

고발포 소화약제 사용 실험에 의한 지하공동구 화재진압방법 연구

박준길 · 이민철^{*†}

인천대학교 안전환경시스템공학과 대학원생, 인천대학교 안전공학과/소방방재연구센터 교수^{*}

Experiment using High-Expansion Foaming Agent in an Underground Utility Tunnel as a Fire Suppression Method

Joon Gil Park · Min Chul Lee^{*†}

Graduate Student, Department of Safety Engineering, Incheon National University,

^{*}Professor, Department of Safety Engineering/Fire Disaster Prevention Research Center, Incheon National University

(Received October 11, 2022; Revised November 01, 2022; Accepted November 02, 2022)

요 약

본 연구에서는 실스케일의 지하공동구 실험체를 대상으로 고팡창포 발포실험을 수행하고, 지하공동구 화재 시 고발포 소화약제의 방사·발포특성을 이해함으로써 효과적인 화재대응방안을 제시코자 하였다. 한 곳에서 고발포 폼을 발포하였을 경우 포 소화약제 환원시간에 도달하며, 약 4 min 만에 포가 깨어지기 시작하였다. 반면, 실험체의 세 곳에서 고발포 폼 관창을 이용하여 폼을 집중 발포하였을 경우, 650 L의 소화약제를 사용하여 7 min 만에 실험체를 모두 채울 수 있었다. 또한 셀라관창 실험에서는 관창을 맨홀에 수직으로 삽입하여 방사하는 것보다는 관창을 수평에 가깝게 삽입하여 방사하는 것이 연기 및 열기를 밀어내도록 하는데 효과적임을 확인하였다.

ABSTRACT

This study conducted a discharging experiment of high-expansion foams at a real-scale experimental underground utility tunnel and proposed an effective fire response plan. The study analyzed the discharge and foaming characteristics of high-expansion foam in the event of an underground utility tunnel fire. When high-expansion foams were injected at one point, foam agents started to break out four minutes after reaching reduction time. Meanwhile, when high-expansion foams were injected at three points, the experimental tunnel was filled entirely after seven minutes using 650 L of extinguishing agent. Moreover, in the cellar nozzle experiment, discharging from a nozzle injected horizontally to a manhole was more effective than that from a nozzle vertically injected to push smoke and heat.

Keywords : Underground utility tunnel, High expansion foaming agent, Real-scale tunnel experiment, Cellar nozzle

1. 서 론

현대사회는 수도권 등 대도시 중심의 압축고도 경제성장으로 인해 인구의 대도시권 밀집되고 있고, 건축물이 날로 대형화·고층화가 되어가고 있으며, 기능의 복합화·다양화가 급속히 이루어지고 있다. 이러한 인구의 도시밀집으로 인해 도시 및 아파트단지에 필요한 통신·전력·광케이블 배선 시설 등을 효과적으로 사용하고 도시 기반시설의 확장에 따라 발생하는 여러 가지의 문제점을 해결하기 위한 방법으로 시설물을 한 장소로 모아 유지관리 할 수 있도록 지하공동구를 설치하고 유지하고 있다. 그러나 지하공동구는 서로 다른 목적의 수

용시설을 함께 관리하게 됨으로 경제적인 면에서 편리한 점도 많지만, 다량의 케이블이 지하밀폐공간에서 연소함으로써 화재 초기감지, 화재진압 및 접근성, 화재양상 등 소방·방재 측면에서는 고위험 요인들이 존재하고 있다⁽¹⁻⁴⁾.

특히, 2018년 11월 24일 발생한 서울 서대문구 충정로3가 KT아현지사 지하 통신구 화재로 서울 한강 이북 서부 지역에서 인터넷, 휴대폰 등을 이용할 수 없게 되었고, 화재로 케이블 150 m가 소실되었고 건물 내부 300 m² 등 약 80억원의 재산 피해가 발생한 것으로 집계되었지만 실제 물적피해 보다 간접적인 경제적·사회적 피해는 가늠조차 어려운 것이 실정이다. 이에 지하공동구 화재는 정보화사회에 대중에게 큰 불

[†] Corresponding Author, TEL: +82-32-835-8295, FAX: +82-32-835-0779, E-Mail: LMC@inu.ac.kr

© 2022 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

편함을 가져올 수 있는 사회적 재난수준 관리가 필요한 이슈로 대두되고 있다.

이러한 지하공동구의 화재예방 및 대응을 위하여 지하공동구 유사환경에서의 화재특성실험⁽⁵⁻⁷⁾, 지하공동구 대상 화재전산해석⁽⁸⁻¹⁰⁾, 위험성 평가⁽¹¹⁻¹³⁾, 화재진압⁽¹⁴⁾ 등 다양한 연구가 수행되어져 왔다. 특히, 4차 산업혁명 기술과 접목하여 딥러닝 기반 지하공동구 화재 탐지 모델 개발 연구⁽¹⁵⁾ 및 IoT 기술의 적용 지하공동구 상태감시연구⁽¹⁶⁾ 등이 수행되고 있다. 본 연구와 동일분야인 화재진압과 관련된 연구로 Hong 등⁽⁷⁾은 국내의 지하공동구 화재 사례 및 관련 법기준을 검토하고, 화재진압방법으로 스프링클러설비와 연결살수설비를 조합한 직접살수방법과 워터 미스트분사방법에 대해 제안하고 관련 설계안을 제시하였다. 그러나 해당 연구에서는 개념설계안 수준의 제시하고 실제 실험 등으로 검증된 바 없고, 실제 살수 설비보다 포 소화설비의 방안에 대한 검토가 이루어지지 않아 한계점으로 남아있다. 또한 Kim과 Ahn⁽¹⁴⁾은 지하공동구 화재진압방안으로 가장 많이 활용되고 있는 물분무노즐의 분사 특성에 전산해석적 방법을 이용해 두 가지 종류의 노즐에 대한 특성을 분석하였다. 이러한 지하공동구 화재 관련 많은 연구들이 진행되어 왔지만, 포 소화설비를 이용한 실험적 연구는 수행된 바 없다. 이에 본 연구에서는 지하공동구 화재진압방안으로 고펡창포 소화설비를 새롭게 제시하였는데, 이를 실제 지하공동구와 동일 규모 수준의 야외 실증실험을 통해 셀라관창을 이용한 고펡창포 소화설비의 발포 및 팽창특성, 발포 노즐의 분사특성 등에 대해 파악하였다. 한편, 고펡창포 소화설비 관련 이전연구로는 Kim 등⁽¹⁷⁾이 실험적으로 연구한 고발포 소화약제의 온도 변화에 따른 최적발포성능 유지용 자동혼합시스템을 개발한 사례가 있는데, 이는 실험 규모가 본 연구에 비해 2 m × 2 m × 1 m의 장치에서 실험하였다는 측면에서 소규모이고, 실험 대상 및 목적이 다르다는 측면에서 본 연구와는 차별된다. 또한 Oh 등⁽¹⁸⁾도 고펡창포 소화약제에 대해 풍량, 스크린 매쉬, 포수용액의 농도 및 소금물의 농도를 변수로 랩스케일의 실험적 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 랩스케일 수준이 아닌 지하공동구와 동일 규모의 실험체 구성을 통한 실제 화재현장과 유사한 환경에서 실험연구가 진행되었다는 측면에서 본 연구 결과는 중요한 의미를 가진다고 할 수 있다.

