터널 화재 시 열감지기 작동 온도의 비교에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Comparison of Operating Temperatures in Thermal Detector due to Tunnel Fire

노형기* · 박광영** · 임석빈***

Roh, Hyeong-Ki · Park, Kwang-Young · Im, Seok-Been

Abstract

Due to the rapid development of construction technology with effective land utilization in this nation, many tunnels were and are being built across the country. However, the smoke and the heat generated from tunnel fire are the most important critical factors which may results in both massive personal injury and property damage, especially, due to the closed surrounding of the tunnel. Considering this particular nature of the tunnels, this study aims to install a fire detection system using an optic fiber cable to measure the temperature changes, compare, and analyze the resulted values with the times of temperature changes of the sensor by performing fire simulations under the same condition as a real fire test. From the results, it has been found that the temperature sensor detects a fire occurrence and generates an alarm within one minute after ignition for both a real fire test and a fire simulation alike, and also that the characteristics of temperature changes of the sensor has close relations with the speeds of the currents inside the tunnel. In addition, considering the tunnel fires can affect the evacuation efficiency and the fire extinguishing activities of the fire brigade inside the tunnel, the temperature sensor must be able to search and find the locations and directions of the fires correctly.

Key words : Operating temperature, Thermal detector, Tunnel fire, Optic fiber cable, Fire detection system, Fire simulation

요 지

건설 기술 발전과 국토의 효율적인 활용으로 인하여 건설되고 있는 터널은 지하 공간과 같은 폐쇄 공간의 특성으로 화재 시 발생하는 연기와 열은 인명 및 물적 피해에 영향을 주는 매우 큰 위험요소이다. 본 연구에서는 광케이블을 이용하여 온도 변화를 측정하는 화재 감지 시스템을 설치하여 감지기가 동작한 온도 변화 값 및 시간과 실 화재 실험과 동일한 조건으로 화재 시뮬레이션을 수행하여 온도센서의 온도 변화 값 및 시간을 비교, 분석하였다. 실험 결과 화재실험과 화재 시뮬레이션의 온도 변화는 점화 후 1분 이내에 화재를 감지하여 신호를 경보하는 것으로 나타났으며, 화재 감지기와 시뮬레이션 온도 센서의 온도 변화 특성은 터널 내부의 기류 속도와 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타났다. 또한 터널 화재는 연기의 방향에 의해 피난과 소방대 진입에 영향을 미치므로 화재 지점과 화재 방향을 파악할 수 있어야 한다.

핵심용어 : 작동온도, 열 감지기, 터널화재, 광케이블, 화재 감지시스템, 화재 시뮬레이션

1. 서 론

국가 건설 기술 발전과 국민의 생활 형태의 변화는 물류 수송량과 교통량을 크게 증가 시켰으며, 지역 간의 빠르고 경제적인 운송 수단의 필요성에 의하여 국토를 격자형으로 연결하는 고속도로, 국도 및 지방도로 건설이 활기차게 이루어지고 있으며, 산지의 비율이 70% 이상을 차지하고 있는 좁은 국토를 가진 우리나라는 국토의 효율적인 활용과 지형적인 특성 상 많은 터널이 건설되고 장대화가 되어 가고 있다.

터널 화재는 매년 수천 씩 발생하고 있으며, 대부분의 경우 사고 규모가 작고 주로 최초 발화원인 차량 한 대에 국한되어 화재가 발생하지만, 간혹 주변의 다른 차량으로 전파되어 화재가 확산되어 많은 사상자가 발생하기도 한다. 1999년 몽블랑(Mont Blanc)터널 화재에서는 39명이 사망하고, 40여대의 차량이 전소되었고, 2년 9개월 동안 터널을 폐쇄함으로써 발생한 경제적인 피해액은 총 3억 9천 2백만 유로에 달하는 것으로 보고가 되었다. 2001년 스위스 고타드(St. Gotthard)터널 화재에서는 11명이 사망하고 23대의 차량이 전소 되었다.

