

# 미분무수 소화시스템의 도로터널 적용을 위한 실물 화재 실험 Full-scale Fire Suppression Test for Application of Water Mist System in Road Tunnel

한용식<sup>†</sup> · 최병일 · 김명배 · 이유환 · 소수현\*

Yong-Shik Han<sup>†</sup> · Byung-Il Choi · Myung-Bae Kim · Yu-Whan Lee · Soo-Hyun So\*

한국기계연구원, \*경일대학교  
(2011. 3. 7. 접수/2011. 6. 10. 채택)

## 요 약

도로터널에서의 미분무수 소화시스템의 화재진압 특성을 조사하기 위해 실물 터널 화재 실험을 수행하였다. 적용된 소화시스템은 압력이 3.5 bar인 저압 물분무 소화설비와 60 bar인 고압 미분무수 소화시스템이다. 미분무수 소화시스템은 물분무 소화시스템의 1/6 만큼의 소화용수량을 사용한다. 화원(fire source)은 실물 승용차와 유류화재를 모사한 화원면적 1.4 m<sup>2</sup>의 탱크 연료 팬 화재로 구성하였다. 터널 내의 환기조건을 구현하기 위해 실물모형 터널의 한쪽 끝단에 유속(0.9~3.8 m/sec 범위) 발생장치를 설치하였으며, 화원에서 하류 방향으로 터널 내 온도분포는 K-type 열전대 트리를 사용하여 측정하였다. 실험 결과 고압 미분무수 소화시스템은 B급 화재의 경우 저압 물분무 시스템과 동등한 수준의 냉각효과를 보였다.

## ABSTRACT

The full-scale experiments are carried out to investigate the fire suppression characteristics of water-based fire fighting systems in a road tunnel. Applied systems are the low-pressure water spray system at 3.5 bar and the high-pressure water mist system at 60 bar. The water flow rate of the high-pressure system is one sixth only of the water spray system. A passenger car and a heptane fuel pan with area of 1.4 m<sup>2</sup> are used as fire sources. A blower system is installed at the tunnel exit to realize the longitudinal ventilation conditions (0.9~3.8 m/s) in the tunnel. Temperatures from the fire source to the down-stream direction are measured by K-type thermocouple trees. The experimental results show that the cooling effect of the high pressure water mist system in the test conditions were equivalent to that of the low pressure water spray system for B-class fire.

**Key words :** Fire suppression, Water mist system, Road tunnel, Full-scale test, Safety

## 1. 서 론

국내·외적으로 빠른 경제성장과 산업 사회의 발달로 인한 교통량과 물류 수송이 급격히 증가하고 있다. 이러한 교통량 및 물류 수송량의 증가는 교통비 및 물류수송비의 증가를 가져왔으며, 그 대응책의 하나로 국토의 70%가 산악으로 이루어진 우리나라에서는 철도 터널 및 도로 터널의 건설이 필수불가결하게 되었으며, 이러한 터널건설은 현재에도 꾸준히 증가하고 있다.

일반적으로 길이가 긴 장대터널은 구조상 개방된 공간이 아닌 반밀폐 공간으로, 화재의 발생 시 인명, 터

널 시설물 및 터널 구조물의 보호를 위해 터널 내 소화시스템의 설치가 요구된다. 우리나라를 포함하여 일부 나라에서는 화재를 신속히 자동으로 소화 또는 화재성장의 억제를 수행하는 자동식 화재 진압장치를 도로터널 내에 설치하고 있으며, 그 대표적인 시스템이 물분무 시스템이다. 도로터널 내 물분무 소화시스템은 일본에서 가장 먼저 설치되기 시작하였으며, 위험도가 높은 터널에 이의 설치를 의무화하고 있다. 일본에서는 물분무 헤드 간격은 4~5m, 방수압 0.29 MPa 이상, 도로면 1m<sup>2</sup>에 6 l/min 이상 방수, 방수구간은 50m 이상, 구간 경계의 화재 시 2구간 동시 방수를 규정하고 있다. 미국이나 유럽의 경우는 터널 내에 설치된 예가 적지만 최근에 대형 터널 화재 사고를 겪으면서 물분

<sup>†</sup>E-mail: yshan@kimm.re.kr

무 설비의 설치에 관한 연구<sup>1)</sup>가 진행되었다. 국내의 경우 건교부의 설치 지침<sup>2)</sup>에 따라 터널의 위험도에 따라 설치를 권고하고 있으며, 죽령터널과 능동터널에 물분무 소화설비가 설치되어 있다. 설치 기준은 물분무 헤드간격 4~5 m, 방수구역 50 m 이내, 한 개의 노즐에 대한 방수량은 도로면에 6 l/min-m<sup>2</sup> 이상으로 되어 있다.

