

화재로 인한 터널 구조물의 피해와 대책

장수 호*, 윤태국², 최순욱³, 배규진⁴

최근 들어 지구촌은 기상이변 등으로 인해 많은 인적, 물적 피해를 겪고 있습니다. 우리가 살고 있는 이 땅을 가꾸고 조각하는 건설인으로서 이러한 피해를 반복적으로 경험하고 있다는 것은 매우 부끄러운 일이기도 하지만, 한편으로는 우리가 나아가야 하는 기술개발의 방향을 암시하는 것이라고 할 수 있습니다. 우리나라도 이러한 피해에 자주 노출되다 보니 방재분야에 대한 관심이 점차 깊어지고 있습니다. 방재를 담당하는 전담기구도 조직되고 관련 제도 및 법령을 정비하기 위한 노력도 많아졌으며, 대학에서는 방재전문인력을 양성하려는 움직임도 있습니다. 물론 우리학회에서도 '재해대책기술위원회'가 새로이 조직되어 좀더 전문적으로 기술발전을 이끌어가고 있습니다. 그래서 올해에는 이러한 방재분야의 정보를 공유하고 발전시키기 위해 방재와 관련된 지반공학분야의 전문가들을 모시고 [지반공학 분야의 재해와 예방]이라는 주제로 특집내용을 기획하였습니다. 지반공학에서 다루고 있는 구조물들 중 방재대상으로 관리할 필요가 있는 터널분야, 사면분야, 댐분야 등 각 분야에서 발생하는 재해와 이를 해결해 나가려는 최신의 기술동향을 다루고자 합니다.

앞으로 다뤄지는 [지반공학 분야의 재해와 예방] 특집기사에 많은 회원 여러분의 관심을 부탁드립니다.

황영철(상지대학교 건설시스템공학과 교수, 학회지 편집장)

1. 서론

2003년 2월에 발생한 대구지하철 중앙로역 화재

사고 이후에 국내에서도 터널내에서의 화재에 대한 관심이 증대되고 있다. 더욱이 장대터널의 증가와 터널내 교통량의 증가뿐만 아니라 최근 들어 빈번하게 발생하고 있는 터널 내에서의 교통사고 등을 고려한다면 터널 화재의 위험성은 상당히 높다고 할 수 있다.

이러한 터널 화재는 막대한 인명피해뿐만 아니라

*1 한국건설기술연구원 지반연구부 선임연구원 (sooho@kict.re.kr)

*2 한국시설안전기술공단 지하시설실 진단팀장

*3 한국건설기술연구원 지반연구부 연구원

*4 한국건설기술연구원 선임연구부장, 연구위원

폐쇄된 지하공간이라는 특수성으로 인해 화재 개시 후 1,000℃이상의 고온에 도달할 수 있기 때문에 터널 구조물에도 상당한 피해를 야기할 수 있다. 특히 화재후 손상된 터널 구조물의 복구 작업에 소요되는 직접적인 경제적 손실과 교통흐름의 저해로 인한 간접적인 손실을 고려한다면 피해 규모는 매우 크다고 할 수 있겠다.

유럽에서는 연이어 발생한 대형 터널 화재사고들로 인해 1990년대부터 EUREKA 프로젝트, FIT (Fires In Tunnels) 프로젝트, DARTS(Durable and Reliable Tunnels Structures) 프로젝트 등과 같은 공동 연구들을 통해 터널 화재에 대한 대책 기술을 계속적으로 발전시키고 있다(Haack, 1998; Khoury, 2003). 미국에서도 유럽의 EUREKA 프로젝트와 같은 시기에 MTFVTP(Memorial Tunnel Fire Ventilation Test Program)을 수행한 바 있으며, 일본에서도 터널 화재안전에 대한 상당한 연구가 진행되고 있다(Carvel, 2002; 日本コンクリート工學協會, 2003).

하지만 현재까지 국내에서는 화재 후 신속한 조사·평가·복구 기술과 화재로 인한 터널 구조물 손

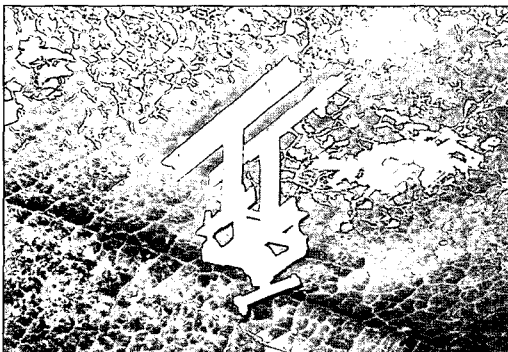
상을 사전에 방지하기 위한 대책이 매우 미흡한 실정이다. 또한 터널 구조물의 화재 손상과 관련된 각종 규정이나 지침이 마련되어 있지 않다.

이에 본 고에서는 국내외 터널 화재사례들을 정리하여 터널 화재의 특성을 분석하고 터널 화재에 대한 대책기술의 동향을 소개하여, 터널 화재의 위험성을 부각시킴은 물론 향후 개선 방향 등을 제안하고자 한다.

