

터널화재시 물분무소화설비의 성능에 대한 실험

박경환^{1*}, 소수현²

A real scale test on performance of water spray systems in tunnel fire

Kyung-Hwan Park, Soo-Hyun So

Abstract The performance of water spray system installed to reduce risks of tunnel fire is investigated by a real tunnel fire test. In case of A class fire, Pool fire, and car fire, the nozzle of water spray has had a marvelous effect to reduce the temperature of hot smoke. And it is verified to have remarkable cooling effects when there is the air flow in a tunnel. Though this results, water spray system will be able to prevent a fire jump to decrease the air temperature in a tunnel and to protect tunnel facilities by the fire control.

Keywords: Tunnel fire, water spray, pool fire, car fire, fire control

요 지 터널화재 시 위험을 경감시키기 위해 설치하는 물분무설비의 성능을 실험을 통해 확인하였다. A급 화재, Pool 화재 및 차량화재시 물분무노즐은 뜨거운 연기의 온도를 낮추는데 효과가 큰 것으로 확인되었다. 또한 터널에 기류가 존재하는 경우에도 냉각효과가 큰 것으로 확인되었다. 이 결과를 통해 물분무설비는 터널화재 시 기류온도를 낮춤으로써 fire jump를 방지하고, 주위의 시설물을 보호할 수 있을 것으로 판단된다.

주요어: 터널화재, 물분무설비, 액면화재, 차량화재, 화재제어

1. 서 론

터널화재의 위험성에 대한 이전 연구는 차량화재의 크기(유용호 등, 2007), 피난연락경의 설치간격(이동호 등, 2010)나 임계풍속(유지오 등, 2002) 및 내화성능(김효규 등, 2005)에 관한 주제는 많이 다루어졌지만 물분무설비의 효과에 대한 연구는 부족한 상황이다. 이에 본 연구는 터널화재를 경감시키는 소방시설 중 물분무설비의 성능을 확인하기 위해 실시되었다.

‘도로터널방재시설설치지침’(건설교통부, 2004)에서 물분무소화설비를 설치해야 하는 대상은 터널길이 3,000 m 이상으로 규정되어있다가, ‘도로터널방재시설설치및관리지침’(국토해양부, 2009)으로 개정되면서 터널위험도 등급에 따라 설치하는 것으로 개정되었다. 위험도 등급은 화재 위험에 미치는 영향을 사고확률(교통량, 연장), 터널특성(경사도, 터널높이, 곡률반경), 대형차혼입율, 정체정도 및 통행방식(대면, 일방)터널연장, 주행방식, 통행량, 위험물수송차량 통과여부, 대형차혼입율, 터널

경사 등 다양한 측면을 반영하여 점수를 부여한다. 이 터널위험도 지수 합계가 29점 초과하는 1등급 터널에만 물분무설비는 권장설비로 포함하도록 변경되었다.

이전에는 통행량이 작지만 터널연장이 긴 죽령터널, 가지산터널에 물분무설비가 설치되었다. 하지만 지침의 변경으로 인해 통행량과 정체빈도가 커서 위험도가 높은 도심지 터널에는 설치되지 않는 모순을 해소할 수 있을 것으로 생각된다.

국외의 경우 도로터널의 물분무설비(water spray)는 주로 일본에서 많이 설치하였고, 스프링클러설비(foam water sprinklers)는 미국과 호주에서 많이 설치하였다. 최근에는 미분무설비(water-mist)가 유럽의 도로터널에 많이 설치되고 있다(NFPA, 2008).

우리나라 물분무설비의 효시적인 일본의 경우 터널연장, 통행량 등 위험변수에 따라 물분무설비를 설치하였다. 물분무설비는 주로 도심지 고속도로에 연결되는 약 100여개 터널에서 운영되고 있다. 그 결과 실제로 연 2-3회 정도 물분무설비가 작동하여 대형피해로 전이되는 것을 막고 있다.(RWS, 2001).

일반적으로 물분무소화설비는 작은 물입자를 화염 주위에 방출하여 가연물의 냉각, 뜨거운 연기의 냉각, 질식

¹정회원, 서울시립대학교 재난과학과

²비회원, 한국소방산업기술원

*교신저자: 박경환 (E-mail: kwfree21@hanmail.net)

작용에 의한 화재제어성능을 발휘하는 것으로 알려져 있다(NFPA, 2003). 냉각효과는 물방울의 크기와 분포, 살수밀도와 밀도분포 그리고 화염의 이격 거리 등에 영향을 받는다. 따라서 물분무설비 노즐의 방수특징은 소화 성능에 영향을 미칠 수 있다.

