

[Research Paper]

복층터널 자동 모니터 소화설비를 이용한 화재진압 실험

박진욱 · 유용호[†] · 김휘성 · 박병직 · 김양균

한국건설기술연구원 화재안전연구소

Fire Suppression Test using the Automatic Monitor System for Double-Deck Tunnel

Jin-Ouk Park · Yong-Ho Yoo[†] · Hwi-Seung Kim · Byoung-Jik Park · Yang-Kyun Kim

Fire Research Center, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

(Received November 21, 2017; Revised December 13, 2017; Accepted December 13, 2017)

요 약

대도심지의 교통 체증 문제로 발생하는 경제적 손실의 해결방안으로 도심도 지하도로 개발이 국내외적으로 대두되고 있으며, 이 중 일부는 시공성 및 경제성이 뛰어난 복층터널로 계획되고 있다. 그러나 복층터널은 하나의 굴착단면에 중간 슬래브를 설치하여 상하행선으로 사용하는 특수한 구조로 인해 일반 터널보다 층고가 낮게 설치되어 터널내에서 발생하는 화재사고 및 환기 문제에 대해 비교적 취약하다. 따라서, 복층터널의 방재적 약점을 극복하기 위해서는 복층터널에 최적화된 방재 설비구축 연구가 국내에서도 체계적으로 수행되어야 한다.

본 연구에서는 복층터널 화재 안전성 향상을 위해 화재발생시 초기 화재 진압 및 확산 방지가 가능한 자동모니터 소화설비를 개발하였으며, 차량화재 진압 실험을 통해 성능시험을 수행하였다. 그 결과로부터 30 m 거리의 차량내부 화재 및 10 m 거리의 엔진룸 화재에 대해 화재 확산 방지 및 진압 효과를 확인하였다.

ABSTRACT

As one of the solutions to deal with economic loss caused by traffic congestion in metropolitan area, a deep underground road has been planned and implemented at home and abroad. The part of them has been pushed ahead with a double-deck scheme which has an advantage in constructability and cost efficiency comparing to traditional road tunnel. However, the double-deck tunnel has a lower floor height than the general road tunnel due to the special structure used as the upper and lower lines by installing the middle slab on one excavation section. Therefore, it is relatively weak against fire accidents and ventilation problems occurring in tunnels. Thus study to develop the life safety system optimized to a double-deck tunnel has been systematically carried out in order to overcome their weak point. In this study, automatic monitoring fire extinguisher (AMFE) is developed to suppress a fire and prevent its spread at early stage of tunnel fire, conducting the performance test through vehicle fire tests as verification. The tests were conducted with AMFE being 30 m apart from the vehicle and 10 m apart from engine room. As a results, it was confirmed that AMFE enables to suppress a fire and prevent its spread in both cases.

Keywords : Double Deck Tunnel, Fire Suppression, Real Scale Fire Test, Automatic Monitor System

1. 서 론

수도권 및 광역도시의 대도심지는 주거와 상업이 집중적으로 밀집되어 심각한 교통혼잡이 발생되고 있으며, 교통 혼잡으로 인해 매년 약 12.5조원 이상의 경제적 손실이 발생되고 있다. 특히, 서울특별시에는 교통 혼잡에 따른 경제적 손실이 매년 5.88%씩 증가되고 있어 이에 대한 근본적

인 해결방안이 시급한 실정으로 교통 문제해결을 위해 일반적으로 지상교통망을 추가적으로 구축하여야 하나 공간 부족, 막대한 용지 보상비, 토지 소유자와의 이해관계 등의 문제로 사업추진에 많은 어려움이 있다.^(1,2) 따라서 이러한 사회적, 경제적 문제를 해결하면서 새로운 교통공간을 창출할 수 있는 강력한 해결책으로 국내외에서는 도심도 지하공간을 이용한 교통망 개발이 활발하게 추진 중에 있다.

