

장대터널용 소방차량의 운용에 관한 연구

권태순^{1*}, 박원희^{1,2}

¹한국철도기술연구원 철도안전연구실
²과학기술연합대학원대학교 철도시스템공학

The study on the operation of fire fighting vehicle for a long railway tunnel

Tae-Soon Kwon^{1*}, Won-Hee Park^{1,2}

¹Railroad Safety Research Division, Korea Railroad Research Institute

²Railway System Engineering, University of Science and Technology

요약 본 연구에서는 장대터널의 철도차량 화재사고 진압을 위한 소방차량 운용 시 고려사항을 분석 및 검토하였다. 최근 들어 터널연장 10 km 이상의 긴 장대터널 시공사례가 늘고 있으며 경부선의 금정터널(연장 20.3 km)을 시작으로 영동선의 솔안터널(연장 16.7 km) 및 2016년 하반기 개통 예정인 수서고속선의 율현터널(연장 50.3 km)까지 점점 터널의 길이가 증가하는 추세이다. 이에 따라 터널 내에서 철도차량 내 대형화재사고 발생으로 긴급정차 시에 승객의 피난시간이 길어지는데 반해 소방인력의 접근은 더욱 어려워져서 큰 인명피해의 발생이 우려된다. 이에 해외 선진국에서는 철도선로 주행이 가능한 특수소방차량을 개발 및 도입하여 운용 중에 있다. 따라서 국내에서도 기존 도로전용 소방차량이 아닌 철도터널 내에서 운행이 가능한 특수소방차량 도입을 통한 대응체계 구축이 요구된다. 상기 목적으로 본 연구에서는 철도터널의 주요 환경과 철도차량 내 화재발생에 따른 터널 내 열환경 변화를 분석하였다. 또한, 분석결과를 개발 중인 장대터널용 소방차량의 주요 사양과 연계하여 국내 장대철도터널에서 소방차량 운용 시 주요 고려사항을 제안하였다.

Abstract In this study, we investigated the operation of railroad fire fighting vehicles against fires on trains in a long railway tunnel. In recent years, long railway tunnels (more than 10 km in length) have been built and the number of such tunnels, such as the Geumjeong tunnel (20.3 km in length) on the Gyeongbu high speed line, Solan tunnel (16.7 km in length) on the Yeongdong line and Yulhyeon tunnel (50.3 km in length) on the Suseo high speed line which is scheduled to be opened in the second half of 2016, is increasing. Significant damage is to be expected, due to the increased evacuation time and limited accessibility of fire services when the train is stopped by an urgent fire in the tunnel. Special fire fighting vehicles capable of running on rails have been developed and operated in overseas advanced countries. Therefore, a fire-response system using Unimog vehicles, which can run on road and rail, instead of road vehicles, is necessary. The characteristics of the railway tunnel and thermal environmental change caused by a train fire in a tunnel were analyzed in this study. Also, the operational requirements of the railroad fire fighting vehicles were evaluated by taking into account the specifications of the railroad fire fighting vehicles under development.

Keywords : fire fighting vehicle, long railway tunnel, fire accident, vehicle operation, rescue

본 연구는 국민안전처 소방안전및119구조구급기술연구개발사업(MPSS-소방안전-2012-64)의 연구비지원으로 수행되었음.

*Corresponding Author : Tae-Soon Kwon (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-31-460-5570 email: klez@krii.re.kr

