터널 화재시 연기확산 방지를 위한 국소제연설비의 성능 평가 연구 A Evaluation Study of Local Smoke Control Facility for the Smoke Spread Prevention on Tunnel Fire

유용호* · 박상현** · 한상주*** · 신현준****

Yoo, Yong Ho*, Park, Sang Hun**, Han, Sang Ju***, and Shin, Hyun Jun****

Abstract

The modern tunnel tends to be long and deep and therefore has a lot of difficulties for effective smoke ventilation on fire due to the semi-hermetic structure. Also, it has difficulty on evacuation and fire fighting by toxic gases together with high increase rate of temperature. The smoke occurring on fire is to avoid spreading over adjacent area and secure a escape road for prolonging the escape time. Accordingly, test on performance evaluation has been carried out applying air curtain, local smoke extraction facilities, in this study. As a result of the test, it can be seen that the smoke barrier formed by the air curtain has an effect on prevention of the smoke layer spreading. In addition, in the result of the measurement on the carbon monoxide inside and outside the barrier by the air curtain, there was difference of 40-time carbon monoxide inside and outside. Therefore, it has been shown that the effect to prevent the smoke from spreading is expected on fire of the tunnel applying the air curtain.

Key words : Tunnel Fire, Local Smoke Control facilities, Air Curtain, Smoke Spread Prevention

요 지

장대화되고 대심도화 되는 현대 터널은 반밀폐적인 구조로 인하여 화재발생시 효과적인 배연에 많은 어려움이 있으며, 고온의 온도상승과 함께 유독성 연기로 인한 피난과 소화활동에 많은 어려움을 주고 있다. 본 연구에서는 화재시 발생하는 연기를 인접구역으로 확산되지 않도록 구획하여 피난자의 대피로를 확보하고 대피시간을 연장시킬 수 있는 국부제연설비인 에어커튼을 적용한 성능평가 실험을 수행하였다. 실험결과 에어커튼에 의하여 형성된 연기차단막은 터널 내부의 차량 화재로 인한 고온 연기층의 확산 방지 효과를 확인할 수 있었다. 또한 에어커튼에 의한 차단막 내외부의 일산화탄소 측정결과에서도 40배 이상 차이를 보임으로써 에어커튼을 적용한 터널 화재시 연기확산방지 효과를 기대할 수 있을 것으로 평가 되었다.

핵심용어 : 터널 화재, 국소제연설비, 에어커튼, 연기확산방지

1. 서 론

국내외적으로 각국에서는 미래의 신공간 창출을 위한 지하 공간 개발의 중요성이 대두되고 있으며, 대표적으로 각종 혐오시설의 지하화, 도시재생을 위한 미래형 지하 신도시, 기존 도로의 지하화를 위한 신공간 창출, 고속화 복층터널 등으로 활용되고 있다. 특히 유럽과 미국 등 선진국에서는 지상의 녹

색공간 확보 및 교통체증 문제를 해결하고, 지속가능한 신공간 개발과 녹색 성장을 도모하기 위하여 도심지 대심도 지하도로 건설을 활발히 진행하고 있다. 특히 서울시에서는 교통체증이 도시경쟁력을 저해하는 주요 요인이라고 판단하고, 도로교통 환경개선을 통한 도시경쟁력 제고를 위하여 지하도로 건설 계획을 수립하였다. 즉, 서울시내 주요 간선도로 하부 수십 미터(m) 지하에 프랑스 A86 도로터널, 말레이시아 스마트

*교신저자. 정회원. 한국건설기술연구원 화재안전연구센터 수석연구원(Tel: +82-31-369-0516, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: yhyoo@kict.re.kr)

Corresponding Author. Member. Senior Researcher, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

**동일기술공사 기술연구소 선임연구원

Senior Researcher, Dong Il Engineering Consultants Co. LTD.

***동일기술공사 기술연구소 연구소장

Head of Technical Research & Development Institute, Dong Il Engineering Consultants Co. LTD.

