

터널화재시 제트팬에 의한 연기제어에 관한 실험적 연구

이성룡¹⁾ · 김충익²⁾ · 유홍선²⁾ · 방기영³⁾

An Experimental Study of Smoke Control in Tunnel Fires with Jet Fan

Sung Ryong Lee, Choong Ik Kim, Hong Sun Ryou and Ki Young Bang

Abstract. In this study reduced-scale experiments were conducted to analyze smoke movement in tunnel fire with jet fan. The 1/20 scale experiments were carried out under the Froude scaling using gasoline pool fire range from 6.6 to 12.5 cm in diameter with total heat release rate from 0.714 to 4.77 kW. In the case of fires under the 2.5 kW, backlaying was reduced about 40cm and smoke was effectively controled in downstream of the fan when operating the fan. The smoke layer was moved down and the ceiling temperature was decreased compared to that of without fan case in upstream of the fan, but the temperature in the lower part of the tunnel was increased.

KeyWords: Tunnel Fire, Smoke Movement, Froude Scaling, Jet Fan, Ventilation

초 록. 본 연구에서는 제트팬이 설치된 터널에서 화재발생시 연기의 거동을 해석하기 위하여 축소실험을 실시하였다. Froude 상사를 사용하여 1/20로 축소된 모형터널에서 실험을 실시하였으며 가연물질로는 휘발유를 사용하였다. 지름이 6.6~12.5 cm의 화원을 사용하였으며 발열량은 0.714~4.77 kW이다. 2.5 kW 이하의 화재시 팬을 가동함으로써 인하여 연기류가 팬 상류 약 40cm 이상 감소하였으며 팬 하류에서는 효과적으로 연기를 제어하였다. 팬 상류에서는 팬을 가동하지 않은 경우에 비해 연층은 하강하고 온도는 감소하였으나 터널 하부에서는 온도가 증가하였다.

핵심어: 터널화재, 연기거동, Froude 상사, 제트팬, 환기

1. 서 론

경제성장과 더불어 급속하게 성장된 교통의 수요를 충족시키기 위해 간선도로망의 정비는 불가결한 것이다. 산악지형에서 도로의 선형성 확보와 지하공간 활용을 위해 터널의 건설이 성행하고 있으며 최근들어 터널이 장대화되는 추세이다. 일반적으로 총연장이 1 km 이상인 터널을 장대터널이라 하며 2001년 12월 개통된 죽령터널은 총연장이 4.6 km로 국내 최장의 터널이다. 터널이 장대화될수록 차량충돌 등 화재가 발생하였을 경우 위험성은 더욱 증가하게 된다. 죽령터널의 경우 방재시설로서 피난용 연락갱 6개소, 비상주차대 13개소와 터널내 화재에 대비한 대형 스프링클러가 설치되어있다.

터널내에서 차량충돌 등 화재가 발생하였을 경우 공간이 한정된 특수한 환경에 있으므로 신속한 조치를

취하지 않으면 2차적인 화재를 발생시킬 위험성이 있다. 최근의 터널사고 사례를 보면 1999년 몽블랑터널 탱크로리 충돌 화재사고로 39명이 사망하였으며, 오스트리아 타우에른터널 화재사고로 12명이 사망하였다. 2000년 오스트리아 키츠슈타인호른 산악열차 화재사고로 155명이 사망하였으며, 2001년 오스트리아 남부 글라인 일름터널에서 자동차정면충돌로 인한 화재사고로 인해 5명이 사망하였으며, 암베르크터널 화재사고로 3명이 사망하였다. 그리고 스위스의 생 고타르터널 차량충돌 화재사고로 인해 10명이 사망하는 사고가 발생하였다. 터널내 차량화재사고의 발생빈도는 낮으나, 최근의 터널 화재사례에서처럼 화재가 발생하면 중대한 사고로 발전될 가능성이 높아 많은 인명 및 경제적 손실이 발생하므로 초기 화재진압 및 인명대피가 가능한 방재설비 설계에 대한 많은 검토가 이루어지고 있다.