Received April 5, 2016

Revised May 9, 2016

Accepted May 12, 2016

Published May 31, 2016

1. 서론

터널시공관련 기술발달과 함께 산악지형에 관계없이 철도선로의 직선화가 가능하게 되었고 이로 인해 철도차량 운행시간이 획기적으로 단축되었다. 경부고속철도 구간을 보면 총 98개의 터널이 건설되었는데 이중 3 km이상의 장대 터널이 17개이고, 5 km이상의 터널이 10개이다 [1]. 이와 같이 장대터널의 시공사례가 증가하고 있으나 터널 내 차량화재와 같은 대형사고가 발생할 경우 긴 피난경로 및 소방차량의 접근한계로 초기대응이 더 어려워지는 문제를 갖고 있다. 또한, 터널과 같은 밀폐된 공간에서는 불완전 연소로 인해 개활지에서 보다 많은 유독한 화재연기가 발생하며 이러한 화재연기는 터널의 온도가 급격하게 상승하여 발생한 기류와 같이 전파된다 [2]. 즉, 초기대응에 실패할 경우 대응자체가 어려워지는 것으로 1996년 영국-프랑스를 연결하는 해저터널인 샤넬터널(연장 50.5 km)에서 발생한 화재사례를 보면 화재발생 이후 초기대응수단의 부재로 진압에 실패하여 터널 내에서 10시간 이상 화재가 지속되었고 그 결과 약 250백만 유로에 달하는 막대한 피해로 이어졌다 [3].

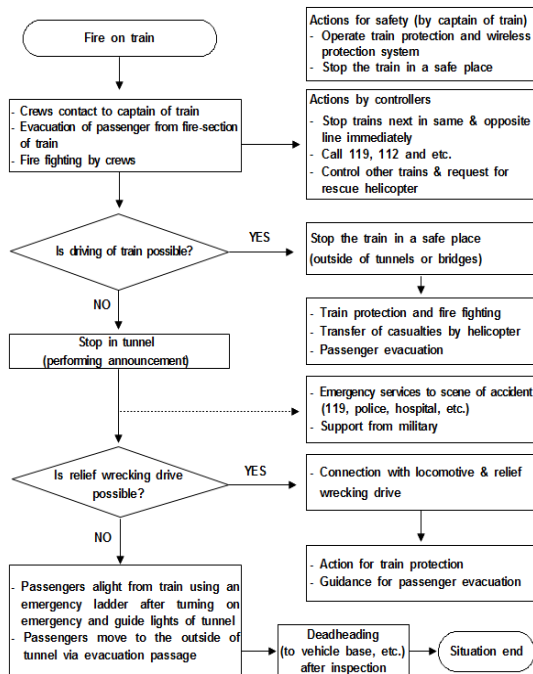


Fig. 1. Responding procedures for fire accident on high speed train (KTX) [4,5]

Table 1. Status of foreign vehicles for railway tunnel fire

Classification		Nations
Conventional & high speed railway	Fire Fighting train	Germany, Switzerland, Austria, Russia
	Fire Fighting vehicle	Italy, France, Norway and European countries, Australia
	Rescue vehicle	European countries
Urban railway	Fire Fighting train	-
	Fire Fighting vehicle	-
	Rescue vehicle	-

국내 장대철도터널은 2009년 개통한 경부선의 금정터널(총연장 20.3 km)에 이어 2016년 하반기 개통예정인 수서고속선의 울현터널(총연장 50.3 km)까지 연장 10 km 이상의 초장대터널이 점점 증가하고 있다. 아직까지 국내 장대철도터널 내에서 열차화재사고는 발생하지 않았으나, 장대철도터널 시공 사례 증가는 화재사고 발생 시에 보다 심각한 상황으로 이어질 가능성이 높아지는 것을 의미함으로 적절한 초기대응이 가능한 화재진압수단의 도입이 요구되고 있다.

현재 국내의 철도차량 화재발생 시 대응절차는 Fig. 1과 같으며 구조관련 유관기관(소방서 등)에 신고와 함께 우선적으로 터널 밖 안전한 장소로 차량을 이동 후 정차하여 열차방호 및 승객피난 등의 조치를 취하는 것을 원칙으로 하고 있다. 철도차량의 터널 밖 이동이 불가능할 때는 승객하차 후 터널 밖으로 대피를 시행하고 화재진압은 출동한 소방대에 의해 수행된다.

