximum delay time was 3.86s. In CASE 1, the ceiling temperature was decreased by approximately 8°C and the vertical temperature was decreased by approximately 7°C. In CASE 2, both ceiling and vertical temperature were decreased by 3°C and in CASE 3, they were decreased by 2°C each. It was confirmed that the thickness of smoke layer was maintained uniformly under the 25% height of tunnel through the visualized smoke flow by a laser sheet and the digital camcorder.

**Keywords :** Tunnel, Smoke movement, Froude scaling, Ventilation, Visualization

## 1. 서 론

산업의 급속한 발전과 생활수준의 향상에 따라 도로

및 철도 건설의 수요가 크게 증가하고 있다. 국토의 2/3가 산악지형으로 형성되어 있고 운송수단의 고속화 요구를 충족시키기 위하여 도로의 직선화가 요구되며, 따라서 터널 건설이 증가하고 있으며 장대터널이 요구되고 있는 상황이다.

<sup>†</sup> E-mail: comblee@hanmail.net

터널에서 화재가 발생하였을 경우 높은 열과 연기로 인하여 발화점의 측정이 어렵고, 공간의 특성상 내부 상황 파악이 어렵고 화재현장 접근 곤란으로 인하여 소방활동의 지연 등이 예상된다.

철도 터널 화재의 예로는 일본에서 발생한 북륙터널 화재(1972)와 생구터널화재(1987), 미국의 샌프란시스코만 해저터널화재(1979), 스페인의 콘고치나스터널화재(1978) 등이 발생하였으며 최근 스위스의 키츠슈타인호른에서 터널을 통과하던 케이블열차에 화재가 발생하여 172명이 사망하는 대형사고가 발생하였다(2000).<sup>1)</sup> 이처럼 터널화재는 발생 빈도에 비해 대형참사를 초래하는 경우가 많다. 따라서 터널 화재시 적절한 배연 설비 및 피난 대책의 수립이 필수적이지만 국내에서는 인식의 부족으로 이에 대한 연구가 거의 진행되지 않고 있다.

Oka와 Atkinson은 화원의 크기, 모양, 위치를 변화시켜가며 축소터널 실험을 실시하여 임계속도에 관한 연구를 하였으며,<sup>2)</sup> Woodburn과 Britter는 터널 화재시 배기속도에 관한 수치해석을 실시하였으며,<sup>3,4)</sup> Chow는 Zone 모델과 Field 모델을 이용하여 터널 내에서 연기의 거동을 해석하였으며,<sup>5,6)</sup> Atkinson과 Wu는 터널 경사를 변화시켜가며 실험을 실시하여 임계속도와와의 관계를 연구하였다.<sup>7)</sup> Wu와 Baker는 서로 다른 단면을 가진 모형터널에 대하여 실험을 실시하여 수치해석 결과와 비교하였으며,<sup>8)</sup> 국내의 연구로는 김상훈 등이 축소모형 실험을 실시하여 연기의 거동을 해석하였으며 이를 수치해석 결과와 비교하였다.<sup>9)</sup>

화재 발생시 화염 자체보다 독성가스에 의한 영향이 인명에 더욱 치명적이므로 화재시 적절한 환기설비를 갖추지 않는 경우 대형 인명사고를 초래할 수 있다. 따라서 화재 발생시 연기 제어는 매우 중요한 인자이다. 연기제어 방식에는 크게 자연배기 방식과 기계배기 방식으로 나눌 수 있으며 자연환기가 가능한 한계는 조건에 따라 다르나 산악터널의 경우 터널연장이 1km 미만이면 가능하다.<sup>10)</sup>

터널이라는 공간의 특성상 소방활동 보다는 연기의 제어가 더욱 중요한 인자이며 우리나라의 경우 대부분의 터널이 1km 이하이므로 본 연구에서는 그에 해당하는 축소모형을 제작하여 배기구의 위치가 각각 1m, 2m, 3m 세가지의 경우에 대하여 4.35cm와 5.23cm의 화원을 사용하여 자연배기 실험을 실시하여 배기구의 위치에 따른 터널내 연기의 거동을 해석하여 터널 방재계획의 수립과 방재 시스템 설계시 기초자료로 제공하고자 한다.

