

# 대형 터널화재를 방지하기 위한 고정식소화설비에 대한 최근 동향

소방기술사 박경환

## 1. 사고의 교훈

### 장면 1.

2002년 대구지하철 1공구 중앙역사에서 발생한 화재는 192명의 생명을 빼앗아갔다. 이후에도 홍지문터널(2003), 달성터널(2005)에서 연이은 사고가 발생하였다. 이 결과로 터널 화재의 위험성에 대한 국민적인 관심이 고조되었고, 그 후 많은 안전시설이 설치되었다.

### 장면 2.

1999년 3월 이탈리아와 프랑스를 연결하는 MontBlanc터널에서 마가린을 실은 트럭에서 화재가 발생하면서 39명이 사망하고, 3년간 터널을 폐쇄하게 된 사고가 발생하였다. 사고는 발생 후 53시간 후에 진화되었다. 이 사고로 전소된 차량에는 소방차량이 2대 포함되었다.

### 장면 3.

2005년 Frejus 터널에서 타이어를 가득 실은 트럭에서 화재가 발생하였다. 화재는 6시간 후 진화되었다. 이 사고로 소방차 2대를 포함해서 6대의 차량이 전소되고, 사망자가 2명 발생했다.

### 장면 4.

2002년 스위스 Gottard 터널에서 2대의 대형트럭이 충돌하면서 11명이 사망하는 사고가 발생했다. 화재는 2일간 지속되었으며, 이후 터널은 3개월간 폐쇄되었다.



[그림 1] Frejus 화재 차량 모습

앞의 사고들의 특징은 다음 4가지로 일반화할 수 있다.

- ① 하나의 차량에서 발생한 화재가 인근 차량으로 연속적으로 전파되면서 대형사고로 발전
  - 대형트럭과 그 적재물의 화재크기는 100 MW 이상
  - 화재 기류의 하류에 있던 차량들은 대류열과 복사열에 의해 연속적으로 화염 발생(Fire Jump 현상)
  - 화염전파가 발생한 차량 간 거리는 MontBlanc에서는 최대 100m, Gottard에서는 최대 50m
- ② 화재가 계속되는 동안 소방대는 화재지점에 접근하지 못함
  - 화재지역의 온도는 1,000~1,300℃
  - 화재지속시간은 MontBlanc 53시간, Gottard 약 2일, Frejus 6시간
  - 구조물의 냉각에 물을 사용하는 경우 터널 붕괴 위험성이 존재
- ③ 터널 구조물과 시설에 큰 피해를 초래
  - 고강도 스틀리트는 약 250℃ 부근에서 폭열
  - 구조물 파손 길이는 MontBlanc 900m, Gottard 700m, Tauern 500m
- ④ 터널 폐쇄로 인한 간접 피해 확대
  - 터널 구조물과 시설을 보수하는 기간 동안 터널은 폐쇄
  - 장기간의 물류의 수송에 추가적인 경제적인 손실을 초래
  - 터널의 폐쇄기간은 MontBlanc 3년, Gottard 2개월, Tauern 3개월

이들 사고의 공통점은 최초로 발생한 차량만으로 끝났을 화재 사고가 여러 차량으로 번지면서 비극이 시작되었다는 점이다. 이들 사고의 결과로부터 우리는 건물에 설치되는 스프링클러와 같이, 다른 차량으로의 화염 전파를 방지할 수 있는 고정식소화설비가 필요하다는 교훈을 얻을 수 있다.

## 2. 터널화재 크기

일상생활에서 우리는 온도를 높이는데 필요한 에너지량을 칼로리(calorie)로 표현하고 있다. 칼로리는 에너지의 양을 표현하는 정적인 개념이다. 반면, 화재와 같이 단위시간당 발생하는 에너지는 와트(Watt)와 같은 동적인 개념을 사용하는 것이 일반적이다. 그리고 가연물의 종류, 가연물의 적재 상태, 연소효율 등을 고려해서 발생하는 에너지의 크기를 단위면적으로 환산한 결과를 보통 사용하게 된다. 목재, 폴리스티렌, 헵탄, 가솔린은 각각 제곱미터당 130kW, 1,189kW, 2,650kW, 1,887kW의 에너지를 발생시킨다. 이처럼 화재에

서 발생하는 단위시간당 열량, 즉 열방출율로 화재크기를 규정하게 된다.

