

## 터널 콘크리트 구조물의 내화설계 Approach 및 내화대책공법



박해균

삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사



이승복

삼성물산 건설부문 토목사업본부 국내토목영업팀 차장, 기술사



이명섭

삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장, 기술사



김재권

삼성물산 건설부문 토목사업본부 토목기술팀장 상무, 공학박사, 기술사

### 1. 서론

최근 사상자를 동반한 대규모 터널 화재가 세계 각지에서 발생하고 있으며 그 사회적 손실 또한 무시할 수 없을 만큼 방대해 지고 있다. 외부가 노출된 다른 토목구조물과는 달리 매우 제한된 공간인 터널에서 화재가 발생할 경우 대형 참사로 이어질 가능성이 높으며 최근 터널의 장대화에 따라 이러한 우려는 더욱 현실적으로 나타나고 있다. 유럽의 여러 나라에서는 터널의 화재 안전성을 중요시하여 이미 수 년 전부터 이에 대한 연구와 개발이 진행되고 있으며, 가까운 일본에서도 터널 방재 개념으로 화재안전시설에 대한 관심과 함께 터널 콘크리트의 화재 안전성에 대한 보고서를 발간하는 등 전 세계적으로 터널의 내화성능에 대한 관심이 고조되고 있는 상황이다. 따라서 본 고에서는 최근 발생한 터널의 대표적인 사고사례와 함께 내화설계 기본절차 및 당사에서 실시한 콘크리트 세그먼트 내화실험결과를 소개함으로써 콘크리트로 구성된 터널 구조물의 화재 안전성을 이해하는데 조금이나마 보탬이 되고자 한다.

### 2. 최근 터널 화재 사례

최근 유럽을 시작으로 각국에 있어 장대터널에서의 화재사고가 발생하여 그 피해가 보고 되고 있다. 1999년 Mont blanc 터널, 동년 5월 오스트리아의 Tauern 터널, 2001년 스위스의 Gotthard 터널 등 대규모 화재가 발생하였으며 터널의 화재 안전성에 대한 대책이 시급히 요구되고 있다. Mont blanc 터널 화재의 경우, 천정부의 심각한 손상이 약 900m 구간에 영향을 미쳤으며, Tauern 터널에서는 손상부분만 약 1.5km 이상 이었다. Gotthard 터널에서는 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. 표 1에 대표적인 터널 화재사고 사례를 나타내었다.

표1. 대표적인 터널 화재 사례

터널명	장소	년도	연장 (km)	원인	사상자	피해차량	구조체 손상
Caldecott	미국	1982	1.02	충돌	사망 7	트럭 3대	천정, 측벽부 손상 100MW급 대규모 화재
Isola delle Femmin	이태리	1996	0.148	충돌	사망 5	탱크로리 1 버스 1	2.5일간 터널 폐쇄
영-불해협터널	영-프	1996	50.0×2	탑재 화물차	부상8	차량 1대	터널연장 2km간 라이닝 콘크리트 박리 라이닝보수비 : 67억원 피해손액 : 3,600억원
Mont-blanc	프랑스- 이태리	1999	11.6	엔진오일	사망 41	트럭 23 승용차 10	900m천정부 손상, 철근노출 복구공사비 : 280억원
Tauern	오스트리아	1999	6.4	충돌	사망 12 부상 59	트럭 16 승용차 24	2차 콘크리트라이닝 대량 폭열 보수비 : 85억원
Gotthard	스위스	2001	16.9	충돌	사망 11	트럭 15대	250m구간 천정부 콘크리트 붕괴

### 3. 터널 내화설계 기본 절차

• 내화 수준과 내화 대책 설정

도로 및 철도터널의 내화설계는 1)터널 이용자의 안전 거리확보 2)소화활동 환경의 확보 3)터널의 과도한 변형 및 붕괴에 의한 2차 재해의 방지를 고려하여 효과적이며, 경제적으로 설계해야 한다. 현재까지 얻어진 연구결과 및 지식에 근거하여 터널 내화설계에 대한 기본적인 절차를 그림 1에 나타내었으며, 이러한 설계절차는 대상터널의 종류와 규모, 화재발생규모, 비상시설 및 환기시설 등에 따라 달리 적용될 수 있을 것이다.