*정회원 · 경기대학교 대학원 (E-mail : hyeongki.roh@siemens.com)

**정회원 · 경기대학교 대학원

***정회원 · Texas Transportation Institute

우리나라에서도 40여명의 부상자가 발생한 2003년 홍지문 터널 화재 사고, 많은 재산 피해를 일으킨 2005년 구마 고속국도 달성2 터널 화재사고 이후 화재의 신속한 감지, 터널 사용자의 안전한 피난과 사고에 대한 적절한 대처 필요성이 사회적 관심으로 대두되었다.

국내·외 도로 터널의 방재 대책에 대한 연구는 대형 사고의 발생으로 활성화되고 있으며 화재 발생은 재산상의 피해 뿐만 아니라 인명 피해에 치명적인 결과를 초래하므로 사전 예방 중심의 방지 대책이 우선시 되고 있으며 화재가 발생될 경우 화재 조기 진압, 연기의 제·배연, 피난, 인명구조의 방향으로 연구가 진행되고 있다.

따라서 본 연구는 도로 터널에 설치하는 화재 감지시스템과 화재 시뮬레이션에서 온도 센서의 온도 변화 비교를 통하여 적정성을 판단하는데 목적이 있으며, A터널에 광케이블을 이용하여 온도 변화를 측정하는 광센서 아날로그 화재 감지 시스템을 설치하여 가연물을 연소시켜 화재 감지기가 시간에 따른 온도 감지 변화를 실험한 결과와 화재 모델링 프로그램인 FDS(fire dynamics simulator)를 이용하여 실 화재 실험과 동일한 조건으로 온도변화 및 시간을 확인하는 방법으로 비교, 분석하였다.

2. 이론적 배경

차동식 분포형 감지기는 주위온도가 일정 상승률 이상이 되는 경우에 동작하는 감지기로써 감도시험은 공기관식의 감도시험법에 의하여 시험을 진행하며, 종별로 표 1의 공기관 자체의 온도 상승률 t_1 및 t_2 의 값에 따라 표 1의 시험에 적합하여야 하며, 공기관 중 검출부로부터 가장 먼 거리에 있는 20 m의 부분이 t_1 °C/min의 직선적인 비율로 상승하는 경우 1분 이내에 작동하여야 한다. 또한 공기관 전체가 t_2 °C/min의 직선적인 비율로 상승하는 경우 15분 이내에 작동하지 아니하여야 한다.

정온식 감지기는 주위온도가 일정 온도에 도달하는 경우 동작하는 감지기로써 공칭작동온도는 60°C에서 150°C까지의

표 1. 차동식 분포형 감지기의 감도시험

종 별	t_1	t_2
1 종	7.5	1
2 종	15	2
3 종	30	4

표 2. 정온식 감지기의 감도시험

종별	실 온	
	0	0 이외
특종	40초 이하	실온 $\theta(^{\circ}\text{C})$ 일 때의 작동시간 $t(\text{초})$ 는 다음 식에 의하여 산출 한다. $t = \frac{\text{to} \log_{10} (1 + \frac{\theta - \theta_r}{\delta})}{\log_{10} (1 + \frac{\theta}{\delta})}$
1종	40초 초과 120초 이하	
2종	120초 초과 300초 이하	

(주) to : 실온이 0°C 인 경우의 작동시간(초)
 θ : 공칭작동온도(°C), δ : 공칭작동온도와 작동시험온도와의 차

범위로 하되, 60°C에서 80°C인 것은 5°C 간격으로, 80°C 이상인 것은 10°C 간격으로 하며 작동시험은 공칭 작동온도의 125%가 되는 온도이고 풍속이 1 m/s인 수직 기류에 투입하는 경우 표 2에 정하는 시간 이내에 작동하여야 한다.

