

# 터널 화재(Modified Hydrocarbon Curve)시 콘크리트에 매입된 강재의 열적 손상 평가

## Evaluation on the Thermal Damage of Steel Embedded in Concrete in Tunnel Fire(Modified Hydrocarbon Curve)

박 경 훈\* · 김 흥 열\*\* · 김 형 준\*\*\*  
Park, Kyoung Hoon Kim, Heung Yeol Kim, Hyung Jun

---

### ABSTRACT

Fire intensity in tunnel fire is very severe, which might cause the spalling on the surface of shotcrete and concrete lining exposed to the heat as well as rapidly-reducing stress due to heat transfer by steel material such as anchor embedded in tunnel which plays the critical role in securing the stability of the tunnel. In this study, a fire test to identify the heat intensity(Modified Hydrocarbon Curve) and the fire resistance of steel materials embedded as parameters, was carried out. And the evaluation to identify the thermal damage, which was based on critical temperature range for thermal damage of steel materials determined according to the road tunnel fire resistance standard established by ITA(International Tunneling Association).

### 요 약

터널 화재시 화재강도는 매우 높으며 터널 내부에서 화재 발생은 높은 화재강도에 의해 구조요소인 슛크리트 및 콘크리트 라이닝의 화재 노출표면에서 폭열 발생을 유발시키는 동시에 터널 안정에 있어 중요한 역할을 수행하는 앵커 등의 터널에 매입된 강재 또한 고온의 노출로 인한 열전달로 급격한 응력감소가 발생하게 된다. 따라서 본 실험에서는 화재강도(Modified Hydrocarbon Curve)와 매입된 강재의 내화 유무를 변수로 정하여 콘크리트 라이닝의 내부에 매입된 강재의 열전도를 알아보기 위한 화재시험을 수행하였다. 또한 최근 ITA(International Tunneling Association)에서 연구한 도로 터널 내화구조 기준에 따라 강재의 열손상 임계 온도범위를 산정하여 열적 손상 정도를 평가하였다.

---

\* 정회원, 한국건설기술연구원, 화재및설비연구센터, 연구원  
\*\* 정회원, 한국건설기술연구원, 화재및설비연구센터, 선임연구원  
\*\*\* 정회원, (주)종합건축사사무소 광일건축, 기술연구소, 연구원

## 1. 서 론

최근 8.2km에 달하는 부산-거제간 연결도로가 국내 처음으로 일부구간을 침매터널로 계획하여 시공하는 등 현재 국내터널의 개소가 해마다 증가하고 터널연장이 증가함에 따라 터널 내의 사고 및 화재로 인한 피해에 대한 관심이 모아지고 있다. 터널은 타 구조물에 비해 화재의 빈도가 높지는 않지만 폐쇄된 공간의 특성상 갇힌 터널 내에서 화재가 발생할 경우 5분내 1000℃ 이상으로 온도가 급상승할 수 있으며, 소화 및 구조활동 등의 초동 조치를 취하기가 쉽지 않아 화재 발생 시 인명 및 구조물의 피해가 극대화될 수 있다.

현재 유럽을 중심으로 구조물에 가장 큰 피해를 가져오는 콘크리트의 폭렬(spalling)에 대한 이론고찰 및 터널화재와 관련하여 터널 내에서 발생한 화재피해를 최소화 할 수 있도록 터널구조물의 내화설계방안을 마련하기 위한 연구가 진행 중에 있다. 터널 화재시 화재강도는 매우 높으며, 터널 내부에 화재발생시 높은 화재강도에 의해 구조요소인 콘크리트 라이닝(Lining)은 화재 노출표면에서 콘크리트 폭렬발생을 유발시키고, 또한 콘크리트 라이닝의 고정을 위한 앵커는 고온의 노출로 인하여 표면뿐만 아니라 매입되어 있는 부분까지 열전달로 급격한 응력감소가 발생하게 된다.