실험은 인천소방본부에서 지하공동구 화재진압방안의 일환으로 국립소방연구원에 실험을 의뢰하여 실시하였고, 실험의 결과를 토대로 고발포 소화약제를 이용한 지하공동구 화재진압시 효율적 방안을 도출코자 하였다.

2. 실험목적 및 방법

2.1 실험의 배경 및 목적

본 연구에서는 지하공동구 화재진압방안을 도출하기 위해 인천소방본부에서 국립소방연구원에 『고팽창포 소화약제를 이용한 지하공동구 화재대응 실험』을 의뢰하여 2021년 10월 29일 실험을 수행하였고, 그 결과를 통해 고발포소화약제를

이용한 지하공동구 화재진압특성을 분석하고, 적절한 진압방안에 대해 고찰하였다.

지하공동구의 방화구획을 공동구 정의 상 최소 체적(180 m³) 기준에서 포소화약제를 주입하여 소방대원들이 화재진압 시 공동구의 공간을 채우는데 필요한 약제량을 확인하고 포소화약제가 화점까지 도달하여 질식소화를 일으키는 시간을 측정함으로써 진압의 효과를 예측하고 약제 소요기준을 마련함으로써 화재현장에서 진압전술 상 화재진압을 효율적으로 지휘하고 통제할 수 있을 것을 목적으로 한다. 또한 지하공동구 화재 대응 시 재난현장표준작전절차(SOP)에 따르면 화점 방향으로 포를 주입하여 질식소화를 시도하도록 명문화되어 있지만 포 발포시간 및 약제사용량 등에 대한 대응 기준이 없는 실정이며, 본 실험을 통해서 화재 시 대응 방안에 대해서 다각도 실험을 통한 분석을 하고 그 실험 결과를 토대로 지하공동구 화재진압방안을 제시하고자 한다.

실험을 위해 약 180 m³ 체적, 길이 50 m의 실스케일 크기의 대형 모의 지하공동구 실험체를 준비하고, 포 소화약제를 주입하여 체적 내 약제 발포시간 및 소요량을 확인하였다. 또한 지하공동구 화재 시 화재 초기나 화점의 위치를 알 수 있는 경우에 화점 방수를 할 수 있는 셀라관창을 화재 시 연기확대 방지나 화점 근처에서 직접 방수의 효과성에 대해 추가적 실험을 통해 검증하였다.

2.2 실험재료

2.2.1 포소화약제 시료

포소화약제는 합성계면활성제 3%를 포함하는 스노우폼-1000을 시료로 사용하였다. 스노우폼-1000은 친환경 합성계면활성제 포소화약제로 불소계 화합물과 중금속 등이 전혀 사용되지 않고 높은 팽창율과 기포안정도 뛰어난 소화능력을 갖추고 다양한 화재 상황에서 저발포 및 고발포 등 다목적으로 사용 가능한 약제로서 인천소방본부에서 주력 포소화약제로 사용하는 시료이다.

2.2.2 모의 공동구 실험체

체적 180 m³ 체적(폭: 1.8 m, 높이: 2 m, 길이: 50 m)를 적용한 모의공동구 실험체를 Figure 1과 같이 제작·설치하였다. 모의 공동구 실험체의 천정에는 5개의 공동구 맨홀이 등간격으로 설치되어 있어 소화약제를 다양한 위치에서 분사할 수 있도록 구성하였다.

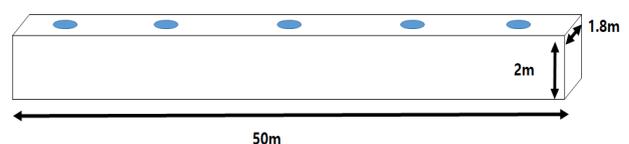


Figure 1. Simulated underground tunnel test facility.