한국화재·소방학회, 제15권 제1호, 2001년

## 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 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 각각 1m, 2m, 3m 떨어진 곳의 양쪽에 대칭으로 위치시켜 배기구의 위치변화에 따른 축소 실험을 실시하였다. 축소 터널의 사진을 그림 1-1에 나타내었으며 배기구 section의 사진을 그림 1-2에 나타내었다.

### 2.2 실험 장치

축소 터널 내부에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 0.32mm 두께의 T-타입(구리-콘스탄탄, 측정범위: -270~400°C) 열전대를 설치하였다. 터널 중앙에 화원이 위치하므로 대칭이라 가정하고 터널 한쪽 부분의



그림 1-1. Photograph of the reduced tunnel.



그림 1-2. Photograph of the vent section.

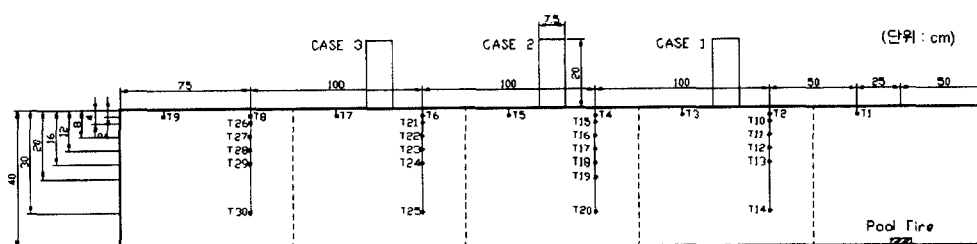


그림 2. Schematic of the thermocouple arrangement in the reduced tunnel.

내부에만 천장 아래에서의 연기전파 속도를 측정하기 위해 천장아래 2cm 위치에 9개(T1~T9), 수직온도 분포를 측정하기 위해 4곳에 높이방향으로 21개(T10~T30)의 열전대를 설치하였으며 열전대의 측정위치를 그림 2에 나타내었다. 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

축소 터널 공간에서의 화원의 위치는 축물 1/20에 따라 터널 모형의 중앙에 설치하였다. 실험에 직경이 5.23cm와 4.36cm의 화원을사용하였으며 가연물질로 휘발유를 사용하였다. 휘발유의 발열량은 다음식에 의해 얻어진다.

$$(\text{발열량}) = (\text{연소량}) \times (\text{연소열}) \times (\text{연소효율})$$

증발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소효율을 0.7로 고려하여 계산된 유효발열량은 5.23 cm의 화원의 경우 약 1.1004 kW이며 4.36 cm의 화원의 경우 약 0.7648 kW이다.

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.

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

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

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

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

화원 크기(cm)	발열량(kW)	환산발열량(MW)
4.36	0.7648	1.37
5.23	1.1004	1.97

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

3. 실험 결과 및 고찰

배기구를 화원으로부터 양쪽으로 각각 1m, 2m, 3m 떨어진 곳에 위치시켜 세 가지의 경우에 대해 오차를 줄이기 위해 각각 5회씩 실험을 실시하였다.

그림 3에 지름이 4.36 cm의 화원을 사용하였을 경우 시간의 경과에 따른 T6에서의 온도변화를 나타내었다. 배기구 통과 후연층의 온도가 배기구의 위치에 관계없이 배기구가 없는 경우에 비해 약 7~8°C 낮게 유

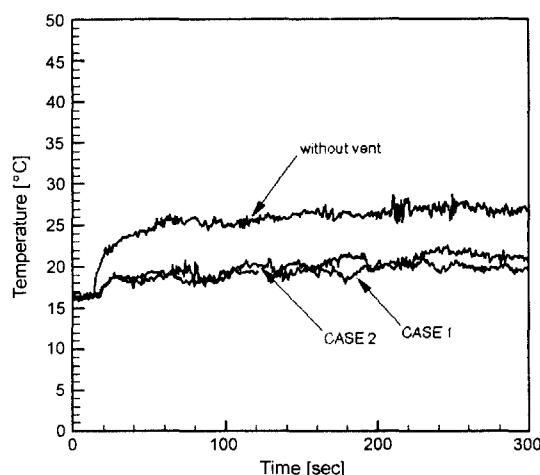


그림 3. Temperature variation at T6 with D=4.36 cm pool.

