

터널 화재사례 중심으로 본 내화 처리 기술

Fire Protection Technology Based on Tunnel Fire Case



최 옥*
Wook Chol



윤태국**
Tea-Kook Yun



안상로***
Sang-Ro An



최연왕****
Yun-Wang Chol



김경환*****
Kyung-Hwan Kim

1. 서 론

국내에서 발생한 터널 화재 사례를 살펴보면 대구지하철 중앙로역 화재 사고, 서울도시철도 ○○유치선터널 화재사고 등 공용중인 터널에서 방화로 인한 화재와 나이키 미사일 추진체를 적재한 차량 화재에 의한 구마고속도로상의 달성 제2터널 화재 등이 있었다. 또한 ○○철도 건설공사의 박스터널 구간에서 인부의 실수로 인한 터널 화재 등 시공 중인 터널 내에서의 화재도 종종 발생하고 있다.

더욱이 국내에서도 나날이 늘어나고 있는 교통량의 증가와 더불어 증가하고 있는 터널 내부에서의 교통사고로 인한 터널 화재까지 포함하면 그 빈도는 상당히 높을 것으로 추정된다. 터널은 지하공간에서 폐쇄되어 있다는 구조적 특징으로 인하여 화재시 터널 라이닝콘크리트 면에서의 수열온도는 단시간에 1,000℃ 이상까지 급상승하게 되며, 그 후 시간이 경과함에 따라 서서히 온도가 하강하는 특성이 있다. 이러한 고온에 노출되어 라이닝콘크리트가 손상을 입게 되면 터널 안전은 심각한 영향을 받게 된다.

이에 본 고에서는 국내의 터널 화재사고 사례를 소개함과 더불어 금년 4. 22~27까지 국내에서 성황리에 개최된 국제터널학회(ITA)에서도 많은 관심이 대두되었던 터널 화재시 안전을 확보할 수 있는 라이닝콘크리트의 내화처리 기술에 대하여 살펴보고자 한다.

2. 국내 터널 화재

* 정회원, 한국시설안전기술공단 기술개발실 구조재료팀장
cucg@kistec.or.kr

** 정회원, 한국시설안전기술공단 진단 1본부 진단팀장

*** 정회원, 한국시설안전기술공단 기술사업단장

**** 정회원, 세명대학교 토목공학과 교수

***** 정회원, H.B.T 대표이사

2.1 대구지하철 중앙로역 화재사고

대구지하철 1호선 중앙로역 화재사고는 2003년 2월 18일 09:53 대구지하철 1호선 중앙로역 하행선 전동차(1079호)의 객차내 방화로 발생하였고, 이어서 진입한 상행선 전동차(1080호)로 화재가 확산되면서 화재가 더욱 커져 사망 192명, 실종 21명, 추정 손실액 570억원이 발생한 대형 터널 화재사고였다.

이에 관리주체에서는 긴급 안전점검, 정밀안전진단, 재하시험 등을 실시하였다. 정밀안전진단 결과 대구지하철 중앙로 역의 지하 3층 승강장 주변으로 구조물에 집중적인 화재 손상이 발생하였으며, 주요 손상으로는 박리, 박락, 철근노출, 횡방향 균열 등이 조사되었다. 이러한 손상과 더불어 슬래브 부분에서의 폭열된 깊이는 평균 100mm 내외로 확인되었다. 또한 화재로 인한 콘크리트 라이닝의 수열온도는 전소된 선로 상부의 슬래브에서는 최소 1,000℃ 이상의 고온이 발생하였으며, 그 외의 선로 부분에서는 500~1,000℃정도, 승강장 부분에서는 200~500℃의 고온이 수열된 것으로 분석되었다. 또한 열응력 해석 및 구조해석 결과 구조물이 붕괴할 정도는 아닌 상태였다. 이러한 결과는 화상의 정도가 심하지 않다는 것은 아니며, 가장 화상이 심한 지하 2층 슬래브의 경우 외력이 자중 및 도보하중에 국한될 뿐 아니라, 주변의 토압에 대해서는 박스 외부벽체가 있고 상부의 통과하중은 충분한 토피가 있음에 따른 결과이다.

2.2 서울 도시철도 유치선 터널 화재사고

서울 도시철도 ○○유치선 터널 화재사고는 2005년 1월 3일 07:14에 지하철 장암발 온수행 열차가 철산역을 출발할 때 열차 화재 발생을 인지하고, 07:19에 광명사거리역에 도착하여 승객전원을 대피한 후 승강장 내의 소화기를 이용하여 1량의 열차에 대하여 진화작업 시행하였으나 잔재로 인한 화재가 발생하였다. 이에 08:54에 유치선 터널로 열차 진입하여 터널내

부에서 화재가 발생하여 약 1시간 18분간의 화재가 발생함에 따라 터널구조물에 화재 손상이 발생하게 된 사고이다. 이에 관리주체에서는 신속하게 전기를 차단하고 승객수송을 정상화하였으며, 화재사고의 안전진단 용역을 실시하였다(사진 1).