[†] Corresponding Author, E-Mail: phyoo@kict.re.kr, TEL: +82-31-369-0516, FAX: +82-31-369-0540

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

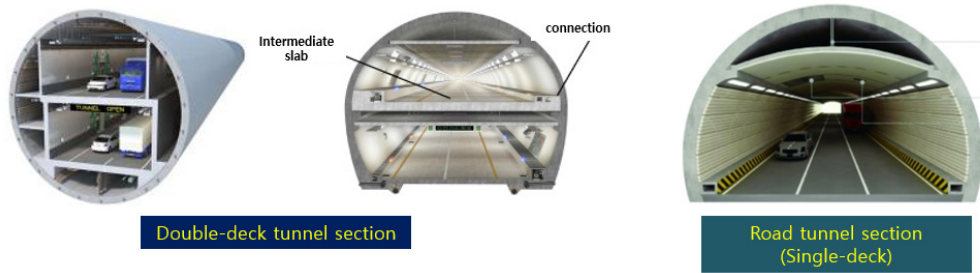


Figure 1. Comparison for characteristics of tunnel area (Double-deck tunnel vs Road-tunnel).

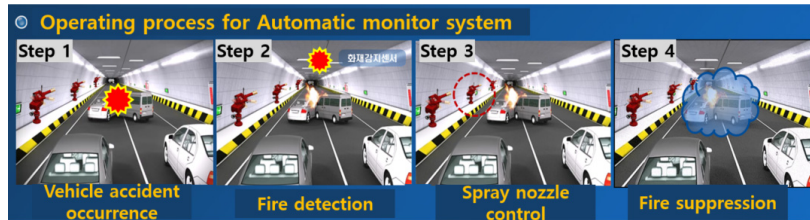


Figure 2. Operating process for automatic monitor system.

대표적으로 국내에서는 영동대로 지하공간 통합개발, 수도권 GTX, 해저터널 개발, 부산 만덕-센텀 지하도로 건설 등이 있고, 국외의 경우 영국(Inner Orbital Tunnel, 35 km), 스웨덴 (Stockholm Bypass Project, 18 km), 인도(New Delhi10 Road Project, 4개의 복층터널 포함) 등지에서 대심도 지하공간 창출을 위한 대규모 사업이 추진 및 계획 중에 있으며, 이 중 일부는 복층터널(Double-deck tunnel)로 계획되고 있다.

복층터널은 하나의 굴착 단면에 중간슬래브가 설치되어 상하행선의 왕복 차로로 이용되는 형태의 터널구조로 Figure 1에 일반도로터널의 단면과 비교하여 나타내었다. 한 개의 굴착단면을 두 개의 단면으로 나눈 형태이기 때문에 일반도로터널에 비해 층고가 현저히 낮으며, 중간슬래브가 존재하는 특징을 가진다. 이러한 복층터널은 아직 국내에는 전무하나, 시공성 및 안정성 그리고 경제적 이점을 기반으로 프랑스(A86 West Beltway), 스페인(마드리드 M30), 말레이시아(SMART 터널), 터키(이스탄불 Eurasia Tunnel) 등지의 각국에 건설되어 친환경공간 조성 및 교통 혼잡완화 그리고 홍수피해 방지 등의 기능을 충분히 수행하고 있다.⁽³⁾

그러나 전술한 복층터널의 구조적 특성으로 인해 반밀폐 구조인 터널이 가지는 방재적 약점은 더욱 극대화 될 것이다. 낮은 층고로 인해 화재 발생에 따른 기류 확산이 제한되어 화재연기에 의한 가시거리 감소가 크게 발생 되고, 유독성 가스의 확산 및 공기 온도의 급격한 상승 그리고 산소농도 감소 등이 초래되어 통행자 위험도는 급격히 높아질 뿐만 아니라 구조물이나 각종설비 및 차량의 손상을 유발할 것이다.⁽⁴⁾ 따라서, 복층터널에서는 환기 및 방재 그리고 일반 구조물 설치시 일반 도로터널과는 상이하게 설계가 되어야 할 것이다. 특히, 환기기는 국부적으로 연기를 집중 배연할 수 있고, 차량 통행에 영향을 미치지 않는

대배기구가 설치되어야 할 것이며, 중간 슬래브는 하행선에서 화재가 발생 한다면 상행선 통행에 큰 영향이 없도록 수 시간동안 화재에 견딜 수 있는 내화설계가 적용해야 한다. 또한, 대심도 장대터널이기 때문에 소방대의 투입시간이 길어질 것으로 예상되므로, 관제실에서 자동으로 제어가 가능한 초기화재 진압 설비가 반드시 갖추어져야 할 것이다.

