

# 에어커튼을 이용한 터널 및 지하도로 제연시스템 개발 '스마트 에어커튼 시스템'



황 주 환 | 동일기술공사 사장  
 한 상 주 | 동일기술공사 기술연구소 연구소장  
 안 승 주 | 동일기술공사 기술연구소 책임연구원  
 박 상 현 | 동일기술공사 기술연구소 선임연구원

## 1. 서론

최근 세계적으로 도심지의 새로운 공간창출을 위해 지하공간 연구개발이 활성화되고 있으며, 도시재생을 위한 미래형 지하 신도시, 기존 도로의 지하화를 위한 신공간 창출, 고속화 복층터널 등으로 추진되고 있다. 특히 유럽과 미국 등 선진국에서는 지상의 녹색공간 확보 및 교통체증문제를 해결하고, 지속가능한 신공간 개발과 녹색성장을 도모하기 위하여 도심지 대심도 지하도로 건설을 활발히 진행하고 있다.

서울시에서도 교통체증이 도시경쟁력을 저해하는 주요 요인이라고 판단하고, 도로교통 환경개선을 통한 도시경쟁력 제고를 위해 서울시내 주요 간선도로 지하에 프랑스 A86 도로터널, 말레이시아 스마트(Smart) 도로 터널 등과 같은 소형차 전용 지하도로 건설을 계획 중에 있으며, 국내 도심지 중심으로 수도권 광역급행철도(GTX: Great Train Express)와

제주-목포간 해저터널 구간을 비롯한 한-중 및 한-일 해저터널 등 대심도를 이용한 초장대 해저철도터널 사업이 활발히 검토 중에 있다.

이렇게 추진되고 있는 대형터널에서 가장 큰 문제점은 화재발생 시 터널의 밀폐된 공간특성 상 급격한 화재확산과 화재연기 배출의 어려움이 대두되고 있다.

터널 화재로 인해 발생된 연기는 뜨거운 스모그 연소산물로 천장아래부터 층을 이루면서 공기와 혼합되지 않고 긴 거리까지 진행하기 때문에 적절한 배연설비를 통해 화재연기층을 직접 배출시키거나 연기층의 확산을 지연시킬 제연설비가 필요하였다.

몽블랑 터널 화재사고 및 홍지문 터널 화재사고 등 지난 10여 년간 발생된 터널 화재사고들에서 나타난 바와 같이 차량의 연소로 인하여, 화재연기로 인한 대피 시야차단 및 유독가스 배출로 인한 호흡곤란으로 대피하려는 사람에게 상당히 위험한 환경을 유발시켜 많은 인명피해가 발생하였다.

터널에서의 화재사고는 확률적인 면에서 그리 많지 않지만, 화재사고 발생 시 터널 내의 연기 확산속도가 매우 빠르고, 대피가 쉽지 않으며, 화재사고 이후에도 터널 내의 상황 파악이 용이하지 않아 차량들의 터널 내부로의 진입이 계속적으로 이루어져 대형 재난사고로 이루어질 수 있으므로 이에 대비하기 위한 요소기술인 에어커튼을 활용한 스마트 에어커튼 시스템을 개발하게 되었다.

## 2. 스마트 에어커튼 시스템

### 2.1 스마트 에어커튼 시스템 (차연설비)

스마트 에어커튼 시스템이란 지하도로 및 도로터널에서 화재발생 시 대류현상을 이용 상부에서 발생된 연기를 흡입 후 일정한 각도로 터널 하부로 분사하여 화재 시 발생된 연기의 확산을 제어하는 시스템이다.



그림 1. 스마트 에어커튼 시스템 개념도

### 2.2 주요특징

스마트 에어커튼 시스템은 다양한 측면에서 다음과 같은 특징을 갖고 있다.

- ① 화재진압적인 측면 : 화재진화 시 근접진화가 가능하여 안전하고 신속하게 화재를 진화할 수 있으며, 진압시간을 단축하여 구조물 손상을 최소화할 수 있다.
- ② 대피자 측면 : 연기확산을 막아 대피 약자인 노

약자 및 부상자의 충분한 대피시간을 제공하며, 공기를 이용하여 화연을 차단하므로 대피자의 대피시야 확보가 용이하다.

- ③ 경제성 측면 : 기존 제연시설(제트팬) 대비 규모최소화가 가능하고, 초기공사비 및 소비전력이 작아 유지비용 절감이 가능하고, 중량이 가벼워 설치가 간단하며 시공성이 양호하다.

