

복층터널 화재대응을 위한 원격 자동소화 시스템 개발 연구

박진욱¹ · 유용호^{2*} · 김양균³ · 박병직⁴ · 김휘성⁵ · 박상현⁶

¹비회원, 한국건설기술연구원 전임연구원

²정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

³정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

⁴정회원, 한국건설기술연구원 전임연구원

⁵비회원, 한국건설기술연구원 주임주무원

⁶비회원, 동일기술공사 차장

Development of remote control automatic fire extinguishing system for fire suppression in double-deck tunnel

Jinouk Park¹ · Yongho Yoo^{2*} · Yangkyun Kim³ · Byoungjik Park⁴ · Whiseong Kim⁵ · Sangheon Park⁶

¹Research Specialist, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

²Research Fellow, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

³Senior Researcher, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁴Research Specialist, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁵Technician, Fire Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

⁶Deputy Director, Dong Il Engineering Consultants

*Corresponding Author : Yongho Yoo, yhyoo@kict.re.kr

OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and
Underground Space Association
21(1)167-175(2019)
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2019.21.1.167>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received December 3, 2018

Revised December 20, 2018

Accepted December 27, 2018



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution

Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Copyright © 2019, Korean Tunnelling and Underground Space Association

Abstract

To effectively deal with the fire in tunnel which is mostly the vehicle fire, it's more important to suppress the fire at early stage. In urban tunnel, however, accessibility to the scene of fire by the fire fighter is very limited due to severe traffic congestion which causes the difficulty with firefighting activity in timely manner and such a problem would be further worsened in underground road (double-deck tunnel) which has been increasingly extended and deepened. In preparation for the disaster in Korea, the range of life safety facilities for installation is defined based on category of the extension and fire protection referring to risk hazard index which is determined depending on tunnel length and conditions, and particularly to directly deal with the tunnel fire, fire extinguisher, indoor hydrant and sprinkler are designated as the mandatory facilities depending on category. But such fire extinguishing installations are found inappropriate functionally and technically and thus the measure to improve the system needs to be

taken. Particularly in a double-deck tunnel which accommodates the traffic in both directions within a single tunnel of which section is divided by intermediate slab, the facility or the system which functions more rapidly and effectively is more than important. This study, thus, is intended to supplement the problems with existing tunnel life safety system (fire extinguishing) and develop the remote-controlled automatic fire extinguishing system which is optimized for a double-deck tunnel. Consequently, the system considering low floor height and extended length as well as indoor hydrant for a wide range of use have been developed together with the performance verification and the process for commercialization before applying to the tunnel is underway now.

Keywords: Double deck tunnel, Remote control, Fire extinguishing system, Real scale fire test, Fire suppression

초 록

차량화재가 대부분인 터널 화재 사고에 효과적으로 대응하기 위해서는 초기에 화재를 진압하는 것이 가장 효율적이다. 그러나 도심지 터널의 경우 화재 사고시 차량 정체로 인해 소방대 투입이 어려워 신속한 소화 활동에 제약을 받으며, 이러한 문제는 최근 장대화 및 대심도화 되고 있는 지하도로(복층터널)의 경우 더욱더 심하게 나타날 것으로 판단된다. 국내의 경우 터널에서 발생하는 재난·재해에 대비하여 터널연장과 터널 조건별로 정해지는 위험도 지수를 토대로 연장등급과 방재등급을 산정하여 방재시설 설치 범위를 규정하고 있으며, 특히 터널 화재에 직접적으로 대응하기 위한 설비로 소화기구, 옥내소화전설비, 물분무설비 등을 등급에 따라 기본시설로 지정하고 있다. 그러나 이런 소화설비는 현실적으로 기능적이고 기술적인 측면에서 많은 약점이 발생되어 개선방안이 필요한 실정이다. 특히, 하나의 단면을 중간 슬래브로 나뉘 상하행선으로 사용하는 형태인 복층터널의 경우 일반 소화설비보다 더 신속하고 효과적으로 화재 진압이 가능한 설비가 필요할 것으로 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기존 터널 방재시설(소화설비)이 가지는 문제점을 보완하고, 복층터널의 구조적 특수성에 최적화된 원격 자동소화 시스템을 개발하였다. 그 결과로 낮은 층고를 고려한 장거리용 설비와 보급성을 확대한 옥내소화전용 설비 등 두 가지 형태의 시스템 개발을 완료하여 성능을 검증하였으며, 실제 터널에 보급되어 널리 활용될 수 있도록 현재 실용화를 추진 중에 있다.