이에 따라, 저자는 복층터널 내 차량화재 특성분석 및 대배기구를 이용한 국부배연 그리고 화재 초기진압 혹은 화재확산 제어를 위한 자동 모니터 소화설비 개발 등의 연구를 진행하고 있으며, 본 문에서는 연구를 통해 개발된 자동 모니터 소화설비 초기 모델에 대한 터널 화재 진압 성능평가를 수행하였다.

2. 자동모니터 소화 시스템(Automatic Monitor System for Double-Deck Tunnel)

본 연구에서는 복층터널에서의 화재시 초기진압 및 화재확산 제어 그리고 상황에 따라 최종 화재진압까지 가능한 자동모니터 소화시스템 개발을 위해 초기 시작품을 제작하였으며, 성능시험을 위해 터널내부 차량화재를 대상으로 화재 진압 실험을 수행하였다.

2.1 자동모니터 소화설비 개발

자동모니터 소화설비란 Figure 2에 나타난 바와 같이 터널내부에서 차량화재가 발생했을시 화재가 최전성기로 이어지기 전에 화재위치를 운영자 또는 센서로 파악하여 자동/수동으로 화원에 직접적으로 분사하여 화재를 진압하는 시스템이다.⁽⁵⁾ 이 시스템은 화재의 연소를 일정한 크기로 제한하고, 연기와 열을 제어하여 통행자의 피난을 돕고, 터

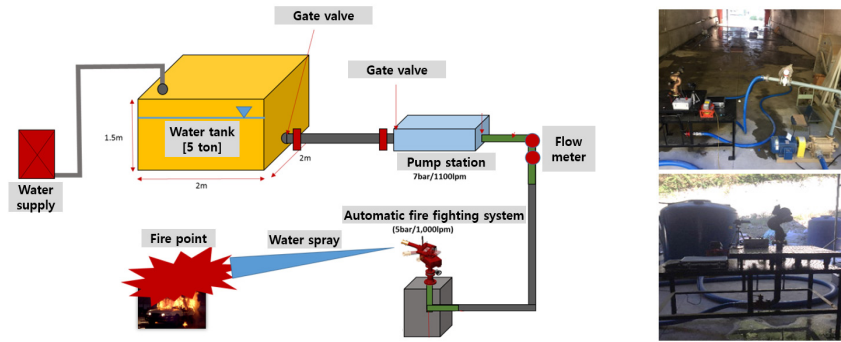


Figure 3. Schematic diagram of automatic monitor system.

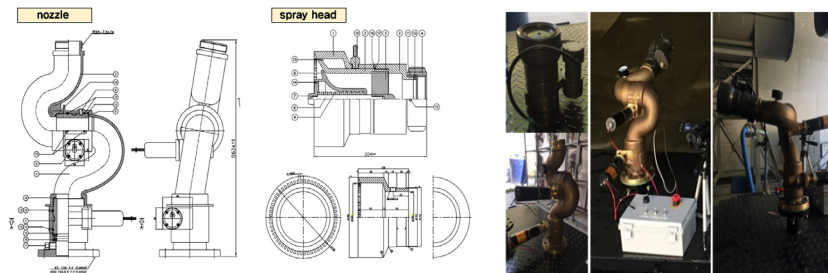


Figure 4. Design for automatic monitor.

