

콘크리트 라이닝의 화재손상 평가에 관한 실험적 연구

박경훈* · 김흥열* · 유용호* · 김형준*

한국건설기술연구원

An Experimental Study on the Fire Damage Evaluation of the Concrete Lining

Park, Kyung Hoon · Kim, Heung Youl · Yoo, Yong Ho · Kim, Hyung Jun
KICT

요 약

최근 국내에서는 대심도 터널 시공계획이 발표되면서 터널 구조물에 대한 방재 및 내화설계에 대한 관심이 높아지고 있다. 화재 발생 시 문제가 발생할 수 있는 콘크리트 라이닝의 내화설계를 위해서는 보다 구체적인 내화성능을 측정하기 위한 내화실험이 실시되어야 한다. 현재 국내에서는 건축물의 내화성능을 평가하기 위한 시험평가 방법이 제시되어 있는 상태이나 터널 구조물에 대한 시험법이나 성능평가는 거의 전무한 상황이다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 구조물의 화재손상 정도를 평가하기 위해 현장에서 사용되고 있는 터널 라이닝을 대상으로 화재 시 콘크리트 라이닝의 손상정도를 평가하였다. 실험은 대표적인 터널 화재시나리오 곡선인 RABT 화재 시나리오를 적용하였으며 폭발방지에 효과적인 것으로 알려져있는 fiber cocktail(강섬유+폴리프로필렌섬유)의 혼입여부에 따른 성능평가도 함께 실시하였다.

1. 서 론

국내 터널 화재에 대한 안전설계는 일반적으로 인명의 안전에 더 높은 가치를 둔 방재 시설 중심의 내화설계(Active fire protection)가 주가 되어 왔다. 화재로부터 구조물을 보호하는 것은 시공시 많은 비용이 드는 것으로 알려져있지만 다른 한편으로는 인명 및 구조물과 사회, 경제적인 위협에 대한 비용에 비하면 경제성이 우수하다고 할 수 있다. 1996년 유로터널 화재에서는 과열된 콘크리트 파편이 구조 및 비상대원과 같은 현장의 사람들에게 떨어지는 사고가 발생하였고, 1999년 이태리와 프랑스의 경우 몽블랑 터널화재로 인한 시설의 붕괴로 인하여 해당 지역뿐만 아니라 광범위한 인접 지역에 대한 경제적인 과장이 발생하였다. 이처럼 각국의 화재로 인한 철도터널의 피해사례는 빈도가 많지 않지만 그 피해는 상당한 것으로 알려져 있다. 특히 유로터널의 경우 3차례의 화재피해 사례가 발생하였는데, 1996년 첫 번째 유로터널화재는 터널 라이닝의 폭발 등에 의한 구조물

보수피해비용만 약 2억유로로 추정되며 이는 터널 전체의 구조적 내화처리 비용인 2천만 유로의 10배에 달하는 피해액이었다. 2006년 발생한 두 번째 유로터널화재의 경우에는 화염원이 크지 않아 조속히 진화되어 큰 피해가 발생하지 않았으나 2008년 세 번째 유로터널화재로 인해 구조물 보수피해비용이 4천 6백만 유로 이상으로 추정되며, 이는 터널 전체의 구조적 내화처리 비용(2천만유로)의 2.3배에 해당되는 비용이다. 터널의 화재사고 발생건은 매우 낮으나 화재사고가 발생할 경우, 초동진압 실패시 폐쇄된 공간에서의 화재전파속도가 빨라 단시간 내에 화재의 확산과 함께 고온으로 상승하여 피해를 증대시킨다. 터널 내의 화재발생시 약 1000℃ 이상으로 추정되는 고열에 의한 제반설비의 훼손, 콘크리트 구조체의 폭발현상으로 인한 심각한 구조적 손상 및 이로 인한 내력구조물의 붕괴로 유발되는 2차적 화재피해의 가능성이 높으므로, 터널구조물의 내화설계 분야에 대한 대응 기술개발이 요구되고 있다.

2. 터널 라이닝 내화성능 평가 실험조건

국내 터널화재 안전기술 분야는 단위재료에 대한 부분적인 화재안전성능 평가 및 기준 개발 수준에 머물러 있으며 실물 화재평가를 통한 포괄적인 적용기술은 아직까지 외국기술에 전적으로 의존하고 있어 이의 개선을 위한 연구개발이 수행되어야 한다. 터널 화재 발생 시 구조적 손실과 관련된 화재안전 성능의 평가를 위하여 화재 관련 선진국에서 수행하고 있는 터널 구조요소의 화재거동 및 전체 터널 구조물의 화재시 거동을 수치적 해석방법으로 구현하기 위해서는 터널 구조물에 대한 실물실험을 통한 구체적인 내화성능을 평가할 필요성이 있다. 이에 본 연구에서는 터널의 콘크리트 라이닝에 대한 화재거동 실증실험을 통해 터널 구조요소별 화재손상 범위를 평가하였다.

