

고속도로 터널 내 화재발생 시 초기 진압용 화재진압시스템(Water-Bulwark System) 개발 연구

백충현*
*(주)서현기술단

A Study on the Development of the Water-Bulwark System for Early Suppression in the Event of Fire in Highway Tunnel

Chung - Hyun Baek*
*Seohyun Engineering

Abstract

In general, fire accidents in tunnels are sufficiently preventable, but the damage is very large. Therefore, the number of highway traffic accidents is high in spring when spring fatigue occurs and the traffic volume for maple travel increases. In particular, when analyzing the cause of death of people killed in fire accidents in tunnels, it is analyzed that most of them are suffocated by smoke. Therefore, in this study, it can be said that it is meaningful to make a social contribution to reduce the number of traffic accident deaths by establishing an efficient fire suppression system for fire accidents in tunnels.

Keywords : Water-Bulwark System, Fire in tunnel, Highway tunnel

1. 서론

SOC 사업은 국민 편의 측면에서 지속적으로 추진되고 있고, 국민소득의 증가는 차량 증가에도 기여함에 따라 획기적인 대중교통으로의 여객 수단이 전환되지 않는 한 앞으로 도 차량 증가로 인한 도로 정체는 더 확대될 것으로 보인다.

기존 지상 도로의 경우 만성적인 도로정체로 시민들의 불만이 증가됨에 따라 전문가들은 도로의 지하화를 추진하게 되었고, 이에 따라 경부 및 경인고속도로, 동부간선도로 등의 지하화가 추진되고 있다. 특히 이러한 고속도로의 경우 고속화를 위해 직선화는 필수적이며, 이에 따라 남한의 경우 산지 비율이 65.2%를 차지함에 따라 터널 건설 역시 불가피한 선택이 될 수밖에 없다.

하지만, 고속도로의 터널 건설 증가에 따라 터널 내 교통사고로 인한 화재 역시 증가하는 문제점이 야기되고 있다. 국회 국토교통위원회에서는 2021년 현재 전국의 고속도로에 설치된 터널의 수가 총 1,090개에 이르고, 이중 92%인 1,002개소가 화재사고 발생 시 골든타임인 7분 이내에 소방대가 도착할 수 없는 것을 지적하였다. 특히

중앙고속도로 부산방향 공근터널, 서울-양양고속도로 서울방향 금남터널, 영동고속도로 인천방향 대관령5터널, 6터널 등 산악지대에 위치한 8개 터널은 19분 도착으로 나타나 사고 발생 시 2차 사고 위험요인이 더욱 높은 것으로 조사되었다.

이러한 사고를 예방하기 위해 기존의 수동식 소화기와 옥내소화설비 및 물 분무 소화설비 등의 화재진압 시스템으로는 한계가 있다.

이러한 측면에서 터널 내 화재사고 발생 시 초기 화재진압을 위한 대안 마련이 시급함에 따라 본 연구에서는 Water-Bulwark System을 개발하여 사고 비용을 최소화하고, 터널 이용자에게 재난안전의 쾌적한 서비스를 제공하기 위한 대책을 수립하도록 하였다.

2. 이론적 배경

2.1 사전 연구

기본적으로 철도 및 도로 터널은 차량 성능 향상에 따라

†Corresponding Author : Chung-Hyun Baek, Seohyun Engineering, 6F, Seohyun Bldg, Heungan-daero, Dongan-gu, Anyang-si, Gyeonggi-do, E-mail: uman2943@naver.com

Received October 5, 2022; Revision December 14, 2022; Accepted December 14, 2022

고속화를 기술성능의 척도로 여김에 따라 터널 역시 직선화를 채택하게 되었고, 우리나라의 지형 특성상 산악 지형이 많음에 따라 터널의 수가 많고, 터널의 길이도 장대화되었다.

이미 이러한 상황에서 불가적으로 터널 내 사고 역시 증가되었고, 그결과 터널 내 화재사고로 인한 사망자가 증가함에 따라 국가적 관심을 불러 일으키게 되었다.