Table 1. Spray Characteristics According to Ejection Angle (Head Height 1.6 m, Ejection Pressure 3.0 bar)

Ejection Angle (°)	Max. Height of Water Flow (m)	Max. Distance (m)
15	2.8	25
20	3.8	26
25	4.8	28
30	6.0	29
35	7.0	27

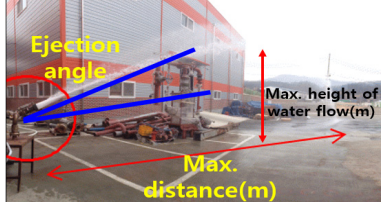


Table 2. Spray Characteristics According to Ejection Pressure (Head Height 1.6 m, Ejection Angle 15°)

Ejection Pressure (bar)	Flow Rate (L/min)	Max. Distance (m)
3.0	830	28~30
4.0	940	33~36
5.0	1,070	38~45

널 구조물과 내부 시설물을 보호하는 기능을 하며, 기존 물 분무 설비와는 다르게 소방대의 진입전에 직접 화재 진압이 가능한 소화설비이다. 또한, 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침에서 규정하고 있는 물분무설비와 국내OO터널 연장 5,000 m에 가상 설계 적용하여 수행한 경제성 검토 결과 약 28%의 공사비 절감 효과가 발생하는 이점을 가지고 있다.^(5,6)

본 연구에서 개발한 자동모니터 소화설비의 전체 개략도 및 사진을 Figure 3에 도시하였다. 시스템의 구성은 자동모니터, 펌프 스테이션, 물탱크(5 ton) 등 3가지로 구분된다.

우선, 자동모니터는 구동부와 제어부로 구성된다. 구동부는 Figure 4와 같이 분사헤드와 노즐로 구성되며, 분사헤

드의 직·방사, 노즐의 상하좌우 조절을 위해 총 3개의 제어모터가 설치되었다. 또한, 이렇게 설치된 구동부의 모터를 제어하기 위해 제어부에는 총 3개의 버튼이 설치되어 상하좌우, 직·방사를 조정한다.

자동모니터의 분사 성능은 분사각 및 말단압력에 따라 Table 1과 2에 나타내었으며, 복층터널의 낮은 층고(3.6 m)를 고려할 때, 분사각 15도, 유량 1,000 L/min, 말단압력 5 bar의 조건에서 45 m의 최대분사거리를 도출하였다.

2.2 자동모니터 소화시스템을 이용한 화재 진압 실험

자동모니터 소화시스템의 성능시험을 위해 두 가지 경

우의 차량실물화재실험을 수행하였으며, 자세한 조건은 아래와 같다.

Case 1은 Figure 5의 1번에 나타난 바와 같이 2,000 cc 중형차량과 소화설비(분사헤드)와의 거리를 30 m이격되도록 위치시켰으며, 화재시나리오는 차량내부 화재를 모사하기

위해 50 mL의 헵탄(Heptane)을 적신 솜뭉치를 이용하여 운전석 시트에 화재를 발생시킨 후 약 2분이 경과된 후부터 화재진압을 위한 수분사를 시작하였다.