2. 터널 화재발생 동향

2.1 국내의 터널 화재사고

대구지하철 참사 이전에도 국내의 터널 내 화재사례는 다수 있었지만 대부분 경미한 사고로서 일시적인 통행제한 등의 조치로 마무리 되었다. 그러나 대구지하철 참사의 경우는 사망 192명, 부상 146명, 실종 21명의 인명 피해와 8개월간의 보수·보강에 의하여 약 1,000억원의 경제적인 피해가 발생하면서 대형 화재로 인한 터널 구조물의 피해가 심각한 문제임을 인식하게 하였다. 대구지하철 1호선 중앙로



(a) 터널 천정부의 망상균열



(b) 콘크리트 파손 및 철근 노출

그림 1. 대구지하철 중앙로 역사 화재 피해 상황

화재로 인한 터널 구조물의 피해와 대책

표 1. 국내 터널 화재사고 사례 (1996년 이후)

터널명	터널연장	발생년도	화재원인	화재 피해
증악터널(현재 폐도)	755m	1996	· 운전부주의로 터널 면벽 충격후 후속 차량의 연쇄 충돌로 화재 발생	· 주/추월선 일시차단 · 교통제한 시간 20분
대덕터널(현재 폐도)	408m	1997	· 중형화물차 운전자의 과속 및 운전부주의로 터널 좌우측 면벽 연쇄 충격후 전도/기관 화재 발생	· 주행선 차단 · 교통제한 시간 40분
마성터널(영동선)	1450m	1999	· 대형화물차의 파손된 타이어가 과열되어 화재 발생	· 주행선 차단 · 교통제한 시간 30분
남산3호터널(서울시)	1260m	1999	· 빗길 과속으로 인해 승용차가 매표소에 충돌	· 1명 사망
수리터널 (판교-일산선)	1882m	2000	· 소형화물차 운전자의 핸들 과대조작으로 우측터널 내벽에 충격후 전소	· 주행선 차단 · 교통제한 시간 30분
둔내터널(영동선)	3300m	2000	· 둔내터널 상행선 출구부 소형차 화재	· 3시간 이상 차량 정체
영동터널(경부선)	505m	2000	· 대형화물차의 엔진과열로 인한 화재	· 주행선 일부차단 · 교통제한 시간 5분
장지터널(부산시)	587m	2001	· 과속으로 인해 승용차가 터널입구 옹벽에 충돌	· 1명 사망, 4명 중상
다부터널(중앙선)	1041m	2001	· 엔진부분의 합선으로 인해 승용화 화재	· 1시간만에 화재 진화
마성터널(영동선)	1461m	2001	· 터널내 11중 연쇄 충돌사고 발생	· 1명 사망, 100여명 부상
금화터널(서울시)	555m	2001	· 택시와 승용차 3중 충돌	-
무안3터널(서해안선)	280m	2002	· 승용차가 터널 입구 측벽과 충돌	· 2명 사망
남산1호터널(서울시)	1530m	2002	· 좌석버스의 자연발화	· 차량후미 화재 20분간 지속
대구지하철 중앙로역	-	2003	· 객차 방화로 인한 화재	· 사망 192명, 실종 21명, 부상 146명 · 지하3층 승강장 주변 구조물에 집중적으로 화상 발생 · 선로 상부의 슬라브에서 단면손실은 평균 10cm내외이며, 최소 1,000°C이상의 고온 발생 추정 · 시설물안전점검 및 안전진단 세부지침(터널편)에 의한 종합평가등급은 E등급
옥천4터널(경부선)	874m	2003	· 화물트럭이 터널 진입후 화재, 연기에 의해 후속 차량 10대 연쇄 충돌	· 약 3시간 교통 통제
홍지문터널(서울시)	1890m	2003	· 25인승 미니버스가 승용차 충돌화재, 2분후 전력공급 차단	· 2시간 40분간 교통 통제
옥천3터널(경부선)	1613m	2003	· 승용차가 터널 측벽 충돌, 6대 연쇄 충돌	· 10여명 부상
안영2터널(대전시)	600m	2003	· 1톤 화물차에서 매트리스가 떨어져 정차, 승용차와 관광버스가 충돌	· 5명 부상
월드컵터널(서울시)	-	2003	· 승용차가 경구부 중앙분리대와 충돌	· 1명 사망
반포대교 지하차도(서울시)	-	2003	· 25톤 트럭이 지하차도 교각과 정면충돌	· 3시간 동안 교통 통제

표 1. 국내 터널 화재사고 사례 (1996년 이후)(계속)

터널명	터널연장	발생년도	화재원인	화재 피해
운수역 유치선 구간 (서울지하철 7호선)	-	2005	· 객차 방화로 인한 화재	· 약 1시간 이상 화재 발생 · 화상구간 약 50m · 최고온도가 700°C 정도였던 선로 상부에서 약 3.5cm의 단면 손실 발생 · 시설물안전점검 및 안전진단 세부지침(터널편)에 의한 종합평가등급은 C등급
OO공사 박스터널	-	2005	· 케이블 포설공사중 휴대용 발전기 과열로 불꽃이 궤도 자재(방진패드)로 옮겨져 화재 발생	· 약 3시간동안 화재 발생 · 최고온도가 1,000°C 내외였던 위치에서 평균 10cm의 단면 손실 발생 · 시설물안전점검 및 안전진단 세부지침(터널편)에 의한 종합평가등급은 C등급
달성2터널(구마선)	993m	2005	· 나이키 미사일 추진체를 운반하던 차량 발화로 인한 화재	· 화재로 인한 터널의 화상 구간은 전체 993m 연장중 약 470m로서 47%에 해당 · 일부 구간은 500°C 이상의 고온에 노출된 것으로 추정

역 전동차 화재사고의 개요를 살펴보면 그림 1과 같이 전동차에서 발생한 화재는 전동차가 정거한 구간을 중심으로 폭발로 인한 박리, 철근노출, 망상균열 등의 현상이 발생하였고 본선구간에도 화재로 인한 그늘음이 환기구까지 발생되었다.

화재사고 발생이후의 현장정밀조사에 의하면 전동차량이 위치한 선로위의 슬래브에서는 최고 1,000°C 이상의 고온을 받은 것으로 추정되고 있으며, 그 외 선로위의 슬래브는 전체적으로 500~1,000°C 정도의 고온을 받은 것으로 추정하고 있다(대구지하철공사, 2003). 이와 같은 조사내용은 국내에서도 터널 구조물의 화재손상 방지대책 수립이 필요하며 선진국에서 적용되고 있는 화재시나리오인 RABT 곡선 및 RWS 곡선과 같은 터널 화재시의 온도이력을 국

내실정에 맞게 도입할 필요가 있음을 말해주고 있다.