실제 터널에 대한 화재실험은 1992년 노르웨이에서 실시한 Eureka 499 Project와¹⁾ 1993년 미국에서 실시한 Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program²⁾ 등이 있다. 실물 터널에 대한 실험은 좋은 결과들을 많이 제공하고 있지만 시간과 비용이 많이 드는 단점을

¹⁾ 중앙대학교 기계공학부 대학원

²⁾ 중앙대학교 기계공학부 교수

³⁾ 삼성 에버랜드 기술개발연구소 소장

접수일: 2002년 1월 29일

심사 완료일: 2002년 6월 8일

가지고 있다. 따라서 대안으로 CFD와 축소모형실험이 많이 사용되고 있다. 축소실험을 통하여 임계속도가 발열량의 1/3승에 비례하는 구간과 발열량에 상관없이 일정한 구간이 존재하는 것을 확인하였으며 수치해석을 통하여 터널내 연기의 유동을 해석하였다.³⁻¹²⁾

터널 길이가 증가할수록 내부에서 화재가 발생하였을 경우 별도의 제연설비가 필요하게 된다. 따라서 본연구에서는 천장에 제트팬이 설치된 모형터널을 제작하였다. 팬가동시 제연효과와 온도제어 효과를 해석하여 터널설계시 방재계획 수립에 정성적인 자료를 제공하고자 한다.

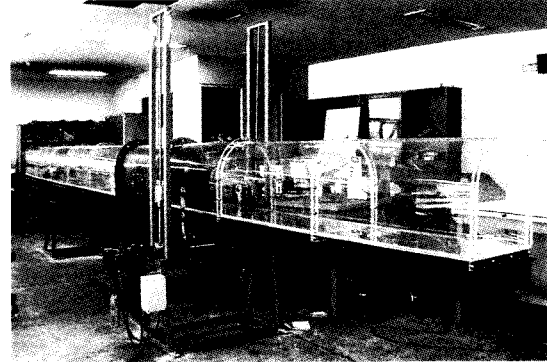


Fig. 1. Photograph of the reduced tunnel.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험터널

터널 내에서의 화재성상에 관한 실험에 사용된 터널은 폭 8 m, 높이 8 m, 길이 180 m 크기의 실물 터널 공간을 길이에 대해 1/20으로 축소시켜 폭 0.4 m, 높이 0.4 m, 길이 1 m의 내부공간에 1 cm의 두께를 갖는 투명 아크릴로 모형을 제작하여 9개의 모형을 연결하였으며 화원의 지름을 6.5 cm부터 12.5 cm까지 변화시키며 축소실험을 실시하였다. 열에 의한 변형을 방지하기 위하여 화원부의 모형은 강철로 제작하였다. 축소 터널

의 사진을 Fig. 1에 나타내었다.

2.2 실험 장치

축소 터널 내부에서의 온도 변화를 측정하기 위하여 0.32 mm 두께의 T-타입(구리-콘스탄탄, 측정범위: -270 ~400℃) 열전대를 설치하였다. 천장 아래에서의 연기의 온도분포를 측정하기 위해 천장아래 2 cm 위치에 19개(T1~T19), 수직온도 분포를 측정하기 위해 2곳에 높이방향으로 12개(T20~T31)의 열전대를 설치하였으며

