

[Research Paper]

## 도로터널 화재시 효과적인 소방활동전략 수립을 위한 시나리오 연구

김학근 · 이지희<sup>\*†</sup>

중앙소방학교 인재개발과, \*경북대학교 국토교통기술지역거점센터

### Scenarios for Effective Fire Fighting Operations during Tunnel Fires

Hak kuen Kim · Ji-hee Lee<sup>\*†</sup>

National Fire Service Academy, \*Daeyeong Regional Infrastructure Technology Development Center, Kyungpook National University

(Received June 5, 2017; Revised July 31, 2017; Accepted August 30, 2017)

#### 요 약

터널화재는 국제적인 관심사이며, 매년 중대 터널화재는 발생하고 있다. 교통밀도가 증가하면서 장대터널은 물론, 더 많은 수의 터널이 건설되고 있어서, 앞으로 터널화재의 잠재위험성이 더 나빠질 수 있으므로 더욱더 심각한 문제이다. 도로터널 화재발생시 소방대원이 효과적인 소방활동 전략을 수립하도록 하는 것이 본 연구의 궁극적 목적이다. 과거 화재 사례로부터 어떠한 사고가 발생하였고, 어떠한 소방활동이 행해졌는지 알아보기 위하여 국내외 73건의 터널화재사고사례를 조사하여 4가지 사고유형으로 분류하였다. 소방활동의 전략수립을 위해 개입시간과 열방출율의 관계로 6가지 화재시나리오 곡선을 도출하였다. 이것은 두 가지 기준 즉, 반응한계와 최대 도착시간에 따라 소방활동의 전략을 수비적, 공격적 전략 중 선택할 수 있도록 하였다. 도로터널 분류 모델은 각 소방기관이 관할 터널의 화재 위험 정도를 화재 진압의 관점에서 평가하고 예방조치를 수립하는데 사용될 수 있다.

#### ABSTRACT

Fires in tunnels are an international concern and fatal accidental fires in tunnels seem to occur on annual. They have the potential to become much worse in the future as more and longer tunnels are constructed and as traffic densities increase. This is a serious problem.

The main purpose of this study is to develop operational procedures for fire brigades in road tunnel fires. This study discussed the past to see what can be learned from the incidents that have already done in tunnels. 73 cases of road tunnel fires domestic and outside of Korea were investigated and classified into 4 incident categories. Among them, 4 tunnel fires are highlighted, focusing on the activities of fire brigades and operation. Regarding the establishment of the strategies for fire fighting, 6 kinds of fire scenario curves have been deducted with regard to the relation between intervention time and heat release rate. It made the choice from the defensive or aggressive fire fighting activities depending on two criteria i.e. response limit and maximum response time. Road Tunnel Classification models can be useful when a fire brigade evaluates fire risk levels in the tunnels under its jurisdiction from the firefighting point of view and sets up preventive measures.

**Keywords :** Road Tunnel Fires, Fire Scenarios, Fire Fighting Operations, Strategy, Classification Models

### 1. 서 론

최근 국내외 터널화재는 빈번하게 발생하고 있으며, 도로터널은 단독사고와 복합사고로 나눌 수 있다. 단독 사고는 차량 결함이 대표적 원인이며, 복합 사고는 주로 차량 추돌로 인한 화재가 대부분이다. 도로터널 및 철도터널은 일반 지상건축물과는 달리 화재발생시 유독가스가 기류의 방향 변화에 따라 배출이 곤란하며, 피난방향과 배출방향의 혼선을 초래하게 된다. 전 세계적으로 터널의 안전수준을 향상시

키기 위하여 실제 화재와 모형화재, 시뮬레이션 해석 등을 이용하여 많은 노력을 기울이고 있다. 도로터널의 안전은 주로 터널 디자인, 터널 운영, 비상대응 등 3가지 요인에 의존한다.<sup>(1)</sup> 비상대응은 터널 디자인과 터널 운영에 따라 크게 달라질 수 있다. 본 연구는 소방대원의 활동전략을 효과적으로 수립할 수 있는 비상대응에 초점을 두고자 한다.

안전한 터널을 위해 디자인과 운영 등 많은 연구가 진행되었지만, 비상대응 특히 소방기관의 활동에 관한 관심은 적었다. 주 원인 중 하나는 화재진압과 구조활동은 소방기

<sup>†</sup> Corresponding Author, E-Mail: [jihee@knu.ac.kr](mailto:jihee@knu.ac.kr), TEL: +82-53-950-7315, FAX: +82-53-950-7315

© 2017 Korean Institute of Fire Science & Engineering. All right reserved.

**Table 1.** Firefighting activities in road tunnels

No.	Year	Tunnel name Country Length (km)	Vehicle where fire occurred	Most possible cause or location of fire	Type of incident	Firefighting
1	2015	Sangju Korea (1.6)	An HGV* carrying Thinner	Collision with wall and fire	Collision and fire. fire spread.	The First emergency response arrived within 20 min. But they were unable to control the fire.
2	2011	Namsan No.1 Korea (1.6)	An car	Engine room overheating	Single fire Fire Spread	The First response fire brigade could not extinguish the fire on early stage. Due to the volume of traffic, shortage of ventilation systems and escape route, it took a long time for the fire brigade to reach the fire.
3	2007	Honam Korea (0.7)	4 cars	Front-rear-collision between 4 cars	Collision and fire. fire spread.	The First response fire brigade could not extinguish to the fire. Due to the power supply, it didn't work ventilation system.
4	2005	Dalsung No.2 Korea (0.99)	An HGV carrying missile propel.	Engine room overheating	Single fire No fire Spread	The First response fire brigade could not even approach to the fire. explosion, operation break of ventilation
5	2005	Frejus France/Italy (12.9)	An HGV carrying tyres	Engine fire	Single fire Fire Spread	Fire extinguished before it reached glue load in 4th lorry.
6	2004	Frejus France/Italy (12.9)	An HGV	Breaking system	Single fire	The fire was extinguished easily.
7	2003	Floyfjell Norway (3.1)	A car	Collision with wall and fire	Collision(wall) and fire. No fire spread.	Fire brigade arrived after 6 min. and quickly extinguished the car fire.
8	2003	Licica Slovenia (0.8)	An HGV carrying a cargo of aluminium beams	-	Single fire	The fire brigade extinguished the fire on arrival.
9	2002	Tauern Austria (6.4)	A lorry	A faulty engine	Single fire	The fire brigade was able to bring the fire under control very quickly.
10	2001	Gleinalm Austria (8.3)	A car	Front collision between a lorry and a car	Collision and fire. No fire spread.	The fire was successfully extinguished by the fire brigade shortly.
11	2001	St. Gotthard Switzerland (16.9)	2 HGVs, one carrying a load of rubber tyres	A head on collision between 2 lorries.	Collision and fire. Fuel spill. Fire spread.	The First response fire brigade could not extinguish the fire on early stage.
12	2001	Tauern Austria (6.4)	2 cars	A head on collision	Collision and fire. No fire spread.	The fire was extinguished quickly by the driver of one of the cars.
13	2000	Laerdal Norway (24.5)	A bus transporting about 50 passengers	-	Single fire	The fire was small and was easily dealt with by the bus driver.
14	2000	Saukopf Germany (2.7)	A car	-	Single fire	The fire brigade extinguished the fire easily.
15	2000	Cross harbour Hong Kong	A car	-	Single fire	The First emergency response arrived within 3 min. But they were unable to control fire. The fire brigade arrived 2 min later.