#### 3.2 터널 구조 조건

터널 구조 조건은 기본적으로 토목 구조물과 배연 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 따라 서로 온도 영역은 크게 변화한다. 따라서 최종적으로 터널 구조체의 내화 대책의 필요성 및 대책 수준을 적정한 것으로 하기 위해서는 내열 수준, 즉 강도 열화의 허용값과 내화 재료의 시방서와 시공 범위의 관련성을 명확히 할 필요가 있다.

#### 3.1 내화설계 필요성 검토

먼저 내화설계에 대한 기본적 개념으로서 다음에 나타내는 여러 가지 기본적 조건에 의거하여 내화설계의 필요성에 대해서 검토를 해야 한다.

- 터널 및 지하공간에 대한 화재 사고 사례의 수집과 분석
- 내화설계 대상 터널에 예상되는 화재 규모와 발생 확률 및 설계상 화재 규모의 설정

#### 3.3 터널의 화재 규모와 초기 조건 설정

터널의 화재 규모는 연소 대상물의 규모(총열량)와 시간 경과(열출력)로 나타내는 것이 일반적이며 이러한 화재 규모를 설계 열출력(Design Fire)이라고 한다. 설계 열

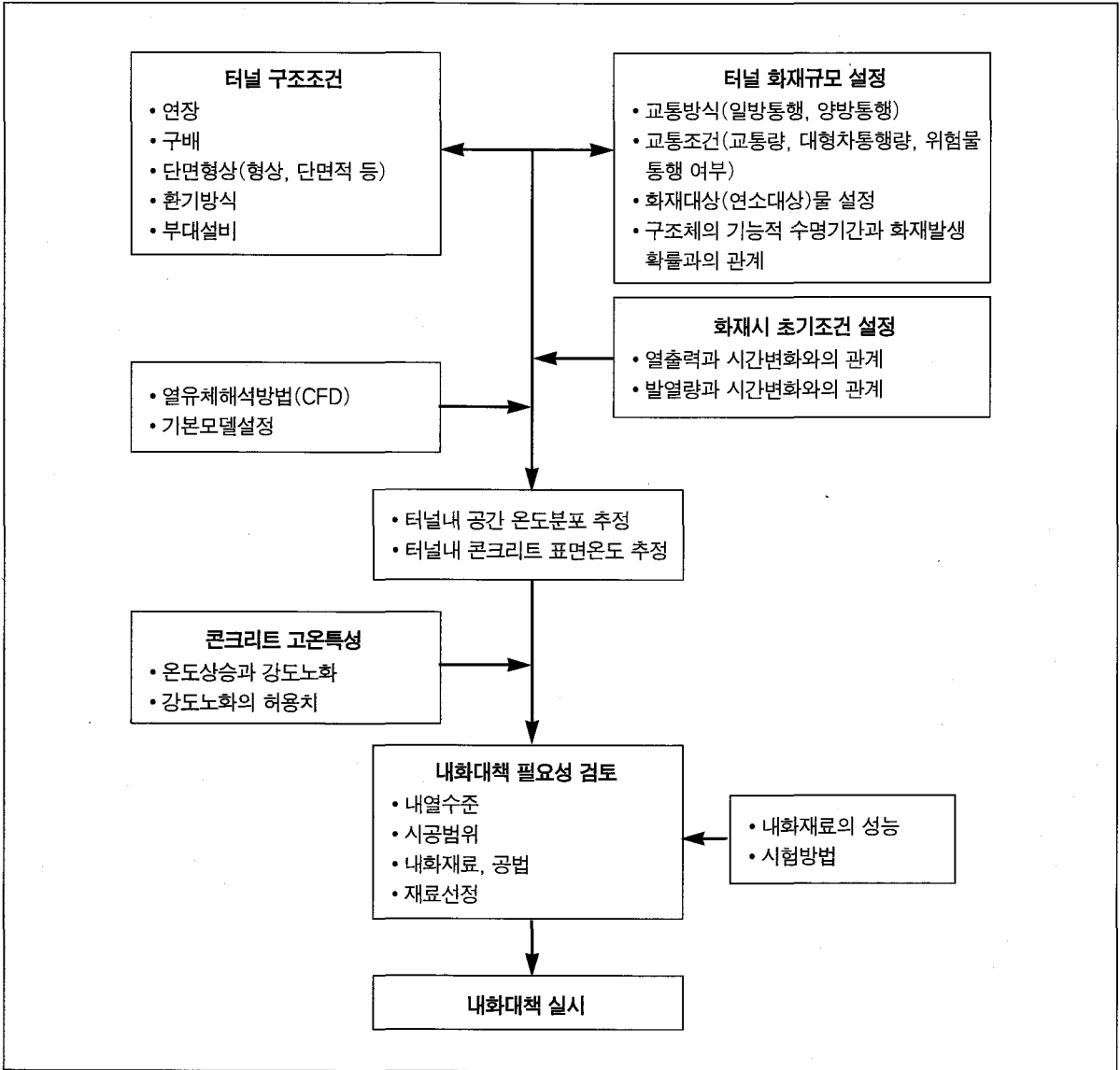


그림 1. 터널 내화설계 기본 절차

표 2. 차량화재실험에 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

출력은 당연하지만 차종마다 다르고 적재 상황에 따라 서로 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℃ 정도가 된다고 한다. 또한, 2ton의 가구(家具)를 적재한 화물 트럭에서는 최고 온도가 1,300℃ 이상인 것으로 보고 되고 있다. 표 2에 화재 실험간 터널 내부에 발생된 온도 및 최대 열출력을 나타낸다.

### 3.4 터널 내 공간 온도 분포 및 터널 내 콘크리트 표면 온도 추정

앞서 서술한 설정 열출력에 의거하여 터널 구조 조건 및 환기 조건에서 터널 내 공간 온도(공기 온도 분포) 및 콘크리트 구조체 표면 부근의 온도 분포를 추정하는 것은 내화 대책 설정에 대단히 중요하다. 터널 내 공간 온도를 확실하게 파악하는 방법은 수치해석방법(CFD), 모형실험, 과거 화재사례 등으로 피해 추정을 생각할 수 있지만 어느 방법이나 아직까지는 확실하다고 할 수는 없는 상황이다. 그러나 터널 구조체의 내화 대책 검토를 위해서는 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 허용 값 및 폭발(폭열) 발생온도 검토
