

# 터널 화재에서의 콘크리트 내화대책

## (Fire-Resistance of Concrete in Tunnel Fire)

**박 해 군** (삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사)

**이 승 복** (삼성물산 건설부문 토목사업본부 국내토목영업팀 차장, 기술사)

**이 명 섭** (삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장, 기술사)

**김 재 권** (삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀장 상무, 기술사)

### 1. 서론

최근 대표적인 토목구조물인 도로 및 철도터널에서 사상자를 동반한 대규모 화재사고가 세계 각지에서 발생하고 있으며 화재에 따른 경제적, 사회적 손실 또한 무시할 수 없을 만큼 방대해 지고 있는 실정이다. 외부가 노출된 다른 토목구조물과는 달리 매우 폐쇄된 공간인 터널 내부에서 화재가 발생할 경우 대형 참사로 이어질 가능성이 높으며 최근 터널의 장대화에 따라 이러한 우려는 더욱 현실적으로 나타나고 있다. 특히, 콘크리트 라이닝이 구조체 역할을 하는 쉴드터널, 침매터널, 개착터널 등에서는 화재로 인한 피해가 터널의 붕괴로 까지 이어질 가능성이 높으며, 인명 피해뿐만 아니라 사회 기반인 교통망을 장기간 끊어 놓게 되어 사회적으로 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 네덜란드, 독일 등 유럽의 여러 나라에서는 터널의 화재 안전성을 중요시하여 이미 수 년 전부터 이에 대한 연구와 개발이 진행되고 있으며, 가까운 일본에서도 터널 방재 개념으로 화재 감지 설비, 초기 소화 설비, 배연 설비 등의 소방 설비에 대한 관심과 함께 터널 콘크리트의 화재 안전성에 대한 보고서를 발간하는 등 전 세계적으로 터널의 내화성능에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 이에 본고에서는 토목구조물 중 화재로 인한 피해가 보고되고 있는 터널의 대표적인 사고사례와 함께 고온에서

의 콘크리트 성질, 그리고 최근 실시한 쉴드터널 콘크리트 세그먼트 내화성능 실험결과를 소개함으로써 화재로부터 터널 구조물을 보호하기 위한 대책에 대해 살펴보기로 한다.

### 2. 최근 터널 화재 사례

최근 유럽을 시작으로 각국에 있어 장대터널에서의 화재사고가 발생하여 그 피해가 보고 되고 있다. 1999년 3월 프랑스-이탈리아의 Mont blanc 터널, 같은 해 5월 오스트리아의 Tauern 터널, 2001년 10월 스위스의 Gotthard 터널 등 대규모 화재가 빈번히 발생하고 있으며, 국내에서도 2003년 6월 서울 홍지문 터널에서의 차량 사고로 인한 경미한 화재가 발생하는 등 터널의 화재 안전성에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다. Mont blanc 터널(사망 : 41명)화재의 경우 천정부의 심각한 손상이 약 900m 구간에 영향을 미쳤으며, Tauern 터널(사망 : 12)에서는 손상부분만 약 1.5km이상이었다. 그림 1의 Gotthard 터널 (사망 : 11명)에서는 약 250m 구간에서 천정부의 철근 콘크리트가 폭열로 인해 탈락, 장기간 터널의 사용이 중지되어 경제적인 면에 상당한 영향을 미쳤으며, 사고가 발생된 어느 터널에서도 터널 내 온도가 1,000℃ 이상에 달하였다고 보고하고 있다.

터널의 화재로 인해 내부에 시공된 콘크리트 라이닝이 어떠한 피해를 받을 수 있는지 1996년 11월 18일에 발생한 영-불 해협 터널(Euro Tunnel) 화재를 일례로 조사하였다. 영-불 해협 터널은 영국과 프랑스와의 해협을 횡단하는 총 길이 50km(해저 부분 38km)의 철도터널로 여객이나 차량 수송에 사용되고 있다. 화재는 화물 트럭을 수송하는 전용 열차에 적재된 트럭에서 발생된 것으로 추정되는데 오후 9시 45분경에 화재가 감지되고 그 후 소방 활동으로 다음 날 이른 아침에 진화되었다. 이 화재로 15대의 화물 트럭과 전용 열차가 완전히 소실되었고, 트럭 내의 화재 온도는 1,000℃ 이상인 것으로 추정하고 있다. 화재 후 터널 내 상황 및 피해를 받은 콘크리트 세그먼트(Segment) 단면의 스케치를 그림 2에 나타내었다. 보는 바와 같이 화재가 발생한 터널 내 세그먼트 표면에 길이 3~5km에 걸쳐 그을음이 발생하였고, 길이 300~500m 범위에서는 보수를 해야 할 만큼 큰 피해를 입었다. 습윤 상태에 있던 철근콘크리트 세그먼트는 화재로 인한 급격한 온도 상승으로 인해

