

터널화재시 자연환기에 의한 연기거동에 관한 실험적 연구

이 성 룡, 박 현 태, 김 충 익*, 유 홍 선*

중앙대학교 기계공학부 대학원, *중앙대학교 기계공학부

An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires with Natural Ventilation

Sung Ryong Lee, Hyun Tae Park, 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 August 25, 2001; revision received February 19, 2002)

ABSTRACT: In this study, reduced-scale experiments were conducted to analyze smoke movement in tunnel fire with roof vent. The 1/20 scale experiments were carried out under the Froude scaling using gasoline pool fire ranging from 7.3 to 15.4 cm in diameter with total heat release rate from 1.0 to 8.46 kW. In case of 1 m high vent, smoke front reached to the tunnel exit at about 16 sec delayed with ventilation. The delay time grew longer with the vent height. The temperature after the vent was lower than that without the vent. The exit temperature declined maximum of 20°C after passing the vent. It was confirmed that the thickness of smoke layer was maintained uniformly under the 25% height of the tunnel through the visualized smoke flow by a laser sheet and the digital camcorder.

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

기 호 설 명

A : 풀 면적 [m^2]
 A_T : 터널단면적 [m^2]
 C_p : 정압비열 [kJ/kgK]
 D : 풀 직경 [m]
 g : 중력가속도 [m/s^2]
 H : 터널 높이 [m]
 H_c : 연소열 [MJ/kg]
 \dot{m}'' : 연료증발량 [kg/m^2s]

P : 둘레길이 [m]
 \dot{Q} : 발열량 [kW]
 T : 온도 [K]
 V : 속도 [m/s]
 t : 시간 [s]
 L : 터널 길이 [m]

상첨자

$k\theta$: 소화-흡수계수 [m^{-1}]

하첨자

∞ : 무한반경
 0 : 대기 상태

† Corresponding author

Tel.: +82-2-820-5283; fax: +82-2-815-0672

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

v : 배기

1. 서 론

우리나라는 국토의 약 70%가 산악지대이며 간선도로망의 정비에 있어서는 산맥 등의 지형적 장벽을 극복하는 수단으로서 터널의 건설이 불가피하다. 도로의 구조형식의 하나로써 터널의 채용은 바람직한 도로선형의 확보에 따른 주행편의를 향상시키는 것은 물론 산악지대에서의 험준한 경사에서 자연재해로부터 교통을 보호함과 자연경관의 보전에서도 유용하다. 한편 도시에 집중하는 교통을 처리하기 위한 도시 내의 도로망 정비에 있어서도 터널구조는 생활환경의 보전이나 토지의 입체적 활용에 의한 고도이용 등의 관점에서 유용한 구조형식이다.

그러나 이러한 유용한 구조형식인 터널 안에서는 차량충돌 등 사고가 발생했을 때 신속한 조치를 취하지 않으면 2차적인 화재를 발생시킬 위험성이 있다. 또한 터널 안은 공간이 한정된 특수한 환경에 있으므로 화재현장 접근 곤란으로 인해 화재가 확대되어 큰 재난이 될 가능성이 있다.

터널화재에 대한 연구로서 Oka and Atkinson⁽¹⁾은 화원의 크기, 모양, 위치를 변화시켜 가며 축소터널 실험을 실시하여 임계속도가 $(Q^*)^{1/3}$ 에 비례하지만 화염높이가 터널높이 이상이 되는 경우 발열량에 무관하다는 것을 보여주었으며 Atkinson and Wu⁽²⁾도 경사터널에 대하여 같은 결과를 얻었다. Wu and Bakar⁽³⁾는 서로 다른 단면을 가진 모형터널에 대하여 축소실험을 실시하여 수치해석 결과와 비교하였으며 Woodburn and Britter^(4,5)는 터널화재시 배기속도에 관한 수치해석을 실시하였는데 난류모델에 따라 많은 차이를 보였다. Chow^(6,7)는 터널을 여러 구간으로 나누어 Zone 모델을 이용한 수치해석 결과 평균 온도와 연층의 경계높이가 비교적 잘 일치하였으며 Field 모델을 이용시에는 난류모델에 따라 결과에 차이를 보였다. 국내의 연구로는 Kim et al.⁽⁸⁾이 축소모형 실험을 실시하여 연기의 거동을 해석하였으며 이를 수치해석 결과와 비교하였으며, Lee et al.^(9,10)은 수평 환기구를 설치하여 환기구의 설치효과와 환기구의 위치변화에 따른 연기의 거동에 관한 축소실험을 실시하였다.