터널 내 화재사고 발생 시에 가능한 진압방법은 스프링클러 등의 터널 내 고정식 소화설비를 이용한 방식과 이동이 가능한 소방차량의 직접투입을 방식으로 구분할 수 있다. 이 중 터널 내 소화설비를 통한 진압은 차량화재의 확산억제의 측면에서는 효과적이나 화재의 완전진압을 위해서는 차량 내부에 직접적으로 소화수 공급이 필요하기에 소방차량 및 인력의 투입을 통한 화재진압이 추가적으로 요구된다. 이를 위해 해외에서는 Table 1 및 Fig. 2와 같은 철도전용의 소방차량을 개발하여 운영 중에 있다. 그러나 국내에서는 아직 이와 같은 특수차량의 소방분야 도입 및 운영 사례가 없는 상황이다. 따라서 철도터널 내에서 대형화재사고가 발생할 경우, 기존의 도로주행 소방차량으로는 터널 내 사고현장 접근이 어렵기

때문에 철도선로 위를 움직이며 소화 및 구조활동이 가능한 차량의 개발이 요구된다.

이에 본 연구에서는 도로 및 철도선로 모두 주행하며 화재진압이 가능한 특수소방차량의 개발과 관련하여 차량의 사양을 기반으로 실제 철도터널에서의 운용 시 고려사항을 분석 및 제안하고자 한다.



Fig. 2. Foreign fire fighting train (a) and unimog vehicles (b) for railway tunnel fire

2. 본론

2.1 장대터널용 소방차량 사양

국외에서 운용 중인 철도용 소방차량은 Table 1과 같이 디젤기관차형과 도로-철도 병행주행이 가능한 유니목(unimog) 차량으로 구분된다. 본 연구에서는 차량운용의 효율화를 위해 도로 및 철도구간 모두에서 소화활동이 가능한 유니목 형태의 차량을 개발 대상으로 선정하였다. Fig. 3과 같은 별도의 윤축과 철도선로로 이동을 위한 케도리프팅 시스템을 차량하부에 장착하였으며 상세사양은 Table 2와 같다. 적용된 윤축시스템의 휠폭은 140 mm 휠지름은 300 mm이며 SM45C 재질을 적용하였고 축의 폭은 1,400 mm 지름은 300 mm로 SCM440H 재질을 적용하였다.



Fig. 3. Wheel & axle system for railroad

Table 2. Specification of railroad fire fighting vehicle

Categories	Spec.
Weight	5 ton
Maximum speed	40 km/h
Traction power	1 ton
Number of riding person	5 person
Water for fire-fighting	2,000 L

2.2 철도터널 내 화재특성 분석

철도터널 내에서 철도차량화재는 폐쇄된 지하공간특성으로 인해 열방출량이 낮아 일시에 폭발적 연소가 이루어지며 플래시오버에 도달한다. 즉, 초기대응이 늦어지면 짧은 시간 안에 대형화재로 성장하여 진압이 힘들어진다. 여기에 철도차량 객실에 사용되고 있는 내장재의 대부분이 FRP(Fire-reinforced plastic)과 같은 고분자 물질로 연소로 인해 다량의 연기와 유독성 가스가 발생하며 밀폐된 터널공간의 특성으로 인해 농연 및 연기가 화재초기에 내부공간에 차올라 승객의 피난을 어렵게 한다. 따라서 철도차량 내 화재사고 발생 시에 터널 내 정차가 아니라 신속하게 터널 밖으로 철도차량을 이동시킨 후 화재진압 및 승객피난조치를 취하는 것을 기본대응원칙으로 하고 있다 [4,5]. 그러나 예기치 못한 전력공급 중단 또는 차량이상으로 터널 외부로 이동을 못하게 될 경우에는 신속한 소방대의 현장도착이 화재진압을 위한 최우선 사항 중의 하나이다.