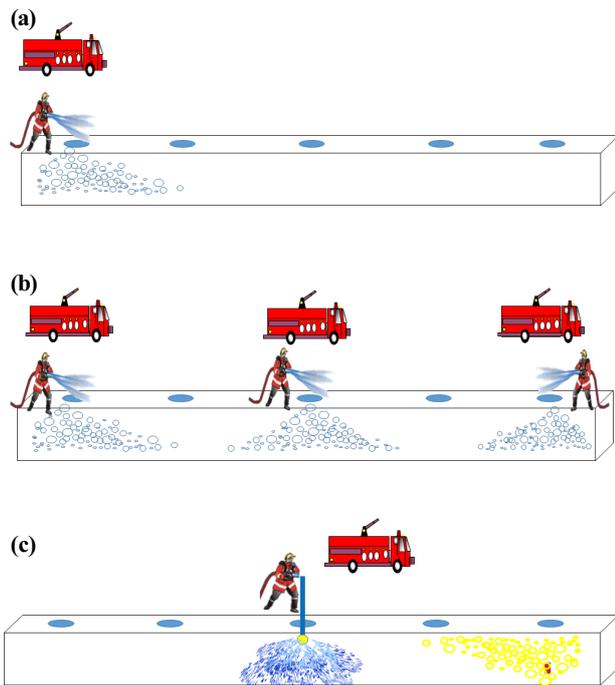


Figure 2. Experimental setup for (a) one-way discharge of high expansion foam, (b) three-way discharge of high expansion foam and (c) cellar nozzle discharge of high pressure water.

2.2.3 셀라관창

셀라관창은 사람이 접근하기 어려운 밀폐된 실내 화재 시 방수압력에 의해 관창 선단이 자유회전을 하여 다중방사로 화재를 진압하거나 수막을 형성하여 소방대원을 보호할 수 있는 관창이다. 특히 플래쉬오버(flash over)현상 등이 일어난 고온 실내환경에서 사용 시 실내온도를 낮추는데 효과적이다.

2.2.4 고발포 폼 관창

고발포 폼관창은 유류, 화학, 일반화재 시 사용되는 관창으로써 소량의 소화약제로 다량의 거품을 형성하여 신속한 화재진압을 할 수 있다. 노즐에 방사된 소화약제가 망(screen)을 통과하면서 형성된 폼을 장거리까지 방사할 수 있도록 설계되었다.

2.3 실험방법

실험체의 체적 조건에서 포가 최상단(2 m)에 도달하여 질식소화까지 이르게 되는 조건을 알아보기 위해 동일한 2개의 세트를 구성하여 한 개 세트에서는 한쪽 방향으로 포를 발포하고 또 한 개의 세트에서는 처음, 중간, 끝 부분의 맨홀 주입구에서 포를 발포하여 집중 방사하였다.

포소화약제는 소방차량에서 압력을 0.5 MPa로 유지하되, 발포되는 폼의 상황에 따라 0.3~0.7 MPa로 변동하여 발포하였을 때 소화효과와 발포량 및 시간을 측정하였다. 그리고 실험체에서 단방향으로 포를 주입하여 포 전개성을 확인하고 일



Figure 3. Direct photos of experimental facility pictured by (a) a general view camera and (b) a wide angle camera.

정거리(5 m 간격)마다 포가 도달하는 시간을 측정하였다. 또한 실험체 내 농연을 재연하여 포 방사 후 포가 차오를 때 개구부로의 배연 양상을 확인하였다.

본 연구에서는 Figure 2에 도시된 바와 같이 3가지 주제의 실험이 실시되었다. 실험(1)에서는 Figure 2(a)와 같이 단방향에서 포를 발포하여 환원시간이 지나감에 따라 포가 깨지지 않고 체적을 채울 수 있는지 여부와 시간에 따른 약제의 축적·발포양상을 관찰하였다. 여기서 환원시간(drainage time)이란 발포상태에서 포가 깨져 포수용액으로 환원되는데 걸리는 시간을 말한다. 실험(2)에서는 Figure 2(b)와 같이 단방향이 아닌 3곳에서 집중 발포하였을 때 포가 깨지지 않고 체적을 채울 수 있는지 여부와 시간에 따른 약제의 축적·발포양상을 관찰하였다. 실험(3)에서는 Figure 2(c)와 같이 공동구 화재 시 화점의 위치가 예측 가능한 화재 초기의 경우 화점방수 및 연기확대 방지를 위해 셀라관창을 활용해 실험 조건에서 연기확대 방지 효과성을 검증하였다. 이 때 셀라관창의 최고 압력은 0.7 MPa로 유지한 상태에서 실험체의 중앙 맨홀을 통해 주수하였고, 한쪽 끝에서 연막탄을 통해 연기가 발생하였을 때, 그 연기가 반대쪽으로 새어나가지 않는지 여부를 확인하였다. 또한 화점방수 시 셀라관창의 가로 방수길이를 측정하여 화점방수의 범위를 살펴보았다.

3. 실험결과

3.1 실험체 구성 및 부피계산 방법

앞서 기술된 바와 같이 모의 공동구 실험체는 폭 1.8 m, 높이 2 m, 길이 50 m의 형상을 가지고 있는데, 실제 구축된 사진은 Figure 3과 같다. 모의 공동구 실험체에 포가 발포되어 축적된 부피를 정량적으로 측정하기 위해 Figure 3(b)와 같이 실험체의 길이방향으로 2 m의 등간격을 가지는 25개 구역을 나누었고, 높이방향으로 0.2 m 단위의 10개 측정눈금을 도시하여 폼의 축적 높이를 측정하였다. 이 때 눈금을 읽는 기준은 폼의

제일 낮은 부분을 기준으로 하였다. 이를 통해 폼의 길이방향 전파와 높이를 정량적으로 계측하고, 부피계산에 사용하였다.

3.2 실험결과

3.2.1 실험(1) - 단방향 발포실험

실험(1)은 단방향 발포실험으로 한쪽 측면에서 합성계면활성제 3%의 약제를 0.7 MPa의 압력으로 고발포 폼 관창을 사용하여 발포하였을 때, 시간에 따른 포 축적 높이를 측정하였다. 실험체 내 25개의 구분된 영역에 대해 포 축적 높이를 측정하기 위해서는 Figure 4와 같이 촬영된 사진들이 활용되었고, 측정결과는 1 min 간격으로 Table 1과 같이 정리되었다. 각 영역별 포 축적높이를 모두 합산하여, 실험체 내 축적된 포의 총 부피를 계산하면, Figure 5와 같다. 시간이 진행됨에 따라 발포 초기에는 포가 깨지지 않고 실험체의 공간을 채워나갔지만 4 min이 지나면서 환원시간이 지남에 따라 포가 깨지기 시작하였고, 이로 인해 포의 축적부피가 증가하지 않고, 60 m³ 이내의 수치를 유지하였다. 여기서 주목할 점은, 포 소화약제

의 환원시간은 약 4 min으로 측정되었다는 것이다. 이는 합성계면활성제의 국내검정기준인 3 min 이상의 수치와 일치한다고 할 수 있다. 따라서 지하공동구 포 소화약제를 이용한 화재진압에서는 결과적으로 고발포 폼 관창 1개로는 실험체의 체적 공간을 채울 수 없다는 결과에 도달하였으며, 효과적 화재진압을 위해서는 여러 개의 폼 관창을 이용한 포 주입이 필요하다는 것을 알 수 있다.