대구지하철 중앙로역 화재사고 이후에도, 2005년 1월에 방화에 의해 화재가 발생한 서울지하철 7호선 운수역 유치선 구간, 현재 시공중인 OO건설공사의 신설 박스터널구간에서 인부의 실수로 인하여 2005년 5월에 발생한 화재사고, 그리고 2005년 11월에 나이키 미사일 추진체를 운반하던 화물차량으로 인해 발생한 구마고속도로 달성 제2터널의 화재 사고 등 최근 들어 터널내 화재사고가 빈번하게 발생하고 있다.

최근 10년간 발생한 터널 화재사고 사례를 정리하면 표 1과 같다. 전체적으로 도심지 터널과 고속도로/국도상의 터널 화재의 사고빈도는 각각 47.8%(11건)와 52.2%(12건)로 거의 유사하게 나타났다. 지하

화재로 인한 터널 구조물의 피해와 대책

표 2. 터널 유형별 화재사고 발생 가능성

터널 유형	화재 사고율(사고빈도/1억대·km)
도심지 터널	0 ~ 10
일방향 터널 (주로 고속도로)	0 ~ 10
양방향 터널 (주로 외곽터널)	0 ~ 15

철 터널구간을 제외하고 도심지 터널의 경우 터널 개수와 연장이 고속도로/국도상의 터널보다 상대적으로 작음에도 불구하고, 도심지 터널의 화재 발생 빈도가 비교적 크게 나타난 이유는 방화나 빈번한 교통흐름으로 인한 사고 위험 등을 들 수 있겠다. 또한 사고유형을 분석해보면, 갱구부 추돌사고로 인한 화재가 34.8%(8건)로 가장 큰 비중을 차지하며, 터널내 추돌사고와 차량결함으로 인한 화재사고는 각각 26.1%(6건), 방화로 인한 원인은 8.7%(2건) 그리고 기타 4.3%(1건)으로 나타났다. 이상과 같이 과거에는 터널 갱구부 부근의 화재가 가장 큰 비중을 차지하였으나 터널이 장대화되고 교통량이 많아짐으로 인해 터널 내부에서 화재가 발생할 위험이 더욱 증가될 수 있음을 예상할 수 있다. 참고적으로 터널 화재 사고확률은 1억대·km당 사고빈도의 단위로 나타낼 수 있는데 이를 정리하면 표 2와 같다(김은수 외, 2003).

이와 같이 터널 화재 빈도가 증가되고 화재로 인한 피해규모가 커지고 있는 실정에도 불구하고, 현재까지 터널 구조물 자체에 대한 방재 관련 기준은 제시되고 있지 않다. 터널 이외의 타 구조물들에 대한 내화 관련 콘크리트 구조설계기준(한국콘크리트학회, 2003)에서도 “화열의 온도, 지속시간, 사용골재의 성질 등을 고려하여 콘크리트의 피복두께를 결정하여야 하며, 슬래브의 경우 30mm 이상, 기둥 및 보의 경우에 50mm 이상을 철근의 피복두께로 하여야 한다”고만 제시하고 있다. 또한 내화구조의 지정

및 관리기준에서는 건축물의 벽, 기둥, 바닥 또는 지붕의 화재시 가열에 대하여 부재별로 정해진 시간 이상을 견딜 수 있는 내화구조로 하여야 한다고 규정되어 있다. 그러나 내화에 필요한 피복두께는 화열의 온도, 지속시간, 사용골재 등을 고려하여 정하는 것으로서, 부재별로 피복두께를 설정하여야 하며 이에 따른 구체적인 피복두께의 계산방법을 제시하여야 하나 이에 대한 연구가 아직 미흡한 실정이다.

2.2 국외의 터널 화재사고

터널에서의 화재는 폐쇄된 공간특성상 많은 인명 및 경제적 피해를 야기하는 대형 참사로 이어진 경우가 많기 때문에 최근 들어 유럽을 중심으로 국제적인 기술적 관심사로 인식되고 있다. 특히 유럽 등지에서 발생한 대형 터널 화재 사고 이후로 터널에서 좀 더 효과적이고 안전한 피난·구조 과정과 함께 화재에 대한 터널의 대응설계 기술이 요구되고 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 3은 국외에서 발생한 대형 터널 화재사고 현황을 정리한 것이다.

유럽에서도 1999년에 발생한 몽블랑 터널화재 이

표 3. 국외의 대표적인 터널 화재사고 현황

터널명	발생년도	복구기간	피해금액
Nipponzaka tunnel	1979	2 months	33 million US\$(Only rehabilitation cost)
Channel tunnel(Euro tunnel)	1996	6 months	350 million US\$
Mont Blanc tunnel	1999	3 years	27 million US\$(Initial repair cost) 273 millionUS\$(Total rehabilitation cost)
Tauern tunnel	1999	3 months	6 million US\$(Rehabilitation cost)
Gothard tunnel	2001	2 months	25 million US\$(Rehabilitation cost)