화재에 의한 표면경도의 변화를 확인하고자 반발경도치를 매핑을 한 결과 천정부에서 상대적으로 반발경도치가 작은 것으로 분석되었다. 또한 탄산화시험 결과를 구간별, 위치별로 매핑하면 천정부에서 주로 탄산화가 많이 진행된 것으로 분석되었다. 수열온도분포를 분석한 결과 폭열을 받았던 선로 위 천정부에서는 국부적으로 상당히 깊게 화재손상을 입은 것으로 추정되지만, 그 이외의 부위에서는 상대적으로 화재손상의 깊이가 크지 않은 것으로 분석되었다. 특히, 벽체의 경우 바닥면으로부터 3m 내외까지는 화상이 없는 것으로 확인되었다. 폭열을 받아 표면의 최고온도가 700℃ 정도였던 선로 바로 위에서는 약 350 mm 정도의 폭열이 발생하였으며, 폭열을 받지 않은 부위에서는 최고 약 250℃의 온도를 받은 것으로 분석된다(사진 2).



사진 1. 화재 발생 후 전경



사진 2. 유치선 터널 화재 후 전경

2.3 ○○철도 건설공사 신설 박스터널 구조물 화재사고

○○철도 건설현장에서의 화재사고는 2005년 5월 10일 18:40에 케이블 포설공사 중 휴대용 발전기 과열로 불꽃이 방진패드로 옮겨져 화재가 발생하였으며, 21:40경에 화재진압 완료 및 잔불진화 중이었고, 22:00경에 잔불까지 진화 완료되었다. 이로 인하여 약 3시간의 화재가 발생함에 따라 구조물에 화상이 발생하게 되었다.

화재에 의해 발생한 변상은 그을음, 콘크리트 변색, 박리, 박락, 철근노출 등이 조사되었으며 그을음은 터널 바닥면으로부터 약 2.0~3.0m 상단의 측벽 및 천정부, 기둥에서 주로 발생한 상태이다. 콘크리트 표면이 회백색으로 변한 구간 내부에서 콘크리트 박리 및 박락이 조사되었다. 박락은 화재물질이 위치되었던 주변에서 발생하였으며 폭열로 인한 철근노출이 심한 구간도 조사되었으며 폭열부위의 최대깊이는 120 mm로 확인되었다(사진 3).

코어의 평균 콘크리트 압축강도는 40.7 Mpa로서 설계기준 강도($f_{ck} = 28.0$ Mpa)를 상회하고, 반발경도법에 의한 콘크리트 압축강도는 35.5 Mpa ~ 59.9 Mpa의 범위로서 모두 설계기준 강도를 만족하는 상태이다. 탄산화는 거의 진행하지 않은 것으로 조사되었으며, 철근배근 탐사, 염화물함유량 시험의 결과 모두 기준을 만족하는 것으로 분석되었다.

대상 구조물에 대한 수열온도를 분석한 결과, 철근 노출된 콘크리트 표면의 최고온도가 1,000℃내외였던 위치에서 평균 100 mm의 폭열이 발생하였으며, 폭열을 받지 않은 부위에서는 600℃ 이하의 온도를 받은 것으로 추정되었다.

2.4 나이키 추진체 폭발로 인한 터널 화재사고

미사일 추진체를 싣고 가던 화물차가 고속도로 △△터널 구간에서 불이 붙어 전소됐다. 2005년 11월 1일 오후 2시 18쯤 대구시 달성군 현풍면 논공읍 구마고속도로 상행선 △△ 2터널 속 약 300 m 지점에서 미사일 추진체를 싣고 가던 15톤 화물차 한대가 불이 났다.

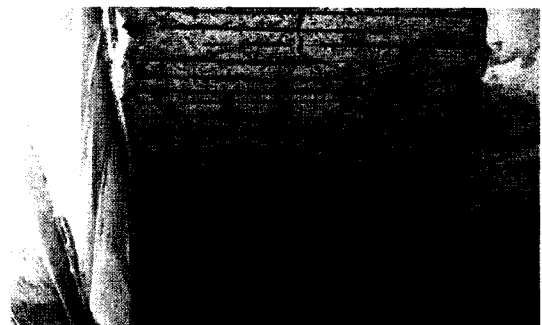
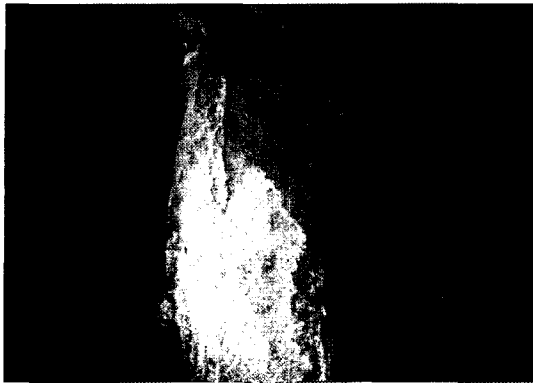