주요어: 복층터널, 원격제어, 소화설비, 실규모 화재 실험, 화재진압

1. 서론

최근 도로터널의 경우, 국내의 교통선진화 및 대도시 개발에 따라 지형적인 특성을 고려한 장대터널의 개소수가 증가하고 있으나 이러한 증가 및 교통량 통행 증가에 따른 터널의 사고 빈도도 높아지고 있는 추세이다(Kim et al., 2006). 전국 터널 및 지하도로의 경우 2017년 1년 동안 발생한 사고가 1,200건에 육박하며, 사망자는 39명, 부상자가 2,353명에 달했고 차량화재사고 또한 최근 5년간 연평균 26건씩 발생하고 있는 실정이다. 특히, 국내 터널의 80% 이상을 차지하는 500~1,000 m 터널의 경우, 약 30~40%가 2004년 이전에 건설된 터널로 피난연결 통로 또는 소방설비, 제연설비의 누락으로 현재의 터널 내 방재기준에 미달되고 있어 터널의 화재안전에 대한 문제점이 제기되고 있다(Statistics Korea, 2017).

국내에서는 터널 및 지하도로에서의 화재에 대한 안전성 확보를 위해 국토교통부에서 제정한 「도로터널 방재

시설 설치 및 관리지침」을 따라 설계 및 운영되고 있다. 이 지침에서는 터널연장과 터널의 위험인자를 고려한 위험도지수를 근거로 연장등급과 방재등급을 산정하여 방재시설 설치 범위를 규정하고 있으며, 특히 터널 화재에 직접적으로 대응하기 위한 설비로 소화기구, 옥내소화전설비, 물분무설비 등을 등급에 따라 기본시설로 지정하고 있다(Ministry of Land Infrastructure and Transport, 2016). 그러나 소화기구는 초기화재에 대응하기 위한 설비로 화재가 확대되는 경우 소화능력이 부족 하며, 옥내소화전은 일반 사용자나 관리자가 사용하는 것을 목표로 하고 있으나, 일반 사용자의 경우 옥내소화전 사용방법을 숙지하지 못하는 경우가 대부분이며, 관리자의 경우에는 정체차량으로 인해 접근성이 제한되어 시간이 지연될 우려가 있다. 그리고 물분무설비의 경우 화재가 초기에 감지되었다는 가정하에 터널운영자의 조작으로 화재초기에 작동이 가능하나, 방재등급 1등급 이상의 터널에만 기본설비로 포함되어있어 실제 사용 범위에 한계가 있으며, 화재확산을 저감하는 기능과 터널이 화재로 인해 고온으로 장시간 지속되어 취성파괴 및 구조물 붕괴를 발생시키는 것을 방지하는 기능을 하지만 작동 효율이 낮고 성능에 비해 고가인 문제점이 있다. 이러한 터널 방재시설(소화설비)의 약점은 하나의 단면을 중간 슬래브로 나뉘어 상하행선으로 사용하는 형태인 복층터널의 경우 더 크게 나타날 것이며, 일반 소화설비보다 더 신속하고 효과적으로 화재 진압이 가능한 설비가 필요할 것으로 사료된다.

국외에서는 도로터널 화재특성을 고려하고 신속한 대응이 가능한 자동소화 시스템 개발 연구가 수행되고 있다 (Yoo et al., 2016). 국내외적으로 증가되는 초장대 터널 및 도심지 지하도로, 대심도 복층터널 개발에 대응하여 터널의 안전성을 증대시키기 위한 방안으로 적용되는 물 분무 설비에 대하여 기존기술 대비 효율적이고 경제적인 소화설비 개발이 필요한 실정이며, 국산화된 화재진압 원천기술의 선점이 필요하다. 이에 따라 본 연구에서는 복층터널 내에서 화재 발생시 원격 자동 수 분사를 통해 화재에 대한 신속한 대응이 가능한 초기 화재 진압용 원격 자동소화 시스템 개발을 목표로 연구를 수행하였다.