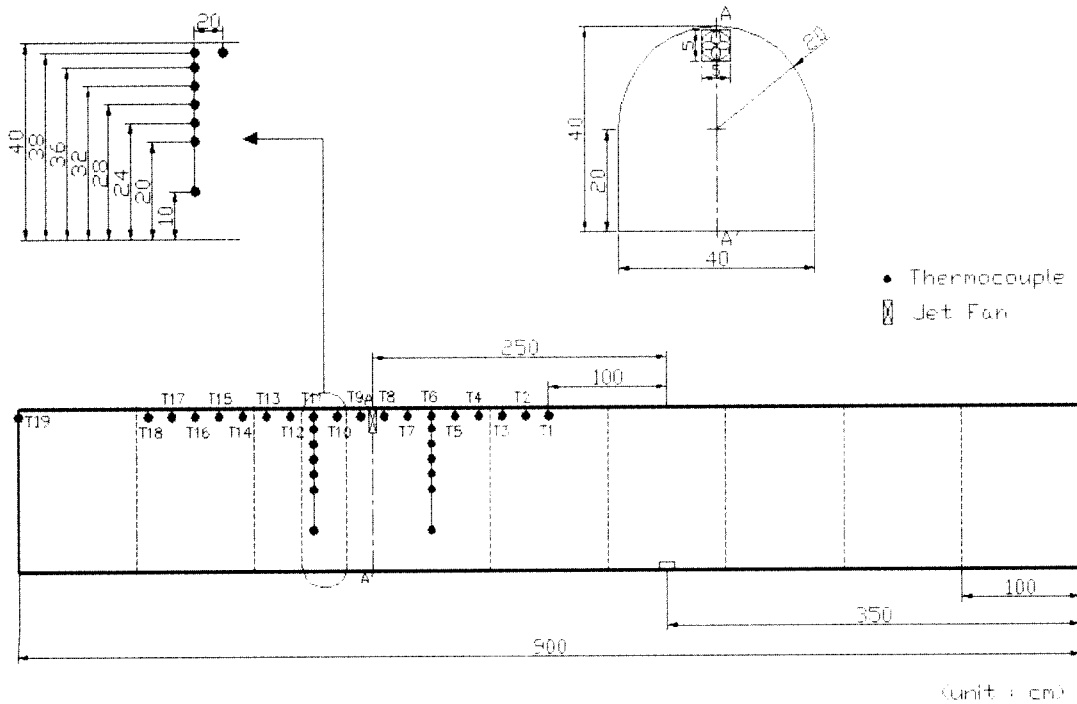


Fig. 2. Schematic of the reduced tunnel and the position of thermocouples.

터널의 개략도와 열전대의 측정위치를 Fig. 2에 나타내었다. 제트팬으로 CPU용 쿨링팬(50×50×10 mm)을 사용하였으며 디지털 마노미터로 유량을 측정된 결과 유량은 0.0063 m³/s(토출속도 4.54 m/s)이며 실제 터널 팬의 유량으로 환산하면 11.32 m³/s(토출속도 20.3 m/s)이다. 화원으로부터 2.5 m 떨어진 위치에 팬을 설치하였으며 화재발생 감지시간을 고려하여 화재발생 30초후 팬이 가동하게 하였다.

2.3 화원

실험에 직경이 다른 5개의 화원(6.6 cm, 7.3 cm, 8.3 cm, 10 cm, 12.5 cm)을 사용하였으며 가연물질로 휘발유를 사용하여 모형 터널의 입구에서 3.5 m 위치의 중앙에 화원을 설치하였다. 풀화재의 경우 발열량은 다음의 식에 의해 얻어진다.¹³⁾

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

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

여기서 \dot{Q} 는 발열량(kW), H_c 는 연소열(MJ/kg), \dot{m}'' 는 질량소멸율(kg/m²s), A 는 풀의 단면적(m²), D 는 풀의 지름(m)이다. 휘발유의 경우 $H_c=43.7$ MJ/kg, $\dot{m}_{\infty}'' = 0.055$ kg/m²s, $k\theta = 2.1$ m⁻¹이다.

중발된 연료가 모두 연소되는 것은 아니기 때문에 연소효율을 0.7로 고려하여 발열량을 계산하였다.¹⁴⁾

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 \dot{Q}_M 과 \dot{Q}_F , 속도 V_M 과 V_F , 시간 t_M 과 t_F 사이의 관계는 다음 식과 같다.¹⁵⁾

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

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

Table 1. The model and full-scale heat release rates 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
12.5	4.77	8.572

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

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

3. 실험결과 및 고찰

터널에서 화재가 발생하면 화재에 의하여 생성된 연기가 부력에 의하여 상승하고 터널의 천장을 만나며 터널의 길이방향으로 전파된다. 종류식 환기설비의 경우 피난방향으로 연기가 전파되지 못하도록 피난방향에서 화재 방향으로 기류를 불어주게 되는데 이 기류를 이기고 피난방향으로 연기가 전파되는 현상을 역기류라고 하며 이는 연기가 흐르고자 하는 힘이 연기를 제어하고자 하는 힘보다 크기 때문에 발생한다.

