

# 터널 콘크리트 구조물의 화재 안전성 평가와 대책

- Evaluation of Fire Safety and Countermeasure of Tunnel Concrete Structure -



박해균\*  
Park, Hae Geun



이명섭\*\*  
Lee, Myeong Sub



김재권\*\*\*  
Kim, Jae Kwon

## 1. 서 론

최근 대규모 교통(도로, 철도)터널 화재가 세계 각지에서 발생하고 있으며 국내에서도 대구지하철 사고 등으로 인명피해는 물론 사회적 손실 또한 무시할 수 없을 만큼 방대해 지고 있다. 토목 구조물 중 외부에 노출된 교량, 댐 등과 같은 대표적인 토목 구조물과는 달리 폐쇄된 공간인 터널에서 화재가 발생할 경우 터널 붕괴 등 대형참사로 이어질 가능성이 높으며, 최근 10 km 이상의 장대터널 시공이 점차 증가하고 있는 시점에서 화재 시 터널 콘크리트 구조체의 손상에 의한 교통지연 등 장기 복구에 따른 경제적 손실 역시 더욱 현실적으로 나타나고 있다. 이미 수 년 전부터 유럽의 여러 나라에서는 터널의 화재 안전성을 중요시하여 이에 대한 연구와 개발이 진행되고 있으며, 가까운 일본에서도 터널 방재 개념으로 화재안전시설에 대한 관심과 함께 터널 콘크리트의 화재 안전에 대한 보고서를 발간하는 등 전 세계적으로 터널의 내화능에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 따라서 본고에서는 최근

국내외에서 발생된 교통터널의 대표적인 사고사례와 함께 터널 화재 특성 및 터널 콘크리트 안전성 평가 방법과 쉴드터널 콘크리트 세그먼트에 대한 내화실험결과, 그리고 터널 콘크리트 내화대책을 소개함으로써 터널 콘크리트 구조물의 화재 안전성을 이해하는데 미약하나마 보탬이 되고자 한다.

## 2. 최근 발생된 국내의 터널 화재사고 사례

최근 유럽을 시작으로 각국에 있어 장대터널에서의 화재사고가 발생하여 그 피해가 보고되고 있다. 1999년 3월 프랑스-이탈리아의 Mont blanc 터널, 동년 5월 오스트리아의 Tauern 터널, 2000년 11월 오스트리아의 Kaprun 터널, 2001년 10월 스위스의 Gotthard 터널 등 대규모 화재가 발생하였으며, 국내에서도 2002년 12월 무안 3터널, 2003년 6월 서울 홍지문 터널 등 차량 사고로 인한 화재가 발생하는 등 터널의 화재 안전성에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다. Mont blanc 터널(사망 : 41명)화재의 경우 천정부의 심각한 손상

이 약 900 m 구간에 영향을 미쳤으며, Tauern 터널(사망 : 12명)에서는 손상부 분만 약 1.5 km 이상 이었으며, <그림 2>의 Gotthard 터널(사망 : 11명)에서는 약 250 m 구간에서 천정부의 철근 콘크리트가 폭발로 인해 탈락, 장기간 터널의 사용이 중지되어 경제적인 면에 상당한 영향을 미쳤으며 사고가 발생한 어느 터널에서도 터널 내 온도가 1,000 °C 이상에 달하



그림 1. Mont-Blanc 터널 화재(1999)



그림 2. Gotthard 터널 화재(2001)

\* 정회원, 삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장

\*\* 정회원, 삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장

\*\*\* 정회원, 삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀장 상무

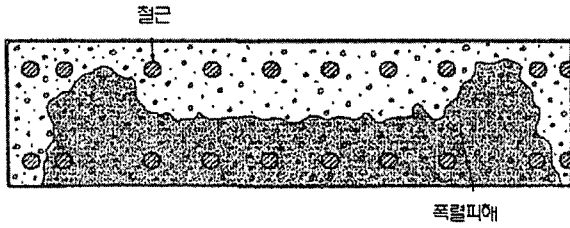


그림 3. 폭렬로 인한 콘크리트 세그먼트의 손상(Euro 터널)