## 3. 스마트 에어커튼 시스템 원리 및 구성

### 3.1 작동원리

스마트 에어커튼 시스템은 시로코팬을 이용하여 화재연기를 흡입한 후 기류를 수직방향으로 전환시켜 분사되는 원리를 갖는다.

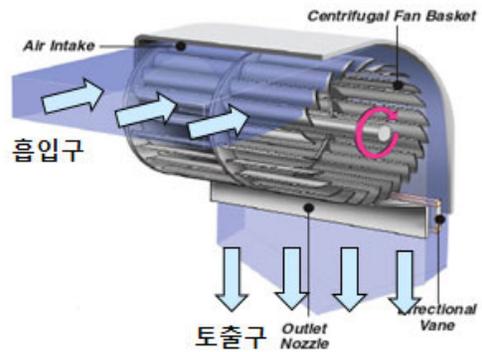


그림 2. 에어커튼의 시로코팬 작동원리

### 3.2 구성 요소

에어커튼은 크게 흡입구, 본체부, 노즐부 3가지로 구분이 되며, 흡입구는 중력식 개폐방식으로 평소 닫혀있다가 작동 시 열리는 개폐구조이며 본체부는 시로코팬, 구동모터, 제어부가 설치되어 있으며 구동모터는 절연등급 H종의 모터(250℃ 1시간을 견딜수 있는 모터 적용)가 적용되었다. 노즐부는 터널내 풍속에 의해서 가변적으로 이동이 가능한 구조로 되어 있다.

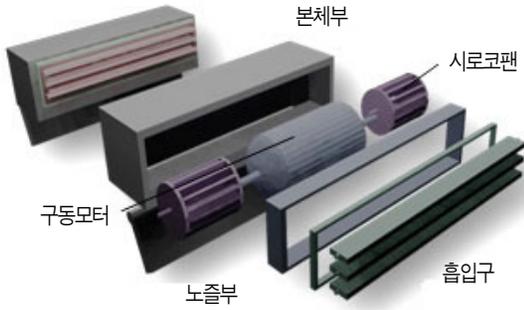


그림 3. 에어커튼 시스템 구성

차단블라인드의 경우, 아치형 터널에 에어커튼 위와 천장부 사이에 적용되는 시설물로 화재발생 시 각각의 블라인드가 닫혀져 제연경계벽 역할을 수행하고, 평상시에는 열려있어 터널환기를 고려한 자동개폐식으로 되어 있다.



그림 4. 아치부 터널 천장부 차단블라인드

## 4. CFD 시뮬레이션을 통한 에어커튼 최적화

### 4.1 에어커튼 최적화 시뮬레이션 결과

스마트 에어커튼 시스템은 대류현상을 이용한 차연설비이므로 에어커튼의 분사각도, 분사속도에 대한 최적화 조건을 위해 CASE별 시뮬레이션을 실시하였으며, 시뮬레이션 결과 분사각도 15°, 분사속도가 30m/s일 때 가장 효율적인 차단효과를 발휘하였으며, 분사 노즐의 경우, 돌출방식의 노즐분사가 안정된 기류를 형성하였다.

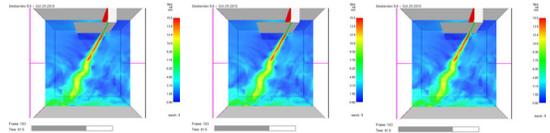


그림 5. 에어커튼 최적분사 시뮬레이션

### 4.2 터널조건을 고려한 3D 시뮬레이션 결과

에어커튼 최적화 시뮬레이션 조건을 토대로 지하도로의 터널 단면, 교통환기력, 화재강도 등의 설계조건 인자를 고려한 차단효과를 검증하기 위해 3D 시뮬레이션을 실시하였으며 시뮬레이션 조건은 아래와 같다.

- 에어커튼의 분사속도 : 30m/s
- 화재강도 : 20MW
- 화재강도곡선 : 0MW에서 20MW까지 480초간 선형적으로 증가
- 시뮬레이션 시간 : 480초
- 터널사이즈 : 500×10×4m

위와 같은 조건으로 20MW급 3D 화재시뮬레이션 결과, 화재기류가 에어커튼 맞은편으로 넘어가지 않고 안전하게 차단하여 화재연기 차단에 대한 안전성을 확보하였다.