2.1 성능평가 기준

현재 콘크리트의 내화성능 평가방안은 건축물을 대상으로 하는 기둥 및 보의 내화성능 확인기준과 방법 등이 제시(국토해양부 고시 제 2008-334호)되어 있으나 터널 구조물을 대상으로 하는 평가기준은 정립되어 있지 않아 성능평가에 대한 객관성을 확보하기 어려운 실정이다. 이에 본 논문에서는 터널 구조요소의 화재거동을 평가하기 위해 콘크리트 터널 라이닝의 내화실험 방법을 규정하여 화재손상 범위를 평가하는 내화시험을 수행하였다. 실험방법은 유럽의 내화자재협회인 EFNARC(European Federation for Specialist Construction Chemicals and Concrete Systems)의 터널라이닝 내화시험 지침서를 기초로 하여 규정하여 실험을 실시하였다.

2.2 실험체 제작 방법

기존의 국내콘크리트 터널내화 실험은 소규모의 단위실험을 통한 분석에 국한되어 평가되어 왔으며 그 결과를 실제 터널라이닝의 화재손상범위로 평가하기에는 결과의 신뢰성을 확보하기 어려웠다. 따라서 본 연구에서는 콘크리트 라이닝의 실험체 실물실험은 현장에서 시공하는 터널라이닝 세그먼트 업체 K사의 기준강도 40MPa의 라이닝을 체결하여

그림 1과 같이 아치형태의 실험체로 제작하였다. 제작된 콘크리트 시험체 크기는 길이 4300mm, 높이가 1200mm이며 EFNARC에서 제안한 large scale 내화시험의 요구조건인 콘크리트 시험체 화염노출면적 1500×1500mm 이상을 확보하였다. 화재 시 터널 라이닝의 열특성을 측정하기 위해 시험체 내부에 삽입되는 열전대는 1.0mm의 k타입을 사용하였으며, 그림 2와 같이 EFNARC에서 제안한 열전대 측정위치를 준용하여 콘크리트 표면(가열면)으로부터 25±2mm의 거리(2,4,6,8)에 4개의 열전대를 배치하고 50±2mm의 위치(1,3,5,7)에 4개의 열전대, 75±2mm의 보강근 밑쪽에 5개의 열전대를 고정하였다. 또한 콘크리트 표면 앞쪽에서 100±2mm의 위치(3,7)에 2개의 열전대, 뒤쪽에 3개의 열전대(1,5,9)를 배치하여 내부온도를 측정하도록 하였다.



그림 1. 터널 라이닝실험체 제작 사진

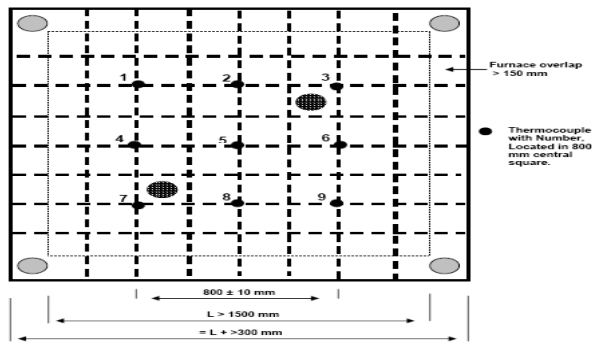


그림 2. EFNARC에서 제안하는 열전대 설치 위치

2.3 내화성능 평가 방법

터널라이닝 세그먼트의 내화성능 평가는 그림 3과 같이 5분 이내에 1200℃에 도달하여 55분간 지속된 후 대기의 상온온도인 20℃에 도달할 때까지 냉각되는 현상을 모사하는 RABT 터널화재 곡선의 온도조건을 대상으로 하여 실시하였다. 실험에 사용된 가열로는 한국건설기술연구원에서 터널화재 시 구조요소의 열특성을 평가하기 위해 개발한 터널용 다목적 가열로로써, 기존의 가열로들이 모사하기 어려웠던 RABT 화재곡선과 같은 급가열 후 급냉각의 화재시나리오의 수행이 가능하며 폭 1500mm, 길이 4000mm로 제작하여 EFNARC에서 제시하는 Large-sacle 화재실험조건(1500×1500mm)을 만족하였다. 또한 폭렬

저감에 효과적인 것으로 알려져있는 Fiber cocktail(강섬유+폴리프로필렌섬유)를 혼입하여 폭열로 인한 세그먼트의 손상범위를 평가하였다.