었다고 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 50 km(해저 부분 38 km)의 철도터널로 여객이나 차량 수송에 사용되고 있다. 화재는 터널을 주행 중인 화물 트럭 수송 전용

열차에 적재된 트럭에서 발생된 것으로 추정되는데 오후 9시 45분경에 화재가 감지되고 그 후 소방활동으로 다음날 이른 아침에 진화되었다. 이 화재로 15대의 화물 트럭과 그것을 적재한 차량이 완전히 소실되었고, 트럭 내의 화재 온도는 1,000 °C 이상에 이르렀다고 추정하고 있다. 화재 후 터널 내 상황 및 피해를 받은 콘크리트 세그먼트(Segment) 단면의 스케치를 <그림 3>에 나타낸다. 화재가 발생한 터널 내 세그먼트 표면에 길이 3 ~ 5 km에 걸쳐 그을음이 발생하였고, 길이 300 ~ 500 m 범위에서는 보수를 해야 할 만큼 큰 피해를 입었다. 습윤 상태에 있던 철근콘크리트 세그먼트는 화재로 인한 급

격한 온도 상승으로 인해 폭렬(exploding spalling, 부재 표층의 콘크리트 박리·비상)이 발생하였으며, 이 폭렬로 길이 500 m 범위 내에 있던 두께 40 cm 세그먼트의 약 2/3 가 아주 심하게 피해를 입었으며 암석층이 보일 만큼 단면 결손이 생긴 곳도 있다고 보고되고 있다. PIARC(국제도로협회)에서는 터널 방재 계획 시 주요 권장사항으로 터널 콘크리트의 붕괴를 제시하였는데 일반적으로 콘크리트에는 표면 온도 약 250 ~ 300 °C 정도에서 폭렬에 의한 박락이 발생하기 때문에 피난자에게는 별 문제가 되지 않을 수 있지만 소방관들에게 화재 진압을 지연시키거나 파편에 의한 직접적인 피해 원인을 제공하며, Mont blanc, Gotthard 터널사고와 같이 라이닝 붕괴에 따른 장기적인 통행제한으로 경제적인 손실까지 영향을 미치기 때문에 터널 콘크리트 붕괴에 대한 내용도 주요 권장사항으로 포함시키고 있다.

최근 해외에서 발생된 대표적인 터널 화재 사고사례를 <표 1>에, 국내 터널 사고 사례를 <표 2>에 나타내었는데, 최근에는 국내에서도 경미하지만 빈번한 터널 내 화재사고가 발생되고 있는 것을 알 수 있다.

표 1. 대표적인 터널 화재 사고 사례(해외)

터널명	장소	년도	연장 (km)	원인	사상자 (명)	피해차량 (대)	구조체 손상
Caldecott	미국	1982	1.02	충돌	사망 7	트럭 3	천장, 측벽부 손상 100 MW급 대규모 화재
Isola delle Femmin	이탈리아	1996	0.148	충돌	사망 7	탱크로리 1 버스 1	2.5일간 터널 폐쇄
영-불 해협 터널	영국-프랑스	1996	50.0 × 2	탑재 화물차	부상 8	차량 1	터널연장 2 km 간 라이닝 콘크리트 박리 라이닝 보수비 : 67억원 피해손액 : 2,600억원
Mont-blanc	프랑스-이탈리아	1999	11.6	엔진오일	사망 41	트럭 23 승용차 10	900 m 천장부 손상, 철근노출 복구공사비 : 280억원
Tauern	오스트리아	1999	6.4	충돌	사망 12 부상 59	트럭 16 승용차 24	2차 콘크리트라이닝 대량 폭렬 보수비 : 85억원
Gotthard	스위스	2001	16.9	충돌	사망 11	트럭 15	250 m 구간 천장부 콘크리트 붕괴

표 2. 최근 발생된 터널 내 화재 사고 사례(국내)