**Table 1.** Firefighting activities in road tunnels (continued)

No.	Year	Tunnel name Country Length (km)	Vehicle where fire occurred	Most possible cause or location of fire	Type of incident	Firefighting
16	2000	Tauern Austria (6.4)	An HGV	-	Single fire	This fire was dealt with and was extinguished within half an hour by firefighters on both sides of the vehicle.
17	1999	Candid Germany (0.252)	A car	Engine compartment	Single fire	Due to the volume of traffic, the fire brigade took a long time to reach the fire, but on arrival the fire was quickly extinguished.
18	1999	Tauern Austria (6.4)	A lorry with a cargo of spray cans including paints	Front-rear-collision between 4 cars and 2 lorries	Collision and fire. Fuel spill. Fire spread.	The fully developed fire could not be extinguished until substantial long time.
19	1999	Mont Blanc France/Italy (11.6)	A lorry with a flour and margarines	Diesel fuel leaking onto hot surfaces of engine compartment	Oil leakage and fire Fire spread	The First response fire brigade could not even approach to the fire.
20	1990	Mont Blanc France/Italy (11.6)	An HGV with 20 tons cotton	Motor	Single fire	The French firefighters arrived within 10min. Despite the fact that the fire had spread to involve the entire vehicle by this point, the firefighters were able to control the blaze and extinguish it.
21	1988	Mont Blanc France/Italy (11.6)	An HGV	-	Single fire	The French firefighters were able to extinguish the fire on arrival.

\* HGV means Heavy Goods Vehicles.

관이 독점적으로 수행하며, 일반인들이 소방기관의 업무가 어떻게 수행되는지 정확히 이해하기 어렵다. 실제로 터널화재시 소방대원은 모든 과정에 참여하여 각 대응단계마다 중요한 역할을 담당하고 있지만, 진압, 탐색 및 구조 대응에 많은 어려움이 따르고 있다. 1999년 프랑스 몽블랑 터널화재사고<sup>(2)</sup>의 경우 차량의 연소에 의해 고온과 농연으로 소방대원의 현장접근이 어려웠고 터널 내부로 진입한 소방대원과 터널외부와외의 통신 장애로 효율적인 진압작전의 전개가 힘들었다. 특히 사고현장이 관할 소방서와 원거리에 있어서 접근경로 및 거리로 인해 현장도착이 지연되었다. 이와 같이 도로터널 화재는 기본적으로 차량에 의해서 발생하며, 고온과 농연으로 접근이 어렵고, 통신장애로 인한 소통부재, 도심지가 아닌 외곽지의 경우 차량의 통행량이 많다면 더욱더 현장접근이 힘들어서 짧은시간 내에 화재를 진압하기는 힘들다는 것을 하나의 사례만으로도 잘 알 수 있다.

본 연구의 주관심사는 비상대응을 위한 분야로써 도로터널 화재 발생시 소방대원이 효과적인 소방활동 전략을 수립하는데 유용한 화재시나리오와 터널분류모델을 개발하여 소방대원의 안전은 물론, 요구조자의 안전과 재산피해를 최소화하는 것이 궁극적 목적이다.

### 1.1 연구범위 및 용어정의

도로터널의 정의는 도로의 일부로서 자동차의 통행을 위해 지붕이 있는 지하구조물을 말한다.<sup>(3)</sup> 터널은 사용목적에 따라 분류하면, 교통용 터널과 수로용 터널, 기타 터널로 나눌 수 있다. 이 중 교통용 터널은 철도터널, 도시철도, 도로터널, 지하보도 터널 등이 있다. 도로터널 화재와 철도터널 화재사례를 분석한 내용에 의하면,<sup>(4)</sup> 철도시스템은 일반적으로 여러 대의 기차로 구성되어 수백명의 승객이 타고 있다. 따라서 일단 화재가 발생하면, 도로터널 화재에 비교해서 희생자가 훨씬 더 많을 가능성이 높다. 실제 2003년 대구지하철 화재와 1995년 Azerbaijan 지하철 화재에서 200명 이상의 희생자가 발생한 것이 그 사례이다. 그에 비하면, 도로터널 화재의 희생자는 철도화재보다 훨씬 적다.<sup>(4)</sup> 현재까지 사고사례를 보면, 철도터널 화재는 많은 사상자를 발생시키고, 도로터널 화재는 자주 발생하는 경향이 있다.

과거에 발생한 화재사례로부터 귀중한 교훈을 얻고자 할 경우에는 그 사례가 많으면 많을수록 좋다. 본 논문에서는, 1949년부터 발생한 터널화재 중 사고사례가 많은 도로터널을 대상으로 하였다.