일반적으로 고속도로 터널 내 화재발생 시 기존 소화방재 설비는 수동식소화기, 옥내소화전설비 및 물분무 설비가 있으며, 수동식 소화기는 50m 이내 간격으로 일방통행 터널에서는 4차로 미만 일방통행 터널은 주행차로 우측 벽면에 설치하고, 4차로 이상 터널은 양쪽 측벽에 설치하도록 하였다. 대면통행 터널의 경우 양측 측벽에 교차로 설치하도록 하였고, 옥내 소화전설비는 50m 이내 간격으로 4차로 미만의 일방통행 터널은 주행차로 우측 측벽에 설치, 편도 2차로 미만의 대면통행 터널은 한쪽 측벽에 설치, 4차로 이상 일방통행 터널 및 편도 2차로 이상의 대면통행 터널은 양쪽 측벽에 설치하도록 하였다. 또한 물분무 설비로는 방수구역 25m 이상, 3구역 동시 방수토록 측벽에 설치하여 도로면 전체에 균일하게 방수토록 하였다.

홍창의(2016)는 터널내 교통사고의 특성을 분석하며, 터널 내는 구조적으로 길어깨가 좁아 차량 대피가 어려워 대형 2차 사고 발생 가능성이 높다고 지적하였다. 이는 일반적으로 터널 내에서 운전자의 시야가 좁아짐으로써 속도감이 떨어지는 착시 때문에 과속을 터널 내 교통사고의 주요 원인으로 언급하였고, 터널 내 밀폐된 공간에서의 화재 시 대량의 연기로 인해 산소 공급이 한정되어 불완전 연소가 되는 경우가 많다. 이는 터널 내부에 갇힌 사람들의 질식사예 주된 원인이 되고, 터널 내 다른 차량으로 급속히 전파되어 진화가 어렵고, 인명피해가 크게 발생할 수 있다.

구현민(2015)은 터널 내 화재 발생 시 실제적인 초기 대응의 일환으로 기존의 문제점을 조사하고 분석한 후 터널 내 광센서 선형감지시스템 제안과 밀폐된 터널의 특성을 반영한 피난유도 시스템을 제안하였다.

조현준(2015)은 미분무소화설비 인증기준 연구에서 국외의 경우 실험시의 용도, 부피, 위험정도 등에 따라 화재를 구분하여 실의 치수, 개구부, 노즐의 이격거리, 재질, 높이 등에 대한 정량적 기준을 제시하였고, 국내의 경우 최소 길이, 부피, 벽의 최소 두께, 재질, 외벽 불연재 보강 등의 기준을 제시하고 있어, 국내외 기준의 차이점에 대해 언급하였다. 특히 국내에서는 시험실의 규격이 정해지지 않아 실물 시험이 가능한 공간규모에 대해 미분무소화설비의 적용성을 검증하는데 정확성을 높일 수 있으나, 국외에서는 정형화된 기준이 없이 미분무소화설비의 데이터 축적을 통한 코드화의 어려움을 도출하였다.

해외에서는 스위스 몽블랑터널 대형 화재사고 이후 화

재 발생 시 가능한 터널 밖으로 대피하는 운전자의 대책, 토로터널 관리 안전 전담기구 설립과 모든 증량물 수송차량에 소화기 설치를 의무화하고, 쌍굴 터널의 경우 피난연결통로로 연결하는 피난로 활용방안을 연구하였다. 또한 유럽의 도로터널 방재시설을 터널의 수와 지리적 특성, 터널 길이 특성과의 형태, 비상탈출 통로, 사고 발생 시 터널 접근 방법, 비상 주차대, 도로 배수로, 환기설비를 위해 시 설해야 할 구조적인 필요사항을 설정하는 방안이 연구되었다. 또한 이탈리아에서는 Autostrada 고속도로에서 CO2 농도와 가시거리를 측정하기 위한 검지시스템의 설치와 1,500m 이상 터널에서 환기설비, 비상전화 부스, 소화전, 소화기가 비치된 안전대소 등의 설치 방안 연구가 시행되었다.