폭열(explosive spalling, 부재 표층의 콘크리트의 박리, 비산)이 발생하였으며, 이 폭열로 길이 500m 범위 내에 있던 두께 40cm 세그먼트의 약 2/3가 아주 심하게 피해를 입었으며 암석층이 보일 만큼 단면 결손이 생긴 곳도 철근화재손상(그을음) 있다고 보고되고 있다.

### 3. 터널 화재 온도와 고온시의 콘크리트 성질

터널 내부에서 화재가 발생되었을 경우 터널 화재가 일반 화재와 비교했을 때 어떠한 특성을 가지고 있으며, 또한 내부에 시공된 콘크리트 라이닝에는 어떠한 영향을 미치는 지에 대해서 알아보자.

#### 3.1 터널 내 화재 온도

터널 화재와 관련하여 유럽에서는 EUREKA Project EU 499 FIRETUN이라는 프로젝트가 1990년에서 4년 동안 진행되었으며 처음 2년간은 실험 위주로 약 20여 차례의 터널 화재 모형실험이 실시되었으며, 나머지 2년 동안 이들 실험 결과에 대한 분석과 검토가 행해졌다.

본 프로젝트 결과, 터널 내부에서의 화재 온도는 일반화재와 달리 화재 발생 후 10~15분 사이에 급격히 상승하고, 터널 내 최고 온도는 연소물의 유형에 따라 다소 차이가 나지만 최고 1,200℃ 정도가 된다고 한다. 또한, 2ton의 가구(家具)를 적재한 화물 트럭에서는 최고 온도가 1,300℃ 이상인 것으로 보고되고 있다. 아래의 표 1에 화재실험간 터널 내부에 발생한 온도를 나타내었다.

#### 3.2 고온시에 콘크리트의 성질

콘크리트는 약 250℃ 전후의 온도에서부터 어느 정도의 탈수가 발생하기 시작하는데 450~550℃에서는 콘크리트 주성분인 강알칼리성의 수산화칼슘(Ph 12~13)이 분해 되어 중성화 현상이 발생되며, 이

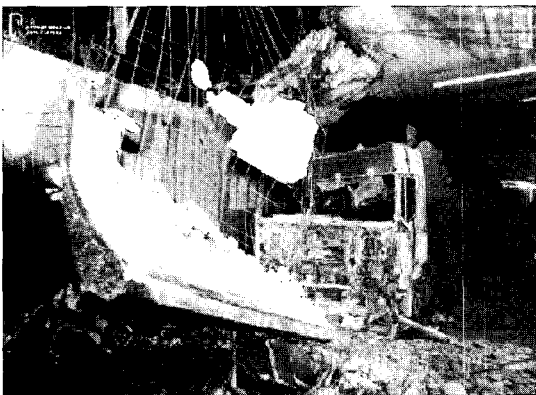


그림 1. 스위스 Gotthard 터널 화재사고 피해(2001. 10)

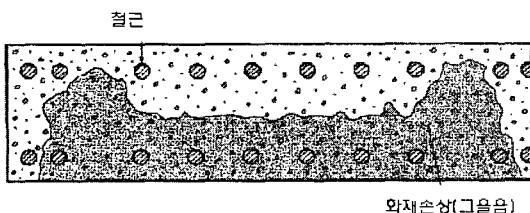


그림 2. 폭열로 인한 콘크리트 세그먼트의 손상(Euro Tunnel)