따라서 본 시험은 콘크리트 내부에 매입된 앵커의 위치와 앵커의 내화유무를 변수로 정하고 Hydrocarbon의 온도 상승 비율을 조정한 곡선으로, 급격한 초기 온도 상승에서의 콘크리트 재료의 열 충격 효과를 분석하기 위해 Modified Hydrocarbon Curve 화재조건 하에서 콘크리트 라이닝의 내부에 매입된 앵커의 열전도를 알아 보기위한 화재시험을 수행하여 향후 터널구조물의 매입된 강재에 대한 내화설계방안을 마련하기 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

## 2. 강재의 화재 안전성 확보를 위한 화재시험

### 2.1 화재시험 계획

터널화재시 강재의 열적손상을 평가하기 위해 압축강도 50MPa 콘크리트 시험체를 사용하여 600×600×150mm의 크기로 <그림 1>과 같이 총 4개의 시험체를 제작하였다. 1개의 시험체에는 각각 3개의 앵커를 가열표면으로부터 50, 75, 100mm의 깊이로 고정시켜 제작하고 내화피복 미적용으로 실험을 수행하였다. 나머지 3개의 시험체에는 각각에 1개의 앵커를 매입하고 50, 75, 100mm의 깊이로 위치를 고정시켜 모두 내화피복을 적용한 후 화재강도를 터널화재에 적합한 Modified Hydrocarbon Curve 화재조건을 계획하여 실험을 수행하였으며, 1면 노출로 120분 동안 가열하였다. 시험체 시험변수 조건은 <표 1>과 같다.

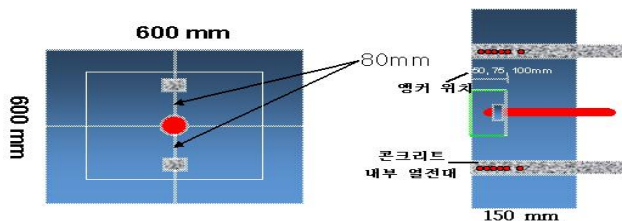


그림1 시험체 크기 및 앵커, 열전대 위치

표 1 시험체 일람표

시험체명	앵커삽입 깊이(mm)	화재강도	내화피복	콘크리트 강도(MPa)	콘크리트 내부 열전대위치 (mm)	비고
L-A-1	50	Modified Hydrocarbone Curve	미적용	50	10, 20, 30, 40, 50, 75	앵커크기 : D30
	75					
	100					
L-A-2	50		적용			
L-A-3	75					
L-A-4	100					

2.2 화재시험 결과 및 분석

터널 화재시 앵커가 고온에 노출이 되면 표면뿐만 아니라 매립되어 있는 부분까지 급격한 응력감소 현상이 발생되어 앵커의 성능을 발휘하지 못하게 된다. 따라서 화재시 구조요소인 콘크리트 라이닝의 고정을 위한 앵커의 화재 안전성 확보 또한 매우 중요하다고 할 수 있다. ITA의 도로 터널 내화구조 기준에 따르면 화재시 도로터널의 구조적인 안정성을 위해서 분절 강재 라이너의 최고 표면온도의 범위를 550℃로 규정하였다.

PC패널라이닝에 내화피복을 처리하지 않은 L-A-1 시험체는 MHC 화재조건에서 실험시 콘크리트 시편이 폭열한 후 급속한 온도상승률을 나타냈으며, 시험체의 50mm의 깊이에서도 600℃에 가까운 열분포 특성을 보였다. 앵커매입 깊이에 따른 열특성을 살펴보면 50mm의 깊이로 앵커를 매입한 경우 70mm의 열전대 위치에서 강재에 안정한 550℃이하의 열분포를 나타내었고, 75mm의 깊이와 100mm의 깊이에 앵커를 매입한 경우 안정된 열전대 위치는 각각 50mm와 75mm를 나타내었다.