표 2. Average velocity of smoke front (unit:m/s)

	배기구 통과전		배기구 통과후	
	속도	환산속도	속도	환산속도
CASE 1	0.185	0.827	0.154	0.689
CASE 2	0.188	0.841	0.158	0.707
CASE 3	0.189	0.845	0.164	0.733

지되었다. 따라서, 발열량이 1.37 MW인 경우에는 배기구의 위치에 관계없이 배기구 통과 후에는 연기의 온도가 약 20~21°C로 일정하게 유지된다.

지름이 5.23 cm의 화원을 사용하였을 경우에 대하여 고려해보면, 터널내 화재가 발생하면 높은 온도로 인한 주위의 공기와의 밀도차에 의한 부력으로 인해 주위 공기의 유입이 이루어져 연기가 상승해 천장에 도달한 후 천장을 따라 천장제트를 형성하며 수평방향으로 이동한다. 천장에 수평방향으로 설치된 열전대의 온도 반응시간을 연기 선단의 위치로 간주하여 연기 선단의 수평전파 속도를 계산하여 표 2에 나타내었다. 배기구를 통과하면서 연기가 가지고 있는 열이 방출되고 천장과의 마찰과 열전달 등으로 인하여 배기구 통과 후 온도가 감소하기 때문에 연기의 이동속도가 감소하게 된다.

화재 발생시 피난시간의 확보는 인명 구조에 매우 중요한 인자이다. 따라서 화재 발생 후 연기 선단이 터널 출구에 도달하는 시간을 계산하기 위해 T1에서 T9까지 연기선단이 도달하는 시간을 계산하여 표 3에 나타내었다. 배기구가 화원에 가까울수록 배기구 통과 후 연기의 평균 이동속도가 감소하여 피난시간 확보에 영향을 주게 된다. CASE 1의 경우 연기 선단이 T9까지 도달하는데 걸리는 시간이 배기구가 없는 경우에 비해 약 3.86초 지연되었으며 이것은 환산시간으로 계산하면 약 17.3초가 지연된다.

화재발생 300초 후 천장아래 2 cm에서 터널 길이방향의 온도분포를 그림 4에 나타내었다. 연기가 갖고 있는 열에너지의 손실과 천장과의 마찰 등으로 인하여 연기가 퍼져나가면서 부력을 잃어가기 때문에 길이방

표 3. Reaching time of smoke front from T1 to T9

	시간(sec)	환산시간(sec)
without vent	21	93.9
CASE 1	24.86	111.2
CASE 2	23.3	104.2
CASE 3	21.8	97.5

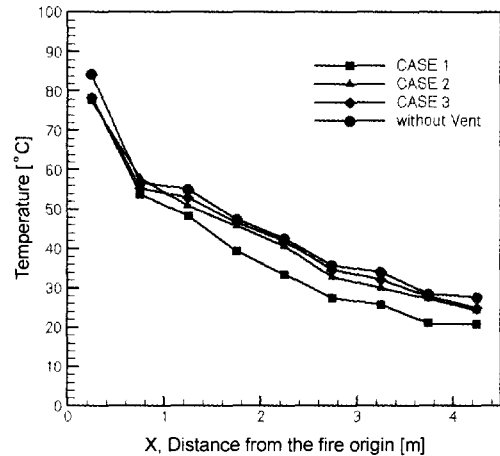


그림 4. Longitudinal temperature distribution in the tunnel at 300 sec.

향으로 온도가 감소하고 있는 것을 확인할 수 있으며 따라서 연기의 속도가 감소하게되어 연층 두께가 증가하게 되는데 이것은 가시화 사진을 통해서도 확인할 수 있다. 배기구를 통과하면서 외부로 열손실이 발생하지만 각 경우 배기구 통과 후 천장 부근에서 급격한 온도의 감소는 보이지 않았다. CASE 1의 경우 배기구 통과 후 배기를 하지 않은 경우에 비해 온도가 약 8°C 정도 감소하였으며 CASE 2에서는 약 3°C, CASE 3에서는 약 2°C가 감소하였다.