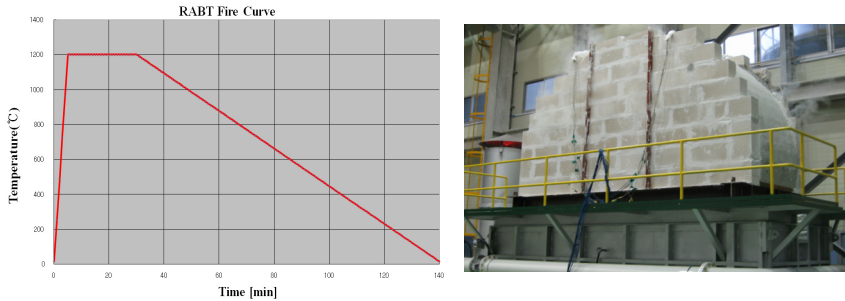


그림 3. 실험에 사용된 터널화재곡선 및 터널가열로

3. 실험결과

3.1 섬유 무혼입 터널라이닝 실험체

화재강도를 RABT 화재곡선으로 적용하여 합성섬유를 혼입하지 않은 터널라이닝 시험체에 대한 140분 large scale 화재시험을 수행하였으며, 그림 4는 화재시험 후의 시험체 형상이다. 섬유를 혼입하지 않은 시험체의 경우 시험 시작 후 10분이 경과된 후부터 폭열현상으로 인한 콘크리트 폭열현상이 발생하였으며 140분 내화시험 후 시험체 전체 측면에서 폭열로 인한 라이닝 표면의 탈락현상이 발생하였다. 시험체의 폭열깊이는 25mm 이상으로 측정되었다.



그림 4. 화재 실험 후 터널라이닝 표면(섬유 무혼입)

3.2 섬유혼입 터널라이닝 실험체

터널화재 시 콘크리트 라이닝 내화성능확보를 위해 사용되는 합성섬유는 폭열방지에 효과적인 것으로 알려져있는 폴리프로필렌 섬유와 강섬유를 하이브리드하여 사용하였다.. 화재강도는 RABT 화재시나리오를 적용하여 140분 동안 내화시험을 수행하였다. 그림 5는 시험 후의 시험체 형상이며, 섬유를 혼입한 경우 터널 시험체 측면에서 깊이 5mm정도

의 국부적인 폭발현상이 발견되었으나 상부구조에서는 폭발현상이 발생하지 않았다. 합성 섬유를 혼입한 시험체의 내화성능 평가결과 결과 열전대 매입깊이가 가열면으로부터 25mm인 지점의 온도가 최고 370℃ 미만으로 나타나는 결과를 나타내었으며, 섬유혼입으로 인한 폭발저감 및 내부온도 저감효과로 인해 터널화재 시 콘크리트 라이닝의 내화성능이 향상된 것으로 판단된다.



그림 5. 화재 실험 후 터널라이닝 표면(섬유 혼입)

4. 결 론

기존의 NATM 방식의 터널과 달리 침매터널이나 대심도 터널에서의 콘크리트 라이닝은 구조체 역할을 하게 되므로 내화성능 확보는 터널 구조 설계에 중요한 요소가 될 수 있다. 화재 발생 시 단시간에 1000℃이상의 고온을 유발할 수 있는 터널구조물의 내화성능 확보를 위해 실물실험체를 대상으로 콘크리트 라이닝의 내화성능 평가실험을 실시하였으며 ITA(International Tunneling Association)에서 규정한 콘크리트 손상 한계온도인 380℃를 기준으로 시험체의 손상정도를 평가한 결과 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 폭발 저감재인 fiber cocktail을 혼입하지 않은 터널라이닝 실험체의 경우 라이닝 전반에 걸쳐 폭발이 발생하였으며 폭발깊이는 25mm인 것으로 평가되었다. 또한 ITA의 콘크리트 손상 한계온도를 적용할 경우 구조물의 내화성능 확보 시간은 8분인 것으로 평가되었다.

2) 폭발 저감재인 fiber cocktail를 혼입한 터널라이닝 실험체의 경우 부분적으로 폭발이 발생하였으며 최대 폭발깊이는 5mm정도인 것으로 판단된다. 또한 ITA의 내화성능 확보 온도인 380℃를 초과하지 않아 140분 동안 내화성능을 확보한 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업으로 수행된 (11주요)구조물 성능기반 화재거동해석 및 설계기술연구 과제와 관련되어 수행되었습니다, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Brook Green, Structural fire protection of railway tunnel(2009), Railway Engineering Conference, pp.24-25, 2009.
2. International Tunnelling Association(2004), Guidelines for structural fire resistance for road tunnels
3. Specification and Guidelines for Testing of Passive Fire Protection for Concrete Tunnels Linings(2006), pp. 1-19