터널 안에 화재가 발생하였을 경우 열에 의한

손상 이외에 독성가스에 의해 사고가 확대되고 피해가 커질 수도 있으므로 적절한 환기설비를 갖추지 않은 경우 대형 인명사고를 초래할 수 있다. 터널의 환기방식에는 송풍기를 설치하여 강제적으로 배연하는 기계환기방식과 자연환기방식으로 나눌 수 있다. 기계환기방식이 자연환기방식에 비하여 배연효과는 우수하나 유지보수에 많은 비용이 들며 그에 따라 신뢰성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 지금까지의 연구들도 대부분이 정상상태에서 강제환기방식에 의한 임계속도에 관한 연구들이 대부분이다. 그러나 인명피해의 대부분이 화재발생 초기에 발생하므로 비정상상태의 연기거동이 중요하나 이에 대한 연구는 거의 진행이 되지 않고 있다.

따라서 본 연구에서는 시간에 따른 연기의 거동과 환기구설치로 인한 배연효과를 평가하기 위하여 수평 환기구가 설치된 모형터널을 제작하여 환기구의 높이를 변화시켜 가며 실험을 실시하였다. 환기구설치에 따른 배기의 효과와 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 1/20으로 축소시켜 폭 0.4m, 높이 0.4m, 길이 1m의 내부공간에 1cm의 두께를 갖는 투명 아크릴로 모형을 제작하여 9개의 모형을 연결하였으며, 내경이 7.5cm, 높이 0.2m, 0.6m, 1.0m 세 가지의 경우의 환기구를 화원으로부터 2m 떨어진 곳에 위치시켜 화원의 지름을 7.3cm부터 15.4cm까지 변화시켜 가며 축소실험을 실시하였다. 열에 의한 변형을 방지하기 위해 화원부의 모형은 강철로 제작하였다. 축소터널과 환기구부 모형의 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험장치

축소터널 내부에서의 온도변화를 측정하기 위하여 0.32mm 두께의 T-타입(구리-콘스탄탄, 축

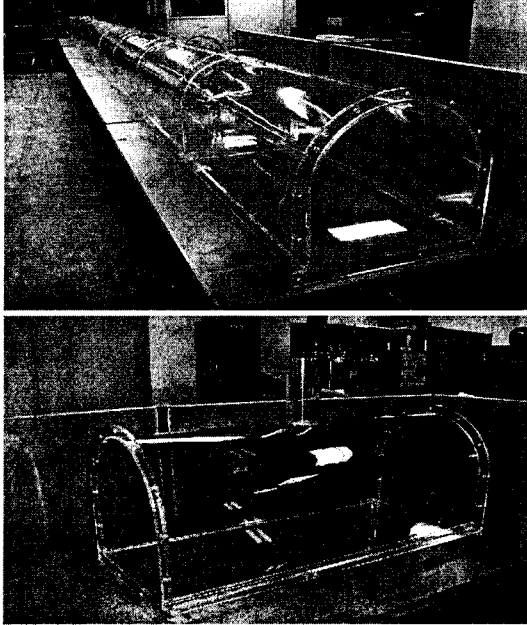


Fig. 1 Photograph of the reduced tunnel.

정범위 : -270~400℃) 열전대를 설치하였다. 천장 아래에서의 연기전파속도를 측정하기 위해 천장 아래 2cm 위치에 15개(T1~T15), 환기구 주변의 수직온도분포를 측정하기 위해 5곳에 높이

방향으로 21개(T16~T36)의 열전대를 설치하였으며 터널의 개략도와 열전대의 측정위치를 Fig. 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 화 원

실험에 직경이 다른 5개의 화원(7.3 cm, 8.3 cm, 10 cm, 12.5 cm, 15.4 cm)을 사용하였으며 가연물질로 휘발유를 사용하여 모형 터널의 입구에서 2.5m 떨어진 곳에 화원을 설치하였다. Pool 화재의 경우 발열량은 다음의 식에 의해 얻어진다.⁽¹¹⁾

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

여기서, $\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}''(1 - e^{-k\theta D})$, 휘발유의 $H_c = 43.7 \text{ MJ/kg}$, $\dot{m}_{\infty}'' = 0.055 \text{ kg/m}^2\text{s}$, $k\theta = 2.1 \text{ m}^{-1}$ 이다.