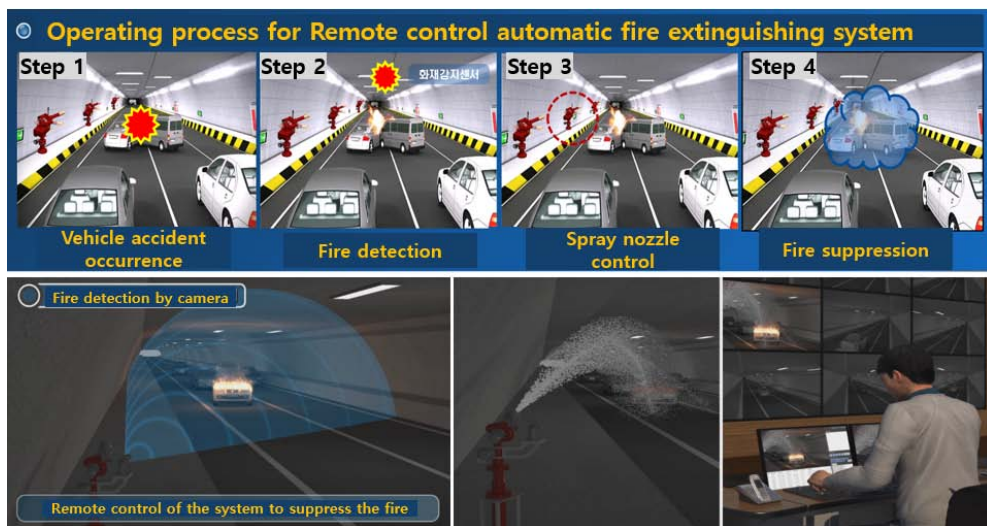


Fig. 1. Operating process for remote control automatic fire extinguishing system

원격 자동소화 시스템은 Fig. 1에 나타낸 바와 같이 터널 화재 감지용 영상유고설비나 기존 터널 자동화재탐지 설비에 의해 감지된 화재발생 신호가 터널 관리사무소 또는 인근 소방서로 전송되고, 이에 따라 화재를 인지한 터널 관리자(혹은 소방관)가 화재가 발생한 터널의 상황을 모니터를 통해 확인한 후 원격으로 분사포를 작동하고 조종하여 화재를 초기에 진압하거나 소방대가 출동할 때까지 화재 확산을 억제하여 피해를 최소화하는 기술로서 화재 대응력 및 경제성을 향상시킨 터널 방재시설(소화설비)라 할 수 있다.

2. 자동 소화 모니터 제작 및 분사 실험

층고가 낮은 구조적 특성을 가지는 복층터널(대심도 지하도로) 적용과 성능 대비 고가인 기존 물분무설비의 약점을 보완하기 위해 분사포 한 개소 당 방수구역을 최대화하기 위해 Fig. 2와 같이 원격 자동소화 시스템에 사용될 자동 소화 분사포를 개발하고 성능검증을 위한 분사 실험을 수행하여 그 결과를 Table 1, 2에 나타내었다. 자동 소화 분사포는 상하좌우 구동을 위해 2개의 모터가 장착된 S자 형태의 노즐로 제작되었으며, 분사거리 조절을 위해 자동 직/방사 조절 헤드를 장착하였다. 분사실험은 상하구동을 이용한 분사각 조정과 연결된 펌프스테이션을 이용하여 말단압을 변경시켜 그 영향을 분석 하였다. 그 결과 일반적인 복층터널의 층고높이를 대략 3.5 m라 가정할 때 터널 천장에 닿지 않는 범위에서의 최대분사거리 45 m의 결과를 확인 하였다. 이 결과로부터 자동 소화 분사포를 복층터널에 적용할 시 한 개소 당 방수거리를 양쪽으로 고려할 때 최대 80 m (5 m는 겹침 허용 거리)까지 적용할 수 있을 것으로 나타났다.