Case 2는 Figure 5의 2번에 나타난 바와 같이 2,000 cc 중형차량과 소화설비를 10 m 거리로 이격시켰으며, 화재시나

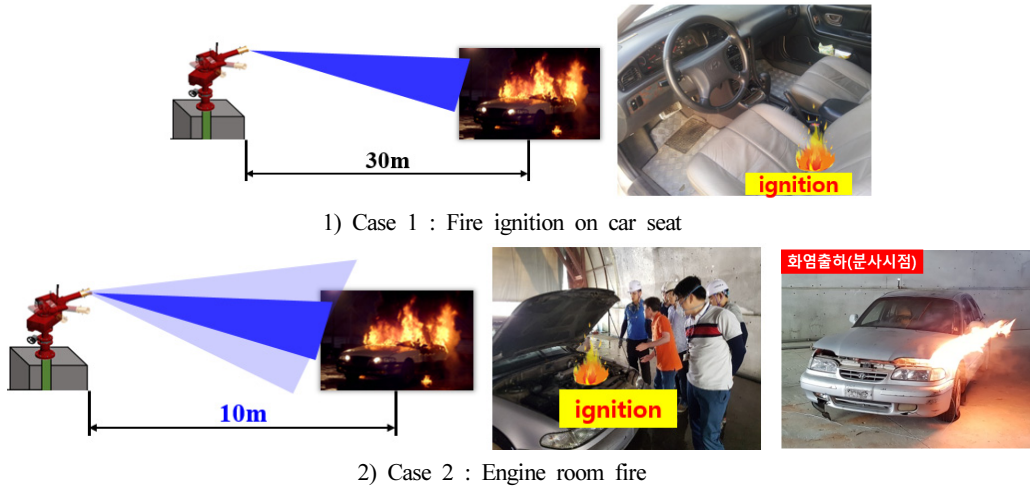


Figure 5. Scenario for fire test using automatic monitor system

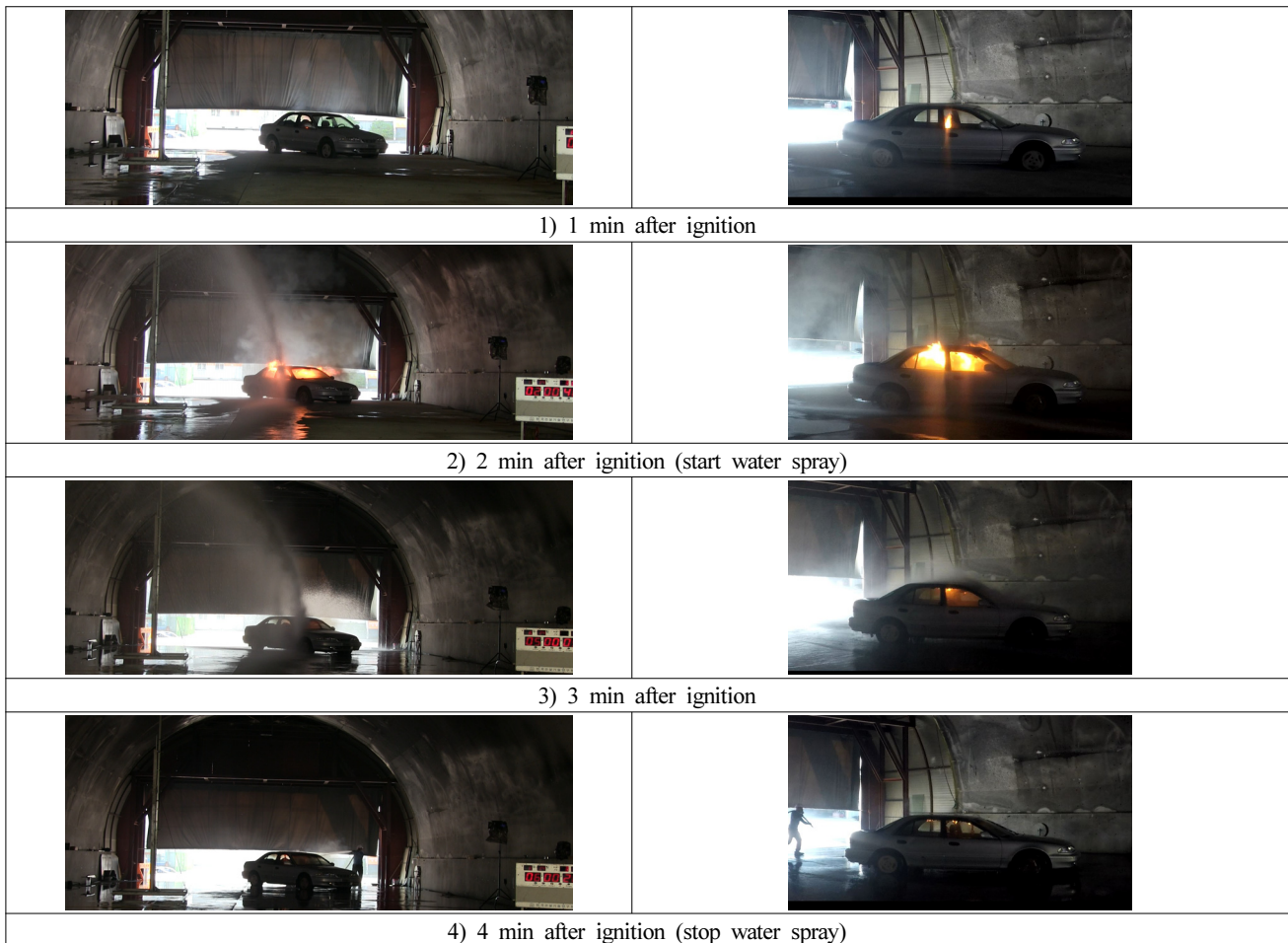


Figure 6. Result for case 1 (fire in car, Distance to fire source 30 m).

리오는 차량엔진룸 화재를 모사하기 위해 50 mL의 헵탄(Heptane)을 적신 솜뭉치를 이용하여 엔진룸내 배터리의 연결부에 화재를 발생시키고, 약 4분이 경과된 후부터 화재진압을 위한 분사를 시작하였다. 엔진룸화재의 경우 차량 시트 화재에 비해 화재확산이 비교적 느리기 때문에 본닛 틈으로 화염이 출하되는 시점인 4분을 분사시점으로 정하였다.

두 가지 경우 모두 안전을 위해 차량의 창문을 모두 열어둔 상태로 실험을 진행하였으며, 폭발의 위험이 있는 차량용 배터리, 연료, 타이어의 공기 등을 모두 제거하고 실험을 진행하였다.

3. 화재진압 실험결과

3.1 CASE 1 : 30 m 거리의 차량내부화재

이 실험은 한국건설기술연구원이 보유하고 있는 40 m

터널동(10 m가량은 시스템 설치부로 사용됨)에서 실험이 가능한 최대 이격거리에서의 화재 진압성능을 시험하기 위해 수행하였으며, 실험 과정을 Figure 6에 나타냈다. 차량 내부화재 특성상 점화 후 약 100~150초 정도에 최대 발열량이 발생될 것으로 예상되어⁽⁴⁾ 점화 후 120초가 되는 시점부터 직사의 형태로 소화수 분사를 시작하였다.

