도로터널내 화재시 온도분포 및 연기 유동 분석 연구

The Temperature Distribution and the Smoke Flow Behaviour During Road Tunnel Fire

최태희*1
Choi, Tae-Hee

윤영표*2
Yeun, Young-Pyo

윤철욱*2
Yun, Chul-Uk

김명배*3
Kim,Myung-Bae

최준석*3
Choi, Jun-Seok

이승호*4
Lee, Seung-Ho

김낙영*5
Kim, Nag-Young

Abstract

Recently, the construction of tunnels longer than one kilometer has increased rapidly. Considering characteristic of limiting structure of longer tunnel, if fires inside tunnel broke out because of vehicle incidents, the catastroph would have high possibility to take place due to toxic smoke and heat of fire. In case of highway tunnel, safety facilities which can cope with tunnel fire are installed in the tunnel but according to rapid increase of heavy good traffic, dangerous goods and enlargement of tunnel magnitude, the research has to carry out about heat fluxes and smoke behaviour during tunnel fire. Therefore, through full-sized fire experiment the paper analyzed temperature distribution, wind velocity, smoke behaviour during tunnel fire.

Keywords: Back layering, Critical velocity, Tunnel fire

*1 정회원, 한국도로공사 부사장, 한국터널공학회 부회장
*2 정회원, 한국도로공사 부장
*3 한국기계연구원 선임연구원
*4 정회원, 상지대학교 토목공학과
*5 정회원, 한국도로공사 책임연구원

요 지

최근들어 1km이상의 장대터널건설이 급증하는 추세이고 이로 인해 터널내 화재가 발생하면 터널내부는 외부와의 통로가 한정되고 고립된 공간이므로 화재로부터 발생되는 연기와 열로 대형인명사고가 발생 가능성이 높아지고 있다. 그러므로 고속도로 터널의 경우, 터널화재에 대비한 방재시스템을 구축하고 있지만 터널의 장대화, 화물운송차량의 대형화, 운반물류의 다양화에 따라 가연물의 규모, 터널내 기류등 다양화된 제반조건을 세부적으로 고려한 화염확산 형태 및 연기유동 메카니즘에 대한 연구가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 고속도로 터널 실물화재실험을 수행하여 화재발생시 터널내부의 온도분포, 풍속, 연기거동 특성을 분석하였다.

주요어: 후방역류현상, 임계속도, 터널화재

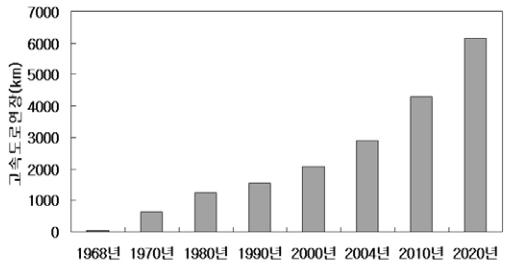
1. 서론

최근들어 급속한 경제성장과 더불어 물류이동량이 급증하고 쾌적한 주행에 대한 요구를 만족시키기 위하여 고속도로 신설공사와 확장공사가 급증하고 있다.

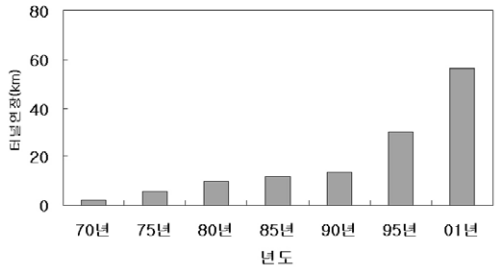
특히, 산지가 전 국토의 70%를 차지하고 있는 우리 국토의 지리적 특성과 고속도로 건설정책이 주변 자연생태계를 최대한 보전하는 생태순환형 개념의 Eco-Highway 건설정책으로 전환되므로서 그림 1과 같이 고속도로 연장 및 터널공사는 필연적으로 증가하고 있고 규모면에서도 장대화 되어가는 추세이다.