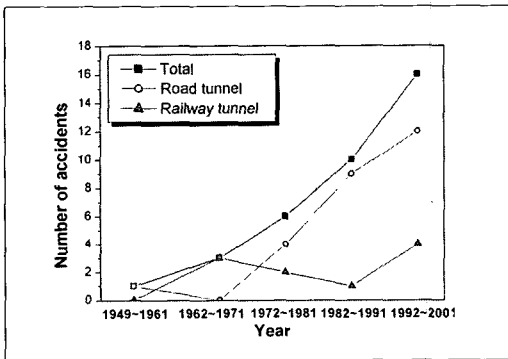


그림 2. 해외의 터널 화재사고 추이

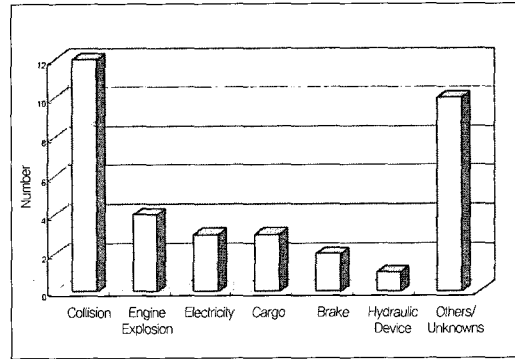


그림 3. 터널 화재발생의 주요 요인

전에는 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. 몽블랑 터널화재가 발생한 후 두 달이 지난 다음, 오스트리아의 타우른 터널에서 차량충돌에 의해 12명의 사망자가 발생하였고, 오스트리아의 카프룬에서도 150명의 사망자가 발생하였다. 이러한 사고 이후 계속되는 유럽의 터널화재안전에 대한 노력에도 불구하고 2001년 고타드 터널에서 두 대의 중차량 충돌이 원인이 되어 11명의 사망자와 250m의 터널라이닝이 붕괴되는 대형 터널화재사고가 발생하였다. Carvel(2002)은 유럽에서는 이미 터널내의 화재에 대한 연구를 계속적으로 수행해온 상태이며 터널 내에서의 화재와 연기거동에 대한 실

험적 연구가 충분하다고 판단하고 있으나, 이와 같이 계속적으로 터널내 대형화재가 발생하는 원인은 기 시공된 터널의 화재안전능력이 현재의 유럽기준에 부합되지 못하였기 때문인 것으로 지적하였다.

일반적으로 도로터널은 철도터널에 비해 교통량이 많기 때문에 터널 내 사고빈도와 화재발생위험이 높은 것으로 분석되고 있다. 그림 2는 1949년부터 2001년까지의 해외에서 발생한 총 35건의 화재를 10년 단위로 나타낸 것으로서, 도로터널 내 화재가 전체 터널 화재의 대부분을 차지하고 있으며, 매년 화재사고가 증가 추세에 있다는 것을 확인할 수 있다(日本コンクリト工學協會, 2003).

또한 국외에서 발생한 터널화재의 원인을 분석한 결과 그림 3과 같이 터널내 차량충돌이 주요 요인인 것으로 나타났다(日本コンクリト工學協會, 2003).

화재로 인한 터널 구조물의 피해와 대책

표 4. 터널 연장에 따른 터널 화재사고의 발생 빈도 (일본)

터널 연장	터널 개수 (A)	터널 화재발생 건수 (B)	발생빈도(=B/(years×A))
< 2km	-	100	-
2~3km	80	16	0.0105
3~4km	37	7	0.01
> 4km	16	23	0.076

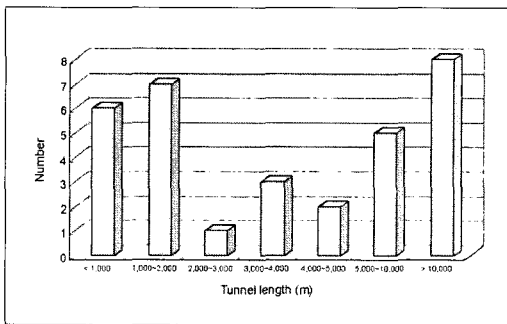


그림 4. 터널 연장별 터널 화재사고의 분류

독일의 STUVA에서는 도로터널의 경우 화재의 원인을 차량결함, 차량충돌사고 또는 운전자나 차량유지관리의 문제로 보고하고 있다. 일본에서는 도로터널에서 주된 화재 원인을 차량간의 충돌과 배기관 접촉 및 전기배선으로 파악하였고(日本火災學會, 1997), 철도터널에서는 전기시설의 문제와 방화가 주요한 화재원인인 것으로 분석하였다(栗岡均, 1998).

앞서 언급한 국외 35건의 터널 화재사례에 대해 터널 연장별로 분석해보면 그림 4와 같이 장대터널일수록 터널 개소에 비하여 화재발생 건수가 많았으며, 일본에서도 표 4와 같이 2km 이상의 장대터널에서 화재사고 발생확률이 증가하는 것으로 보고되었다(日本火災學會, 1997). 따라서 특히 장대 도로터널의 경우에 터널내 화재에 대비한 기술적 대응이 시급하다는 것을 확인할 수 있다.

3. 화재로 인한 터널 시공재료의 손상 특성

3.1 화재로 인한 터널 시공재료의 단면 손실

화재시 터널 시공재료의 단면 손실은 폭발(explosive spalling), 박리, 박락 등에 의해 발생하게 된다. 여기서 폭발은 콘크리트의 표면에서 온도가 급격히 증가할 경우 콘크리트 표면에서 콘크리트 파편이 폭발하는 것과 같이 파괴되어 떨어지는 것을 말한다. 폭발은 일반적으로 화재발생 후 약 20~30분 동안 발생하는 것으로 알려져 있으며, 터널 구조체의 재료적 특징, 기하학적 특징과 환경적 특징 등에 따라 달라지는 것으로 보고되고 있다(Khoury, 2002).