도로터널의 화재안전기준(NFSC 603)의 제3조 정의<sup>(5)</sup>에 의하면, ‘도로터널이란 도로법 제8조에서 규정한 도로의

일부로서 자동차의 통행을 위해 지붕이 있는 지하 구조물로서 지상 구조물이 아닌 지하구조물임을 명시하고 있다.

소방활동이란 화재의 예방·경계·진압·조사, 화재·재난·재해 그 밖의 상황에서의 구조구급 등의 업무와 이와 관련된 업무(교육훈련 포함) 수행에 필요한 활동을 말한다. 소방활동은 화재진압활동, 인명구조활동, 구급활동, 안전교육활동, 소방차량 운행활동, 기타활동 등이 있다.

**1.2 연구방법**

국내외 터널화재 사고사례를 문헌과 인터넷 사이트를 통하여 수집한 후 사고유형을 분류하며, 각각의 화재사례에 따른 소방진압활동을 조사하였다. 또한 도로터널 분류 모델을 정립하여, 소방활동 전략 수립을 위한 화재시나리오 곡선을 개발하였다. 아울러 터널화재를 분류하여 도로터널의 화재시 소방활동 계획 수립을 용이하도록 제시하고자 한다.

**2. 연구내용**

**2.1 사고유형분류**

도로터널 화재시 효과적인 소방전략 및 전술을 개발하

기 위해서는, 과거 발생한 화재사례를 수집하고 그 당시 소방진압활동의 조사가 필수적이다. 따라서, 1949년 이후 발생한 도로터널 화재에 관한 사례를 파악하기 위하여 문헌과 인터넷 사이트<sup>(6-8)</sup>를 통해 조사를 수행하였다 그 결과 국외 69건과 국내 4건 총 73건의 화재사례에 관하여, 발생연도, 터널명, 국가, 터널길이, 화재발생차량, 화재원인, 사고유형, 진압활동을 조사하였다. 지면관계상 본 논문에는 21건의 사례를 조사한 내용은 다음과 같다(Table 1).

73건의 화재사고유형을 분류한 결과 “단순화재”와 “충돌화재” 2가지로 분류할 수 있다. 단순화재는 화재발생초기에 단지 한 대의 차량만이 관련된 화재사고이며, 충돌화재는 화재발생초기에 1대 이상의 차량이 관련되어 차량간 충돌 혹은 터널 벽과의 충돌로 이어지는 화재이다. 조사대상 73건 중 단순화재는 50건(68.5%), 충돌화재는 23건(31.5%)이었다.

여기서, 화재확산의 여부에 따라 사고 유형을 다음 4가지로 분류하였다(Table 2<sup>9)</sup>). 특히 화재확산에 초점을 맞추는 것은 터널화재의 심각성을 결정하는 주된 요소는 초기화재가 화재발생 차량으로 한정되는지 아니면, 다른 곳으로 전파되는지의 여부에 따라서 화재의 심각성이 결정되기

**Table 2.** Classification of Incidents

Incident Category	Definition
IC 1	Single Fire That does not Spread to Other Vehicles
IC 2	Single fire That Propagates to Neighbouring Vehicles
IC 3	Collision Fire That is Limited to the Vehicles which are Involved in the Collision
IC 4	Collision Fire That Spreads to Other Vehicles which are not Involved in the Collision

**Table 3.** Analysis on the Previous Fires in Road Tunnels

Type (%)	Category	No. of Fire (%)	Location of Original Fire	Casualties
Single Fire 50 (68.5%)	IC 1	44 (60.3%)	HGV : 26 Bus or Coach : 14 Passenger Car : 3 Mobile Crane : 1	Casualty : 11 No Casualty : 32
	IC 2	6 (8.2%)	HGV : 5 Car + Car : 1	In All Fires, Casualties Occurred
Collision Fire 23 (31.5%)	IC 3	7 (9.6%)	Motorcycle + 2 Cars : 1 Lorry + Bus or Car : 2 Car + Wall : 2 Car + Car or Bus : 2	In 5 Cases, Casualties Occurred
	IC 4	15 (20.5%)	HGV + HGV : 1 HGV + Car (Bus) : 3 HGV(s) + Cars : 5 HGV + Wall : 2 car + Car : 1 Not Known : 3	In all Fires, Casualties Occurred
	Not Known	1 (1.4%)	Not Known	Not Known

때문이다. 결국 화재확산은 화재의 세기와 크기를 증가시키고, 소방대 활동을 방해하는 주요 요인이 된다.

본 연구에서 조사한 터널화재 73건 중 단순화재는 50건이며, IC 1는 44건, IC 2는 6건으로 분류되었다. IC 1(단순화재, 확산 없음) 중 26건의 화재는 화물트럭, 3건은 승용차, 14건은 버스나 승합차, 그리고 1건은 크레인 차량에서 발생했다 2005년 제2 달성터널에서 발생한 미사일 발사체를 적재한 트럭으로 인한 화재가 여기에 속한다. IC 2(단순화재, 확산 있음)는 6건이었다. 5건은 다량의 가연물, 예를 들어 타이어(프레슈스터널, 2005년), 9톤의 마가린과 12톤의 밀가루(몽블랑터널, 1999년), 폴리스틸렌 600박스(스자카터널, 1967년), 휘발유(살랑터널, 1982), 11톤의 이황화탄소(네델란드터널, 1949년)를 적재한 화물트럭, 가스탱크로리에서 발생했다. 이와 같은 5건은 화재진행을 가속화시킬 수 있는 고유한 요소를 가지고 있다. 즉 연료의 누출(몽블랑터널, 1999년), 부적절한 활동절차(스자카터널, 1967년), 폭발(살랑터널, 1982년, 네델란드터널, 1945년), 엔진룸 과열(남산터널, 2011) 등이다.

충돌화재는 23건이었으며, IC 3(충돌화재, 확산 없음)는 7건이었다. 화물트럭-버스, 승용차-벽, 승용차-승용차 또는 버스, 오토바이와 터널벽간의 충돌에 의한 화재사고였다. 이 중 5건의 화재사고에서 사망자가 발생했다. IC 4(충돌화재, 확산 있음)는 15건이었다. 이 경우는, 모두 충돌하는데 한 대 이상의 화물트럭(Heavy Goods Vehicle)이 연관되어 있었다. 그리고 모두 화물트럭이나 화물트럭과 충돌한 차량에서 화재가 시작되었고, 사망자가 모두 발생하였다.