교통사고와 관련해서는 서임기 외 3명(2012)은 장대 터널 설계요소에서 교통사고와 관련 변수로 중단경사, 측방여유폭 요인이 관련된 것으로 분석하였고, 측방여유폭은 부(-)의 부호로 측방여유폭이 2m 이하인 경우 교통사고 위험이 있는 것으로 분석되었다. 교통환경 요인의 차로당 연평균 일 교통량은 정(+)의 부호로 10,000대 이상일 경우 사고 발생빈도가 높았고, 시선유도시설 중 장대터널 공동구 내장재 요인이 교통사고와 밀접한 관련이 있는 것으로 분석되었다.

또한 기술분야에 있어 Water-Bulwark System 과 유사한 특허현황을 살펴보면 <Table 1>에서와 같이 한국철도기술연구원의 터널 화재 시 질식소화 및 연기전파 방지를 위한 발포폼 분사 시스템, 창진이앤씨(주)의 터널 확연 확산 방지 장치, 9주)파라다이스산업 외 2의 터널 수벽차단 소화 시스템 등 6개의 유사 선행기술이 있으나, 본 연구에서 개발한 시스템과는 기술구현의 개념과 방법, 그리고 구난 조치에 있어 차별성이 있었다.

<Table 1> The Traffic Accidents by years

Patent name	Patent holder	country of app.
Foam injection system to prevent asphyxiation and smoke propagation during tunnel fire	Korea Railroad Research Institute	Korea
Tunnel Spread Prevention Device	Changun ENC	Korea
Tunnel Water Wall Blocking Fire Extinguishing System	Paradise Industry	Korea

2.2 교통사고 재난유형 통계

‘재난 및 안전관리기본법’에서 ‘재난’이란 국민의 생

명·신체·재산과 국가에 피해를 줄 수 있는 것으로 자연 재난과 사회재난 두 종류로 구분하고 있다. 이중 교통사고는 사회재난에 해당하며 항공사고와 해상사고를 포함하고 있다.

2.2.1 도로터널 운영 현황

<Table 2>에서 보는 바와 같이 전국의 도로터널 현황에서 총 3,645개의 터널이 있으며, 이중 고속국도 1,272개, 일반국도 921개, 특별·광역시도 505개의 순으로 나타났다. 이는 2020년에 비해 총 903개가 증가한 수치로 매우 큰 증가율을 보이고 있다.

<Table 2> The National Road Tunnel Status in 2021

Type	Total	a high-speed national highway	a general national highway	a metropolitan road
Total	3,645	1,272	921	505
Type	a state-sponsored local road	a local road	on a city road	a country road
Total	139	181	460	167

※ 출처 : 국토교통부, 도로교량 및 터널현황조사(2022.05)

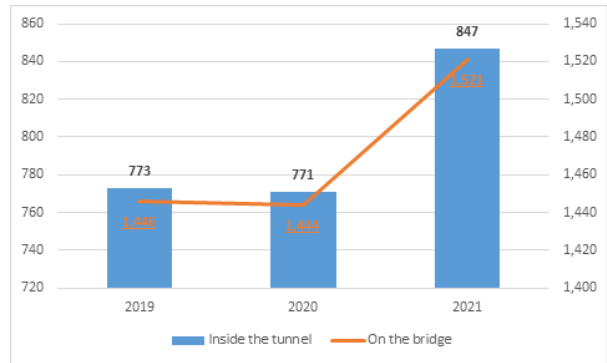
2.2.2 교통사고 발생현황

<Table 3>에서 보는 바와 같이 2019년 대비 지속적으로 전체 교통사고 발생건수와 사망자 수는 지속적으로 감소하고 있는 추세에 있다.

<Table 3> The Traffic Accidents by years

Type	2019	2020	2010
the No. of accidents	229,600	209,654	203,130
the no. of death	3,349	3,081	2,916
the No. of Injured	341,712	306,194	291,608

<Table 3>, <Figure 1>의 2021년도의 단일로에서의 전체 사고발생 건수는 총 90,042건이며, 이중 터널 내에서 총 847건이 발생하여 그 비중은 크지 않지만, 터널 내에서의 사망자 수는 2019년 773명에서 2021년 847명으로 크게 증가한 것으로 분석되었다.