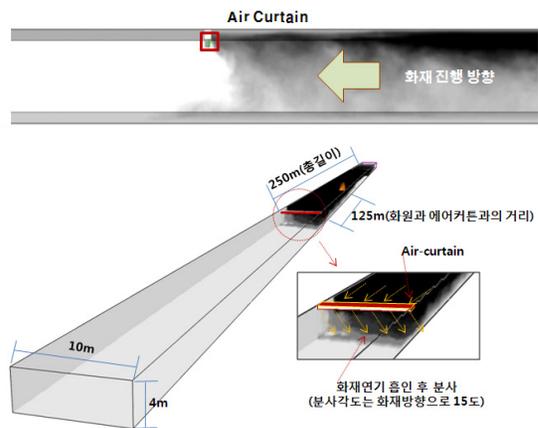


그림 6. 에어커튼의 화재연기 차단 3D 시뮬레이션

## 5. 에어커튼 차연설비 실험동 Lab Test

### 5.1 실험동 Lab Test

에어커튼을 적용한 터널내 연기확산방지 성능검증을 위한 1차 실험은 에어커튼 3D 시뮬레이션의 최적화 결과값의 검증을 위해 그림 7의 형태로 실시하였다. 길이 40m의 모형터널에 입구로부터 5m 지점에 화원을 설치하였으며, 35m 지점에 상부 5m 높이 지점에 에어커튼을 설치하였다. 연기층의 차단효과를 확인하기 위하여 터널의 중앙지점 20m 지점에서 5m 간격으로 터널 내부 측면 부분에 3개의 온도센서를 설치하였으며, 에어커튼 직상부와 외부에 각 1개씩의 온도센서를 설치하였다.

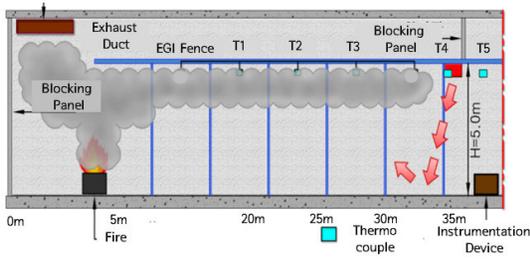


그림 7. 실험동 Lab Test 실험 개념도

화원은 지름 1m의 원형 폴화재를 이용하였으며, 연료는 헵탄을 이용하였다. 폴화재의 열방출율은 식 (1)에 의하여 결정되며, 본 실험에 이용된 폴화재의 열방출율은 증발된 연료가 모두 연소된다고 가정할 경우 약 1.7MW 정도이다(V.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  $44.6 \text{MJ/kg}$ )

$A$ : 화원단면적( $\text{m}^2$ )

### 5.2 실험동 Lab Test 결과

설치된 에어커튼의 토출풍속 및 토출각도는 선행 연구결과를 토대로 분사각도  $15^\circ$ 와 분사속도  $30\text{m/s}$ 로 가동하였다. 모형 터널에서 실시한 실험결과와는 아래의 그림 9와 그림10에 제시되어 있다. 그림 8에서

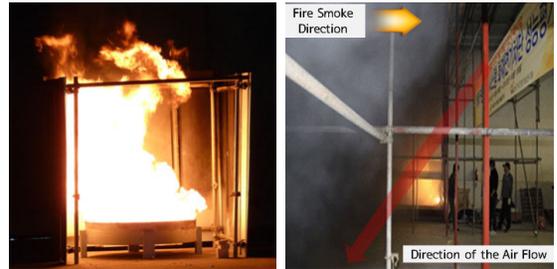


그림 8. 화재발생(헵탄) 및 에어커튼 화재연기 차단

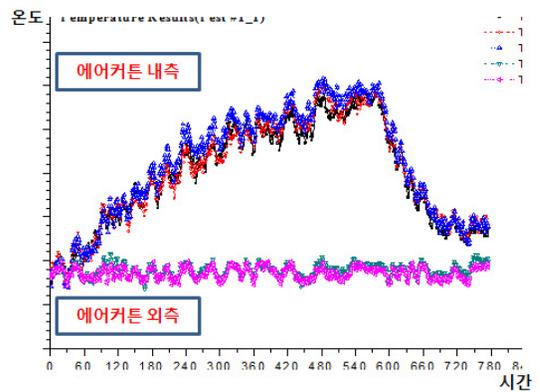


그림 9. Thermocouple 온도-시간 그래프



그림 10. 열화상 카메라 온도-시간 그래프

보는 바와 같이 화재발생 후 에어커튼을 작동시킨 결과 에어커튼 기류가 화재 팽창압력에 밀리지 않고 제연경계벽을 형성해 주는 것을 확인 할 수 있다.

