

화재에 의한 터널 열화특성 및 내화대책 기술

Deterioration Character of tunnel damaged by fire and Fire Proofing Measure

서강천¹⁾, Seo Kang-Chun, 윤태국²⁾, Yoon Tae-Gook, 박시현³⁾, Park Si-Hyun,
조성현⁴⁾, Cho Sung-Han, 김은종⁵⁾, Kim Eun-chong

¹⁾ 정회원, 서울특별시도시철도공사 시설처장 Manager, Seoul Metropolitan Rapid Transit Corporation

²⁾ 정회원, 한국시설안전기술공단 진단팀장 Team Manager, KISTEC(Korea Infrastructure Safety & Technology Corporation), yoon7647@kistec.or.kr

³⁾ 정회원, 한국시설안전기술공단 과장 Senior manager, KISTEC

⁴⁾ 정회원, GS건설(주) 기술연구소 수석연구원 Member, Chief Research Engineer, GS E&C.

⁵⁾ 정회원, (주)금륜방재산업 사장 President, Golden Wheels Defense Fire Co., Ltd.

SYNOPSIS : In this paper, the behaviors of tunnel damaged by fire, the diagnostic techniques for evaluating tunnel stability are presented. Also two fireproof construction methods are recommended. Three tunnels damaged by fire were analyzed to evaluate the structural stability. From the these analyses, it is recommended that surface checking, rebound number of concrete by Schmidt Hammer, and carbonation of concrete are essential to evaluate the engineering properties of concrete in tunnel structure damaged by fire. On the basis of case studies of tunnel fire collected by ITA, the change of concrete and steel strengths by fire are explained, and numerical analysis, which was performed on culvert and circle tunnel, shows that distribution of temperature in the tunnel is dependant upon tunnel shape. Two fireproof construction methods using panel and punching metal are introduced to protect the tunnel by fire.

Keywords : Fire damage, Concrete engineering properties, Explosive spalling

1. 서 론

최근 국내에서는 대구지하철 중앙로역 화재 사고를 비롯하여 서울지하철 온수역 유치선터널 화재사고 등 공용중인 터널에서 방화로 인한 터널내 화재가 발생하였다. 현재 시공중인 ○○건설공사의 신설 박스터널구간에서 인부의 실수로 인하여 발생한 터널화재사고 등 터널화재가 종종 발생하고 있다. 더욱이 국내에서도 나날이 늘어나고 있는 교통량의 증가와 더불어 필수적으로 증가하고 있는 터널 내부의 교통사고로 인한 터널화재까지 포함하면 그 빈도는 상당히 높은 것으로 추정된다.

또한 터널이 지하공간에서 폐쇄되어 있다는 구조적 특징으로 인하여 화재시 터널 라이닝면에서의 수열온도는 1,000℃까지 급상승하게 되며, 그 후 시간이 경과함에 따라 서서히 온도가 강하하게 되는 특성이 있다. 이에 본 고에서는 국내 화재사고 사례를 중심으로 화상의 분석기법과 더불어 터널 화재의 특성을 분석하고, 화상피해를 최소화하기 위한 보다 현실적인 내화대책을 제안함으로써 터널화재로 인한 재해를 최소화하고자 한다.

2. 본 문

2.1 국내 터널 화재 분석

2.1.1 대구지하철 중앙로역 화재사고

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

이에 관리주체에서는 긴급 안전점검, 정밀안전진단, 재하시험 등을 실시하였다. 정밀안전진단 결과 대구지하철 중앙로 역의 지하 3층 승강장 주변으로 구조물에 집중적인 화상이 발생하였으며, 주요 손상으로는 박리, 박락, 철근노출, 횡방향 균열 등이 조사되었다. 이러한 손상과 더불어 슬라브 부분에서의 폭열된 깊이는 평균 10cm 내외로 조사되었다. 또한 화재로 인한 콘크리트 라이닝의 수열온도는 전소된 선로 상부의 슬라브에서는 최소 1,000°C 이상의 고온이 발생하였으며, 그 외의 선로 부분에서는 500~1,000°C 정도, 승강장 부분에서는 200~500°C의 고온이 수열된 것으로 분석되었다. 또한 열응력 해석 및 구조해석결과 구조물이 붕괴할 정도는 아닌 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 화상의 정도가 심하지 않다는 것은 아니며, 가장 화상이 심한 지하 2층 슬라브(지하 3층 천정부)의 경우 외력이 자중 및 도보 하중에 국한 될 뿐 아니라, 주변의 토압에 대해서는 박스 외부벽체가 있고 상부의 통과하중(차량하중)은 충분한 토피가 있어 충분히 분산된 후 박스터널에 작용함에 따른 결과이다. 시설물안전점검 및 안전진단 세부지침(터널편)에 의한 종합평가 등급은 "E등급"으로 평가하였다.