[Figure 1] the death No. in tunnels and bridges

3. 터널 내 화재진압시스템 개발

3.1 Water-Bulwark System 개발

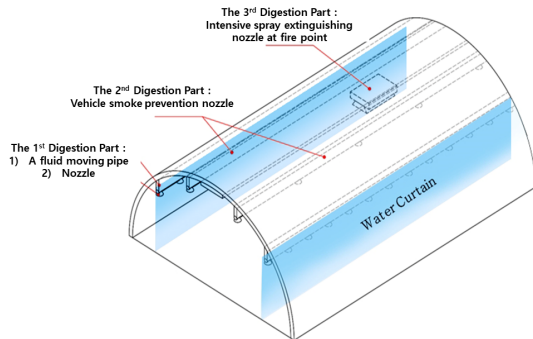
일반적으로 유체를 통한 화재 방어막의 종류는 모두 3종류로 구분된다. 먼저 대피로를 확보하기 위해 형성하는 제1 방어막, 연소가스와 연기 확산을 억제하는 제2 방어막, 그리고 차량 통행 공간을 확보하기 위한 제3 방어막으로 분류된다. 이 때 제3 방어막은 일반적으로 도로의 물리구조가 2차로 이상의 도로에 적용될 수 있다. 터널 내 화재가 발생했을 때 제1 방어막의 터널 길이 방향의 양측에 형성되어 대피로를 확보하고, 확보된 대피로를 따라 터널 내 대피자가 신속히 대피 가능토록 공간을 형성시켜야 한다. 제3 방어막은 2차로 이상의 도로에 적용할 수 있으며, 화재 발생 차선을 포획해서 화재가 발생되지 않은 차량의 차량들이 신속하게 터널 외부로 빠져나갈 수 있는 공간을 형성시킬 수 있다.

이러한 개념을 적용하여 터널 화재진압시스템(Water-Bulwark System)은 터널 내 화재 발생 시 집중 분사 노즐을 화재지점으로 이동해 유체를 집중 분사하여 신속하게 화재를 진압하고, 터널 내부에 설치된 노즐에서 분사된 유체를 통해 방어벽을 형성시켜 연소가스 및 연기의 확산을 방지하고, 방어벽을 통해 확보된 대피로로 신속하게 대피할 수 있도록 하여 연소가스 및 연기로 인한 2차 인명피해를 방지할 수 있는 터널 화재 진압 시스템이다.

3.1.1 시스템 구성요소

[Figure 2]에서 보는바와 같이 화재진압시스템(Water-Bulwark System)의 구성은 5개 핵심 요소로 구성된다. 첫째 터널 내부에서 발생한 화재를 감지하여 화재신호를 생성하는 감지부, 둘째 유체를 공급할 수 있는 유체 공급부, 셋째 대피공간의 확보와 화재를 신속히 진압할 수

있는 소화부, 넷째 소화부의 동작을 제어하는 제어부, 다섯째 분사된 유체를 다시 회수할 수 있는 유체피드백부이다.



[Figure 2] Configuration of the Water-Bulwark System

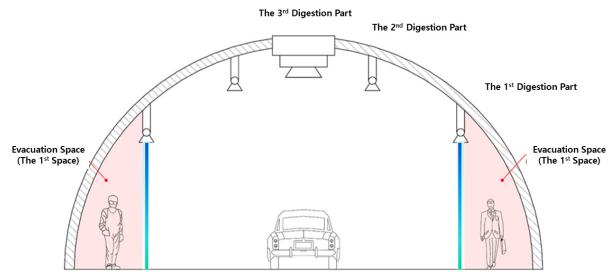
감지부는 터널 내부의 상면, 측면, 하면에 각각 설치되며, 온도를 감지하는 온도감지센서와, 화염을 감지하는 광감지센서를 포함할 수 있는데, 온도와 광량의 값을 설정하고 설정된 이상의 값이 감지 될 경우 화재신호를 생성하여 제어부로 전달하게 된다. 제어부는 감지부로부터 화재신호가 전달되면 소화부를 제어하여 화재를 신속히 진압하고 대피공간을 확보할 수 있도록 한다. 소화부는 제1소화부, 제2소화부, 제3소화부, 제4소화부(未圖示)로 나눌 수 있다.