목재, 플라스틱 등이 건물화재의 가연물이라면, 터널화재에서의 가연물은 승용차, 트럭, 버스 자체와 차량에 적재된 물품이다. 결과적으로 차량이 크고 가연물이 많이 실린 차량에서 발생하는 화재의 크기가 커질 것이다. 아래 [표 1]은 일반적으로 도로터널의 위험성과 구조물의 내화성능을 평가하는 지표로 사용되는 설계화재크기를 정리한 것이다.

[표 1] 도로터널 화재크기 기준의 변화

차량 종류	화재크기 [MW]	
	PIARC 1999 edition	NFPA 2008 edition
Car(승용차)	2.5~5	5~10
Multiple Passenger Car(2-4대의 객차)	8	10~20
Bus	15~20	20~30
Heavy Good Vehicle(대형화물차량)	20-30	70~200
Tanker(위험물)	100	200~300

화염 크기와 에너지 발생량의 관계에 대하여, 최대 열방출량이 3MW인 승용차 화재와 6MW인 승합차 화재 사진을 비교하여 볼 수 있다.



[그림 2] 승용차 화재



[그림 3] 승합차 화재

### 3. 터널 내 고정식소화설비

도로터널에 고정식소화설비를 가장 많이 설치한 국가는 일본이다. 일본은 1969년에 Futatsugoya터널 화재시험을 통해 물분무(water spray)설비의 살수밀도와 살수시간을 규정하였다. 그럼에도 1979년 Nihonzaka터널 화재 시 소방대의 도착이 지연되면서 작동되었던 물분무설비의 소화수가 고갈되어 대규모의 터널화재가 발생하였다.[1] 이 사고에서 화재는 159시간(약 7일)동안 지속되었으며, 127대의 차량이 파괴되고, 7명이 사망하였다. 현재 고정식소화설비는 수도권 지역을 중심으로 약 100여 곳에 설치되어 운영되고 있으며, 매년 2~4회 정도 실제 사고에 적용되고 있다.

미국은 1970년부터 일부 터널에 고정식소화설비를 설치하였다. 이것은 1970년대에 있었던 터널 유류화재사고가 기폭제가 되었다. 다만, 일본과는 다르게 AFFF(수성막포)를 포(foam water sprinkler) 형태로 방출하도록 설치하였다.[2]

**[표 2] 북미 터널에 설치된 고정식소화설비**

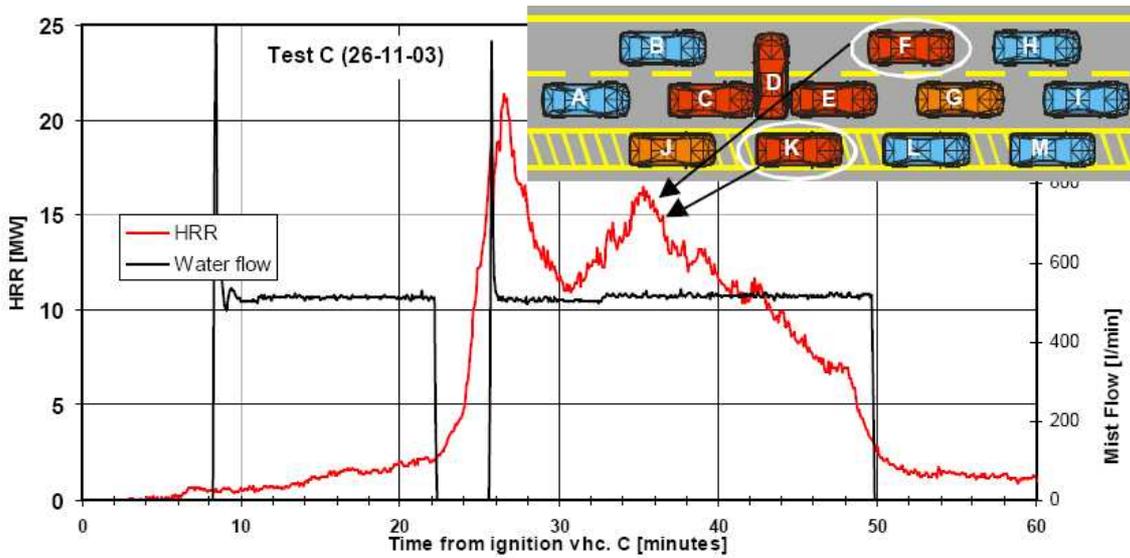
터널	위치	개통일	길이[m]	굴수/차선수	고정식설비 형식	살수구역
Battery Street	시애틀	1952	671	2/4	델류지/물	14
Mercer island	시애틀	1989	914	3/8	델류지/포	37
Mt.Baker Ridge	시애틀	1989	1067	3/8	델류지/포	50
CANA Northbound	보스톤	1990	470	1/3	델류지/포	15
CANA Southbound	보스톤	1990	275	1/3	델류지/포	9
I-5	시애틀	1988	167	1/12	델류지/포	9
George Massey	밴쿠버	1959	630	2/4	스프링클러	-