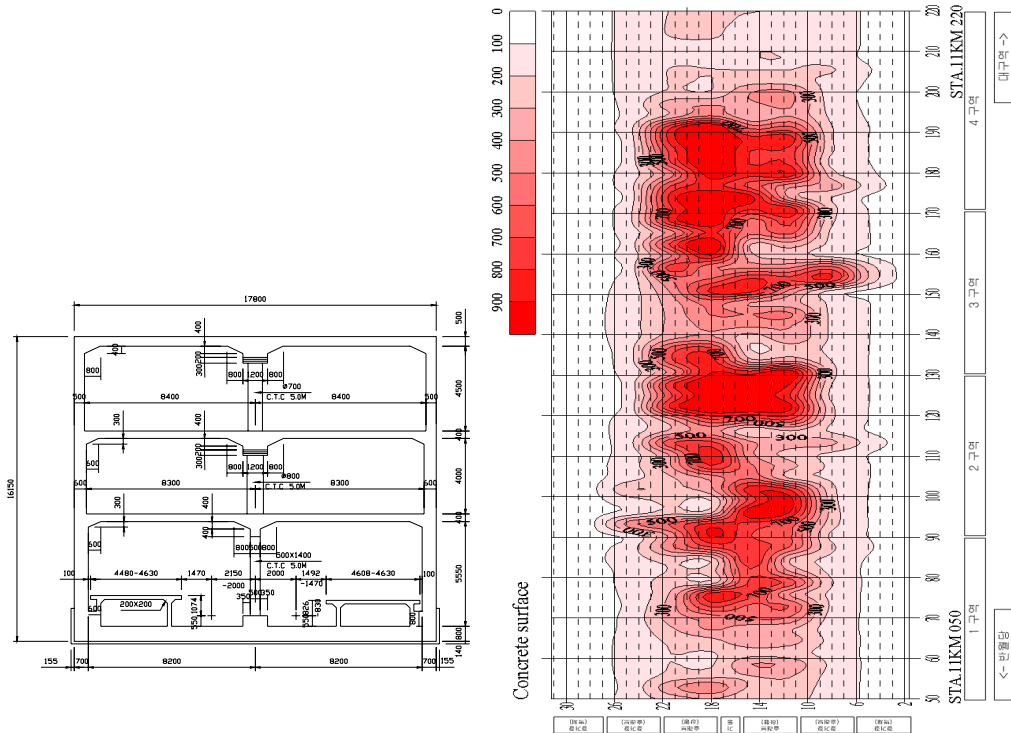


그림 1. 좌 : 중앙로역 대표단면, 우 : 수열온도 분포



그림 2. 좌 : 중앙로역 화재 전경, 우 : 콘크리트 폭열, 철근노출

2.1.2 서울지하철 7호선 온수역 유치선 터널 화재사고

서울지하철 7호선 온수역 유치선 터널 화재사고는 2005년 1월 3일 07:14분에 지하철 7호선 장암발 온수행 열차가 철산역을 출발할 때 열차 화재 발생을 인지하고, 07:19분에 광명사거리역에 도착하여 승객전원을 대피한 후 승강장 내의 소화기를 이용하여 1량의 열차에 대하여 진화작업 시행하였으나 잔재로 인한 화재가 발생하였다. 이에 08:54분에 온수역 유치선 터널에 열차 진입하여 터널내부에서 화재가 발생하여 약 1시간 18분간의 화재가 발생함에 따라 터널구조물에 화상이 발생하게 된 사고이다. 이에 관리주체에서는 신속하게 전기를 차단하고 열차를 온수역 구내에서 회항하면서 승객수송을 정상화하였으며, 이와 더불어 화재사고의 안전진단 용역을 실시하였다.

안전진단결과 코어의 평균 콘크리트 압축 강도는 258kgf/cm^2 로서 설계기준강도($f_{ck}=210\text{kgf/cm}^2$)를 상회하며, 반발경도법에 의한 추정콘크리트 압축강도는 $224\text{kgf/cm}^2 \sim 369\text{kgf/cm}^2$ 의 범위로서 모두 설계기준 강도를 만족하는 상태이다. 또한 화재에 의한 표면경도의 변화를 확인하고자 반발경도치를 Mapping한 결과 천정부에서 상대적으로 반발경도치가 작은 것으로 분석되었다. <그림 3, (우), 참조> 또한 중성화시험 결과를 구간별, 위치별로 Mapping한 결과 천정부에서 주로 중성화가 많이 진행된 것으로 분석되었다. 이러한 결과는 측벽부에서 상대적으로 중성화가 적게 진행되었고 화상으로 인한 영향이 적으며, 폭열로 인하여 콘크리트 표면이 먼저 박락되었음을 나타내는 결과이다.

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 분석되었다. 또한 이러한 결과는 반발경도법, 중성화시험, 외관조사결과 등과의 상호 비교 분석한 결과에서도 같은 결과를 확인 할 수 있었다.

따라서 폭열을 받아 표면의 최고온도가 700°C 정도였던 선로 바로 위에서는 약 3.5cm 정도의 폭열이 발생하였으며, 폭열을 받지 않은 부위에서는 최고 약 250°C 의 온도를 받은 것으로 추정된다.

