

P-23

## 주요 터널화재 사고사례 분석 및 국내 터널구조물 내화설계법 고찰 An Investigation on Fire Resistance Design of Tunnel Structures

한 상 훈\* · 김 민 석\*\* · 이 철 호\*\*\*

Han, Sang Hoon · Kim, Min Suk · Lee, Choul Ho

### Abstract

By investigating a series of catastrophic tunnel fires, this research aims to evaluate the fire resistance design method as applied to tunnel structures in Korea. It is shown that the current strategy is oriented towards smoke control and ventilation to reduce the loss of life. As structural collapse is not regarded, a general guide is proposed to obtain the fire safety.

**key words** : Tunnel fire, Spalling, Fire Damage, Tunnel Structure, Fire Resistance Design

### 1. 서 론

최근 들어 경제발전 및 사회간접자본 확충을 통한 물류비용 절감을 위해 고속도로 및 국도의 신·증설과 도로의 직선화가 가속화되고 있으며 산지가 많은 지형적인 특성으로 터널연장의 증대와 사용빈도 또한 증가하면서 터널내의 사고 및 화재로 인한 피해가 큰 사회문제로 대두되고 있다. 터널은 항상 사고가 발생할 수 있는 잠재적인 위험요소를 가지고 있으며, 폐쇄공간과 유사하기 때문에 화재 발생시 적절한 초동 조치를 취하지 못할 경우 소화 및 구조 활동이 곤란하며, 적절한 환기시설이 효과적으로 운영되지 못하면 재산 및 인명 피해가 극대화될 수 있다.

터널내부에서의 화재는 발생하지 않도록 예방하는 것이 가장 좋은 방법이지만 이를 실현하기는 어려우므로 터널 내에서 발생한 화재피해를 최소화 할 수 있도록 터널구조물의 내화설계방안을 마련하는 것이 효과적이다. 이에 본 연구에서는 국내외의 터널 화재사고의 조사분석을 통해 이를 기반으로 요구되는 구조물의 화재 대응성능향상을 중심으로 앞으로의 나아가야 할 방향에 대해서 모색해 보고자 한다.

### 2. 주요터널 화재사고 분석

유럽의 경우 산악지형이 많아 오래전부터 터널의 이용이 활발하였으며 유럽연합체제 이후 국가간 도로를 이용한 물류이동이 늘어나며 다수의 터널화재로 인하여 큰 피해를 입은 경우가 많았으며, 최근 국내에서도 도로터널의 이용량이 증가하면서 화재사고들이 증가하고 있다. 따라서 터널구조물의 화재대응 시나리오를 위한 터널내화설계방안을 살펴보기 위하여 주요 터널화재 사고사례를 조사·분석하였다.

#### 2.1 국외 터널 화재 사례

유로 터널은 영국과 프랑스 지역을 연결하는 총연장 50km의 장대터널로써 1996년 11월 18일 프랑스에서 19km 떨어진 지점에서부터 영국으로 향하는 화물열차에 원인불명의 화재가 발생하였다. 초기의 화재크기는 1~1.5MW정도였으나 다른 Wagon에 불이 옮겨 붙으면서 350MW까지 급상승하여 최고온도 1100℃에 도달하였고 화재는 5시간가량 지속되었다. 480m이상의 터널내부시설 손상과 폭발적 라이닝 폭열이 발생하여 터널 천장부의 손상을 가져왔다. 290m정도의 구간에서는 전체적으로 폭열이 5~20cm 두께로 발생하였으며, 화재의 중심구간은 심한손상을 입어 최대40cm, 평균 17cm정도의 단면손상이 발생하여 0.51cm의 콘크리트만 잔존하게 되었다.

몽블랑 터널은 프랑스와 이탈리아를 연결하는 터널로 1965년에 완공되어 총연장 11.6km, 직경이 8.6m에

\* 정회원, 한국건설기술연구원 화재및설비연구센터 연구원, 공학박사(hans@kict.re.kr)

\*\* 정회원, 인하대학교 지능형 국토정보 기술혁신 사업단 연구원, 공학석사(kms@inha.ac.kr)

\*\*\* 한국건설기술연구원 화재및설비연구센터 연구원, 공학석사(chlee@kict.re.kr)

이르는 세계에서도 가장 긴 도로터널에 속한다. 터널에서는 총 5번의 화재가 발생하였으며, 모두 대형화물차량이 원인이었다. 1999년 3월 24일 이태리 방향으로 이동하던 벨기에의 냉동트럭에서 엔진과열로 추정되는 원인으로 발생한 화재는 39명이 사망하고 53시간동안 화재가 지속되어 최악의 사상자와 피해를 가져왔다. 화재차량에서 발생한 열 방출량은 75~100MW 정도이며 화재지점에서의 최고온도는 1,000℃ 이상으로 급상승하였다. 도로구간 슬래브와 덕트 아래 부분은 내화콘크리트 구조로 이뤄져 피해가 적었으나, 50cm 두께의 라이닝은 내화처리 없는 순수 콘크리트 구조로 이루어져 있어 900m이상의 천장부분이 심각한 폭렬 손상을 입었다.