터널 내 소화시스템은 화재의 진압을 1차적인 요건으로 가져야 하겠지만, 터널 환기조건, 구조적 문제 및 차량의 차체 구조 특성 상 화재의 완전 진압을 달성하기 힘들기 때문에 소화시스템의 특성에 따라 적절한 화재의 억제(suppression) 및 제어(control)를 목적으로 할 수도 있다.<sup>3)</sup>

일반적으로 도로터널에 사용되는 물분무 시스템은 저압 시스템이다. 저압 시스템의 경우 상대적으로 물입자의 직경이 커서 물입자의 직경이 보다 작은 경우에 비해 화원으로의 침투력은 높은 반면 물입자의 증발에 의한 공간냉각 효과는 떨어지게 된다. 본 연구에서는 터널 내 수계 소화시스템의 적용 가능성을 확인하기 위해 화재 실험을 수행하였다. 특히 작은 소화용수로 A급 화재 및 B급 화재에 효과적으로 사용할 수 있는 미분무수 소화시스템의 화재 제어 성능을 확인하기 위한 실물화재 실험을 실시하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

Figure 1은 실물 화재 실험에 사용된 한국건설기술 연구원에 설치되어 있는 실물크기 도로터널로, 죽령터널을 모사한 폭 11.6 m, 높이 7.5 m, 길이 40 m의 사양을 가지고 있다. 콘크리트로 이루어진 터널의 길이는 40 m이지만 화재연기의 배연을 위하여 배연설비가 설치된 건물까지 터널 단면적을 유지하면서 배풍로를 약

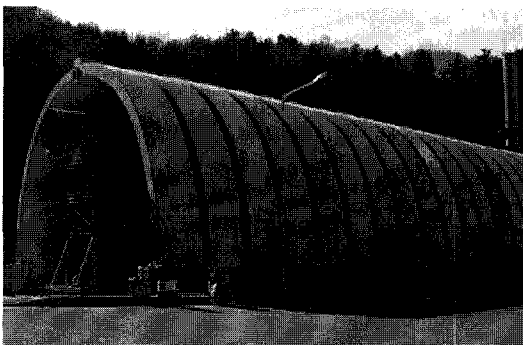


Figure 1. The external appearance of the experimental tunnel.

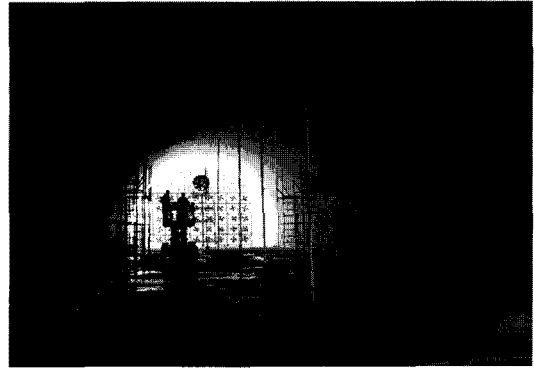


Figure 2. The blower system for tunnel ventilation.

30 m 설치하였으므로 실제 터널 길이는 약 70 m 정도가 된다. Figure 2에서 보는 바와 같이 터널입구에는 터널 내 유속을 재현하기 위하여 1 대의 제트 팬과 40 대의 송풍기로 이루어진 터널 유속발생 장치가 설치되었다.<sup>4,5)</sup>

화원은 연료를 제거한 2000 cc 승용차와 1.4 m<sup>2</sup>의 단면적을 갖는 heptane pool fire를 사용하였다. 화원 면적에 따른 heptane 연료 화재의 화재크기는 연소효율을 100%로 가정하는 경우 대략 4.8 MW,<sup>6)</sup> 유속이 없는 경우의 화재 불꽃의 높이는 대략 5.7 m 정도이다.<sup>6)</sup>

실험에 사용된 물분무 노즐은 국내 터널에 설치되어 있는 3종류의 저압 노즐 시스템(작동압력 3.5 bar 이하, 한쪽 측벽 5 m 간격 5개)과 고압 미분무수 노즐(작동압력 60 bar, 양쪽 측벽 5 m 간격 총 10개)시스템이다. 각 시스템의 분사 밀도를 측정하기 위하여 화원이 없는 상태에서 Figure 3과 같이 터널 바닥면에 25개의 집수통(단면 0.3 × 0.3 m)을 설치하여 분사밀도를 측정하였다.