이와같은 추세와 더불어 도로상에 설치된 터널구조물에 대한 방재기능의 중요성이 확대되고 있고 최근 해외에서 발생된 몽블랑 터널화재(1999년 3월), 타우에른 터널화재(1999년 5월), 고타드 터널화재(2001년 10월) 사고에서 알수 있듯이 터널화재가 발생할 경우 터널내부는 외부와의 통로가 한정되고 고립된 공간특성을 가지기 때문에 화재로부터 분출되는 연기와 열로 인해 대형인명사고가 발생 할 수 있다.

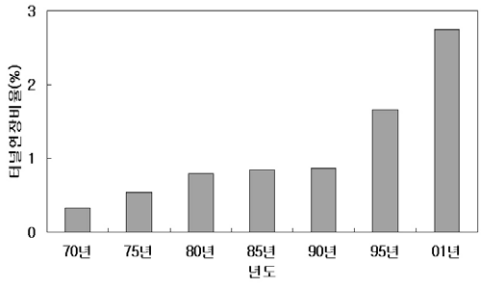
현재 고속도로 터널의 경우 터널화재에 대비한 방재시스템을 구축하고 있지만 터널의 장대화, 화물운송차량의 대형화, 운반물류의 다양화에 따라 가연물의 규모, 터널내 기류등 다양화된 제반조건을 세부적으로 고려한 화염확산 형태 및 연기유동 메카니즘에 대한 연구가 필요하다.



(a) 년도별 고속도로 연장



(b) 년도별 고속도로 터널연장(일방향 기준)



(c) 년도별 고속도로 총연장(터널연장비율)

그림 1. 년도별 고속도로 터널 현황

따라서 본 연구에서는 고속도로 터널 실물화재실험을 수행하여 화재발생시 터널내부의 온도분포, 풍속, 연기기동 특성을 분석하므로서 터널화재 발생에 대한 합리적인 방재모델을 구축하는 기초적인 자료로 제시코자 한다.

2. 화재실험

2.1 화재실험 대상 터널

현재 공용중인 터널을 크기별로 조사하면 그림 2와 같이 대부분이 2차로 터널에 대부분을 차지하고 있다.

이를 고려하여 실물화재실험 터널로 사진 1과 같이 전형적인 2차로 터널을 선정하였다.

본 터널은 폐기노선에 위치한 터널로서 연장 465m, 폭 9.18m, 높이 6.7m이다.

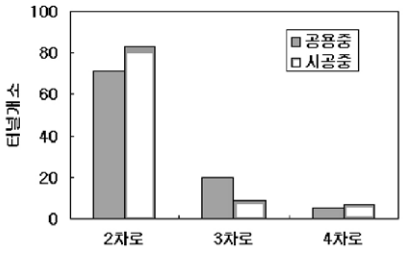


그림 2. 차로수별 터널현황

사진 1. 실험 적용 터널 전경

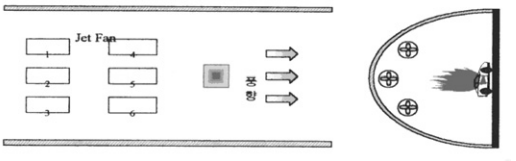


그림 3. 제트팬 배치도

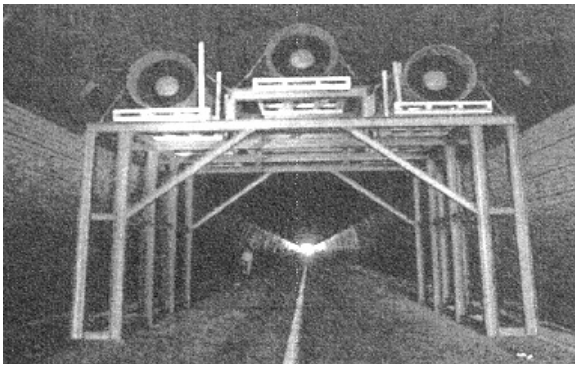


사진 2. 제트팬 전경

2.2 화재규모

도로터널 내부에서 발생하는 화재규모는 차량의 종류, 연료 잔량, 차량에 탑재된 수화물 재료에 따라 다양하다. 따라서 본 연구에서는 화염높이의 변화와 터널손상가능성을 고려하여 화재규모는 PIARC,"Ventilation for Fire and Smoke Control : Recommended Design Fires(1999)"를 참고로 하여 화염높이의 변화와 터널손상가능성을 고려하여 승용차 화재에 해당되는 화재규모 2.5MW로 결정하였다.

