

## 터널 내 다중차량 화재 방지를 위한 자동식소화설비

박경환, 윤명오\*, 박형주\*\*

영설계엔지니어링(주), 서울시립대 방재공학과, 경원대학 소방시스템과\*\*

### Automatic Fire Extinguishing System for Prevention of Multiple Vehicles Fire in Tunnel

**Kyung whan Park, Myong O Yoon\*, Hyung Joo Park\*\***

*Young Design Eng, University of Seoul, Kung Won College*

#### 1. 서 론

도로터널 내에서 발생하는 강력한 화재는 화재기류의 하류에 있는 다른 차량들을 발화시켜 단일차량화재가 다중차량화재로 진행될 수 있다는 점이 사고 경험과 실험을 통해 밝혀지고 있다. 그러나 아직 이런 종류의 화재 시나리오는 터널의 계획, 시공 및 개통 이후에도 거의 고려되고 있지 않은 실정이다. 특히 위험물수송 탱크로리와 LPG 탱크로리의 통과를 제한하지 않는 도로터널과 단면이 좁고 천정이 낮은 터널에서 이런 유형의 화재 발생 위험이 높아질 것이다. 따라서 다중차량으로 화재 전파를 차단할 수 있는 방호대책이 요구되고 있다. 자동식소화설비(sprinkler, water spray, water-mist, foam, Gaseous System)는 차량간의 화재 전파를 방지하고, 터널의 내화성능을 확보하고, 터널 이용자의 생존가능성을 높일 수 있는 유력한 수단으로 주목받고 있다.

#### 2. 차량 간 화재 전파

##### 2.1 사고 사례

[표1]은 도로터널에서 다른 차량으로 화재가 전파된 대표적인 경우이다. Mont Blanc 터널은 마아가린을 실은 차량의 화재로 500m까지, 2대의 HGV 차량의 충돌로 발생한 Gottard 터널 화재는 200m 구간의 차량으로 화재가 전파되었다. 이탈리아 Palermo에서 발생한 교차로 아래 터널에서 발생한 LPG 탱크로리와 버스의 충돌 화재는 BLEVE를 일으켜 터널 내 전 차량으로 전파되었다. 그리고 최근 Frejus 터널에서 타이어를 실은 트럭의 연료누출로 발생해서 100m까지 다른 3대의 트럭으로 전파되었다. 이 이외에 49년 Holland 터널에서 10대의 트럭과 자가용 13대가 파괴되었고 화재는 4시간 동안 지속되었다. 또 Nihonzaka 터

널에서 127대의 트럭과 자가용 46대가 파괴되었고 화재는 1주일간 지속되었다.[5]

[표 1] 화재전파가 발생한 도로터널 사고 예

화재장소	일시	터널길이 [km]	차량 형식	화재지속시간	열방출율	피해	비고
Mont Blanc Tunnel[1]	1999.3.24	11.6	HGV	53	최초 75-110MW, 최대 150-190MW	차량:33대(소방차2대), 사망 39, 구조물 900m 파괴	차량간격 3-45m, 전파거리 500m
Gottard Tunnel[2]	2001.10.24	16.9	HGV	2일	100MW 이상	사망 11, 차량 23대	차량간격 10-50m 전파거리 200m
Isola delle Femmine[3]	1996. 3.18	0.15	LPG Tanker	-	-	차량 20대, 사망5, 중상 20	6분 정도에 BLEVE 발생
Frejus tunnel[4]	2005. 6. 4	12.9	HGV	6	-	차량6(소방차3대)대, 사망2 연기중독 21명	차량 간격 100m

## 2.2 전파 메커니즘

몽블랑터널 화재조사보고서 4.6.3에서 차량 사이의 열전달은 1)근거리 차량은 화염에 직접 닿아서 2) 원거리 차량은 뜨거운 열기류의 하류와 상류로의 역류 발생에 의해서 3) 가솔린이나 마가린 액체의 유동에 의한 전파와 4)아스팔트 도로에 의go 발생한 것으로 추정하였다. 특이한 점은 최초의 연소 차량군에서 100m 지점은 시설물들의 피해가 작은 반면 그 이후는 피해가 매우 컸다는 점이다.