사진 3. 콘크리트 폭열, 철근노출



(a) 기둥부 화상 및 폭열



(b) 기둥부 화상 및 폭열

사진 4. 기둥부와 슬래브의 폭염 및 철근노출

이는 사고 화물차의 우측 뒷바퀴 타이어가 펑크가 나면서 튼 불꽃이 미사일 추진체를 실은 나무상자에 옮겨 붙었다는 것이다. 사고차량은 택배운송업체 화물차로 전남 순천의 모 공군부대에서 미사일 추진체를 싣고 대구 11전투비행단으로 이송하던 중이었던 것으로 알려졌다. 목격자들은 화물차 4대 중 2대가 터널을 빠져나간 상태에서 화재가 났다고 전했다. 불이 날 당시 터널 안에는 수십 대의 차량이 있었으나 운전자 등은 사고가 나자 차에서 내려 모두 터널 밖으로 대피, 인명피해는 없는 것으로 경찰과 소방당국이 전했다. 사고 발생 후 시설물 관리주체에서는 신속하게 터널을 차단하고 차량은 현풍과 회원일원에서 우회를 시키고, 인접한 공사 현장의 장비와 인력으로 응급 복구를 실시하였다. 또한 현장에서 가장 심한 폭열로 인한 피해를 타임을 통하여 박락의 가능성을 제거한 후 서행으로 차량을 통과시키면서 특별점검을 하였고 콘크리트 슬래브 바닥, 라이닝 콘크리트 부분을 보수 보강을 실시하였다(사진 4, 5).

3. 국외 터널 화재

프랑스, 영국, 일본, 미국, 캐나다 등 세계의 여러 지역에서

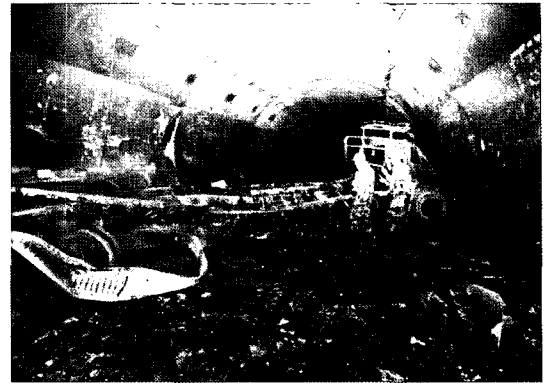


사진 5. 화재 직후 터널 화재 현장

엄청난 인적 및 물적 피해를 발생시킨 심각한 사고들이 보고되고 있다. 이러한 사고들은 지하공간에서 좀 더 효과적이고 안전한 피난과 구조를 요구하게 하였고, 화재에 대한 지하구조물의 대응설계 기술을 요구하고 있다. Haack(1998)은 터널내 대형화재는 터널을 이용하는 운송수단 뿐만 아니라 터널내의 시설에도 심각한 손상을 주며, 이러한 손상은 고온과 유독 연소 가스 등에 의해 발생한다고 지적하였다. 또한 발생한 화재가 비록 터널에 구조적인 위협을 주지 않을 지라도 일정기간 동안 터널의 이용성을 감소시킬 수 있다고 하였다. 즉 화재 후 터널의 보수에 소요되는 시간은 몇 주 또는 몇 달이 걸릴 수 있으며 대도시의 경우 이러한 보수기간동안 터널을 이용하는 시민들은 상당한 불편을 겪게 된다는 점에서 구조적 손상이 발생하지 않은 경우에도 터널 내 화재를 과소평가할 수 없다고 지적하였다. <표 1>은 국외 지하구조물의 대형화재발생사고 현황을 정리한 것이다.

1999년 몽블랑 터널화재 이전에는 많은 사람들이 현대의 터널이 화재에 대한 충분한 안전을 확보하고 있다고 생각하였다. 그러나 몽블랑 터널화재는 39명의 사망자를 냈고 사람들에게 터널에서의 화재는 재앙으로 다가옴을 현실로 느끼게 하였다. 또한, 몽블랑 터널화재가 발생한 후 두 달이 지난 다음, 오스트리

표 1. 구조적인 손상을 입은 최근의 터널 화재

터널 (년도)	콘크리트 강도	최고 온도	화재 기간	피해 길이	피해 부분의 깊이
Great Belt (1994)	76 MPa 28 days	800°C ~ 1,000°C	7시간	1.65 m -천정부에 손상을 입은 16개 구획	탈락 최고점 270 mm
Channel (1996)	110 MPa	1,100°C	9시간	심하게 탈락 피해가 있는 50m를 포함한 500 m	두께 (400 mm)가 100% 탈락되어 그라우트가 보임
Mont Blanc (1999)	기록 없음	1,000°C	50시간	900 m-터널 천정부 대부분이 피해가 있음	터널 구조물에 심각한 손상

아의 타우른 터널에서 차량충돌에 의해 12명의 사망자가 발생하였고(사진 6 (a)), 오스트리아의 카프룬에서 150명의 사망자가 발생하였다. 이러한 사고 이후 계속되는 유럽의 터널화재 안전에 대한 노력에도 불구하고 2001년 고타드 터널에서 두 대의 중차량 충돌이 원인이 되어 11명의 사망자와 250m의 터널라이닝이 붕괴되는 대형 터널화재사고가 발생하였다(사진 6 (b)).

Carvel(2002)은 유럽에서는 이미 터널내의 화재에 대한 연구를 계속적으로 수행해온 상태이며 터널 내에서의 화재와 연기 거동에 대한 실험적 연구가 충분하다고 판단하고 있으나, 이와 같이 계속적으로 터널 내 대형화재가 발생하는 원인은 기 시공된 터널의 화재안전능력이 현재의 유럽기준에 부합되지 못하였기 때문인 것으로 지적하였다.