그러나 아직까지 국내에서는 일본과 달리 도로터널용 물분무노즐의 소화성능에 대한 기준이 정립되어 있지 않을 뿐만 아니라 노즐의 성능을 검증할 기준도 마련되어 있지 않다.

이에 본 연구는 이전에 도로터널에 설치되었던 물분무노즐 2종류와 1개의 신제품을 포함한 3개의 제품을 시험터널에 설치하여 화염에서 발생하는 연기의 냉각효과를 측정하였다. 또한 이 결과를 토대로 도로터널용 물분무설비의 냉각효과를 통해 물분무설비의 효과에 대한 정량적인 근거를 제시하고자 한다.

2. 시험 개요

2.1 2차선 도로터널 모형세트

본 시험은 축령터널과 같은 단면을 가지는 폭 5 m, 높이 9m의 사각형 단면에서 하나의 물분무노즐의 성능을 측정하기 위해 기획되었다. 이 시험에 사용된 화원은 일본의 소방연구소, 동경대 및 카지마건설(주) 등의 공동연구에서 실시한 물분무 소화시스템에 대한 자료(2003)를 참고하여 결정하였다. 화재에서 발생하는 열기류를 측정하기 위해 화재 중심부에 그림 1과 같이 7개의 열전대를 설치하여 온도변화를 관찰하였다. 시험은 점화 3분 후에 각각 0.35 MPa과 0.5 MPa에서 물분무를 발생시킨 후 온도를 측정하였다. 필요압력은 펌프를 가압하였고, 압력측정은 노즐 앞에 설치한 압력계로 측정하였다. 모형세트가 시험장 내에 설치되어 있어 외부기류에 대한 영향은 없는 것으로 가정할 수 있다.

2.2 2차선 도로터널 실물세트

본 시험은 건설기술연구원의 폭 11.5 m, 높이 7.5 m, 길이 40 m의 콘크리트 터널에서 실시되었다. 5개의 노즐을 한쪽 벽면에 5 m 간격으로 설치하였다. 화원은 B급 4단위와 7단위의 heptane pool 및 2,000 cc급 자동차가 사용되었다. 터널화재시 바람에 의한 영향을 모사하기 위해 터널 입구에 1대의 제트팬과 40대의 소형 소풍

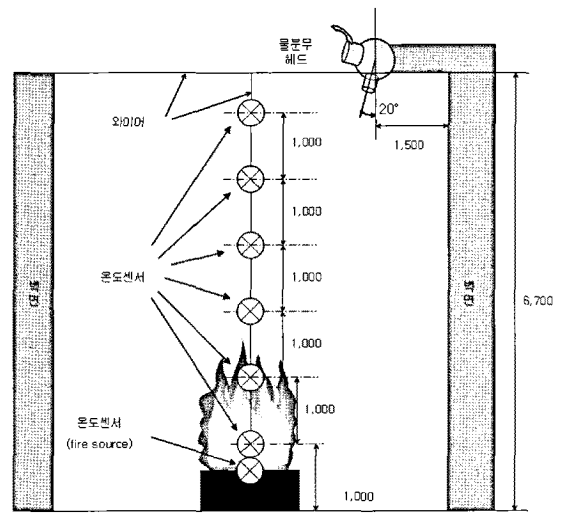


그림 1. 기류온도 측정용 열전대

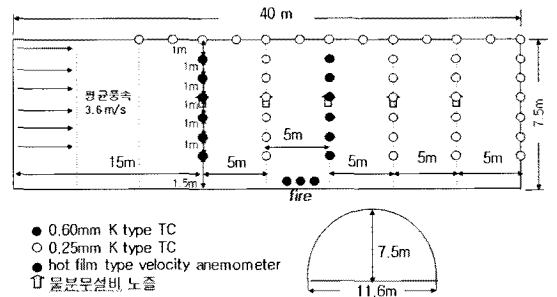


그림 2. 노즐 설치 위치 및 열전대 측정 위치를 보여주는 단면도

기로 구성된 장치를 사용하였다. 공기 유속을 측정하기 위해 hot film형 속도센서를 설치하였고, 온도를 측정하기 위해 화원전방 5 m, 화원, 화원후방 5 m, 10, 및 15 m 지점에 K-type 열전대가 설치되었다(그림 2). 또한 물분무노즐의 방사압력을 측정하기 위해 배관입구에 압력계를 설치하였고, 이 배관을 펌프에 연결하였다.