Figure 4의 상부에 설치된 노즐이 저압노즐이고 하부에 설치된 노즐이 고압노즐이다. 소화용수의 공급은 노즐 방식에 따라 달리 하였는데, 저압용은 옥내 소화

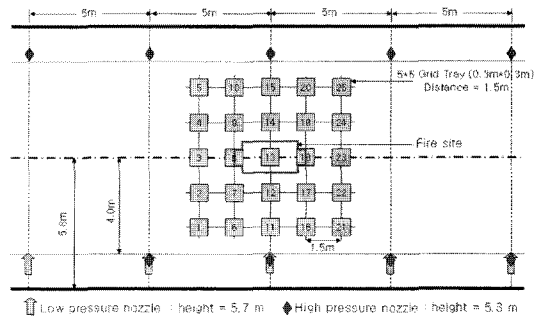


Figure 3. Nozzle position and water flux measuring points.

전을 고압노즐에는 Figure 5에서 보이는 고압 펌프가 사용되었다. Figure 6은 실험에 사용된 계측장치의 개략도를 보여준다. 터널 내 온도분포를 측정하기 위하여 K-type의 열전대를 설치하였으며, 화재 시 터널 내 유속 분포를 확인하기 위하여 화원 10 m 전방에 hot

film 형식의 속도센서를 설치하였다.

자동차 실험화재 실험의 경우 화원이 일정 정도 성장하도록 하기 위하여 점화 후 2분 후에 소화시스템을 가동하였으며, 표준화된 Heptane 풀화재의 경우 15초~60초 정도 화재가 성장한 후에 소화시스템을 가동하였다.

### 3. 실험결과

Figure 7은 Figure 2의 유속발생장치에 의한 화원위치에서의 터널 내 유속 분포를 도시하였다. 천장부에 강력한 제트 팬을 설치하여 천장부의 속도가 높으며, 터널 바닥면으로 갈수록 유속이 감소한다. 평균 유속은 높이에 따라 0.9~3.8 m/sec 사이이다.

Figure 8은 실험에 사용된 물분무 헤드의 분사압력 및 터널 바닥면에서의 분사밀도를 보여 주는데, 3 종류가 국내 설치기준인 6 l/min-m<sup>2</sup>에 근접하고 있음을 알 수 있다. 고압 시스템의 경우 저압 시스템 대비 약 1/6의 분사밀도를 보인다. 온도 분포 측정결과 3개의 저압 소화시스템은 대동소이한 결과를 나타내었기 때문에 본 논문에서는 A 노즐 결과를 실험결과 분석에

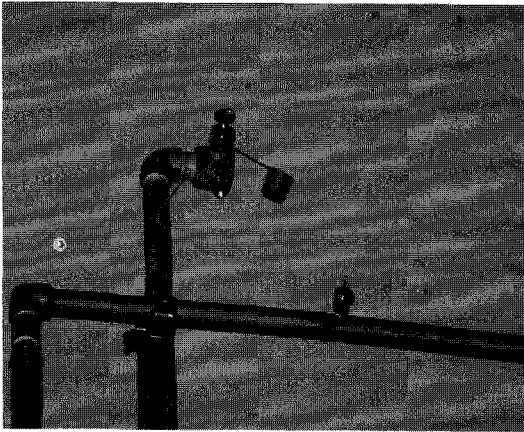


Figure 4. Installed nozzles for the experiments.

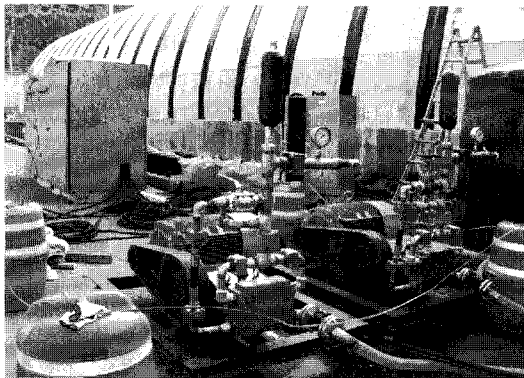


Figure 5. High pressure pumps for the water mist system.