2.3 화재시 터널내 유동조건

터널내 유동조건을 구현하기 위해 터널내부에 그림 3과 같이 제트팬을 설치하였다.

실험을 위해 설치할 제트팬의 수량과 설치방향을 확정하기 위해 제트팬 설치전 1달간 일별, 시간별 터널내부의

자연풍의 방향과 풍속을 측정하였다. 계측된 자료 분석결과 결정된 제트팬의 설치대수는 6대이다.

본 연구에서 터널에 설치한 제트팬은 환기목적 보다는 터널 내 차량주행과 지형, 기압차등에 발생되는 터널내부 유동을 묘사하고 터널화재 발생시 생성되는 연기의 후방 역류(Back Layering)를 억제하기 위한 임계속도를 평가하기 위하여 설치되었다.

2.4 계측시스템

실물터널 화재실험에 의해 발생되는 연기의 거동을 파악하고 터널내부의 유동조건을 확인하기 위하여 그림 4, 그림 5와 같이 온도측정, 풍속측정, 유독가스측정 시스템, 연기거동 가시화 측정시스템을 구축하여 터널내부에 설치하였다.

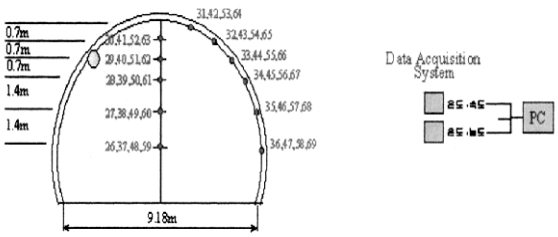


그림 4. 계측시스템 구성도

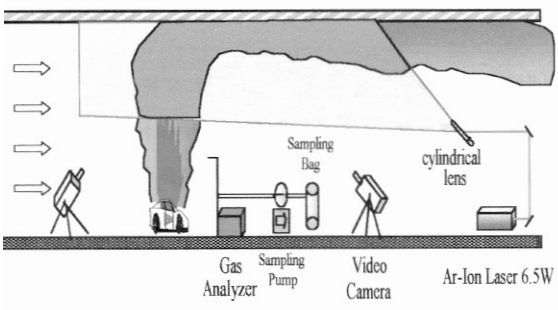


그림 5. 연기거동 측정시스템

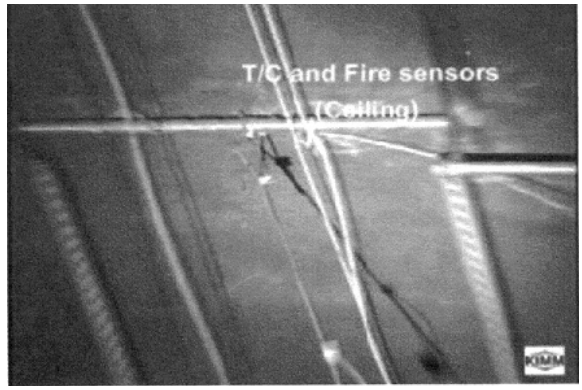


사진 3. 온도 측정

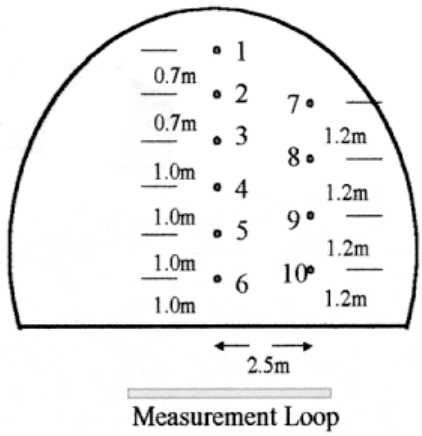


그림 6. 풍속측정 위치

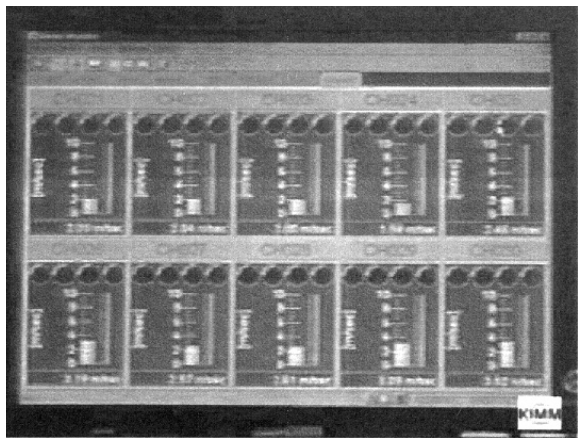


사진 4. 속도측정 데이터 취득

2.4.1 온도측정

온도측정시스템은 사진 3과 같이 86곳에 설치된 K-Type 열전대와 데이터처리장치, 컴퓨터로 구성되었으며 터널 천장부 길이 방향, 터널 높이방향, 터널 벽면의 원주방향으로 설치된 열전대로 구분된다.

터널 천장부 길이방향으로 설치된 열전대는 온도측정의 기능과 열전대의 반응여부에 따라 터널길이방향 연기거동파악하고 수직방향으로 설치된 열전대는 터널중앙부 연층의 하강자료를 측정하고 원주방향 열전대는 벽면쪽의 연기거동을 파악하도록 하였다.

2.4.2 터널내부 풍속측정

실물터널화재실험을 위해 제트팬을 가동시키고 터널내부의 여러위치에서 터널내부의 풍속을 그림 6과 같이 동시에 여러위치에서 동시에 측정하므로서 제트팬의 가동대수 및 조합에 따른 터널내 유속의 단면분포를 측정하였다.

2.4.3 유독가스측정

대부분 터널내 화재로 인한 인명사고의 주요원인은 유독가스 발생량이므로 그림 7, 사진 5와 같이 유독가스측정시스템을 구축하여 실험현장에서 실시간 계측을 하였다.

