

# 해저터널 구난역 열차화재시 압축공기포(Compressed Air Foam) 소화설비의 적용성 평가 실험

박병직<sup>1</sup> · 신현준<sup>2</sup> · 유용호<sup>1\*</sup> · 박진욱<sup>2</sup> · 김희성<sup>2</sup>

<sup>1</sup>정회원, 한국건설기술연구원

<sup>2</sup>비회원, 한국건설기술연구원

## Evaluation test of applicability of Compressed Air Foam fire extinguishing system for train fire at rescue station in Subsea tunnel

Byoung-Jik Park<sup>1</sup>, Hyun-Jun Shin<sup>1</sup>, Yong-Ho Yoo<sup>1\*</sup>, Jin-Ouk Park<sup>1</sup>, Hwi-Seong Kim<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Member, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 64, 182 Beon-Gil, Mado-Ro, Mado-Myeon, Hwaseong-Si, Korea

<sup>2</sup>Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, 64, 182 Beon-Gil, Mado-Ro, Mado-Myeon, Hwaseong-Si, Korea

**ABSTRACT:** Recently, a mega project such as Korea-China or Kore-Japan undersea tunnel project has been emerged for detail discussion and the interest in undersea tunnel is on the rise. More severe damage by train fire is expected in undersea tunnel comparing to ground tunnel and thus the study on more efficient fire extinguishing system, besides existing disaster prevention design is underway. To that end, a full-scale fire tests using CAF fire extinguishing system which has been developed by modifying traditional foam fire extinguishing system for fire suppression at rescue station in timely manner were conducted over 7 times. The test was conducted after setting the rescue station in virtual tunnel with a car of KTX. As a result of using compressed air foam directly to the fire source, 30 liter of Heptane combustibles was extinguished within 1 minutes. Applicability of compressed air foam to train fire at rescue station in undersea tunnel was has been proven and further study is considered required while changing the nozzle angle and location so as to achieve quick and easy extinguishing goal, making use of the advantage of CAF, as well as to reduce the fire water and chemicals required.

**Keywords:** CAF(Compressed Air Foam), Foam fire extinguishing system, Real scale fire test, Tunnel safety facility

**초 록:** 최근 한중, 한일 해저터널과 같은 대규모 프로젝트가 구체화되고 있으며, 해저터널에 대한 관심이 높아지고 있다. 해저터널은 일반 지상터널에 비해 열차화재에 따른 대규모 피해가 발생할 수 있으며, 기존의 일반터널 방재설계 이외에도 효율적인 소화방안에 관한 연구가 필요하다. 이에 따라, 본 연구에서는 열차화재를 구난역에서 신속하게 진압하기 위하여, 일반적인 포 소화설비를 개량한 '압축공기포(CAF) 소화설비'를 활용한 실물 화재실험을 7차례 수행하였다. 실험은 가상의 터널에 구난역을 설치하고 KTX 열차의 1량 규모의 가상열차를 대상으로 실시하였다. 압축공기포를 화원에 직접 분사한 경우에 헵탄(Heptane) 원료 30 L의 가연물을 1분 이내에 소화시켰다. 본 실험 연구를 통하여 해저터널 구난역 열차화재 소화설비에 압축공기 포소화설비가 적합한지 확인하였으며, 해저터널 외에 일반터널에서도 CAF가 갖는 장점을 활용하여 빠르고 손쉬운 소화가 가능하도록 노즐 각도 및 설치위치 등을 변경하여 소화수와 소화약제를 최소화하기 위하여 추가로 실험 연구를 진행해야 한다고 판단된다.