****한국건설기술연구원 화재안전연구센터 선임연구위원

Senior Research Fellow, Fire Research Center, Korea Institute of Construction Technology

(Smart) 도로 터널 등과 같은 소형차 전용 지하도로 건설을 계획 중에 있다. 또한 수도권 광역급행철도(GTX: Great Train Express)은 초입기에 접어들었으며, 제주-목포간 해저터널 구간을 비롯한 한-중, 한-일 해저터널 등 대심도의 초장대 철도터널 사업등이 활발히 검토중에 있다.

그러나 현재까지 발생한 대형 터널 화재 사고 사례를 보면 대부분이 전기결함이나 엔진 결함, 충돌사고등에 의하여 발생하고 있으며(Kim, 2004), 화재 발생시 터널의 밀폐된 공간 특성상 급격한 화재 전파와 연기 배출의 어려움이 커다란 문제점으로 대두되어 왔다. 터널과 같이 밀폐된 공간에서의 화재시 대량의 연기가 발생하는 것은 터널내부 공간에 산소의 공급이 한정되어 불완전연소가 되는 경우가 많기 때문이며, 발생한 연기는 터널내부에 갇혀 있기 때문에 쉽게 외부 대기로 확산되지 않는 경우가 많다. 이러한 연기는 승객들의 질식사의 주원인이 된다. 터널 화재 시 출화점에서 발생한 연기가 열에 의한 부력을 얻어 천장면에 이르면 천장기류(Ceiling Jet)를 형성하여 터널 길이 방향으로 퍼지고 이후 연기층이 발달하여 하강함에 따라 터널 내부에 가득 차게 되어 피난을 저해하는 중요 장애요인으로 작용한다. 연기로 인한 시각적인 장애는 주로 연기속의 주성분인 탄소입자로 인하여 광선이 차단되어 피난 유도표지나 출입구를 찾기 어렵게 되는 경우이며, 또한 연기로 인한 눈의 기능 장애도 일으키게 된다. 터널에서의 화재사고 발생 시 화염은 고온의 가벼운 가스이기 때문에 터널 천장부에 다다른 후에 터널길이 방향으로 진행하게 되며, 이 경우 터널 직경의 5~10배 정도의 상당한 거리까지 확장될 수 있다. 천장부에서 터널 길이 방향으로 진행되는 화염과 공기와의 혼합과정은 화염이 터널 천장 방향으로 진행할 때보다 상당히 느린 속도로 진행되며, 이후 확장과정에서 무거운 가스 위에 가벼운 가스가 층을 이루어 안정화된 상태를 이루게 된다. 이때 난류와류(turbulent eddies)는 부력에 의해 약해지게 되고 혼합되는 공기량도 상당히 감소하게 되며, 더욱이 터널 길이 방향으로의 화염 혼합과정은 화염의 한 쪽 면에 걸쳐서 이루어진다. 뜨거운 스모그 연소산물의 유동의 경우 천장아래에서 층을 이루면서 공기와 혼합되지 않고 긴 거리까지 진행할 수 있으므로 적절한 설비장치를 통해 이 층으로부터 매연을 직접 배출 시키거나 연기층의 확산을 지연시킬 제연 설비가 필요하다(Yoo et al., 2010). 몽블랑 터널 화재사고 및 홍지문 터널 화재사고 등 지난 10여 년간 발생한 터널 화재 사고들에서 나타난 바와 같이 차량의 연소로 인한 열과 연소물질의 대부분이 터널 입구 쪽으로 이동하여 정체되어 있는 차량과 대피하려는 사람에게 상당히 위험한 환경을 유발시켜 많은 인명피해가 발생하였다. 이렇듯 터널에서의 화재 사고는 확률적인 면에서 그리 많지 않지만, 화재 사고 발생 시 터널 내의 연기 확산 속도가 매우 빠르고, 대피가 쉽지 않으며, 화재 사고 이후에도 터널 내의 상황파악이 용이하지 않아 차량들의 터널 내부로의 진입이 계속적으로

이루어져 대형재난사고로 이루어질 수 있으므로 이에 대비하기 위한 요소 기술 개발에 대한 연구가 필요하다.