3. 터널의 화재 특성

3.1 화재 특성

3.1.1 화재사례 및 분석

국내에서 발생한 터널 화재 사고는 표 3과 같다. 터널 화재는 일반 소방 대상물에 비해 발생 빈도는 현저히 낮지만 발생하게 되면 인명 피해와 물적 피해로 연결될 확률이 높다는 것이다. 국내의 터널 화재는 둔내 터널, 남산 1호 터널 등 소규모 화재 사고가 십여 건 발생하였으나, 최근에 발생한 홍지문 터널의 화재가 가장 큰 피해를 초래하였다.

최근 세계적인 관심을 끌었던 해외 터널 화재사고 사례는 표 4와 같다. 대형 화재 사고에서 알 수 있듯이, 터널에서 화재가 발생하면 터널은 외부와 고립되는 공간 특성을 가지

표 3. 국내 터널 화재 사고 현황

발생일	터널 길이	위치	터널	사망지수/부상지수	화재 원인
1998. 6	1,090m	부산	광안	2 / -	충돌
2000. 8	580m	경남	산청 3	4 / 1	차량 불티
2000. 11	830m	경남	장북	- / 1	충돌 스파크
2001. 2	820m	부산	만덕	1 / -	교통사고 후 화재
2002. 12	280m	전남	무안 3	2 / -	터널 입구 충돌 후 화재
2003. 6	1,890m	서울	홍지문	- / 48	교통사고 후 화재
2005. 11	993m	대구	달성 2	- / -	브레이크 과열

표 4. 해외 터널 화재 사고 현황

연도	장소	피해		
		사망	중상	물적 피해
1979	일본 Nihonzaka 터널	7명	1명	차량 173대 소실
1979	미국 샌프란시스코 해저터널	1명	44명	차량 5대 소실
1993	이탈리아 Serra Ripoli 터널	4명	4명	차량 16대 소실
1999	프랑스 몽블랑 터널	39명	-	차량 35대 소실
1999	오스트리아 Tauern	12명	59명	차량 40대 소실
2001	스위스 고타드 터널	11명	-	차량 23대 소실

표 5. 국내 터널 화재 원인

항목	빈 도(건)	구성비(%)
전기적 결함	24	34.3
엔진/제동장치	24	34.3
추돌/충돌	12	17.1
담뱃불/불티	5	7.1
가스누출	1	1.4
기타	4	5.7
합계	70	100

기 때문에 화재 시 생성되는 연기와 열은 터널 이용자와 구조물에 심각한 영향을 미칠 수 있다.

운행 중인 터널에서 발생한 국내 화재 사고에 대한 화재의 원인을 분석하면 표 5와 같이 전기적 결함이나 엔진정비 불량으로 인한 화재 사고가 대부분 차지하고 있으며, 다음으로 교통사고에 따른 추돌 및 충돌 사고 후 발생하는 화재의 순서로 나타나고 있다.

3.1.2 화재의 특징

터널은 입구와 출구가 외기와 연결이 되어 있지만 일정 길이 이상의 터널의 경우 통로가 한정되고 지하공간과 같은 폐쇄 공간의 특성을 갖기 때문에 화재 시 발생하는 연기와 열은 인명 및 물적 피해에 영향을 주는 매우 큰 위험요소이다. 열과 연기로 인하여 가시거리 감소, 독성가스의 확산 및 급격한 온도 상승, 산소 농도가 감소하여 통행자의 안전에 큰 위험이 된다. 또한 구조물, 각종 설비 및 차량의 손상을 일으키며 결과적으로 오랜 시간 동안 통행 불능 상태로 되어 이로 인한 경제적인 피해가 매우 크다 하겠다.

터널 내 차량 화재의 주요 특징은 아래와 같이 분석할 수 있다.

(1) 차량은 화재가 쉽게 확산될 수 있는 연료를 적재하고 있어 유류 화재의 화재 특성을 갖고 급속하게 확대되며 또한 차량 내부의 내장재를 연소시키면서 다량의 독성 가스를 발생하며, 엄청난 발열을 동반한다.(독일의 터널 기준 RABT(Richtlinien Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln)에서는 차량 화재의 경우 5 MW(가솔린 20리터, 표면적 4)의 화재 하중으로 가정한다.)