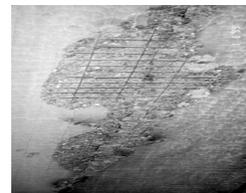
타우런 터널은 알프스를 남북으로 통과하며 남독일과 북이탈리아의 공업지역을 연결하는 연장 6400m, 일평균교통량 14,300대인 가장 중요한 타우런 고속도로의 한 구간으로 NATM공법을 사용하여 1975년에 개통하였다. 터널화재는 1999년 5월 29일 터널 내에서 교통사고가 발생하였고 페인트 통을 싣고 있던 트럭의 연료탱크에서 화재가 발생하여 14시간동안 지속되었고 최고온도는 1200℃에 도달하였다. 열 방출량은 200MW로 24대의 승용차와 16대의 트럭이 전소되어 12명이 사망하고 터널내부 구조물에 많은 피해를 야기시켰다. 터널 내부의 손상은 천장 부분에서 6m길이로 붕락되었으며 고온지점에서 내부라이닝의 비보강 콘크리트는 터널길이 100m이상의 구간에서 40cm의 깊이로 폭렬 피해를 입었다. 국외 터널화재사고 피해모습을 그림 1에 나타낸다.



(a) Euro Tunnel



(b) Montblanc Tunnel



(c) Tauern Tunnel

그림 1. 국외터널 화재피해

## 2.2 국내 터널 화재 사례

대구지하철은 2003년 2월18일 대구지하철 중앙로 역사의 방화사건으로 인하여 3시간동안 화재가 지속되었으며 사망 197명, 부상146명의 막대한 피해와 함께 재산피해 47억원, 복구비용 516억원, 11월 말까지 운행중단으로 인하여 총 1000억여 원의 경제적 손실을 가져왔다. 화재시 구조물의 피해가 심했던 상행선 구간은 평균 51mm, 최고 99mm의 박락피해를 입어 철근 피복두께(50mm)를 초과하는 것으로 조사되었으며, 정거장 구간은 콘크리트 물성시험 결과 화재에 의해 1,000℃ 이상 상승한 것으로 조사되었고 열응력 해석 및 구조해석을 실시하여 구조물의 안전성평가를 실시한 결과 부재의 손상에 의해 내력이 저하되어 즉각적인 보수·보강공법이 필요한 것으로 나타났다.

구마고속도로 달성 2터널은 콘크리트 2차선 도로로 사고는 2005년 11월 1일 미사일 추진체를 탑재한 차량의 브레이크 라이닝이 과열되어 발생한 불이 미사일 추진체를 포함하는 나무박스에 옮겨 불어 화재가 발생한 것으로 추정된다. 터널내부에 전반적으로 발생한 손상은 천정부에 균열폭 0.3~1.0 mm정도의 종방향 균열과 망상균열, 박리, 박락이 조사되었으며, 포장 면에서도 표면박리가 확인되었다. 발화지점에서의 라이닝 콘크리트는 600~900℃의 온도를 수열하였고 그늘음이 발생한 구간은 300℃미만의 온도를 수열한 것으로 추정되며 천정부의 균열폭은 대부분 0.5mm 이상 되는 대균열로 확인되었다. 피해상황으로는 400m의 벽체타일의 손상과 100m 구간의 콘크리트 포장이 파손되었다. 국외 터널화재사고 피해모습을 그림 2에 나타낸다.



(a) Dae-Gu Metro Tunnel



(b) Dal-Sung Tunnel

그림 2. 국내터널 화재피해

## 2.3 주요터널 화재사고 분석결과

터널의 화재시 위에서 살펴본 바와 같이 폭열로 인하여 구조물의 손상피해와 이로 인한 철근노출, 박리 및 탈락으로 구조체의 내력을 저하시켜 구조물의 붕괴로 이어지는 심각한 피해가 발생할 수 있다. 이러한 피해를 저감하기 위해서 터널구조물의 내화설계방안을 마련하고 자체규정을 제정해야 할 것이다. 외국의 경우 화재사고를 통한 경험을 토대로 관련기준들을 준비하고 있으나 우리의 경우 크고 작은 화재를 경험하고 있으면서도 이를 이용한 대안마련이 부족한 실정이다. 주요 해외터널화재의 사고사례를 분석하여 본 결과를 간단히 정리하면 표 1과 같다. 그리고 각 나라의 차량 종류에 따른 화재강도를 표 2에 나타낸다.