철도터널 내에서의 고속철도차량(KTX-II) 화재에 따른 표준발열량곡선(Fig. 4)을 보면 승무원에 의한 초동조치 미흡상태에서 화재발생 후 약 10분 경과 후 15 MW의 최대열량을 방출하는 최성기에 도달한다 [6]. 즉, 대응이 불가능한 대형화재 상황으로서 수식 (1)에 기반하여 화재발생차량(화원)으로부터 복사열에 따른 거리별 열유속 분포를 보면, Fig. 5에서와 같이 화재사고 현장에서 5-15 m 거리까지 약 10 kW/m² 수준의 열환경을 유지하고 있다 [7]. 이 결과와 Fig. 6의 소방장비의 등급에 따른 한계 열환경을 고려하면 화재진압 시 터널 내 화재발생차량 인근에서의 소방대의 활동시간이 상당히 제한됨을 알 수 있다.

$$\dot{q}'' = \frac{\chi_R \dot{Q}}{4\pi R^2} \quad (1)$$

(\dot{q}'' : 거리(R , m)에서의 열유속, χ_R : 복사열분율(0.6), \dot{Q} : 열방출율)

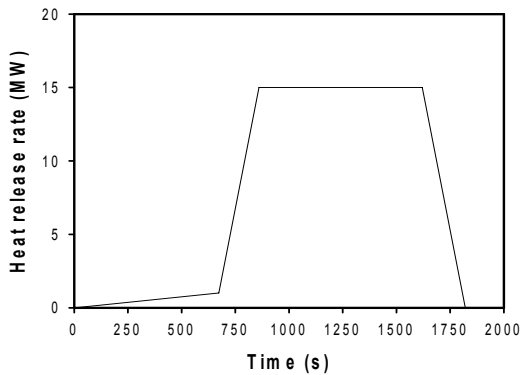


Fig. 4. Standard heat release curve of KTX-II [6]

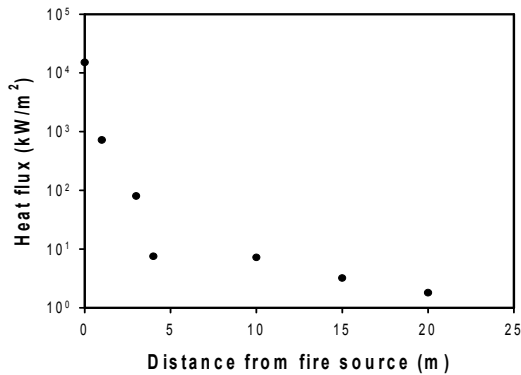


Fig. 5. Heat flux distribution from fire source

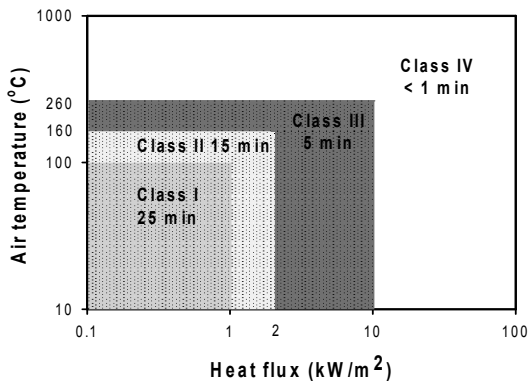


Fig. 6. Graphical representation of the recommendations for thermal classes of fire fighter environments [8]

2.3 장대터널용 소방차량의 운용방안

철도터널 내 화재사고 시 화재성장곡선 분석에 따른 대형화재로의 성장시간은 약 10분 내외이며, 차량 내 승

무원의 초동조치에 의한 지연효과를 감안하여도 진압이 불가능한 임계점(플래쉬 오버) 도달을 막기 위해서는 최대 15분 이내의 현장도달이 요구된다.

