

실물터널 화재실험을 통한 터널화재 위험도 평가 The Risk Assessment of Tunnel Fire Through Real Scale Fire Test

최준석[†] · 최병일 · 김명배 · 한용식 · 장용재 · 이유환 · 황낙순 · 김필영*

Jun-Seok Choi[†] · Byung-Il Choi · Myung-Bae Kim · Yong-Sik Han · Yong-Jae Jang ·
Yu-Whan Lee · Nak-Soon Hwang · Phill-Young Kim*

한국기계연구원, *한국도로공사
(2002. 8. 12. 접수/2002. 9. 9. 채택)

요 약

실제 터널화재에서의 위험성을 평가하기 위하여, 국내에서 최초로 실물터널 화재실험이 수행되었다. 길이 465 m의 터널에서 0.25 MW에서 2.5 MW까지의 가솔린 풀과 1500CC 승용차를 화원으로 사용하였으며, 터널내의 유속을 조정하기 위하여 6대의 제트팬을 설치하였다. 터널내의 온도분포와 연기거동을 살펴 보기 위하여 총 86곳의 온도를 측정하였다. 다양한 조건에서의 풀화재와 자동차 화재의 성상을 비교하였으며, 실험 결과 각종 화재 조건에서의 연기의 역류, 하강, 터널 내 온도분포 등과 같은 실제 터널 화재 상황에서 피해에 영향을 미치는 각종 인자들을 파악하였다.

ABSTRACT

The real scale tunnel fire tests are carried out for the first time in domestic range to assess the extent of risk in the tunnel fire. The tunnel dimension is 465 m in length, 9.2 m in width and 6.5 m in height. Gasoline pools with 0.25 MW~2.5 MW size and a 1500CC passenger car are used as fire sources. Six jet fans are used to change the flow velocity inside the tunnel. Temperatures at total 86 points in the tunnel are measured to find the temperature distribution and smoke behavior in the real tunnel fire. In the experiment, it is examined that the important parameters to assess the extent of risk in tunnel fire such as back layering of smoke front, descending of smoke layer and the fire size of a real passenger car.

Keywords : Tunnel fire, Back layering, Smoke propagation, Temperature distribution

1. 서 론

몽블랑 터널 화재¹⁾(1999. 3. 24 : 사망 41, 부상 27), 타우에른 터널 화재²⁾(1999. 5. 29 : 사망 12, 부상 49), 오스트리아 산악터널 화재³⁾(2000. 11. 11 : 사망 155명), 고타드 터널 화재⁴⁾(2001. 10. 24 : 사망 11명, 실종 80여명)등 최근 3년간 세계적인 관심을 끌었던 대형 터널 화재사고에서 알 수 있듯이, 터널화재가 발생할 경우 터널내부는 외부와의 통로가 한정되고 고립된 공간특성을 가지기 때문에 화재로부터 발생되는 열과 연기 등의 다양한 연소생성물은 터널 사용자와 구조대의 안전에 심각한 문제를 야기하고 대형사고

로 이어지고 있음을 알 수 있다.

국내에서도 환경 친화적인 고속도로망 구축과 선형 개량 등을 위하여 장대터널 건설이 증가하는 추세이므로, 대형 인명참사를 초래할 가능성이 큰 터널에서의 차량화재 및 풀화재 실물실험을 수행하였다.

외국에서는 Memorial 터널 화재실험⁵⁾ 등 다수의 실물실험이 수행되었으나, 국내에서 최초로 수행된 실물터널 화재실험이므로 실험의 준비상황을 비교적 상세히 서술하였으며, 터널내의 온도분포 및 연기전파 특성을 살펴보았다.

2. 실물터널 화재실험 개요

실물터널 실험은 대전광역시외의 협조를 받아 경부고속도로 폐기노선에 위치한 대전터널(전장: 465 m, 폭:

이윤용 박사 정년퇴임 기념논문

[†]E-mail: jschoi@kimm.re.kr

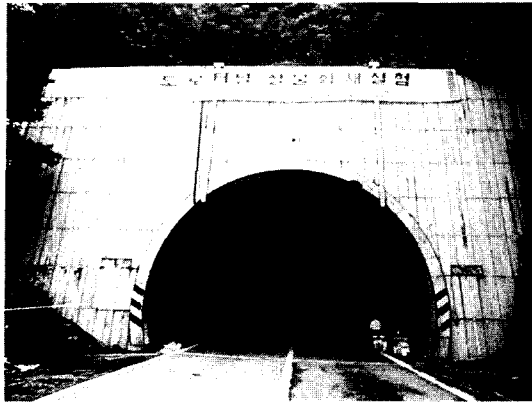


Fig. 1. Overview of the test tunnel.

