

셴드터널 콘크리트 라이닝의 내화특성

Fire-Resistance Characteristics of Shield Tunnel Concrete Linings

박 해 균* 이 명 섭** 전 상 은*** 박 동 규****
Park, Hae Geun Lee, Myeong Sub Jeon, Sang Eun Park, Dong Kyu

ABSTRACT

In recent years a number of catastrophic tunnel fires, the Euro tunnel, the Mont Blanc tunnel, the Tauern tunnel and the Gotthard tunnel, have occurred and inflicted serious damages to European countries. If a fire occurs in shield tunnels, the reinforced concrete segment linings playing as an important structural member is expected to damage severely and finally can be caused the collapse of tunnel. The purpose of this study is to evaluate the performance of concrete segment lining under heat exposure and to obtain information to assist a new technical approach to fighting fires in tunnels. In order to evaluate the fire-resistance performance of concrete segment by adding Polypropylene fibers, fire tests using the RABT heat-load curve is carried out. The temperature rise of this curve is very rapid up to 1200°C within 5 minutes, and duration time of the 1200°C exposure is 55 minutes. From the fire test, it was found that the explosive spalling was rapidly reduced by adding polypropylene fibers and this method is considered as an effective fireproof material to upgrade fire safety in tunnels economically.

1. 서 론

최근 도로 및 철도터널 등 교통터널에서 대규모 화재사고가 유럽을 중심으로 세계 각지에서 빈번히 발생하고 있으며 이로 인한 경제적, 사회적 손실 또한 무시할 수 없을 만큼 방대해 지고 있는 실정이다. 하천을 횡단하는 셴드터널(Shield Tunnel)의 경우 높은 수압의 작용으로 수밀성이 요구되어 그림 1에 나타낸 것과 같이 보통강도 콘크리트를 사용한 2차 라이닝을 방수쉬트를 사이에 두고 시공하는 공법의 적용이 일본 등지에서는 점차 증가하고 있다. 특히, 셴드기계에 의한 굴착 후 굴착면 내부에 구조부재로 시공되는 철근콘크리트 세그먼트(1차 라이닝)는 압축강도 45N/mm² 이상의 고강도 콘크리트를 사용하는데 특별한 내화대책이 없이 세그먼트만을 시공할 경우에는 터널화재로 인해 세그먼트에 상당한 피해가 예상되며 아울러 폭발에 의한 단면손실 및 철근 강도 손실로 터널 붕괴로까지 이어질 가능성 높은 것으로 판단된다. 따라서 본 논문에서는 셴드터널 철근콘크리트 세그먼트와 동일한 시험체를 제작, 콘크리트 내화성능에 효과적인 방법으로 알려진 폴리프로필렌(Polypropylene) 섬유를 혼입하여 그림 2에 나타낸 독일의 화재시간-온도곡선인 RABT곡선에 의한 내화실험을 실시하여 내화성능을 평가하였다.

* 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사

** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 부장, 토목구조기술사

*** 삼성물산(주)건설부문 기술본부 기술연구소 전임연구원, 공학박사

**** 삼성물산(주)건설부문 토목사업본부 토목기술팀 과장, 공학박사

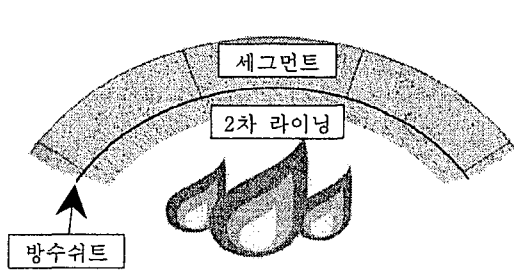


그림 1 쉘터널 라이닝 구조(2차 라이닝 시공시)

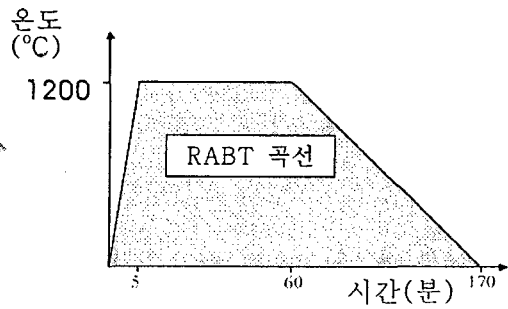


그림 2 독일의 화재온도-시간곡선(RABT)