**주요어:** 압축공기포(Compressed Air Foam), 포 소화설비, 실물 화재실험, 터널 방재 설비

## 1. 서론

\*Corresponding author: Yong-Ho Yoo  
E-mail: yhyoo@kict.re.kr

Received August 17, 2016; Revised September 7, 2016;  
Accepted September 9, 2016

보령-태안 해저터널(총연장 : 7 km)이 2018년 완공을 목표로 건설 중이며, 한일, 한중 해저터널이 계획 중에 있다. 국외의 대표적인 해저터널로는 유로터널

(프랑스-영국, 총연장 : 50.45 km, 1994년 완공)이 있으며, 홍콩 해저터널(중국, 총연장 : 9 km), 보스포러스 해저터널(터키, 총연장 : 14.6 km)이 국내 기업에 의해 해외에서 추진 중에 있다. 유로터널 화재(1996) 및 몽블랑 터널 화재(1999), 고타드 터널(2001)의 대규모 터널 화재로 인하여 터널 방재에 대한 많은 투자와 연구가 진행 중에 있으며, 터널화재 진압용 미분무 시스템이 개발되어 상용화되었다.

차량 화재가 터널 내부에서 전소하게 되면, 화재로 인한 고열이 발생하며 유독가스 및 검은 연기가 발생한다. 이로 인하여 피난 및 소화 활동에 지장을 초래할 수 있다. 또한 열차는 철관 재질로 둘러싸여 화재 시 일반적인 소화설비를 이용한 소화방법이 외부의 철관에 막혀 화원에 도달하지 못하여 소화를 하는데 어려움이 있다. 본 연구에서는 이와 같은 문제를 해결하기 위하여 포 소화설비를 이용하여 열차 화재 시 직접적으로 소화 할 수 있는 방안에 대하여 연구하였다.

## 2. 압축공기포 소화설비 이론 및 원리

포 소화설비는 대량의 소화용수를 단시간에 살포하여 빠르게 소화를 완료할 수 있기 때문에 대규모의 화재소화에 적합하며 실내외 상관없이 사용할 수 있다. 또한 사용되는 약제가 인체에 무해하며 유독성가스 발생이 적기 때문에 상대적으로 소화 작업에 유리하다(이장원, 2012, 2013).

포 소화설비에 사용되는 소화약제는 탱크에서 물과 혼합되어 거품형태로 노즐에서 발사하게 된다. 거품은 화재 표면을 덮어 가연물에 공기를 차단하여 질식 효과로 인하여 소화를 하게 된다(백열선, 2005).

소방방재청에서 고시한 화재안전기준(NFSC)의 NFSC-105에는 포 소화설비의 화재안전기준에 대하여 설치유지 및 안전관리에 관한 법률로 규정하고 있으며, 포 소화설비는 특수가연물을 저장·취급하는 공장 또는 창고, 항공기격납고, 연면적 800 m<sup>2</sup> 주차장 등에 설치하여 사용할 수 있다(소방방재청, 2012).

압축공기포 소화설비와 기존 소화설비를 비교하면

**Table 1.** Comparison between existing fire extinguishing system and CAF system

Item	Existing fire extinguishing system		CAF system
	Non-spraying	Spraying	
Rate per unit area (Fire Service Act)	No standard	10.2lpm/m <sup>2</sup>	1.63lpm/m <sup>2</sup>
Fire extinguishing capacity	Class A (normal fire)	Class A (normal fire), Particular combustibles	Class A (normal fire) Class B (oil fire) Particular combustibles
Fire extinguishing conditions	A fully-sealed compartment, not outdoor or open space	Outdoor/indoor and open space	Outdoor/indoor and open space
Fire water supply	Fire pump and fire water tank are needed	Fire pump and fire water tank are needed	Fire pump and fire water tank are not needed
Drainage	Large	Large	Very small drainage because of flow rate which is 1/7 of existing ones
Power supply for fire pump	Needed	Needed	Power for fire pump separately
Pipe diameter by protection zone	No base	6"	3"
Cost efficiency	Average	Average	High
Maintenance	Complex and frequent failure	Complex and frequent failure	Simple

Table 1과 같이 차이점이 있으며, 주요 장점을 아래와 같이 정리 할 수 있다.