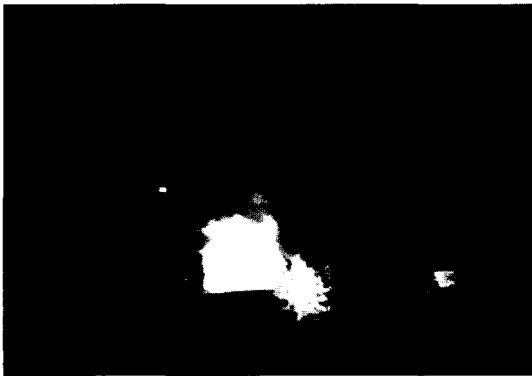


Fig. 2. Photo of the real car fire.

9.18 m, 높이: 6.7 m)에서 수행되었다. 실험은 실물차량 (1500CC 승용차)과 화재규모를 예측할 수 있는 가솔린 풀 화재(pool fire)를 이용하여 진행되었다. 터널내 유동 조건을 구현하기 위해 터널내부에 팬 설치용 구조물을 설계 제작하고, 6대의 제트팬(jet fan)을 설치하였다.

Fig. 1은 실험이 수행된 대전터널의 전경을 보여주고 있으며, Fig. 2는 실물차량 화재의 대표적인 모습을 보여준다.

2.1 화재규모 및 시나리오

도로터널 내부에서 발생하는 화재는 차량화재로 간주될 수 있지만 차량화재에 대한 화재의 규모는 차량의 종류, 연료 잔량, 화물의 종류 및 성질 등이 불명확하기 때문에 명확히 정의될 수 없다. 그러나 관련 외국기관 및 실험자료⁶⁾에 의하면 승용차 화재의 경우 화재의 크기는 대략 2.5 MW~5 MW정도로 예상할 수 있다. 또한 Heskestad의 실험식⁷⁾을 이용하여 가솔린 풀화재의 화염의 평균높이를 계산하면 2.5 MW 가솔린 풀화재의 경우 화염높이는 3.95 m, 5 MW 가솔린 풀화재의 경우 화염높이는 5.2 m 정도로 나타난다. 따라서 화염이 터널 벽면에 직접 닿을 경우의 터널 손상 가능성을 고려하여 실험시 가솔린 풀화재의 최대 화재 규모는 2.5 MW로 하였다.

터널내 자연풍과 차량주행에 의한 유동이 존재하는 상태에서 차량이 주행하는 중에 추돌 혹은 엔진 과열에 의해 승용차 화재가 발생하고 자동화재 감지설비가 화재를 감지한 후 제연을 위해 터널 내에 설치된 6대의 제트팬이 가동되는 시나리오에 의해 실물화재 실험을 수행하였다. 풀화재의 경우에는 화재의 특성을 파악하기 위하여 제트팬의 가동 조건을 변경하면서 다양한 터널내 풍속에서의 화재 특성을 살폈다. 차량화재실험의 경우 점화를 위하여 차량 엔진실 하단에 가솔린 풀을 설치하고 풀 화원을 이용하여 점화하였다.

2.2 계측 및 데이터처리 시스템

실물터널 화재실험에 의해 발생하는 연기의 거동을 파악하고 터널내부의 유동조건을 확인하기 위하여 Fig.