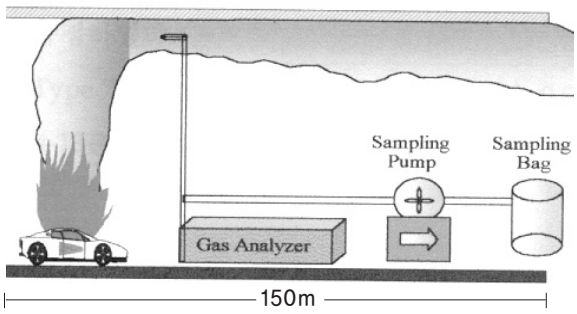


그림 7. 가스농도 측정

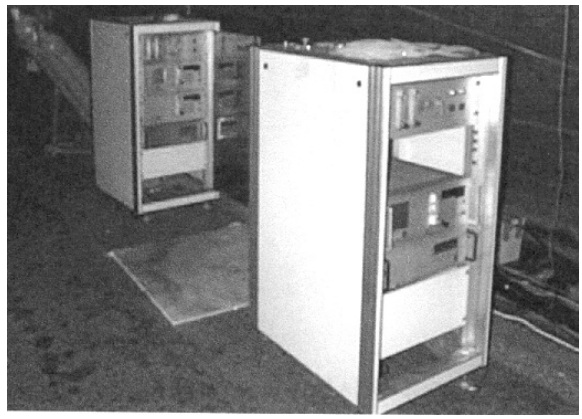


사진 5. 가스농도측정 데이터 취득

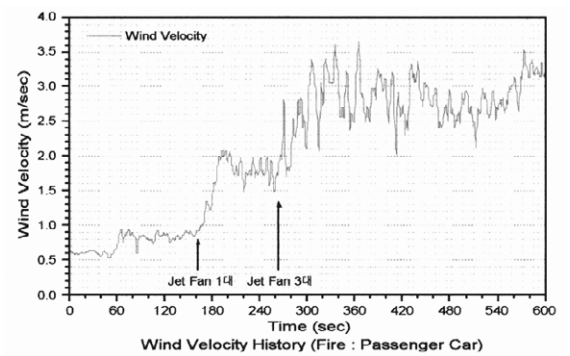
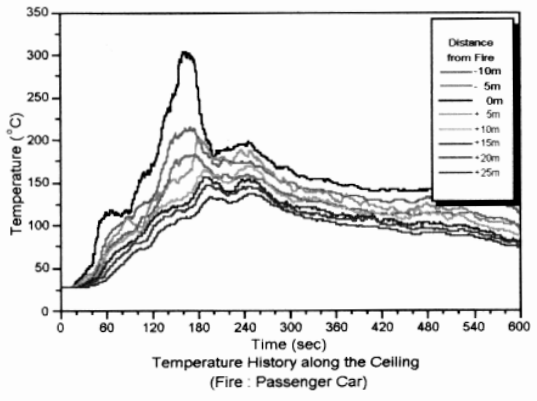


그림 8. 터널내 유속분포

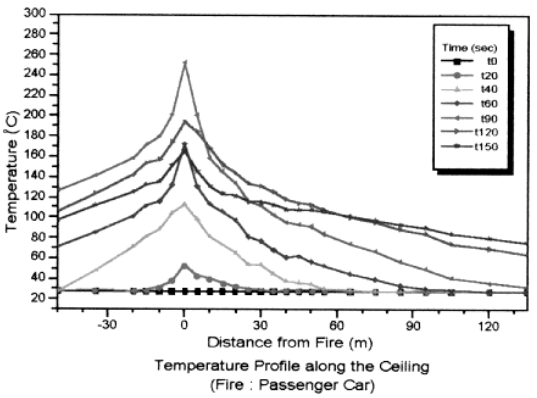
3. 실물차량 화재 실험 분석

3.1 터널내 유속분포

차량화재 실험시 자연풍속은 약 0.6m/sec를 유지하고 있었고 이 자연 풍속조건에서 차량을 점화하였다. 그림 8과 같이 속도측정결과에서 보면 점화 후 약 1분 정도까지 터널 상류풍속은 자연풍의 속도를 유지하나 화재가 성장한후 (1분) 화재에 의해 자연풍속의 증가가 감지되었다. 1분 경과 후 풍속은 0.8m/sec로 유지되다가 제트팬 1대 가동에 의해 약 1.8m/sec, 3대 가동에 의해 약 2.8m/sec로 증가되었다.