터널 명	장소	년도	원인	사상자	피해차량	손 상
무안 3 터널	전남	2002. 12	추돌	사망 2	승용차 1	터널 우측벽과 충돌, 전도 후 화재 발생
남산 1호 터널	서울	2002. 12	버스화재	사상자 없음	버스 1	운행 중 버스 뒷부분 화재 발생
옥천 4 터널	충북	2003. 2	트럭화재	다수 부상	차량 다수	트럭화재에 따른 연기로 연쇄추돌, 3시간 교통 정체
홍지문 터널	서울	2003. 6	추돌	부상자	미니버스 승용차	25인승 미니버스와 승용차 추돌, 환기설비 가동중단, 3시간 통제
옥천 3 터널	충북	2003. 6	추돌	부상 10여명	화물차 승용차/버스	승용차 터널벽과 충돌, 연이은 연쇄추돌 화재
월드컵 터널	서울	2003. 8	충돌	사망 1	승용차	터널 갱구부 중앙분리대 벽과 충돌

### 3. 터널 콘크리트 구조체의 화재 안전성 평가

#### 3.1 터널 구조 조건

터널 콘크리트에 대한 화재 안전성 평가를 위해서는 콘크리트의 내화특성에 대한 기본지식과 함께 터널 구조 시스템에 대한 전반적인 개념 이해가 요구된다. 터널의 구조 조건은 기본적으로 토목 구조물과 배연(제연) 설비에 대표되는 안전 설비로 구성된다. 만일 어떤 규모의 화재가 발생하였을 때 터널 내의 온도 환경 및 터널 구조물에 대한 온도 영향은 동일 화재 규모라도 단면 형상, 단면적, 냉각 공기량 및 환기 풍속 등의 환기 조건에 따라서도 온도 영역은 크게 변화한다. 따라서 최종적으로 터널 콘크리트 구조체의 내화 대책의 필요성 및 대책 수준을 적정한 것으로

표 3. 차량 화재실험에 대한 최고온도와 최대 열출력

차량 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

하기 위해서는 내열 수준, 즉 재료별(콘크리트, 강재, 방수쉬트 등) 강도 열화의 허용값과 내화 재료의 시방서와 시공 범위의 관련성을 명확히 할 필요가 있다.

### 3.2 터널 화재 규모

터널의 화재 규모는 연소 대상물의 규모(총열량)와 시간 경과(열출력)로 나타나는 것이 일반적이며 이러한 화재 규모를 설계 열출력(design fire)이라고 한다. 설계 열출력은 당연하지만 차종마다 다르고 적재 상황에 따라서도 다르다. 터널 화재와 관련해서 유럽에서는 EUREKA Project EU 499 FIRETUN이라는 프로젝트가 1990년에서 4년 동안 진행되었다. 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 °C 정도가 된다고 한다. 또한, 2톤의 가구(家具)를 적재한 화물 트럭에서는 최고 온도가 1,300 °C 이상인 것으로 보고되고 있다. 아래의 <표 3>에 화재실시간 터널 내부에 발생된 온도 및 최대 열출력을 나타낸다.

### 3.3 터널 내부 온도 분포 및 콘크리트 표면 온도 추정

앞서 서술한 설정 열출력에 의거하여 터널 구조 조건 및 환기 시스템을 통해 터널 내 공간 온도(공기 온도 분포) 및 콘크리트 구조체 표면 부근의 온도 분포를 추정하는 것은 내화 대책 설정에 대단히 중

요하다. 터널 내 공간 온도를 확실하게 파악하는 방법은 <그림 4>에 나타난 수치해석방법(CFD), 열전달해석, 모형실험, 과거 화재사례 등으로 피해 추정을 생각할 수 있지만 어느 방법이나 아직까지는 확실하다고 할 수는 없는 상황이다.

또한 <그림 5>에 나타난 것처럼 어떠한 환기방식(제연 시스템)을 사용하느냐에 따라 인명피해는 물론 화재 시 콘크리트 구조체에 미치는 온도피해도 달라지기 때문에 이에 대한 검토도 필요할 것으로 판단