이와 같이 73건의 터널화재를 조사해본 결과, 화물트럭(HGV)이 참여한 거의 모든 충돌화재는 다른 차량으로 화재가 확산되었고 그 결과 인명피해가 발생하였다. 따라서 이러한 유형 즉, IC 2, IC 4의 터널화재 발생시에는 인명위협과 화재확산에 따른 갑작스러운 온도증가와 고온의 열기류를 고려하여 소방활동의 전략을 수립하여야 한다.

## 2.2 화재사례에 따른 소방활동 조사

과거의 도로터널 화재사례로부터 공통적인 중요변수를 찾기 위하여 소방활동을 조사하였다. 특히 IC 2(단순화재이며 확산있음), IC 4(충돌화재이며, 확산있음)의 사례 중 화물트럭이 관계된 화재사례를 선택하였다. 즉, 국외에서 발생한 3건의 대형터널화재사고와 최근 국내에서 발생한 1건의 사고를 비교하였다. 이러한 비교작업을 통해 각각의 도로터널 환경에서 소방 활동의 특성을 이해하고, 소방과 도로관리의 활동방재설비의 작동을 평가할 수 있다. 4건의 대형도로터널 화재에 관한 소방활동 조사는 다음과 같다 (Table 4).

도로터널 화재시 소방활동에 있어서 가장 중요한 것 중의 하나가 연기와 마주하느냐, 그렇지 않느냐의 여부임을 확인할 수 있었다. 상주터널을 제외하고 3건의 화재는 모두 연기와 맞서 접근한 소방대는 현장도착이 늦지 않았음

에도 불구하고 화점으로의 접근이 불가능했다. 반면 기류를 타고 접근했던 선착대는 화재를 공격할 수 있는 거리까지 접근할 수 있었다.

소방대의 도착시간은 빠르면 빠를수록 좋지만, 여러 가지 현장의 변수로 인해 일정한 도착시간을 결정하는 것은 어렵다. 그러나 화재사례를 통해 살펴본 결과, 충돌화재의 경우는 화점에 접근가능한 시간이 매우 짧았다. 세인트 고타드 터널화재의 경우는 충돌 후 7분 경과시 이미 화재진압이 불가능한 것으로 추정되었다. 하지만, 차량의 결함으로 인한 화재의 경우 즉, 단순화재인 경우 소방대의 접근가능시간은 좀 더 여유가 있었다.

조사항목은 시나리오 타입, 화재가 급속히 전파된 원인, 화재 발화장소, 관련 차량 대수, 화재진압완료시간, 화재도착거리 및 시간, 선착대팀의 활동내용, 제연시스템, 초기 기류 방향, 비상시 신선공기 공급, 기류의 변화, 소방대간의 조정 및 협동 등이다.

몽블랑터널은 프랑스와 이탈리아를 연결하는 대면통행방식의 터널로서 1965년에 개통하였다. 전체길이는 11,600 m이며, 각 절반을 프랑스와 이탈리아가 관리하고 있다. 1965년 이후 몽블랑터널에서는 17건의 화재가 발생한 것으로 기록되어있다. 1999년에는 9톤의 마가린과 12톤의 밀가루를 실은 화물트럭에서 발생한 대형화재였다. 특히 화재경보 후 13분만에 접근 가능거리가 약 10 m에 이르렀으며, 이것은 급속한 열방출량으로 더 이상 접근이 불가능하였음을 알 수 있다. 34대의 차량피해와 39명이 사망하여 3년간 터널을 폐쇄하였다.

타우에른터널은 대면통행터널로써 오스트리아 찰츠부르크 지방에 위치하며 폰나우와 룬나우지방을 연결하고 있다. 독일, 이탈리아, 슬로베니아 국가들간의 남북을 연결하는 중요한 터널이다. 오스트리아에서 가장 길고, 총 연장 6,400 m이다. 타우에른 터널화재는 위험물 및 화물을 실은 화물트럭이 정차한 앞 차량을 보고 정차하려고 하였으나 차량을 충돌 한 후 12명이 사망하고 트럭 16대, 차량 24대가 손상되었으며, 16시간 만에 진압되었다.

고타드터널은 스위스에 위치하고 있으며, 이탈리아 국경과 독일, 프랑스를 연결하는 스위스-알프스산맥을 관통하는 주요 유럽도로망의 일부이다. 1980년 개통하였고 총연장 16,918 m이다. 2001년 사진필름통 등 다양한 화물을 적재한 트럭이 남쪽에서 북쪽으로 주행하고 있었고, 터널 오른쪽 벽과 충돌하고 그 후 남쪽 터널 입구에서 1.1 km 떨어진 지점에서 반대쪽 차선의 왼쪽 벽과 충돌했다. 반대쪽 차선에서는 타이어를 적재한 화물트럭이 남쪽을 향해 오고 있었다. 첫 번째 트럭에서 디젤이 누출되었고, 뱃데리에서 발생한 스파크로 인해 누출 연료가 인화되어 화재는 매우 빠른 속도로 확산되었다. 화재발생으로 11명이 사망하고, 3명은 병원으로 이송되었다. 총 23대의 차량(13대의 화물트럭, 10대의 승용차)이 손상되었다. 이후 터널은 2달 동안 폐쇄되었다.