차량 내부의 좌석시트에서부터 천장부까지 화염이 급격히 전파되어 불길이 상당히 확대된 상태에서 조수석 쪽 창문 및 천장부를 1000 L/min의 유량으로 4분동안 주수 하였다. 그 결과 차량 내 하부, 즉 시트화재는 주수 후 2분만에 대부분 진압 되어 엔진룸으로의 화염 전파를 방지하였으며, 포물선 형태로 분사(Figure 8)되는 자동모니터 소화시스템의 특성상 소화수가 직접적으로 닿을 수 없어 진압이 어려운 차량내 상부(천장부)의 화재 또한 하부로의 확산을 방지하였다. 그러나 화원과의 거리가 30 m로 비교적 먼 경우



Figure 7. Result for case 2 (Engine room fire, Distance to fire source 10 m).



Figure 8. Spray form for automatic monitor system.

로 분사포 제어시 조정비가 커져 정밀 조준이 어렵다. 추후 자동제어에 대한 충분한 정밀도를 가진 제어모터를 사용하여 초기 화점에 대해 집중 분사가 가능할 것으로 판단된다.

3.2 CASE 2 : 10 m 거리의 엔진룸 화재

이 실험은 10 m 이격거리에 위치한 엔진룸 화재를 모사하기 위해 엔진룸 내부 배터리 연결부에 점화하여 성능 시험을 수행하였으며, 실험 과정을 Figure 7에 나타냈다. 엔진룸 화재는 내부화재에 비해 화재가 늦게 전파되므로 점화 후 약 260초가 되는 시점부터 직사 형태로 소화수 분사를 시작하였다. 분사는 1000 L/min의 유량으로 1분동안 하였으나, 유관으로 보이는 실제 화염은 분사 후 약 10초가 경과될 시점에 진압되었다.