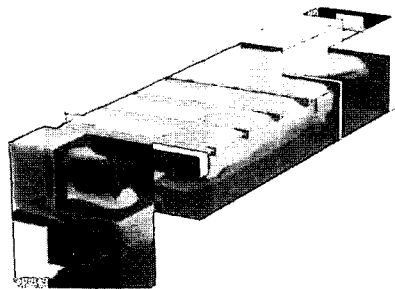
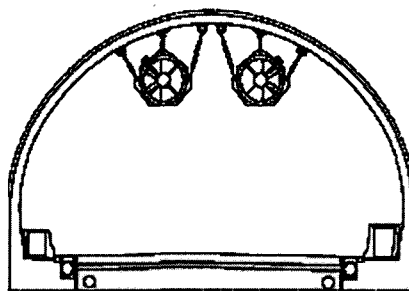
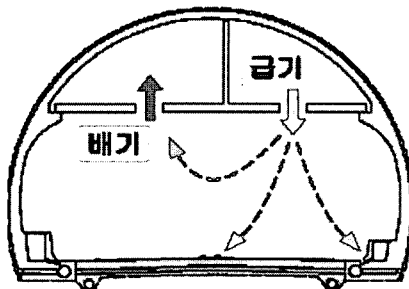


그림 4. CFD해석에 의한 화재 발생 후 연기확산 시뮬레이션



(a) 종류식 환기



(b) 횡류식 환기

그림 5. 터널의 대표적인 환기방식

된다. 이러한 사항을 정리하면 터널 콘크리트 구조체의 내화 대책 검토를 위해서는 일반적으로 다음에 나타내는 여러 항목에 대한 검토가 동반되어야 할 것이다.

- ① 터널 내 최고 공기 온도와 온도 분포 추정
- ② 콘크리트 표면(내부)과 온도 분포 추정
- ③ 콘크리트의 품질과 열 특성에 의한 강도 열화 허용값 및 폭발(폭렬) 발생 온도 검토
- ④ 내화 대책의 필요성 및 내화대책공법/시방서 결정

### 3.4 터널 화재 상정온도-시간곡선

네덜란드, 독일에서는 터널의 콘크리트 세그먼트, 내화 피복판 등 터널에 사용되는 내화재료의 내화성능을 평가하기 위해 <그림 6>에 나타난 바와 같은 화재상정온도-시간 곡선을 사용하고 있다. 네덜란드 운수 공공사업성 치수본국이 규정하는 화재온도 곡선(RWS곡선)은 최고 온도가 1,350 °C 이고, 독일 교통성 도로건설부가 규정하는 화재온도곡선(RABT곡선)은 최고 온도가 1,200 °C이다. <그림 6>에 건축 부재의 내화 시험을 위해 ISO에서 표준화하고 있는 화재 온도 곡선(ISO 834 곡선)도 함께 나타내었는데 ISO 834 곡선에서는 2 시간에 약 1,030 °C의 온도 상승인데 비해 RWS곡선이나 RABT곡선 등의 터널 화재용 온도 곡선에서는 가열 개시 후 5분에서 1,200 °C의 급격한 온도 상승으로 ISO 834 곡선보다 화재 초기 온도 상승 속도가 빠르고, 최고 도달 온도도 높은 것을 알 수 있다. 현재 유럽 각지의 도로 및 철도 터널에서 시공 실적이 있는 내화재료는 이들 규정에 의한 시험에 합격한 제품들이 사용되고 있다.

### 4. 쉴드터널 콘크리트 세그먼트 내화성능시험

터널 콘크리트 라이닝의 내화특성을 평

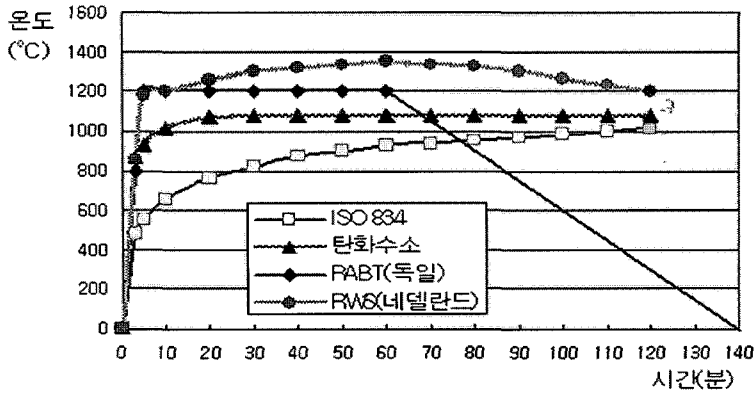
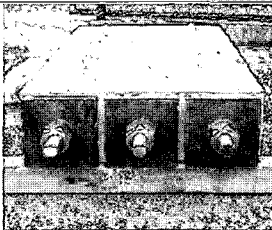
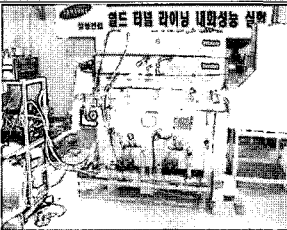
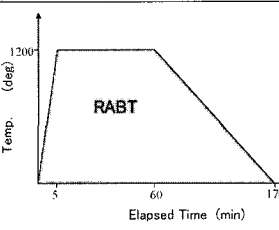