4. 터널에서의 내화 대책

4.1 내화 개요

지난 10여 년간 터널 내에서 발생한 숱한 화재들이 콘크리트 라이닝의 구조적 안전성을 손상시킴에 따라 터널라이닝에 대한 외부적인 내화(耐火) 방안이 중요한 과제로 대두되고 있다.



(a) 몽블랑터널 화재 전경



(b) 카프룬 터널화재로 인한 폭열

사진 6. 터널화재 전경

콘크리트는 그 자체가 불연성이고 열전도율이 낮음에도 불구하고, 가열된 콘크리트는 내부에서 공기압과 내부 인장 응력의 상승에 의하여 폭열(爆裂)을 일으킨다. 이것은 단면 손실과 함께 보강 철근이 위험한 온도에 노출되어 인장응력이 저하되는 결과를 가져온다. 또한 콘크리트는 약 300℃ 이상의 온도에서 강도 저하가 발생한다.

굴착 터널에서의 내화(耐火)는 콘크리트의 폭열(爆裂)을 방지하는 것이 목적인 것에 반하여, 매설된 관, 횡단로 및 지하도 등에서의 내화(耐火) 목적은 주로 천정 보강재의 처짐을 방지하는 것이다. 내화(耐火)에 대한 요구 조건은 위험물질을 운송하는 터널의 경우 약 5분에 1,000℃에 도달하고, 최고 온도가 약 1,300 ~ 1,350℃에 이르는 조건을 만족해야 한다.

4.2 내화의 필요성

터널 화재에서의 안전은 인명에 대한 안전과 구조물에 대한 안전 모두를 적용해야 한다. 터널 화재에 대한 안전 설계에서는 일반적으로 인명의 안전에 더 높은 가치를 두어왔다. 구조물에 대한 안전의 경우는 단순히 경제적인 관점으로 고려되어 왔다. 그러나 화재 시 구조물의 상태 보전은 여러 면에서 인명에 영향을 준다. 일반적으로 화재 발생에 따라 먼저 터널을 이용하는 사람들에게 의하여 화재의 연기와 열 등이 감지되고, 사람들이 대부분 대피한 다음 콘크리트의 탈락이 발생하는 것이라고 인식되고 있다. 그러나 이와 같은 인식은 다음과 같은 이유로 매우 위험한 결과를 초래할 수 있다.

- (1) 무거운 팬과 같은 중량물이 화재 중에 고정 앵커의 파손으로 인하여 사람 위로 떨어질 수 있다.
- (2) 과열된 콘크리트 파편이 구조 및 비상 대원과 같은 현장의 사람들에게 떨어질 수 있다.(channel tunnel 화재에서 실제 발생)
- (3) 터널 라이닝의 완전한 파괴나 지붕의 붕괴는 전체 터널의 붕괴라는 결과를 가져올 수 있다.(불투수성의 백악계 대리석 층을 굴착한 channel tunnel에서는 이러한 위험은 없었음)
- (4) 지지 구조나 문 자체의 고장으로 인하여 탈출로의 문들이 작동되지 않을 수 있다.

또한 다음과 같은 재정적, 사회적 및 경제적인 영향이 발생한다.

- (1) 사용자 및 운영자에게 발생하는 손해는 보수비용뿐만 아

나라 보수기간 동안의 시설의 폐쇄로 인한 운영수입 손실금액도 포함된다.

- (2) 시설의 봉쇄로 인하여 해당 지역뿐만 아니라 광범위한 인접 지역에 대한 경제적인 파장이 발생한다. 이것은 특히 mont blanc 화재에 의한 이태리와 프랑스의 경우에 실질적으로 발생하였다.
- (3) 터널 봉쇄로 인한 사회적인 영향이 발생한다.
- (4) 차량들이 먼 거리를 돌아 운행되는 것으로 인한 경제적인 손실(유류비의 증가, 납기지연 등)과 환경피해(대기 오염, 소음, 진동 등)가 발생한다.

콘크리트 라이닝을 화재로부터 보호하는 것은 시공시 많은 비용이 드는 것으로 알려져 있지만, 다른 한편으로 인명 및 구조물과 사회·경제적인 위험에 대한 비용에 비하면 경제성이 우수하다. 위험도 평가는 요구되는 내화(耐火) 등급을 확인하기 위하여 분명하게 실시되어야 하지만, 유럽의 경우 최근에는 좀 더 높은 등급의 내화(耐火)를 요구하는 추세이다.

4.3 유럽의 동향

4.3.1 터널 라이닝의 내화(耐火) 처리 고품질화

1994년 덴마크의 Great Belt 터널 화재와 2년 후인 1996년에 발생한 영국의 Channel 터널 화재에서처럼 터널에서 화재가 발생하면 항상 콘크리트 라이닝이 크게 손상을 입었고, 그것은 덴마크와 영국이 구조물의 내화(耐火)에 대하여 좀더 심각하게 받아들이는데 큰 영향을 주었다. 또한 유럽¹⁾의 터널 화재 빈도가 통계적으로 낮아지던 1990년대 중반에 Great Belt 터널 화재와 Channel 터널 화재가 발생하였다.