3. 측정 결과

3.1 2차선 도로터널 모형세트

(I) A급 고체가연물 화재시험

그림 3은 물분무설비가 작동하기 전에 A급 2단위 화재시험에서 측정된 온도분포를 나타내고 있다. 화원 중심과 상부 1 m 지점의 온도는 1,000°C 이상이었고, 화원

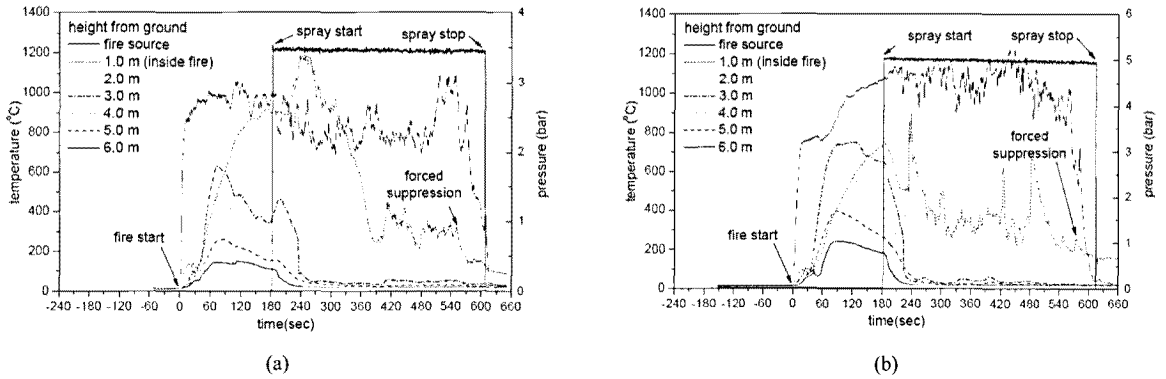


그림 3. A급 2단위 화재 시 물분무노즐 방사에 의한 온도 강하(a: 0.35 MPa, b: 0.5 MPa)

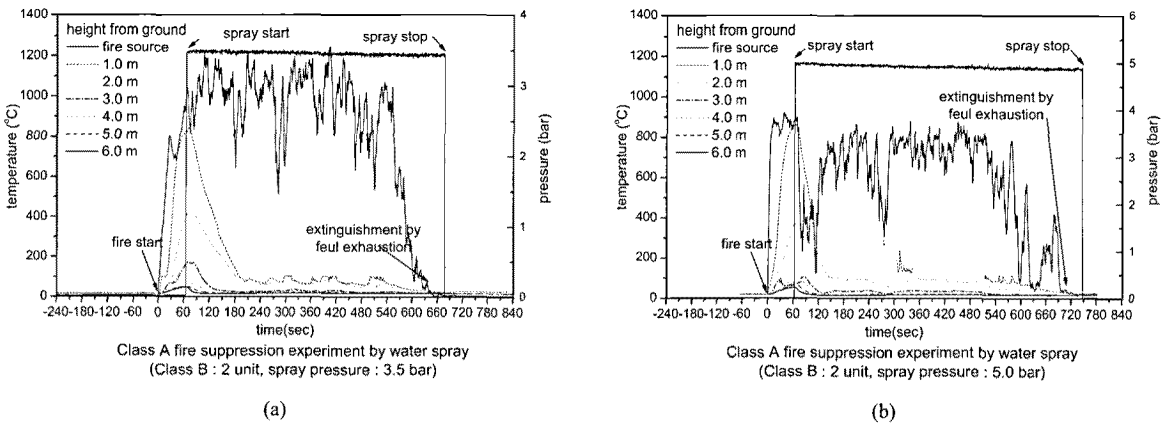


그림 4. B급 2단위 화재 시 물분무노즐 방사에 의한 온도 강하(a: 0.35 MPa, b: 0.5 MPa)