중발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소효율을 0.7로 고려하여 발열량을 계산하였다.^(12,13)

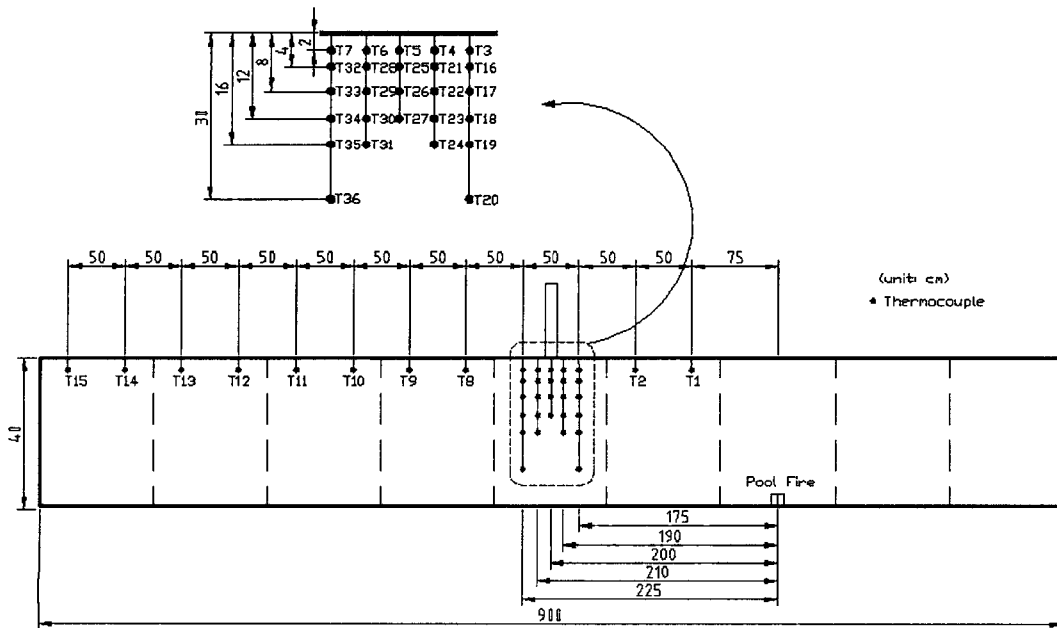


Fig. 2 Schematic of the tunnel and the position of thermocouples.

2.4 축소법칙

터널 내에서의 연기유동은 부력에 의해 지배되므로 Froude No.가 가장 중요하며 이에 따라 본 축소실험에서는 'Froude' Scaling을 사용하였다. 축소터널과 실제 터널의 발열량 \dot{Q}_M 과 \dot{Q}_F , 속도 V_M 과 V_F , 시간 t_M 과 t_F 사이의 관계는 다음 식과 같다.⁽¹⁴⁾

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

$$\frac{V_M}{V_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\frac{t_M}{t_F} = \left(\frac{L_M}{L_F}\right)^{1/2} \quad (4)$$

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

3. 실험결과 및 고찰

터널 내 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.

화재발생시 피난시간의 확보는 인명구조에 매우 중요한 인자이다. 따라서 화재발생 후 연기선단이 터널 출구에 도달하는 시간을 계산하기 위해 천장에 수평방향으로 설치된 열전대의 온도 반응시간을 연기선단의 위치로 간주하여 T1에서

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

D (cm)	\dot{Q}_M (kW)	\dot{Q}_F (MW)
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

T15까지 연기선단이 도달하는 데 걸린 시간을 이용하여 연기선단의 이동속도를 계산하였다.

T1에서 T15까지 연기선단이 도달하는 데 걸린 시간과 연기선단의 평균 이동속도를 Table 2에 나타내었다. 환기구의 높이가 증가할수록 연기선단의 출구도달시간이 지연되었으며, 환기구의 높이가 1m의 경우, 환기구를 설치하지 않은 경우에 비해 최대 약 16초가 지연되었으며 이것은 환산시간으로 약 70초가 지연된다.