지금 영국에서는 콘크리트의 탈락을 방지하고 철재 보강재가 극한 온도를 초과하지 않도록 보증하기 위하여 터널 라이닝을 화재로부터 보호하는 것이 일반적인 관례가 되었다. 이것은 분명히 공식적인 지침에 앞서는 향상된 보호 방법으로 터널의 사

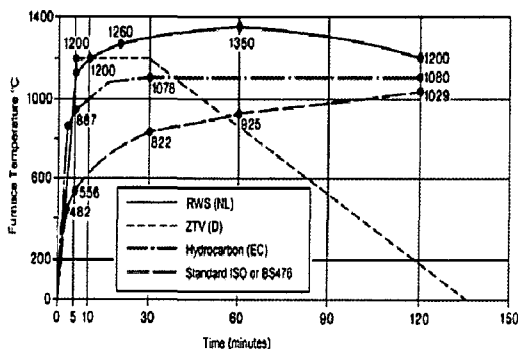


그림 1. 터널의 표준 공칭 온도-시간 화재 곡선

용자와 운영자에 의하여 요구된 것이다. Channel 터널 난간 고리, Heathrow Airside 터널 및 보강된 Dartford 터널(뿔어붙이기 콘크리트로 보호한 노후 터널)들이 그 예이다. 이러한 예들은 적어도 영국에서는 화재에 대한 구조적인 보호가 엄격하게 채용 되어질 뿐 만 아니라 새로운 터널의 설계와 기존 터널의 개선을 위한 예산이 반영되고 있다는 것이다.

4.3.2 터널 안전에 관한 유럽의 대책

Danish 와 Channel 터널 화재 시에는 사망 피해가 없었으나 최근 유럽에서의 다른 터널 화재에서는 사망 피해가 있었으며 전 유럽에서는 ADAC²⁾와 같은 기관을 통해 자체 조사를 하였다.

유럽 42개 기관에서 참여하고 1,200만 유로의 기금이 투입된 UPTUN(upgrading tunnel) european에서 터널 안전에 관한 규제 사항들을 역점을 두어 다루고 있다. 이 UPTUN 프로젝트는 유럽 각국의 자금 지원으로 이루어지는 터널 안전에 관련된 유일한 프로젝트임과 동시에 유럽이 터널 안전을 얼마나 중요하게 인식하고 있는가에 대한 공식적인 수준을 보여주는 것이다. 이러한 프로젝트들은 앞으로 터널 안전을 위한 유럽 지침을 제시할 것이다.

4.4. 터널의 내화처리

4.4.1 개요

터널 화재에 따른 구조적인 거동은 여러 가지 인자에 따라 매우 달라질 수 있는 화재의 특성에 따라 좌우 된다. 주요 특성은 구조물의 표면에서 화재에 의하여 발생하는 온도-시간 곡선이다. 특히 ㉑ 콘크리트 내부의 온도, 함수율과 간극압의 변화율의 크기에 영향을 미치는 가열 속도(온도 상승율), ㉒ 재료의 물리-화학적 특징과 재료의 특성에 영향을 미치는 최고온도 크기, ㉓ 시간 경과에 따른 구조물 내부 온도 상승에 영향을 미치는 화재 지속기간, ㉔ 냉각방법(예를 들면, 물 냉각은 재료와 온도 분포에 대하여 "자연" 냉각과는 다른 영향을 미침)이다. 터널에 대한 제한적 특성이 주어지면, 터널 화재들은 일반 건물 화재보다 높은 온도를 발생시키고 소방대원과 장비의 접근이 제한되기 때문에 화재 시간이 훨씬 길어진다. 터널에 대한 몇 개의 공칭 화재 곡선이 있으며, 그것들 중 가장 급격한 것은 온도가 5분 후에 1,100°C(평균 가열 속도 ≈ 216 °C/min)에 이르고, 60분 후에 1,350°C에 이르는 독일 RWS 탄화수소 곡선이다. 건물의 경우 섬유유질 재료의 연소는 온도가 5분 후에 556°C, 30분 후에 821°C(평균 가열속도 ≈ 30 °C/min), 60분 후에 925°C 그리고 2시간 후에 1,029°C에 이르는 ISO 834 곡선에 의하여 형상화 되며 이는 가장 완만한 화재 곡선이다. ISO 화재 곡선은 또한 소규모 터널의 화재를 위하여 제안 된다. 다른 모든 터널 공칭 화재 곡선

은 이 두 극한 곡선 사이에 있게 된다(그림 1).

4.4.2 터널라이닝의 내화(耐火) 처리

불연성이고 열전도성이 낮음에도 불구하고, 콘크리트는 화재가 발생하는 동안 내부 인장 응력과 간극압의 상승에 의하여 폭열(爆裂)을 일으키게 된다. 이것은 단면 손실과 보강 철근의 극한 온도로의 노출이라는 결과를 가져온다. 또한, 콘크리트는 온도가 약 300°C 이상으로 가열되면 강도가 저하한다. 이러한 문제들은 터널 라이닝에 대한 내화(耐火) 처리로 접근할 수 있지만 접근하려는 터널의 형식에 따라 그 방법은 달라진다.