화재에 의해 발생된 열이 콘크리트에 작용하면 화재 노출면에 가까운 콘크리트 내부의 수분이 탈착된다. 형성된 수증기의 대부분은 콘크리트의 차가운 내부쪽으로 움직이게 되고 콘크리트 내부의 공극에 재흡수된다. 화재에 의한 열이 계속적으로 공급될 경우 가열된 부위가 점차적으로 증가함에 따라 물과 수증기가 배면 공극에 축적되게 된다. 일단 포화된 층은 전면에 형성된 열에 의해 영향을 받은 공극구조를 통해서 충분히 빨리 움직일 수 없게 되어, 화재 접촉면에서 물이 증발하는 원인이 된다. 그리고 빠른 온도상승과 억제된 팽창, 그리고 급속한 수증기압의 상승도 원인이 된다. 콘크리트의 인장강도가 수증기압에 의해 발생된 인장력을 억

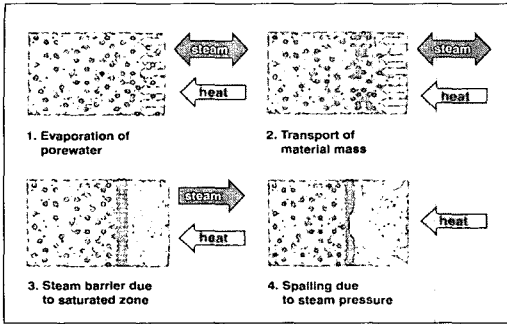


그림 5. 폭발에 의한 단면손실 메커니즘 (Khoury, 2002)

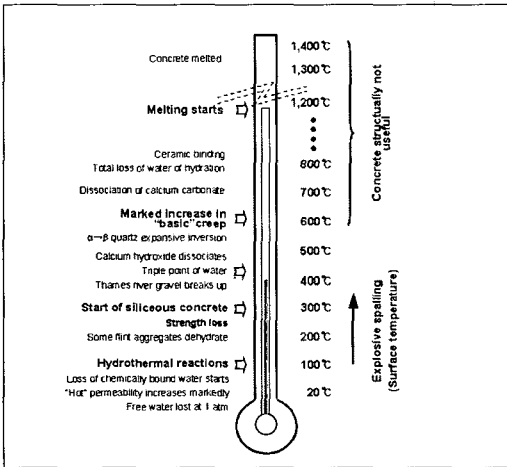


그림 6. 고온에서 콘크리트의 물리·화학적 변화 (Khoury, 2002)

제할 수 없게 되면 표면 부위에서 콘크리트 파편이 터지는 폭발이 발생하여 갑작스럽게 단면이 손실된다. 이러한 폭발은 반복적으로 일어날 수 있으며 콘크리트가 고강도이거나 낮은 투수성의 콘크리트 내부에 수분이 많을 경우 이와 같은 파괴가 발생할 수 있다(그림 5).

3.2 화재로 인한 터널 시공재료의 특성변화

Khoury(2002)는 그림 6과 같이 화재에 의한 열이 콘크리트에 미치는 물리적, 화학적 변화를 도식적으

표 5. 부재의 표준적인 사용온도

부재명	콘크리트	강재	고무
사용온도(°C)	250~380	250~350	70~100

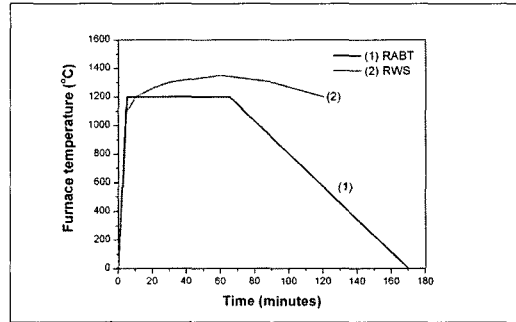


그림 7. RABT와 RWS 온도이력곡선

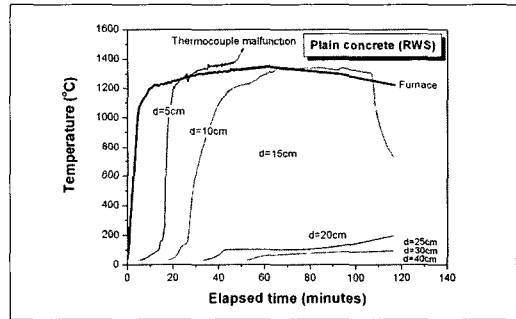


그림 8. 무근 콘크리트에 대한 온도이력곡선 (한국건설기술연구원, 2005)

로 나타내었다. 이와 같은 변화는 콘크리트의 배합비와 배합성분에 따라 다르게 나타날 뿐만 아니라 화재 발생시의 콘크리트 함수량과 온도조건과 같은 환경적 요인이 영향을 미칠 수 있다.

또한 일본콘크리트공학협회(2002)는 표 5와 같이 부재의 표준적인 사용온도를 제시하고 있다.

한국건설기술연구원(2005)은 독일 교통성 도로건설부에서 규정하고 있는 RABT (Richtlinien für die Ausstattung und den Betrieb von Straßentunneln) 와 네덜란드 운수공공사업성 치수본국 규정에 제시

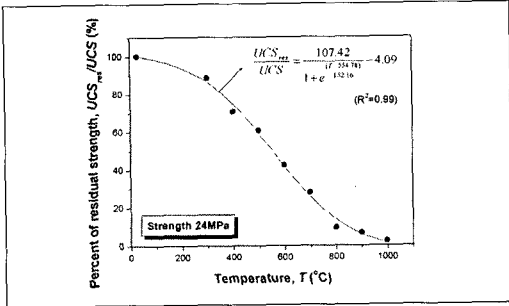


그림 9. 콘크리트의 온도단계별 역학적 특성변화 (한국건설기술연구원, 2005)

된 RWS(RijksWaterStaat) 시나리오(그림 7) 하의 모의 화재시험을 실시하여 터널에 사용되고 있는 각종 시공재료들의 화재 손상 특성을 규명하였다. 모의 화재시험 결과, 적용된 시나리오에 따라 손상 정도는 다르지만 터널 시공재료의 단면손실은 최대 15cm 이상으로 나타났으며, 가열면으로부터 약 15~20cm 떨어진 지점의 잔존부에서도 상당한 재료 손상이 발생한 것으로 파악되었다(그림 8). 또한 300°C 부터 1,000°C까지 100°C간격으로 공시체를 가열한 후 제반 역학적 특성변화를 측정된 결과, 300°C부터 600°C까지 재료 물성이 선형적으로 급격히 저하되는 것으로 나타났다(그림 9). 따라서 300°C부근의 온도수준은 재료 물성이 선형적으로 감소되기 시작하는 임계 온도수준으로, 그리고 600°C부근의 온도수준은 재료 물성이 급격히 저하된 후에 거시적인 파괴가 발생하여 구조체로서의 기능을 기대할 수 없는 임계 온도로 고려할 수 있는 것으로 파악되었다.