표 1. 차량 화재 실험에 대한 최고온도와 최대 열출력

연소물의 종류	최고 온도(°C)	최대 열출력(MW)
승용차	400~500	3~5
버스/트럭	700~800	15~20
열차의 객차	800~900	15~20
가열물을 적재한 트럭	1,000~1,200	50~100

후 탈수 진행이 빨라지며 약 600~700°C 이상에서는 탄산칼슘의 분해와 함께 약 900°C에서 시멘트 페이스트의 완전한 탈수가 일어나는 것으로 알려져 있다. 콘크리트가 고온을 받으면 압축강도, 탄성계수 등의 성질이 저하하는데 콘크리트의 온도가 높을수록 저하 정도는 심하며 약 700°C 에 대한 강도는 상온시 30% 정도로 저하하는 것으로 알려져 있다. 한편, 화재시의 콘크리트의 문제로서 전술한 성질의 저하와 함께 폭열에 대한 문제가 있다. 콘크리트가 화재에 노출되면 표층이 박리되거나 비산해서 단면결손이 발생하게 되는데 이러한 현상을 폭열 현상이라고 하며 일반적으로 화재 온도, 부재에 발생하는 열응력, 골재의 광물조성, 콘크리트의 함유량 등의 요인이 서로 작용하여 발생하는 것으로 알려져 있다. 이러한 폭열현상은 콘크리트 내부의 수분이 고열에 의해 수증기가 되면서 팽창함에 따라 발생하는 수증기압이 주 원인으로 콘크리트가 고강도 일수록(조직이 밀실하여 수증기의 투과가 힘들), 함유비가 높을수록, 가열온도가 빠를수록, 응력이 많이 작용할수록 폭열현상의 발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.

전술한 터널 피해 사례에서도 언급한 바와 같이 최근 도로터널의 화재에서는 이러한 콘크리트 부재의 폭열에 의해 구조체에 피해를 주는 경우가 자주 보고되고 있다. 이러한 터널 화재로부터 콘크리트 구조물의 피해를 줄이기 위해 다음 4종류의 내화대책방법이 고려되고 있다.

- (1) 콘크리트 면에 내화재료를 설치하는 방법
- (2) 콘크리트 자신의 내화성능을 향상시키는 방법
- (3) 콘크리트 면에 열전달을 지연하는 방법
- (4) 2차 라이닝을 사용하는 방법

이중 콘크리트의 폭열현상 저감에 폴리프로필렌 섬유(Polypropylene fiber)가 효과적이라는 연구결

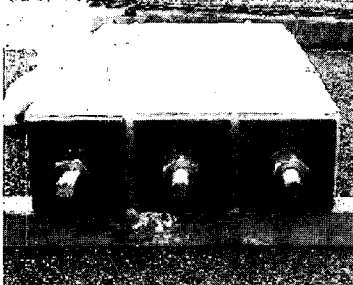
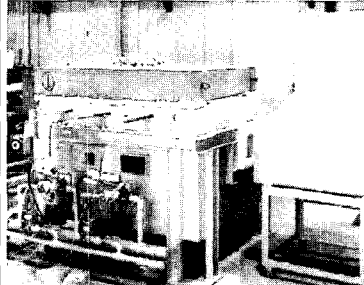
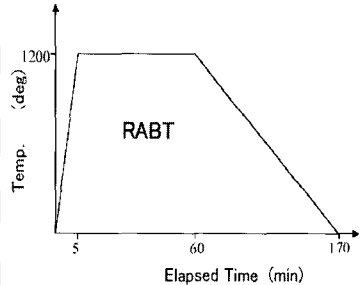
과가 자주 보고 되고 있다. 콘크리트 1m<sup>3</sup>당 폴리프로필렌 섬유 1kg이상을 혼입하면 폭열을 대폭 저감시킬 수 있다는 사실을 알 수 있는데 그 이유는 폴리프로필렌 섬유가 170°C 전후의 비교적 낮은 온도에서 용해하여 그 결과 콘크리트 내부에 다수의 공극을 발생시킴으로써 수분의 이동 경로를 제공하여 콘크리트 표층부의 수증기압이나 열응력을 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 다음 장에서는 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 터널 콘크리트의 내화성능 실험 결과를 소개하기로 한다.