- (1) 매설된 관, 횡단로와 덮개, 지하도 등에서의 내화(耐火) 목적은 주로 천정 보강재의 처짐을 방지하는 것이다.
- (2) 굴착 터널에서의 내화(耐火)는 콘크리트의 강도가 높을수록 심해지는 폭열(爆裂)을 방지하는 것이다.

일반적으로 내화(耐火) 처리는 다음 문제들이 결합될 때 필요하다.

- (1) 폭열(爆裂) 방지(prevention of explosive spalling)
- (2) 극한 온도의 초과로부터 보강 철근과 프리스트레싱 강재 보호
- (3) 극한 온도의 초과로부터 콘크리트의 보호

최근 대부분의 터널은 콘크리트 라이닝으로 시공하고 있으나, 과거에는 철재 라이닝을 사용하였다. 최근 들어 이러한 터널 중 일부가 방열 울타리의 접목으로 고품질화 되고 있다. 그 중의 하나가 뿔어붙이기 콘크리트로 터널의 내화(耐火)를 실시한 런던의 Dartford 터널이다.

4.5 터널 라이닝콘크리트의 폭열

4.5.1 폭열(爆裂, explosive spalling)

폭열(爆裂)은 화재 발생시 높고 빠르게 상승하는 온도에 콘크리트가 노출되었을 때 구조물의 표면으로부터 콘크리트의 층이나 조각이 떨어져 나가는 것이다. 이 화재 초기 20 ~ 30분 사이에 발생하고, 가열 속도에 영향을 받는다.

많은 재료적(투수성, 함수율, 골재 크기와 종류, 균열과 보강 유무), 기하학적(단면의 모양과 크기) 그리고 환경적(가열 속도, 가열 이력, 하중 수준) 인자가 화재시 콘크리트의 탈락에 영향을 미친다는 것이 기존의 연구를 통하여 확인되었다. 탈락에 영향을 미치는 주 인자는 가열 속도(특히 2~3°C/min 이상),

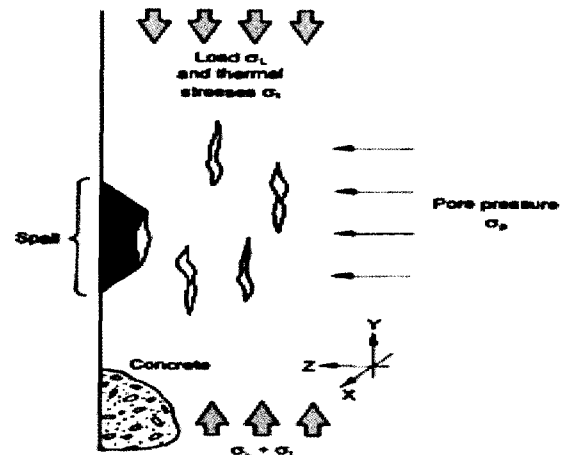


그림 2. 콘크리트 탈락 메커니즘³⁾

재료의 투수성, 간극의 함수율(특히 수분량이 콘크리트 중량에 대하여 23% 이상), 보강재의 유무와 외부 재하 하중의 인자이다. 낮은 투수성의 고성능 콘크리트(HPC)는 더 높은 인장 강도에도 불구하고 일반 강도 콘크리트에 비하여 폭열(爆裂) 현상이 크며 다양한 형태로 탈락을 일으킨다. 이것은 가열되는 동안에 발생하는 재료의 낮은 투수성으로 인한 더 큰 간극압 때문이다. 또한 간극압의 최대치는 고성능 콘크리트의 표면 부위에서 일어나고 이는 고성능 콘크리트의 상대적으로 얇은 단면이 지속적으로 탈락되는 이유이다.

폭열(爆裂)을 설명하기 위하여 제안된 메커니즘은 아래의 세가지와 같다(그림 2).

- (1) 간극압 탈락(pore pressure spalling) : 함수량, 가열 속도, 재료의 투수성에 따라 좌우되는 콘크리트 내부 간극압의 상승에 기인한다.
- (2) 열응력 탈락(thermal stress spalling) : 세라믹의 경우처럼 수분을 포함하고 있지 않지만 높은 가열 속도에서 온도와 응력의 큰 변화에 따라 폭발한다.
- (3) 간극압과 열응력 복합 탈락(combined pore pressure & thermal stress spalling)

지금까지 폭열(爆裂)에 대처하기 위한 많은 방법들이 제안되어 왔고, 가장 효과적인 방법들은 다음과 같다

- (1) 화재로부터 콘크리트 표면을 보호하기 위한 차열벽(thermal barrier)을 설치한다. 이러한 차열벽은 온도 상승을 억제하고 내부 재료로의 열 흐름을 감소시키는데 특

히 효과적이다. 뿔어붙이기 콘크리트로 코팅하는 질석(풍화한 흑운모) 처럼 판형식의 차열벽은 여러 가지가 있다. 팽창성 도료는 일반적으로 콘크리트 구조물이 아니라 강재 구조물의 내화(耐火)에 사용되고 있다. 이것은 습윤 콘크리트에 대한 부착성의 문제와 상대적으로 낮은 화재 등급 때문이다. 흥미롭게도 몇 가지의 차열벽은 혼합시에 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)를 사용한 뿔어붙이기 콘크리트로 만들어진다. 따라서 적절하게 시공된 콘크리트는 근본적으로 화재에 대한 저항성이 있으며, 콘크리트가 콘크리트를 화재로부터 보호하기 위하여 사용될 수 있다.