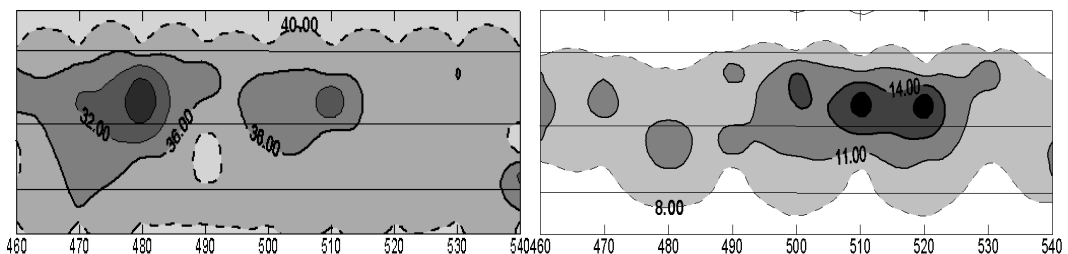


그림 3. 좌 : 반발경도치(Ro) 매핑 결과, 우 : 중성화시험 매핑 결과

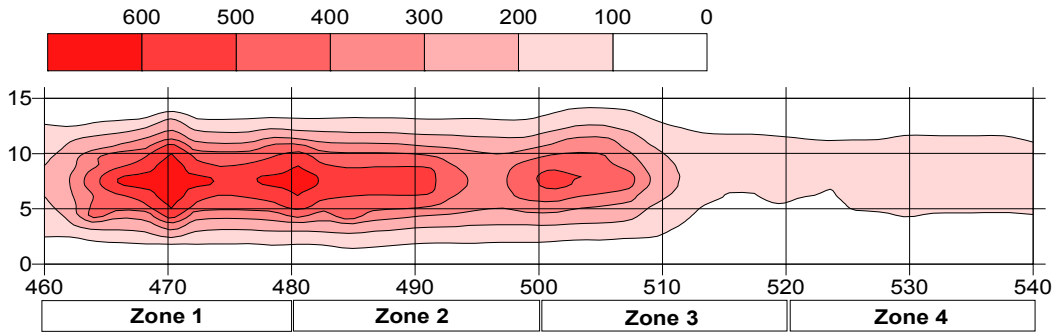


그림 4. 수열온도 분포



그림 5. 좌 : 온수역 유치선 터널 전경, 우 : 시공이음부 박락

2.1.3 ○○건설공사 신설 박스 구조물 화재사고

○○ 건설현장에서의 화재사고는 □□년 5월 10일 18:40분에 케이블 포설공사 중 휴대용 발전기 과열로 불꽃이 궤도 자재(방진패드)로 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 12cm로 확인되었다.

코어의 평균 콘크리트 압축강도는 406.9kgf/cm^2 로서 설계기준강도($f_{ck}=280\text{kgf/cm}^2$)를 상회하고, 반발경도법에 의한 콘크리트압축강도는 $355\text{kgf/cm}^2 \sim 599\text{kgf/cm}^2$ 의 범위로서 모두 설계기준강도를 만족하는 상태이다. 중성화는 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 $1,000^\circ\text{C}$ 내외였던 위치에서 평균 10cm의 폭열이 발생하였으며, 폭열을 받지 않은 부위에서는 600°C 이하의 온도를 받은 것으로 추정되었다. 또한 시설물안전점검 및 안전진단 세부지침(터널편)에 의한 종합평가 등급은 "C등급"으로 평가하였다.

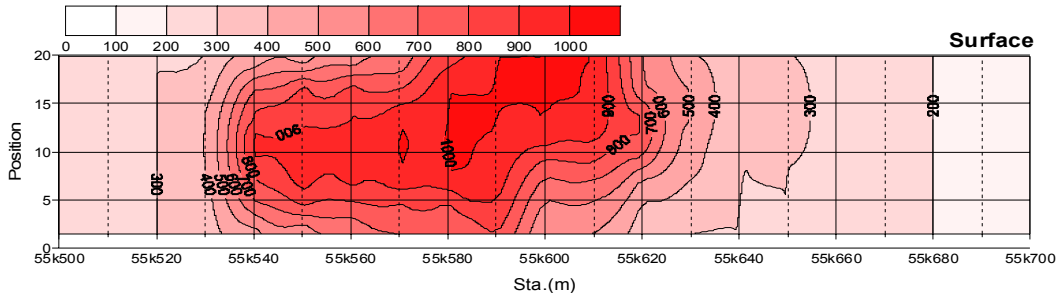


그림 6. 수열온도분포



그림 7. 좌 : 기둥부 화상 및 폭열, 우 : 슬라브 폭열 및 철근 노출

2.1.4 국내 터널 화재 결과 분석

국내 터널 화재가 발생한 후 안전진단을 실시한 사례를 분석한 결과 현장조사의 중요성을 절실히 알 수 있었다. 특히 화재에 의한 콘크리트의 화학적 변화는 100℃에서 자유공극수가 방출하며, 100~200℃에서는 물리적 흡착수가 방출된다. 즉, C-S-H 계 수화물은 100~130℃에서 흡착수가 방출되기 시작하며, 에트링가이트($C_3A_3CSH_{32}$)는 160~180℃에서 흡착수가 방출되며 250~270℃에서 열분해 된다. 또한 온도가 300℃ 이상 되면 모노설페이트(C_3ACSH_{32}), 알루미늄네이트계 수화물(C_3AH_6), 이수석고($CASO_4 \cdot 2H_2O$) 등 콘크리트 중의 시멘트 수화물이 화학적으로 변질되며, 400℃ 이상에서 화학적 결합수가 방출된다. 500~580℃에서는 콘크리트내의 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)이 열분해되어 알칼리성을 손실하게 된다. 600℃까지는 시멘트 페이스터가 수축되고 골재는 팽창함에 따라 600~800℃에서 콘크리트가 파열하고 1,200℃에서는 콘크리트가 용융의 상태가 된다.