화재발생 200초 후 천장아래 2 cm에서 터널 길이방향의 온도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 1.46 kW 이하의 화재의 경우 팬 하류로 연기의 이동이 억제되었으며 팬 상류 약 40 cm 이상 역기류가 감소하였다. 일반적으로 터널내에 설치되는 제트팬의 경우 토출속도가 30 m/s 정도이나 본 연구에서는 팬의 토출속도가 작아 역기류를 완전제어할 수는 없었다. 2.5 kW 이상의 화재의 경우 팬을 가동하여도 연기가 터널 출구로 배출되었으며 4.77 kW 화재의 경우 터널 내부의 높은 온도로 인하여 팬에 변형이 발생하여 팬의 작동이 중단되는 경우가 발생하였다. 이와 같은 현상은 실제 터널 화재에서도 발생하여 화재가 확대되는 경우가 있으므로 터널내 제트팬의 설계시 이와 같은 사항이 고려되어야 할 것이다.

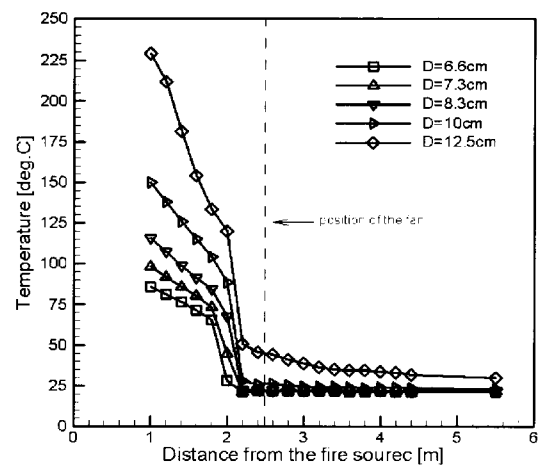


Fig. 3. Ceiling temperature distributions in the tunnel at 200sec.

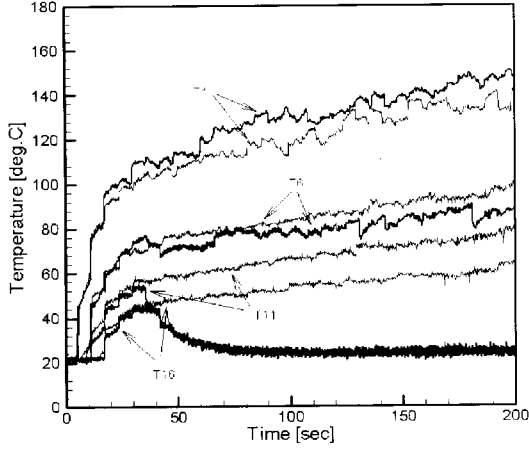


Fig. 4. Temperature progression as a function of time with 2.5kW fire.

2.5 kW 화재에 대하여 시간경과에 따른 T1, T6, T11, T16의 온도변화를 Fig. 4에 나타내었다. 여기서 굵은 실선은 팬을 가동한 경우이며 가는 실선은 팬을 가동하지 않은 경우이다. 팬을 가동함으로써 팬 하류로 연기의 이동이 감소되었으며 시간경과에 따라 온도가 감소하여 팬 하류에서는 주위공기와의 온도차가 3°C 이내로 유지되었다. 팬 상류 약 40 cm 까지 역기류가 감소하였으며 T6에서는 팬을 통하여 유입된 공기와 연기와의 혼합으로 팬을 가동하지 않은 경우에 비해 온도가 감소하였으나 T1은 화재로 인해 발생한 연기가 정체되어 온도가 증가하였다.

연층의 존재영역을 추정하는 방법으로 Cooper 등은 N퍼센트법을 제안하였다.¹⁶⁾

$$\Delta T_{rej}(t) = \max[T(z_{top}, t)] - T_{amb}(z_{top}) \quad (5)$$

여기서 $T(z, t)$ 는 높이 z , 시간 t 일때의 온도, z_{top} 는 최상부 열전대의 높이, $T_{amb}(z) = T(z, t=0)$, $\max[T(z, t^*)]$ 는 $0 \leq t \leq t^*$ 에서의 $T(z, t)$ 의 최대값이다.