- ④ 내화 대책의 필요성 및 내화 대책 시방서 결정

### 3.5 콘크리트의 고온특성

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, 이후 탈수 진행이 빨라지며 약 600~700℃ 이상에서는 탄산칼슘의 분해와 함께 약 900℃에서 시멘트 페이스트의 완전한 탈수가 일어나는 것으로 알려져 있다. 콘크리트가 고온을 받으면 압축 강도, 탄성계수 등의 성질이 저하하는데 콘크리트의 온도가 높을수록 저하 정도는 심하며 약 700℃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 폭열현상(explosive spalling)이라고 하며 일반적으로 화재 온도, 부재에 발생하는 열용량, 골재의 광물조성, 콘크리트의 함수량 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), 함수비가 높을수록, 가열온도가 빠를수록, 응력이 많이 작용할수록 폭열현상의 발생 가능성이 높은 것으로 알려져 있다.

### 3.6 내화재료 요구성능

화재시에 콘크리트 구조체를 보호하는 방법으로 내화 피복재료의 설치가 가장 일반적이다. 기본적인 시공방법으로는 3.8항에서 자세히 언급할 스프레이(Spray)공법과 패널(Panel)공법이다. 이 시공방법의 특징은 신규 터널에 공히 적용 가능하다는 것으로 특히, 과거에 건설된 터널의 내화성능을 개선하기 위해 최적이라고 할 수 있다. 하

지만 도로터널에 내화재료를 설치할 경우, 내화재로서의 가장 중요한 내화성능과 별도로 아래의 여러 성능에 대해서도 검토를 추가할 필요가 있다.

(a) 스프레이(Spray)공법 및 패널(Panel)공법 적용시 재료의 부착강도

교통터널의 내부는 통행 차량에 의해 공기압이 변화한다. 일본에서는 도로터널의 경우, 공기압의 변화는 거의  $2.5N/mm^2$ 이지만 고속열차가 통과하는 철도터널에서는 공기압의 변화는 최대  $60N/mm^2$  정도로 예상하고 있다. 따라서 이러한 압력변동에 대한 내화재료의 부착강도는 충분히 견딜 수 있어야 한다.