포 축적 부피뿐만 아니라, 시간에 따른 포의 수평방향 영향 범위를 확인하기 위해 포의 수평방향 도달거리를 Figure 6과 같이 측정하였다. 단방향 포 주입시, 주입구로부터 20 m까지 포 도달시간은 5 m 간격으로 약 1 min씩 비교적 일정하게 소요되었으나 20 m부터 포 도달시간이 점차 늦어졌으며, 특히 포가 35~45 m 근처에 도달했을 때는 포 환원시간 대비 주입시간이 길어짐에 따라 포 도달시간이 현저히 늦어짐을 확인할 수 있다. 이 때 포의 환원은 2 m 높이에서 10 min 이상의 장시간 포를 방시함으로써 포 사이의 마찰 또는 바닥면과의 마찰에 의해 이루어진 것으로 판단된다. 45 m를 초과한 거리에서는 대부분의 포가 환원됨으로 인해 포 도달시간은 측정이

Time [min]	A focused view for 0~10 m zone	A wide angle view for 0~50 m zone
1		
3		
5		
7		
9		
11		
13		

Figure 4. Time series form accumulation photos of the one-way discharge experiment.

Table 1. A Volume Calculation Chart According to the Results of One-way Discharge Experiment. Unit Accumulation Volume in Each Zone is Identical to 0.72 m³/EA Which Can be Calculated by 0.2 m (Height) × 1.8 m (Depth) × 2 m (Width)

Time [min]	Accumulation Height at Each Zone [E.A.]																			Sum	
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19~25		
1	4	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	Zero	13
2	5	7	6	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		27
3	7	8	7	6	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		43
4	9	10	9	8	7	6	5	4	3	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0		63
5	8	9	8	7	7	6	5	5	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0		65
6	8	8	8	7	6	5	4	4	4	3	2	2	1	0	0	0	0	0	0		62
7	8	8	8	7	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1	0	0	0	0	0		66
8	7	7	7	7	7	7	6	5	4	3	3	3	2	2	1	0	0	0	0		71
9	7	7	7	7	7	6	6	5	5	4	4	3	3	2	2	1	0	0	0		76
10	6	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	4	3	2	1	0	0	0		76
11	5	6	6	6	6	6	6	6	5	5	4	4	4	4	3	2	1	0	0		79
12	5	5	6	6	6	6	6	6	5	4	4	4	4	4	4	2	1	0	0		78
13	5	5	5	6	6	6	6	6	5	5	5	4	4	4	4	3	2	1	0		80
14	4	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	4	4	3	3	2	1		76

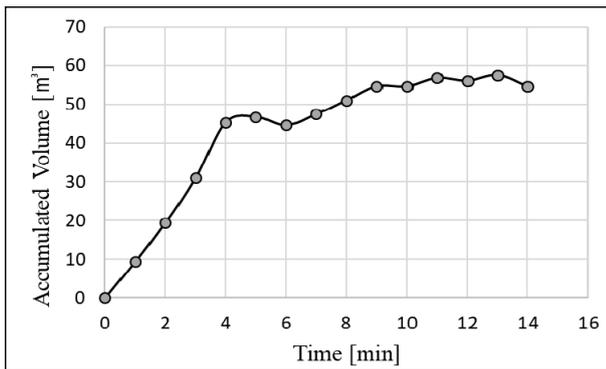


Figure 5. Time series volume of accumulated form in one-way discharge experiment.

불가했고, 이는 단방향 발포를 통해서는 50 m 실험체 내 전체를 포로 진압하기에는 충분하지 않다는 것을 의미한다. 이에 50 m 실험체 내에 추가적인 발포를 하는 3방향 발포하는 실험을 추가적으로 실시하여 적절한 화재진압 성능을 확인하였다.

3.2.2 실험(2) - 3방향 발포실험

실험(2)에서는 Figure 2(b)와 같이 실험체 상부의 0, 25 m, 50 m 지점에 위치한 3개의 개구부에서 발포하였을 경우에 대해 화재진압성능을 확인하였다. Figure 7과 같이 광각으로 촬영된 직접 사진을 통해 시간에 따른 포의 축적공간을 확인하고, Table 2와 같이 25개의 구역에 대해 포의 높이를 측정하여 그 축적부피를 정량화한 후, Figure 8과 같이 시간에 따른 포의 축적부피를 도시하였다.

3방향 발포실험결과도 단방향발포의 경우와 유사하게 초기

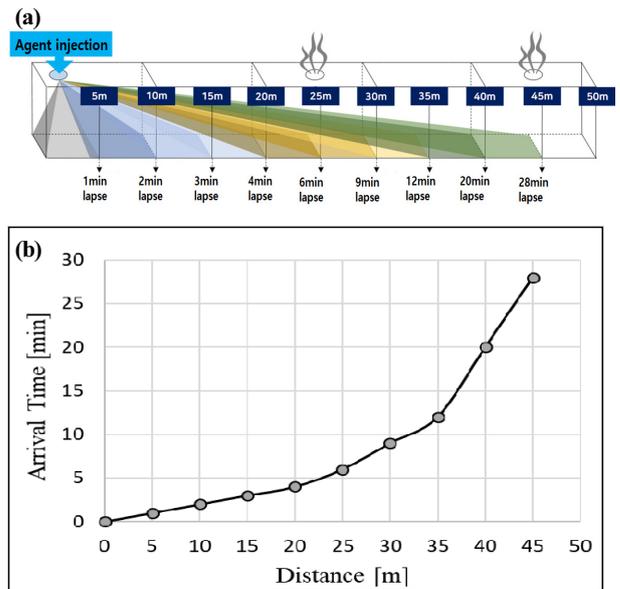


Figure 6. (a) Schematic of injection location and arrival time and (b) the measurement results of arrival time of high expansion form in the one-way discharge experiment.