시간 t 일때 연층의 경계높이는 다음과 같이 정의된다.

$$T(z_i, t) - T_{amb}(z_i) = N \Delta T_{rej}(t) / 100 \quad (6)$$

N값의 설정에 관해 Cooper 등은 약 10% 부근부터 15%가 적정하다고 하였다. 본 연구에서는 N값으로 10%를 사용하였다. 화원으로부터 2 m 떨어진 위치에서의 연층의 경계높이를 Fig. 5에 나타내었다. 1 kw 이하의 화재의 경우 역기류가 거의 제거되었다가 시간 경과에 따라 다시 연층의 높이가 하강하였다. 터널 출구로

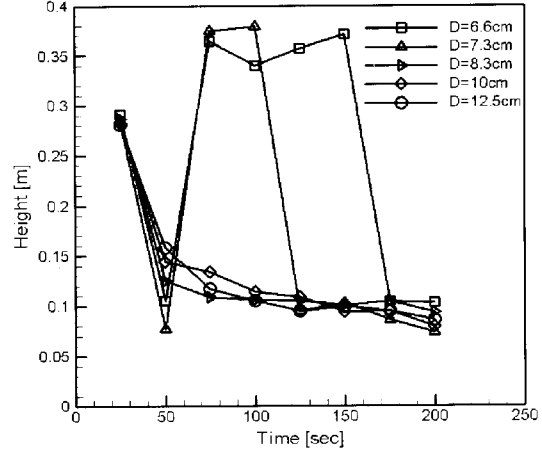


Fig. 5. Elevation of interface according to N percent rule.

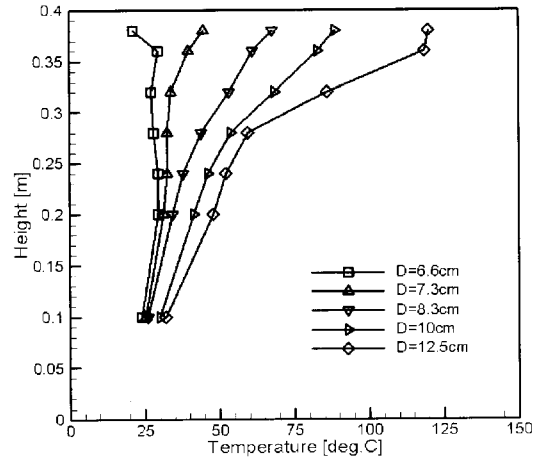


Fig. 6. Vertical temperature distributions at 200sec with various fire sources(T6).

배출되는 연기가 T6 부근 위치에서 팬의 풍력에 의해 혼합이 일어나고 연층 경계높이는 하강하였으며 발열량에 관계없이 경계높이는 0.1 m 부근에서 거의 일정하게 유지되었다.

화재발생 200초 후 T6과 T11 위치에서의 수직온도분포를 Fig. 6와 Fig. 7에 나타내었다. 발열량이 증가할수록 상부의 뜨거운 연기층이 하강하는 것을 확인할 수 있다. 1.46 kW 이하 화재의 경우 T11 위치에서는 연기가 완전히 제어되었으며 4.77 kW 화재의 경우 연기제어 효과가 미미한 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8에 2.5 kW의 화재에 대하여 화재발생 100초와 200초 후의 천장에서의 온도분포를 팬을 가동하지 않은

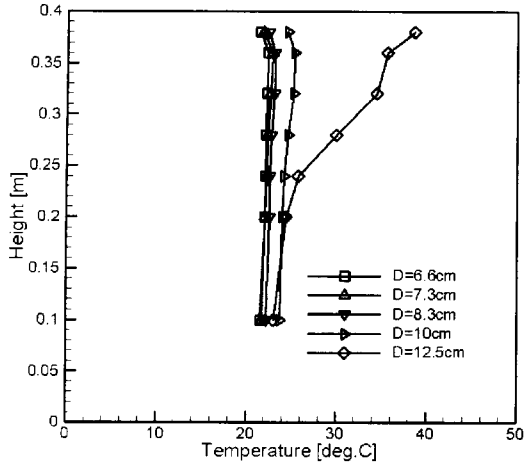


Fig. 7. Vertical temperature distributions at 200sec with various fire sources(T11).