유럽지역은 고정식소화설비에 대한 PIARC(국제도로연맹)의 부정적인 의견을 수용하여 설치 사례가 거의 없다. PIARC는 1960년 스위스 Offenegg터널에서 시험 중 스프링클러에 의해 소화된 유류 증기가 재점화되면서 폭발을 발생시킨 사건을 근거로 아래와 같은 부정적인 의견을 제시하였다<sup>1)</sup>. 이런 부정적인 의견은 NFPA에도 그대로 반영되었다.

- 물은 연료나 적절한 첨가제와 결합되지 않으면 다른 화학물질의 폭발을 유발할 수 있다.
- 화재가 소화되더라도 가연성가스가 계속 발생되어 폭발을 일으킬 수 있는 위험이 있다.
- 고온의 증발 증기는 사람에게 유해할 수 있다.
- 소화효과는 차량의 내부화재에 적응성이 낮다.
- 연기층이 냉각되고, 연기 성층화가 깨져 연기가 전체 터널을 뒤덮을 것이다.
- 유지관리에 많은 비용이 든다.
- 스프링클러는 자동으로 조작하기가 어렵다.
- 가시도가 감소된다.

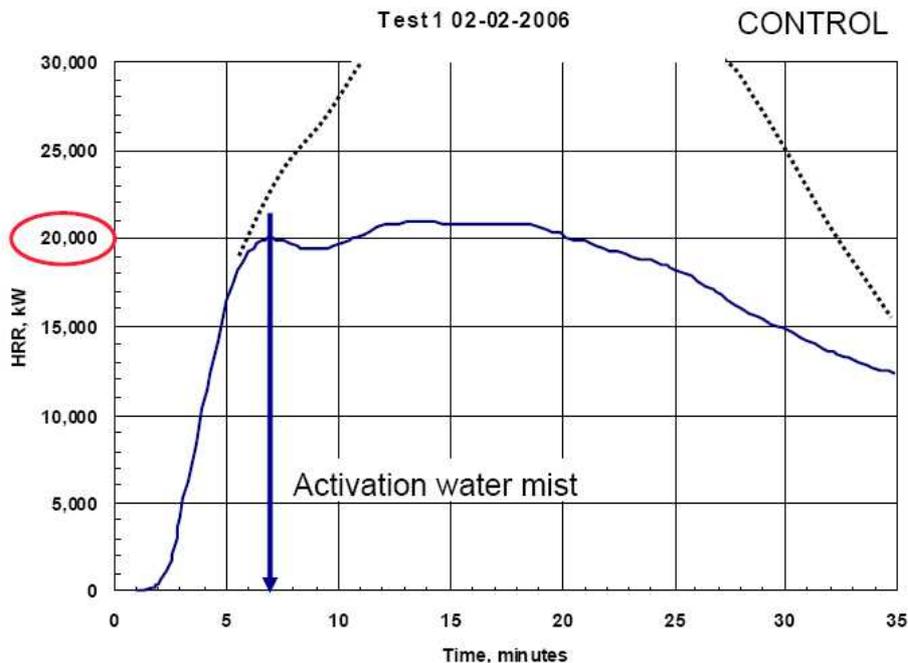
하지만 유럽은 1999년 Montblnac, 2001년 Gottard, 2005년 Frejus 터널에서 대형화재를 경험하면서 고정식소화설비에 대한 적극적인 개발과 실대시험을 진행하였다. 특히 주된 관심사가 된 것은 미분무수(watermist)설비를 터널에 효과적으로 적용할 수 있는지 여부였다. 미분무수설비와 관련하여 프랑스와 스페인에서 주목할 만한 2가지의 시험이 수행되었다.

1) 이 터널은 높이 6m, 폭 4m인 소형 터널이었다. 스프링클러는 10MW의 풀화재(pool fire) 시험 중 발생하였다. 시험은 풀화재가 완전히 성장하도록 충분한 시간동안 지연된 후에 스프링클러가 작동되도록 계획되었다. 즉 화재가 소화된 이후에도 고온의 구조체의 복사열에 의해 유증기가 계속적으로 발생하였기 때문에 발생한 것이다.