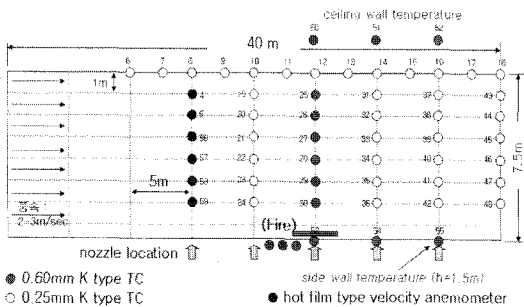


Figure 6. A schematic of measuring apparatus.

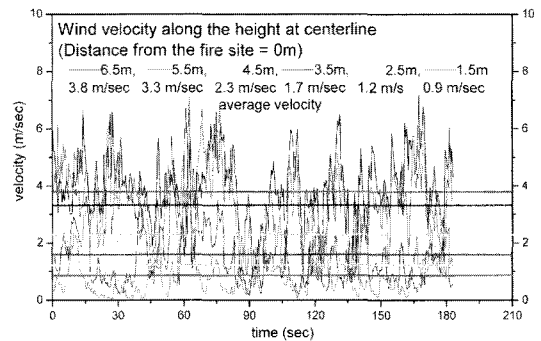


Figure 7. Velocity profile in the test tunnel.

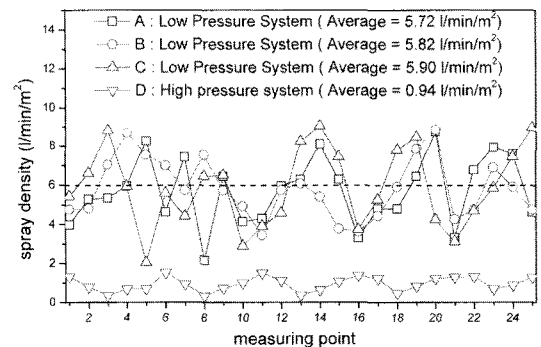


Figure 8. Flux density of water-based systems.

사용하였다.

Figure 9와 Figure 10은 실험에 사용된 자동차와 헵

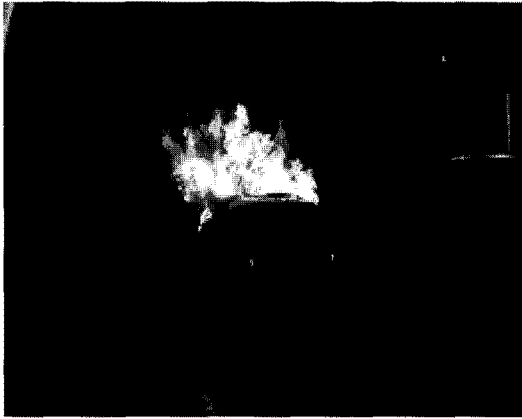


Figure 9. Fire source of the passenger car.

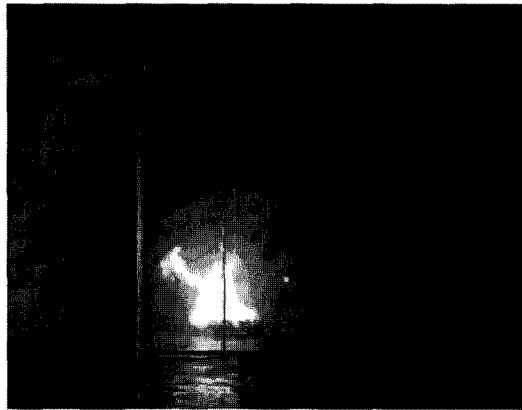


Figure 10. Fire source of the heptane pool.

탄 풀 화원을 나타낸 사진이다. 자동차 화재의 경우 heptane(120 g)을 적신 40 cm\*40 cm의 화장지를 차량 앞 뒤좌석에 설치한 후 조수석에 점화하였다.

Figure 11은 실험 자동차 화재의 화원 하류 5 m 높이의 천장부 온도를 나타내고 있다.