2001년 UPTUN 프로젝트의 하나로 Runehamar tunnel에서 대규모 HGV 대규모 화재시험이 수행되었다. 이 시험은 차량 사이의 화재 전파를 일으킬 수 있는 한계 복사열류속과 소방대원의 근접 가능한 열유속을 측정하였다[6]. 여기서 다른 차량으로 화재가 전파되는 임계열유속은 12.5kW/m<sup>2</sup>로 가정되었고, 화재 하류 5m 지점에서 임계열유속은 4번의 시험에서 최대 55분에서 최소 10분 정도 유지되었다. 또 이 지점에서 최대 열유속은 100kW/m<sup>2</sup>에 도달하기도 하였다. 또 화재 상류 10m 지점의 임계열유속을 초과하는 시간은 3-20분 정도로 관측되었다[7]. 이 시험에서 화재 하류 15m 지점에 설치한 목재펠릿은 최대 열방출율에 도달하기 전에 이미 발화되었다.

즉 화재의 크기와 터널 단면적, 풍속에 의존하는 고온가스의 유동은 일정 거리에 있는 다른 차량에 임계열유속을 초과하는 경우 보통의 HGV화재에서도 발화를 일으킬 수 있다는 것을 보여준다.

## 2.3 다중차량 화재의 문제점

다수의 차량으로 전파되는 화재의 문제점은 크게 4가지로 분류할 수 있다.

- 인명안전

다중차량화재를 유발시킬 수 있는 최초의 화재는 대부분 대형 트럭에 적재된 고체가 연료탱크에서 누출된 Pool 화재다. 이 화재들의 열방출율은 수분 내에 최고열방출율에 도달하고 진행중인 차량에서 발생한 인공풍에 의해 발생한 고온기류는 급격히 하류 방향으로 전파한다. 인공풍이 사라지게 되면 화재의 열기류는 상류와 하류 양방향으로 급격히 전파한다. 이것은 정체차량과 화재 사실을 인지하지 못하고 터널로 진입한 차량에 탑승한 사람들의 대피를 방해하고 다수의 사망자를 발생시키는 원인이 된다. 특히 Mont Blanc 터널 화재는 비상대피소로 대피한 2명이 50시간 이상 지속된 화재로 인해 사망하게 만들었다. 유럽연합의 도로터널 기준[9]에서는 외부로 통하지 않는 비상대피소는 설치하지 말 것을 요구하고 있다.

• 구조체와 설비의 손상 및 폐쇄로 인한 손실

다중차량화재는 터널 구조체와 설비의 손상이 국소적인 단일차량화재와 달리 매우 긴 거리에 걸쳐 손상을 초래한다. 이 결과 터널의 보수에 많은 시간과 비용을 초래시키는 원인이 되고 있다. 특히 하저터널과 같이 수면 아래에 존재하는 터널은 붕괴의 가능성이 지상의 암반터널에 비해 월등히 높아지게 된다. 또 화재 후 터널을 보수하기 위해 통행을 제한하거나 폐쇄하는 경우 다른 우회경로를 통한 차량운행은 경제적인 소실과 더불어 긴 거리운행으로 인한 환경오염문제를 발생시킨다.

• 소방대 구조와 진압활동

다중차량화재와 같은 대형 화재는 구조와 소화활동을 하는 소방대원과 장비를 파괴시키기도 한다. 몽블랑터널 화재에서 소방차가 3대, Frejus 터널 화재에서 2대의 소방차가 소실되었고, 많은 대원들이 연기로 부상을 당했다. 또 하나의 위험은 터널 구조물의 파괴로 인한 물리적인 부상이다. 슛크리트는 약 250℃ 이상에서 폭열을 시작한다. 특히 진화작업 중 살포되는 소화수는 가열된 구조물을 급격하게 냉각시키며 균열을 발생시키기도 한다. 소방활동을 가장 어렵게 만드는 것 중 하나는 화원에 대한 접근이다. 많은 대형화재에서 소방대는 화재에 수 시간에서 수십 시간까지 접근하지 못함으로써 피해가 확대되었다.