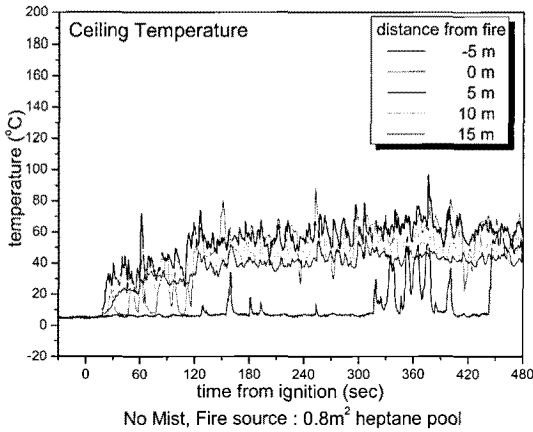
상부 2 m 지점은 700°C까지 상승하였다. 화원 상부 3 m, 4 m 지점도 400~600°C까지 고온을 나타냈다.

물분무설비 노즐의 방수는 화염이 발생한지 3분 후부터 시작되어 7분 동안 지속되었다. 0.35 MPa(평균방수 밀도 4.16 lpm/m²) 압력으로 방수한 경우 화원 직상부의 온도(적색 실선)는 거의 변화가 없었지만 1 m 지점의 온도(적색 점선)는 400°C까지 낮아졌다. 그리고 화원 상부 2 m(연두 실선) 이상에서는 100°C 이하로 온도가 급격히 떨어졌다. 0.5 MPa(평균방수밀도 4.8 lpm/m²·min) 압력으로 방수한 경우는 0.35 MPa 압력으로 방수한 경우 보다 온도가 급격히 떨어졌다. 반면 2.0 m 이상의 지점의 온도는 0.35 MPa의 경우와 비교해서 큰 변화가 없었다.

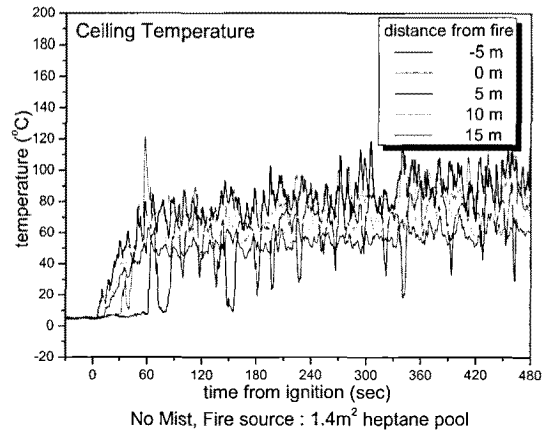
(2) B급 액체가연물 화재시험

B급 2단위 화재의 경우(그림 4) 화염 발생 1분 후부터 물분무설비가 작동하여 약 10분 후에 연료가 모두 연소하여 자연적으로 소화되었다.

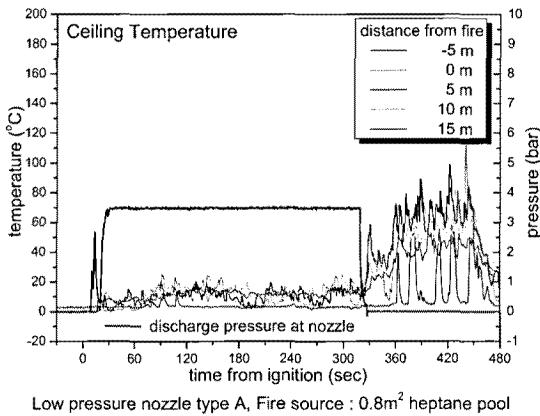
0.35 MPa의 압력으로 방수한 시험의 경우 모든 지점에서 물분무설비의 방수와 동시에 화원 직상부(적색 실선)를 제외한 1 m 이상(적색 점선)의 온도는 급격히 떨어졌다. 그리고, 2 m 이상의 지점에서는 모두 100°C 이하를 유지하였다. 0.5 MPa의 압력으로 방수한 시험에서 물분무설비가 작동하면서 화원의 온도가 800°C로 낮아졌고, 다른 지점의 온도분포는 0.35 MPa의 경우와 비슷하였다.



