

# 해저터널 열차 화재 시 구난역 에어커튼 시스템의 성능에 관한 실험 연구

박병직<sup>1</sup> · 신현준<sup>2</sup> · 유용호<sup>3\*</sup> · 박진욱<sup>4</sup> · 김휘성<sup>4</sup> · 김양균<sup>5</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원 연구원

<sup>2</sup>정회원, 한국건설기술연구원 선임연구위원

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 연구위원

<sup>4</sup>비회원, 한국건설기술연구원 연구원

<sup>5</sup>비회원, 한국건설기술연구원 전임연구원

## Experimental study on applicability of Air-Curtain system in train fire at subsea tunnel rescue station

Byoung-Jik Park<sup>1</sup> · Hyun-Jun Shin<sup>2</sup> · Yong-Ho Yoo<sup>3\*</sup> · Jin-Ouk Park<sup>4</sup> · Hwi-Seong Kim<sup>4</sup> · Yang-Kyun Kim<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>2</sup>Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>3</sup>Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>4</sup>Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

<sup>5</sup>Research Specialist, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology

\*Corresponding Author : Yong-Ho Yoo, yhyoo@kict.re.kr

### Abstract

Visibility is very poor in tunnel fire because of confined space where the fire may easily lead to the mass casualty incident because of fast smoke spread. In this test, air curtain and the fan were installed at rescue station in a bid to make use of rescue station in safe way during the train fire in undersea tunnel and a full-scale fire test was conducted to identify the applicability of air curtain system. Air curtain system was installed at a real rescue station and the test was continued for 2 minutes till heptane which was used as fire source was completely burned out. When air curtain was working, difference in temperature between inside and outside the platform was 160°C and carbon monoxide measured inside the platform was less than the case of no air curtain system by 160 ppm. Thus a full-scale fire test demonstrated that the air curtain system installed at rescue station in undersea tunnel was able to effectively block the heat and smoke generated from the fire.

**Keywords:** Tunnel fire, Local smoke control facilities, Air-Curtain system, Subsea tunnel, Smoke spread prevention

### OPEN ACCESS

Journal of Korean Tunnelling and  
Underground Space Association  
20(1)1-9(2018)  
<https://doi.org/10.9711/KTAJ.2018.20.1.001>

eISSN: 2287-4747

pISSN: 2233-8292

Received November 16, 2017

Revised December 12, 2017

Accepted December 20, 2017



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 © 2018, Korean Tunnelling and Underground Space Association

## 초 록

터널 화재는 밀폐된 공간에서 발생하기 때문에 시야 확보가 매우 어려우며, 빠른 속도로 연기가 차오르기 때문에 대형 재난사고로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 해저터널 열차 화재 시 구난역을 안전하게 사용하기 위하여 에어커튼 및 가압송풍기를 구난역 플랫폼에 설치하고 실물화재실험을 통하여 에어커튼 시스템의 적용성을 확인하였다. 실제 규모의 구난역에 에어커튼 시스템을 설치하였으며, 화원으로 사용한 액체 햅탄이 전소될 때까지 약 2분 동안 실험을 진행하였다. 에어커튼 시스템이 작동한 경우에는 구난역 플랫폼의 온도와 외부의 온도는 약 160°C 차이가 발생하였으며, 에어커튼 시스템이 작동한 경우에 구난역 플랫폼 내부의 일산화탄소는 작동하지 않은 경우의 구난역 플랫폼 내부와 비교하여 약 160 ppm 적게 일산화탄소가 측정되었다. 따라서 본 실물화재 실험을 통하여 해저터널 구난역 에어커튼 시스템이 화재로부터 발생한 열기와 유독가스를 차단할 수 있음을 확인하였다.

**주요어:** 터널 화재, 국소제연설비, 에어커튼 시스템, 해저터널, 화재확산방지

## 1. 서론

국내외적으로 초장대·대심도 지하 터널 건설을 통하여 지속가능한 개발과 녹색 성장을 계획하고 있다. 우리나라의 서울특별시와 부산광역시도 지속적으로 늘어나는 자동차 교통량으로 인한 상습 정체를 해소하기 위하여 도로 확장 및 우회 도로를 계획하기 어려운 구간에 대해서 대심도 지하 고속화도로를 계획하고 있다.