(2) 차량의 전소 화재는 고온의 많은 열량을 발생시켜, 강한 자연풍으로 인하여 인접 차량에 신속히 전파되며 통제 불능의 화재로 발달하여 인명과 재산의 손상을 초래한다.

(3) 터널 화재 시 고속 주행 차량의 급정지로 인하여 신속히 대피하지 못하고 많은 사람들이 터널 속에 머무르는 경우가 많으며 연기에 의해 시야 확보가 곤란하다.

(4) 터널은 지형에 따라 자연 대류나 강제 환기로 인해 항상 빠른 기류의 흐름이 있어 연기가 한쪽 방향으로 신속히 확산한다. 이러한 기류로 인해 천정에 부착된 감지기가 정확한 발화 지점을 감지하게 어렵게 한다.

3.2 위험성 분석

터널 화재사고 분석에 의하면 화재 시 대피자의 안전에 영향을 미치는 주요 인자는 가시거리, 온도, CO이다. 화재 시 연기로 인해 가시거리 확보가 곤란하여 피난로를 찾지 못하여 열이나 유독가스에 질식하여 사망에 이르기 때문에 화재 초기 신속한 감지 및 경보 능력, 제연 능력 및 대피 능력이 안전에 가장 크게 영향을 미치는 것으로 분석된다.

3.2.1 공간의 잠재 위험성

(1) 교통 효율 향상과 도로의 직선화, 터널 굴착 기술의 향상 등으로 인한 장대 터널의 건설이 증가되고 있어 위험성이 증대되고 있다.

(2) 반 밀폐적인 구조를 가진 터널은 일반 도로가 갖는 위험 요소보다 더 많은 위험 요소를 내포하고 있으며, 화재 시 효과적인 제연에 어려움이 있고 고온의 온도 상승과 함께 유독성 연기로 인하여 호흡과 시야의 장애 및 심리적인 공포감이 초래되는 구조를 지니고 있다.

(3) 터널에서의 화재는 통행자의 생명을 위협할 뿐만 아니라 구조물이나 각종 설비 및 차량의 손상을 초래할 수 있으며 오랜 시간 동안 통행 불능 상태를 초래한다.

3.2.2 소화의 난이성

(1) 반 밀폐적 구조로 화재 시 열, 연소 가스 및 나빠진 시야로 인해 피난 및 소화 활동이 매우 어렵다.

(2) 터널 화재 상황의 발전 단계는 화재 초기에 터널 내 도로 이용자만 존재하기 때문에 대피자 스스로 상황을 판단하여 피난, 조기 진화 등 대응 조치를 하여야 한다.

(3) 터널 내 화재 시 본격적인 화재로 확대될 때까지 시간은 일반적으로 10분 정도로 짧으므로 신속한 소화 활동이 요구된다.

3.2.3 피난확보의 곤란성

(1) 대피 속도와 시간

화재 시 대피 속도는 연기에 의한 가시거리, 조명, 연소가스의 독성, 대피로 폭, 대피로의 경사 등 여러 가지 인자에 의해 영향을 받으며 대략 평균 1m/sec 정도로 고려된다. 또한 화재 인지 후 대략 5분 이내에 대피를 해야 하는 것으로 판단된다.

(2) 화재 시 행동 특성

1) 일반적으로 화재가 발생 시 주변 사람들은 모두 피난하지 않고 일부는 현장에 남아 화재 상황을 지켜본다는 것이다.

2) 화재 현장에 있는 사람들이 연기에 접했을 때 연기 속을 통과하여 피난 할 것인지는 군중 심리에 의한 주변 사람들의 거동에 영향을 받게 된다.

3) 터널 화재 시 강한 열과 짙은 연기 그리고 독성에 노출되어 불안, 초조, 공포 등으로 인하여 피난 의지를 상실하게 된다.