**Table 4.** A Comparisons Between Four Major Tunnel Fires

Items	Mont Blanc Tunnel Fire(1999)	Tauern Tunnel Fire (1999)	St. Gotthard Tunnel Fire (2001)	Sangju Tunnel Fire (2015)
Type of Scenario (cause of Fire)	Single Fire and Fire Spread (IC 2) (Technical Defect)	Collision Fire and Fire Spread (IC 4) (Front-rear Collision)	Collision Fire and Fire Spread (IC 4) (Head-on Collision)	Collision Fire and Fire Spread (IC 4) (Front-rear Collision)
Estimated Causes of Rapid Progress of the Fire.	Fuel Leakage in Engine Compartment. Supply of the Fresh Air. High Fire Loads (Margarine and Flour)	Fuel Leakage onto Road Surface. Multi Collision. High Fire Loads (Various Types of Spray Cans)	Diesel Spill on Road Surface. Explosion of Tyres. High Fire Loads (film Rolls and Tyres)	Vehicle Overturning with Combustible Goods (Thinner Explosion)
Original Fire Location	An HGV with much Combustible Goods.	Between Multi Collided Cars and HGVs	Between HGVs Collided Each Other.	Vehicle with Much Combustible Goods.
Number of Involved Vehicles	26 vehicles and 8 HGVs	16 HGVs and 24 cars	13 HGVs and 10 cars	17 cars
Estimated Time for Control of Fire	About 53 hours	About 16.1 hours	About 6.2 hours	About 5 hours
Accessible Distance to a Fire and Duration Time	Italian Side : About 10 m After 13 min. (Patrol Man)	500 m After About 30 min. (Since the Collision Happened, the Author's Estimation)	15-20 m After 7 min.	Sangju IC 20 km About 32 min.
	French Side : About 2800 m After 23 min.	There was no Attempt to Access from the North.	2500 m After 13 min.	Sunsan IC 7.9 km About 20 min.
Work of the Earliest Response Team	The Patrolman could not Advance and went Back into the Shelter.	They were Blocked by the smoke. Later, They Advanced Further and Rescued the Trapped.	The Firefighters Started Their Operations and Succeeded in Protecting the Rear Part of the HGV and Stopping the Fire Spread.	They were Blocked by the Smoke.
	French Teams had Difficulty in Advance and had to Escape to the Shelters.	They did not Enter the Tunnel for a long Time.	They were Seriously Hampered in Their Approach.	-
Ventilation	Transverse Type with 4 Supply Air Ducts and 1 Reversible Duct.	Transverse Vent. with 4 Vent. Sections.	Transverse Vent. with 6 Vent. Stations and 10 Vent. Sections.	Transverse Vent. with 4 Vent. Sections.
Initial air Flow Direction	From Italian Side to French Side (South to North)	From North to South Direction	From South to North	From South to North
Emergency Fresh Air	Max. Fresh Air to Vent. Section Containing Fire	Cut Fresh Air to Vent. Section Containing Fire.	Cut Fresh Air to 30% of full Capacity Vent. Section Containing Fire	-
Variation of the Air Flow	No	Yes	No	Yes
Coordination and Cooperation between fire Teams	No.	It Appears to be Made.	It Appears to be Made.	Yes

상주터널은 경상북도 상주시에 위치하며 총 연장 1,685 m이다. 중부내륙고속도로 창원방향으로 가던 위험물을 적재한 화물차량이 터널 내 정체구간 최후미를 늦게 발견하고 급제동을 하면서 적재한 위험물이 누출되면서 터널벽을

충돌한 후 스파크 불티가 접촉하여 화재가 발생하였다. 차량전소 2대 등 총 17대 차량이 손상되었고, 사망자는 1명, 경상자는 19명이었다.

위의 4가지 터널화재는 화물트럭이 관련된 사고를 대상으로 하였지만, 몽블랑 터널은 단순화재에서 화재확산이 있었고, 나머지는 충돌화재이면서 화재확산이 된 화재였다. 모든 화재사태가 화재진압활동, 인명구조활동, 구급활동 등의 소방활동은 화재의 급격한 성장으로 인해 진입이 어려웠고, 가장 빠른 진입은 고타드터널의 7분, 가장 지연된 터널은 상주터널의 32분 경과였다. 이것은 정체여부에 따른 현장도착시간의 지연과 가연물의 성격에 따른 급격한 성장으로 인해 진입 가능한 거리까지 도달할 수가 없었기 때문이다. 그 외 연기로 인해 소방활동에 많은 제약이 따랐음을 확인할 수 있었다. 그 외에 제연시스템, 초기 기류 방향, 비상시 신선공기 공급, 기류의 변화 등은 터널에 따라서 차이가 있었으나, 4곳 모두 제연 효율이 우수한 횡류제연방식을 갖추고 있었고 소방대간의 조정 및 협동은 몽블랑터널을 제외하고는 원활하게 이루어졌다.

### 3. 도로터널 화재시 소방활동 전략

#### 3.1 전략의 선택

본 연구는 터널화재 사고시 소방대원의 효과적인 소방활동 전략 수립을 위한 연구로써, 소방대원의 고유의 대응절차를 무시할 수 없다. 전략(Strategy)이란 현장지휘자가 소방활동의 목적, 즉 구조작업을 수행하고, 화재의 위치를 확인, 제한, 진압하여 인명과 재산을 보호하기 위하여 결정하는 일반계획 또는 행동절차라고 정의할 수 있다. 반면, 전술(Tactic)은 전략을 달성하기 위해 현장 지휘관에 의해 선택된 필요한 활동 또는 행동이라고 정의한다.<sup>(10)</sup> 따라서, 선택된 전략에 따라 여러 가지 변수 즉, 접근경로, 개입시간 등에 대한 후속결정이 이루어지므로, 상황에 따라 적절한 전략을 선택하는 것이 대단히 중요하다.

일반적으로 소방진압 및 구조에 적용할 수 있는 전략은 공격적 전략과 수비적 전략이다. 공격적 전략(offensive strategy)은 화점에 대한 공격적인 내부공격을 위해 빠른 수관 전개를 강조하는 반면, 수비적 전략(defensive strategy)은 화재에 노출된 인명을 보호하거나, 화재를 제한하는 것이 중요한 초기에, 대형 또는 확장하는 소방활동시 채택되는 전략이다.<sup>(10)</sup>

전략적 계획과 실행전술을 잘 선택하고 실행하느냐는 화재상황 파악에 따라 달라진다. 화재규모가 커서 선착대의 능력을 초과하는 것으로 예상되면, 수비적 전략을 선택해야한다. 다시 말하면, 선착대는 작업 우선순위를 화재의 세기를 제압할 수 있을 때까지 화재확산을 막고 초기화재를 제한하는데 두어야한다. 반면, 초기화재가 작거나 화재가 천천히 진행될 때에는 공격적 전략이 효과적인 화재제어 전략이 된다.