[표2] 터널 화재로 인한 터널 손상길이 및 손실액[8]

터널명	몽블랑터널	타우에른터널	고타드터널	유로터널
터널 구조물 손상길이	900m	500m	700m	400m
터널 폐쇄 및 보수기간	3년	3개월	2개월	7개월
비용(€)	복구/개선비용	189 Mio. €	6.2 Mio. €	87 Mio. €
	수입손실비용	203 Mio. €	18.5 Mio. €	211 Mio. €
	합계	392 Mio. € (약 470억)	24.7 Mio. € (약 30억)	298 Mio. € (약 360억)

### 3. 자동식 소화설비의 효과

위에서 제시한 문제점을 해결하기 위한 방안의 하나로 많은 나라들은 자동식소화설비

에 관심과 연구를 진행하고 있다. 즉 화재초기에 화원에 직접 소화수를 분무함으로써 화재의 크기를 제한하고, 소방대의 접근성을 증가시키고, 구보물의 손상을 최소화할 수 있는 유력한 수단으로 자동식소화설비를 고려하고 있다.

### 3.1 일본

자동식소화설비를 가장 광범위하게 적용하고 있는 나라는 일본이다. 물분무설비는 1) 화재와 주위의 냉각, 2)화재의 진화(제어), 3) 화재 전파의 방지, 4)소화활동의 지원, 5) 터널 구조물과 설비의 보호를 목적으로 설치하고 있다. 일본도로공사는 연간 10-16건의 화재를 경험하고 있으며 2-3건에 물분무설비를 작동해서 적용하고 있다. 도시고속도로공사는 실제로 5-6건의 화재에 물분무설비를 적용한 경험을 보고되고 있다.[10] 물분무설비의 작동으로 인한 피해감소나 2차 사고에 대해서는 알려지지 않고 있다.

### 3.2 유럽

유럽연합은 터널안전에 관한 대규모 프로젝트인 UP-TUN을 진행하고 이중 work package 5는 터널 화재에 직접적인 문제인 예방, 감지, 진압, 환기 등의 문제를 다루고 있다. 이들은 1) 일본, 오스트리아 터널에 스프링클러가 있고 2) LPG 운송 시 발생하는 BLEVE 재해를 방지할 가능성 3) 정체 터널에서 많은 회생을 초래하는 대형 화재 방지 가능성에 대한 해답을 얻기 위해 2001년 네덜란드 2th Benelux tunnel에서 시험을 수행했고 다음과 같은 결론을 내렸다.[11]

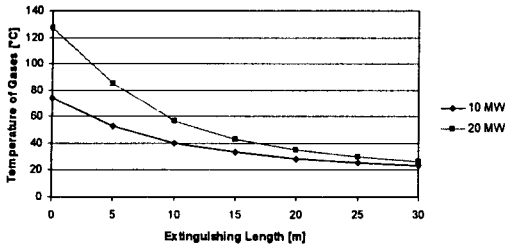
- 스프링클러가 작동되어 가시도는 10m 이하로 감소되었고 이것은 빛속을 통과하는 것처럼 안전운전을 방해할 수 있다.
- 개방된 화재에서 화재는 진화되었지만 상부가 차폐된 화재에서는 진화되지 않았다. 차폐된 화재에서도 증기발생은 강력하지 않았다. 화재지점 하류에서 공기 온도는 50℃를 초과하지 않았다.
- 350℃로 가열된 탱크는 스프링클러 작동 후 5분에 100℃, 10분에 50℃로 낮아졌다.

결과적으로 스프링클러는 화재의 전파를 방지하고, 주위에 낮은 온도 환경을 조성하지만 비용이 많이 든다고 평가하고 있다.

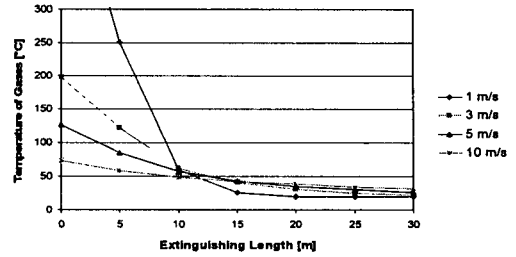
### 3.3 Giemans Building Technology 시험

스위스 Hagerbach 터널에서 Giemans는 터널용 광케이블 감지기와 물분무설비에 대한 시험을 실시하였다.[12] 분무구역은 30m이고, 살수밀도는  $6 \ell/m^2 \cdot \text{min}$ 이다.