터널에서의 화재사고는 빈도수는 많지 않지만, 화재발생 시 대규모 재난사고로 이어질 수 있기 때문에 방재 시설을 계획하여 인명 및 시설물의 피해를 최소화해야 한다. 터널 화재는 밀폐된 공간에서 화재가 갖는 급격한 화염 전파와 유독가스 배출의 어려움이 있다. 한정된 공간에서 유입되는 산소의 양이 적은 경우에 불완전연소로 인하여 검은 연기가 발생하며, 이는 피난자의 시야 확보를 어렵게 하여 피난 속도를 낮추고 특정지역에서는 심각한 병목현상을 만들어 대규모 인명피해가 발생할 수 있다. 따라서 연기를 직접적으로 외부로 배출하거나 확산을 지연시킬 수 있는 제연 설비가 터널 방재에 필요하다.

국도교통부에서는 도로터널 방재시설의 계획·설계·시공 및 관리 시 적용해야 할 최소한의 기술기준을 규정하기 위하여 기존의 ‘도로터널 방재시설설치 및 관리지침’을 개정하였다(Ministry of Land, Infrastructure and Transport, 2016). 지침에서는 터널 연장등급이 3등급(길이 500 m 이상) 이상이고 피난·대피시설이 미흡한 터널은 피난대피환경 보완계획을 수립하고, 제연설비 또는 제연보조설비를 추가로 설치해야 한다고 명시되어 있다. 따라서 화재 시 제·배연설비의 용량이 터널 전체 구간을 담당하는 설비 계획이 어려운 경우에는 국소제연설비를 설치하여 연기확산 방지가 필요하다.

터널 방재에서 에어커튼이란 터널 내부에서 화재가 발생했을 때, 고압 공기를 분사하여 유독가스를 차단시켜 피난자가 안전하게 대피할 수 있는 피난 환경을 만드는 장치이다. 이와 관련한 연구는 국소제연설비, 연기확산방지장치 등으로 용어가 대체되며 대부분 상사법칙을 통한 시뮬레이션 분석을 중심으로 연구가 이루어졌다. 국내

에서는 소방방재청 재난안전기술개발기반구축 사업의 일환으로 에어커튼을 활용한 지하도로 연기제어시스템 연구개발을 진행하였으며, Fig. 1과 같이 에어커튼을 도로터널에 설치하여 실물화재실험을 통하여 차량 화재 시 에어커튼 성능을 검증하였다(Yoo et al., 2014). 또한 에어커튼 상하 양방향 토출 에어커튼 시스템을 전산유체역학 (Computational Fluid Dynamics, CFD)를 이용하여 수치최적화 연구를 진행하였다(Yang et al., 2014). 해저터널 구난역 플랫폼에서 열차 화재 시 화재연기확산 방지를 위하여 Fig. 2와 같이 에어커튼 시스템을 설치하여 화재연기 차단성능 및 최적화 설치방안에 대한 시뮬레이션 연구를 수행하였다(Park et al., 2015).



Fig. 1. The installation of the air curtain road tunnel (Yoo et al., 2014)

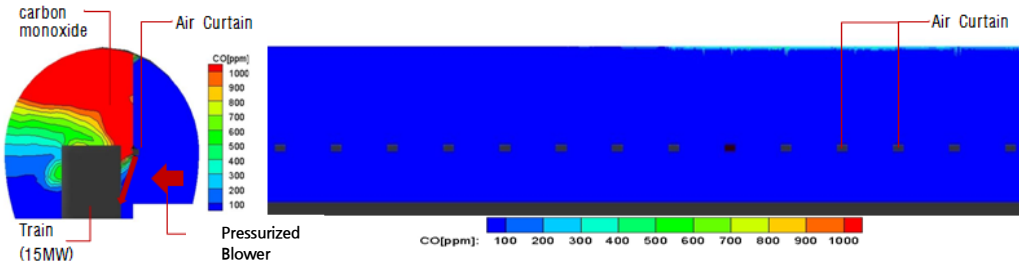


Fig. 2. CO gas inflow in case of subsea tunnel rescue station fire (Park et al., 2015)

## 2. 에어커튼 실물화재 실험

### 2.1 이론 및 원리

본 실험연구의 에어커튼 시스템에 사용한 시로코 팬(sirocco fan)은 Fig. 3의 형태로 다익식 송풍기로 불리며, 여러 개의 날개를 회전시켜 공기를 흡입하여 밀어내는 형태이다. 다른 형식의 팬보다 회전수가 적어 환풍 능력은 떨어지지만, 소음이 적고 사용전력이 적어 지속적으로 사용이 가능하며, 일반 송풍기에 비해 정압이 크다. 임펠러 블레이드와 스크롤 케이싱의 비교적 단순한 구조를 갖고 있으나 내부에는 복잡한 유동 현상이 발생하여 팬 효율 향상 및 저소음화를 위한 설계 방법 연구를 지속적으로 하고 있다(Lee, 2010).