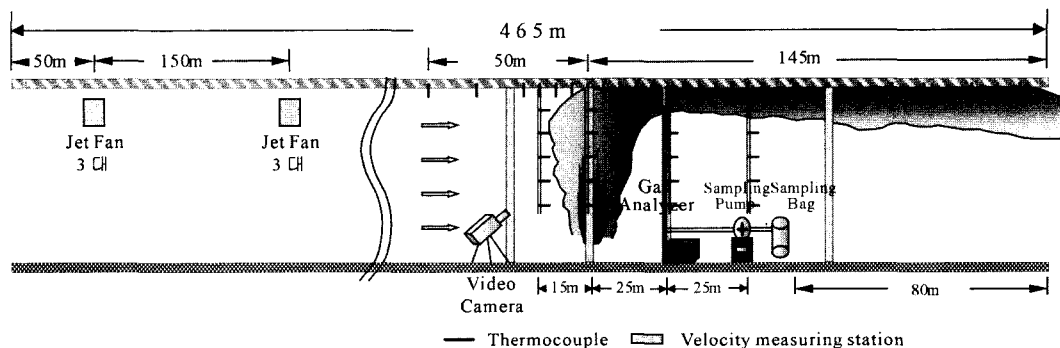


Fig. 3. Schematic of the experimental facilities.

3과 같이 각종 센서를 설치하였다.

온도측정 시스템은 86곳의 위치에 설치된 K-type 열전대와 데이터처리장치, 컴퓨터로 구성하였으며, Fig. 3에 나타난 바와 같이 터널 천장부 길이방향, 터널 높이방향, 터널 벽면의 원주방향으로 설치된 열전대로 구분된다. 터널 천장부 길이방향으로 설치된 열전대는 온도측정의 기능과 함께 열전대의 반응여부에 따라 터널 길이방향 연기저동 파악을 위한 자료를 제공하며,⁸⁾ 수직방향으로 설치된 열전대는 터널중양부 연층의 하강 자료를 제공하고 원주방향 열전대는 벽면쪽의 연기저동 파악자료를 제공한다.

실험시의 터널내 유속 분포를 측정하기 위하여 터널의 여러 위치에서 Hot film type 유속계를 이용하여 속도를 측정하였다. 유속측정 결과 화원 위치에서는 단면 유속분포가 매우 균일함을 알 수 있었다. 이 측정결과를 토대로 화원 상류 25 m, 터널 중앙, 지면으로부터 2 m 높이에 대표속도를 측정하기 위한 Hot film type 유속계를 설치하여 화재실험 시 유속을 측정하였다.

3. 실물터널 화재실험 결과

3.1 화재 크기에 따른 터널내 온도분포

화재의 크기를 0.25 MW에서 2.5 MW까지 순차적으로 바꾸어 가면서 측정된 화재 규모에 따른, 최고온도가 도달된 시간에서의 온도 분포는 Fig. 4와 같다.

모든 화재크기의 경우 화원 주위에서 높은 온도를 보이고 상류나 하류로 가면서 온도가 감소한다. 화재의 크기가 2 MW를 넘어서면 화원 근처뿐만 아니라 터널 전체에 걸쳐 인명피해를 유발할 수 있는 정도의 고온이 유지되고 있음을 알 수 있다. 2.5 MW, 풍속 1.8 m/s 화재의 경우 화원 상류에 고온이 유지되고 있음을 알 수 있는데 이는 연기의 확산속도가 터널의 유

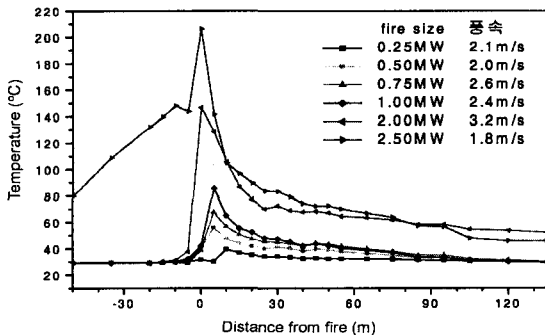
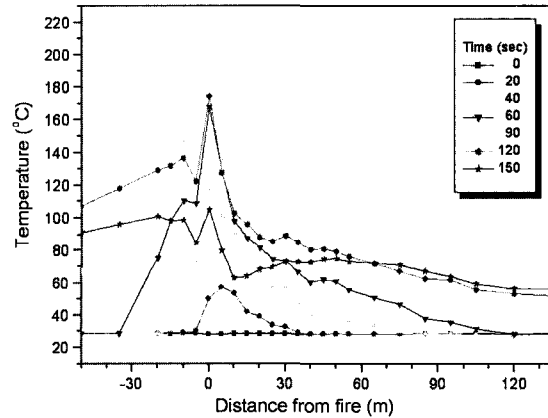


Fig. 4. Temperature distribution according to fire size.