- 1) 물분무 설비에 비해 소방펌프 용량 1/7 감소
- 2) 소방 주배관 직경 1/2 축소
- 3) 배수로 용량 감소
- 4) 소방펌프용 전력 설비 불필요
- 5) 소화수 저장탱크 용량 감소
- 6) 공사 규모 축소로 인한 공사비 절감

압축공기포(이하 CAF)는 Fig. 1과 같이 소화수, 포원액, 압축공기로 구성된다. 압축공기포 혼합장치(가로 1,200 mm, 세로 1,200 mm, 높이 2,075 mm)는 물과 포원액, 압축공기를 혼합하여 조밀한 형태의 폼을 형성하는 장치이며, 소화수 탱크(500 L), 포원액 탱크(20 L), 압력조절장치 등으로 Fig. 2, Table 2와 같이 구성되어 있다.

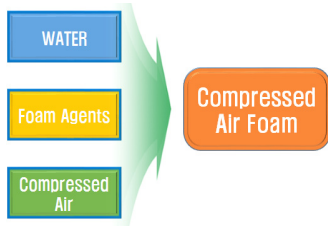


Fig. 1. Principle of CAF system

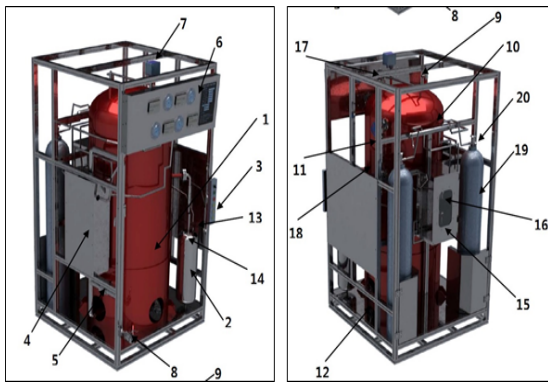


Fig. 2. Components of CAF system

Table 2. Components of CAF system

NO.	Description	NO.	Description
1	Fire water tank	11	Lvel gauge
2	Foam tank	12	Fire water inlet
3	Operation switch board	13	Foam inlet
4	Foam mixer	14	Air Vent
5	By-Pass valve	15	CAF generation regulator
6	Compression gauge board	16	Pressure regulator
7	Compression switch	17	Air Vent
8	CAF outlet	18	Compressed air control valve
9	Safety valve	19	N2 or Air cylinder
10	Cylinder manifold	20	Cylinder valve

### 3. 압축공기포 실물화재 실험

#### 3.1 실험 준비

정량적 위험도 평가기법에 의한 화재 시나리오에 따라 해저열차터널에서 구난역은 평균 25 km 간격으로 계획되며, 열차 화재시 구난역에 정차하여 피난 및 소화활동을 하도록 기존논문에서 제안하였다(유지오, 2015).

따라서, 본 실험에서는 가상 터널에 구난역을 계획하고 정차된 열차 한량을 Fig. 3과 같이 설치하였으며,



Fig. 3. CAF system arrangement

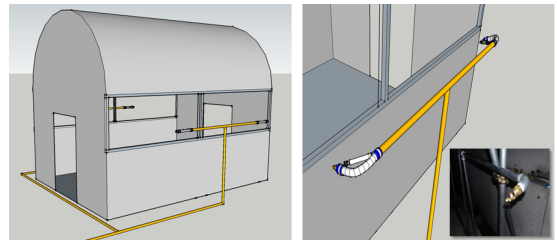


Fig. 4. CAF Pipe Line and nozzle plan

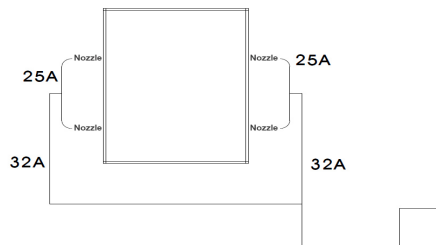


Fig. 5. CAF Pipe Line and nozzle plan

압축공기포 혼합장치와 소화 배관으로 연결한 소화 노즐을 열차 외부에 양쪽 각 2개씩 Fig. 4, 5와 같이 1차 실험에서는 높이 3 m에 배치하였으며 2차 실험에서는 높이 1 m에 하향식(45°)으로 배치하였다. 소화 시 노즐의 분사압력은 6 bar가 유지되도록 하였다.