(b) 2차적 재해의 방지

터널내의 온도가 높아지면 화재나 연기, 유해가스등이 발생한다. 따라서 이러한 이차적 재해가 발생하지 않는 물질을 사용할 필요가 있다.

(c) 재료의 무해성

시공중에 관계자에 대해서 물리적인 영향을 주지 않는 환경친화적인 재료를 사용할 필요가 있다.

(d) 시공성

내화성능은 시공성에 좌우되는 경우가 있다. 하지만 현재까지 내화재료 단일의 재료에 대한 성능은 지정된 시험 방법등에 기초로 하여 규격화 되어 있지만, 시공후의 전체적인 내화성능에 대해서는 확인이 되지 않고 있다. 따라서 양호한 내화성능을 얻기 위해서는 세심한 시공이 필수 불가결이다.

(e) 동결융해 저항성

연간 온도변화가 심한 장소에서는 내화재료는 터널 외부에서의 강수에 의한 건조(융해)와 습기(동결)의 상호영향을 받기 쉽다. 따라서 동결, 융해에 대한 저항성에 대한 평가도 중요한 항목으로 판단된다.

3.7 내화재료 성능시험 (화재상정온도-시간곡선)

네덜란드, 독일에서는 터널의 콘크리트 세그먼트, 내화 피복판 등 터널에 사용되는 내화재료의 내화성능을 평가하기 위해 그림 2에 나타낸 바와 같은 화재상정온도-시간 곡선을 사용하고 있다. 네덜란드 운수공공사업성 치수 본국이 규정하는 화재온도곡선(RWS곡선)은 최고 온도가  $1,350^{\circ}C$ 이고, 독일 교통성 도로건설부가 규정하는 화재 온도곡선(RABT곡선)은 최고 온도가  $1,200^{\circ}C$ 이다. 그림 2에 건축 부재의 내화 시험을 위해 ISO에서 표준화하고 있는 화재 온도 곡선(ISO 834 곡선)도 함께 나타내었는데 ISO 834 곡선에서는 2시간에 약  $1,030^{\circ}C$ 의 온도 상승인데 비해 RWS곡선이나 RABT곡선 등의 터널 화재용 온도 곡선에서는 가열 개시 후 5분에서  $1,200^{\circ}C$ 의 급격한 온도 상승으로 ISO 834 곡선보다도 RWS 곡선이나 RABT 곡선 쪽이 화재 초기 온도 상승 속도가 크고, 최고 도달 온도도 높은 것을 알 수 있다. 따라서 일반 건축 화재보다도 터널 화재 쪽이 과혹한 온도 조건이라는 것을 미루어 알 수 있다. 현재 유럽 각지의 도로 및 철도 터널에서 시공 실적이 있는 내화재료는 이들에 의해 규정된 시험 방법으로 내화 인정을 받은 재료가 사용되었다.

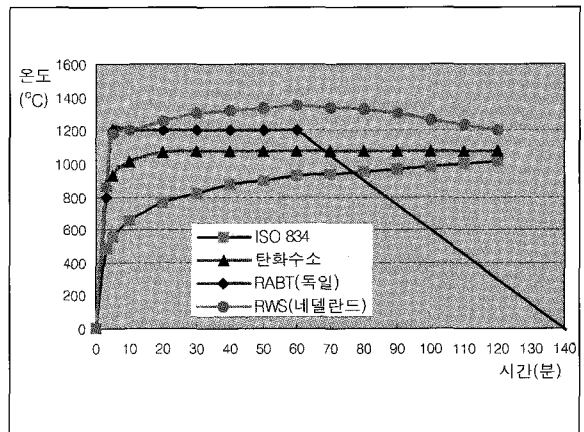


그림 2 각국의 화재상정온도-시간곡선

### 3.8 터널 콘크리트 내화대책공법

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. 다음 4종류의 내화대책공법은 화재로부터 콘크리트를 보호하는 기초적인 형식이다.