이러한 화학적 변화에 대해서는 여러 분석을 기법을 통하더라도 시간적 공간적 제약으로 인하여 정확하게 판단하기에는 한계가 있다.

따라서 콘크리트면의 변색, 환기구 위치, 계단위치 등의 주변 상황과 <표 1>과 같은 여러 가지 기법을 이용하여 콘크리트 라이닝에서 수열온도를 분석하고자 하나, 이 또한 정확한 온도 경계를 분석하기에는 한계가 있고, 깊이별 온도분석 또한 정확하게 분석하기는 더욱 어려운 것이 현실적인 문제점이다.

표 1. 터널 화재 분석 기법

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

이에 현장에서 수열 온도를 분석함에 있어 보다 중요한 사항에 대하여 기술하면 다음과 같다.

1) 외관조사의 중요성

터널 화재 현장에 대하여 조사를 실시함에 있어 외관조사는 다른 어떠한 조사보다도 중요하다. 특히 구조물의 그을음상태, 색깔, 망상균열의 발생여부 등은 아주 중요한 정보라 할 수 있다. 수열 온도별 변색 상황은 300°C미만일 경우 그을음만이 조사되며, 300 ~ 600°C인 경우 분홍색, 600 ~ 900°C인 경우 회백색, 900 ~ 1200°C인 경우 담황색, 1200°C 이상일 때는 콘크리트 자체가 용융상태에 이른다.

또한 균열 주입된 면에서 나타나는 에폭시 용융상태, 주변 자재의 화상 정도 등을 분석함으로써 수열 온도 분포를 분석하는 자료로 활용 할 수 있다. 즉 화상온도를 간접적으로 분석하는 것으로서 즉 목재의 경우 260°C에 착화가 되며, 유리는 600°C, 아연도금의 경우 419°C, 알루미늄 창외의 경우 659°C, 철의 경우 1,535°C등에서 용융이 된다.

2) 반발경도법, 중성화 시험의 중요성

(1) 반발경도법

반발경도법은 콘크리트 표면의 반발경도(R_o)를 측정하여, 이 측정치로부터 콘크리트의 압축강도를 추정하는 검사방법이다. 반발경도를 구하는 방법으로는 슈미트 해머(Schmidt Hammer)법이 가장 널리 사용되는데 이 방법은 슈미트 해머로 경화된 콘크리트 표면을 타격 시, 반발도(R)와 콘크리트의 압축강도(F'_c)와의 사이에 특정 상관관계가 있다는 실험적 경험을 기초로 하여 비파괴 압축강도를 추정한다. 반면 표면 반발경도치는 화상을 입은 콘크리트의 경우 건전부위에 비하여 미세 균열이 발생할 뿐 아니라 화학적으로 취약한 상태로 변함에 따른 상대적으로 R_o 치가 적어지는 특성이 있으므로 이의 매핑 작업을 통하여 여러 가지 분석기법 결과와 상호 비교할 필요가 있다.

즉 콘크리트 압축강도는 온도가 100°C정도까지는 상온의 경우에 비하여 그다지 변화가 없지만, 200°C를 초과하면 강도의 저하가 현저하게 되고, 온도가 500°C정도가 되면 강도는 상온의 경우의 1/2정도까지 저하된다.

잔존 압축강도율은 가열 개시 전(20°C)의 압축강도 결과치에 대해서 일정 온도에서 가열이 완료된 후의 결과치와의 비를 나타내는 것으로 가열온도 200°C 이하에서는 극단적인 압축강도저하를 확인할 수 있다. 또 가열 온도 400°C 이상에서는 급격한 강도저하를 나타내며 약 700°C에서는 상온에서의 압축강도의 약 20~40%까지 저하한다.

반면, 저하된 압축강도는 화재 후 어느 정도의 기간이 경과되면 <그림 8>과 같이 압축강도가 자연 회복되며 수열 온도가 500°C 이내이면 재사용이 가능한 상태로 회복된다.

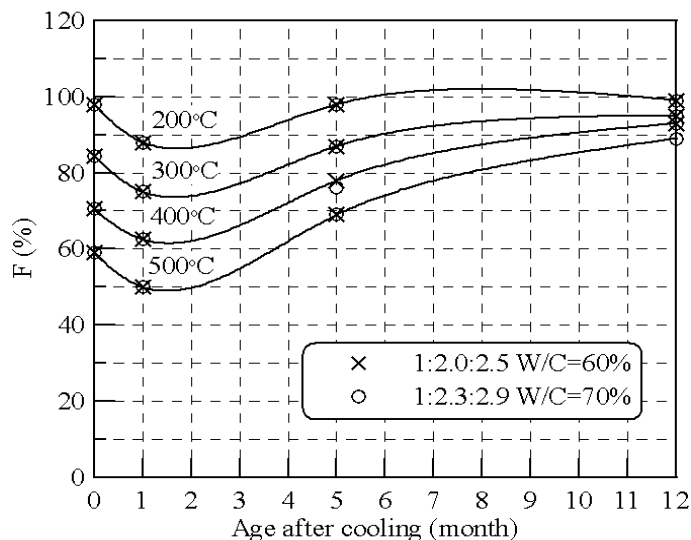
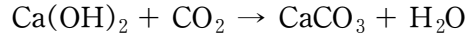


