

# 터널에서의 콘크리트 구조물 내화성능 확보방안을 위한 연구

박경훈 · 김흥열\* · 김형준\*\* · 신현준\*

한국건설기술연구원 화재안전연구실\* · 서울시립대 건축학부 건축공학전공\*\*

## Research of the Method for Required Fire Resistance of the Concrete Structures in Tunnel

Park, kyung Hoon · Kim, Heung Youl\* · Kim, Hyung Jun\*\* · Shin, Hyun Jun\*

KICT, Fire Safety Research Division\* · UNI. OF SEOUL, Division Architectural Engineering\*\*

### 요 약

최근 건설 중인 금정터널(총 연장 20.3km)이나 부산-거제간 침매터널은 화재 발생 시 구조체의 강도저하로 인한 붕괴 및 사회기반시설인 교통망을 장시간 끊어놓은 등 큰 피해를 야기시킬 수 있다.

이러한 초장대터널이나 침매터널은 다른 터널보다 밀폐된 공간이므로 화재 시 단시간에 급격하게 온도상승이 일어날 수 있으며 이로 인해 구조물의 주재료인 콘크리트의 폭열이 발생하고 구조물 내부까지 고온이 전달되어 경우에 따라 구조체의 붕괴의 원인이 되기도 한다.

따라서 본 연구에서는 콘크리트 구조체의 내화성능을 확보하기 위해 유럽에서 사용되고 있는 터널내화용 보드와 모르타르를 적용한 콘크리트의 내화성능 확보방안을 위한 시험을 수행하였다.

시험에 대한 내화성능 평가는 ITA(International Tunneling Association)에서 정한 화재 손상범위를 평가기준으로 하였고 터널화재 시나리오는 네덜란드의 TNO에 의해 실행된 실험결과를 따른 RWS 화재곡선을 이용하여 수행하였다.

### 1. 서 론

최근 건설되고 있는 초장대 터널인 금정터널이나 부산-거제간 침매터널 뿐 아니라 서울에서 추진중인 서부간선도로를 따라 지하 40km 공간에 월드컵대교(제2성산대교)-금천구 독산동 구간을 연결하는 대십도 지하 도로터널 등의 터널 구조물들은 화재 시 인명

피해 뿐만 아니라 터널내 시설에도 심각한 손상을 줄 수 있다. 터널화재용 구조물의 내화 성능의 목적은 터널 화재 시 이용자의 안전한 피난과 구조 및 진압 작업을 수행하는 소방대원들의 안전을 확보하는 것이며, 화재 이후 보수작업에 투입되는 작업자들의 안전 확보에 있다. 주로 콘크리트를 기반으로 제작되는 터널 내부 구조물은 화재 발생시 폭렬(Spalling)의 영향으로 내화 거동에 심각한 문제점이 있어, 실제 화재시 안전뿐만 아니라 복구에도 많은 어려움이 있는 사례가 자주 발생되면서 관련국가들(영국, 스웨덴, 독일, 네델란드 등)은 체계적인 연구를 수행중이다. 현재 국내에서는 건축 구조물에 대한 내화대책에 대한 연구수준에 비해 터널 화재로 인한 터널 구조물의 내화대책에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 외국에서와 같이 터널구조물의 내화성능에 대한 설계기준이나 권고안이 마련되기 위해서는 국내에서도 화재시 화재 최대온도가 터널 구조물에 미치는 영향성과 위험성을 판단하기 위한 연구가 필요한 실정이며 이에 따른 터널 구조물에 대한 내화성능 확보방안에 대한 기준이 수립되어야 한다.

## 2. 시험 조건

EUREKA 시험에 의하면 화재저항 구조물의 시간에 따른 온도 특성은 대형 휘발유 탱크에 경우 최대 1400℃까지 상승할 수 있다고 보고되고 있다. 터널 구조물의 내화성능 평가 기준은 내화성능평가 기준을 고려하여 터널별 화재온도곡선과 내화시간을 제안하여야 하지만 본 연구의 경우에는 앞으로 국내에 건설될 침매터널이나 초장대터널, 지하 대심도 터널에서의 화재성상을 고려하여 RWS 화재곡선에 기초한 2시간의 내화성능 시험을 통해 구조물의 내화성능을 평가하였다.