국내 대표 장대철도터널인 금정터널을 보면 Table 3 과 같이 20.3 km의 구간에 2개의 경사갱(차량이동가능), 4개의 수직구(계단 및 엘리베이터)와 외부로 피난이 어려울 경우 터널 내에서 구조를 기다릴 수 있는 4개의 구난대피소를 구비하고 있다. 여기에 제연을 위한 방연문과 신선공기 공급관이 대피통로 및 구난대피소에 설치되어 있다. 또한, 대피로 주변에는 초기화재대응을 위한 소화기와 터널 내부에 진입한 소방대의 화재진압활동을 위한 연결송수관이 터널 전구간에 운용 중에 있다.

Table 3. Specification of Geumjeong tunnel [9]

Categories		Spec.
Tunnel length		20.3 km
Type		Double track single tube
Evacuation Routes	Inclined shaft	2
	vertical shaft	4
	Relief shelter	4
Other equipment		Standpipe system (whole section), fire extinguisher, etc.

터널 외부에서 내부로의 차량진입경로는 터널의 양쪽 출입구 또는 터널중간에 연결된 경사갱으로 한정됨으로 금정터널 내에서 소방특수차량의 최대 이동거리는 4 km 내외로 판단된다. 본 연구에서 개발 중인 또는 외국의 상용 장대철도터널용 차량의 선로에서의 최대속도가 40 km/h임으로 실제현장도달에만 약 10분 내외의 시간이 소요된다. 여기에 Table 4의 인근 소방서에서 터널진입로까지의 이동거리를 고려하면 15분 이내 소방대가 터널 내 사고현장에 도달하는데 한계가 있는 것으로 추정된다. 따라서 사고발생 후 신속한 초기대응을 위해서는 철도전용 소방대를 운용하고 있는 선진국(스위스, 오스트리아 등)과 같이 장대철도터널 출입구 또는 중간진입로에 별도의 소방대 또는 시설의 운용이 요구된다. 그러나 일부 국내 장대철도터널의 경우, 중간진입이 가능한 경사갱과 같은 통로가 부재하여 터널 양끝 출입구를 통한 소방대의 진입이 가능하여 터널 내 이동에만 약 30분에서 1시간이 소요되기 때문에 부가적인 안전대책이 요구된다.

Table 4. Accessibility of fire service to Geumjeong tunnel

Classification	Distance from nearby fire station
Starting point of tunnel	About 4-5 km
Slope gang 1	About 2 km
Slope gang 2	About 4-5km
Endpoint of tunnel	About 2 km

터널화재사고의 효과적인 대응을 위해서는 2개 소방차량을 1개조로 편성한 운용이 요구된다. 터널 내에서 화재진압과 구조를 1개 차량이 동시에 진행할 수 없기 때문에 화재진압과 구난목적의 차량을 별개로 운영하는 필요하며 철도전용 소방대를 운용하고 있는 스위스의 경우에도 Fig. 7과 같이 화재진압용 소방차량 1량, 장비차량 1량 및 구조차량 1량을 1편성으로 하여 운용하고 있다.

터널진입은 단선터널이 아닌 경우를 제외하고 복선터널에서는 화재차량선로가 아닌 반대편 선로를 통한 접근을 원칙으로 하여야 한다. 여기에 진입 시에 배연차 및 터널 송풍기 등을 통해 연기흐름을 최대한 제어하여 진입하는 소방대의 안전을 확보하는 것이 요구된다. 또한, 화재발생 후 터널내부의 CCTV, 센서 등이 고온 및 농연조건에서 무력화됨으로 터널 내부상황을 실시간으로 확인할 수 있는 무인감지드론 등을 먼저 투입하여 최소한 약 100 m 내의 전방의 상황을 확인하며 진입하는 것이 필요하다.