#### 3.2 소방활동 전략을 위한 화재시나리오 곡선

도로터널 화재의 사고유형을 분류하여 다음과 같은 6가지 화재시나리오 곡선을 개발하였다.<sup>(11)</sup> 즉, 시나리오 곡선 A, B, C, D 그리고 변형곡선 a, c 이다. 이 화재시나리오 곡선은 소방대가 각각의 화재타입에 따른 특징을 파악한 후 그에 따라 적절한 화재진압 및 구조전략을 수립하는 데 도움을 줄 수 있다.

소방대의 대응한계기준을 알아볼 수 있는 방법은 열방출율, 화점과의 거리, 복사열의 관계를 보여주는 방정식을 이용하는 것이다. 열방출율(HRR)은 다음 식<sup>(12)</sup>으로 계산된다. 여기서,  $\dot{q}_s''$ 는 복사열,  $Q$ 는 열방출율,  $R$ 은 화점에서 소방대까지의 거리이다.

$$\dot{q}_s'' = 1/3 \cdot \frac{Q}{(4\pi R^2)}$$

소방대가 방호복을 착용하고 견딜 수 있는 복사열  $5 \text{ kW/m}^2$  (PIARC권장사항)에 노출될 때, 대략 5분을 견딜 수 있고,<sup>(13)</sup> 이 때 이상적인 화재진압 거리를 10 m라고 가정하면, 위 식에서 열방출율 값은 약 20 MW로 계산된다. 따라서, 본 연구에서는, 20~30 MW 규모의 화재를 도로터널의 대응한계기준(Response limit area)으로 하였다.

곡선 A는 단순화재이며, 화재확산은 되지만, 소방대 또는 터널이용자에 의해 화재초기에 진압하는 경우이다. 열방출율은 대응한계기준을 넘지 않고, 소방대의 개입으로 진화되는 경우이다. 몽블랑 터널 화재(1990)가 대표적인 경우이다.

곡선 a는 단순화재이며, 화재확산의 가능성이 없어 소방대의 개입이 필요하지 않다. 열방출율은 작고 대응한계보다도 작다. 대부분 소규모 화재가 해당된다.

곡선 B는 단순화재이면서 화재확산이 된다. 열방출율은 소방대의 개입 전에 이미 대응한계를 넘는 경우로써, 몽블랑 터널화재(1999), 남산터널화재(2011)이다.

곡선 C는 충돌화재로써 급격히 증가하지만 화재확산은 없다. 열방출율은 화재확산을 일으킬만큼 높지 않아서 소방대의 개입으로 감소된다. 프렌더(Pfänder) 터널화재(1995)가 해당된다.

곡선 c는 충돌화재로써 급격히 증가하지만 화재확산 가능성은 없다. 열방출율은 화재가 확산될만큼 크지 않고 대응한계보다도 작다. 플뢰이피엘(Fløyfjell) 터널화재(2003)가 해당된다.

곡선 D는 충돌화재로써 급격히 증가하면서 화재가 확산한다. 그로 인해 열방출율이 급격히 상승하며 계속적으로 화재확산이 발생한다. 타우에른(Tauern)터널(1999)와 세인트고타드(St. Gotthard)터널화재(2001)가 여기에 속한다. 국내의 호남터널 화재(2007), 상주터널(2015)도 여기에 해당된다.

소방활동에 있어서는 가장 중요한 문제가 화재 곡선별

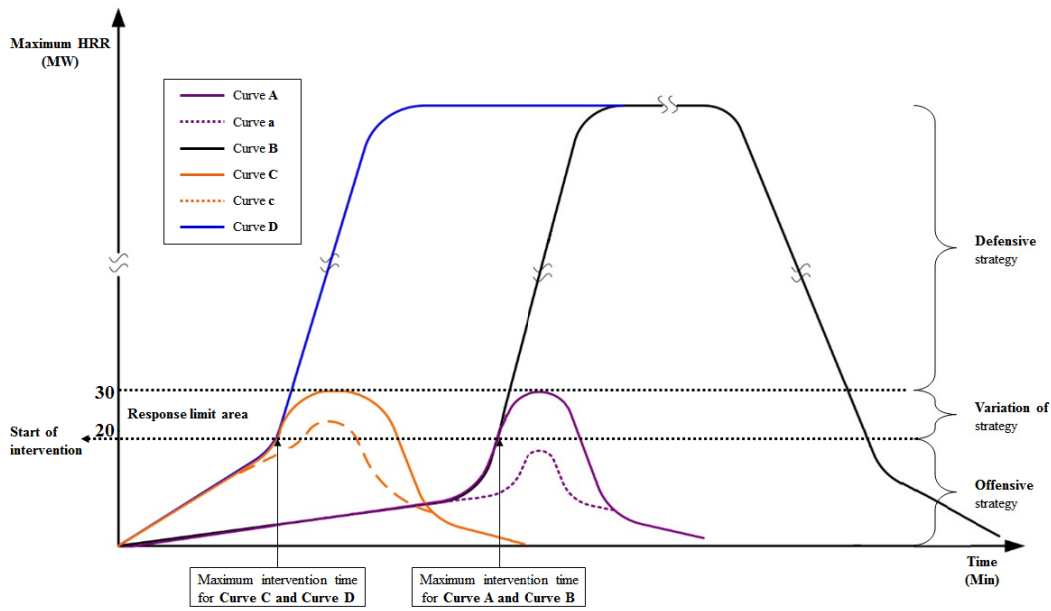


Figure 1. Fire Scenario curves for firefighting strategies.