## 4. 쉴드터널 2차 콘크리트 라이닝 내화성능실험

### 4.1 실험개요

쉴드터널 철근콘크리트(RC) 세그먼트는 압축강도 45N/mm<sup>2</sup>의 고강도 콘크리트를 사용하며, 토압 및 수압에 의한 응력 발생으로 일반 콘크리트보다 낮은 온도에서 폭열현상이 발생할 가능성이 높다. 또한, 그림 2의 Euro Tunnel 화재에서 보는 것과 같이 구조부재인 RC 세그먼트가 폭열로 인해 손상을 받을 경우, 터널붕괴까지 이어지는 위험이 잔존함에 따라 화재안전성, 시공성, 경제성, 유지관리 등을 종합적으로 고려한 내화공법 선정이 필요하게 되었다. 따라서 본 실험에서는 쉴드터널의 내화성능을 검토하기 위해 쉴드터널 세그먼트 내부에 시공되는 2차 라이닝(설계압축강도 24N/mm<sup>2</sup>, 두께 20cm의 철근콘크리트 구조)에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여 그 성능을 검토하였다. 일반적으로 쉴드터널 세그먼트 자체에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여 내화성능을 향상시키는 방법도 있지만 이럴 경우 세그먼트 자체의 내화성

표 2. 내화성능실험

실험시편	실험장치	화재온도-시간곡선
		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2개 시편 (PP 섬유혼입 유무)</li> <li>• 세그먼트축력도입 (6.5N/mm<sup>2</sup>)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 최대온도 1,500℃까지 가열할 수 있는 내화실험용 화로</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 독일터널화재 설계곡선사용</li> <li>• 화재발생 5분내 최대 1,200℃ 지속 시간 60분</li> </ul>

능 향상은 기대 되지만, 세그먼트를 구성하는 연결부에서의 방수슈트 및 연결부분에서의 손상이 예상되는 바 본 실험에서는 세그먼트 내부에 시공되는 2차 라이닝에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여 그 내화성능을 검토하기로 하였다.

#### 4.2 내화성능실험

내화실험과 관련된 내용을 표 2에 나타내었다. 폴리프로필렌 섬유의 혼입 유무(0kg, 1.0kg)에 따라 2개의 시편(B:700mm, L:1,400mm, t:200mm)을 제작하였으며, 잔류수압 및 토압의 작용을 고려하여 6.5N/mm<sup>2</sup>의 축력을 도입하였다. 화재규모는 도로 터널의 위치, 터널구조, 단면, 주변환경, 방재설비, 통행차량의 종류 등 종합적으로 고려해서 설정하여야 하는데 본 실험에서는 독일의 화재온도-시간곡선(RABT곡선, 최대온도 1,200℃, 최대온도 지속시간 60분)을 사용하였다.

#### 4.3 내화성능 실험결과

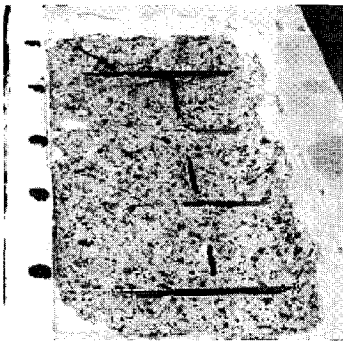
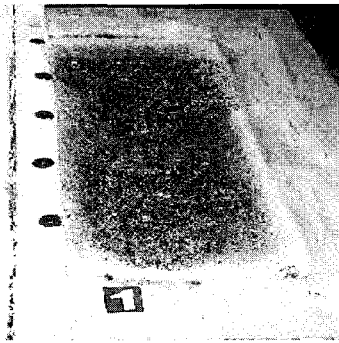
내화성능 실험결과를 표 3에 정리하였다. 실험결과에서 보는 바와 같이, 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 시편은 RABT곡선에 의한 가열 17분 만에 심한 폭열(폭열깊이 약 50mm)이 발생하여 실험을 중