그리고 철근 콘크리트가 고온에 노출될 경우 콘크리트의 특성뿐만 아니라 철근의 특성도 화재저항성에 영향을 미치게 된다. 특히 침매터널이나 복개터널의 경우와 같이 인장하중이 작용하는 구조물의 경우는 더욱 그러하다. 화재시 철근 콘크리트 구조물의 독특한 특징은 하중저항능력이 최소가 되는 시점

이 콘크리트 표면온도가 최대가 되는 시간이 아니라 철근온도가 최대가 되는 시간이라는 점이다. 따라서 콘크리트 표면온도가 최대가 된 후 얼마 정도의 시간이 지난 다음에 콘크리트 구조물의 하중저항능력이 최소가 되며, 파괴는 철근온도가 철근이 저항할 수 있는 온도의 한계치를 초과하였을 때 발생하게 된다. 철근 콘크리트에서는 콘크리트 피복에 의하여 철근이 과도한 열을 받지 않을 수 있지만, 폭발이 발생할 경우 콘크리트 피복의 손실에 의해 철근은 과도한 열응력을 받게 된다. 이와 같은 경우 설계에 적용되는 화재시나리오에 따라 최소 피복두께를 설정하여 사용하여야 하고, 충분한 피복두께를 확보하지 못할 경우에는 적절한 내화 대책을 적용해야 한다.

4. 화재에 대한 터널 구조물의 대책 방향

4.1 화재 후 신속한 터널 구조물의 조사·평가 기술 개발

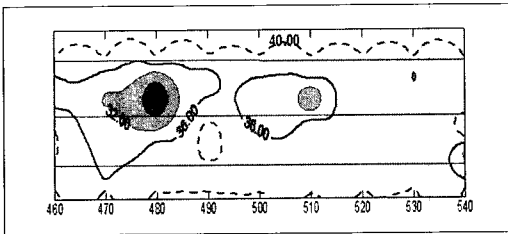
화재로 인해 화상을 입은 터널 구조물을 신속하고 정확하게 복구하기 위해서는, 화재 손상의 정도와 범위를 정량적이고 정확하게 평가하는 것이 가장 중요한 과정 중의 하나라고 할 수 있다.

현재까지 국내에서 발생한 터널 화재사고 후 적용된 조사·평가 기술로는 콘크리트면의 변색, 환기구 위치, 계단 위치 등의 주변 상황 조사와 표 6과 같은 여러 가지 기법을 이용하여 터널 구조물에 발생한 수열온도를 추정하고 있다.

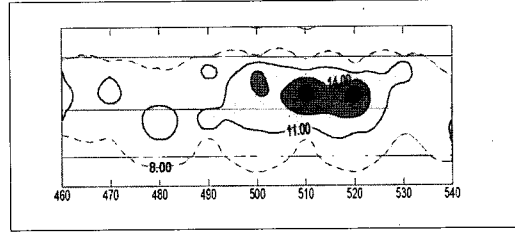
이 가운데 슈미트해머에 의한 콘크리트 반발 경도 측정시험에서는 가열면 표면의 압축강도를 추정하여 조사에 활용하고 있다. 하지만 콘크리트 표면의

표 6. 터널 화재 분석 기법

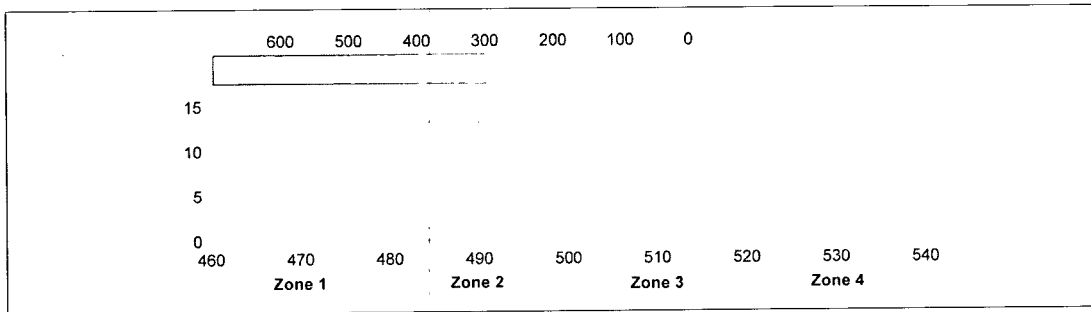
구분	화재 피해	콘크리트			철근 특성	부재	
		압축강도	탄성계수	수열온도		내력	강성
외관조사	○			○	△		
중성화시험				◎			
반발경도시험		◎		△			
코어, 샘플채취에 의한 실내분석		◎	◎	◎			
철근 인정시험					◎		
재하시험						◎	
진동시험							◎



(a) 반발경도치 mapping결과



(b) 중성화시험 mapping결과



(c) 수열온도 분포 추정결과

그림 10. 터널 구조물의 화재손상 조사 사례 (한국시설안전기술공단, 2005)

반발 경도만 측정할 수 있고, 콘크리트 내부의 강도 분포는 측정할 수 없으며, 기열후의 압축강도에 대한 기존 자료가 없으므로 상대적인 평가만이 가능하다는 단점이 있다. 또한 콘크리트가 500°C 이상의 열을 받으면 알칼리성에서 중성으로 변화한다는 사실에 근거하여 중성화시험도 적용되고 있다. 그리고

화재후 잔존부에서 코어를 채취하여 잔존 압축강도를 추정하고 있으나, 일반적으로 코어는 깊이 방향으로 그 피해정도가 다르기 때문에 해당 부분의 잔존 압축강도의 추정은 곤란하다. 그래서 샘플 채취 후 실내에서 중성화, 시차열분석, X선회절분석, 열중량 분석, 탄산가스 및 유리석회량의 분석 등을 실

시하여 수열온도를 추정하고 있다(그림 10). 하지만 이 역시 샘플 채취부터 수열온도 추정까지 상당한 시간이 요구된다는 한계를 가지고 있다.