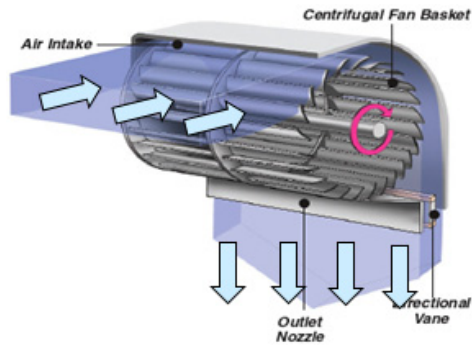


Fig. 3. The shape and actuation principle of the sirocco fan in air curtain

## 2.2 실험 준비

본 실물화재 실험은 해저터널 구난역에 화재가 발생한 열차가 정차하면, 화재연기 차단장치를 작동하여 구난역 플랫폼에 유독가스 유입을 차단하여, 대피자가 구난역 플랫폼을 이용하여 안전하게 피난대피통로로 피난할 수 있도록 화재 시나리오를 계획하였다.

Fig. 4와 같이 실규모 터널실험동(폭 10.5 m, 높이 7.0 m, 연장 45.0 m)에 실험체를 설치하였으며, 구난역 플랫폼은 입구(3.0 m × 2.7 m)가 2개 있는 직육면체(3.0 m × 3.0 m × 15.0 m)의 형태에 피난연결통로를 원기둥( $\phi$  3.0 m × 3.5 m)형태로 제작하여 연결하였다. Fig. 5와 같이 구난역 플랫폼의 에어커튼 설치부분의 바닥에는 에어커튼으로부터 분사되는 공기를 구난역 밖으로 보낼 수 있도록 풍도를 설계하였으며, 에어커튼은 Fig. 6과 같이 구난역 플랫폼 상부에서 흡입하여 아래로 분사되며 분사된 공기의 일부는 플랫폼 바닥에 설치된 배기그릴을 통해 외부로 자연배출 될 수 있도록 설계하였다.



Fig. 4. View of a full-scale fire test (before test)

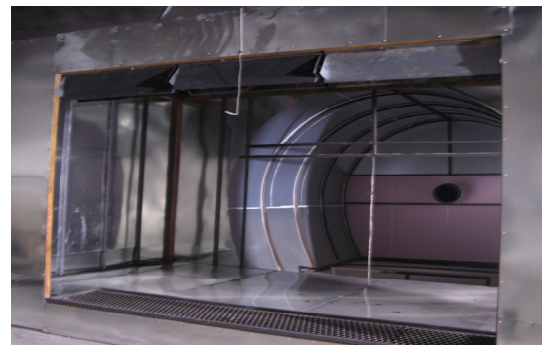


Fig. 5. Air curtain installation and evacuation passage connection

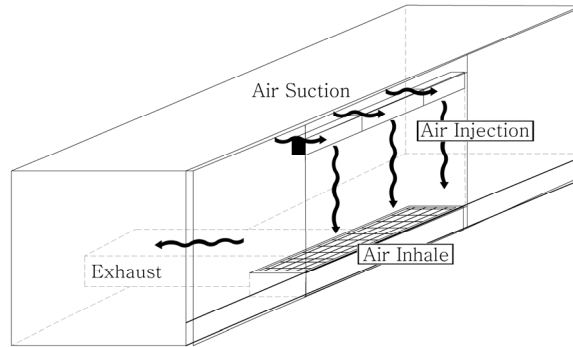


Fig. 6. Air curtain operation

에어커튼은 Fig. 7과 같이 시로코팬(1200.0 mm × 295.0 mm × 275.5 mm)을 이용하여 제작 하였으며, 분사각도를 지면으로부터 15°로 분사 될 수 있도록 노즐 판을 제작하였다. 에어커튼 장치는 구난역 플랫폼 입구당 3개씩 직렬로 연결하여 총 6대를 사용하였으며, 에어커튼 1대당 Table 1과 같은 성능을 갖는다. 피난연결통로에는 가압 송풍기로 연결된 토출구(직경 0.2 m, 높이 1.5 m)를 설치하였으며 220 V / 60 Hz / 3 HP 성능의 송풍기를 사용하였다.