엔진룸의 특성상 유관으로 확인할 수 없는 부분이 있어 1분동안 추가 분사(직사→방사)를 하였으며, 주수 후 완벽하게 화재가 진압되었다. 엔진룸 점화를 위해 인위적으로 만들어 놓은 본닛과 엔진룸 사이의 미세한 틈으로 소화수가 정확히 주수되어 순식간에 화재가 진압되었다. 이와 같은 결과는 화원과의 거리가 가까울수록 정밀 분사가 가능하여 화재진압효과가 극대화될 수 있음을 나타내며, 엔진룸 화재의 경우에도 화염확산 방지 효과와 더불어 추돌사고에 의한 화재일 경우 추돌에 의해 발생된 본닛 틈으로 정밀 주수가 가능하다면 충분히 화재를 진압할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

자동모니터 소화설비는 터널내부에서 화재가 발생 했을 시 자동 화재탐지설비나 CCTV를 통해 감지신호 및 위치정보를 받아 화재 초기에 관제실 또는 현장 관리자가 모니터를 통해 자동 혹은 현장 수동 제어로 화원에 직접적으로 주수하여 화재를 신속히 진압하는 시스템이다. 본 연구에서는 낮은 층고로 인해 화재에 취약점을 가지는 복층터널에 최적화된 자동모니터 소화설비를 개발 하였으며, 터널 내 실

물 차량화재 진압 실험을 통해 성능시험을 수행하였다.

우선, 자동모니터 소화설비는 거리 및 화재 형태에 따라 직/방사 제어가 되고, 노즐부 상하좌우 조정이 가능하도록 제작되었으며, 분사 성능은 복층터널의 낮은 층고를 고려하여 분사각 15°, 유량 1,000 L/min, 분사압 5 bar의 조건에서 최대 거리 45 m까지 분사되도록 개발하였다.

성능시험은 제작된 자동모니터 소화설비를 이용하여 30 m거리의 차량내부화재(Case1), 10 m 거리의 엔진룸 화재(Case2) 등 총 두가지 경우에 대해 수행하였다. 차량내부화재의 경우 좌석(차량내 하부)에서 발생하는 화재를 효과적으로 진압하여 엔진룸으로의 화재 확산을 억제하였으며, 포물선 형태로 분사되는 시스템 특성상 진압이 어려운 천장부 화재를 고립시켜 다른 부분으로의 화재확산 방지하였다.

엔진룸 화재의 경우 본닛과 엔진룸의 벌어진 틈을 통해 화점에 정확히 주수가 되면서 약 10초만에 화재가 진압되는 효과 나타났다. 이러한 결과는 정밀분사의 중요성을 나타내며, 추돌 혹은 충돌로 발생하는 엔진룸 차량화재를 대상으로 할 때, 차량파손에 의해 불가피하게 발생하는 틈새를 통한 화재진압은 상당히 효과적일 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2014년 건설기술연구사업의 ‘대심도 복층터널 설계 및 시공 기술 개발(14SCIP-B088624-01)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

References

1. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, “Undersea Tunnel Technical Planning Report”, Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (2012).
2. M. L. Sawley, B. Greveldinger and A. Drotz, “Numerical Flow Simulation of an Air Curtain for Road Tunnel Fire

- Security”, EPFL (2008).
3. Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, “Development of Design and Construction Technology for Double Deck Tunnel in Great Depth Underground Space”, Report, Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (2014).
 4. J. O. Park, Y. H. Yoo, H. S. Kim and B. J. Park, “Experimental Study on the Fire Behavior in Double Deck Tunnel”, Fire Science and Engineering, Vol. 30, No. 2, pp. 75-80 (2016).
 5. Y. H. Yoo, S. H. Park, S. J. Han and J. O. Park, “The Study on Application of Automatic Monitor System for Initial fire Suppression in Double-deck Tunnel”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 18, No. 5, pp. 419-429 (2016)
 6. “The National Guideline for the Installation of Road Tunnel Fire Safety Facilities”, Ministry of Land Transport and Maritime Affairs (2016).