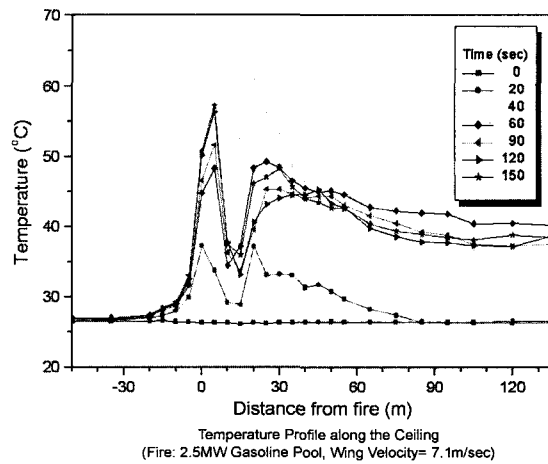
속보다 빨라 연기가 상류로 전파되는 연기역류(Back Layering) 현상이 일어나고 있기 때문이다.

3.2 터널 유속변화에 따른 터널내 온도분포

실물차량 화재실험을 모사하기 위해 2.5 MW 규모의 풀화재(Pool Fire)에 대하여 유속을 변화시키면서 수행한 시험결과 중 시간에 따른 터널내 온도분포를 Fig. 5에 나타내었다. 화재의 크기가 동일함에도 불구하고 유속에 따라 온도분포가 커다란 차이를 보인다. 유속이 1.8 m/s에서 7.1 m/s로 올라가면 일단 터널내의 최고온도가 70% 이상 감소하고 연기가 상류로 전파하는 연기역류(Back Layering) 현상이 발생하지 않는다.



(a) Wind Velocity = 1.8m/s



(b) Wind Velocity = 7.1m/s

Fig. 5. Temperature distribution according to wind velocity (2.5 MW pool fire).

유속 1.8 m/s와 5 m/s 사이에 화재시 터널내의 상황을 결정하는 유속이 존재하고 있음을 알 수 있었으며, 유속이 5 m/s를 초과하면 유속의 차이는 터널 내 전체 상황에 큰 영향을 주지 못한다는 사실을 확인할 수 있었다.

3.3 2.5 MW Pool Fire, Wind Velocity 1.8 m/s

실물 차량 화재는 대략 2.5 MW 정도로 예측된다. 또한 실제 화재 사고시에는 터널 내 차량의 흐름이 멈추게 되므로 터널내부 유속은 낮을 것으로 예상되므로 2.5 MW, 1.8 m/s의 결과를 서술한다. Fig. 5(a)는 시간에 따른 터널 내부온도 분포를 보여주고 있다. 터널 내부 온도는 화원 위치에서 최고를 기록하며 그 온도는 약 220°C이다. 상류의 온도분포를 보면, 화재로부터 발생한 고온의 연기가 상류로 전파(Fig. 6, 전파속도)하고 있음을 알 수 있다. 하류의 경우 천장부의 온도는 상류의 경우보다 낮는데 이는 상류의 연기가 공

기와 덜 섞이면서 높은 온도를 유지하는데 비해 하류의 연기는 공기와 섞이면서 온도가 하강하기 때문이다. 이러한 공기의 섞임으로 하류의 연기는 빨리 지상으로 하강하여 피난허용높이(호흡선)까지 터널내를 채우게 된다(Fig. 7). 연기는 화원 점화 후 약 60초 경과한 후에 하류 105 m 지점까지 도달하고 이런 하류로의 연기 전파속도는 터널내 유속보다 조금 빠른 정도이다(Fig. 6).

이러한 연기 거동으로부터 피난허용높이에서 터널 내부의 온도는 높지 않으나 연층이 피난허용높이까지 내려오게 되어, 연기가 터널 내 화재 시 인명 피해의 주요인이 될 수 있음을 알 수 있다.

3.4 실물차량 화재 실험 결과

실물차량 화재 실험시 화재발생 후 일정한 시간이 경과한 후 배연을 위한 제트팬을 가동하였다. Fig. 8은 실험 도중의 터널내 시간에 따른 유속을 보여주며 Fig. 9는 화재실험중 차량 내부의 온도를 보여준다.