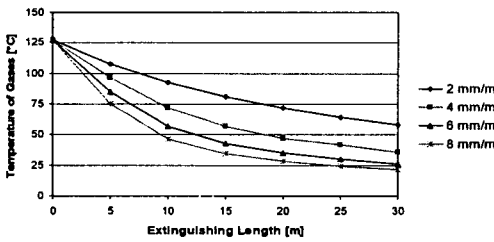
[그림1]은 화재크기와 방수거리에 따른 온도강하를 보여준다. 화재가 감지되고 물분무설비가 작동될 때까지의 최대성장화재는 10MW, 20MW로 가정되었다. 물의 방사로 화재지점의 온도는 최고 120℃에서 생존한계온도 50℃에 도달하는 거리는 15m 이내라는 것을 알 수 있다. [그림2]는 터널 내 풍속이 1-10m/s까지 변할 때 방사범위 10m 지점에서 한계 온도에 도달함을 보여준다. [그림3]은 방수밀도에 따라 변하는 온도를 보여주고,  $6 \ell/m^2 \cdot$



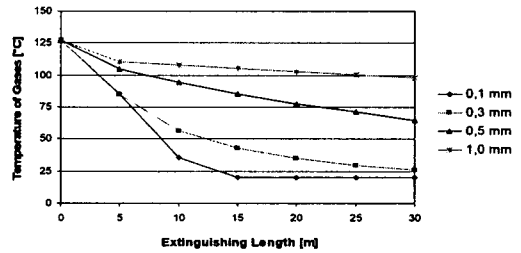
[그림1] 방수거리와 온도변화



[그림2] 풍속과 온도변화



[그림3] 방수밀도와 온도변화



[그림4] 입자크기와 온도변화

min일 때 15m 이내에서 한계온도 이하로 저하됨을 보여준다. [그림4]는 물입자의 크기에 대한 온도변화를 보여주는데 입자가 작을수록 온도강하가 급격하게 이루어짐을 보여준다. 그러나 입자가 작으면 바람에 의한 이송이 촉진되고, 바닥에 도달하는 방수밀도가 저하될 수 있다는 것에 주의해야 한다.[13]

위 시험의 결과로부터 방수구역 내 피난자의 생존가능성이 매우 높고, 소방대는 화원의 10m 지점까지 접근이 가능하다는 것을 의미한다. 또 화원 상부의 온도가 슛크리트 파괴 범위인 250℃ 보다 매우 낮은 온도가 형성되어 구조물의 파손을 방지할 수 있음을 알 수 있다.

## 4. 적용 시스템 비교

### 4.1 스프링클러설비

건축물과 산업분야의 화재 진압(제어)설비로 가장 광범위하게 설치되고 있는 설비로 미국과 오스트리아 일부 터널에 설치되어 있다. 위험물 수송 차량의 통과를 허용하는 경우 방수밀도는 Extra hazard Group 1, 2인 경우 12.2 l/m<sup>2</sup> · min가 요구되어 소화용수 저장량이 매우 높다.[14] 2차선 터널인 경우 차폭이 6m 이상이므로 측벽형헤드는 양쪽에 설치되어야 하고, 상향식헤드는 천정 전체를 가지배관이 설치되어야 하므로 비용이 높아진다.

#### 4.2 포소화설비

위험물 수송차량이 통과하는 터널의 Pool 화재에 적용하는 시설로  $6.5 \ell/m^3 \cdot \text{min}$ 의 방수밀도가 요구된다. 도로에 고른 분포를 위해 배관은 천정에 다수의 가지배관을 설치해야 하므로 비용이 높아진다.[15] 최근의 연구는 압축공기포(Compressed Air Foam)를 이용하는 방안이 연구중이다.

#### 4.3 물분무설비

일본과 한국의 터널에 적용하는 설비로 방수밀도  $6.0 \ell/m^3 \cdot \text{min}$ 을 요구한다. 2차선 터널은 한쪽 벽면에 헤드를 설치할 수 있어 상대적으로 소화용수량과 배관 비용이 저렴하다. 위험물 수송차량이 통과하는 경우 포소화약제를 혼합할 수 있다.[16]

#### 4.4 미세물분무설비

터널에 적용한 사례는 없으나 유럽에서 연구가 활발히 진행되고 있다. 터널 내 기류에 의한 날림을 방지하기 위한 설계법이 제안된다면 광범위한 활동이 예상되지만 고압배관 설비에 많은 비용이 추가될 것이다.[17]

#### 4.5 가스소화설비

일명 "FirePASS"로 불리는 불활성가스로 산소농도를 15-16%로 유지하면서도 소화효과를 가지는 물질이다. 화재가 발생한 구간을 Draft Curtain으로 차단하고 약제를 방출하거나 사전에 약제를 방출해서 화재 차량이 통과하면 소화하도록 구성되어 있다. 아직 설치 사례는 없다.[18]