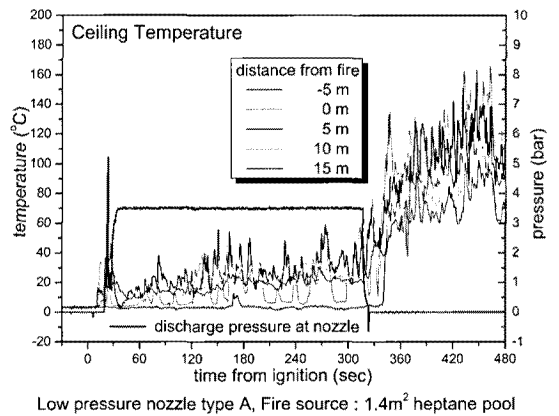
(a)



(b)

그림 5. 물분무 노즐 비작동 시 온도분포(a: 0.8 m², b: 1.4 m²)

(a)



(b)

그림 6. 물분무노즐 A 작동 시 온도 분포 (a: 0.8 m², b: 1.4 m²)

3.2 2차선 도로터널 실물세트

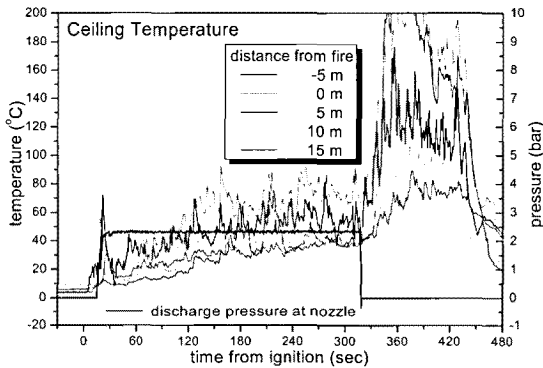
2차선 도로터널 실물세트의 시험은 터널 길이가 상대적으로 짧고, 제트팬과 속도계의 거리가 가까워서 풍속 분포가 다소 불균등하게 나타났다. 하지만 평균 3.6 m/s에서 시험이 진행되었다.

(1) 액체가연물 화재시험

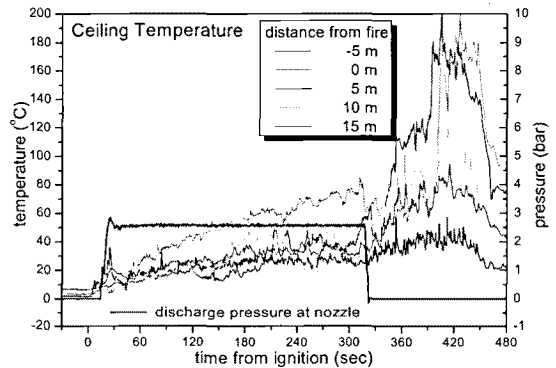
그림 5는 물분무설비가 작동하지 않은 상태에서 0.8 m²과 1.4 m²의 B급 화재시 온도분포를 보여준다. 화원의 하류 5 m 지점의 천장부 온도는 0.8 m² 시험에서

약 60~80°C 정도였고, 1.4 m² 시험에서는 약 80~120°C까지 상승하였다. 이처럼 천장부의 온도가 낮은 것은 강한 외부기류(3°C)에 의한 냉각작용이 발생하였기 때문으로 추정된다.

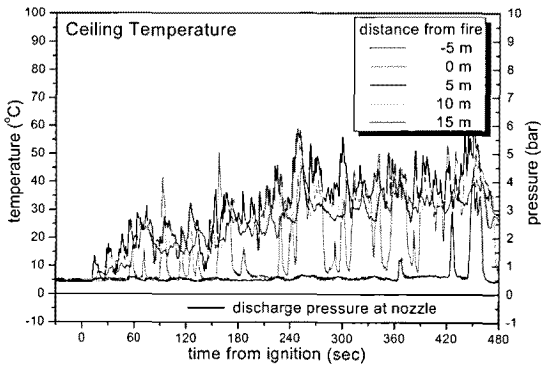
물분무노즐 A가 0.35 MPa(평균방수밀도 5.7 lpm/m²·min)의 압력에서 작동한 경우인 그림 6을 보면 점화 후 30초부터 330초까지 천장의 온도는 0.8 m² 화재시험에서 20°C 이하를, 1.4 m² 화재시험에서는 평균 30°C를 유지하였다. 다시 물분무설비 노즐의 방수가 중지되면 천장부 온도는 80°C(a), 120°C(b)까지 급상하였다.