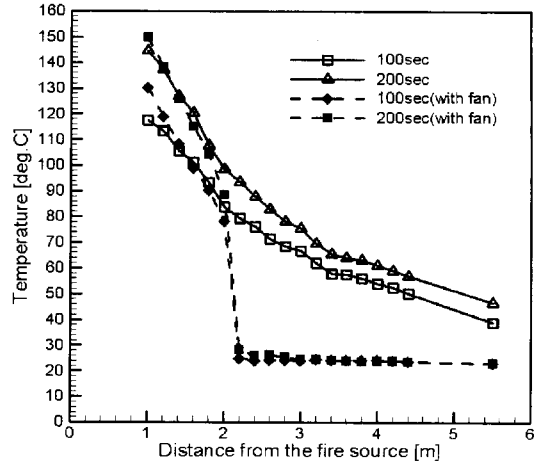


Fig. 8. Ceiling temperature comparison with 2.5kw fire.

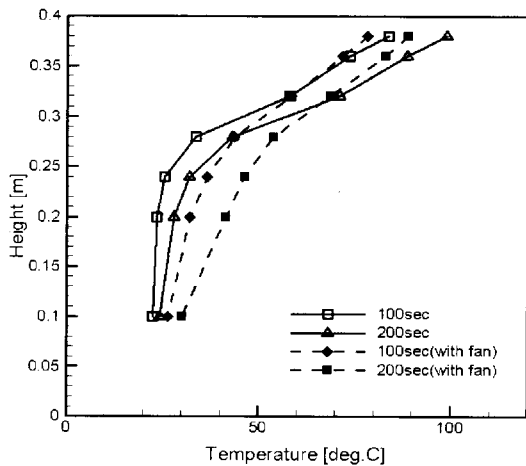


Fig. 9. Vertical temperature comparison with 2.5kW fire(T6).

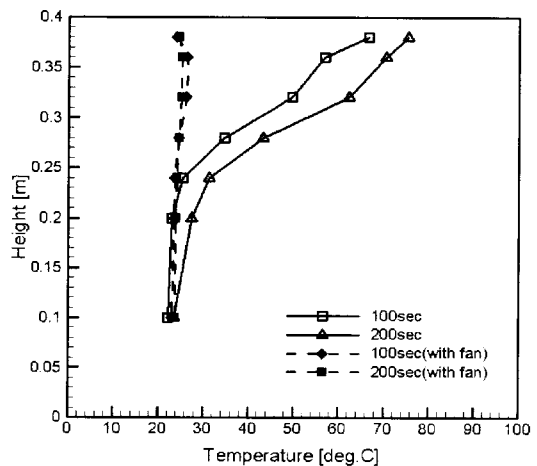


Fig. 10. Vertical temperature comparison with 2.5kW fire(T11).

경우와 비교하였다. 팬 전방 40 cm 부근에서부터 연기의 온도가 감소해 온도제어 효과가 우수한 것을 확인할 수 있다. 상류로 갈수록 팬의 영향이 줄어들어 온도가 팬을 가동하지 않은 경우에 비해 높게 나타난다.

Fig. 9와 Fig. 10에 2.5 kW의 화재에 대하여 화재발생 100초와 200초 후 T6과 T11 위치에서의 수직온도분포를 나타내었다. T6위치 부근에서 팬에 의해 유입된 공기와 연기와의 혼합이 발생하여 터널상부에서는 온도가 감소하였으나 하부에서는 오히려 온도가 증가하였으며 연층의 하강으로 인하여 피난에 방해가 될 위험성이 있다. T11 위치에서는 팬을 가동함으로써 온도 제어 효과가 우수한 것을 확인할 수 있다.

4. 결 론

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

- 1) 제트팬을 설치하여 강제배기를 실시함으로써 인하여 제트팬 하류에서 연기제어의 효과를 얻을 수 있다.
- 2) 팬상류에서 역기류가 팬으로부터 40 cm 이상 감소하였으며 팬을 가동하지 않은 경우와 비교하여 터널상부에서의 온도는 감소하였으나 하부에서는 온도가 증가하였으며 연층의 높이가 하강하였다.

- 3) 화재 발생시 고온으로 인하여 팬이 오작동하여 화재가 커질 위험성이 있으므로 설계시 이에 대한 고려가 필요하다.
- 4) 제트팬이 설치된 터널에서 발열량에 변화에 따른 터널내 온도분포를 파악하여 터널내 방재계획과 배연시스템의 설계시 정성적인 자료로 제공될 수 있다.