단하게 되었는데 이러한 결과를 통해 볼 때 실제 터널 화재 발생시 구조체인 세그먼트에 상당한 손상을 줄 것으로 예상되며 나아가 터널의 중대한 손상이나 붕괴까지 유발시킬 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 폴리프로필렌 섬유 1.0kg을 혼입한 시편에서는 RABT곡선 전 과정(최대가열온도: 1,200℃, 최대온도지속시간:60분, 전체온도가열시간:170분)을 가열하였으나 일부구간에서 폭열깊이 5mm정도의 작은 손상만을 보여 터널 콘크리트의 내화성능 향상 및 터널 안전성 확보에 폴리프로필렌 섬유의 혼입이 효과적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 참고적으로 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 시편에서 폭열이 적었던 이유로 폴리프로필렌 섬유가 고온에서 용해되어 콘크리트 내부의 공극을 따라 외부로 배출됨으로써 폭열의 원인인 내부의 수증기압을 완화시켰을 것으로 판단된다. 따라서 폴리프로필렌 섬유의 혼입으로 터널 콘크리트의 내화성 확보와 함께 내구성 및 구조성능 향상에 유리하게 작용할 것으로 판단된다.

#### 5. 결론

터널에서 대규모 화재사고가 발생할 경우, 인명피해는 물론 온도상승에 따른 터널 구조부재의 응력저하 및 폭열로 인한 손상이 필연적으로 발생되며 더욱

표 3. 내화성능 실험결과

시편종류	2차 라이닝(PP섬유 무혼입)	2차 라이닝(PP섬유 1.0kg 혼입)
압축강도(N/mm <sup>2</sup> )	24	24
실험결과	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 가열 17분 후 심한 폭열로 실험 중지</li> <li>• 급격한 폭열로 인한 과도한 철근 노출</li> <li>• 폭열깊이 : 50mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• RABT 곡선 한도시간까지 가열(170분)</li> <li>• 일부구간 폭열 발생</li> <li>• 폭열깊이 : 5mm</li> </ul>
결과사진		

이 피해 복구까지의 장시간이 소요되어 사회적, 경제적으로 미치는 영향이 상당히 크다고 할 수 있다.

기존의 연구결과 및 본 실험결과를 통해 터널의 화재 온도는 일반화재와 달리 급격히 상승하여 최고 1,200~1,350℃ 정도에 이르며, 화재와 같은 고온에서는 콘크리트의 강도 및 탄성계수의 저하가 동반되며, 콘크리트 라이닝의 경우 폭열로 상당한 단면 결손을 유발시켜 터널 붕괴로 이어지는 위험이 있고, 콘크리트 폭열 방지에는 고온에서 용융·분해하는 폴리프로필렌 섬유를 혼입하는 것이 효과가 있다는 사실을 알 수 있었다.

터널 화재에 대한 콘크리트의 강도 저하나 폭열을 억제하기 위해서는 전술한 콘크리트 자체의 내화 성

능을 향상시키는 방법과 콘크리트 구조체의 내화 성능을 향상시키는 방법(Spray 공법, Panel공법) 등을 생각할 수 있지만, 특별한 지침이나 시방기준이 아직 마련되지 않아 향후 더 많은 연구결과가 필요할 것으로 판단된다. 터널 화재 안전성에 대해서는 각국 터널 협회 및 국제터널협회(ITA) 등에서 여러 가지로 검토되고 있으며, 일본 등에서는 이미 연구보고서(콘크리트 구조물의 화재안전성 연구위원회 보고서, 2002. 6)를 발간한 바 있다. 국내에서도 터널 구조물의 화재 안전성과 관련해서 배연(환기)설비, 비상용 설비등의 연구와 함께 구조물 자체, 특히 콘크리트로 구성되는 터널 구조체에 대한 적극적인 내화대책 연구도 동반되어야 할 것으로 판단된다.

### 참고문헌

1. Haak, A., "Fire Protection in Traffic Tunnels, General Aspects and Results of the EUREKA Project, Tunnelling and Underground Space Technology, Vol.13, NO.4, pp.377~381, 1998
2. 日本コンクリート工学協会, "コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書,"2002.6
3. Koichi.Ono, "Fire Safety to Concrete Structure,"Concrete Journal, Vol.40, No.7, pp.10~15, Jul. 2002
4. T.Morita, "トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について,"日本コンクリート工学協会, Vol. 38, No.11, Nov. 2000
5. JTA地下利用委員会, "各国の地下施設防災,安全に関する現像調査,"トンネルと地下, 1997.12