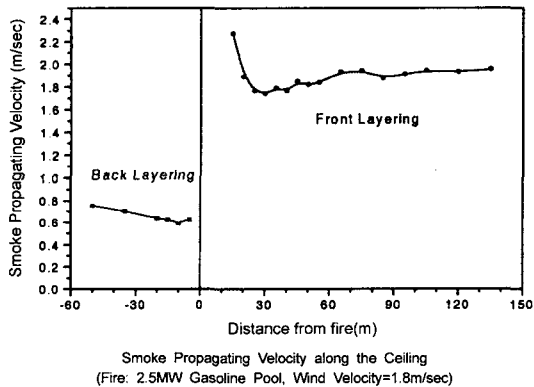


Fig. 6. Smoke propagating velocity (2.5 MW 1.8 m/sec).

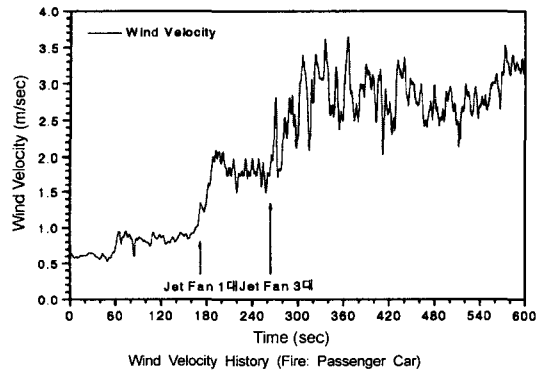


Fig. 8. Velocity history (real car fire).

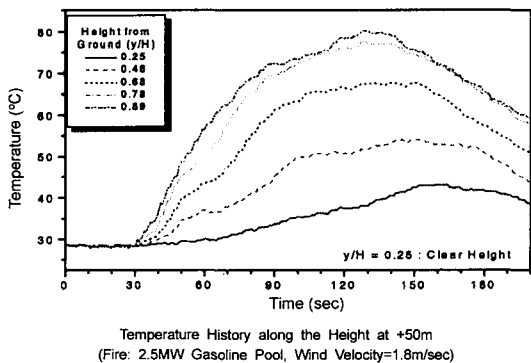


Fig. 7. Temperature distribution along the height (distance from fire=50 m).

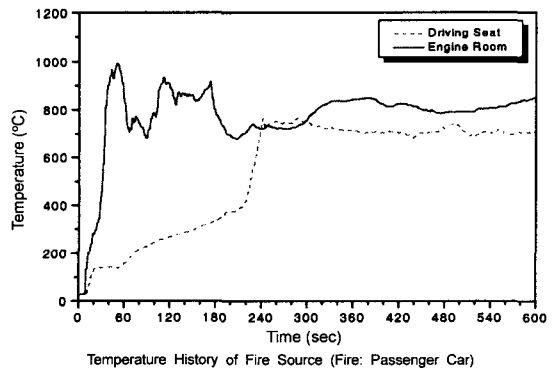


Fig. 9. Temperature history inside the car

점화 후 약 1분 정도까지 터널 상류 풍속은 자연풍속 0.6 m/s를 유지하나 화재가 성장한 후(1분) 화재에 의해 자연풍속이 0.8 m/s로 증가된 후 제트팬 1대 가동에 의해 약 1.8 m/s, 3대 가동에 의해 약 2.8 m/s로 증가된다.

점화후 엔진실(engine room) 하단의 점화원에 의해 엔진실 내부의 온도가 급격하게 증가하는 것을 Fig. 9로부터 확인할 수 있다. 이어서 화재는 운전실(driving room) 내부로 전파한다. 차량 내부의 최고 온도는 1000°C까지 상승하였다.

Fig. 10은 차량화재시의 온도 분포를 보여준다. 화원 바로 위에서, 180초 경과 후 최고온도는 약 260°C에 도달하게 된다. 이 온도는 배연을 목적으로 한 제트팬용 모터의 설치전 기능시험 온도범위(250°C)를 넘어서는 값으로 보다 큰 규모의 화재에서는 화원 주변의 제

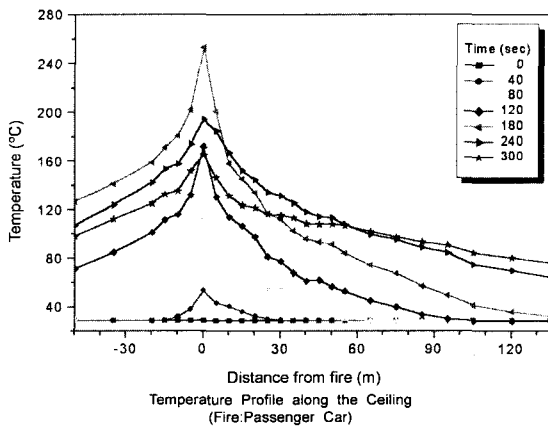


Fig. 10. Temperature distribution along the ceiling (real car fire).