Low pressure nozzle type B, Fire source : 1.4m² heptane pool

(a)

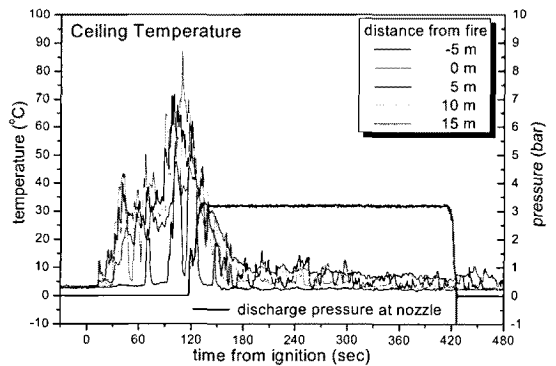
Low pressure nozzle type C, Fire source : 1.4m² heptane pool

(b)

그림 7. B급 1.4 m² 화원 상부의 온도분포(a: 물분무노즐 B, b: 물분무노즐 C)

No MIST, Fire source : 2000cc passenger car

(a)



Low pressure nozzle type A, Fire source : 2000cc passenger car

(b)

그림 8. 고체가연물(2,000 cc 차량) 화원 상부의 온도분포(a: 물분무노즐 비작동, b: 물분무노즐 B 작동)

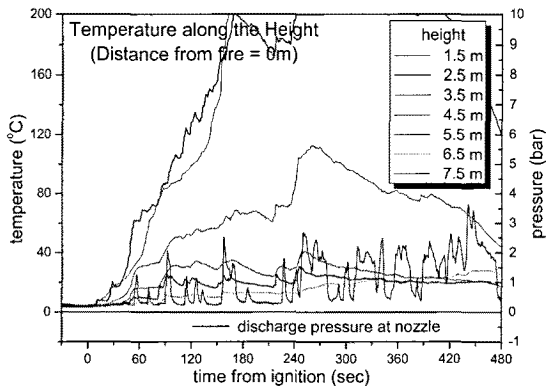
그림 7을 보면 물분무노즐 B가 작동하는 경우 0.24 MPa(평균방수밀도 5.8 lpm/m²·min)의 방수압력에서 40~80°C를 유지하다가 방수를 중단시키면 200°C까지 급상승하였다. 노즐 C가 작동하는 경우에도 0.29 MPa(6.0 lpm/m²·min)에서 천장의 온도가 80°C 이하로 떨어졌다가 작동을 중지시키면 다시 200°C까지 급상승하였다.

(2) 고체가연물(2,000cc차량) 화재시험

그림 8(a)는 중형승용차의 화재시험에서 물분무설비가 작동하지 않은 상태에서 측정된 온도분포를 보여준다. 차량에 점화를 한 후 자유연소를 유지시키면 발화한 지 후 30초 후 부터 화염이 확산되면서 천장의 온도가

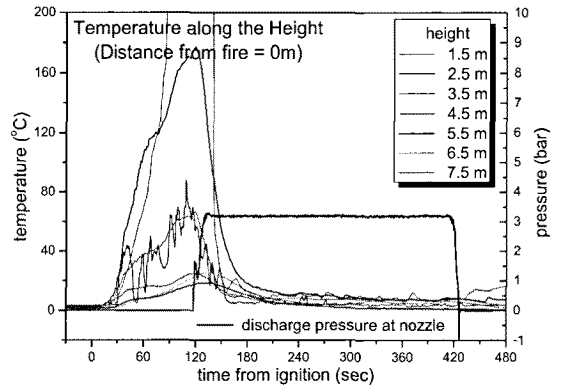
화원상부와 5m 하류에서는 60°C까지 상승하였다. 반면 그림 8(b)를 보면 물분무설비가 작동되면서 최고 90°C까지 상승하였던 천장의 온도가 20°C 이하로 급격히 떨어짐을 알 수 있다.

화원 상부의 온도분포를 보여주는 그림 9(a)는 물분무설비가 작동되기 이전의 온도분포로 발화 2분 후에 200°C 이상으로 상승하였다. 물분무설비가 작동한 후, 온도분포를 보여주는 그림 9(b)를 보면, 200°C 이상을 나타냈던 천장 온도가 20°C 이하까지 급격히 떨어졌다. 특히 차량의 상부인 1.5 m 이상에서는 높이에 상관없이 온도가 거의 동일하게 낮아짐을 확인하였다.