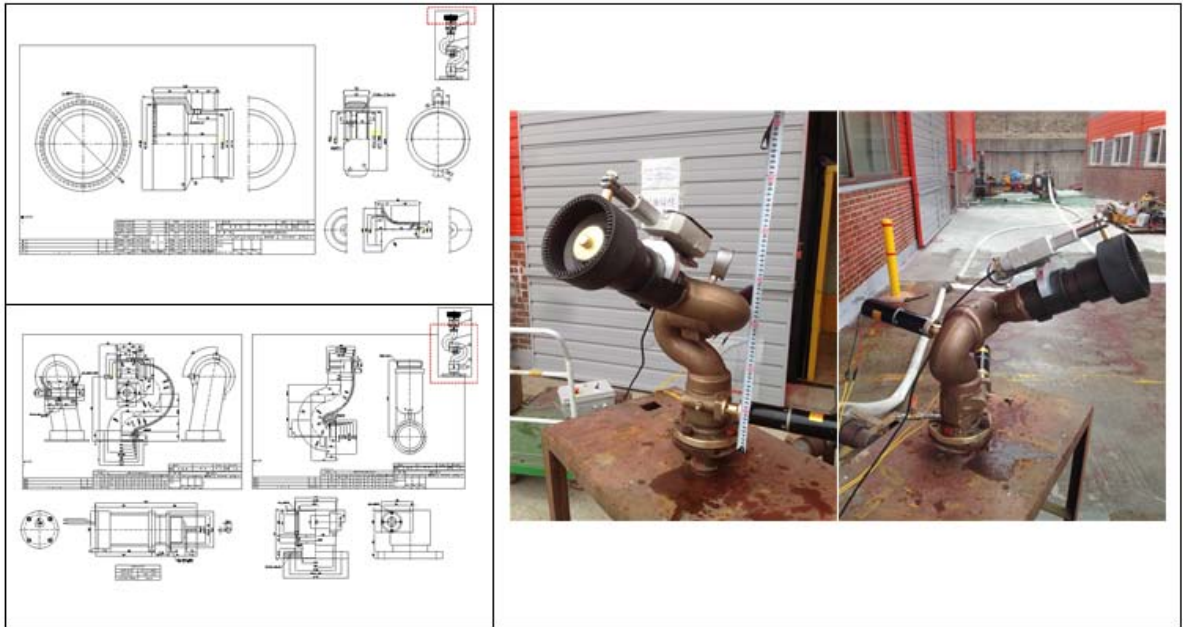


Fig. 2. Design for automatic monitor

Table 1. Spray characteristics according to ejection angle (head height 1.6 m, ejection pressure 300 kPa)

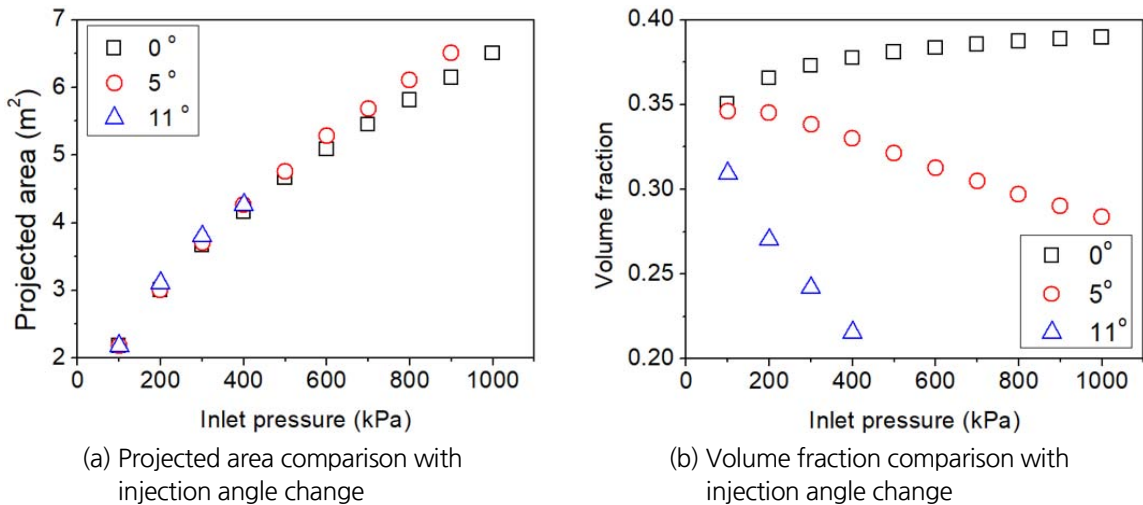
Ejection angle (°)	Max. height of water flow (m)	Max. distance (m)
15	2.8	25
20	3.8	26
25	4.8	28
30	6.0	29
35	7.0	27

Table 2. Spray characteristics according to ejection pressure (head height 1.6 m, ejection angle 15°)

Ejection pressure (kPa)	Flow rate (L/min)	Max. distance (m)
300	830	23~25
400	940	33~36
500	1,070	38~45

3. CFD 해석을 통한 분사 성능 분석

자동 소화 분사포의 복층터널 적용성 검증을 위해 층고가 낮은 복층터널에서의 분사 특성 분석을 위해 CFD 해석을 수행하였다.