제1소화부의 구성은 파이프와 노즐로 구성되고, 파이프는 유체의 이동 통로로 터널의 길이방향을 따라 한 쌍으로 서로 마주보게 설치되며, 노즐은 파이프의 길이방향을 따라 복수개로 설치되어진다. 이때 노즐은 제어부에 전기적으로 연결되어 제어부의 명령에 의해 동작되며, 파이프로부터 전달된 유체를 분사하여 화재 시 대피자가 연기 흡입 없이 외부로 안전하게 탈출할 수 있도록 제1방어막을 통해 대피공간을 형성하게 된다.

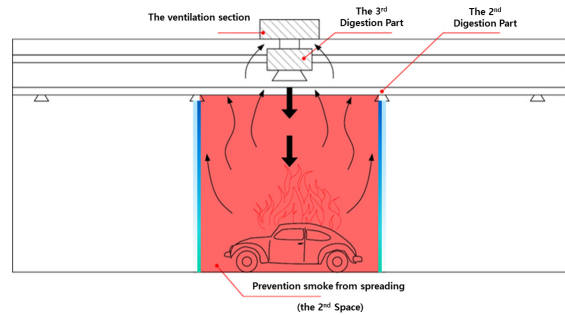
제2소화부는 제1소화부의 구성과 동일하되 설치되는 위치는 제1소화부 사이에 설치되며, 터널 내부에 화재 발생 영역 양측면(터널의 수직방향)에 유체를 분사하여 화재 발생으로 생성된 연기가 터널 내부에 확산되는 것을 방지할 수 있도록 제2방어막을 통해 공간을 형성한다. 제3소화부는 레일부와 노즐부로 구성되며, 터널의 길이 방향으로 레일부가 설치되어 화재가 발생된 대상물에 유체를 집중적으로 분사하여 화재를 진압하는 것으로 노즐부가 터널 내부에서 레일부를 따라 이동가능 하도록 설치된다. 제4소화부의 구성은 제1소화부의 구성과 동일하며, 2차로 이상의 터널에서 화재 발생 시 화재가 발생 된 차선만 포획하여 화재가 발생 되지 않은 차로의 차량들이 신속하게 터널 외부로 빠져나갈 수 있도록 제3방어막을 통해 공간을 형성한다.

터널 내 화재 발생 시 Water-Bulwark System의 작

동 원리는 터널 내부에 설치된 감지센서를 통해 화재를 감지하게 되면 제어장치로부터 신호를 받아 방어막을 형성시키는데, [Figure 3]과 같이 제1 소화부 노즐을 통해 유체가 분사되어 형성된 방어막으로 대피자의 대피공간(제1공간)을 형성하여 대피로를 확보하고, [Figure 4]와 같이 터널의 길이방향에 따라 일정한 간격으로 배치된 제2 소화부 노즐은 화재가 발생된 지점에서 가장 가까운 양측에서 유체를 분사하여 화재로 인한 연기의 확산을 방지하는 방어막(제2공간)을 형성시킨다. 제3소화부의 노즐은 설치된 레일에 의해 이동이 가능한데 화재가 발생된 지점으로 이동하여 대상물에 집중적으로 유체를 분사하여 화재를 효과적으로 진압한다.



[Figure 3] Securing Evacuation Space by Fire Extinguishing Unit 1

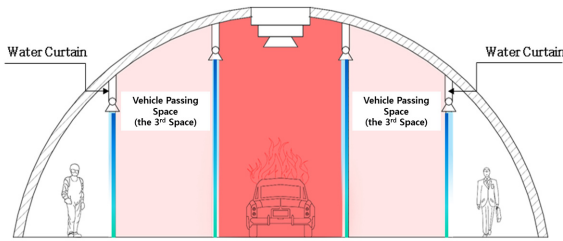


[Figure 4] Operation of the 2nd and 3rd Fire Extinguishing Parts

제어부는 연기의 흐름에 따라 제2소화부에서 형성한 제2공간을 확대 또는 축소하여 화재로 인해 발생된 연기를 환기구 쪽으로 유도함으로써 터널 외부로 효과적으로 배출될 수 있고, 화재의 진행 양상에 따라 유체에 포함되는 화학물질에 대한 배합비율을 결정할 수 있고 최적의 배합비율을 가진 유체를 통해 더욱 효과적으로 화재를 진할 할 수 있도록 시스템을 제어한다.