No MIST, Fire source : 2000cc passenger car

(a)



Low pressure nozzle type A, Fire source : 2000cc passenger car

(b)

그림 9. 고체가연물(2,000 cc 차량) 화원 0 m 지점 온도분포(a: 물분무노즐 비작동, b: 물분무노즐 B 작동)

4. 결 론

2차선 도로터널 모형세트에서 실시한 A급 2단위 화재 시험과 B급 2단위 화재시험에서 물분무설비의 성능 시험 결과는 다음과 같다.

1. A급 2단위 화원 중심에서 1,000°C 이상이었던 온도가 화원 상부 2 m 이상에서는 물분무설비가 작동한 직후에 급격히 낮아졌고, 작동 한 지 1분 후에는 10 0°C 이하를 유지하였다.
2. A급 2단위 화재시험에서 화원 상부의 온도는 0.35 MPa의 압력으로 물분무설비가 작동한 경우 보다 높은 압력인 0.5 MPa에서 급격히 낮아졌다. 이것은 방수압력이 높을수록 방수량이 증가하면서 화원 주위의 냉각효과를 높인 것으로 보인다. 따라서 물분무설비의 방수밀도가 최소방수밀도를 만족하지 못하는 경우에는 화원 주위의 온도감소 성능에 영향을 줄 것으로 판단된다.
3. B급 2단위 화재시험의 경우 화원 직상부에서 800°C 이상이었던 온도가 물분무설비가 작동하면 화원상부 2 m 이상부터는 100°C 이하로 급격히 낮아졌다. 특히 3 m 이상부터는 물분무설비가 작동하기 이전에는 200°C를 나타냈던 온도가 물분무설비가 작동하면서 대기온도 수준으로 떨어졌다.
4. B급 2단위 화재에 대한 물분무설비의 압력에 의한

영향을 보면 0.5 MPa로 방수한 경우가 0.35 MPa로 방수한 경우보다 시간에 따라 온도의 감소 및 평균온도 모두에서 좋은 성능을 나타냄을 알 수 있다. 2차선 도로터널 실험세트에서 실시한 3개 제조사의 물분무설비 노즐을 사용한 화재시험의 결과는 다음과 같다.

5. 3개사 물분무설비 노즐 모두 B급 0.8 m²과 1.4 m² 액체가연물 화재에서 작동을 시작한 후 1분 이내에 열기류의 온도를 급격히 떨어뜨렸다. 특히 화원 상부 3 m 이상의 온도를 대기온도까지 감소시켰다.
6. 2000 cc 중형승용차에 대한 시험에서도 열기류의 온도는 물분무설비가 작동한 후 급격히 떨어졌다. 특히 천장의 온도는 대기온도 부근까지 낮아졌다.

이상의 시험을 통해 도로터널에서 화재가 발생하는 경우 물분무설비는 열기류의 온도를 낮추어주는 냉각효과가 매우 뛰어난 소화설비라는 것을 확인할 수 있었다.

참고문헌

1. 유용호, 김흥열, 신현준 (2007), 대형칼로리미터를 이용한 차량 화재 특성에 관한 연구, 터널기술, Vol. 9, No. 4, pp. 343-349.
2. 이동호, 김하영, 유지오 (2010), 터널 내부 기류 변화에 따른 피난연락경 간격 설정에 관한 연구, 터널기술, Vol. 12, No. 1, pp. 43-49.

3. 유지오, 신현준, 이동호, 이용화 (2002), 조합환기방식 터널의 환기기 운전단계에 관한 연구, 터널기술, Vol. 4, No. 4, pp. 343-353.
 4. 김효규, 박경환, 운명오, 이창우 (2005), 터널의 내화성능 평가용 화재온도곡선과 화재모델별 내화시간에 대한 고찰, 터널기술, Vol. 7, No. 2, pp. 165-176.
 5. 건설교통부 (2004), 도로터널 방재시설 설치 지침.
 6. 국토해양부 (2009), 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침.
 7. NFPA (2003), Fire Protection Engineering Handbook, 8th ed., pp. 10-265.
 8. Bouwdienst Rijkswaterstaat (RWS) (2001), Sprinklers in Japanese Road Tunnels.
 9. 2003, ウォーターミストの消火機構と有効な適用方法に関する研究報告書.
-

접수일(2010.7.2), 수정일(2010.7.14), 게재확정일(2010.7.29)