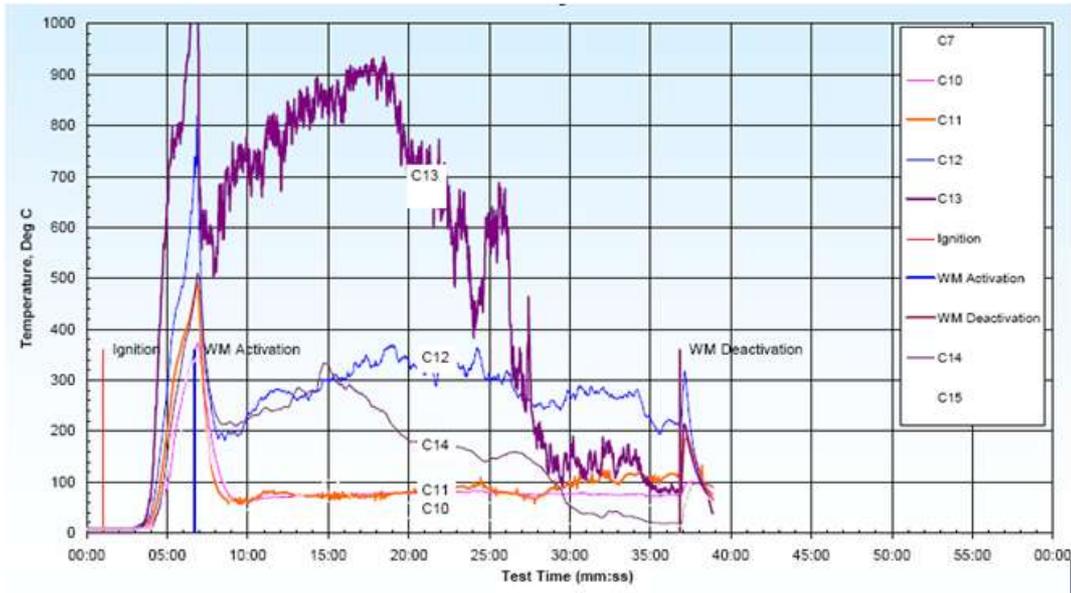
[그림 4] A86터널에서 수행된 실대화재시험

프랑스에서는 파리를 관통하는 A86 고속도로의 소형차전용터널 정체상황에서 화재가 발생하는 시나리오에 의해 [그림 4]와 같은 열방출율을 기록한 실대시험이 수행되었다. 발화 후 8분에 미분무수설비가 작동되면서 화재가 성장하지 못하다가, 22분에 방출을 멈추자 급격히 화재가 성장하는 것을 보여준다. 다시 26분에 미분무수설비가 작동되자 화재가 약간의 성장 후 지속적으로 감소되어 거의 소화상태에 도달하는 것을 보여준다.[3]



[그림 5] 스페인 미분무 시험에서 측정된 열방출율

스페인에서 실시된 또 하나의 시험 결과는 [그림 5]에서 볼 수 있다. 미분무수설비가 없는 경우 최대 60MW까지 성장하는 화재(점선)에서 7분 후 20MW에 도달하였을 때 미분무수설비를 작동하였다가 37분에 중지하였다.[4] 그 결과 열방출율은 20분까지 제어된 후 이후에 점차 작아지고 있는 모습을 볼 수 있다.



**[그림 6] 스페인 미분무 시험에서 측정된 온도분포**

[그림 6]은 스페인 미분무수설비 시험 중 측정된 온도그래프다.2) 화재 차량 상부에 위치한 C13(그래프 맨 위쪽 선)의 열전대에서 측정된 온도변화를 살펴보자. 온도는 화재크기가 20MW에 도달하는 5분에 1,000°C 이상에서 미분무가 작동되는 7분에 600°C로 급감한 후 다시 상승하다가 25분 이후에 200°C 이하까지 낮아졌다. C12(위에서 두 번째)와 C14(위에서 3번째)는 800°C 이상에서 미분무 작동 후 급격히 하락하여 300°C 이하를 유지하였다. 그리고 C11(맨 아래)에서 온도는 100°C 이하를 유지하였다. 이 시험 결과를 보면, 미분무수설비가 작동하면 화원 주위의 온도를 급감시켜 고온 기류에 의해 다른 차량으로 화염을 전파시키는 것을 차단할 수 있음을 알 수 있다.