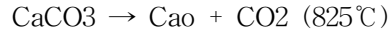
그림 8. 가열된 콘크리트의 압축강도 회복률

(2) 중성화 시험

중성화(탄산화)란 굳은 콘크리트와 공기중의 탄산가스가 반응하면서 알칼리성을 잃게 되는 현상을 일컫는다. 즉 건전한 콘크리트는 경화 시멘트풀의 수산화 화합물중 약 25%를 차지하는 수산화칼슘(Ca(OH)₂)의 영향으로 pH가 12~13인 강알칼리성을 나타내나 탄산가스가 수산화칼슘이 반응하면 탄산칼슘(CaCO₃)으로 환원되면서 표면부터 콘크리트의 pH가 서서히 10이하로 낮아지는 현상이다. 따라서 이러한 현상은 정확히 표현하면 중성화보다는 탄산화에 의한 중성화현상이라고 함이 정확하다.



반면 화재에 의한 중성화는 다음과 같은 다른 화학반응을 일으킨다.



따라서 화재에 의한 중성화에 의해 1% 페놀프탈레인 용액에 의해 변색이 된 개소는 최소한 500°C 이상으로 추정할 수 있다. 반면 금번 ○○건설 현장의 경우처럼 신설 현장이어서 중성화가 전혀 진행이 되지 않았거나, 화재 발생시 소화작업을 위하여 물이 충분히 도포 경우, 화재 직후 대기 중의 수분을 콘크리트면이 수분을 흡수한 경우는 중성화 결과가 정상치와 크게 오차가 발생하거나 조사가 불가할 수도 있으므로 보다 정확한 중성화 조사가 필요하다고 하겠다.

3) 분석기법의 연구개발

현재까지 화재로 인한 깊이별 온도 분포의 분석은 SEM, XRD, EDS 등의 실내 분석과 이론적 계산에 의한 방법 등이 있으나 보다 정확한 분석을 위해서는 여러 가지 선진 분석기법의 도입과 더불어 보다 정량적인 분석을 위해서는 이의 조사 기법에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

2.2 터널화재에 대한 기준 정립 (ITA)

국제터널협회(ITA)에서는 터널내 화재에 대한 국제적 기준을 정비하기 위하여 세계적으로 발생한 다양한 사고 사례를 수집 정리하고 있다. 이 중 주요한 내용을 정리하여 국내 터널 화재에 따른 대책을 강구하고 향후 연구 방향 설정 등의 자료로 제안하고자 한다.

2.2.1 콘크리트 및 강재의 수열에 의한 강도 변화

콘크리트 부재가 화재에 의해 열을 받게 되면, 그 강도의 열화상태는 콘크리트 배합설계, 함수비, 응력 상태에 따라 다르지만 <그림 9>에서와 같이 화재 직전의 강도를 100%로 하면 대체로 200 ~ 250°C 정도의 온도가 한계로 판단된다. 이는 RWS(네델란드 운수 공공 사업부의 내화 대책 방침)과 기본적으로 동일하며 TNO (네델란드 과학 에너지 연구소)의 조사에 의해서도 밝혀지고 있다. 즉, 콘크리트의 강도는 대개 200°C까지 100%인 채로 있다가 750°C에서 거의 강도가 소멸된 상태로 된다. 화재에 의한 온도가 고장력의 강재에 주는 영향은 일반적인 강재(철근)에 미치는 영향보다 더 심하다. 이를 고려하여 1992년 이후부터 네델란드에 있어서 콘크리트 건축물에 대하여 안전계수는 1.7을 사용하고 있다. 이는 콘크리트의 강도가 100%이고 안전계수가 1.7인 경우, 콘크리트의 강도가 59%로 감소하게 되면 건축물의 안전성은 1.0이 되어 더 이상 안전한 건축물은 아닌 것을 의미한다.

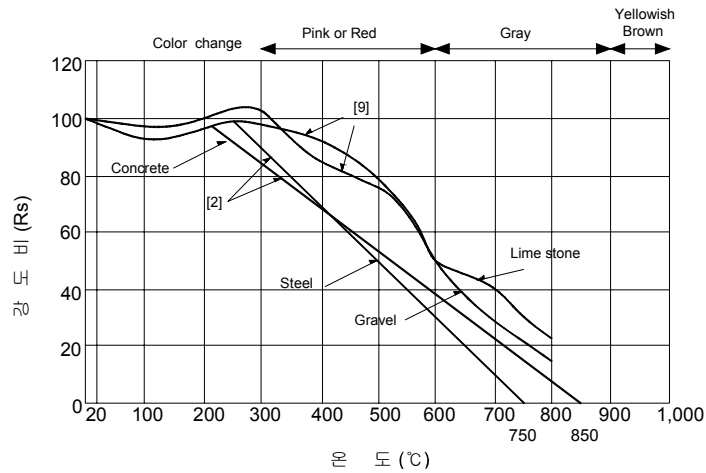


그림 9. 온도 상승에 따른 콘크리트의 압축강도 변화

2.2.2. 화재에 의한 터널 거동 특성 사례 분석

1) 수치해석 기법에 의한 터널 해석

화재에 의한 시뮬레이션을 위해서는 CFD(Computational Fluid Dynamics)법이라는 수치해석적 기법을 사용하여 지하공간 및 구조물의 온도분포해석 및 매연확장에 대한 예측을 실시하고 있다. 이 방법은 3차원 구조물인 터널구조물을 작은 고체요소(셀 요소)로 분할하여 유한요소법 등을 이용하여 유체열역학 방정식을 푸는 것이다. 이와 같은 해석을 통하여 속도, 온도, 매연의 밀도 등이 얻어진다. 이를 분석함에 있어 <표 2>와 같이 터널화재로 인한 터널 내부온도의 최고치를 설정하고 있다.