- (2) 160°C 이상으로 가열되는 동안 투수성을 증가시켜 탈락과 간극압을 감소시키는 목적으로 콘크리트에 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)를 첨가한다. 이러한 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)는 약 160°C에서 녹고 콘크리트 내부에서 수분의 탈출로를 제공한다. 또한 마이크로 스코픽 분석으로 알려진 파이버 주변의 미세 균열도 압력의 감소에 기여한다. 지금까지의 연구로는 직경 18 마이크론의 단섬유가 가장 효과적이다. 최근에는 더 좋은 효과를 나타내기 위해 용점이 낮은 (130°C) 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)가 개발되었다. 이것은 특히 낮은 투수성의 수밀하고 포화된 콘크리트에 더욱 효과적이다. 그러나 향후 연구 개발 하여야 할 두 가지 핵심적인 사항이 있다. 즉, ① 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)가 작용하는 메커니즘이 완전히 구명되지 않았다(콘크리트의 미세구조에서의 파이버의 용해/증발의 영향과 미세균열의 추가적 인역할), ② 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)의 사용 방법이 아직 완벽하지가 않다(재하 하중과 콘크리트 강도와와의 관계에서 파이버의 량과 형태). 더구나 고성능 콘크리트와 자기충전(self compacting) 콘크리트에 대한 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)의 효과도 명확하게 검증되지 않고 있다.

폭열방지 방법은 몇 개의 인자들에 의해 결정된다.

- (1) 기존 및 신규 터널 : 기존 터널에서는 오로지 차열벽만이 사용된다. 신규의 경우에는 양쪽의 어느 방법이든 선택할 수 있다.
- (2) 원가 및 심한 온도 : 폴리프로필렌 파이버(polypropylene fibers)는 좀 더 저렴한 선택이며, 타설 중에 콘크리트에 혼합될 수 있다. 폴리프로필렌 파이버는 심한 간극압의 발생을

방지하지만 콘크리트 내부 온도의 상승을 감소시키는 것은 아니다. 그러므로 과도한 온도를 피하여야 하는 터널의 천정부나 보강재에는 신규 터널에서도 차열벽이 사용된다. 최선의 해결책은 모든 신규 터널의 콘크리트에 폴리프로필렌 파이버를 사용하고 화재로부터 특별히 보호되어야만 하는 부위에는 차열벽을 사용하는 것이다.

4.6 화재와 강재재료

철근콘크리트의 화재에 대한 저항성은 콘크리트⁶⁾ 특성뿐 아니라 고온하에서의 보강재의 특성에 따라 크게 영향을 받는다. 매설관, 횡단로, 박스 터널들처럼 인장 하중에 노출된 구조물에 있어서는 특히 그렇다. 화재에 노출된 철근콘크리트 구조물의 특징은 구조물 표면 온도가 최고점일 때 뿐만 아니라 이후에 발생하는 강재 온도의 최고점에서도 내화성능의 저하가 발생한다는 것이다(그림 3). 파괴는 강재 온도가 한계 값을 초과할 때 일어난다. 강재는 콘크리트 덮개가 탈락되지 않으면 폴리프로필렌 파이버에 의하여 초과하는 온도로부터 보호된다. 화재에 대비하여 적절한 철근 피복을 확보해 주기도 한다. 그러나, 콘크리트 피복 두께가 충분하지 않거나 탈락될 우려가 있으면 차열벽을 사용하여야 한다.

4.7 화재와 콘크리트 재료

1,000°C를 초과하는 용융에 이르는 정도까지 가열은 물리, 화학 작용의 변화를 유발한다. 이러한 작용들의 특징은 화재 중의 환경과 함수 조건뿐만 아니라 사용된 배합과 혼합 성분에도 따라 달라진다. 이러한 요소들에 따른 고온에서의 콘크리트의 압축 강도를 보면 300°C에서 가열되지 않은 콘크리트 압축 강도와 비교하여 60% 정도로 낮아지거나, 130%로 높게 변화될 수 있다. 재료적, 환경적 요소들에 대한 변화 양상이 주어진다면, 온도에

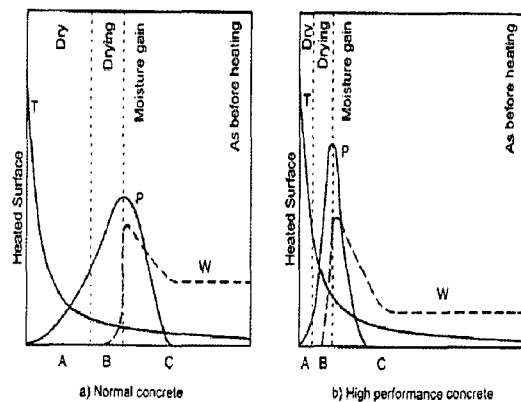


그림 3. 한 측면을 가열했을 경우 콘크리트의 변화⁴⁾

대한 콘크리트의 특성에 대하여 전형적인 곡선이 하나만 존재한다고 추정하는 것은 잘못된 것이다. 이러한 원인은 가열된 콘크리트의 특성 하에서의 재하-가열의 연속, 재하 수준, 골재 종류 등의 역할이 충분히 규명되지 않았기 때문이다.