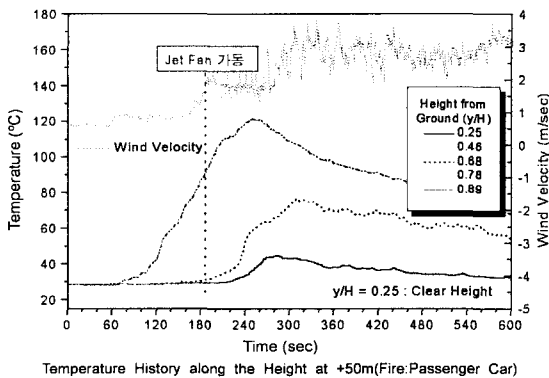


Fig. 11. Temperature distribution along the height (distance from fire=50 m).

트팬이 손상되어 사용할 수 없게 될 수도 있음을 나타낸다. 또한 화원 상류의 온도가 급격히 상승함을 볼 수 있는데 이는 터널 내부유속이 충분하지 못하여 연기가 상류로 전파되는 연기역류 현상이 일어나고 있음을 나타낸다.

Fig. 11은 화원하류 50 m 위치에서 터널 수직방향의 온도분포를 보여준다. 점화 약 70초 후에 연기가 도달한다. 이때의 연층은 터널 높이의 약 89% 상층부에 채워져 있음을 알 수 있다. 제트팬을 가동하기 직전인 180초까지 연층은 터널 높이의 약 79%까지만 하강한다. 즉 이 때까지는 연층이 사람의 피난허용높이까지 하강하지 않고 있다. 그러나 배연을 위하여 제트팬을 가동하면 가동 직후 연층이 피난허용높이까지 급격히 하강한다. 즉 터널 전 단면이 연기로 충만하게 된다. 이는 배연을 목적으로 한 제트팬 가동이 오히려 인명

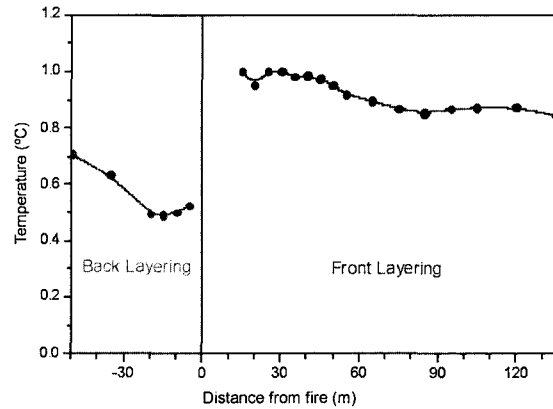


Fig. 12. Smoke propagating velocity (real car fire).

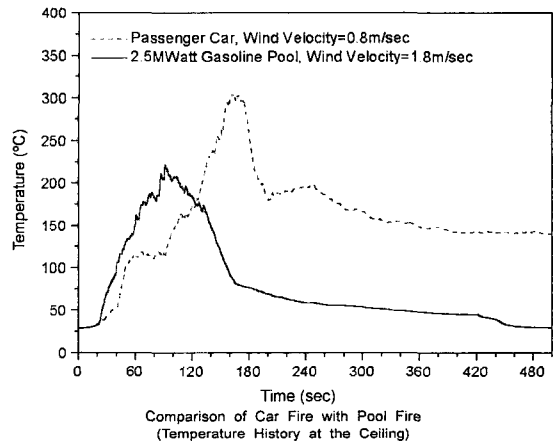


Fig. 13. Comparison between a 2.5MW pool fire and a real car fire.

피해를 유발할 수 있는 연층하강을 촉발하는 부정적 요인으로 작용할 수도 있음을 보여준다.