### 2.1 내화시험 평가 기준

본 연구에서는 터널 콘크리트 라이닝의 내화시험 평가는 EFNARC에서 작성된 내화시험 지침 규격서를 기초로 하여 실시하였다. 내화성능 평가시 사용되는 화재하중곡선은 화재시나리오 및 화재 이후 구조물의 안전성·경제성 등을 고려하여 최악의 화재가 발생할 경우로 가정하여 최대 화재온도가 1350℃에 달하는 RWS 화재곡선을 120분간 적용하여 평가하였다. RWS 화재온도 곡선은 네덜란드 터널의 Rijkswaterstaat 기준으로 독일의 ZTV(Zustzlich Technische Vorschriften)곡선에 비해 터널 구조물에 더 높은 화재온도(1350℃)와 지속시간(2시간)을 적용하도록 고안되었다.

### 2.2 터널 내화용 고온 가열로

<그림 1>은 본 연구에 사용된 가열로로써, 콘크리트 실험시료의 고온성상을 분석하기 위하여 가열로의 온도 오차범위를 KS기준에 적합하게 성능을 향상시켜 화재강도 조정이 가능하며, 시편의 효율적인 장착을 목적으로 하였으며 노내의 열전대를 R-TYPE으로 설치하였다. 열전대의 구조는 연속 실험으로 인한 열전대의 오차범위 증가로 인한 문제 해결을 위해 열전대를 피복하고 보호 파이프와의 이격을 통한 신뢰성 및 내구성 확보 방안을 검토할 수 있도록 하였다. 본 가열로는 KS 내화규격 뿐 아니라 유럽통합규격인 EFNARC(European Federation of Producers and Applicators of Specialist Products for

Structures)의 터널 화재에 대한 콘크리트 라이닝의 효과적인 수동형(passive) 내화성능을 측정하기 위한 내화시험 규격에 대해서도 교정수행을 실시하였다. EFNARC 규격에서 정한 가열로의 열전대 위치는 시험체 가열면에서  $100\pm 5\text{mm}$  이격시키는 것으로 본 가열로의 열전대 위치 범위에 만족하였다.(KS 규격: $100\pm 50\text{mm}$ ) 화재시험에 사용된 화재하중곡선에 대한 가열로의 성능을 평가하기 위해 EFNARC 규격에서는, KS 규격에서의 오차 범위 평가 방법과 유사하게 화재시험에 사용된 화재하중곡선과 가열로가 구현하는 화재하중곡선의 온도편차를 면적에 대한 오차범위를 토대로 하는 최대 온도편차 계산방법을 적용하고 있다. 백분율 온도편차( $100 - (\text{실제 가열로 가열 평균시간} - \text{가열온도 곡선면적을 가열로 표준시간} - \text{가열온도곡선면적으로 나눔}[\%])$ )는 시험 시작 최대 5분까지는 편차에 대한 제한이 없고 화재 시험 후 5분에서 10분 사이에는  $\pm 15\%$  이내의 편차, 10분에서 30분 사이에는 허용편차가 10%로 제한되며 시험 시간 30분 후에는 5% 이내의 편차범위 이내로 유지되어야 한다.