앞에서 언급한 것처럼 화재초기의 화재강도는 매우 낮으나 초동진압에 실패할 경우 터널의 내부는 자연풍 및 제연설비의 영향으로 화재전파속도가 빨라 단시간내에 화재의 확산과 함께 고온으로 발전하여 피해를 증대시킨다. 사고시의 화재지속 시간은 모두 5시간 이상이어서 비상피난소와 같은 특수목적의 구조물의 경우에는 더 많은 내화설계의 고려가 필요할 것이다. 실제 화재강도는 복수차량의 연속적인 화재로 발생한 화재강도로써 국내의 단일차량 화재시의 최대화재 하중설계값인 50~100MW는 표 1의 분석결과를 상회하는 결과를 보이므로 단일차량기준의 화재강도 산정은 터널내화설계에 타당하지 못한 결과를 보인다. 화재시의 최고온도는 1000℃ 이상의 결과를 보이지만 국내에서 광범위하게 사용하고 있는 빌딩화재곡선인 ISO곡선은 Cellulose기반 화재로 초기 30분 이내에 842℃에 도달하고 1시간이내의 최대온도는 945℃에 불과하여 화재강도 측면에서 터널구조물에서의 적용은 적절하지 못한 것으로 판단된다.

표 1. 주요 터널화재 분석결과

주요터널	화재강도	최고온도	화재지속 시간	구조물피해 여부
유로	350 MW	1100 ℃	5시간	피해
몽블랑	100 MW	1000 ℃	53시간	피해
타운런	200 MW	1200 ℃	14시간	피해

표 2. 각 나라의 기준 화재강도와 국내 기준 비교

차량의 종류	열방출률[MW]					적용사례 Øresund tunnel
	제한값					
	PIARC	RABT (독일)	CETU (프랑스)	NFPA502 (미국)	도로터널방재설비 설계지침 (한국)	
승용차	5	—	2.5	5	5	2.5
중·대형 승용차	—	—	5	—	—	—
승용 밴	—	—	—	—	—	—
승용차(1-2대)	—	5-10	—	—	—	—
승용차(2-3대)	—	—	8	—	—	—
승합차	—	—	15	—	—	—
대중버스(1대)	20	—	—	—	20	—
비위험물 소형트럭과 버스	—	20-30	20	20	—	15
대형화물차	—	—	—	—	30	—
가솔린 탱크 누설	100	50-100	200	100	100	120
LPG 탱크 누설	—	—	—	—	—	150 이상

3. 터널화재곡선 및 화재하중

현재까지 터널 화재와 관련된 통합된 국제규정이나 국제표준은 제정되지 않은 상태이지만 화재관련 선진국 들은 자체적인 규정을 정해 놓고 있으며, 그 중 독일은 RABT곡선이나 EBA터널화재 곡선을 규정하여 터널 구조물의 안정성에 관한 기준을 제정하였고, 네덜란드의 경우에는 터널의 붕괴로 인한 주변지역의 피해를 방지하기 위하여 RWS 곡선을 제정하여 구조물의 최소성능 확보방안을 마련하고 있다. 터널에 대한 특수목적의 화재곡선이 제시되기 이전에는 빌딩 구조물의 화재에 관한 곡선인 ISO 834와 석유화학플랜트의 화재시 유용한 Hydrocarbon fire 곡선을 터널에 적용하여 사용하여 왔으며 이와 관련하여 주요 화재시나리오 곡선을 그림 3에 나타내며, 표 3에 주요 화재곡선들의 특징을 간략하게 정리하였다.

유럽의 경우 각 국의 실정에 맞는 성능위주의 내화설계기준이나 권고안이 발표되고 있으나 국내의 경우에는 설계기준조차 마련되어 있지 않아 국내터널특성을 고려한 내화성능 평가기준의 마련이 시급하다. 현재 국내의 터널설계업체에서는 대안 설계시 ISO834 화재곡선을 주로 적용하며 미국방재협회에서 제정한 기준과 국외 기준인 ACI216R-89, EUROCODE 및 국내의 콘크리트 피복두께 내화설계기준인 콘크리트 구조설계기준5.4.5 외 내화구조의 지정 및 관리기준 중에서 유용한 기준들을 택일하여 설계하는 사례가 많으나 이들은 모두 빌딩구

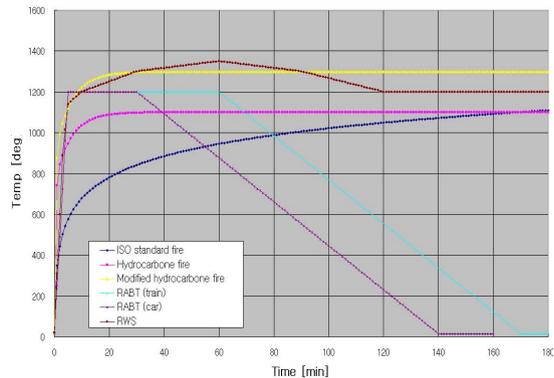


그림 3. 주요 화재시나리오 곡선

조물의 콘크리트 내화설계기준이므로 터널에 직접 적용하기에는 무리가 있으며 위 기준을 적용시에도 각 업체마다 서로 다른 화재시나리오를 선택하여 해석프로그램을 통한 내화설계를 수행하고 있어 통합된 규정이나 지침에 관한 연구가 계속적으로 진행되어야 할 것이다.