이외에도 많은 시험들에서 이와 비슷한 결과들이 도출되었다.3) 아래 [표 3]은 고정식 소화설비가 설치된 각국의 터널들을 간단히 소개한 것이다. 호주는 일본과 비슷하게 고정식 소화설비에 대한 부정적인 의견이 지배하던 시기에도 터널에 고정식 소화설비를 적극적으로 설치하였다.

2) 이 시험에서 열전대는 화재직상부에 C13, 기류흐름의 상류쪽 15m와 30m에 각각 C12, C11, 기류 하류쪽 15m에 C14가 설치되었다.

3) 특히 스웨덴 SP와 네덜란드 TNO의 시험이 대표적이다.

[표 3] 고정식소화설비가 설치된 유럽과 호주의 터널

국 가	터 널	국 가	터 널
호 주	Sydney Harbor	스 페 인	M30
	M5 East		Vielha
	Lanecove Distributer	네덜란드	Roemond
	City Link	노르웨이	Valreng
	Graham Farmer		Floyfjell
	M4	스웨덴	Tegelbacken
	Adela	오스트리아	MonaLisa
	Mitchham/Frankstone		Felbertauem

#### 4. 맺으며

앞서 살펴본 결과들에 근거하여 최근 유럽지역에서는 도로터널에 고정식소화설비인 물분무설비를 적극적으로 설치하고 있으며, 이에 대한 설치기준을 마련하고 있다. 미국도 이런 경향을 반영하여, 도로터널에 대한 기준을 제공하고 있는 'NFPA 502' 2008년판에서는 도로터널에 고정식소화설비 설치를 권장하는 내용으로 개편이 있었다. 그 내용을 간단히 정리해보면 다음과 같다.

- 1) 도로터널의 화재는 주로 차량이나 엔진룸과 같이 물에 차폐된 공간에서 발생하므로, 고정식소화설비는 소화에 효과적이지 않다.
  - 고정식소화설비의 목적은 다른 차량으로 화염이 전파되는 것을 막아서 소방대가 진압할 수 없는 크기로 화재가 성장하지 못하도록 하는 것이다.
  - 고정식소화설비의 목적은 a)화재성장을 제어 b)다른 차량으로 화염 전파를 방지 c)구조물과 시설의 붕괴방지 및 보호 d)소방대가 화원에 접근할 수 있는 환경 조성 등 다양하다. 특히 터널구조체가 내화성능이 없는 우리나라의 경우는 구조물의 붕괴를 방지할 수 있다는 측면이 강조되어야 한다.
- 2) 만약 발화 후 고정식소화설비의 작동이 지연되면, 뜨거운 가스층에 얇은 물방울이 분무되어 실제적으로 화재를 진압하지 못한 채 대규모의 과열증기를 발생시킨다.
  - 여러 화재 시험들은 이런 우려가 근거가 없다는 것을 보여주었다. 적정하게 설계된 고정식소화설비는 화재를 진압하고 터널 내 온도를 냉각시킨다. 그러므로 100MW 이상과 1,200℃에 도달하는데 10분 정도가 필요한 HGV(High Goods Vehicle, 대형 화물차량) 화재는 대단히 치명적이므로 설비는 가능한 빨리 작동되어야 한다.
  - 기존 일본에서는 물분무설비의 작동을 오직 수동에 의해서만 이루어지도록 하였다가, 2005년 사고 이후에 10분 후 자동으로 작동하도록 변경한 바 있다. 하지만 이것은 최선이 아니다. 터널화재는 10분후면 최대크기로 성장하기 때문에 가능한 빨리 작동하도록 프로그래밍되어야 한다.