탈락은 재료적인 현상이라기 보다는 구조적 현상이다. 비록 탈락이 일어나지 않았다 하더라도 300°C 이상의 고온에서 중대한 강도손실이 발생 할 수 있고, 550 ~ 600°C를 초과하는 온도에서 구조적인 기능을 상실하게 된다. 다행히 콘크리트의 낮은 열전도 특성 때문에 단지 표면부분만이 이러한 높은 온도에 노출된다. 화재 후에 300°C를 초과하는 온도에 노출된 콘크리트는 전부 제거하는 것이 일반적이다.

4.8 유럽의 내화가이드라인

독일의 내화 설계 목표는 <ZTV curve- 그림 4> 다음과 같다.

- (1) 터널 화재 동안 보강재의 온도 300°C 이하
- (2) 터널구조물의 내하성능을 위협하는 손상이 없을 것
- (3) 방수성을 유지하면서 터널 구조물의 사용성을 해치는 변형이 남지 않을 것

네덜란드는 많은 해저 터널이 있기 때문에 RWS curve에 따라 내화 설계를 하는 것으로 규정되어 있다. 누수를 방지하기 위하여 터널 구조체는 다음의 조건들을 만족시켜야 한다.

- (1) 수밀성의 저하가 없을 것
- (2) 터널 붕괴가 없을 것

그러므로 내화를 위한 시험규정들은 다음 기준을 만족시켜야 한다.

- (1) 콘크리트와 내화재료 계면에서의 온도는 380°C 이하
- (2) 보강재 하부(일반적으로 콘크리트 표면으로부터 상부로 25 mm)에서의 온도 250°C 이하
- (3) 고무질 이음부 개스킷(rubber joint gasket)에서 60°C 이하

탈락이 주요한 문제가 되는 통로 터널에서는 독일의 경우 200 ~ 250°C의 임계 계면온도를 제안하고 있다⁷⁾.

5. 결 론

본 고는 국내외에서 발생한 터널 화재로 인한 여러 경우를 조사하여 이에 따른 문제점과 내화대책의 필요성에 대하여 기술하고자 하였다. 특히 터널에서 발생하는 화재는 폐쇄공간에

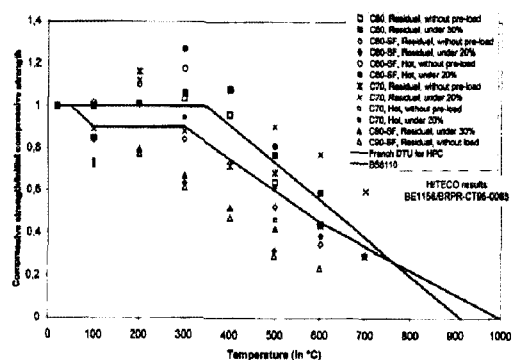


그림 4. 온도별 콘크리트 압축 강도 분포⁵⁾

서 발생하므로 화재온도가 단시간에 고온까지 상승하게 되고 이에 수반하여 콘크리트 라이닝 등에 내하력 손상을 발생시킬 수 있다. 그러므로 유럽의 경우 최근 10여 년간 발생한 터널 화재로부터 터널 라이닝 콘크리트에 대한 내화규정을 강화하고 있으며, 우리나라의 경우도 이에 대한 도입을 적극 검토하여야 할 것이다. 터널 라이닝 콘크리트에 내화 시공을 하는 것은 많은 비용이 들지만 최근 큰 관심을 끌고 있는 무기질계의 내화 모르타르 뿔칠 공법 등은 비교적 저렴한 편이며, 인명 보호 및 구조물 손상으로 인한 사회·경제적인 손실에 비하면 오히려 경제성이 있다고 할 수 있다. □

참고문헌

1. PIARC Committee on Road Tunnels, *Fire and smoke control in road tunnels*, World Road Association, ISBN 2-84060-064-1, 1999, 288 pp.
2. Brux, G., *Safety in road tunnels*, Tunnel, 2000, pp. 55 ~ 66.
3. Zhukov, V.V., *Explosive failure of concrete during a fire in Russian*, Translation No. DT 2124, Joint Fire Research Organisation, Borehamwood, 1975.
4. Anderberg, Y. and Khoury, G., Private Communication.
5. Cheyrezy, M., Khoury, G., and Behloul, M., "Mechanical properties of four high-performance concretes in compression at high temperatures". *Revue Francaise de Génie Civil*, Vol 5, No. 8, 2001, pp. 1159 ~ 1180.
6. Khoury, G.A., Anderberg, Y., Both, K., Felinger, J., and Majorana, C.E., Hoj, "Niels Peter Fire Design of Concrete: Materials, structures and modelling", *Keynote Paper, Proc. International FIB Congress*, Japan, October, 2002.
7. Both C., van der Haar P., Tan G., and Wolsink, G., "Evaluation of passive fire protection measures for concrete tunnel linings", *International Conference on Tunnel fires and escape from tunnels*, Lyon, France, 1999, pp. 95 ~ 104.