터널 출구로 배출되는 연기선단의 이동속도를 Fig. 3에 나타내었다. 연기선단의 이동속도가 발열량의 멱승에 비례하여 증가하였으며 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$V_{front} = \alpha \dot{Q}^\beta \quad (5)$$

여기서 α 와 β 는 실험상수이며 $\alpha=0.18$, $\beta=0.27$ 이다.

또한 무차원 해석방법을 이용하여 데이터 분석을 실시하였다. 본 연구에서는 터널 수력직경, \bar{H} 와 환기구의 높이, H_v 를 특성길이로 사용하였다. 터널 수력직경은 다음과 같이 정의된다.

Table 2 Reaching time to tunnel exit and velocity of smoke front

Q [kW]	With vent						Without vent	
	Vent height=0.2 m		Vent height=0.6 m		Vent height=1.0 m		t_{T15-T1} [s]	V_{front}
	t_{T15-T1} [s]	V_{front}	t_{T15-T1} [s]	V_{front}	t_{T15-T1} [s]	V_{front}		
1.0	37.92	0.145	42.9	0.128	46.53	0.118	30.44	0.181
1.46	34.62	0.159	39.83	0.138	42.0	0.131	25.57	0.215
2.5	30.6	0.18	34.0	0.162	35.66	0.154	24.16	0.228
4.77	23.525	0.234	25.65	0.214	26.78	0.205	19.26	0.286
8.46	17.6	0.313	18.5	0.297	19.65	0.28	16.65	0.33

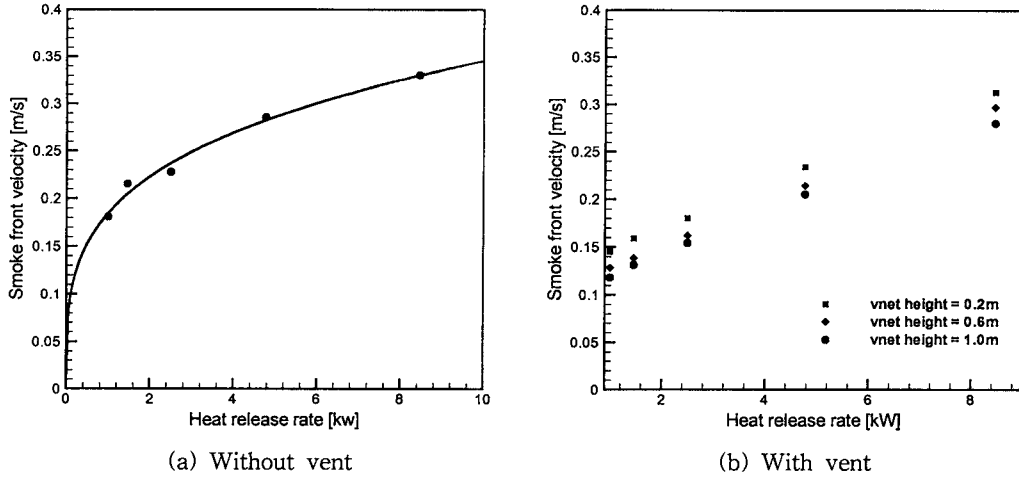


Fig. 3 Smoke front velocity.

$$\bar{H} = \frac{4A_T}{P} \quad (6)$$

따라서 무차원 연기선단 속도, V'' 와 무차원 발열량, Q'' 은 다음과 같이 정의된다.

$$V'' = \frac{V_{front}}{\sqrt{gH_v}} \quad (7)$$

$$Q'' = \frac{\dot{Q}}{\rho_0 C_P T_0 \sqrt{g\bar{H}^5}} \quad (8)$$

터널 수력직경과 환기구의 높이를 이용하여 Q''

와 V'' 의 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 무차원 연기선단 속도가 무차원 발열량의 증가에 따라 증가하였으며 H_v 와 Q'' 를 이용하여 다음의 관계식으로 나타낼 수 있다.

$$V'' = C_1 H_v^\alpha + C_2 H_v^\beta Q'' \quad (9)$$

여기서 C_1, C_2, α, β 는 실험상수로서 $C_1=0.0312, C_2=0.805, \alpha=-0.642, \beta=-0.527$ 이다.