4 min까지는 포의 축적부피가 거의 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 4 min 이후 부터는 포의 축적속도가 점차 감소하였고, 7 min에 실험체 대부분의 공간을 포로 다 채웠으며, 7 min 40 s에 부피의 증가가 더 이상 없는 것을 확인하고 실험을 종료하였다.

여기서 주목할 점은 초기 4 min까지 단방향발포 시 포 축적속도보다 3방향발포 시 포 축적속도가 약 3배정도 빠르게 증가한다는 점이다. 이는 포의 주입유량이 3군데에서 일정하게

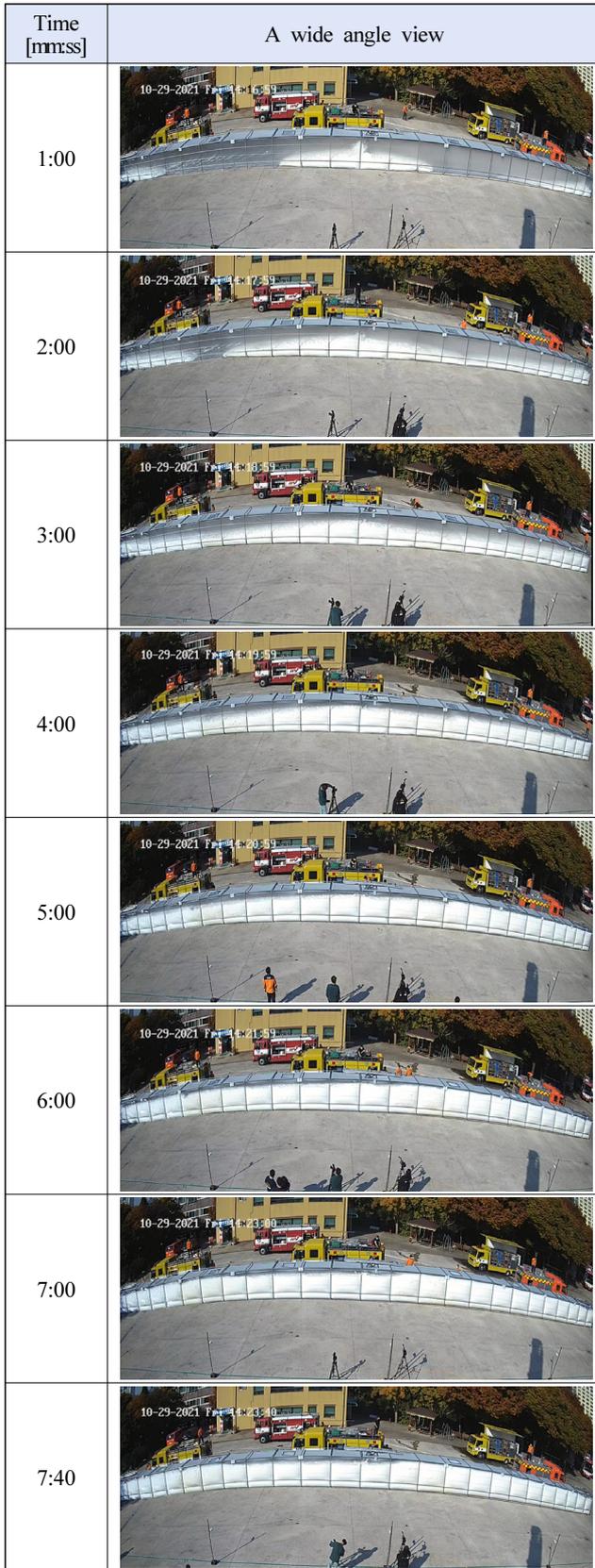


Figure 7. Time series form accumulation photos of the three-way discharge experiment.

Table 2. A Volume Calculation Chart According to the Results of Three-way Discharge Experiment. Unit Accumulation Volume in Each Zone is Identical to 0.72 m³/EA Which Can be Calculated by 0.2 m (Height) × 1.8 m (Depth) × 2 m (Width)

Zone	Time [mm:ss]							
	1:00	2:00	3:00	4:00	5:00	6:00	7:00	7:40
1	3	3	6	8	7	9	10	10
2	3	3	5	8	7	9	10	10
3	2	3	4	7	7	9	10	10
4	1	2	4	6	7	9	10	10
5	0	2	4	6	7	8	10	10
6	0	1	3	5	7	8	10	10
7	0	0	3	5	7	8	10	10
8	0	2	4	5	7	8	9	9
9	0	3	5	6	8	8	8	8
10	2	4	6	7	8	8	8	8
11	3	5	7	8	8	8	8	8
12	4	6	8	9	9	9	8	8
13	4	5	7	8	9	10	8	8
14	3	4	6	7	9	10	10	9
15	1	3	5	7	9	10	10	10
16	0	2	5	7	10	10	10	10
17	0	2	5	7	10	10	10	10
18	0	2	5	7	10	10	10	10
19	0	3	5	7	10	10	10	10
20	0	4	5	8	10	10	10	10
21	1	5	5	8	10	10	10	10
22	2	5	6	9	10	10	10	10
23	3	6	7	9	10	10	10	10
24	3	6	8	10	10	10	10	10
25	3	6	8	10	10	10	10	10
Sum	38	87	136	184	216	231	239	238

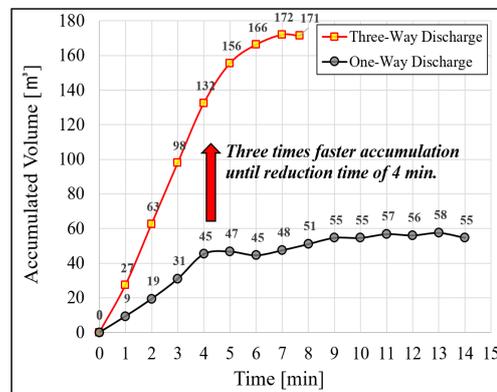


Figure 8. Time series volume of accumulated form in one-way and three-way discharge experiments.