표 2. 터널내부 최고 설정 온도

순번	구 분	최고온도
1	보통 자동차	400℃
2	버스, 소형 트럭	700℃
3	연소하기 쉬운 적재물을 실은 대형 트럭	1,000℃
4	탱크로리 (일반적인 경우)	1,200℃
5	탱크로리 (기름의 유출량이 무제한 또는 침매터널의 경우)	1,400℃

<그림 10>은 이러한 수치해석결과에 근거한 터널 공기의 최고온도에 대한 시간적 분포를 나타내고 있다. 즉, 터널 공기의 최고온도가 박스형 단면은 원형단면에 비해 200℃이상 높은 온도인 것으로 나타났다. 이것은 터널 형상의 차이로 인해 발생하는 발화점과 터널 천단부와의 거리 및 열기류 흐름 등의 차이가 주된 원인 것으로 판단된다.

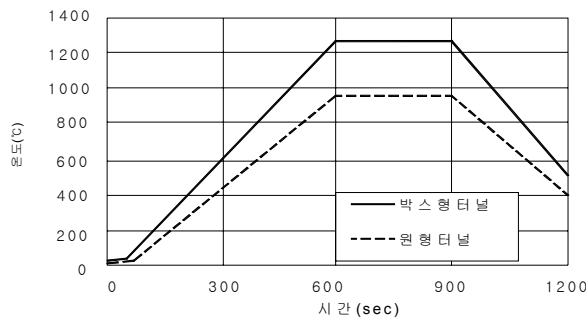


그림 10. 터널 공기의 최고온도에 대한 시간적 분포

<그림 11, 12>로부터 원형과 박스형의 콘크리트 단면을 가지는 터널 단면에 있어서의 최고 온도는 동일한 열출력의 경우에 230 ~ 315℃로서 박스형 터널은 원형 터널에 비해 약 85℃이상 온도가 높게 나타났다. 이러한 현상은 원형 터널에서는 상단면 방향의 기류의 회전에 의해 단면 전체에 확산되기 쉽기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 천정 부분의 최고 온도는 박스형 터널의 천정 부분에 비하면 낮게 나타나지만 노면 부근에서는 오히려 박스형 단면보다 더 높게 된다.

원형 단면의 경우 200℃를 넘는 부분은 대개 화재 발생원으로부터 10m 이내이다. 이는 원형 터널에서 화재의 열출력이 30MW의 경우에는 대개 40m² 범위의 콘크리트가 내열 허용치를 초과한다. 그러므로 설계 레벨로 최소한의 범위에 걸쳐 콘크리트 내화 대책에 대해 검토가 필요하다. 하지만 화재시에 있어서의 환기 풍속이 2.5 m/s의 확보가 가능하다면 원형터널 횡단면의 200℃를 초과하는 부분은 넓지 않으며 따라서 콘크리트 구조물에 심각한 변상을 초래하지는 않을 것으로 판단된다.

반면 박스형 터널의 경우 콘크리트의 내열 한계(200℃)를 초과하는 범위는 대개 200m²으로 원형터널에 비해 훨씬 큰 것으로 분석되었다.