### 5. 결론

도로터널에서 발생하는 화재 중 액체위험물 수송차량, LPG 탱크로리 차량 화재와 대형 가연물적재트럭의 화재는 그 자체로 높은 열방출율로 터널 구조물과 시설을 파괴하고 인명에 손상을 초래할 수 있지만 인근 차량으로 발화를 통해 긴 터널 구간에 대규모의 화재를 발생시킬 수 있는 위험성을 가지고 있다. 따라서 이런 위험성이 내포된 도로터널에는 자동식소화설비를 적용하는 것이 필요하고, 아래와 같은 기준이 적용될 필요성이 있을 것이다.

1. 건설교통부 '도로터널 방재시설 설치지침'의 물분무소화설비는 위험물수송차량이 통과가 허용되거나 운행차량수가 많은 경우 3,000m 이상에서 더 낮은 기준으로 변경할 필요가 있다.
2. 내화성능이 있는 재료에 의해 방호되지 않는 터널에는 자동식소화설비가 적용할 필요가 있다.
3. 자동식소화설비의 작동시간은 소방대의 도착시간 중 가장 긴 소요시간 이상으로

하고 최소 30분 이상이 필요할 것이다.

4. 액체 Pool 화재가 예상되는 터널에는 최소 10분의 포소화약제를 적용함으로써 유류화재의 적응성을 높일 수 있을 것이다.
5. 자동식소화설비는 화재지점에서 거주자들이 모두 대피한 것을 확인하고 수동으로 작동하도록 하는 기준은 화재 발견 즉시 자동/수동으로 작동하도록 변경될 필요가 있을 것이다.

도로터널에 자동식소화설비를 설치할 경우 발생할 수 있는 문제점에 대한 지적의 상당 부분은 설치비용과 관련되어 있다. 그러나 앞서 살펴본 것처럼 단 1회의 사고에서 직접 손실액은 30억 이상으로 자동식소화설비의 설치비용을 상회할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Minister of the Interior, Ministry of Equipment, Transportation and Housing, 1999, Task Force for Technical investigation of the 24 March 1999 Fire in the Mont Blanc Vehicular Tunnel.
- [2] St Gotthard Tunnel Management, 2003, 1st International Symposium Catastrophic Tunnel Fires, " the Fire in the St Gotthard Tunnel on October 24, 2001".
- [3] Masellis M., 1997, "Fire Disaster in a Motorway in Tunnel", Annals of Burns and Disasters-vol. X-n.
- [4] BBC internet news 2005.6.5.
- [5] US Federal Highway Administration, "Prevention and Control Highway Tunnel Fires" FHWA-RD-83-032, 2003.
- [6] Tony Lemaire, "Runehamar Tunnel Fire Test: Radiation, Fire Spread and Back Layering", Proceeding of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires 2003.
- [7] Anders Lönnermark & Haukur Ingason, "Large Scale Fire Tests in the Runehamar tunnel -Gas temperature and radiation", Proceeding of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires 2003.
- [8] A. Voleltzel & A. Dix,(2004) "A Comparative Analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard Tunnel Fires", Road Tunnel-N324.
- [9] Commission of the European Communities, "on minimum safety requirements for tunnels in the Trans-European Road Network, Brussels, 2002.
- [10] Directoraat-Generaal Rijkswaterstaat Ministry of Transport, "Sprinklers in Japanese Road Tunnels", 2001.
- [11] J.W. Huijben "Test on Fire Detection and Sprinkler", ITC Conference Basel 2002.
- [12] Rudolf Maegerle, "Fire Protection System for Traffic Tunnels Under Test", 12th International Conference on Automatic Fire Detection, 2001.

- [13] Peter Stahl, "Customized Fire Safety Concept for Underground Transportation facilities ", CFOA Conference 2004.
- [14] NFPA, "Standard for Installation of Sprinkler Systems", 1999.
- [15] NFPA, "Standard for Low-Expansion Foam", 1998.
- [16] 일본도로협회, “도로터널 비상용설비설치기준집·동해설”, 평성13년.
- [17] Magnus Arvidon, "Alternative Fire Sprinkler System for Roadway Tunnels", Proceedings of the International Symposium on Catastrophic Tunnel Fires, 2003.
- [18] Alan Beard & Richard Carvel, "The Handbook of Tunnel Fire Safety", 2005.