열차 크기는(폭 3 m, 길이 5 m, 높이 2.5 m) KTX 1량을 기준으로 제작하였으며, 유리창은 수직 0.9 m 위치에 5 m × 0.6 m의 크기로 양 면에 설치하였다. 출입문은 앞 뒤로 각 1개씩 0.9 m × 1.5 m의 크기로 설치 하였다.

화원은 액체 헵탄(10 L)을 철제 용기(1 m × 1 m)에 담아서 사용하였다. 화원이 전소하는데 까지 걸리는 시간은 환경에 따라 2-3분 정도 소모되며, 1개 화원은 3.35 MW, 2개 화원은 5.64 MW, 3개 화원은 11.88 MW의 열방출률이 측정되었다.

본 실험에 포원액으로 사용한 수성막포(AFFF ; Aqueous Film-Forming Foam Agents)는 불소계 계면활성제를 주재료로 안정제 등을 첨가한 것으로, 소화속도가 빠르고 수분이 많은 거품을 형성하여 유동성이 우수하여 초기 소화속도가 빠르며 표면장력이 작기 때문에 다양한 종류의 화재에 대한 소화효과가 높다(이승훈, 2014). 본 실험에서는 수성막포를 3% 희석하여 소화약제로 사용하였으며, 질소가스를 이용하여 압력탱크를 가압하였다.

### 3.2 실험 진행

화원에 점화 후 30초 경과시점에 압축공기포 소화 설비를 수동으로 작동시켰으며, 4개의 소화 노즐을 통하여 압축공기포가 분사되었다. 본 실험 수행 전에 예비실험을 3회 실시하였으며, 실험결과 유의미한 값을 갖는 본실험은 총 7회 실험을 실행하였고, 3회까지는 노즐 위치를 열차의 상부에 계획하였으며, 4회부터 7회까지는 노즐 위치를 열차의 유리창 높이에 계획하여 실험(Fig. 6)하였다.

Thermocouple에 의하여 온도를 계측하였으며, 열

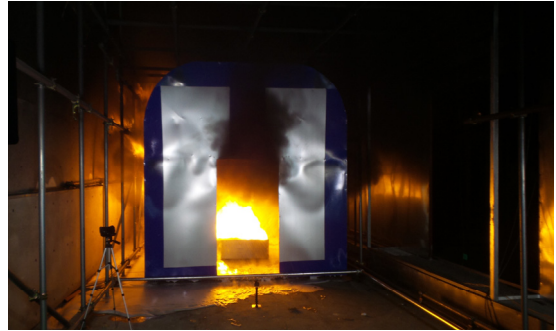


Fig. 6. CAF Discharging

차 내부 천장(화원으로부터 수직 2.5 m 높이)에 수평 50 cm 간격으로 총 5개 설치하였다. Large Scale Con Calorimeter를 이용하여 열방출률을 측정하였다.

화원(헵탄)이 전소된 경우에는 온도 변화의 유무와 상관없이 소화에 실패한 것으로 판단하였다.

### 3.3 실험 결과 및 분석

총 7회 실물 화재실험을 진행하여 Table 3의 실험결과를 얻었다.

1차 실험은 소화수를 사용하여 1회, 소화수와 포원액을 사용하여 1회, CAF를 사용하여 1회 실시하여, 총 3회 하였으며 1개 화원을 사용하였다. Table 4와 같이 소화를 모두 실패하는 실험결과를 얻었다. 1회 실험보다 2,3회 실험에서 소화약제의 일부가 헵탄이 담긴 철제용기에 첨가되어 화원이 전소하는데 시간이 단축되었다고 판단된다.

3회 실험 시 #2번 Thermocouple의 온도가 400°C에서 100°C로 급격하게 하락하고 약 30초 동안 100°C를 유지한 것으로 측정되었다. 이는 실험 중 Thermocouple에서 보내는 신호에 일부 오류가 생긴 것으로 사료된다.