후 기

본 연구는 과학기술부 인위재해방재기술개발사업(M1011300012-01A2-90000600) 지원으로 수행되었으며 관계제위께 감사 드립니다.

참고문헌

1. E. Richter, 1995, Smoke and Temperature Development in Tunnels Experimental Results of Full Scale Fire Test, 2nd International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, Granada, Spain, 295-302.
2. Massachusetts Highway Department and Federal Highway Administration, 1999, Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program Report, USA.
3. Yasushi Oka, Graham T. Atkinson, 1995, Control of Smoke Flow in Tunnel Fires, Fire Safety Journal, Vol. 25, 305-322.
4. G.T. Atkinson, Y. Wu, 1996, Smoke Control in Sloping Tunnels, Fire Safety Journal, Vol. 27, 335-341.
5. Y. Wu, M.Z.A. Bakar, 2000, Control of smoke flow in tunnel fires using longitudinal ventilation systems - a study of the critical velocity, Fire Safety Journal, Vol. 35, 363-390.
6. P.J. Woodburn, R.E. Britter, 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part I, Fire Safety Journal, Vol. 26, 35-62.
7. P.J. Woodburn, R.E. Britter, 1996, CFD Simulations of a Tunnel Fires - Part II, Fire Safety Journal, Vol. 26, 63-90.
8. W.K. Chow, 1996, Simulation of Tunnel Fires Using a Zone Model, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 11, No. 2, 221-236.
9. W.K. Chow, 1998, On Smoke Control for Tunnels by Longitudinal Ventilation, Tunneling and Underground Space Technology, Vol. 13, No. 3, 271-275.
10. 김상훈, 김성찬, 김충익, 유홍선, 2000, 터널내에서 화재 발생시 연기 거동에 대한 연구, 한국화재 소방학회지, 14(2), 21-32.
11. 이성룡, 김충익, 유홍선, 2000, 터널 화재시 자연 배기에 의한 연기 거동에 관한 실험적 연구, 한국화재 소방학회지, 15(1), 1-6.
12. 이성룡, 박현태, 김충익, 유홍선, 2002, 터널화재시 자연환기에 의한 연기거동에 관한 실험적 연구, 설비공학논문집, 14(3), 247-253.
13. V. Babrauskas, 1998, The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, U.S.A.
14. O. Megret, and O. Vauquelin, 2000, A model to evaluate tunnel fire characteristics, Fire Safety Journal, 34(4), 393-401.
15. J.G. Quintiere, 1989, Scaling Applications in Fire Research, Fire Safety Journal, 15(1), 3-29.
16. L.Y. Cooper, M. Harkleroad, J. Quintiere, W. Rinkinen, 1982, An Experimental Study of Upper Hot Layer Stratification in Full-Scale Multiroom Fire Scenarios, Journal of Heat Transfer, Vol. 104, 741-749.

이성룡

1998년 중앙대학교 기계설계학과, 공학사
2000년 중앙대학교 기계공학부, 공학석사

Tel: 02-820-5283

E-mail: comblee@hanmail.net

현재 중앙대학교 기계공학부 박사과정

김충익

1984년 서울대학교 기계공학과, 공학사
1986년 펜실베이니아 주립대학교 기계공학과, 공학석사
1991년 펜실베이니아 주립대학교 기계공학과, 공학박사

Tel: 02-820-5283

E-mail: cik@cau.ac.kr

현재 중앙대학교 기계공학부 교수

유홍선

1977년 서울대학교 항공공학과, 공학사
1979년 서울대학교 항공공학과, 공학석사
1988년 Univ. of London(Imperial College), 공학박사

Tel: 02-820-5280

E-mail: cfdmec@cau.ac.kr

현재 중앙대학교 기계공학부 교수

방기영

1986년 성균관대학교 기계공학과, 공학사
1989년 오클라호마 주립대학교 기계공학과, 공학석사
1994년 오클라호마 주립대학교 기계공학과, 공학박사

Tel: 02-759-1530

E-mail: kybang@samsung.co.kr

현재 삼성에버랜드주식회사 기술개발 연구소 소장