(a) 화원위치별 온도 분포



(b) 시간대별 온도의 공간분포

그림 9. 터널내 위치별 온도분포

3.2 터널내부 온도분포

점화후 차량 내부의 온도는 급격히 증가하나 차량 외부의 온도는 서서히 증가된다. 터널 화재에 의한 온도변화를 분석해보면 그림 9와 같이 화원 바로 위에서 180초 경과 후 최고온도 약 300℃에 도달함을 알 수 있으며 5분 경과 후 터널내 전 구간의 천장부 온도가 80℃ 이상의 고온이 되었다. 이는 화재규모가 증가하면 화재로 인한 터널내의 고온 또한 인명피해의 요인이 될 수 있음을 나타낸다.

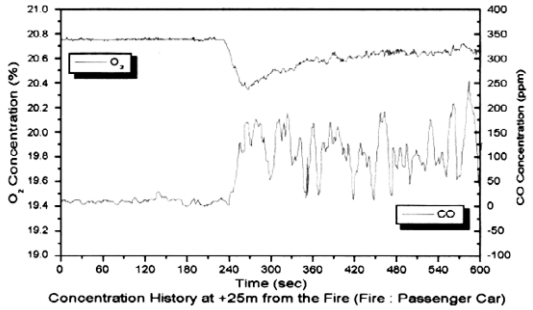


그림 10. 산소, 일산화탄소 분석 결과

또한, 상기 그림 9와 같이 화원 상류의 온도가 급격히 상승함을 볼 수 있는데 이는 터널 내부유속이 충분하지 못하여 연기가 상류로 전파되는 후방역류현상이 일어나고 있음을 나타낸다.