- (1) 콘크리트 면에 내화재료를 설치하는 공법: 스프레이(Spray)공법, 패널(Panel)공법
- (2) 콘크리트 면에 열전달을 지연하는 공법: 스프레이(Spray)공법, 패널(Panel)공법
- (3) 내부에 2차 콘크리트 라이닝을 시공하는 공법: 2차 라이닝(Secondary Lining)공법
- (4) 콘크리트 자신의 내화성능을 향상시키는 공법: 폴리프로필렌(Polypropylene) 섬유 혼입 공법

#### (1) 스프레이(Spray) 공법

- 복잡한 단면형상, 배관부분과 같은 좁은 공간에서의 시공 편리
- 피해를 입은 콘크리트의 보수에 적합
- 콘크리트 보수표면의 상태에 따라 스킵크리트 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: 45mm)

#### (2) 패널(Panel) 공법

- 단순한 형상에 의한 설치와 시공이 가능/교체 또는 재시공 단순
- 시공 상황에 따라 제조단계에서부터 패널의 형상, 품

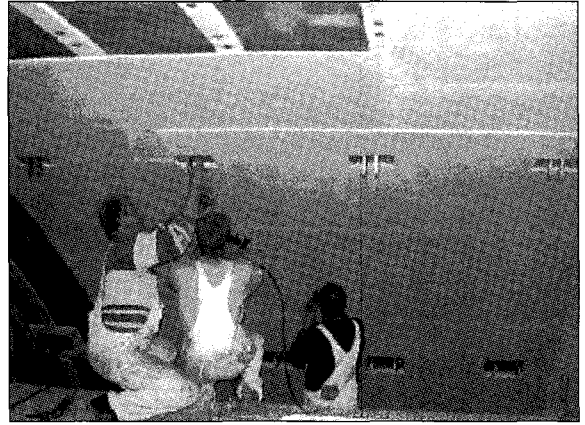


그림 3. 독일 제 4 ELB Shield Tunnel의 Panel공법

질(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: 12mm × 2매 = 24mm)

#### (3) 2차 라이닝(Secondary Lining) 공법

- 해저 쉴드터널 세그먼트 내부에 적용/안정성 증대
- 세그먼트 손상에 따른 방청/방수기능 및 내화성능 향상 기대
- 굴착단면적/공사비 증가
- 최근 육상 도로 쉴드터널의 경우, 세그먼트 지수기술 향상 및 경제성의 이유로 2차 라이닝 생략하는 경우가 많지만, 그 대신 별도의 내화대책 강구(일본 신주조 터널)
- 적용터널: 일본 동경만 횡단 Shield Tunnel (2차 라이닝 두께: 35cm)

#### (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

이중 콘크리트의 폭열현상 저감에 폴리프로필렌 섬유가 효과적이라는 연구결과가 자주 보고 되고 있다. 콘크리트 1m<sup>3</sup>당 폴리프로필렌 섬유 1.0kg이상을 혼입하면 폭열을 대폭 저감시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 따라서 다음 장에는 폴리프로필렌 섬유 혼입 콘크리트 세그먼트의 내화성능 실험결과에 대해 간단하게 소개하기로 한다.

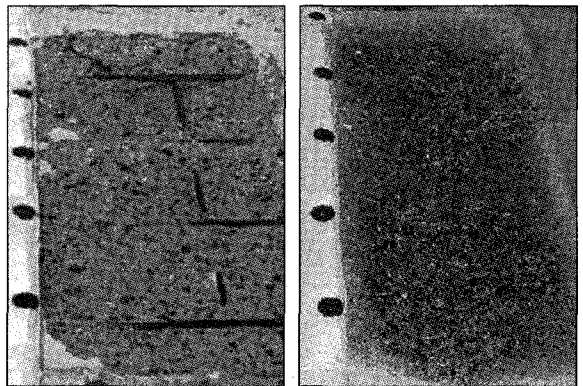


그림 4. 내화성능실험(독일 RABT곡선 사용)

#### 4. 터널 콘크리트 세그먼트 내화성능실험

폴리프로필렌 섬유의 혼입 유무(무혼입, 1.0kg)에 따라 2개의 시편(B:700mm, L:1,400mm, t:220mm)을 제작하였으며, 잔류수압 및 토압의 작용을 고려하여 6.5N/mm<sup>2</sup>의 축력을 시험체에 도입하였다. 시험체의 설계기준강도는 24N/mm<sup>2</sup>이며, 폴리프로필렌 섬유는 비중 0.91, 용융점 160℃, 섬유길이 20mm, 직경 48μm의 제품을 사용하였다. 본 실험에서는 독일의 화재온도-시간곡선(RABT곡선, 최대온도 1,200℃, 최대온도 지속시간 60분)을 사용하여 콘크리트 세그먼트에 대한 내화성능실험을 실시하였다.