또한 에어커튼을 중심으로 내측과 외측의 온도계측 결과 화원과 에어커튼 사이의 경우, 화재연기 기류에 의한 온도가 상승되고 연소 후 온도가 낮아지고 있으나, 에어커튼과 실외 사이에 설치된 온도센서의 경우, 대기온도를 균일하게 유지하여 화재연기가 에어커튼을 월류하지 않고 효율적으로 차단되는 것을 확인하였다.

또한 그림 10에 나타난 열화상 카메라의 경우, 에어커튼의 내측과 외측의 온도차이가 발생되는 것으로 보아 에어커튼이 효율적으로 차단됨을 알 수 있다.

## 6. 에어커튼 차연설비 Test Bed 성능검증

### 6.1 Test Bed 성능검증

에어커튼의 시뮬레이션 및 실규모 Lab Test를 통하여 에어커튼의 현장 도로터널의 화재연기차단 가능성을 검증하기 위해 실제 터널을 대상으로 한 실제 차량화재를 재연하여 에어커튼의 성능을 평가하기 위한 화재실험을 수행하였다. 경부고속도로 직선화 사업으로 폐터널된 OO터널(폭:9.8m, 높이:6.3m, 길이:120m, 2차선도로터널)에서 실시되었으며, 터널 내부에 온도 및 일산화탄소 농도측정 센서를 설치하여 계측하였다.

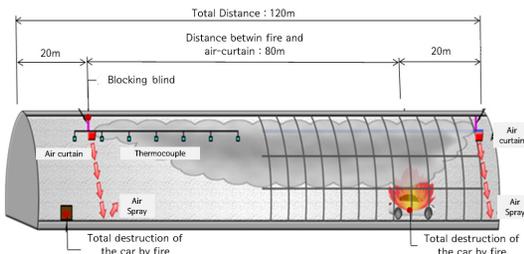


그림 11. Test Bed 도로터널 화재실험 개요도

터널의 입·출구 20m 지점에 에어커튼을 설치하여 화재 시 연기확산을 방지하기 위한 차단효과를 평가하고자 하였으며, 11개의 온도센서를 60m 지점에서부터 3m 간격으로 화재 발생 내부에 설치하고 1개의 온도센서는 에어커튼 외부에 설치하여 비교하였다. 또한 에어커튼 경계벽 내외부에 각 1개씩의 일산화탄소 계측장비를 설치하여 유독가스에 대한 차단효과를 확인하고자 하였다. 에어커튼의 작동은 1차 실험때와 동일한 조건인 토출유속 30m/s, 토출각도 15°를 유지하였다. 화원은 국내 중형 승용차를 연소시켰다.

### 6.2 Test Bed 성능검증 결과

실험결과 터널에서 차량에 화재가 발생하면 약 3분 후 발생한 연기층이 터널 상층부를 통하여 급속히 확대되기 시작하였으며, 화재연기의 근접 시 차단블라인드가 닫히면서 에어커튼이 작동하여 연기층을 차단하였다. 그림 12에 보이는 바와 같이 에어커튼에 의한 제연경계벽이 형성되어 차단하였으며, 더이상 에어커튼 뒤로 화재연기가 통과되지 않기 때문에 실제 터널 화재발생 시 대피자의 피난시간을 연장시킬 수 있을 것으로 평가되었다.



그림 12. Test Bed 도로터널 차량전소실험

그림 13에 나타난 바와 같이 터널 내부의 온도에서도 차량에서 가장 가까운 TC 1의 경우 약 3분 경과 후부터 온도가 급격히 상승하기 시작하여 TC 2, TC 3등 순차적으로 온도가 상승하였다. 그러나 에어커튼 외부에 설치된 TC 12의 경우는 고온의 연기층을 차단하여 실험 전의 터널내부의 대기온도와 유사한 24℃를 유지하고 있으며, 내부와 약 20℃ 이상의

온도차를 보이고 있어 에어커튼 차단에 대한 정량적인 DATA를 확보하였다.

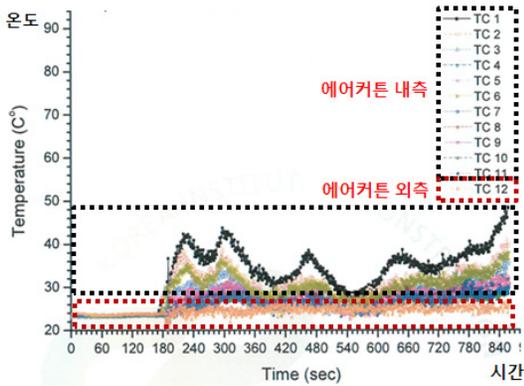


그림 13. Thermocouple 온도-시간 그래프

또한, 화재 시 인명피해의 가장 큰 영향인자로 작용할 수 있는 일산화탄소의 측정결과는 그림 14에 나타내고 있다.