4.77 kW 화재에 대하여 화재발생 100초 후 천장 아래 2cm에서 터널 길이방향의 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 환기구를 통과하면서 환기

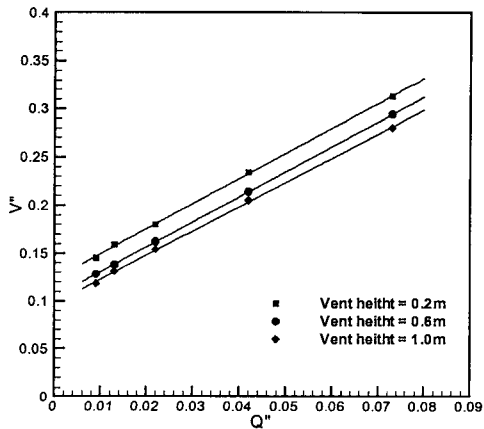


Fig. 4 Dimensionless smoke front velocity.

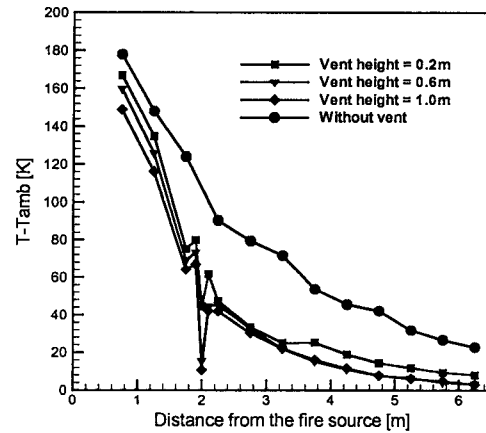


Fig. 5 Ceiling temperature distribution in the tunnel at 100 sec with 4.77 kW fire.

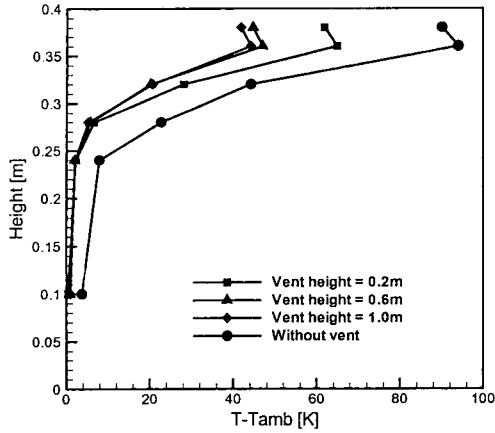


Fig. 6 Vertical temperature profile at 100 sec with 4.77 kW fire.

구 외부와의 밀도차로 인하여 연기가 가지고 있는 열이 방출되고 외부에서 찬공기가 유입되며⁽¹⁵⁾ 환기구 하부의 찬 공기와 혼합 및 천장과 마찰과 열전달 등으로 인하여 환기구 부근에서 온도가 급격히 감소하며 환기구 통과 후 출구에서 온도가 최대 약 20℃의 감소효과를 얻을 수 있다.

Fig. 6은 4.77 kW 화재에 대하여 화재발생 100 초 후 환기구로부터 25 cm 떨어진 위치에서 수직 온도분포를 환기구 설치전과 비교하였다. 그림에서 천장 부근의 뜨거운 연기층, 중간부분의 혼합 영역, 그리고 바닥 부근의 차가운 공기층의 세 개의 영역이 존재하는 것을 확인할 수 있다. 환기구를 설치함으로써 환기구를 통한 뜨거운 연기의 배출과 함께 외부의 차가운 공기의 유입으로 인해 최대 50℃ 이상 온도감소 효과가 있는 것을 확인할 수 있다. 환기구의 높이가 0.6m 이상에서는 환기구의 높이에 의한 온도의 감소에는 차이가 미미한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7에 4.77 kW 화재에 대하여 가시화를 통하여 시간의 경과에 따른 환기구 주위의 연기 거동을 나타내었다. 화재가 발생하게 되면 연기는 부력에 의해 상승한 후 터널 길이방향으로 천장 제트를 형성하며 이동하여 출구로 빠져나가게 되며 터널 출구로부터 차가운 공기의 지속적인 유입으로 인하여 화재발생 약 1분 후부터는 뜨거운 연기층의 높이가 거의 일정하게 유지되는 것을 확인할 수 있다. 환기구를 통한 열에너지 손실에 의한 터널 출구로 배출되는 연기의 속도저하와 부력감소로 인하여 환기구 통과 후 방출되는

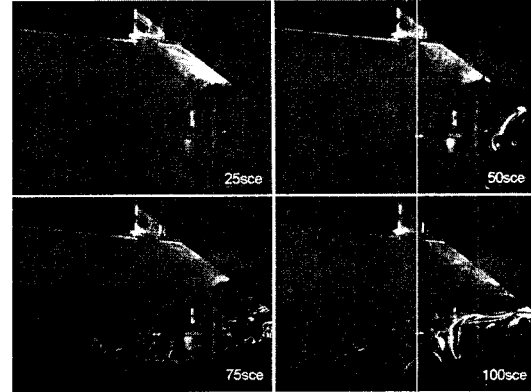


Fig. 7 Photographs of a smoke movement process in the tunnel around the vent with 4.77 kW fire.