제4소화부는 제1소화부와 동일한 구성으로 설치되며, [Figure 5]와 같이 2차로 이상의 터널에서 화재가 발생 시 제4노즐을 통해 유체를 분사하여 화재로 인해 차단된 차선만을 포획하여 이용이 가능한 차선으로의 연기 확산

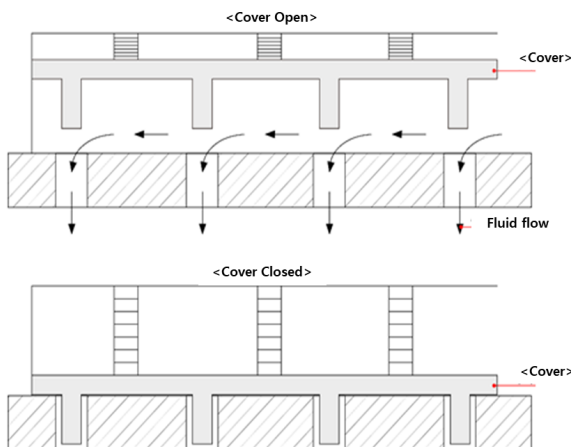
을 방지함으로써 제3공간이 형성되고 이러한 제3공간을 통해 화재가 발생되지 않은 차량이 터널 외부로 신속히 빠져나갈 수 있다.



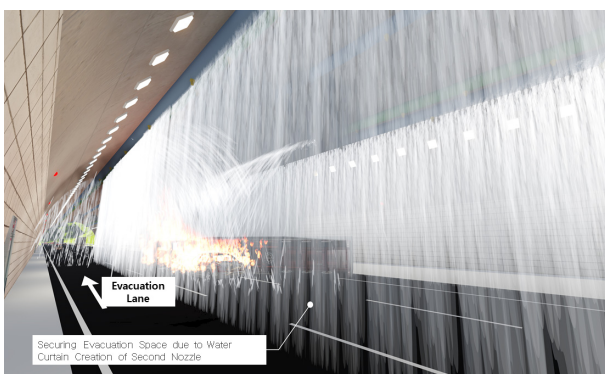
[Figure 5] Securing the Traffic Space in accordance with the Fourth Fire Extinguishing Unit

화재진압 후 유체피드백부에 분사된 유체가 모여지게 되며 필터를 통해 이물질 제거 후 재사용이 가능한 상태로 만들어 유체공급부로 전달하는 역할을 한다.

각각 소화부 노즐의 분사부분에는 잔수(殘水) 배출수단이 있는데 [Figure 6]과 같이 유체분사 시 커버가 개방되고 종료 시 커버가 닫힘으로써 분사부분에 유체가 남지 않도록 하여 유체로 인한 분사부분의 막힘을 방지한다.



[Figure 6] Residual water discharge means of nozzle



[Figure 7] Automobiles can pass through the tunnel by securing space in the passageway when a fire is extinguished

제2소화부에서 연기 확산을 방지하고, 제3화부에서는 대상물에 집중적으로 유체를 분사하여 화재진화(火災鎮火)가 이루어지고, 제1소화부에서 대피공간이 형성되어 사람 대피가 가능하게 되며, 제4소화부에서 통행차로를 포획하여 [Figure 7]과 같이 통행로가 확보되어 자동차 통행이 가능하게 구성되어 있다.

3.1.2 시스템의 장점

일반적으로 교통사고 원인 분석 측면에서 터널 내에서 발생하는 재난사고는 차량의 엔진과열, 적재함 화재, 엔진 결함, 자동차 추돌과 터널 내부 전기적 합선 등에 의해 발생되고 있다. 이러한 요인에 의해 터널 내 화재가 발생했을 때 본 시스템이 가지는 장점으로 크게 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 연기의 흐름에 따라 공간을 확대 또는 축소하여 환기구 쪽으로 유도하여 터널 외부로 효과적으로 배출할 수 있다. 이는 터널 내 화재 사망원인의 대부분인 질식사를 예방할 수 있는 효율적 기술이며, 또한 화재 진행 양상에 따라 유체에 포함되는 화학물질의 비율을 조절가능하다. 이는 적정시기에 적정 유체를 투입하여 최적의 소화효과를 가져올 수 있다.