투입되었고, 서로 환원시간에 이르기까지는 상관하지 않는 상태에서 포가 축적된다고 해석할 수 있다. 또한 단방향 발포 시에는 4 min 이후에 45~58 m³에서 포의 축적부피가 더 이상 증가하지 않는 포의 유입-환원 평형상태를 보였지만, 3방향 발포시에는 4 min 이후에도 지속적으로 증가하여 포의 유입-환원 평형이 다소 지연되는 것을 확인할 수 있다. 또한 전체 실험체 부피가 180 m³인 것을 고려할 때, 3방향 발포시에는 포의 환원과 함께 실험체 공간 내 포가 다 채워지고, 내부 압력이 높아짐에 따라 포가 터지는 효과가 일부 작용할 수 있음을 추정할 수 있다. 또한 Table 2의 결과와 같이 포가 양쪽 끝단에서는 다 채워졌으나, 8~13구역에서는 다 채워지지 않는 것은 양쪽 벽에 의해 막혀있는 상황에서 양끝 구역에 포가 다 채워졌을 때 더 이상 수평방향으로 진행하지 못함으로써 고농도의 포가 가운데 방향으로 밀려나오는 현상이라 할 수 있다. 단방향발포 및 3방향발포 실험결과에서 확인할 수 있듯이, 지하공동구 화재는 포 소화약제가 환원시간인 4 min경, 포가 깨지기 전에 다량의 약제를 주입하여 일거에 진압을 해야 하며 체적공간 180 m³를 채우는데 약 7 min 정도가 소요된다는 것을 알 수 있었다. 따라서 소방대원들이 화재를 진압할 시 현장에 도착하여 공동구 공간의 체적을 파악하여 이 실험에서 도출된 결과인 시간에 따른 소화약제량 사용량과 포의 축적부피를 참고하여 진압한다면 효율적이고 선제적인 화재진압을 할 수 있을 것으로 기대된다.

3.2.3 실험(3) - 셸라관창 주수실험

실험(3)의 경우는 Figure 2(c)와 같이 실험체의 한쪽 측면에는 연막탄을 피워 화재의 발원지로 모사하고, 실험체 중간 셸라관창 위치까지 연막탄이 도달하였을 때 셸라관창을 통해 0.7 MPa의 고압수를 방사하였을 때 화재진압 및 연기확대방지효과를 확인하였다. 셸라관창의 자유회전은 실험체의 가로 방향으로 회전하기 때문에 실험체의 체적공간을 막아 수막을 형성하기 보다는 체적공간의 공기 순환이 발생하여 Figure 9와 같이 연막탄의 연기가 반대쪽으로 확대되는 모습을 볼 수 있다. 결과적으로 셸라관창은 연기확대방지 효과는 없는 것이 확인되었고, 고압 주수로 인해 공동구 내부 공간의 열기를 식히거나 열기의 확대 방지에는 효과 있을 것으로 예상된다. 또한 실험체에서 셸라관창은 가로 6 m 범위의 방수 효과를 나타내어 화재초기의 화점위치를 알 수 있을 경우에는 방수 범위 내에서 사용이 가능할 것으로 판단된다.

4. 고발포 소화약제를 활용한 지하공동구 화재진압방안

4.1 고발포 소화약제를 활용한 화재진압방안

길이 500 m 이하의 지하 통신구는 CCTV가 설치되어 있지 않고, 자체 소방시설이 화재로 인해 소실되었을 경우에는 화점의 위치를 파악하기 어렵기에, 지하공동구 화재시 소방대원들이 화재진압하는데 장시간이 소요되는 실정이다. 이에 따라

서 고발포 소화약제를 사용하여 화재를 진압하는 것이 어느 정도 실효성이 있고 실제로 공동구 화재 시 효과가 있는지 소방대원들도 의문을 가졌던 것이 사실이다. 이에, 본 연구에서는 50 m 길이의 대형 지하공동구 모사 실험을 통해서 고발포 소화약제를 현장에서 사용 시 질식소화가 가능하고 최초에 화재출동시 현장에 도착하여 공동구 관계자를 확인하고 공동구의 도면 등 상세자료를 확보한다면 맨홀 및 환기구의 위치에 따라서 충분히 진압작전의 전개가 가능하다는 것을 확인하였다. 이에 따라서 실험결과에 따른 화재진압 전술 방안을 제시하고자 한다.

Figure 10과 같이 공동구 화재 시 초기에 관계자를 확보하고 화점의 위치가 파악되고 환기구, 맨홀의 위치가 실험의 결과와 같은 환경이 조성된다면, 연소범위의 양쪽면에서 또는 방화벽을 기준으로 한쪽으로 포소화약제를 집중 방사하여 질식소화의 효과를 시도할 수 있을 것이다. 이와 같은 전술은 충분한 차량과 인원, 포소화약제가 확보되어야 하며, 공동구 내부구조 및 환경이 실험에서의 조건과 유사하게 조성되어야 가능할 것으로 판단된다. 단계별로 진압작전에 대해서 구성해보면 아래와 같다.

Time [mm:ss]	A wide angle view
1:00	
1:15	
1:23	
1:34	
1:43	
2:11	
2:41	

Figure 9. Experiment 3 results.