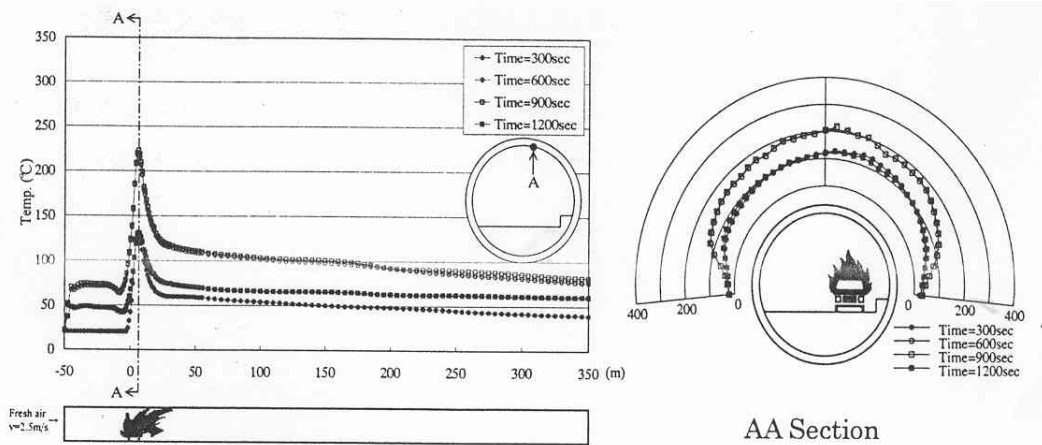


그림 11. 원형터널의 열분포

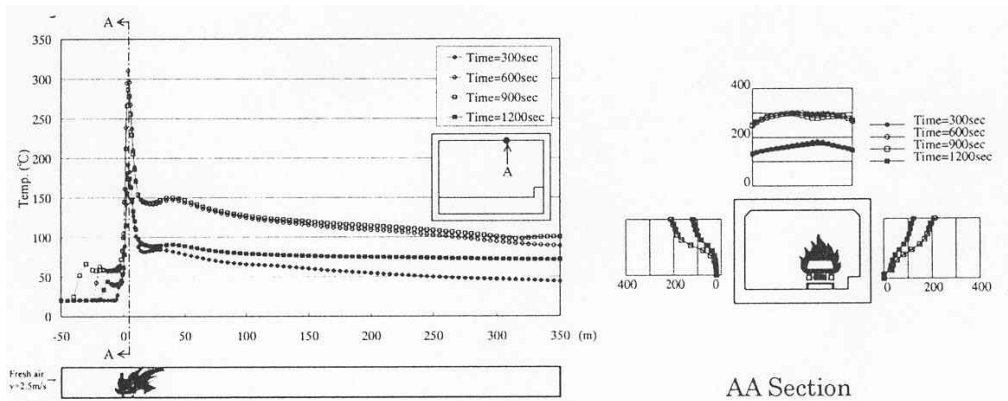


그림 12. 박스터널의 열분포

2.2.3 터널 내화 대책기술

1) 내화 대책 방법

터널 화재시에 있어서 고열의 영향에 의해 콘크리트면에 균열 또는 박락이 콘크리트 표면 전체에 걸쳐 발생했을 경우 초기강도는 저하하게 된다. 따라서 단시간에 350℃ 이상의 열의 영향을 받아 강도가 저하한 곳에 대해서는 보강공법이 필요하게 되며, 최소한 350 ~ 400℃의 열영향 범위에 견딜 수 있는

콘크리트가 요구된다. 이러한 이유로 인해 네덜란드 운수사업부에서는 내화재의 성능 시험을 위한 시험 로내의 공기 온도가 공시체 하단으로부터 10 cm의 위치에서 최고치 1,350℃(RWS기준)까지 도달한 경우에 약 1,000℃의 온도차에 견딜 수 있는 재료를 설계/시공하는 것을 조건으로 하고 있다(<그림 13, 14> 참조)

또한 이러한 내화재료를 설치하는 방법으로서 크게 콘크리트면 위에 내화재료를 설치하는 방법, 콘크리트 자체의 내화 성능을 향상시키는 방법, 콘크리트면에 열전달을 지연시키는 방법, 2차 라이닝을 설치하는 방법 등이 있다. 현재 유럽 각지의 도로터널 및 철도터널에서 시공 실적을 가지고 있는 내화재는 이러한 시험방법에 의해 내화인정을 취득한 재료가 사용되고 있다.

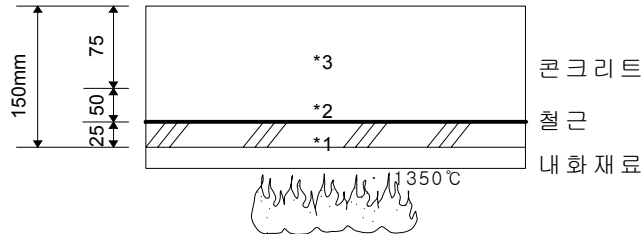


그림 13. 화재의 상태와 콘크리트 부재의 관계 모식도

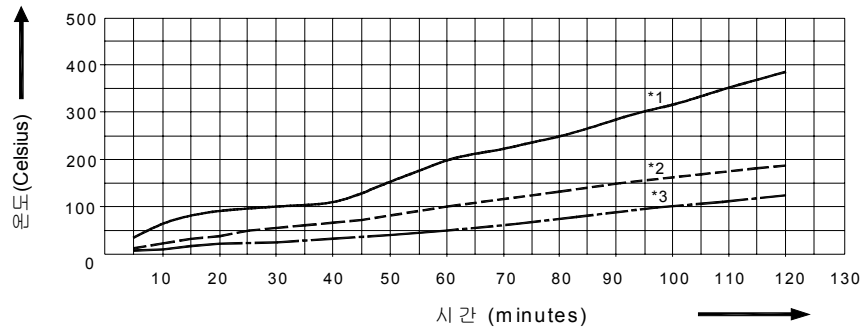


그림 14. 내화재료를 사용한 경우 온도변화

2) 최신 내화공법의 소개

(1) 에나멜 강판에 의한 내화재의 개발

최근 독일에서는 일반적으로 터널 내장재로서 실적이 있는 에나멜 강판을 터널 벽면 표면으로부터 10~20 cm의 간격으로 2매를 중복으로 붙여 단열재로 하는 내화실험이 실시되었다. 2매의 패널을 포함한 전체의 두께는 10cm 정도이며 내부의 공기는 환기 작용이 촉진되는 구조로 되어 있다. 이 실험에서의 화재 온도는 약 1,100℃가 사용되었으며 화재 발생측 패널 표면 최고온도는 약 750℃, 2매면의 패널 표면에서는 약 400℃, 터널 라이닝면에서의 최고온도는 약 150℃인 것으로 나타났다. 에나멜 강판을 사용하는 주된 이유는 터널 내장재로서의 반사, 확산 특성, 세정 회복율이 뛰어나기 때문이다.