2. 국소제연설비

대심도의 초장대 터널경우 화재시 연기에 대한 대응책은 주로 기계적인 힘에 의한 배연시스템으로 설계되고 있다. 현재 국내에서는 “도로터널 방재시설 설치 및 관리지침(2009년)”이 제정되어 터널에서의 화재안전에 대한 설계지침으로 활용되고 있으며, 터널의 연기제어시스템으로 연기의 방향을 대피 반대방향으로 유도하는 제연시스템(종류식 환기시스템에 적용)과 연기를 화재지역에서 배기하는 배연시스템(횡류식, 반횡류식 환기시스템에 적용)에 대한 설계방안을 제시하고 있다. 그러나 복층형 터널과 같이 터널높이가 낮아 연기확산이 빠르게 일어나는 경우나 환기모드에서 배연모드로 전환하는데 시간이 소요되는 경우, 또는 연기의 발생량이 예측치보다 큰 경우에는 연기제어시스템을 가동해도 연기의 전파구역이 넓어질 수 있다. 즉, 긴 터널 구간 전체를 담당할 수 있는 설비적인 보완이 어려울 경우 국소적으로 연기 확산을 방지할 수 있는 보완책이 필요하며, Fig. 1에 도시된 에어커튼과 같은 연기의 확산을 방지 설비를 활용한 제연 효과 및 이용자 피난경로에 도움을 줄 수 있는 대안을 적용할 수 있을 것이다. 국외의 경우 프랑스 EMNantes, CSTB 등에서 터널내 열과 기류를 차단하는 목적으로 사용하는 에어커튼에 대해서 설계 데이터를 확립하기 위한 연구를 수행하였다(Elicer-Cortes et al., 2009). 또한, 에어커튼에서 방출되는 제트류에 대한 이론적 검토와 모델실험을 통해서 에어커튼의 성능에 영향을 미치는 요소와 상사법칙에 대한 연구결과를 제시하였다. 중국의 경우 에어커튼을 통하여 화재로 인한 이산화탄소 및 화재 연기, 온도를 효과적으로 차단하는 기술적인 우수성을 모형실험 및 시뮬레이션 실험으로 검증한 결과를 발표하기도 하였다(Hu, et al., 2008). 하지만 국내에서는 현재 에어커튼은 주로 건축물에서의 구역간 오염물질과 냄새 및 연기확산 저감을 위하여 매우 제한적으로 적용되고 있는 현실로 이를 터널에 적용하기 위한 연구가 필요하다.

Fig. 1. Schematic of Air Curtain in tunnel Fire.

Fig. 2. Diagram of Tunnel Fire Test #1.

3. 에어커튼 성능 평가 실험

3.1 1차 실험

에어커튼을 적용한 터널내 연기 확산 방지 성능 검증을 위한 1차 실험은 모형터널에서 수행되었으며 Fig. 2에 나타내었다. 길이 40 m의 모형터널에 입구로부터 5 m 지점에 화원을 설치하였으며, 35 m 지점에 상부 5 m 높이 지점에 에어커튼을 설치하였다. 연기층의 차단 효과를 확인하기 위하여 터널의 중앙지점 20 m지점에서 5 m 간격으로 터널 내부 측면 부분에 3개의 온도 센서를 설치 하였으며, 에어커튼 직상부와 외부에 각 1개씩의 온도 센서를 설치하였다.

화원은 지름 1m의 원형 폴화재를 이용하였으며, 연료는 헵탄을 이용하였다. 폴화재의 열방출율은 (식 1)에 의하여 결정되며, 본 실험에 이용된 폴화원의 열방출율은 증발된 연료가 모두 연소 된다고 가정할 경우 약 1.7 MW 정도이다(Babrauskas, 1998).

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

여기서, $\dot{m}'' = \dot{m}_{\infty}''(1 - e^{-k\theta D})$, $\dot{m}_{\infty}''$: 휘발성물질의 질량감소율($0.101 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$, $k\theta=1.1 \text{ m}^{-1}$), Hc : 휘발성물질의 연소열(헵탄의 경우 44.6 MJ/kg), A : 화원단면적(m^2)

3.2 1차 실험 결과

설치된 에어커튼의 토출 풍속 및 토출 각도는 선행연구결과를 토대로 35 m/s와 15도로 가동하였다. 모형 터널에서 실시한 실험결과는 아래의 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 화재발생후 에어커튼을 작동시킨 결과 에어커튼 기류가 화재 팽창압력에 밀리지 않고 제연경계벽을 형성해 주는 것을 확인할 수 있다.