터널 단면적이 크고, 터널 천장부에 강한 유속이 존재하기 때문에 천장부 온도가 높지 않다. 그러나 저압 시스템을 가동한 경우와 가동하지 않은 경우 온도를 살펴보면, 저압 시스템이 가동되면서 온도가 급격히 감소함을 알 수 있다. 그러나 고압시스템의 경우, 물분무 시스템이 없는 경우보다는 온도가 급격하게 하강하였지만 저압시스템과 비교하면 상대적으로 온도 하강 효과가 낮다. 이는 두 가지 요인으로 설명할 수 있다.

첫째는 비록 동일한 모델의 차량과 유속발생장치를 사용하였다고는 하나, 차량 내부 가연물의 건조 정도 등 화재성장 특성이 다르고, 매번의 실험 시 터널 종방향의 유속이 동일하지 않았기 때문이다. 이는 Figure 11에서 소화시스템이 가동되기 전인 화원 점화 후 120 초까지의 온도분포에 나타난다. 두 번째, 보다 주된 요인은 화재가 자동차 내부에서 발생하고 화원의 특성이 심부화재인 A급 화재의 특성을 가지고 있기 때문으로 보인다. 고압시스템의 경우 저압시스템에 비하여 상대적으로 물분무 입자의 직경이 작아 화원침투력이 약하고, 따라서 화원자체의 강도를 약화시키는데 한계가 있기 때문이다. 이러한 고압 시스템과 저압 시스템의 온도하강 특성 경향은 Figure 12의 화원하류 15 m 위치 단면의 평균온도 분포에서도 동일하게 나타난다.

저압 시스템과 고압시스템의 화원 하류방향의 공간 냉각 능력의 차이는 화원이 표준화된 풀 화재의 경우

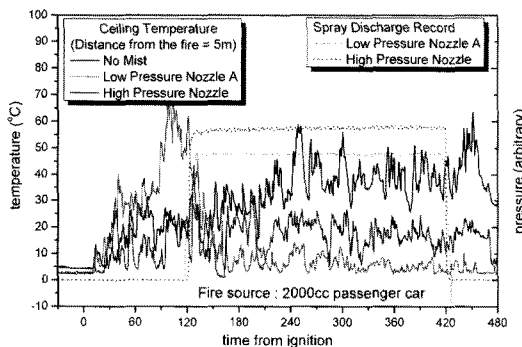


Figure 11. Ceiling temperature (distance from the fire = 5 m, passenger car).

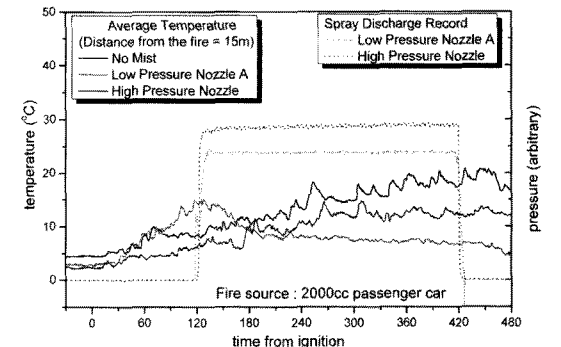


Figure 12. Ceiling temperature (distance from the fire = 15 m, passenger car).

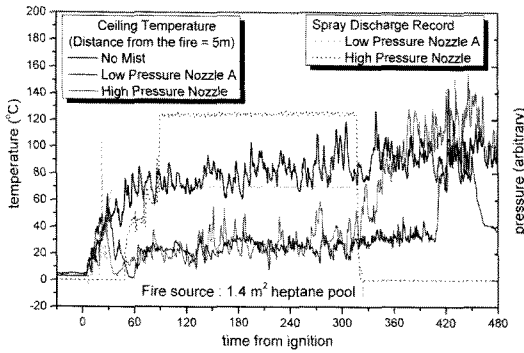


Figure 13. Ceiling temperature (distance from the fire = 5 m, heptane pool fire).

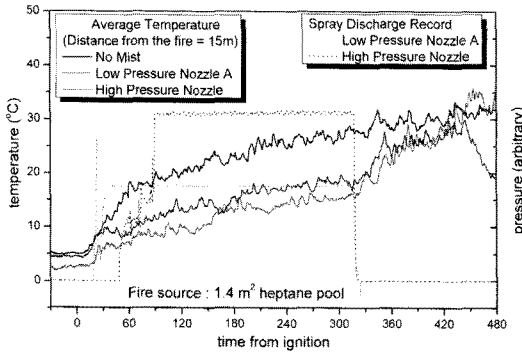


Figure 14. Ceiling temperature (distance from the fire = 15 m, heptane pool fire).