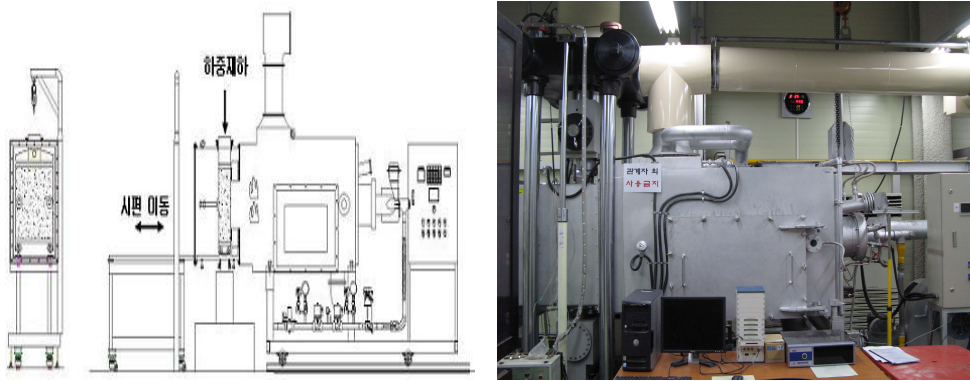


그림 1. 터널 내화용 고온 가열로

### 2.3 시험 방법

콘크리트 시험체 크기는 무근 콘크리트 조건으로 시험체 면적은  $600\text{mm}\times 600\text{mm}$ 로 하고, 화염노출면적은  $400\text{mm}\times 400\text{mm}$ 하며, 슬래브 두께는 150mm로 하여 제작하였다. 콘크리트 강도는 쉘드터널의 콘크리트 세그먼트에 적용되는 설계강도를 고려하여 <표 1>과 같이 40MPa 강도로 배합 설계하였으며 터널과 같은 상황을 재현하기 위해 채령 270일 후 터널 내화재료 적용 유·무에 따라 내화시험을 실시하였다. 화재온도곡선에 따른 콘크리트의 내부온도 특성을 평가하기 위해 시험체 각각에 10, 20, 30, 40, 50, 75mm의 깊이로 열전대를 삽입하고 간격재에 위치를 고정시켜 <그림 2>와 같이 제작하였다. 구조물의 내화성능 확보방안을 평가하기 위해 유럽에서 사용되고 있는 터널용 내화보드 및 내화 모르타르 내화피복을 적용한 후 화재강도를 터널화재에 적합한 RWS 화재조건을 계획하여 실험을 수행하였다. 가열은 터널화재라는 것을 고려하여 1면 노출 화재시험을 실시( $400\times 400\text{mm}$ )하여 120분 동안 가열하였다.

표 1. 배합설계

목표강도 (MPa)	G <sub>max</sub> (mm)	W/C (%)	Unit Weight(kg/m <sup>3</sup> )				
			C	S	G	W	AE제(%)
40	25	39.4	405.7	676.5	1066.1	159.8	1.6

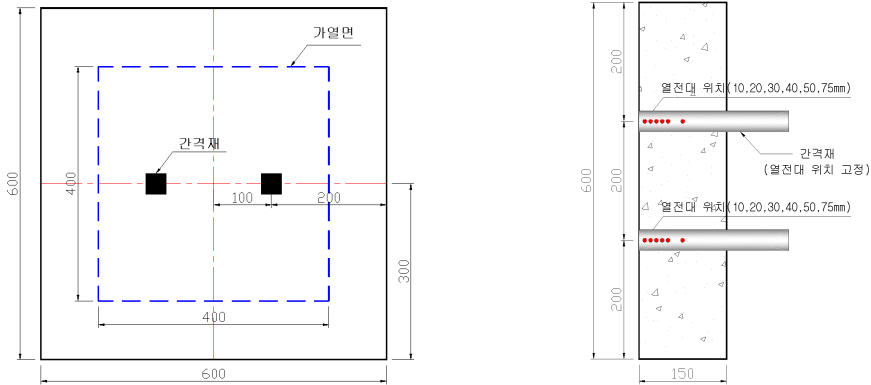


그림 2. 콘크리트 세그먼트 시험체 상세도(평면도 및 단면도)