압축공기포 혼합장치에 압축공기를 주입하여 실험한 3회 실험에서 2회 실험에 비해 최고 온도가 약 100°C 낮게 측정되었다. 화원에 직접적으로 CAF를 사용하지 않더라도 약간의 냉각 효과를 낼 수 있음을 확인하였다. 이것은 노즐에서 나오는 압축공기의 일

Table 3. 1st & 2nd test result

Parameter	1st test			2nd test			
	1	2	3	4	5	6	7
Nozzle height	train roof			train window			
burner	1			1	2	3	1
heat release rate (MW)	3.35			3.35	5.64	11.88	3.35
Fire extinguishing method	water	water + Foam agents	CAF	CAF	CAF	CAF	water + Foam agents
Result	Failure	Failure	Failure	Success	Success	Success	Failure
Time to extinguishing	163	105	110	33	41	59	112

Table 4. Temperature graph (1st test)

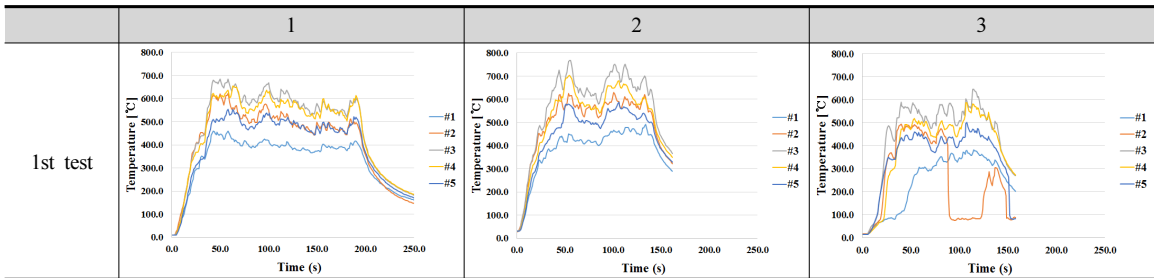
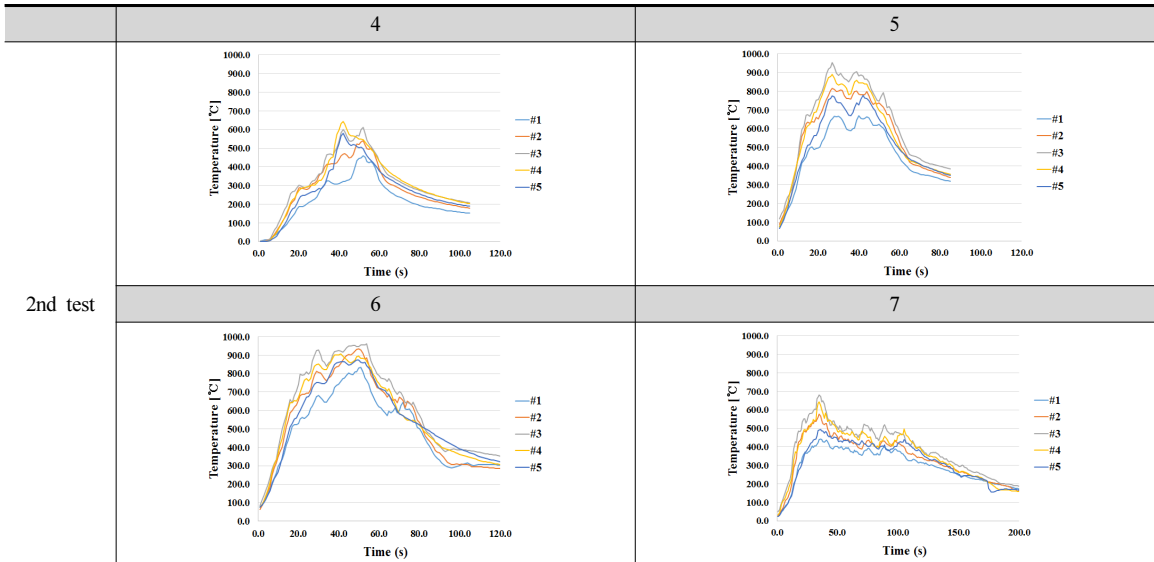


Table 5. Temperature graph (2nd test)



부가 열차 내의 기류에 영향을 주어 Thermocouple이 설치되지 않는 곳으로 일부 열을 이동시켰다고 판단 된다.