또한 Fig. 4에 나타난 2회의 연층 온도 측정 결과를 보면 에어커튼에 의한 제연경계막 내부의 기류 온도는 화재 발생과 함께 지속적으로 증가하나, 에어커튼 제연경계벽 외부의 온도는 화재전 대기온도를 그대로 유지하고 있음을 보여준다.

Fig. 3. Photo of Fire Test Result.

a. Test Results(# 1-1)

b. Test Results(# 1-2)

Fig. 4. Temperature Results of Tunnel Fire Test #1.

3.3 2차 실험터널 차량 화재실험

1차 실험을 통하여 에어커튼이 국소제연설비로서 활용이 가능할 것으로 평가되었으므로, 실험터널을 대상으로 한 실제 차량 화재를 재연하여 에어커튼의 성능을 평가하기 위한 2차 실험을 수행하였다. 경부고속도로 직선화 사업으로 폐터널된 OO터널(폭: 9.8 m 높이: 6.3 m 길이: 120 m, 2차선도로터널)

Fig. 5. Diagram of Tunnel Fire Test #2.

에서 실시되었으며, Fig. 5와 같이 터널 내부에 온도 및 일산화탄소 농도 측정 센서를 설치하여 계측하였다.

터널의 입출구 20 m 지점에 에어커튼을 설치하여 화재시 연기의 확산을 방지하기 위한 포획효과를 평가하고자 하였으며, 11개의 온도센서를 60지점에서부터 3 m 간격으로 화재 발생 내부에 설치하고 1개의 센서는 에어커튼 외부에 설치하여 비교하였다. 또한 에어커튼 경계벽 내외부에 각 1개씩의 일산화탄소 측정 프루브를 설치하여 유독가스에 대한 차단효과를 확인하고자 하였다. 에어커튼의 작동은 1차 실험때와 동일한 조건인 토출 유속 30 m/s, 토출 각도 15도를 유지하였다. 화원은 국내 중형 승용차를 연소시켰으며, 선행 연구 결과에서처럼 약 3.5 MW의 발열량을 가지는 것으로 평가된다(Yoo *et al.*, 2007).

3.4 2차 실험터널 차량 화재실험 결과

실험결과 터널에서 차량에 화재가 발생하면 약 3분후 발생된 연기층이 터널 상층부를 통하여 급속히 확대되기 시작하고 이때 에어 커튼을 작동하여 연기층을 차단하였다. Fig. 6에 보이는 바와 같이 에어커튼에 의한 제연막이 형성되었으며, 이는 일정간격을 유지하며 에어커튼을 설치될 경우 연기층의 이동을 제한하여 피난 시간을 연장시킬 수 있을 것으로 평가되었다.

또한, Fig. 7에 나타난 바와 같이 터널 내부의 온도에서도 차량에서 가장 가까운 TC 1의 경우 약 3분 경과후부터 온도가 급격히 상승하기 시작하여 TC 2, TC 3등 순차적으로 온도가 상승하였다. 그러나 에어커튼 외부에 설치된 TC 12의 경

Fig. 6. Photo of OO Tunnel Fire Test.

Fig. 7. Temperature Results of Tunnel Fire Test #2.

Fig. 8. CO Concentration of Tunnel Fire Test #2.

우는 제연벽에 의한 고온의 연층 차단효과로 시험전의 대기 온도와 유사한 24°C를 유지하고 있으며, 내부와 약 20°C 이상의 온도차를 보이고 있다.

화재시 가장 큰 위해인자로 작용 할 수 있는 일산화탄소의 측정 결과는 Fig. 8에 도시하였다.