그림 5의 실험결과에서 보는 것과 같이 폴리프로필렌 섬유를 혼입하지 않은 (a)시편은 RABT곡선에 의한 가열 17분 만에 심한 폭열로 인해 철근이 노출될 정도의 과다한 콘크리트 탈락이 발생하여 실험을 중단하게 된 반면, 폴리프로필렌 섬유 1.0kg을 혼입한 (b)시편에서는 RABT 곡선 전 과정(최대가열온도: 1,200℃, 최대온도지속시간:60분, 전체온도가열시간:170분)을 가열하였으나 일부 구간에서 폭열깊이 5mm정도의 경미한 손상만을 보여 터널 콘크리트의 내화성능 향상 및 터널 안전성 확보에 폴리프로필렌 섬유의 혼입이 효과적이라는 사실을 확인할



(a) 섬유 무혼입 (b) 섬유 1.0kg 혼입

그림 5. 내화실험결과

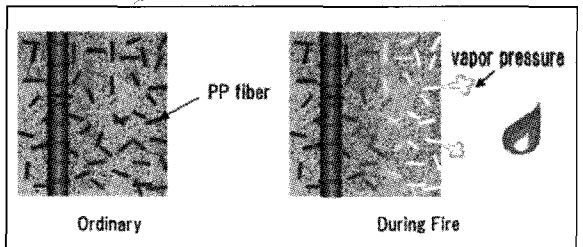


그림 6. 폴리프로필렌 섬유 효과

수 있었다. 참고적으로 폴리프로필렌 섬유를 혼입한 시편에서 폭열이 적었던 이유로 폴리프로필렌 섬유가 고온에서 용해되어 콘크리트 내부의 공극을 따라 외부로 배출됨

으로써 폭열의 원인인 내부의 수증기압을 완화시켰을 것으로 판단된다.

## 5. 결론

최근 잇달아 발생되고 있는 대형 터널 화재사고로 인해 각국의 터널 학회 및 국제터널협회(ITA) 등에서는 다양한 방법의 터널 화재 안전성 평가를 검토하고 있다. 본 고에서는 터널의 방재 대책과 관련하여 주로 콘크리트 재료로 구성되는 터널구조체에 대한 내화설계의 기본적인 절차와 내화대책공법, 그리고 최근 실시한 터널 콘크리트 세그먼트의 내화성능실험에 대해서 소개하였다. 유럽과 일본 등 선진 외국과 비교했을 때 아직까지 국내의 관련 연구는 미진한 상황이지만, 최근 국내에서도 산.학.연 컨소시엄을 통해 터널 방재대책 프로젝트가 진행될 예정으로 알고 있다. 이러한 시점에서 터널의 방재대책과 관련된 중요한 연구 분야인 배연(환기)설비, 비상용설비등의 연구와 함께 콘크리트로 구성되는 터널구조물 자체, 특히 콘크리트 자신의 내화성능을 향상시키는 적극적인 내화대책공법(fireproof concrete, fire protection cementitious material 등)의 개발도 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," 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, "各國の地下施設防災,安全に関する現像調査,"トンネルと地下, 1997. 12
6. 박시현, 마상준, "도로터널에서의 화재와의 전쟁," 대한토목학회 학회지, 제51권 6호, pp.18~23, 2003. 6
7. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, "터널화재에서의 콘크리트 내화 대책", 한국도시방재학회지, 제3권2호, pp.65~69, 2003. 6
8. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권, "실드터널 콘크리트 세그먼트의 내화특성 연구," 대한토목학회 학술발표회 논문집, 2003. 10