그림 6. 화재상정온도-시간곡선(토목/건축)

표 4. 내화성능시험

시험시편	시험장치	화재온도-시간곡선
 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 2개 시편(PP 섬유혼입 유무)</li> <li>· 설계치와 동등한 세그먼트 축력도입</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 최대온도 1,500°C까지 가열할 수 있는 내화실험용 화로</li> </ul>	 <ul style="list-style-type: none"> <li>· 독일 터널화재 설계곡선 사용</li> <li>· 화재발생 5분내 최대 1,200°C, 지속시간 55분</li> </ul>

가하고, 향후 내화대책공법 결정 등 적극적인 터널 내화대책을 수립하기 위해 콘크리트 라이닝이 구조체 역할을 하는 쉘드터널 콘크리트 세그먼트를 대상으로 실시한 내화실험 결과에 대해 간략하게 소개하기로 한다.

#### 4.1 실험개요

쉘드터널 철근콘크리트(RC) 세그먼트는 압축강도 45 MPa의 고강도 콘크리트를 사용하며, 토압 및 수압에 의한 응력 발생으로 일반 콘크리트보다 낮은 온도에서 폭발현상이 발생할 가능성이 높다. 또한, <그림 3>의 Euro 터널 화재에서 보는 것과 같이 구조부재인 RC 세그먼트가 폭발로 인해 손상을 받을 경우, 터널붕괴까지 이어지는 위험이 잔존함에 따라 화재안전성, 시공성, 경제성, 유지관리 등을 종합적으로 고려한 내화공법 선정이 필요하게 되었다. 따라서 본 실험에서는 쉘드터널의 내화성능을 검토하기 위해 쉘드터널

내부에 시공되는 2차 콘크리트 라이닝(설계압축강도 24 MPa, 두께 20 cm의 철근 콘크리트 구조)에 폴리프로필렌 섬유(polypropylene fiber)를 혼입하여 그 성능을 검토하였다. 일반적으로 쉘드터널 세그먼트 자체에 폴리프로필렌 섬유를 혼입하여 내화성능을 향상시키는 방법도 있지만 이럴 경우 세그먼트 자체의 내화성능 향상은 기대 되지만, 세그먼트를 구성하는 연결부에서의 망수쉬트 및 연결부분에서의 손상이 예상되는 바 본 검토에서는 세그먼트 내부에 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 2차 콘크리트 라이닝을 시공하여 그 내화성능을 검토하기로 하였다.

#### 4.2 내화성능시험

내화실험과 관련된 내용을 <표 4>에 나타내었다. 폴리프로필렌 섬유의 혼입 유무(무혼입, 1.0 kg)에 따라 2개의 시편을 제작하였으며, 설계치와 동등한 6.5 MPa의 축력을 도입하였다. 화재규모는 도로터널

의 위치, 터널구조, 단면, 주변환경, 방재설비, 통행차량의 종류 등 종합적으로 고려해서 설정하여야 하는데 본 실험에서는 독일의 화재온도-시간곡선(RABT 곡선, 최대온도 1,200°C, 최대온도 지속시간 55분)을 사용하였다.