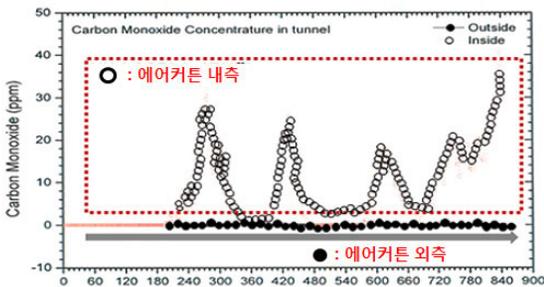


그림 14. 일산화탄소 - 시간 그래프

일산화탄소 농도의 경우 에어커튼 외측은 일정한 일산화탄소를 유지하는 반면 에어커튼으로 부터 내부로 0.5m 지점에서 측정된 일산화탄소는 터널 내부의 온도변화 양상과 유사한 형태로 최고 40ppm 이상 측정되었다. 이는 에어커튼에 의한 터널내 산소를 차단하여 간접적인 연소효과를 발휘하였으며, 에어커튼이 유해가스 차단 역시 효율적이라는 것을 알 수 있다.

## 7. 에어커튼 차연설비의 활용

### 7.1 도로터널

#### 7.1.1 고속도로 중규모 터널 차연설비 적용

현재 2004년 이전에 설치된 고속도로 중규모 터널 (1km 이하)의 경우, 방재시설 미비에 따른 국감지적을 당함에 따라 이에 따른 중규모 터널에 대한 방재시설 확충계획을 실시하고 있으며, 이러한 방재시설이 부족한 도로터널에 스마트 에어커튼 시스템 적용이 가능하다.



그림 15. 중규모 도로터널 적용 개념도

#### 7.1.2 장대 지하도로 차연설비 적용

국내 도심지 도로교통의 선진화를 위해 도심도 지하공간을 이용한 장대 지하도로를 추진하기 위해서 부간선도로, 제물포길, 강변북로 지하화 기본계획 및



그림 16. 장대 지하도로 적용 개념도

실시설계를 추진하고 있어, 화재발생 시 대피자의 원활한 대피환경제공 및 화재연기 차단을 통한 배연 효율 향상을 위한 스마트 에어커튼 시스템 적용이 가능하다.

### 7.1.3 도로터널 피난연결통로 차연설비 적용

피난대피통로의 경우, 방화문 OPEN시 대피자와 화재연기가 동시에 유입되어 대피장애가 발생할 수 있기 때문에 대피장애를 방지하기 위해 피난연결통로 입구부에 에어커튼을 설치하여 대피자의 대피를 원활하게 할 수 있는 스마트 에어커튼 시스템으로 적용이 가능하다.

## 7.2 지하공동구

대규모 택지개발사업을 위해 필요한 전기, 통신, 상수도, 도시가스, 하수도, 냉난방시설 등 필수적인 공공시설물을 지하공동구 형태로 공급하여야 하나, 화재발생 시 좁은 공간으로 인한 화재연기로 인하여 소방인력의 접근이 곤란하여 대형 화재로 확산이 된다. 따라서 이러한 협소한 지하공동구에 화재연기를 효율적으로 차단시켜 초기화재진압을 신속히 할 수 있는 스마트 에어커튼 시스템 적용이 가능하다.

### 7.3 지하철역사/환승통로

전국의 도심권 지역에 지하철 노선확장 및 연장증가에 따른 지하철역사가 확대되고 있는 추세이며, 상업단지 조성을 위한 환승통로를 설치하여 대규모 상업지역 조성 및 지하철역사 진입원활을 위한 복합적인 형태로 적용되고 있어 이러한 지하공간의 화재발



그림 17. 지하철역사 / 환승통로 시스템 적용

생 시 대규모 인명피해가 발생되기 때문에 에어커튼 차연설비를 이용하여, 화재 시 병목현상 최소화로 대피시간 연장 및 대피시아 확보를 위한 시스템으로 적용이 가능하다.