접합부 앵커의 화재조건에 따른 열적 특성을 알아보기 위해 앵커를 내화피복하고 각각 50mm, 75mm, 100mm의 깊이로 앵커를 매립한 L-A-2, L-A-3, L-A-4번 실험체를 비교하여 열적특성을 평가한 결과 앵커를 50mm로 매립한 L-A-2 시험체는 실험 4분후 10~20mm 깊이의 폭열이 일어났으며 L-A-3번 시험체는 실험 4분 후 폭열이 발생하였다. 앵커를 100mm로 매립한 시험체에는 폭열이 일어나지 않았다. 이들 실험체의 앵커에 설치된 열특성을 살펴본 결과 강재변형을 일으키는 550℃의 열분포는 나타나지 않았다. 이는 내화피복을 통해 강재의 열전도가 콘크리트 내부에서 일어나지 않았기 때문인 것으로 판단된다. <표 2>는 앵커를 피복하지 않은 L-A-1시험체의 Modified Hydrocarbon Curve 화재조건에서의 앵커의 열적 손상 결과를 정리한 것이며 각 시험체에 대한 깊이별 앵커의 열 분포를 <표 3>과 같이 정리하였다.

표 2 MHC화재조건 무피복 접합부 앵커(L-A-1)의 열 특성 결과(ITA, 550℃)

시험체	앵커매입깊이(mm)	기준초과부위(mm)	비손상 지지부위(mm)	최고온도(℃)
50MPa MHC조건	50	0~70	80	1120
	75	0~50	75	1100
	100	0~20	80	880

표3 깊이별 앵커의 열 분포 특성

시험체명	앵커삽입 깊이(mm)	화재강도	내화피복	앵커삽입깊이 최고온도(℃)	앵커 최소 매입깊이(mm)	비고
L-A-1	50	Modified Hydrocarbone Curve	미적용	670	75	ITA 규정 앵커 최대 온도 :550℃
	75			320	75	
	100			230	50	
L-A-2	50		적용	250	10	
L-A-3	75			120	10	
L-A-4	100			50	10	

### 3. 결 론

본 연구의 대상인 터널 화재시 콘크리트에 매입된 강재의 열적 손상에 대한 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 내화피복을 처리하지 않은 L-A-1 시험체와 달리 내화피복 처리를 하여 Modified Hydrocarbon Fire 곡선에 화재실험을 실시한 L-A-2(50mm깊이에 앵커 매입), L-A-3(75mm깊이에 앵커 매입), L-A-4(100mm깊이에 앵커 매입) 시험체는 최고온도분포가 각각 350℃, 180℃, 100℃로 나타났으며 150mm 깊이로 앵커를 매입하여도 MHC과 같은 화재시나리오에서 앵커의 내화성능을 발휘할 수 있는 것으로 분석된다
- 2) 피복처리를 하지 않은 PC패널(L-A-1)은 앵커의 손상깊이를 산정하는 550℃ 이상의 열 특성을 보인 기준초과부위가 0~70mm로 나타나 앵커의 전단강도 및 콘크리트 내부에서의 열전도를 방지하기 위해 반드시 내화피복의 적용이 필요하다

### 감사의 글

이 논문은 국가 R&D로 수행되고 있는 한국건설기술연구원의 기관고유사업인 “지하공간 환경조성 및 방재기술 개발(2008)”과제와 관련하여 지식경제부의 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. International Tunnelling Association, Guidelines for structural fire resistance for road tunnels
2. 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.
3. Furumura, F., Abe, T., Shinohara, Y., Mechanical Properties of High Strength Concrete at High Temperatures, Proceedings of the Fourth Weimar Workshop on High Performance Concrete: Material Properties and Design, held at Hochschule für Architektur und Bauwesen (HAB), Weimar, Germany, p. 237-254, 1995
4. Morita, T., Saito, H., and Kumagai, H., Residual Mechanical Properties of High Strength Concrete Members Exposed to High Temperature - Part 1. Test on Material Properties, Summarise of Technical Papers of Annual Meetings, Architectural Institute of Japan, Niigata, 1992
5. Schneider, U., Behavior of Concrete at High Temperature, HEFT 337, Deutscher Ausschuss Für Stahlbeton, Vertrieb Durch Verlag Von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1982