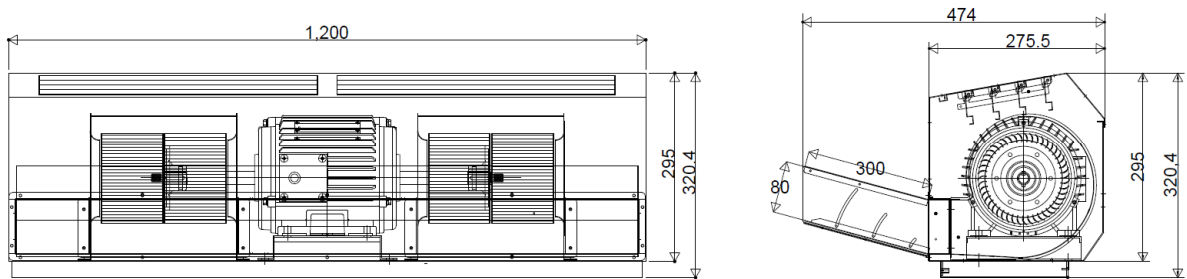


Fig. 7. Sirocco fan - plane & side view

Table 1. Air curtain specification and dimension

Item	Performance	Item	Performance
Frequency	60 Hz	Discharge velocity	50 m/s
Voltage	4.62 A	Size	1,200 × 320 × 275 mm
Power consumption	2,200 W	RPM	3,512 RPM

화원은 에어커튼에서 2 m 이격하여 철제 용기(Φ 2.0 m)에 액체 헵탄(10 L)을 담아서 사용하였다. 헵탄은 전소하는데 2분 소요되며, 열방출량은 5.64 MW 측정되었다. 열전대를 이용하여 구난역 플랫폼의 내외부 온도를 측정하였으며, Fig. 8과 같이 구난역 플랫폼의 피난연결통로에 바닥으로부터 500 mm 간격으로 4개, 구난역 플랫폼

외벽에 높이 1,600 mm에 3,000 mm간격으로 3개를 설치하여 총 7개 설치하였다. 아울러, 일산화탄소 측정기는 구난역 플랫폼의 내부에 1개, 외부에 1개를 높이 1,600 mm로 설치하였다.

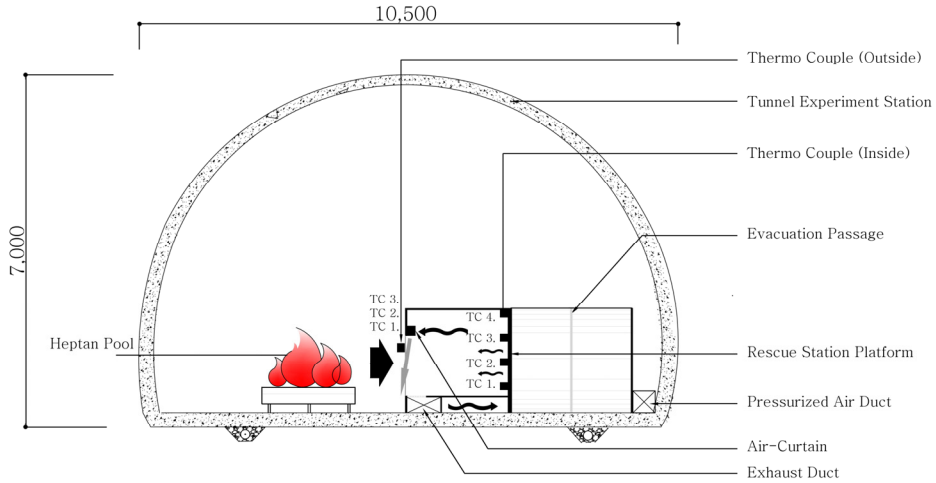


Fig. 8. Specimen installation sectional view

## 2.3 실험 진행



Fig. 9. View of a full-scale fire test (during test)

실물화재실험은 아래와 같은 절차로 진행되며, 실험전경은 Fig. 9과 같다.

### 에어커튼 실물화재 실험절차

1. 원형 철제 용기(Φ 2.0 m)에 물(50 L)을 먼저 넣고 액체 헵탄(10 L)을 넣는다.
2. 열전대 및 일산화탄소 측정기를 작동시켜 측정을 시작한다.
3. 점화봉을 사용하여 점화시킨다.



4. 10초 후에 에어커튼(시로코펜) 및 가압송풍기를 작동시킨다.
5. 온도 및 일산화탄소가 정상적으로 측정 되는지 확인하고 구난역 플랫폼에 유독가스가 유입되는지 확인한다.
6. 점화 2분 경과하면 헵탄이 전소되고 실험이 종료된다.