## 2.4 실험변수

터널화재용 구조물의 내화성능 확보의 목적은 화재시 구조물의 손실을 최소화함으로써 재공사 비용을 감소시키고 터널 폐쇄로 인한 간접 손실을 최소화하는 것이지만 내화피복 시 시공비용에 따른 경제성 평가 또한 중요하다고 할 수 있다. 따라서 본 실험에서는 내화재료의 적정두께를 3가지 범위로 콘크리트 패널에 시공하여 터널 구조물의 내화성능 확보를 위한 적정두께를 평가하였다. 두께 범위는 각 내화재료의 상용화 범위를 기준으로 하였으며 터널 구조체의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트의 성능확보를 위하여 화재 시 터널내 콘크리트 라이닝의 폭발저감과 구조체에 고온이 전달되지 않도록 하기 위한 터널 내화용 재료를 이용한 내화성상 실험을 실시하였다. 콘크리트 라이닝의 내화성능확보조건을 도출하기 위해 ITA에서 제시하고 있는 터널 구조물의 재료별 내화온도 평가 기준을 적용하였다.

(콘크리트 최대 온도 380℃ 이내로 보호)

표 2. 시험변수

시험체명	내화피복두께 (mm)	내화피복 종류	콘크리트 강도(MPa)	화재곡선	콘크리트 내부 열전대위치 (mm)
L-C-1	0	미적용	40	RWS	10, 20, 30, 40, 50, 75
L-B-1	25	내화보드			
L-B-2	22				
L-B-3	19				
L-M-1	38	내화모르타르			
L-M-2	35				
L-M-3	32				

### 2.5 실험결과

터널 구조물의 내화성능 확보를 위해 콘크리트의 내화피복 유·무에 따른 콘크리트의 열특성 및 콘크리트 내화성능 확보를 위한 내화 피복재료의 적정두께를 평가하기 위해 RWS 화재곡선에 1면 노출 화재시험 평가를 실시하였다. 무피복 콘크리트 내화시험을 실시한 L-C-1 시험체의 경우 화염에 노출된 표면이 심각하게 손상되었으나 콘크리트의 표면에서 온도가 급격히 증가할 경우 콘크리트 표면에서 온도가 급격히 증가하여 콘크리트 표면에서 파편이 폭발하는 것과 같이 파괴되어 떨어지는 현상인 폭발성 폭열은 발생하지 않았다. 이는 내화시험 평가에 사용된 콘크리트의 시험체가 채령 270일 이후 실시된 것이 폭열현상에 영향을 미친 것으로 판단된다. 수분 함유량은 폭열현상의 주원인이며, 콘크리트 내 수분이 많을수록 폭열이 더 잘 발생하게 되는데, 이는 수분함유량이 수증기압과 공극압 상승의 직접적인 원인이 되기 때문이다. 그러나, 수분함유량이 콘크리트 전체 중량의 3%이내일 경우에는 폭열현상이 발생하지 않는다고 인식되고 있다. ASTM C 106의 시험 평가 방법에 따라 본 실험에 사용된 콘크리트 시험체의 수분 함유량은 3.14%로 측정되었으며 폭열 영향성 평가에 콘크리트 전체 중량이 큰 영향을 끼치는 것으로 판단되었다.

ITA에서 제시한 터널 구조물 재료별 내화성능 조건을 기준으로 RWS 화재곡선 2시간에 대한 내화피복재료의 적정두께를 평가하였다. 내화보드와 내화모르타르 모두 RWS 화재곡선 2시간에 대해 콘크리트의 열특성이 모두 380℃이하로 나타나 실험에서 사용된 내화보드의 경우 적정 두께는 19mm이하, 내화모르타르의 경우 32mm의 두께로 시공할 경우 터널 구조물에서의 화재시 충분한 내화성능을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. <그림 3>과 <그림 4>는 각각 내화 무피복 콘크리트 L-C-1 시험체 및 내화재료별 최적 내화성능을 확보한 L-B-3, L-M-3 시험체에 대한 내화시험 후 표면성상과 시험체 내부온도 분포를 나타내고 있다.