**Fig. 3.** Projected area and maximum discharge height of water jet in accordance with nozzle angle

자동소화 분사포의 분사압력과 각도에 따른 체계적인 성능 검토를 위해 2차원 Eulerian 다상유동 모델이 적용된 질량방정식, 운동량 방정식, 체적 수송방정식을 사용하여 해석하였다. 해석결과는 Fig. 3에 나타냈으며, Fig. 3(a)

는 분사각도별로 분사압력에 따라 물이 바닥에 닿는 면적(projection area)을 나타낸 것이며, Fig. 3(b)는 물 체적분율(Volume Fraction)을 나타낸 것이다. 수치해석에 적용된 모든 노즐 출구 압력과 노즐 분사 각도에서 물의 체적분율은 0.5를 넘지 않았으며, 모든 물의 분사각도에서 노즐의 출구압력이 증가하면 물이 바닥에 퍼지는 면적은 증가하는 결과를 확인할 수 있었다. 또한, 물의 분사 각도가 없는 경우는 노즐의 출구압력이 증가함에 따라 바닥에 퍼지는 물의 체적분율이 증가하였지만 물의 분사각도가 올라가면 노즐의 출구압력이 증가함에 따라 바닥에 퍼지는 물의 체적분율이 감소하였다. 특히 높은 분사각도에서 노즐 출구 압력을 높일 경우 물의 체적분율은 급격하게 감소하였다.

4. 장거리용 원격 자동소화 시스템

선행하여 개발한 자동 소화 분사포를 적용하여 복층터널(대심도 지하도로)에 적용가능한 장거리용 원격 자동 소화 시스템을 개발하고 실규모 차량화재 실험을 수행하여 성능 실험을 수행하였다.

Fig. 4와 같이 원격 조종을 위해 자동 소화 분사포와 통신선으로 연결된 제어반을 구축하여 제어용 조이스틱을 이용하여 장비 구동 및 조종이 가능하게 하였으며, 제어반에서 터널의 상황을 인지할 수 있도록 영상 송신을 위해 자동 소화 분사포와 일체형으로 움직이는 카메라를 장착하였다. 또한, 화재의 신속한 초기 감지가 화재진압 성능에 크게 좌우되기 때문에 모니터링 카메라에 영상유고 화재 감지 기능을 추가하여 제어반으로 화재신호를 송신할 수 있도록 하였다. 이 기능은 추후 실용화 되었을 경우 터널 관리실 또는 인근 소방서로 화재 신호를 송신하는 역할을 하게 될 것이다.