그림 5에 화재 발생 300초 후 각 위치에서 수직온도 분포를 비교하였다. 그림에서 천장 부근의 뜨거운 연기층, 중간 부분의 혼합영역, 그리고 바닥 부근의 차가운 공기층의 세 개의 영역이 존재하는 것을 확인할

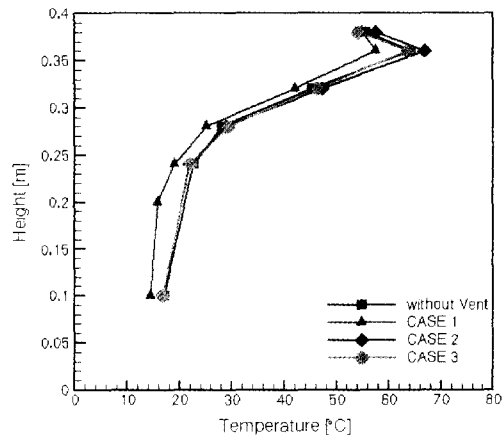


그림 5-1. Vertical temperature comparison at T10-T14.

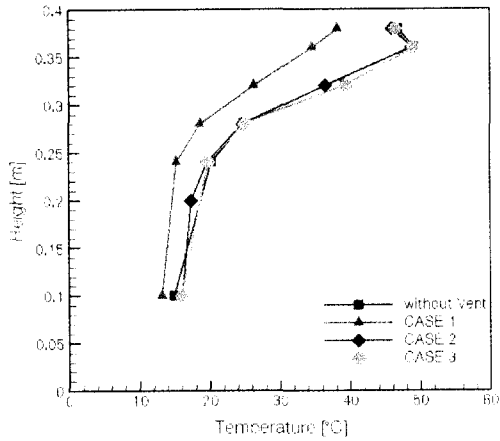


그림 5-2. Vertical temperature comparison at T15-T20.

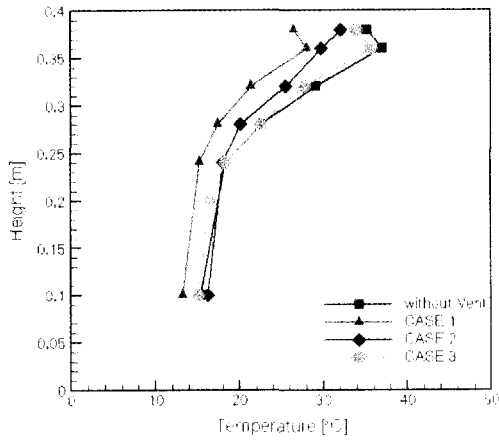


그림 5-3. Vertical temperature comparison at T21-T25.

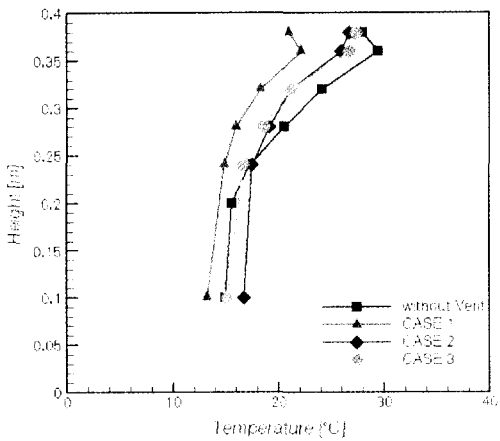


그림 5-4. Vertical temperature comparison at T26-T30.

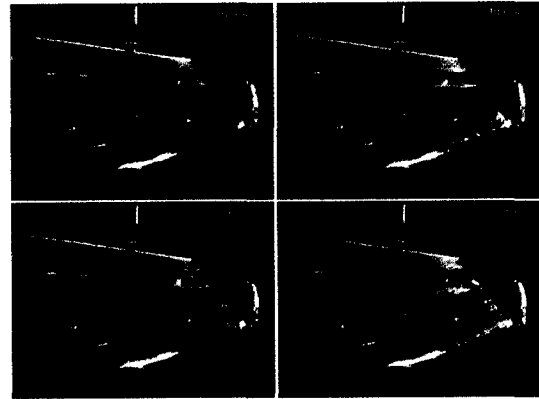


그림 6. Photographs of a smoke movement process in the tunnel around the vent.