이와 같이 현재 적용되고 있는 각종 조사·분석 기법들은 화상이 발생한 터널 구조물의 손상 정도를 신속하고 정량적으로 파악하는데 한계가 있다. 더욱이 가열면으로부터 깊이별로 온도분포를 정확하게 분석하기 어려운 것이 현실적인 문제점이다. 따라서 화재 발생 현장에서 신속하고 정확하게 화재 손상 정도를 추정할 수 있는 조사기법의 개발과 같은 체계적인 연구가 필요하다.

4.2 터널 구조물의 화재 손상을 방지하기 위한 사전대책 기술 개발

화재 사고동안 터널 구조물 손상을 방지하여 피난자들을 위한 안전한 대피 경로를 확보하고 화재 종료후에도 신속한 교통 흐름 재개를 위한 최상의 대책기술은 터널의 내화기술이라고 할 수 있다. 현재 유럽과 일본 등의 일부 국가에서는 터널 구조물에 대해서도 내화대책을 위험도에 따라 적용하고 있는 상황이며, 내화 재료와 시공방법에 대해서도 상당히 상용화·실용화가 이루어진 단계이다.

설계·시공단계인 터널에 대한 내화대책 공법 적용은 비교적 용이할 수 있으나, 현재 공용중인 모든 터널에 대한 내화대책은 공법 적용으로 인한 일시적인 교통흐름 저해와 터널 내공단면을 일부 축소할 수 있다는 문제점이 있다. 또한 교통량이 적고 화재 손상 위험도가 비교적 낮은 터널에 대해서도 내화대책을 실시하는 것은 비경제적일 수 있다. 따라서 본 고에서는 내화대책을 향후 국내 적용에 적용할 경우 참고자료로 활용할 수 있도록 현재까지 국외에서 적

용되고 있는 각종 내화대책을 소개하고자 하였다. 터널용 내화대책으로는 뿔어붙임 형식의 모르타르 내화재료, 내화 보드(board) 패널 그리고 폴리프로필렌 섬유를 혼입하는 방식 등의 크게 3가지 종류로 구분할 수 있다.

폴리프로필렌 섬유를 혼입하는 방식은 시공성과 경제성이 우수하다는 장점을 가지고 있으나, 화재로 인해 폴리프로필렌 섬유가 용해된 이후의 구조적 안정성 문제가 있을 수 있으며 현재 공용중인 터널에 적용이 불가능하다는 한계를 가지고 있다.

실리케이트 칼슘 성분의 내화 보드(silicate calcium board)는 조립과 철거가 용이하지만, 차량충돌 등의 외부충격에 취약할 수 있으며 터널 내공단면을 확보하기 위해서 굴착단면이 증대되어야 한다. 공용중인 터널에 적용은 가능하지만 터널 내공단면의 축소가 불가피하다는 한계를 가지고 있다(그림 11).

반면 질석 경량 모르타르(vermiculite lightweight mortart)의 뿔어붙임에 의한 내화재료는 곡면시공과 연속시공이 가능하며 피복두께 조절이 용이하고 공용중 터널에 적용이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 그러나 내화재료 타설을 위한 별도의 공정과 타설장비가 필요하다(그림 12).

뿔어붙임 내화재료의 경우의 스테인리스 와이어 메쉬(wire mesh)의 설치와 별도의 장비를 필요로 하지만, 터널의 내공단면을 거의 축소시키지 않고 공용중 터널에도 적용이 가능하기 때문에 적용성이 매우 높은 것으로 고려된다. 특히 네덜란드의 Westerschelde 터널에서 적용된 바와 같이 슛크리트 타설 장비나 그라우팅 주입장치를 이용하여도 시공이 가능하기 때문에 내화재료 뿔칠 전용의 장비가 필요하지 않을 것으로 고려된다. 더욱이 마감면 또한 미관 측면에서 매우 양호하다고 할 수 있다(그림 13).

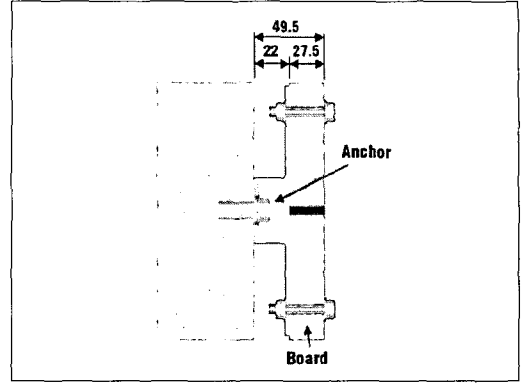
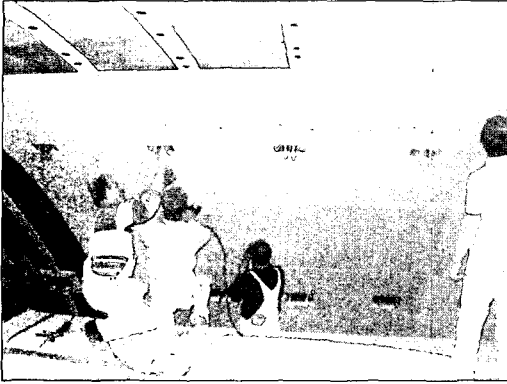