- 3) 터널은 길고 좁고, 대부분 측면이 기울어지고 종방향으로 강력한 기류가 발생하므로 뜨거운 열은 화재 지역에만 국한되지 않는다.
  - 화재감지 기술의 진보로 현재는 고정식소화설비의 살수구역을 작동시키기에 충분할 정도로 터널 내 화재지역을 정확히 감지할 수 있다.
  - 최근 터널에 설치되는 광센서감지기나 열전대감지기는 하나의 살수구역 이내에서 화재를 충분히 감지할 수 있으므로, 기류방향과 속도를 고려해서 정확하게 파악할 수 있다.
- 4) 터널 천장을 따라서 뜨거운 연기층이 형성되므로 작동되는 스프링클러는 화재 상부에만 국한되지 않는다. 화원과 떨어진 지역에서 많은 스프링클러가 작동되면 냉각효과에 의해 뜨거운 연기층을 도로면으로 하강시켜서 화재 진압과 구조 작업을 방해할 것이다.
  - 화원 상부가 아니더라도 고정식소화설비의 작동은 터널 내부를 냉각시켜 구조작업을 도와줄 것이다. 또한, 일정한 구역을 동시에 방수하는 구역시스템은 강력한 기류 조건에서도 화재감지기에 의해 작동한다.
  - 터널에 설치하는 고정식소화설비의 노즐은 일정 길이의 구역을 동시에 방수하는 개방식노즐을 사용하기 때문에 화재차량을 중심으로 인근 지역까지 냉각시켜주어 더욱 효과적이다.
- 5) 수면 아래의 터널 천장에서 물이 방수되면 운전자들은 터널의 붕괴로 인식해서 혼란을 초래할 것이다.
  - 이것은 실제로 일어나지 않은 관념적인 생각이다. 화재 시 운전자들은 화재안전 수단으로 노즐에서 물이 방수되는 것으로 인식할 것이다. 인간행위 연구 자료들은 사람들이 화재에서 앞을 보지 못하는 상황에서도 패닉에 빠지지 않음을 보여준다.
  - 대형화재가 오래 지속된다면 터널 붕괴는 가상이 아니다. Channel 터널의 화재는 그 위험성을 보여준 대표적인 사례다.
- 6) 스프링클러설비의 사용은 연기층을 깨뜨리고, 공기와 연기를 뒤섞어서 터널 내 사람들의 안전을 더욱 위협할 것이다.
  - 이런 의견은 정당한 근거가 없음을 보여준다. 화재 시험에서 연기는 터널 상부에 층을 형성하지 않고 빠르게 하부까지 하강하는 것이 드러났다. 보통 터널에서 공기 유동은 이런 과정을 거친다. 고정식소화설비는 다른 차량으로 화재가 확산되는 위험과 온도를 감소시킨다.
  - 고정식소화설비가 작동되면 터널 상부에 있던 연기층이 냉각되고, 유동기류에 의해 연기층이 내려온다는 것은 부정할 수 없는 사실이다. 하지만 더 중요한 것은 이 화재가 제어되지 않을 경우 발생하는 연기량 증가로 더 큰 희생을 초래한다는 사실과 성층화된 연기는 종류식제연시스템에서는 급격하게 바닥까지 하강한다는 객관적 사실을 무시해서는 안된다는 점이다.

7) 고정식소화설비에 대한 정기적인 시험을 준비하는 것은 비현실적이고 비용이 많이 든다.

- 대규모의 방수시험은 오직 설비를 인수할 때만 진행한다. 정기적인 검사는 배수설비를 통해 이루어진다.
- 터널은 정기적으로 먼지를 제거하기 위한 청소를 수행하고, 설비의 개보수가 항상 필요한 구조물이다. 시험은 차량을 부분적으로 통제된 상태에서 진행할 수 있으며, 이때 필요한 비용은 화재로 인한 피해로 인한 손실과 충격에 대한 비용에 비하면 작은 것이다.

이제 유럽과 미국, 일본, 호주 등 많은 나라에서 고정식소화설비가 터널화재에 필요하다는 공감대는 충분히 형성되었다고 필자는 생각한다. 남은 과제는 실제로 고정식소화설비를 설계, 시공, 감리, 점검 등 일련의 과정에 기술자들의 지식과 능력을 발휘해서 좀 더 안전한 터널을 만드는데 우리 모두가 일조하는 일이다.

#### □ 참고자료

- [1] Masahiko Kunishima, 'the fire disaster in the Tokyo-Nigoya Nihon-zaka tunnel July 11th 1979', <http://shippai.jst.go.jp/en/Search>
- [2] William G. Connell, " Report of the Committee on Road Tunnel and Highway Fire Protection'
- [3] Alan Weatherill, 'Tunnel Ventilation as A Fire-Fighting measure'
- [4] Jack R. Mawhinney, 'CFD Modeling of Watermist Systems on Large HGV Fire in Tunnels'
- [5] European Commission 'Engineering Guidance for Water Based Fire Fighting Systems for the Protection of Tunnel and Subsurface Facilities', re08

\* 본 자료는 박경환 소방기술사(영설계엔지니어링 이사)님께서 작성해주셨습니다.