둘째, 2차로 이상의 터널에서 화재가 발생했을 때 제4노즐로 유체를 분사함으로써 화재로 차단된 차선을 포획하여 나머지 한 차선으로 연기 확산을 방지할 수 있다. 이로 인해 제3의 공간이 형성되고 이 공간을 통해 터널 내의 정상 작동 차량들은 터널 외부로 안전하게 탈출할 수 있도록 하였다.

셋째, 화재 진압 후에도 간단한 청소만으로 해당 시스템의 재사용이 가능하므로 경제성도 확보하였다.

4. 결론 및 향후과제

4.1 결론

고속도로 통행량이 많은 봄철 꽃놀이와 가을철 단풍놀이 때마다 어김없이 반복되는 터널 내 화재사고는 운전자의 인적오류인 졸음운전 및 부주의에 의해 야기되는 경우가 많다.

하지만 이로 인해 발생하는 터널 내 화재사고를 바라보는 국민들의 생각은 왜 항상 이런 안타까운 사고가 반복적으로 발생하는가에 대한 의문이다.

이러한 문제를 해결하고자 본 화재진압시스템인 Water-Bulwark System을 개발하게 되었고, 시스템은

감지부, 유체 공급부, 소화부, 제어부, 유체피드백부 등 5개 파트로 구성되어 다음의 특징을 가지고 있다.

첫째, 시스템은 되어 있다. 감지부는 온도와 광량의 값을 설정하고 설정된 이상의 값이 가지될 경우 화재신호를 생성하여 제어부로 전달한다.

둘째, 제어부는 소화부를 제어하여 화재를 신속히 진압하고 대피공간을 확보할 수 있다.

셋째, 소화부는 4개 unit으로 구성되어 대피자가 연기 흡입없이 외부로 안전하게 탈출하는 제1 방어막을 형성, 또 터널 내부 화재 발생 영역 양측면에 유체를 분사하여 화재 발생으로 생성된 연기가 터널 내부에 확산되는 것을 방지하는 제2 방어막 형성, 또 화재가 발생된 차선만 포획하여 화재가 발생하지 않은 차로의 차량을 터널 외부로 빠져나가도록 유도하는 제3 방어막을 형성하여 다중 안전망을 확보하였다.

넷째, 이 시스템은 한 번 사용 후 폐기 처분 하는 것이 아니라 간단한 이물질 제거 청소만으로 재사용이 가능한 경제성을 확보하도록 하였다.

4.2 향후과제

본 연구를 통해 개발된 시스템의 성능 확보 및 개선을 위해서는 실제 터널에 설치 및 검증 절차가 필요하다. 하지만 비용과 시간 측면에서 이러한 시스템의 성능 검증은 개인이 시행하기에 어려움이 있기 때문에 향후 지자체 및

도로공사 등 기관과의 협의를 통해 검증 절차와 문제점을 개선함으로써 통해 향후 발생 가능한 터널 내 화재사고의 사망자 수를 감소시키는데 혁신적인 역할을 할 수 있을 것이다.

5. References

- [1] M. Kang(2018), Korea expressway corporation's road traffic research institute service program. Transportation Safety Research Laboratory, Keimyung University, Daegu.
- [2] H. Koo(2015), "A study on the integrated disaster management system of road tunnel." Master's thesis, Gachon University.
- [3] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (n.d.), The national statistical portal. <http://kosis.kr>
- [4] H. Cho(2015), "A comparative study on the domestic and foreign standards of unsprayed fire extinguishing equipment." Master's thesis, Seoul National University.
- [5] R. Carvel, G. Marlair(2011), "A history of fire incidents in tunnels." In A. Beard (Ed.), Handbook of tunnel fire safety (pp. 3 - 23). ICE Publishing, UK.

저자 소개



백충현

경기대학교 도시방재학과 공학박사
 건설안전기술사, 토목품질시험기술사
 現 ㈜서현기술단 부사장
 前 경기도청 광역도시철도과장
 관심 분야 : 철도 및 도로 건설안전