뜨거운 연층의 두께는 다시 증가하게 되며 12.5 cm의 화원의 경우 터널의 약 25%까지 하강하는 것을 확인할 수 있다. 약 1분 후부터 부력을 잃고 하강하는 연기는 출구로부터 유입되는 차가운 공기에 의해 다시 안쪽으로 재유입되기 시작하여 터널 내부가 연기로 가득차게 되는 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 터널 내 화재발생시 축소실험을 실시하여 자연환기에 의한 연기의 거동과 온도분포 등을 연구하였다. 본 연구를 통해 얻은 결론을 다음과 같이 정리할 수 있다.

(1) 환기구를 설치하여 자연배기를 실시함으로써 환기구 통과 후 연기 전파속도의 지연과 온도감소의 효과를 얻을 수 있다.

(2) 화원의 크기가 증가함에 따라 환기구 설치시, 연기선단의 무차원 이동속도가 무차원 발열량에 비례하며 다음과 같다.

$$V'' = C_1 H_v^\alpha + C_2 H_v^\beta Q''$$

여기서, $C_1 = 0.0312$, $C_2 = 0.805$, $\alpha = -0.642$, $\beta = -0.527$ 이다.

(3) 환기구의 높이가 터널높이의 1.5배 이상의 경우, 온도감소 효과에는 크게 영향이 없다.

(4) 가시화를 통하여 연기의 시간에 따른 이동

을 확인할 수 있었고 방출되는 연기층의 두께가 터널높이의 약 25%에서 일정하게 유지되었으며 화재발생 약 1분 후부터 유입되는 차가운 공기와 함께 하강하는 연기가 재유입되어 터널 내부가 연기로 가득차게 된다.

(5) 수평 환기구가 설치된 터널에서 발열량의 변화에 따른 터널 내 온도분포를 파악하여 터널 내 방재계획과 배연시스템의 설계시 정성적인 자료로 제공될 수 있다.

후 기

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

참고문헌

1. Oka, Yasushi and Atkinson, Graham T., 1995, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, *Fire Safety Journal*, Vol. 25, pp. 305-322.
2. Atkinson, G. T. and Wu, Y., 1996, Smoke Control in Sloping Tunnels, *Fire Safety Journal*, Vol. 27, pp. 335-341.
3. 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.
4. Woodburn, P. J. and Britter, R. E., 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part I, *Fire Safety Journal*, Vol. 26, pp. 35-62.
5. Woodburn, P. J. and Britter, R. E., 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part II, *Fire Safety Journal*, Vol. 26, pp. 63-90.
6. Chow, W. K., 1996, Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 11, No. 2, pp. 221-236.
7. Chow, W. K., 1998, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 13, No. 3, pp. 271-275.
8. 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.
9. 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.
10. Lee, S. R., Kim, C. I. and Ryou, H. S., 2001, An Experimental Study of Smoke Movement in Tunnel Fires, *Proceedings of the KSME 2001 Spring Annual Meeting D*, pp. 121-126.
11. Babrauskas, V., 1998, *The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering*, U.S.A.
12. Hamins, A., Konishi, K., Borthwick, P. and Kashiwagi, T., 1996, Global Properties of Gaseous Pool Fires, *Twenty-Sixth Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, pp. 1429-1436.
13. Megret, O. and Vauquelin, O., 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, *Fire Safety Journal*, Vol. 34, No. 4, pp. 393-401.
14. Quintiere, J. G., 1989, Scaling Applications in Fire Research, *Fire Safety Journal*, Vol. 15, No. 1, pp. 3-29.
15. Qing Tan and Yogesh Jaluria, 2001, Mass flow through a horizontal vent in an enclosure due to pressure and density difference, *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44, pp. 1543-1553.