## 7.4 철도터널 및 기타

최근 철도터널의 장대화 및 국가간을 연결하는 해저 철도터널의 기술개발 및 추진이 진행되고 있는 가운데 가장 큰 문제점이 장대터널의 화재안전대책이 가장 중요한 사항이다. 이러한 철도 화재안전을 위해 피난대피소, 철도구난역, 피난연결통로에 스마트 에어커튼 시스템을 적용하여 효율적인 대피환경을 조성할 수 있는 시스템으로 적용이 가능하다.

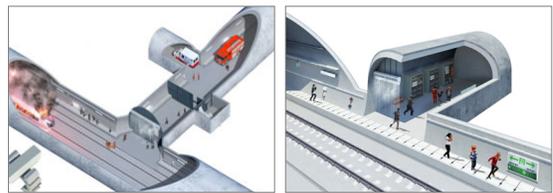


그림 18. 피난대피소 / 철도구난역 시스템 적용

## 8. 결론

스마트 에어커튼 시스템은 이론적인 CFD 시뮬레이션을 통하여 화재연기 차단에 대한 최적화 방안을 도출하였으며, 이러한 이론적인 DATA를 검증하기 위해 실규모 Lab Test 및 현장 Test Bed를 통하여 차량화재발생 시 화재연기 차단에 우수한 차연성능을 확인하였다.

최근 고양버스터미널(2014.05.26), 인천중앙병원(2014.05.02), 장성요양병원(2014.05.28) 화재사고 등과 같이 화재사고가 다양하게 발생되고 있어 이러한 화재질식에 의한 인명피해 최소화를 위한 대책이 부족한 실정이다. 따라서 이러한 스마트 에어커튼 시스템을 도로터널 및 지하도로뿐만 아니라 지하공간 및 건축물에 적극 사용하여 화재연기 확산을 최

소화시켜 대피자가 외부로 대피할 수 있는 시간을 충분히 제공하여 인명피해를 최소화하여야 하며, 관련 기준개정에 앞서 발주처, 시공사, 설계사가 적극적인 반영 등 대피자의 안전을 최우선시 하는 자세가 필요할 것이라 사료된다.

#### 참고 문헌

- Kim, Hyo Gyu 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
- Yoo, Yong Ho 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
- Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2009) Guideline of Fire Safety Design and Management for Road Tunnels
- J.C. Elicer-Cortés et al (2009) Heat confinement in tunnels between two double-stream twin-jet air curtains, International Communication of Heat and Mass Transfer, 36, pp. 438-444
- L.H. Hu et al. (2008) Confinement of fire-induced smoke and carbon monoxide transportation by air curtain in channels, Journal of Hazardous Materials, Volume 156, Issues 1-3, pp. 327-334
- V. Babrauskas (1998) The SFPE Handbook of Fire Protection Engineering
- Yoo, Yong Ho 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
- Grzegorz Krajewski, Grzegorz Sztarbala, "AIR CURTAINS USED FOR SEPARATING SMOKE FREE ZONES IN CASE OF FIRE", Fire Research Department, 2011
- M. Bettelini, S. Rigert, N. Seifert, Flexible Devices for Smoke Control in Road Tunnels, Amberg Engineering Ltd, Switzerland, 2012
- Professor ZHAO Jian Chargé de Cours ROJAS Rafael, Underground Construction Technology, Laboratoire de Mécanique des Roches
- U.S. Department of Transportation Federal Highway Administration, Underground Transportation Systems in Europe, 2006
- Kyung Jin Ryu, Makhsuda Juraeva, Sang-Hyun Jeong, and Dong Joo Song, Numerical Simulation in the Air-Curtain Installed Subway Tunnel for the Indoor Air Quality, International Journal of Mechanical and Aerospace Engineering, 2012
- Dr. L.C. Boer, Behaviour by motorists on evacuation of a tunnel, Commissioned by the Ministry of Transport, Public Works and Water Management, 2000
- 유지오, 윤성욱, 이동호, '횡류식 대배기구 방식을 적용한 도로터널에서 화재 시 최적배연풍량 선정에 관한 연구', KOSOS, VOL.21, 2006
- 김명배, 최병일, 최준석, 한용식, "도로터널에서의 화재 환기 설계에 관한 연구", 한국터널공학회 논문집, 제 6권, 제2호, pp. 129-140.
- 건설교통부, 도로터널 방재시설 설치지침, 2004.
- 김시격, 신태균, '터널방재의 최근동향', Vol 6, No.2
- 신용호, 지하철 승강장 제연 에어커튼 설치에 따른 연기 확산 방지에 관한 연구, 인천대학교, 2008