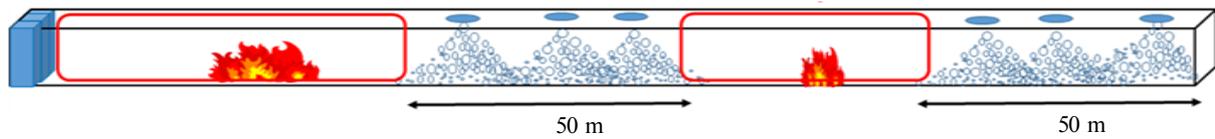


Figure 10. Examples of fire suppression tactics in underground tunnels.

- 1단계: 현장 도착 후 공동구 관계자의 협조 하에 공동구 체적, 길이 등 시설물 현황과 구획상황, 발화장소, 연소범위, 요구조자 유무 등 파악
- 2단계: 요구조자가 없고, 진입이 불가능 시 고발포 소화약제를 이용한 진압작전 전개
- 3단계: 공동구의 구조를 파악하고 체적공간 및 방화구획의 길이를 확인하여 체적공간을 채울 수 있는 맨홀 및 환기구의 폼 주입구 확보
- 4단계: 현장지휘관의 고발포 소화약제 진압작전 가능 판단 시 차량 부서 및 인원 집중 배치
- 5단계: 차량 및 인원 배치 완료 후 현장지휘관의 지휘 아래 일시에 집중 방사

이와 같이 5단계에 걸쳐 진압작전을 전개한다면 포소화약제가 환원시간에 따른 포가 깨지기 전에 일거에 체적공간을 채워서 화재 진압이 이루어 질 수 있을 것으로 기대된다.

4.2 셀라관창을 활용한 화재진압방안

셀라관창은 실험(3)을 통해서 연기의 확대방지에는 비효과적인 것으로 확인되었으나 화재의 열기를 차단하고 현장의 조건에 따라서 Figure 11(a)와 같이 밀폐된 공간의 연기를 다른 배연구를 통해 배출시키는 효과를 거둘 수 있다. 또한 화점의 위치를 최소 근접 범위에서 알 수 있을 경우 화점 부근에서 집중 방수하여 화재를 진압하는 방안을 제시할 수 있다. 실험에서는 셀라관창의 가로 방수 범위 6 m를 확인하였으므로, 화점위치에 따른 직접적 진압 범위를 6 m 내외로 추정할 수 있다. 본 실험

에서는 셀라관창을 수직으로 위치하여 공기 순환 효과가 일어났지만 Figure 11(b)과 같이 관창을 가로 놓혀 수평에 가깝게 방사하였을 경우에는 연기를 밀어내어 열기차단뿐만 아니라 연기의 확대 방지 효과도 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 정책적 제언

지하공동구 화재는 막대한 경제적·사회적 피해를 발생시키고 있으나 화재가 발생하여 공동구 전체로 연소가 확대되었을 경우에는 소방대원들도 화재를 진압할 뚜렷한 방법이 없는 실정이다. 이에 인천소방본부와 국립소방연구원의 공동 연구로 진행된 『고팽창포 소화약제를 이용한 지하공동구 화재대응 실험』을 통해 고발포 소화약제를 사용하여 지하공동구의 최소 체적을 채워 질식소화가 가능한지를 확인하고 거기에 필요한 소화약제량과 필요시간을 측정해 보았다. 추가적으로 셀라관창을 사용하여 지하공동구의 연기 및 열기의 확대를 막을 수 있는지도 실험을 통해서 확인하였으며, 실험 결과를 통해 지하공동구 화재를 진압할 수 있는 방안을 제시하였다.

- 1) 고발포 소화약제 사용 실험 결과: 고발포 소화약제 사용 실험을 통해 한곳에서 고발포 폼 관창을 사용하여 폼을 발포하였을 경우 포소화약제 환원시간(drainage time)에 따라 약 4 min만에 포가 깨지기 시작하였으며 이것은 합성계면활성제의 국내검정기준인 3 min 이상의 수치와 일치하였다. 또한 실험체의 3곳에서 고발포 폼 관창을 이용, 폼을 집중 발포 하였을 경우에는 환원시간이 발생하여 포가 깨지기는 속도보다 포 주입 속도가 빨라서 포가 실험체를 모두 채울 수 있었다. 실험체의 체적공간을 채우는 데는 약 7 min이 소요되었으며 필요한 총 소화약제량은 약 650 L가 사용되었다. 여기서 포 소화약제를 높은 압력으로 주입 시 적은 양으로도 공간이 신속하게 채워짐을 확인할 수 있었다.
- 2) 셀라 관창 사용 실험결과: 셀라관창은 사람이 접근하기 어려운 밀폐된 실내 화재 시 다중방사로 화재를 진압할 수 있는 관창으로서 공동구 실험체의 맨홀 주입구에 수직으로 넣어 방사하였을 경우에는 연기의 확대를 막지 못하고 공기순환에 의해 연기가 더욱 확대 되었다. 그러나 고온의 실내환경에서 실내온도를 낮추는 데는 효과적인 것으로 보인다. 또한 맨홀 주입구에서 셀라관창으로 수평에 가깝게 방사를 하거나 소방대원이 실내 공간에 진입하여 수평으로 방사하였을 경우에는 연기 및 열기를 밀어내어 화재진압의 효과를 거둘 것으로 기대된다.

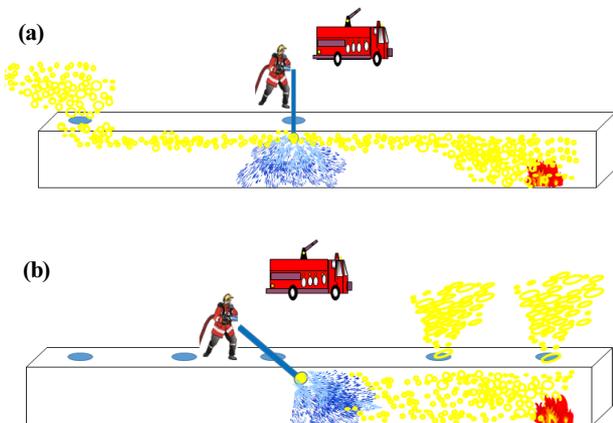


Figure 11. Schematic of smoke flow by (a) vertical and (b) horizontal injection of cellar nozzle.