소방대의 개입시간을 알아내는 것이다. 모든 화재상황이 동일하지 않고, 각각의 발생상황이 다양해서 상세한 결론을 도출할 수는 없다. 그러나 본 논문에서 수집한 도로터널 화재사례를 조사하여 개입시간을 알아내고자 하였다. 즉, 전략측면에서 보면, 곡선 B와 D는 소방대가 신속히 현장에 도착할 경우에는 공격적 전략이 가능하다. 2001년 세인트고타드 터널화재에서 최소 1대의 화물트럭이 충돌화재였을 때 최대 개입시간은 7분, 2000년 몽블랑 터널화재, 1986년 헤르조그베르그 터널화재시 13~20분이었다. 2015년 상주터널 화재시 화재감지 후 30여분 경과 후 도착하였다. 따라서, 개입시간이 늦어지면 그만큼 화재의 세기가 강해지므로 수비적 전략으로 변경하여 탐색과 구조대응을 목표로 하는 것이 현명한 선택이다.

즉, 충돌화재 C, D인 경우 소방대 도착시간이 7~8분 이내일 경우에만 공격적 전략이 가능하며 그 이후 도착시에는 수비적 전략을 취한후 열방출량이 20 MW 이하로 되기를 기다린 후 진압이 가능하며, 단순화재 A, B는 화재가 급격히 성장하지 않는 경우에는, 소방대 도착시간이 8분이상이라도 공격적 전략이 가능하지만, 열방출량을 고려하여 수비적 전략을 세우는 것이 좋다.

3.3 소방활동계획 수립을 위한 터널화재의 분류모델

터널화재시 소방대는 위험수준을 파악하여 소방활동계획을 수립할 수 있다. 본 연구에서는 화물트럭과 그 적재 위험물, 터널의 형태와 길이, 정체여부 그리고 관할 소방서에서 현장도착까지의 출동시간 등 중요변수 4가지를 채택하였다.

화재사례를 통한 사고분석 결과, 승용차와 버스로 발생한 화재는 이웃차량으로 확산되지 않았고, 화물트럭과 적

재 위험물이 있는 경우는, 확산하여 대형화재로 이어짐을 확인할 수 있었다.

도로터널 사고사례를 보면, 일방 통행터널보다 대면 통행터널에서 훨씬 위험성이 높았다. 대면터널인 경우는 진압보다는 요구조자를 위한 탐색 및 구조작업을 우선 하는 동안 화재의 세기가 더욱더 커질 것이다.

정체정도는 요구조자는 물론 소방대가 도착하는 시간을 좌우하는 심각한 변수가 된다. 요구조자는 정체로 인해 구조구급의 시간이 지체되고, 소방대가 화재현장에 도착시간이 지연되어 초기화재의 세기가 더욱더 커지게 할 수 있다.

출동시간은 소방기관이 화재발생현장에 도착한 시간으로 명확하지는 않지만, 본 연구에서 사례를 조사한 결과 3가지 시간 구간 즉, 8분 이내, 8~20분 이내, 20분 이상으로 구분할 수 있었다.

도로터널의 유형과 도착시간, 사고유형, 화재시나리오의 항목으로 소방활동계획 수립을 위한 분류모델은 다음과 같다(Table 4<sup>(14)</sup>).

I 등급은 화물트럭과 위험물을 적재한 차량은 금지된 터널로써 도심의 터널이라고 볼 수 있다. 가장 안전한 터널로 볼 수 있고, 소방대는 대응시간과 화재크기와 상관없이 화재를 진압할 수 있다. 사고유형은 IC 1, 화재시나리오는 A, a에 해당된다.

II 등급은 관할 소방대의 도착시간이 8분 이내이거나 스프링클러 등의 고정식화재진압시스템에 설치된 일방 통행터널이며, 모든 타입의 화재가 소방대나 고정식 화재진압시스템으로 진압될 수 있다. 사고 유형은, 4가지 모두 포함되며, 화재시나리오는, A, a, C, c이 해당된다.

III 등급은 소방대 도착시간은 8~20분 범위에 있는 일방 통행터널이며, 천천히 진행되는 화재이다. 사고유형은 IC



**Table 4.** Classification Models of Road Tunnels for Firefighting

Class	Description	Response Time (min.)	Incident Category	fire Scenario Curve	Example of Tunnels
Class I	The Passage of HGV and Flammable Vehicles Carrying Dangerous Goods I Restricted. On the View of Fire Spread, There is Little Risk. The Tunnels are Regarded as the Safest Tunnels.	Fire Brigade May be Able to Extinguish the Fire Regardless of Response Time and the Size of the Fire.	IC 1	A, a	Some Urban Tunnels Only for Cars and Buses
Class II	The Uni-directional Tunnels That are Within 8 min. Time Distance from the Fire Stations or Where Fixed Fire Suppression Systems Like Sprinkler are Installed. All Types of Fires May be Under Control Either by Fire Brigades or Fixed Fire Suppression Systems.	Less Than or Equal to 8 min.	IC 1, IC 2 IC 3, IC 4	A, a, C, c	Fløyfjell Tunnel (Norway), Urban Tunnels with High Fire Load
Class III	The Uni-directional Tunnels. Fire Brigade May be Able to Extinguish Slow-developed Fires Such as IC 2, Resulting in IC 1 Fires.	Between 8 to 20 minutes	IC 1, IC 2	A, a, C, c	Guadarram (Spain) 20 min. Distance
Class IV	Tunnels That are Congested or Bi-directional. The Possibilities of Occurrence of Single Fire or Collision Fires and Fire Spreads are Expected to be Significantly High.	More than 20 minutes	IC 2, IC 4	B, D	Bi-directional Tunnels: Mont Blanc, Tauern, St. Gotthard Tunnel

I, IC 2이다. 화재시나리오는, A, a, C, c이 해당된다. 스페인의 구아다라뎨터널이 해당된다.

IV 등급은 소방대 도착시간이 여러 가지 도로상황으로 정제되어서 20분 이상 걸린 경우 또는 대면통행터널이다. 충돌화재와 화재확산의 가능성이 매우 크다. 사고유형은 IC 2, IC 4이며, 화재시나리오는 B, D에 해당된다. 대면터널이며 관할 소방서에서 원거리에 있으면서 정제되는 터널 유형이 속한다.

전국고속도로 터널 777개소의 소방대 도착예상시간이 평균 16.3분이라는 보도<sup>(15)</sup>자료에 의하면, 10분 내에 소방대가 도착하는 터널은 774개소 중 83곳으로 10.7%에 불과했고, 20분 이상 걸린 터널은 214곳으로 27.6%에 달했다. 우리나라의 고속도로 터널은 특성상 도심에서 멀리 떨어져 있고 진입로가 한정되어 있어 소방대의 도착시간은 길어질 수 있다.