그림 11. 터널용 내화 보드 시공 사례

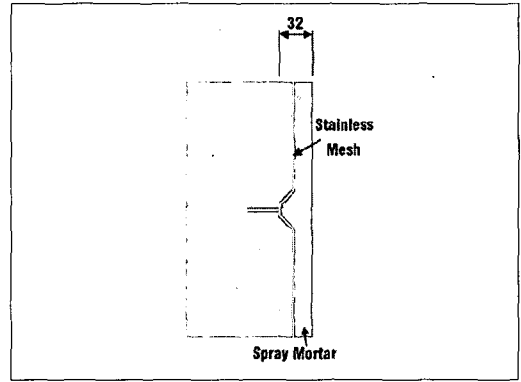
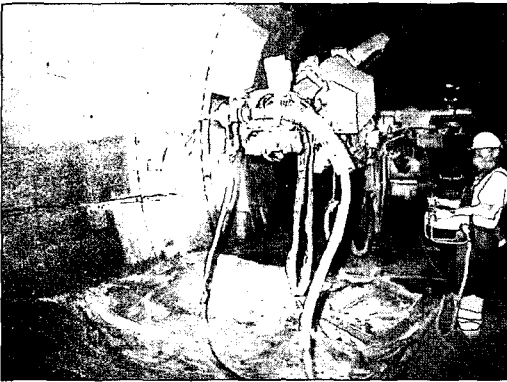


그림 12. 뿔어붙임 모르타르 형식의 내화재료 시공 사례

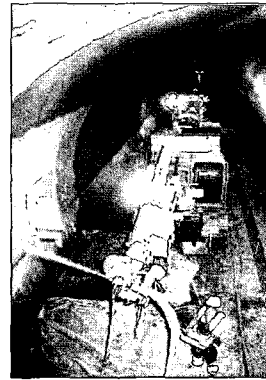
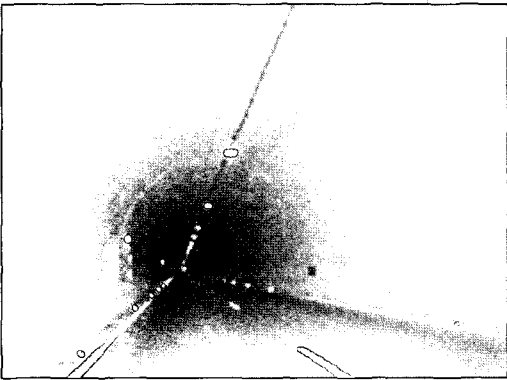


그림 13. 뿔어붙임 내화재료에 의한 터널 최종 마감 (네덜란드 Westerschelde 터널)

5. 맺음말

장대터널의 증가와 교통량의 증대와 비례하여 국내외에서 많은 터널 화재가 발생하고 있으며 화재로 인한 피해규모도 점차 커지고 있는 실정에서, 아직까지 터널 화재 대응 기술에 대한 국내의 관심과 개발 노력은 매우 미흡하다고 할 수 있다.

더욱이 유럽을 위주로 한 국외에서는 이러한 터널 화재피해를 최소화하고 사전에 방지하기 위한 노력들이 지난 10년 이상 이루어지고 있으나, 국내에서는 화재에 대한 터널 구조물 관련 기준이나 지침 등의 마련이 고려되고 있지 않다.

따라서 터널 연장, 교통량 및 화재 발생 가능성 등을 종합적으로 고려한 위험도 분석(risk analysis) 등을 통해 화재 위험성이 높은 터널 구간에 대해서는 내화공법과 같은 사전 대책을 수립할 필요가 있을 것으로 고려된다. 또한 터널 현장조건에 따라 최악의 화재 시나리오를 고려한 모의 화재시험 등을 통해 최적의 대책공법 및 내화재료를 선정하는 과정이 확립되어야 할 것이다.

최악의 경우에 발생할 수 있는 터널 화재시에도 인명·경제적 피해를 최소화하고 신속한 복구를 위해서 화재 손상범위와 손상정도를 신속하고 정량적으로 파악할 수 있는 조사기법의 개발과 함께 각종 터널 시공재료의 화재 손상특성에 대한 데이터베이스를 구축해야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본고는 건설교통부의 2003 건설핵심기술연구개발사업인 “지하공간 환경조성 및 방재기술 개발 - 지하구조물 재해손상 대응기술 개발(과제번호: 003-02)” 연구사업의 일환으로 작성되었습니다.

참고 문헌

1. 김은수, 김효규, 소충섭 (2003), “터널 방재 계획의 재조명”, 제3회 터널 시공기술 향상 대토론회, pp. 29~52.
2. 대구지하철공사 (2003), “대구지하철 1호선 중앙로역 정밀안전진단보고서”.
3. 한국건설기술연구원 (2005), “지하공간 환경개선 및 방재기술 연구사업/제6세부과제- 구조물 재해손상 대응기술 개발”, 2차년도 최종보고서.
4. 한국시설안전기술공단 (2005), “7호선 온수역 종점부 유치선터널 차량화재 영향에 대한 터널 구조물 안전진단보고서”.
5. 한국콘크리트학회 (2003), “콘크리트 구조설계기준 해설”.
6. 栗岡均 (1998), “トンネル火災事故と今後の課題”, 火災, Vol. 48, No. 5, pp. 5~10.
7. 日本コンクリート工學協會 (2003), “コンクリート構造物の火災安全性研究委員會 報告書”.
8. 日本火災學會 (1997), “火災便覽 第3版”, 共立出版.
9. Carvel, R. (2002), “The history and future of fire tests”, Tunnels & Tunnelling International, November 2002, pp. 34~35.
10. Haack, A. (1998), “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.
11. Khoury, G.A. (2002), “Passive protection against fire”, Tunnels & Tunnelling International, November 2002, pp. 40~42.
12. Khoury, G.A. (2003), “EU tunnel fire safety action”, Tunnels & Tunnelling International, April 2003, pp. 20~23.