Fig. 12는 터널 내 각 위치에서의 연기선단의 전파 속도를 보여준다. 화재 초기에 터널내의 유속은 0.8 m/s이었으며 이에 따라 하류로의 전파속도는 터널 내 유속보다 조금 높은 값을 보임을 알 수 있다. 또한 터널 내부 유속이 상류로의 연기전파를 막기에 너무 작은 값이어서 연기가 상류로 약 0.6 m/s의 속도로 전파되고 있음을 알 수 있다. 상류로의 연기전파속도가 화원에서 멀어지면서 점점 증가하는 경향을 보이는데 이는 화재의 초기영역에서 화원에서 열발생량(연기발생량)이 시간에 따라 증가하고 있기 때문으로 판단된다.

3.5 풀화재와 차량화재의 비교

차량 시험을 모사하기 위해 실시한 풀 화재 결과를 차량시험 결과와 비교하였다. 두 경우 공히 연기가 화원 상류로 전파되고 또한 연층이 하강하여 터널내부에 충만하는 결과를 보였다.

Fig. 13은 최고 온도가 발생하는 위치에서의 시간에 따른 온도분포를 나타낸다. 풀 화재의 지속시간이 충분히 길도록 연료를 오랫동안 연소시켰다면 정상상태에서의 최고 온도는 약 200°C 부근을 유지할 것으로 생각된다. 차량화재의 경우 180초 부근의 최고 온도는 초기에 점화를 위해 사용한 가솔린 화염이 차량화재와 중첩되어 나타난 것으로 판단되며 순수한 차량화재의 경우에는 역시 최고 온도가 200°C 부근일 것으로 생각된다. 두 화재의 경우 화재 초기의 터널 풍속은 저속(차량화재: 0.8 m/s, 풀 화재: 1.8 m/s)으로 유속이 화재의 성장에 미치는 차이는 미미할 것으로 판단된다. 물론 오염물질 발생 성장이나, 화재의 성장 속도, 지속 시간 등에는 차이가 있으나 화재의 크기만을 고려한다면 본 실험에서의 실물차량 화재는 2.5 MW 또는 이보다 조금 큰 정도의 화재였을 것으로 판단된다.

4. 결 론

실물차량과 가솔린 풀을 사용하여 실물터널 화재실험을 수행하였다. 이를 통하여 자동차 화재의 규모와,

터널내부 유동이 존재할 때 터널내 온도 분포와 연기 거동을 관찰하였으며 이로부터 다음의 결론을 얻었다.

1) 본 연구에서 사용된 1500CC 차량의 발열량은 약 2.5 MW정도이다.

2) 0.8 m/s~1.8 m/s의 내부 유속이 존재할 때 1500CC 차량화재에서는 유속의 반대방향으로 연기가 전파되는 Back Layering 현상이 나타났다.

3) 화재 초기에 연기는 얇은 층을 이루며 터널 천장 부위를 따라 전파되나, 배연을 위한 제트팬에 의하여 내부 유속이 증가하면 상층의 연기가 급속히 피난허용 높이까지 하강하며, 터널 전체에 충만하게 된다. 이는 제트팬 방식의 제연 시스템 운용에 있어서 고려되어야 하는 위험요소이다.

참고문헌

1. Task Force for Technical Investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel, <http://www.equipement.gouv.fr/actualites/dossiers/1999/rapportuk.htm>.
2. Tokiyoshi Yamada, Yuichi Watanabe, 화재, Vol. 51, No. 2, pp23-28(2001).
3. <http://www.abcnews.go.com/sections/world/DailyNews/austriantunnel990530.htm>.
4. http://news.bbc.co.uk/1/hi/english/world/europe/newsid_1617000/1617309.htm.
5. S. Miles and S. Kumar, "Validation of a CFD Model for Fires in the Memorial Tunnel, First International Conference on Tunnel Fires and Escape from Tunnels, 5-7, May, 1997, Lyon, France.
6. PIARC, "Ventilation for Fire and Smoke Control : Recommended Design Fires"(1999).
7. G. Heskestad, Fire Safety Journal, Vol. 5, p.103 (1983).
8. M. B. Kim and Y. S. Han, "Tracking of the Smoke Front under a Ceiling by a Laser Sheet and Thermocouples", Fire Safety Journal, Vol. 34, pp 287-295(2000).