3.2.4 연소 생성물의 위험성

(1) 일산화탄소(CO) : 산소는 혈액의 헤모글로빈을 통하여 인체에 공급된다. 일산화탄소는 헤모글로빈과 결합하여 COHb(carboxyhemoglobin)를 형성, 산소의 공급을 차단한다. 일반적으로 혈액 안에 COHb의 농도가 30%에 이르면 의식을 잃게 되고, 50% 이상이 되면 사망하게 된다.

(2) HCN(hydrogen cyanide) : HCN은 질소를 함유하는 물질이 탈 때 발생하는 질식 가스로 일산화탄소와 마찬가지로 혈액과 반응하여 치사에 이르게 되는 물질이다.

(3) 이산화탄소 : 이산화탄소 역시 사람의 의식을 잃게 만드는 질식 가스로 15%까지의 농도 감소에는 큰 변화가 없으나 9.6% 이하가 되면 의식을 잃게 된다.

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 실험 방법

광케이블을 이용한 화재 감지기의 온도 변화 특성을 연구하기 위하여 국토해양부 “도로터널 방재시설 설치지침”의 자동화재 탐지설비의 기준에 의하여 시험을 진행하였다. A 터널 내부 천정 면에 광케이블 아날로그 화재 감지시스템을 설치하고 화재수신기에서 Zone별로 온도 설정을 한 후 감시 상태에서 시험을 실시하였다(그림 1, 그림 2). 화원은 2개의 화조를 나란히 인접시켜 하행선 320 m지점에 1,000 mm 높이에 설치하고, 화조에 10 L의 연료를 넣은 후 점화시킨다.

그림 1. 화재 테스트 전

그림 2. 화재 테스트 중

표 6. 실험 조건

구분	실 화재 실험	화재 시뮬레이션
온도	3.5°C	실 화재 실험과 동일
풍속	시험 전 : 2.3~4.4m/s 시험 중 : 2.9~3.9m/s	3.0 m/s, 3.4 m/s, 3.9 m/s
화조	1,000(L)×1,000(W)× 100(H)mm (2개) 화재 강도 1.5 MW (면적 2m ² 에서 10리터의 알코올 화재 상용)	실 화재실험과 동일
연료	1-ProPanol, 99.0% (n-Propyl alcohol)	1-ProPanol, 99.0% (n-Propyl alcohol)
화원 위치	하행선 320 m 지점	하행선 320 m 지점
기압	대기압	대기압

A 터널의 총연장은 1,234 m, 높이는 6.73 m, 폭은 9.495 m 이다. 화재 실험 및 화재 시뮬레이션의 조건은 표 6과 같다.

실 화재 실험에서 광케이블 아날로그 화재 감지 시스템의 화재 감지기는 공칭 작동온도에 도달하면 동작하는 정온식 기능과 온도 변화율로 동작하는 차동식 기능을 갖고 있어 두 기능의 화재 감지기의 동작 온도 값 및 시간을, 화재 시뮬레이션에서는 온도 센서의 온도 변화 값 및 시간을 비교, 분석하였다. 화조의 온도, 주위 풍속, 점화 후 화재감지기가 신호를 발할 때까지 시간을 측정하였으며, 광케이블 아날로그 화재 감지시스템은 점화 후 1분 이내에 화재 신호를 경보하여야 한다.

4.2 실험 결과 및 고찰

실 화재 실험에서 화재 감지기의 온도변화에 따른 동작 시간은 표 7과 같이 분석되었으며 차동식 분포형 감지기 및 정온식 감지기의 동작 시간은 1차, 2차 실험 결과 점화 후 1분 이내에 동작하는 것으로 평가되었다. 또한 화재 시뮬레이션에서의 온도 센서 동작 시간은 화재 수신기의 최대 동작시간 5sec를 추가 계산하여 평가한 결과 화재 시뮬레이션에서도 1분 이내에 동작하는 것으로 평가되었다(그림 3, 그림 4, 그림 5).