#### 4.3 내화성능 실험결과

내화성능 실험결과를 <표 5>에 정리하였다. 실험결과에서 보는 바와 같이, 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 시편은 RABT곡선에 의한 가열 17분 만에 심한 폭발(폭렬깊이 약 50 mm)이 발생하여 실험을 중단하였으며, 그 결과 실제 터널 화재 발생시 세그먼트 상단부분의 단면손실이 발생할 것으로 예상되며 나아가 터널의 중대한 손상이나 붕괴를 유발시킬 수 있을 것으로 사료된다. 한편, 폴리프로필렌 섬유 1.0 kg을 혼입한 시편에서는 RABT 곡선 전 과정(최대가열온도: 1,200°C, 최대온도지속시간: 55분, 전체온도가열시간: 170분)에 준하여 가열하였음에도 불구하고 일부 구간에서 폭렬깊이 약 5 mm 정도의 경미한 손상을 보여 터널 콘크리트의 내화성능 향상 및 터널 안전성 확보에 폴리프로필렌 섬유의 혼입이 효과적이라는 사실을 확인할 수 있었다. 참고적으로 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 시편에서 폭발이 적었던 이유로 폴리프로필렌 섬유가 고온에서 소실하였을 때 콘크리트 내부의 공극을 따라 폭발 원인 중의 하나인 내부의 수증기압이 완화되었기 때문인 것으로 판단된다.

#### 5. 터널 콘크리트 내화대책

터널 내에서 발생하는 화재 규모, 터널 구조 조건, 환기 조건을 통해 콘크리트 구조체의 표면 온도를 추정하고 그 결과로 구조체에 대한 피해 상정으로 내화 대책의 필요성 유무 및 내화 대책이 필요하게 될 때의 대책 정도에 대해서 검토를 해야 한다.

<표 6>에 각국에 시공된 도로터널 내화대책 사례를 나타낸다.

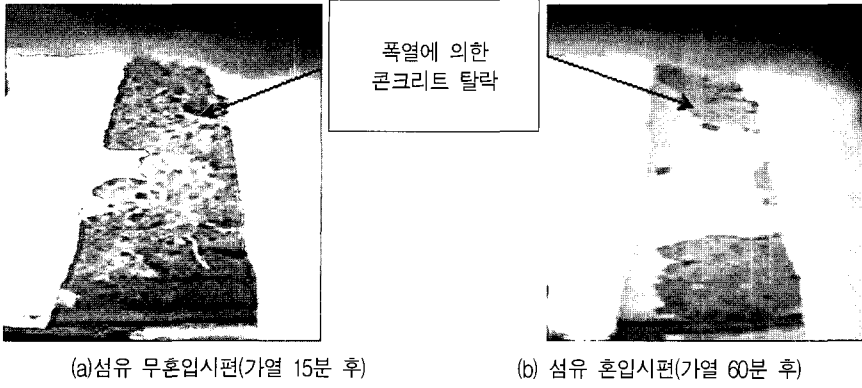


그림 7. 가열면 밑에서 촬영한 콘크리트 폭열 현상

표 5. 내화시험결과

시편종류	2차 콘크리트 라이닝(PP섬유 무혼입)	2차 콘크리트 라이닝(PP섬유 1.0kg 혼입)
설계강도	24 MPa	24 MPa
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 : 약 50 mm</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>· RABT 곡선 한도시간까지 가열(170분)</li> <li>· 일부 구간 폭열 발생</li> <li>· 폭열깊이 : 약 5 mm</li> </ul>
결과사진		

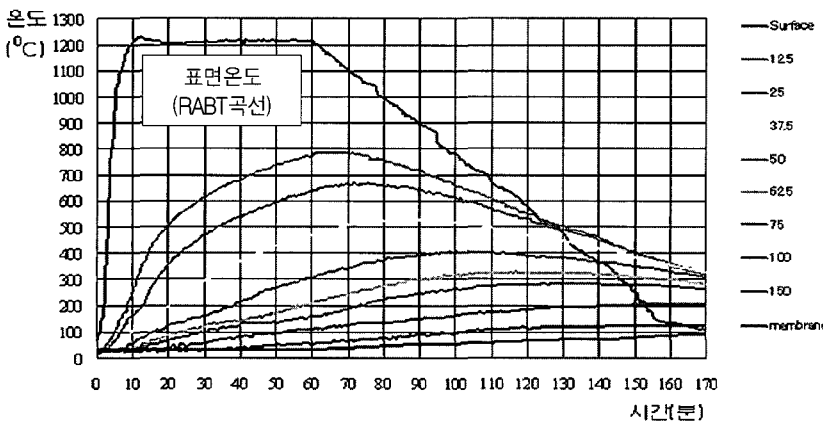


그림 8. 가열 시간별 콘크리트 단면 내부의 온도이력(섬유혼입 시편)