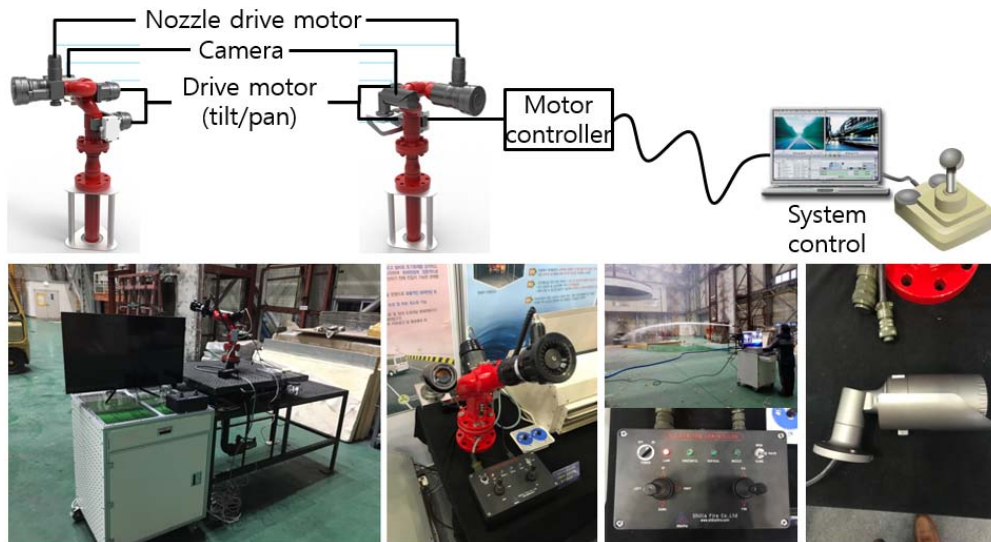


Fig. 4. Remote control automatic fire extinguishing system for long distance

본 시스템의 성능 검증을 위해 실규모 차량화재 진압 실험을 수행하였다. 화원은 2,000 cc승용차를 사용했으며, 운전석 화재와 엔진룸 화재를 모사하고 화원과의 거리를 10~30 m 이격하여 소화성능을 시험하였다. 그 결과 인진룸 화재의 경우 화원으로의 정확한 분사가 이뤄지면서 분사시작 후 30초안에 완전 소화가 되었고, 운전석 화재의 경우에는 분사 특성상 직접적으로 닿을 수 없는 차량 내부의 천장부를 제외한 모든 화재를 3분 안에 진압할 수 있는 우수한 화재 진압 성능을 확인 하였다.

5. 옥내소화전을 이용한 원격 자동소화 시스템

원격 자동소화 시스템은 복층터널에만 국한되지 않고 정체가 심한 도심의 도로터널에서도 필요성이 부각되고 있다. 도시부 2등급터널의 경우에는 정체상황에서의 화재가 발생하는 경우 소방대의 투입이 어렵고 옥내소화전 및 연결송수관 설비에 접근성이 떨어져 신속한 소화 활동이 곤란할 우려가 있으므로 원격으로 작동 및 조종이 가능한 화재 진압 설비가 반드시 필요한 실정이다. 이에 따라 선행한 기존 방재등급 1등급 터널에 기본시설로 포함되어 있는 물분무설비의 배관에 설치되어 작동하는 것을 목적으로 개발된 장거리용 원격 자동 소화 설비를 개량하여 옥내소화전과 결합하여 사용할 수 있도록 하였다. 국토교통부의 「도로터널 방재시설 설치 및 관리지침」에서는 방재등급 1, 2등급 터널에 옥내소화전이 기본시설로 규정되어 50 m이내 간격으로 설치되고 있으므로 이를 이용할 경우 설치 용이성 확보 및 보급 범위 등이 확대될 것으로 판단된다.

Fig 5, 6에 나타낸 바와 같이 다양한 터널에 설치되어 사용될 수 있게 자동 분사포의 크기와 무게를 최소화하여 옥내소화전과의 호환성을 높였다. 우선, 설치를 용이하게 하게 위해 기존 장거리포 자동 소화 분사포에서 상하좌우 구동을 위해 두 개의 모터를 이용하던 방식을 하나의 모터로 구동이 가능하게 변경하였으며, 분사용 관창도 직경 60 mm의 포 형태에서 기존 소화전에서 사용되는 일반 관창을 사용하는 방식을 적용하여 크기 및 무게를 최소화하였다. 그리고 화재 발생시 실제 관리자들의 대응성을 증대하기 위해 시스템 제어 방식을 제어실 원격조종, 스마트폰 특수 앱을 이용한 원격 조종, 현장 제어기를 이용한 현장 제어 등 세 가지로 확대하였다.