표 3. 주요 화재시나리오의 특성

주요화재곡선	특 성
ISO 834	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Cellulose fire를 기반으로 하는 표준화재 곡선으로 1940년 후반에 발표된 이후로 가장 보편적으로 사용되며 빌딩화재곡선의 온도상승 특성을 보여줌.</li> <li>■ 터널화재특성을 대표하기에는 무리가 있음.</li> <li>■ 화재지속시간은 제한이 없으며 최대온도는 1000℃임.</li> </ul>
RABT-ZTV	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Eureka project의 실험결과를 이용하여 독일에서 개발</li> <li>■ 5분 이내에 1200℃까지 급속히 상승한 후 30분 이후부터 Cooling이 진행.</li> </ul>
Hydrocarbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 석유화학공장의 위험물 저장지역, 분배지역 및 석유원료의 화재시 적용되는 화재곡선으로 화재 하중은 200kw/m<sup>2</sup> 적용.</li> <li>■ 스웨덴에서는 RWS곡선이 적용되지 않는 터널의 화재방호를 위한 안전율을 결정하기 위해 최대온도 1100℃까지의 탄화수소 곡선을 사용.</li> </ul>
RWS	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ 화재하중이 300MW인 조건에서 발생하는 화재 시나리오를 가정한 화재곡선</li> <li>■ oil or petrol 탱크에 연료 50m<sup>3</sup>를 점화하며 화재지속시간은 120분으로 5분 이내에 1100℃에 도달하고 한 시간 후에는 1350℃ 최고 온도 도달 후 2시간 후에는 1200℃ 유지</li> </ul>
Modify Hydrocarbon	<ul style="list-style-type: none"> <li>■ Hydrocarbon의 온도상승비율을 조정한 곡선으로, 345kw/m<sup>2</sup>의 화재하중조건으로 급격한 초기 온도 상승에서의 콘크리트 재료의 열 충격 효과를 분석하기 위한 화재시나리오임</li> <li>■ 5분 이내에 1100℃에 도달하고 한 시간 후에는 1300℃ 최고 온도 도달.</li> </ul>

#### 4. 결론

터널에서의 화재가능성은 매우 작지만 그 피해 및 손실액은 크기 때문에 터널의 화재가능성을 낮추는 연구는 필요하다. 하지만, 이를 실현하기는 쉽지가 않으므로 2차 대책으로 화재 후 터널피해를 극소화 시킬 수 있는 방안을 모색하여야 한다. 각 유럽국가에서는 터널 증축부와 추가방화벽을 화재로부터 방호하는 차원에서 각국의 실정에 맞는 터널화재곡선을 개발하고 수많은 경험적 연구를 통하여 화재하중을 100MW 이상으로 상향 변경하고 있다. 그러나 국내의 경우 터널설계시 화재하중을 20MW로 적용하거나 건축물의 화재하중에 따른 평가기준인 ISO 표준화재곡선을 적용하여 내화성능을 평가하고 있다. 따라서 국내터널환경에 적합한 표준화재곡선을 시급히 개발하고, Modify Hydrocarbon등과 같은 구조물의 특성과 화재환경조건에 부합하는 화재시나리오를 적용하여 내화설계를 실시하여야 할 것이다. 또한 최근의 경향에 맞는 설계기준의 요청과 함께 터널라이닝의 내화처리에 관한 지속적인 연구가 진행되어야 할 것이다.

#### 감사의 글

이 연구는 2007~2008년도 “철도종합안전기술개발사업”의 지원 하에 수행 되었습니다.

#### 참 고 문 헌

Eisner, H.S. (1995), Incorporating fire safety in the Channel Tunnel design, Safety Science  
 International Tunnelling Association, (2004), Guidelines for structural fire resistance for road tunnels  
 Voeltzel, A. and Dix, A. (2004), A comparative analysis of the Mont Blanc, Tauern and Gotthard tunnel fire, Tunnels : special issue  
 대구지하철공사 (2003), 대구지하철 1호선 중앙로역 정밀안전진단보고서  
 한국도로공사, (2005), 달성터널 화재사고 모범적 대처사례 보고서  
<http://www.promat.it/Tunnel/Curve/index.html>  
 (주)에스코 (2005), 응동-장유 국도확장공사(부분대인)설계용역 보고서