3.3 터널내부 연기거동

터널내 화재로 인한 온도분포를 보면 점화 후 약 40초 후에 연기가 상류 15m 지점에 도달한다. 이때의 연층은 터널높이의 약 68% 상층부에 채우져 있음을 알 수 있다. 이 상태가 제트팬을 가동하기 직전인 180초 까지 유지된다. 즉 이때가지는 연층이 사람의 호흡선까지 하강하지 않고 있다.

그러나 배연을 위하여 제트팬을 가동하면 가동 후 20초가 지나면 호흡선 높이의 온도센서가 반응하여 온도가 높아진다. 이는 제트팬 가동으로 인하여 연층이 급격히 하강함을 나타낸다.

따라서 배연을 목적으로 한 제트팬 가동이 오히려 인명피해를 유발할 수 있는 연층하강을 촉발하는 부정적 요인으로 작용할 수도 있음을 보여준다. 이러한 경향은 화원의 상류에만 국한되지 않고 터널 전체에 걸쳐 동일하게 일어난다.

3.4 터널내부 오염물질 분석

차량화재시 발생하는 유독물질을 측정하기 위하여 화원 하류 25m 위치, 호흡선 높이에서 발생가스(CO)를 채취하여 분석한 결과 그림 10과 같다.

점화후 240초까지는 산소농도나 일산화탄소 농도에 큰 변화가 없으므로 이 시간까지는 화원으로부터 연기와 오염물질이 하류 25m, 호흡선 높이에 도달하지 못하고 있음을 보여준다.

그러나 제트팬 가동(160초) 후 제트팬에서 유발된 유동이 측정위치에 미치는 시간(240초)에 연기거동에서 알수 있듯이 화원으로 부터의 연기와 오염물질이 호흡선 높이에 도달하게 된다.

그러므로 산소 농도가 급격히 감소하고 일산화탄소 농도가 급격히 증가하여 일산화탄소로 인해 인명피해에 영향을 줄 수 있다는 것을 예상할 수 있다.

4. 결론

터널 실물화재 실험을 통하여 터널내부 유동이 존재할 때 연기거동을 관찰하였으며 분석결과를 정리 요약하면 다음과 같다.

1) 0.8m/sec~1.8m/sec의 내부 유속이 존재 할 때 승용차 차량화재(화재규모 2.5MWatt)에서는 유속의 반대방향으로 연기가 전파되는 후방역류현상이 나타났다.
2) 화재초기에 연기는 얇은 층을 이루며 터널 천장부위를 따라 전파되나 배연을 위한 제트팬에 의하여 내부 유속이 증가하면 상층의 연기가 급속히 사람의 호흡선 높이까지 하강하며 터널 전체에 분포된다. 이는 제트팬 운영속도를 내부유속과 관련시켜 운영시켜야 효율적인 제연효과를 볼수 있는 것으로 판단된다.
3) 화재발생후 화원 온도분포를 분석하면 화원 직상부에서 180초 경과 후 최고온도 약 300℃에 도달함을 알 수 있으며 5분 경과 후 터널내 전 구간의 천장부 온도가 80℃ 이상의 고온이 되었다. 이는 화재규모가 증가하면 화재로 인한 터널내의 고온 또한 주요 인명피해의 요인이 될 수 있는 것으로 판단된다.
4) 오염물질 발생농도의 측정 분석결과, 환기가 되지 않는 터널에서는 피난 가능 시간이 3분 정도로 매우 짧았으며 이는 인명피해의 주요인이 연기와 같은 오염물질에 의한 질식사 임을 보여준다.

참고문헌

1. 최태희(2001), "도로터널 건설과 환경보호", 대한터널협회 정기총회 특별강연집
2. 한국도로공사(1992), "도로설계요령", 한국도로공사, pp 191-358
3. 한국도로공사(1995), "고속도로 터널설계실무자료집", 한국도로공사, pp 27-87
4. Axel Bring, Carl Axel Boman(1997), "Simulation and Measurement of Road Tunnel Ventilation", Tunnel And Under ground Space Technology, pp417-424
5. R Ribot, P Chasse, B Gay(1999), "Numerical simulation of smoke extraction by roof vents in a tunnel; Comparision with experimental tests-analysis physicl phenomena", Tunnel Fires and Escape from Tunnels International Conference, pp169-181