Fig. 5. Remote control fire extinguishing system for fire hose station

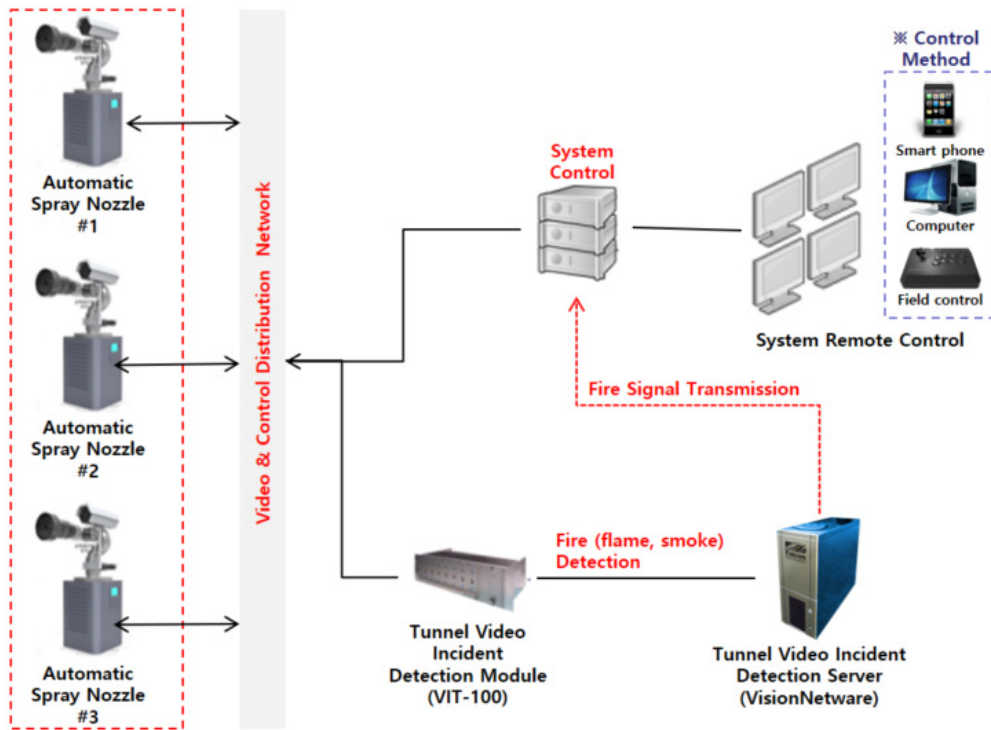


Fig. 6. Schematic of remote control fire extinguishing system for fire hose station

6. 결론

본 연구에서 기존 터널 방재시설(소화설비)의 접근성, 용이성 및 경제성 등의 문제를 개선하고, 터널 화재에 대한 초기 대응성과 원격조종을 통한 피난 안전성 등의 이점을 가지는 원격 자동소화 시스템 개발을 목적으로 연구를 수행하였으며, 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 층고가 낮은 복층터널의 구조적 특성에 최적화하기 위해 자동 소화 분사포를 개발하고 분사각도 및 분사압에 따른 분사 특성을 분석하였다. 그 결과 분사각 15°, 분사압 500 kPa에서 최대 분사거리 45 m의 성능을 확인하였다. 복층터널 적용시 한 개소 당 최대 80 m의 방수거리 범위를 가진다.
2. 원격으로 소화 활동이 가능하도록 자동 소화 분사포와 연동될 제어반(터널관리실, 스마트앱, 현장제어 등), 카메라, 화재 감지용 영상유고장치의 구성으로 전체적인 원격 자동소화 시스템을 구축하였으며, 실규모 차량화재 실험을 통해 그 성능을 검증하였다.
3. 모니터를 통해 화점에 대한 정확한 타격이 가능하여 진압률이 높으며, 타 구조물이나 차량으로의 화재 확산 억제 기능이 우수하다. 그리고 원격 조종에 의해 능동적 소화활동이 가능하므로 추가 인명피해를 최소화한다.
4. 관리자가 모니터를 통해 대피자의 상황을 관찰한 후에 소화활동을 수행하므로 대피자의 안전 확보에 유리하다.

경제적 측면에서는 기존 물분무설비 및 옥내소화전의 급수배관을 이용하므로 경제적으로 우수하며, 초기화재 진압을 통해 터널 구조물 및 내부 시설물에 대한 2차 피해를 방지할 수 있다.

감사의 글

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

References

1. Kim, D.S., Kim, D.H., Kim, W.S., Lee, D.H., Lee, H.S. (2006), “Extimation of safety in railway tunnel by using quantitative risk assessment”, *Journal of Korean Society for Rock Mechanics*, Vol. 16, No. 5, pp. 357-367.
2. Ministry of Land Infrastructure and Transport (2016), “Road tunnel disaster prevention facility installation & management guideline”, pp. 5-17.
3. Statistics Korea (2017), “Time-based traffic accidents by road type-Accident statistics in tunnel and underground roads”, KOSIS.
4. Yoo, Y.H., Park, S.H., Han, S.J., Park, J.O. (2016), “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.