본 연구를 통해 그 동안 소방대원들이 지하공동구 화재에서 고발포 소화약제를 사용하여 화재진압을 하고 있지만 소화효과에 대해서 가졌던 의문점이 상당부분 해소 되었으며, 셀라관창의 활용 방안에 대해서도 이해할 수 있는 근거가 제시되었다. 하지만 지하공동구의 체적공간이나 길이, 맨홀 및 환기구의 위치 등이 실험의 조건과 동일할 경우에 가능한 것으로, 지하공동구의 형태 및 규모 등 화재현장의 다양한 환경에 따른 현장에서 적용 여부를 위해서는 추가적인 연구가 필요하다.

후 기

본 연구를 위해 도움을 주신 인천소방본부 및 국립소방연구원 관계자 분들께 깊이 감사 드립니다.

References

1. Y. Han and C. G. Song, "Development of Activity Diagrams for Mitigating Large-Scale Disaster Damage During Construction of Underground Urban Utility Tunnels", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 20, No. 1, pp. 281-289 (2020). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.1.281>.
2. J. Lee, "A Study on the Fire Prevention Activities and Suppression Measures of Utility-Pipe Conduit", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 10, No. 4, pp. 63-68 (2010).
3. M. H. Kim, S. H. Lee, S. K. Lee, J. E. Lee and M. C. Lee, "Effect of Radiation Deterioration on Class 1E Cable Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 34, No. 6, pp. 1-7 (2020). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.3f6529d5>.
4. E. H. Jang, M. H. Kim, S. K. Lee, Y. S. Moon and M. C. Lee, "Experimental Study on the Toxicity Characteristics of Non-Class 1E Cables according to Accelerated Deterioration", *Fire Science and Engineering*, Vol. 33, No. 6, pp. 105-113 (2019). <https://doi.org/10.7731/KIFSE.2019.33.6.105>.
5. M. Yoon, J. Koh, H. Park and S. Park, "Estimation of Fire Prediction by Utility Tunnels Fire Experiment and Simulation", *Fire Science and Engineering*, Vol. 15, No. 1, pp. 23-33 (2001).
6. S. Park, W. Kim and M. Yoon, "Experiments on the Behavior of Underground Utility Cable in Fire", *Fire Science and Engineering*, Vol. 16, No. 2, pp. 75-80 (2002).
7. K. Hong, Y. Lee and S. Kim, "A Study of Smokeproof in Underground Culvert", *Fire Science and Engineering*, Vol. 15, No. 4, pp. 57-63 (2001).
8. C. S. Kim, W. S. Lee and H. S. Kim, "Characteristics of Flow Induced by Fire in an Underground Utility Tunnel", *Journal of the Korea Mechanical Technology*, Vol. 5, No. 1, pp. 59-64 (2003).
9. H. J. Kim, C. R. Im, H. K. Yoo and C. H. Chung, "Temperature and Stress Analysis of Box Culvert in Fire", *Journal of the Korean Society of Safety*, Vol. 26, No. 6, pp. 31-44 (2011). <https://doi.org/10.14346/JKOSOS.2011.26.6.031>.
10. D. Kim, D. Yoon and B. Ahn, "Assessment of Ventilation Performance of Underground Tunnel with The Domestic and International Standards by Using Computer Simulation", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 17, No. 3, pp. 79-86 (2017). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2017.17.3.79>.
11. H. Seo, H. Choi, M. C. Lee and C. G. Song, "Establishing a Risk Assessment Scenario for Fire Prevention and Safety Management in Underground Urban Utility Tunnels", *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*, Vol. 19, No. 1, pp. 241-248 (2019). <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2019.19.1.241>.
12. Y. Jang and S. Jung, "Quantitative Risk Assessment for Gas-explosion at Buried Common Utility Tunnel", *Journal of the Korean Institute of Gas*, Vol. 20, No. 5, pp. 89-95 (2016). <https://doi.org/10.7842/kigas.2016.20.5.89>.
13. J. Ko, "Study on the Fire Risk Prediction Assessment due to Deterioration Contact of Combustible Cables in Underground Common Utility Tunnels", *Journal of Korea Society of Disaster Information*, Vol. 11, No. 1, pp. 135-147 (2015). <https://doi.org/10.15683/kosdi.2015.11.1.135>.
14. Y. R. Kim and M. H. Ahn, "Development of Water Spray Nozzle in Underground Culvert", *Journal of the Korea Mechanical Technology*, Vol. 4, No. 1, pp. 131-137 (2002).
15. J. S. Kim, C. W. Lee, S. H. Park and J. H. Lee, "Development of Fire Detection Model for Underground Utility Facilities Using Deep Learning: Training Data Supplement and Bias Optimization", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol. 21, No. 12, pp. 320-330 (2020). <https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.12.320>.
16. W. J. Ju and H. S. Kim, "Implementation of Condition Monitoring System in Underground Utility Tunnels using Inductive Coupler", *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, Vol. 21, No. 8, pp. 1597-1603 (2017). <https://doi.org/10.6109/jkiice.2017.21.8.1597>.
17. H. Y. Kim, S. S. Kim and D. H. Rie, "Development of Auto Mixing System of High Expansion Foam for Optimal Expansion Performance according to Changing Temperature", *Fire Science and Engineering*, Vol. 24, No. 6, pp. 139-144 (2010).
18. K. H. Oh, S. E. Lee, S. J. In and M. S. Lee, "A Study on the Effect Factor to the Foam Generating Characteristics of High Expansion Foam", *Fire Science and Engineering*, Vol. 22, No. 5, pp. 83-89 (2008).