표 7. 터널 화재 시 화재 감지기의 감지온도 및 시간

구분	설정 번호	화재 수신기의 설정		시험 결과		
		구간 (m)	내용	작동 시간(초)	풍속(m/s)	
					시험 전	시험 중
1차 시험	Zone 1	310~800	정온식 20°C 설정	14	2.3~4.4	2.9~3.9
	Zone 2	310~800	정온식 30°C 설정	21		
	Zone 3	310~800	정온식 40°C 설정	29		
	Zone 4	310~800	정온식 50°C 설정	39		
	Zone 5	310~800	차동식 7.5°C/min 설정	14		
	Zone 6	310~800	차동식 15°C/min 설정	14		
2차 시험	Zone 1	310~800	정온식 20°C 설정	17		
	Zone 2	310~800	정온식 30°C 설정	30		
	Zone 3	310~800	정온식 40°C 설정	53		
	Zone 4	310~800	정온식 50°C 설정	57		
	Zone 5	310~800	차동식 7.5°C/min 설정	13		
	Zone 6	310~800	차동식 15°C/min 설정	17

그림 3. 화재 시뮬레이션 온도 분포 그래프, 풍속 3.0 m/sec

그림 4. 화재 시뮬레이션 온도 분포 그래프, 풍속 3.4 m/sec

그림 5. 화재 시뮬레이션 온도 분포 그래프, 풍속 3.9 m/sec

5. 결 론

A터널에 광케이블을 이용한 화재 감지시스템을 설치하여 화재 감지기가 동작한 온도 변화 값 및 시간, 실 화재 실험과 동일한 조건으로 화재 시뮬레이션을 수행하여 온도센서의

온도 변화 값 및 시간을 비교, 분석한 결과, 다음과 같은 결과가 도출되었다.

- 1) 터널에서 실시한 실 화재실험과 화재 시뮬레이션의 온도 변화는 점화 후 감지기의 감도시험에 적합하게 1분 이내에 화재 신호를 경보하는 것으로 나타났다.
- 2) 천정 면에 설치된 화재 감지기와 온도 센서의 온도 변화 특성은 터널 내부의 기류속도에 밀접한 관계를 가지는 것으로 나타났다.
- 3) 연기의 방향에 의해 피난과 소방대 진입에 영향을 미치므로 화재 발생 지점과 화재 진행 방향을 파악할 수 있는 감지기가 필요할 것으로 나타났다.

본 연구의 실험 결과를 토대로 화재 발생을 정확히 감지할 수 있는 통합감지시스템과 종합적인 훈련 프로그램 개발에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

- 국토해양부 (2009) 도로터널 방재시설 설치 및 관리지침, 국토해양부 예규 제100호.
- 김효규, 이경우 (2004) 국내도로 터널 내 발생 교통사고, 화재사고 및 터널 특성 관계 연구, 터널기술, (사)한국터널공학회 논문집, 제6권, 제3호, pp. 199-211.
- 노형기 (2005) 도로 터널의 화재감지 성능 확보 방안에 관한 연구, 석사학위논문, 경기대학교.
- 소방방재청 (2005) 대구 달성터널 차량화재 조사보고서.
- 소방방재청 (2009) 감지기의 형식승인 및 검정기술기준(KOFEIS 0301), 소방방재청 고시 제2009-4호.
- 소방방재청(2009) 도로터널의 화재안전기준(NFSC 603), 소방방재청 고시 제2009-45호.
- 오규형 등 (2006) 화재공학원론, 동화기술, pp. 192-219.
- 지멘스(주) (2007) 광센서 선형감지시스템 성능 확인 성적서.
- 한국도로공사 (2002) 고속도로 터널 방재시스템 연구.
- 행정안전부 (2006) 소방대응행정자료 및 통계, p. 41.

- ◎ 논문접수일 : 11년 01월 10일
- ◎ 심사의뢰일 : 11년 01월 13일
- ◎ 심사완료일 : 11년 02월 15일