명확히 관찰할 수 있다. 자동차 화재의 경우 동일한 두 대의 차량을 실험에 사용하였으나, 화재성장곡선이 동일하다는 보증을 할 방법이 없으므로 화원을 표준화하기 위해서 heptane 풀 화재를 이용하여 화재진압실험을 수행하였다.

Figure 13과 14는 1.4 m<sup>2</sup>의 heptane pool 화재에 대한 저압과 고압시스템의 실험 결과를 보여준다. Figure 13에서 관찰할 수 있듯이 화원 하류 5 m 지점의 천장 부위의 온도는 화재가 성장하면서 약 80 °C까지 상승한다.

저압 시스템이 가동되면 온도가 급격히 떨어져 대략 40~60 °C의 온도강하 효과가 나타난다. 온도 강하 효과는 Figure 14의 하류 15 m 지점의 평균온도에서도 마찬가지로 나타난다. 특히 소화시스템의 가동이 멈추면 온도가 급격히 상승하는 것으로부터 물분무의 온도강하 효과를 확증할 수 있다.

자동차 화재와 비교하면 고압시스템의 경우 상대적으로 유류화재에서 저압시스템과 동일한 냉각 성능을 보임을 알 수 있다. 여기서 중요한 점은 고압시스템의

경우 저압시스템에 비해 방수되는 총 수량이 약 1/6에 불과하다는 것이다. 즉 미분무수 입자가 작은 고압시스템의 경우 B급 화재에서 저압시스템에 비해 1/6 정도의 수량만으로도 동일한 공간온도 냉각 효과를 나타냈다.

#### 4. 결 론

터널 내 유속이 존재하는 실물 도로터널에서의 미분무수 소화시스템의 적용 가능성을 검토하기 위해 실물 화재 실험을 수행하였다. 적용된 화원은 실물 승용차 화재와 유류화재를 모사한 화원면적 1.4 m<sup>2</sup>의 heptane pool 화재이며, 기존 도로터널에 설치된 저압식 물분무 시스템과 고압 미분무수 소화시스템과의 냉각효과 비교실험을 수행하였다. 도로터널 내의 환기조건을 구현하기 위해 실물모형 터널의 한 편에 터널 유속(0.9~3.8 m/sec 범위) 발생장치를 설치하였으며, 화원에서 하류 방향으로 터널 내 온도분포를 측정하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 저압 시스템은 상대적으로 차량화재(A급 화재 특성)에 고압 시스템은 유류화재에 우월한 특성을 보인다. 이는 저압(입자크기 큼), 고압(입자크기 작음)의 분무 특성에 기인하는 것으로 판단된다.
- 저압시스템에 비해 약 1/6의 소화용수량을 사용하는 고압시스템은 저압시스템과 비슷한 수준의 공간 냉각효과를 보인다.

본 실험을 통해 도로터널 내 소화시스템으로 수계 소화시스템의 적용 가능성을 확인하였으며, 현재 소방방재청에서 추진중인 미분무수 소화설비 화재안전기준 제정이 완료될 경우 도로터널 내 화재안전 확보와 관련 소방 산업분야의 발전을 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구의 진행을 위해 도움을 주신 소방방재청의 안전기술개발사업과 국토해양부의 미래철도기술개발사업 관련자 여러분과 장소를 제공해 주신 한국건설기술연구원 담당자께 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. EU, UPTUN project report(2007).
2. 건설교통부, “도로터널 방재시설 설치지침”, 건설교통부(2004. 12).

3. 한국터널공학회, “도로터널 방제시스템 개선방안 연구”, 건설교통부(2008.3).
4. 한국기계연구원, “도로터널 화재안전성 평가 및 가상 현실기반 소방훈련시스템 개발”, 소방방재청(2008).
5. 최병일, 한용식, 김명배, 소수현, “도로터널 저압물분무 설비 화재진압 실험”, 한국화재소방학회 2008년 춘계 학술논문발표회 논문집, pp.218-221(2008).
6. SFPE, Handbook of Fire Protection Engineering, 3rd Edition. Section 3, Chapter 1, NFPA(2002).