2차 실험은 CAF를 사용하여 화원을 1개에서 3개까

지 변경하여 3회 실험하였으며, 화원이 1개인 경우에는 600~700°C까지 온도가 상승하였으며, 화원이 2개인 경우와 3개인 경우도 비슷하게 900°C~1000°C까지 온도가 상승하였다. Table 5에 보이듯이 소화를 시작

한지 각각 33초, 41초, 59초 만에 진화에 되었으며, 소화수와 소화약제를 혼입하여 사용한 경우에는 화원 1개도 소화시키지 못하였다.

#### 4. 결론

본 연구에서 구난역에 정차된 열차의 내부 화재를 압축공기포 소화설비를 이용하여 소화할 수 있는 방안을 제시하기 위하여 실물화재 성능실험을 수행하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축공기포 소화설비의 소화노즐의 위치는 열차 차량의 유리창 높이에 설치하여 화재를 직접적으로 소화할 수 있도록 배치해야 한다.
2. 구난역에 압축공기포 소화설비를 설치하면, 열방출량 11.88 MW 규모(헤파탄 30 L, 단면적 3 m<sup>2</sup>)의 화재를 60 초 이내에 소화할 수 있다.
3. 소화수에 소화약제만 혼입하고 압축공기를 가압하지 않은 경우에는 열방출량 3.35 MW 규모(헤파탄 10 L, 단면적 1 m<sup>2</sup>)의 화재를 소화할 수 없다.

본 실험 연구를 통하여 해저터널 구난역 열차화재 소화설비에 압축공기 포소화설비가 적합한지 확인하였으며, 해저철도터널 외에 일반터널에서도 압축공기포 소화설비가 갖는 장점을 활용하여 빠르고 손쉬운 소화가 가능하도록 노즐 각도 및 설치 위치 등을 조정하여 소화수와 소화약제를 최소화하기 위하여 추가로 실험 연구를 진행해야 한다고 판단된다.

#### 감사의 글

본 연구는 국토교통부(국토교통과학기술진흥원) 2016년 건설기술연구사업의 ‘고수압 초장대 해저터널 기술 자립을 위한 핵심요소 기술 개발(16SCIP-B06632-04)’ 연구단을 통해 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

#### References

1. Lee, J.W., Lim, W.S., Kim, S.S., Rie, D.H. (2012), “A Study on Fire Extinguishing Performance Evaluation of Compressed Air Foam System”, Transactions of Korean institute of fire science and engineering, Vol. 26, No. 5, pp. 73-78.
2. Lee, J.W., Lim, W.S., Rie, D.H. (2013), “A Study on B Class Fire Extinguishing Performance of Air Ratio in the Compressed Air Foam System”, Transactions of Korean institute of fire science and engineering, Vol. 27, No. 6, pp. 8-14.
3. Yoo, J.O., Kim, J.S., Rie, D.H., Shin, H.J. (2015), “The study on interval calculation of cross passage in undersea tunnel by quantitative risk assesment method”, Journal of Korean Tunnelling and Underground Space Association, Vol. 17, No. 3, pp. 249-256.
4. Fire safety criteria of doam fire extinguishing system (NFSC 105) Fire Emergency Management Notice #2012-121 (2012.08.20.).
5. Baik, Y.S. (2005), “Fire equipment”, Hyungseol Publication, pp. 455-519.
6. Lee, S.H. (2014), “Fire science”, Donghwa Technology, pp. 382-388.