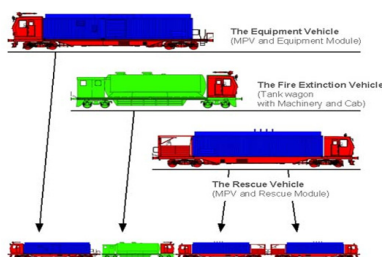


Fig. 7. Diagram of the Swiss fire train [10]

3. 결론

본 연구에서는 국내 장대철도터널 시공사례 증가에 따른 철도터널 내에서 차량화재에 대응하기 위해 장대철도터널용 소방차량의 운용필요성 및 특성을 검토 및 분

석하여 다음과 같은 결과를 제시하였다.

- 철도차량의 화재발생 시, 약 10분 내외의 시간에 플레쉬오버에 도달함으로 진압이 어려운 대형화재로의 성장 전에 현장도착을 통한 화재대응이 요구된다.
- 기존 장대철도터널 사례를 통해 보면 사고발생 이후 소방대의 현장도달(소방서-터널진입로 거리 2-5 km) 및 터널 내 이동(터널 내 최대이동거리 4 km)에 상당한 시간이 소요됨으로 대형화재 성장(10-15분) 전 현장도달에 한계가 있는 것으로 나타났다.
- 이와 관련하여 터널 내 사고 시, 신속한 대응을 위해 선로주행이 가능한 특수소방차량의 운용이 요구되며 소방 및 구조활동을 동시에 수행하기 위해 2개 차량 1개조 편성을 통한 운용이 권장된다.
- 터널길이가 긴 장대철도터널의 경우는 터널 내 이동거리를 감안하여 터널진입로 주변 등 즉시대응이 가능한 위치에 차량 및 설비를 운용하는 것이 터널 내에서 발생한 화재사고로 인한 막대한 인명 및 재산피해를 막기 위해 요구된다.

References

- [1] J. P. Won, M. J. Choi, S. J. Lee, S. W. Lee, Standard Proposed for Fire Safety Evaluation of Railway Tunnels and Evaluation of Fire Temperature, Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection, 14(3), pp. 196-200, 2010.
- [2] W. H. Park, Sensing Characteristics of Fire Detectors in Railway Tunnel by Using Numerical Analysis, Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society, 16(11), pp. 7964-7970, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2015.16.11.7964>
- [3] D. Milmo, J. Orr, S. Jones, L. Davies, Channel tunnel fire worst in service's history, 2008, Available From: <http://www.theguardian.com/uk/2008/sep/12/transport.channeltunnel1> (accessed March 30, 2016).
- [4] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Risk management manual for high-speed rail accident, 2015.
- [5] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Risk response manual for high-speed rail accident, 2015.
- [6] Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Analysis manual for fire safety of railroad tunnel, 2014.
- [7] M. J. Hurley, SFPE Handbook of Fire Protection Engineering, pp. 102-137, Springer, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4939-2565-0>
- [8] M. K. Donnelly, W. D. Davis, J. R. Lawson, M. J. Selepak, Thermal Environment for Electronic Equipment Used by First Responders (NIST TN 1474), National Institute of Standards and Technology, 2006.

- [9] S. J. O, N. Y. Kim, H. Lee, H. S. Lee, Plan for prevention of disaster and ventilation in deep and long railroad tunnel, Tunnelling technology, 10(4), pp. 41-51, 2008.
- [10] B. Gabbert, Fighting fire with a train, 2010, Available From:
<http://wildfiretoday.com/2010/08/24/fighting-fire-with-a-train> (accessed March 30, 2016).

권 태 순(Tae-soon Kwon)

[정회원]



- 2002년 8월 : 카이스트 화학공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : 카이스트 생명화학공학과 (공학박사)
- 2006년 9월 ~ 2007년 11월 : 한국에너지기술연구원 선임연구원
- 2007년 11월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

화재안전, 환경공학

박 원 희(Won-Hee Park)

[정회원]



- 2000년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학석사)
- 2004년 2월 : 중앙대학교 기계공학과 (기계공학박사)
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원
- 2009년 6월 ~ 2009년 12월 : 호주 Victoria Univ. 연구원

<관심분야>

철도 열유체, 화재안전