화재로부터 터널 콘크리트를 보호하는 기초적인 형식으로 일반적으로 다음 4종류의 내화대책공법이 현재까지 적용되고 있다.

(1) 콘크리트 면에 내화재료를 설치하는 공법 : 스프레이공법, 패널공법

(2) 콘크리트 면에 열전달을 지연하는 공법 : 스프레이공법, 패널공법

(3) 내부에 2차 콘크리트 라이닝을 시공하는 공법 : 2차 콘크리트 라이닝공법

(4) 콘크리트 자신의 내화성능을 향상시키는 공법 : 폴리프로필렌 섬유 혼입 공법

### 5.1 스프레이(Spray) 공법

- 복잡한 단면형상, 배관부분과 같은 좁은 공간에서의 시공 편리
- 피해를 입은 콘크리트의 보수에 적합
- 콘크리트 보수표면의 상태에 따라 숏크리트 재료의 부착력 확보를 위한 하면 처리 필요
- 평활한 면처리가 필요한 경우에는 특별한 대응이 필요
- 균일한 마감에 의한 내열성능을 확보하기 위해서는 일정 레벨의 기술 표준화 요구
- 와이어 매쉬 등의 사용으로 시공성 다소 떨어짐
- 적용터널 : 네덜란드 Westerschelde Shield Tunnel (Spray 두께 : 45 mm)

### 5.2 패널(Panel) 공법

- 단순한 형상에 의한 설치와 시공이 가능/교체 또는 재시공 단순
- 시공 상황에 따라 제조단계에서부터 패널의 형상, 품질(성능) 변경 가능
- 곡선의 구체의 경우 내화성능 감소
- 복잡한 표면시공의 경우 시공 곤란
- 화재 발생시 앵커볼트 손상 가능성 높음
- 터널 종류별(도로/철도) 패널의 부착강도에 대한 평가 필요
- 적용터널 : 독일 제 4 ELB Shield Tunnel (Panel 두께 : 12 mm × 2매 = 24 mm)

### 5.3 2차 콘크리트 라이닝 (Secondary Concrete Lining) 공법

- 해저 쉘드터널 세그먼트 내부에 적용/안정성 증대
- 세그먼트 손상에 따른 방청/방수기능 및 내화성능 향상 기대
- 굴착단면적/공사비 증가
- 최근 육상 도로 쉘드터널의 경우,

표 6. 도로터널 내화대책 사례

터널명	국명	형식·단면	설정열출력(MW)	내화대책
테드윌리엄스	미국	침매·직사각형	약 50	없음·천장 덕트 무너짐
제4엘베	독일	실드·원형	약 50	없음·천장 덕트 무너짐을 전제로 한 패널설계
리프켄스퐁크	벨기에	침매·직사각형	불명	노면을 제외한 전체 면
웨스트스카루드	네덜란드	실드·원형	300	위와 같음, 스프레이 시공
오레슨드링크	덴마크 스웨덴	침매·직사각형	300	천장 전체면, 벽면 상부 1m 스프레이 시공
도쿄항 제2항로	일본	침매·직사각형	약 100	천장 전체면, 측벽 상부 1m 패널설계

세그먼트 지수기술 향상 및 경제성의 이유로 2차 라이닝을 생략하는 경우가 많지만, 그 대신 별도의 내화대책 강구(일본 신주조 터널)

- 적용터널 : 일본 동경만 횡단 Shield Tunnel (2차 라이닝 두께 : 35 cm)