Fig. 10과 같이 에어커튼을 가동하지 않은 경우에는 구난역 플랫폼에 유독가스가 바닥면으로부터 1 m 지점까지 차오르며(점화 2분 경과), 화원이 전소 될 때까지 계속 차올랐다. 피난 시 허리를 숙여 피난하는 경우에 시야는 1 m 내외이며 유독가스를 흡입하여 패닉 상태가 될 수 있다. 에어커튼 및 가압송풍기를 작동한 경우에는 피난 연결통로까지 시야를 확보할 수 있다.

에어커튼을 가동하지 않은 경우에는 Fig. 11과 같이 점화 후에 곧 바로 구난역 플랫폼에 연기가 유입된다. 에어커튼 및 가압송풍기를 작동한 경우에는 에어커튼과 가압송풍기로부터 구난역 플랫폼 입구에서 열차방향으로 공기가 이동하게 되어 대류현상을 일으켜 상부층 공기와 하부층 공기가 혼합되며, 에어커튼으로 인하여 하부의 기류방향은 화원 방향으로 바뀌게 된다.



(a) Air-Curtain off



(b) Air-Curtain on

Fig. 10. Comparison of the smoke inside rescue station platform (in 2 minutes)



(a) Air-Curtain off



(b) Air-Curtain on

Fig. 11. Comparison of smoke behavior in train fore (in 20 seconds)

## 2.4 실험 결과 및 분석

Fig. 12는 에어커튼의 작동 유무에 따른 온도와 일산화탄소 변화를 나타낸다. 에어커튼이 작동하지 않은 경우에는 외부 온도가 약 200°C까지 상승하게 되며 구난역 플랫폼 온도는 약 60°C까지 상승하게 된다. 에어커튼 및 가압송풍기를 작동한 경우에는 외부 온도는 에어커튼을 작동하지 않은 경우와 같이 약 200°C까지 온도가 상승하며, 구난역 플랫폼 온도는 약 30°C까지 상승하게 된다. 따라서 에어커튼 및 가압송풍기 작동 시 구난역 플랫폼 온도의 차이가 약 30°C가 발생하여, 에어커튼을 작동시킨 경우에 내부의 온도상승을 억제한 것을 실험을 통하여 검증하였다.

에어커튼이 작동하지 않은 경우에 외부 일산화탄소는 약 270 ppm까지 상승하며 구난역 플랫폼은 약 170 ppm까지 상승하였다. 에어커튼 및 가압송풍기를 작동한 경우에는 외부의 일산화탄소는 약 90 ppm까지 상승하여, 에어커튼이 작동하지 않은 경우의 외부에 비교하여 약 180 ppm 적게 발생하였으며, 구난역 플랫폼은 약 10 ppm 발생하여 에어커튼이 작동하지 않은 경우의 외부에 비교하여 약 160 ppm 적게 일산화탄소가 발생하였다. 에어커튼과 가압송풍기를 가동한 경우에 외부의 일산화탄소가 약 180 ppm 적게 발생한 이유는 에어커튼과 가압송풍기에