일산화탄소 농도의 경우 에어커튼에 의한 제연경계벽 외부에서는 0 ppm으로 일반 대기 조건을 유지하는 반면 에어커튼으로부터 내부로 0.5 m 지점에서 측정된 일산화탄소는 터널 내부의 온도변화 양상과 유사한 형태로 최고 47 ppm이 측정되었다. 이는 에어커튼에 의한 터널내 산소 차단으로 차량의 불완전 연소에 의한 현상에 기인한 것으로 실제 터널 내부의 화재부근에서는 더 높은 고온의 연층과 유독가스가 발생되었을 것으로 예측된다.

이러한 국소제연설비는 Fig. 9에서 도시한 바와 같이 화재 인근 대피자의 경우 짧은 대피거리를 확보할 수 있고 평균보행속도보다 작은 노약자, 어린이들에게 대피 시간을 확보하게 해 줄 수 있다. 특히, 도로터널의 피난연결통로 혹은 철도터널

a. Air Curtain Operation and Evacuation

b. Escape Tunnel for Road Tunnel

c. Emergency Station for Rail Road Tunnel

Fig. 9. Example of Local Smoke Spread Prevention System(Air Curtain System).

의 구난역에서 지역적으로 적용함으로써 피난 보조 설비로도 적용이 가능할 것이다. 또한 기존의 터널 방재설계시 제연풍속을 고려한 제트팬 설치 대수 및 예비용 제트팬 설치를 적용할 경우 발생하는 공사비 및 유지관리비 증가를 일정부분 절감할 수 있을 것이다.

4. 결 론

본 연구에서는 대심도 초장대 터널에서의 화재안전성 향상을 목적으로 국소제연설비를 적용하기 위한 에어커튼의 성능 평가실험을 수행하였다. 실험결과 에어커튼에 의하여 형성된 연기차단막은 터널 내부의 차량 화재로 인한 고온 연기층의 확산 방지 효과를 확인할 수 있었다. 또한 에어커튼에 의한 차단막 내외부의 일산화탄소 측정결과에서도 40배 이상을 보임으로써 에어커튼을 적용한 터널 화재시 연기확산방지 효과를 기대할 수 있을 것으로 평가 되었다.

터널에서의 에어커튼은 철도터널의 구난역등 이용자들의 피난에 도움을 줄 수 있는 보조 설비로 적용이 가능할 것으로 판단되며, 특히 현재 운행중인 도로터널중 제연설비가 미설치된 중규모 터널(0.5~1.0 km)의 경우 화재안전 및 피난안전성

개선을 위한 추가적인 대책으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 이를 위하여 에어커튼의 효용성 검토등 추가적인 연구를 통한 제도개선안 마련이 필요하다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 건설교통과학기술진흥원의 건설기술 연구사업(고수압 초장대 해저터널 기술자립을 위한 핵심요소 기술개발, 13건설연구T01) 및 소방방재청 재난안전기술개발 기반구축 사업(에어커튼을 활용한 지하도로 연기제어시스템 개발)의 지원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

References

- Babrauskas, V. (1998) The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering.
- Elicer-Cortés, J.C. *et al.* (2009) Heat confinement in tunnels between two double-stream twin-jet air curtains, *International Communication of Heat and Mass Transfer*, 36(2009), pp. 438-444.
- Hu, L.H. *et al.* (2008) Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channels, *Journal of Hazardous Materials*, Vol. 156, Issues 1-3, pp. 327-334.
- Kim, H.G. *et al.* (2004) A Study on the Relationship among Traffic Accidents, Fire Occurrences and Tunnel Characteristics in Local Road Tunnels, *Korea Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 6, No. 3, pp. 199-213.
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2009) Guideline of Fire Safety Design and Management for Road Tunnels.
- Yoo, Y.H. *et al.* (2007) A study on the vehicle fire property using the large scale calorimeter, *Korea Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 9, No. 4, pp. 343-349
- Yoo, Y.H. *et al.* (2010) The Study of the HRR and Fire Propagation Phenomena for the Fire Safety design of Deep Road Tunnel, *Korea Tunnelling and Underground Space Association*, Vol. 12, No. 4, pp. 321-328.

Received April 3, 2014

Revised April 8, 2014

Accepted May 21, 2014