수 있다. CASE 1의 경우 T10-T14의 수직 온도분포를 보면 배기구가 없는 경우에 비해 온도가 감소하는 것을 볼 수 있다. 배기구를 통한 열전달이 배기구 통과 전에도 영향을 끼침을 확인할 수 있다. 그러나 CASE 2와 CASE 3에서는 이같은 현상을 발견되지 않았다. 터널 출구에서 가장 가까운 T26-T30의 수직온도 분포를 보면 배기구가 없는 경우에 비하여 CASE 1은 약 7°C, CASE 2는 약 3°C, CASE 3은 약 2°C의 온도가 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 6에 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 연층의 높이가 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 배기구를 통한 열에너지의 손실에 의한 연기의 속도저하로 인하여 배기구 통과후 연층의 두께는 다시 증가하게 되며 터널의 약 25%까지 연층이 하강하는 것을 확인할 수 있다. 부력을 잃고 하강하는 연기는 출구로부터 유입되는 차가운 공기에 의해 다시 안쪽으로 유입되는 것도 확인할 수 있다.

#### 4. 결 론

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 배

기구 통과 후 연기 전파속도의 지연과 온도 감소의 효과를 얻을 수 있다.

2. 발열량이 1.37 MW인 경우, 배기구의 위치에 관계 없이 배기구 통과 후 연기의 온도가 배기구가 없는 경우에 비하여 약 7~8°C 낮게 유지되었다.

3. 발열량이 1.97MW인 경우,

(1) 배기구의 위치가 화원에 가까울수록 배기구 통과 후 연기 선단의 평균 이동속도가 감소하였으며 배기구가 없는 경우에 비교하여 최대 약 17.3초의 지연이 가능하다.

(2) CASE 1에서는 자연배기 실시 후 천장에서 약 8°C, 수직온도가 약 7°C 감소되는 효과를 얻을 수 있었으며, CASE 2에서는 각각 약 3°C, CASE 3에서는 각각 약 2°C의 온도 감소효과를 얻었다.

(3) 가시화를 통하여 배기구 통과 후 연기가 부력 감소로 인하여 다시 하강하는 것을 확인할 수 있었으며 연층은 화재발생 약 1분후 터널 높이의 약 25%까지 하강한 후 일정하게 유지되었다.

(4) CASE 1이 배기구 통과 후 연기의 이동속도 지연과 온도 감소의 효과가 가장 뛰어났다.

4. 배기구의 위치에 따른 터널내 온도분포를 파악하여 터널내 방화계획과 배연 시스템의 설계시 정성적인 자료로 제공될 수 있다.

## Nomenclature

Q : Heat release rate - 발열량[kW]

V : Velocity - 속도[m/s]

t : Time - 시간[sec]

## Subscript

F : Full scale - 실물 스케일

M : Model - 모형

## 후 기

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

## 참고문헌

1. 차철현, 김진국, "지하철 터널에서의 제연", 공기조화 냉동공학, 제28권, 제6호(1999).
2. Yasushi Oka, Graham T. Atkinson, "Control of Smoke Flow in Tunnel Fires", Fire Safety Journal, Vol. 25(1995).
3. P.J. Woodburn, R.E. Britter, "CFD Simulations of a Tunnel Fires-Part I", Fire Safety Journal, Vol. 26(1996).
4. P.J. Woodburn, R.E. Britter, "CFD Simulations of a Tunnel Fires-Part II", Fire Safety Journal, Vol. 26(1996).
5. W.K. Chow, "Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2(1996).
6. W.K. Chow, "On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation", Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3(1998).
7. G.T. Atkinson, Y. Wu, "Smoke Control in Sloping Tunnels", Fire Safety Journal, Vol. 27(1996).
8. Y. Wu, M.Z.A. Bakar, "Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity", Fire Safety Journal, Vol. 35(2000).
9. 김상훈, 김성찬, 김충익, 유홍선, "터널내에서 화재 발생 시 연기 거동에 대한 연구", 한국화재 소방학회지, 제14권, 제2호(2000).
10. 윤철욱, "도로터널 환기 현황 및 문제점", 공기조화 냉동공학, 제26권, 제2호(1997).