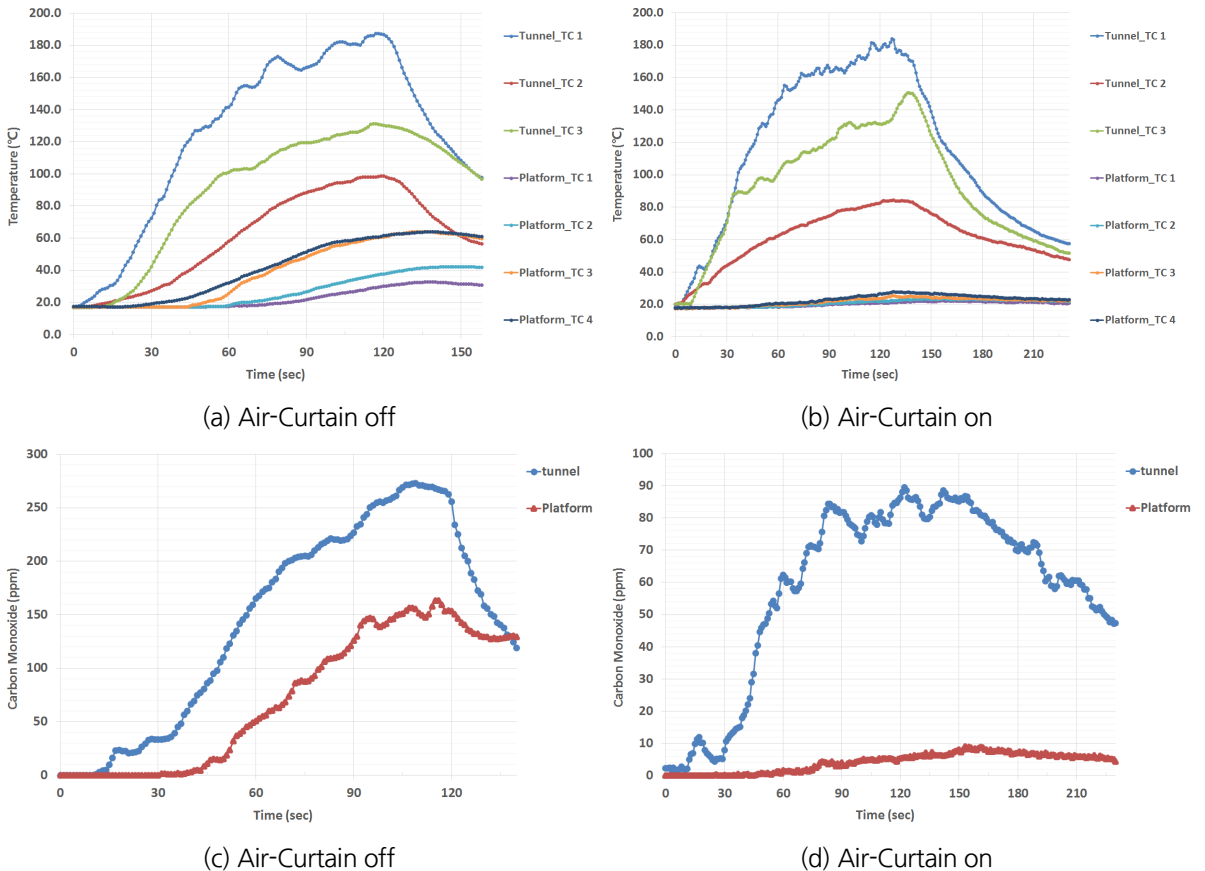


Fig. 12. Graph showing temperature and carbon monoxide change when air curtain is on/off



의해 공기가 혼합되어 외부의 일산화탄소 양도 현저하게 줄어들었다고 판단된다. 그러나 온도의 경우에 에어커튼 시스템 가동 여부와 상관없이 온도가 측정되었다.

### 3. 결론

본 연구는 해저터널 열차 화재 시 구난역의 피난연결통로로 안전하게 대피를 할 수 있도록 하기 위하여, 구난역에 에어커튼을 설치하여 화재로 인해 발생하는 열기 및 유독가스의 차단 여부를 실물화재 성능실험을 통하여 확인하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 2 m 거리의 5.64 MW급 화재에서 발생하는 열기 및 유독가스를 에어커튼을 설치하여 차단할 수 있다.
2. 외부온도가 약 180°C 이상일 때, 에어커튼 및 가압송풍기를 작동한 구난역 플랫폼에서는 약 30°C 정도의 온도를 유지할 수 있다.
3. 에어커튼 및 가압송풍기 작동 시 구난역 플랫폼의 일산화탄소는 10 ppm이 유지되며 피난 시야를 확보 할 수 있다.

### 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2017년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술 자립을 위한 핵심요소 기술 개발(17SCIP-B06632-05)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

### References

1. Lee, C. (2010), “Design method of the sirocco fan considering aeroacoustic performance characteristics”, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 13, No. 2, pp. 59-64.
2. Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2016), “Guideline of fire safety design and management for road tunnels”.
3. Park, S.H., An, S.J., Han, S.J., Yoo, Y.H. (2015), “A study on fire extinguishing performance evaluation of compressed air foam system”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 257-266.
4. Yang, S.H., Choi, Y.S., Kim, J.Y., Kim, N.G., Kim, K.Y. (2014), “The study on the bi-directional ejection air curtain system for blocking smoke diffusion in case of tunnel fire”, The KSFM Journal of Fluid Machinery, Vol. 17, No. 5, pp. 43-53.
5. Yoo, Y.H., Park, S.H., Han, S.J., Shin, H.J. (2014), “A evaluation study of local smoke control facility for the smoke spread prevention on tunnel fire”, Journal of Korean Society of Hazard Mitigation, Vol. 14, No. 3, pp. 171-175.