(2) 펀칭 메탈(구멍뚫린 강판)에 의한 내화 대책

일반적으로 콘크리트는 서서히 가열되어 서서히 냉각되는 경우에는 온도 변화에 의한 강도열화는 적다. 구멍이 뚫린 강판(이하 펀칭 메탈)을 이용한 내화 대책은 콘크리트 구체와 일정 간격을 유지하면서 설치된 펀칭 메탈에 의해 콘크리트에의 열전달을 지연시켜 강도 저하를 억제하는 기술이다. 이 펀칭 메탈을 터널벽면에 설치하여 표면을 가열한 경우, 펀칭 메탈을 통해 열은 콘크리트 표면에 도달한다. 이 경우 펀칭메탈 자체와 콘크리트면과의 간격(3cm)에 의해 열기류의 교환이 발생하여 콘크리트 표면의 가열 시간의 지연과 온도 저하가 가능해져 콘크리트 표면의 열화를 크게 억제할 수가 있는 것으로 나타났다. 이 패널은 자동차의 충돌, 화재, 그 외의 이유로 인해 국소적으로 파손이 발생한 경우에도 용이하게 교체 가능하며, 터널의 공용시간을 줄여야할 필요도 크지 않다. 시공성에 대해서는 종래 공법의 내화 금속재보다 경량이므로 설치가 간단하며 터널 내면 형상에 따라 휨가공도 용이하다.

3. 결 론

본 고에서는 최근 국내에서 발생한 3건의 터널 화재사고 사례를 중심으로 화상의 분석기법과 터널 화재의 특성을 분석하고, 화상피해를 최소화하기 위한 보다 현실적이고 체계적인 내화대책 사례를 제안함으로써 나날이 증가할 것으로 예상되어지는 터널화재로 인한 재해를 최소화하고자 하였다.

국내 터널 화재사고에 대한 조사 결과 수열 온도는 400~1,000℃ 정도로 조사되었으며, 각각의 위치별, 주변상황별 수열온도는 상이하였다. 또한 이러한 현장조사를 중심으로 외관조사, 반발경도법, 중성화시험의 중요성 및 조사시 주의해야할 사항 및 향후 분석기법 개발의 필요성도 기술하였다.

또한 최근의 국제터널학회(ITA) 자료를 중심으로, 콘크리트의 강도는 대개 200℃까지는 원상태의 강도를 유지하고 있다가 750℃에 이르게 되면 강도를 거의 소멸하게 되는 특성이 있었다. 또한 수치해석적인 방법에 의해 원형 및 박스형 터널에 대하여 동일한 열출력을 발생시킨 경우 박스형 터널이 원형 터널에 비해 약 85℃의 높은 수열온도를 보였다. 이는 원형 터널은 단면의 형상적 특성으로 인해 상단면 방향의 기류의 회전에 의해 단면 전체에 확산되기 쉽기 때문이다. 터널 화재에 대비한 내화기법의 종류 뿐 아니라, 선진외국에서 운영되고 있는 두 종류의 내화재를 소개하였다.

향후, 터널에서의 화재사고 등으로부터 피해를 경감시키기 위해서는 그 화재규모가 어느 정도인가를 파악하여 이를 반영한 객관적인 구조, 설계 등에 대한 기준을 책정하고 이의 표준화작업도 선결되어야 할 것이다. 또한 터널화재의 대응대책과 비용대 효과면에서의 판단 기준도 수립해야 할 것이다. 설비 및 시설의 정비와 아울러 테러를 포함한 발생 가능한 각종 터널 내부 재해에 대하여, 피난·유도·구조 등을 포함한 위기관리 매뉴얼에 대한 정비도 필수적이라고 판단된다.

참고자료

1. Fire and Smoke Control in road tunnels(Last Draft-August 1998) PIARC Committee on Road Tunnels.
2. M. Tan "Fire Protection in Tunnel Open to Hazardous Goods Transport", ECOLE NATIONALE, DESPONTS ET CHAUSSEES, 10 December, 1997.
3. H. Ingason, ANOVERVIEW OF VEHICLE FIRES IN TUNNELS. 4th International Conference on Safety in Road Rail Tunnels, Spain, April 2001.
4. Dr. Ing Giuliano Anastas "The Melbourne City Link", Tunnel, May 1999.
5. Y. Ota, K. Horiuchi, S. Date "A Study on Thermal Analysis For Tunnel Structure in the Incidence of Fire", 4th International Conference on Safety in Road Rail Tunnels, Spain, April 2001.
6. S.K Lew, D.M Deaves AG Blgth. Eurotunnel HGV Fire on 18th Nov. 1996. "Fire DEVELOPMENT AND EFFECTS". 3rd International Conference, SIRRT, 1998. 9-10, March, Nice France.
7. J. Aedefalk, B. Wahlstrou, P.Rohlen. LESSONS FROM THE BAKU SUBWAY FIRE. 3rd International Conference, SIRRT, 1998. 9-10, March, Nice France.
8. (社) 日本建築學會編 : 火災とコンクリート, 2001. 6
9. 日経コンストラクション, pp50-51, 2002. 2. 8
10. 大野告一郎ほか, 沈埋トンネルの耐火設計と施工, 東京港第二海底トンネル, トンネルと地下, 32-9, 2001. 9.
11. 강병희, "초음파에 의한 고온수열콘크리트의 강도추정에 관한 실험적 연구", 동아대학교 박사학위 논문, 1989, 12.
12. 한국시설안전기술공단, "원효대교북단 진입고가교 화재구간 내구성 및 물성시험 보고서", 1998. 3