L-C-1 시험체

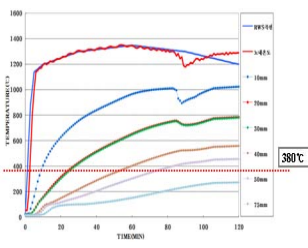


L-B-3 시험체

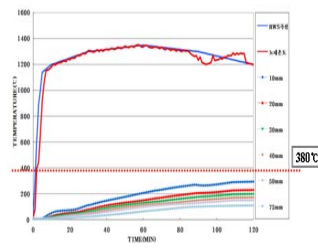


L-M-3 시험체

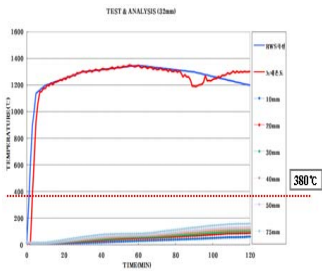
그림 3 내화시험 후 시험체 표면성상



L-C-1 시험체



L-B-3 시험체



L-M-3 시험체

그림 4 내화시험 후 시험체 내부온도 특성

### 3. 결론

국내 터널이 점점 대형화되어 가고 침매터널이나 지하 대심도 터널등의 건설이 증가될 수록 터널 화재의 대형화를 고려한 터널내화용 구조물의 내화성능은 터널 구조 설계에 중요한 요소이다. 본 실험에서는 이러한 터널내화용 구조물의 내화성능을 확보하기 위하여 ITA의 권장사항을 고려한 RWS 2시간의 내화성능을 확보하기 위한 콘크리트의 내화시험을 실시하였다. RWS 2시간 내화시험 후 최대380°C 이하의 콘크리트 내부온도를 기준으로 내화성능을 평가한 결과 무피복 콘크리트의 경우 내화성능은 9분, 내화피복을 한 경우 120분의 내화성능을 확보하였다. 내화재료별 적정 피복두께는 내화보드의 경우 19mm이하, 내화모르타르의 경우 32mm이하로 피복하여도 내화성능을 충분히 확보할 수 있는 것으로 판단되며 각 내화재료별 내화성능 및 최대 내부온도 특성은 <표 3>과 같이 나타났다.

표 3 내화재료별 내화성능

시험체명	화재손상범위(mm)	내부 최고온도(℃)	내화성능(분)
L-C-1	0~50	1011	9
L-B-3	0	295	120
L-M-3	0	160	120

### 감사의 글

이 논문은 국가 R&D로 수행되고 있는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 “구조물 성능기반 화재거동해석 및 설계기술연구(2009)”과제와 관련하여 지식경제부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. 김효규, 박경환, 윤명호, 이창우, “터널의 내화성능 평가용 화재온도곡선과 화재모델별 내화시간에 대한 고찰”, 터널기술 제 7권 제2호, 2005, pp.165~175
2. Anderberg, Y. "Spalling phenomena of HPC of OC, Proceedings of International Workshop on Fire performance of High-strength Concrete", NIST, USA, 1997 pp.69~73
3. Both, C., Haar, P. W., Tan, G. L., Wolsink, G. M. "Passive fire protection measures for concrete tunnels", Fire security in hazardous enclosed spaces, 8&9, 1999
4. Bazant, Z. P., etc., Finite Element Program for Moisture and Heat Transfer in Heated Concrete, Nuclear Engineering and Design, 1981, pp.61~70
5. C Meyer-Ottens, "The Question of Spalling of Concrete Structural Elements of Standard Concrete under Fire Loading", Ph.D. Thesis, Technical University of Braunschweig, German, 1972.
6. Kalifa, P., Menneteau, F. D., Quenard, D. "Spalling and pore pressure in HPC at high temperature in HPC at high temperatures" , Cement & Concrete Research, Vol. 30, 2000, pp.1~13.
7. International Tunnelling Association, Guidelines for structural fire resistance for road tunnels