5.4 폴리프로필렌 섬유(polypropylene fiber) 혼입 공법

- 콘크리트 배합시 적정량의 폴리프로필렌 섬유 혼입
- 경제적/시공 간편
- 과다 사용시 슬럼프 저하로 시공성 결여/섬유 뭉침현상 발생

6. 결론

터널에서 대규모 화재사고가 발생할 경우, 인명피해는 물론 온도상승에 따른 터널 구조부재의 응력저하 및 폭열로 인한 손상이 필연적으로 발생되며 더욱이 피해 복구까지의 장시간이 소요되어 사회적, 경제적으로 미치는 영향이 상당히 크다고 할 수 있다. 기존의 연구결과 및 금번에 실시

한 내화 실험결과를 통해 터널의 화재 온도는 일반화재와 달리 급격히 상승하여 최고 1,200 ~ 1,350 °C 정도에 이르며, 화재와 같은 고온에서는 콘크리트의 강도 및 탄성계수의 저하가 동반되며, 특히 구조부재인 쉘드터널 세그먼트에 특별한 내화대책을 강구하지 않는다면 심각한 화재 발생으로 인해 상당한 단면 결손이 예상되어 터널 붕괴로 이어지는 위험이 잔존하는 것을 알 수 있었다. 금번 내화실험을 통해 폴리프로필렌 섬유의 혼입은 쉘드터널 콘크리트 세그먼트의 내화성능 및 콘크리트의 수밀성, 내구성 향상에 유리하게 작용할 것으로 판단되며, 향후 터널 콘크리트 구조물의 내화성능향상에 기여할 수 있는 내화대책의 한 방법으로 적용 가치가 높을 것으로 판단된다.

참고로 현재 유럽 등에서는 터널 화재 실험실험(Runehamar tunnel, Norway 등)을 포함한 160억원 규모의 대형 터널 방재 프로젝트(UPTUN, Safe-T 등)를 진행하는 등 적극적인 연구가 진행 중이며 국내에서도 죽령터널에서의 모의화재훈련을 실시하는 등 터널 방재와 관련하여 산·학·연 협동연구가 추진 중인 것으로

알고 있다. 이러한 시점에서 터널의 방재대책과 관련된 중요한 연구 분야인 제연(환기)시스템, 비상용 설비 등의 연구와 함께 아직까지 국내에서 연구가 전무한 콘크리트로 구성되는 터널 구조물 자체의 내화성능을 향상시키는 적극적인 내화대책 (fireproof concrete, fire protection cementitious material, fireproof method 등)의 개발도 반드시 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, 1998. pp.377~381.
2. 日本コンクリート工學協會, "コンクリート構造物の火災安全性研究委員會報告書," 2002. 6.
3. Koichi.ONO, "Fire Safety to Concrete Structure," Japan Concrete Journal, Vol.40, No.7, Jul. 2002. pp.10~15.
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學協會, Vol.38, No.11, Nov. 2000.
5. JTA地下利用委員會, "各國の地下施設防炎, 安全に関する現像調査," トンネルと地下, 1997. 12.
6. SAMSUNG E&C, NIPPON CIVIC, "쉘드터널 콘크리트 라이닝 내화성능실험 결과 보고서," 2003. 5
7. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, "터널 화재에서의 콘크리트 내화대책", 한국도시방재학회지 제3권 2호, 2003. 6, pp.65~69.
8. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, "터널 콘크리트 구조물의 내화설계 Approach 및 내화대책공법", 한국터널공학회 학회지 Vol.5, No.3, 2003. 9, pp.64~71.
9. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, "쉘드터널 콘크리트 세그먼트의 내화특성 연구", 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2003. 10, pp.4801~4804.

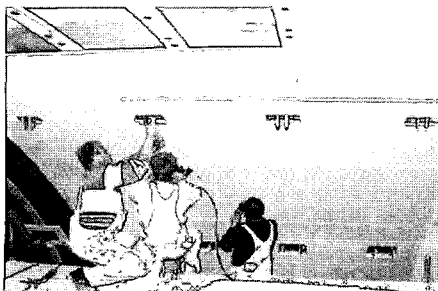


그림 9. 독일 제 4 ELB Shield Tunnel의 Panel공법



그림 10. 실험트럭을 이용한 터널 화재실험 (Europe)