IV 등급은 도착시간만으로 볼 때는 이미 화재성장이 어느 정도 진행된 상황이므로, 소방활동 전략은 수비적 전략을 선택하여 탐색과 구조탐색 활동 위주의 진행을 권장하며, 화재의 세기를 고려하여 전략을 전환하는 것이 바람직하다. 그리고 사전에 원거리의 도로터널에는 터널 내 자동, 수동감지 시스템과 초기진압 및 대응장비를 반드시 구축하도록 하며, 근거리의 터널관리 사무소 내에 현장 근무자가 초기대응 및 피해확산방지를 위한 활동을 하거나, 자체소방대 또는 출장 소방대 설치가 필요하다.

#### 4. 결 론

본 연구는 도로터널의 안전을 위한 3가지 요인 중 비상 대응에 초점을 두고 소방대원이 효과적인 소방활동 전략을 수립하도록 하고자 하였다. 73건의 국내의 도로터널 화재의 사례를 분석하여 사고유형을 분류하였고, 4가지 화재사례(단순화재-확산없음, 단순화재-확산있음, 충돌화재-확산없음, 충돌화재-확산있음)로 유형을 분류하였다. 특히 화물차량과 충돌화재인 경우는 확산의 위험이 높았으며, 이러한 경우는 소방대 도착시간에 따라 전략을 선택해야함을 알 수 있었다.

도로터널 화재의 사고유형을 분류하여 6가지 화재시나리오 곡선을 도출하였다. 즉, 시나리오 곡선 A, B, C, D 그리고 변형곡선 a, c 이다. 이 화재시나리오 곡선은 소방대가 각각의 화재타입에 따른 특징을 파악한 후 그에 따라 적절한 화재진압 및 구조전략을 수립하는 데 도움을 줄 수 있다. 특히 각 곡선에 따른 최대방출율과 소방대 개입 시간을 파악하여 공격적 전략과 수비적 전략 등의 소방활동 전략을 결정할 수 있다.

소방대의 관점에서 도착시간, 화재 사고유형, 화재시나리오 등으로 도로터널 유형을 분류함으로써 평상시 관할 도로터널의 위험등급을 파악할 수 있고 그에 따른 사전전략과 활동 시나리오를 가지고 훈련을 함으로써 좀 더 효율적으로 대비할 수 있도록 하였다.

그러나 똑같은 제원의 터널은 존재하지도 않고, 똑같은

화재상황을 재현하지 못하므로, 모든 종류의 도로터널에 적용할 수 있는 세부작전과 상세한 화재시나리오를 제공할 수는 없다. 그러나 도로터널 화재의 특성과 4가지 도로터널 유형으로 파악해 됨으로써 유사한 상황에서 발생하는 터널화재에서는 좀 더 세부적인 소방활동 전략을 수립하는데 유용하리라 본다.

## 감사의 글

이 논문은 국민안전처가 출연하는 소방안전및119구조·구급기술연구개발사업(MPSS-소방안전-2015-78)과 미래창조과학부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NRF-2015R1C1A2A01055644).

## 후 기

본 논문은 2017년 (사)한국화재소방학회 학술발표대회에서 발표되었던 선행연구<sup>(16)</sup>를 토대로 보완하여 작성하였음.

## References

1. A. Beard and R. Carvel, "Handbook of Tunnel Fire Safety", Second Edition, ICE Publishing, p. 541 (2011).
2. Rapporteur Alfred Haack, "Thematic Network Fire in Tunnels", Technical Report Part 1, p. 46 (2001).
3. Korea National Fire Safety Code 603 (For Road Tunnels).
4. A. Beard and R. Carvel, "Handbook of Tunnel Fire Safety", Second Edition, ICE Publishing, pp. 6-7 (2012).
5. NFSC 603, "Korea National Fire Safety Code for Road Tunnels" (2017).
6. R. O. Carvel, "Fire Size in Tunnels", Ph.D. Thesis, School of Built Environment, Heriot-Watt University, Edinburgh, Scotland (2004).
7. K. Bergmeister and S. Francesconi, "Causes and Frequency of Incidents in Tunnels", UPTUN-Work Package 1-Task 1-2, Version 12th (2004).
8. "Fire Accidents in the World's Road Tunnels", Retrieved from [http://www.lotsberg.net/artiklar/brann/en\\_tab.html](http://www.lotsberg.net/artiklar/brann/en_tab.html)
9. H. K. Kim, A. Lönnermark and H. Ingason, "Effective Firefighting Operations in Road Tunnels" SP Technical Research Institute of Sweden, p. 15 (2010).
10. Fire Department, City of New York "Fire Scene Operations", Engine Company Operations, City of New York, (1997).
11. H. K. Kim, A. Lönnermark and H. Ingason, "Effective Firefighting Operations in Road Tunnels", SP Technical Research Institute of Sweden, p. 57 (2010).
12. H. Ingason, A. Bergqvist, H. Frantzich, K. Hasselrot and S. Lundström, "Planning for Manual Fire Fighting and Rescue in Tunnels", Proceeding of Fourth International Conference on Safety in Road and Rail Tunnels, pp. 595-604, Madrid, Spain, 2-6 April (2001).
13. A. Lönnermark, "On the Characteristics of Fires in Tunnels", Doctoral Thesis, Department of Fire Safety Engineering, Lund University, Lund, Sweden (2005).
14. H. K. Kim, A. Lönnermark and H. Ingason, "Effective Firefighting Operations in Road Tunnels", SP Technical Research Institute of Sweden, p. 61 (2010).
15. The National Assembly Dada for Inspection & Investigation of State Affairs in Land, Infrastructure and Transport Committee by Park Su-hyun Member of Congress (2015).
16. J. H. Lee, Y. D. Kim and H. J. Kim, "Scenarios for Response of Searching and Rescue During Tunnel Fires", Proceedings of 2017 Spring Annual Conference, Fire Science and Engineering, pp. 333-334 (2017).