2. 내화성능실험

금번 내화실험에 사용된 시험체를 표1에 나타낸다. 기준시편(Spec. 1)으로 쉘터널 구조부재로 시공되는 고강도의 RC세그먼트(1차 라이닝)를, 그리고 내화대책의 일환으로 2차 라이닝을 시공하고 그 내부에 폴리프로필렌(PP) 섬유를 혼입한(무혼입, 1.0kg, 3.0kg) 3개의 시편(B:700mm, L:1,400mm, t:220mm)으로 나누어 제작하였다. 수압 등 추가적인 하중의 작용을 고려하여 3개의 강봉을 사용하여 6.5N/mm²의 압축력을 도입하였다. RC세그먼트의 설계기준강도는 45N/mm², 2차 라이닝은 24N/mm²이며, 내부에 사용된 주근과 배력근은 모두 D13철근을 사용 하였고, 폴리프로필렌 섬유는 비중 0.91, 용융점 160°C, 섬유길이 20mm, 직경 48μm의 제품을 사용하였다. 본 실험에 사용된 수평내화로를 그림 3에 나타낸다. 화재규모는 도로터널의 위치, 터널구조, 단면, 주변환경, 방재설비, 통행차량의 종류 등 종합적으로 고려해서 설정하여야 하는데 본 실험에서는 그림2에 나타낸 독일의 화재온도-시간곡선(RABT곡선, 최대온도 1,200°C, 최대온도 지속시간 60분)을 사용하였다.

표 1 시험체 종류





Specimen No	Specimen 1	Specimen 2	Specimen 3	Specimen 4
Specimen type	RC Segment (1차 라이닝) 1차 라이닝 	2차 라이닝 1차 라이닝 2차 라이닝 방수슈트 	2차 라이닝 1차 라이닝 2차 라이닝 	2차 라이닝 1차 라이닝 2차 라이닝 
Concrete Strength (N/mm ²)	45	24	24	24
Dosage of fiber (kg/m ³)	0	0	1	3

표2 세그먼트/2차 라이닝 콘크리트 배합표

Specimen	Gmax (mm)	Slump (cm)	W/C (%)	S/a (%)	Air (%)	Unit Weight (kg/m ³)					plasticizer (kg)
						W	C	Slag	S	G	
RC Segment (1차 라이닝)	20	8	37.1	42.5	2.0	154	353	62	779	1055	4.57
2차 라이닝	20	8	47.4	39.2	2.0	180	380	-	703	1095	3.8

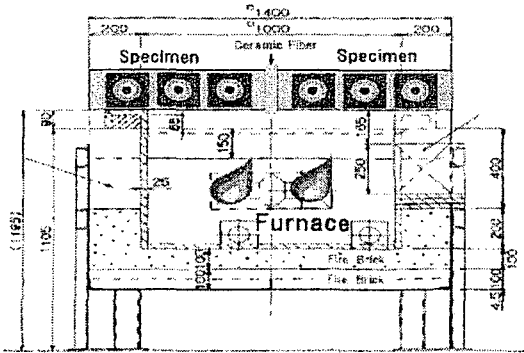


그림 3 내화시험장치



그림 4 실드터널 라이닝 내화시험

3. 내화시험결과

내화성능 시험결과 사진을 그림 5에 나타낸다. 먼저 PP섬유를 혼입하지 않은 Spec.1(RC 세그먼트)과 Spec.2(2차 라이닝)의 경우, 가열개시 직후부터 아주 심한 폭발현상이 발생하였다. 폭발은 가열온도의 증가로 점차 심하게 발생되었으며, 가열 15분 후에는 가열된 면 전체에서 폭발에 따른 콘크리트 박락이 확인되었다. 가열 후 16분~17분을 경과한 시점에서는 박락되는 콘크리트 부위가 점차 커짐에 따라 내화로 내부에서 다량의 수증기가 해방되어 가열곡선인 RABT곡선의 최대온도인 1,200℃까지 상승되지 못하였으며, 내화로 손상 및 시험 간 안전 확보차원에서 Spec.1과 Spec.2 시험체에 대한 내화시험을 중단하였다. 폭발에 의한 손상 깊이는 약 42~50mm 정도로 거의 비슷하게 발생되었으며 Spec.2의 경우에는 주철근 깊이까지 손상이 발생하였다. 위의 결과를 통해 볼 때 구조부재인 세그먼트에 특별한 내화대책이 없을 경우 폭발에 의한 단면손실 및 철근의 손상으로 터널 붕괴까지 유발시킬 수 있을 것으로 판단되며, 비록 낮은 콘크리트 강도임에도 불구하고 압축력의 도입으로 인해 심한 폭발 현상을 확인할 수 있었다.

한편, 2차 라이닝에 PP섬유를 혼입한 Spec.3과 Spec.4의 경우, 최대온도 1200℃의 RABT 가열곡선에 장시간 노출 되었음에도 불구하고 섬유를 혼입하지 않은 시험체(Spec.1~2)와 비교했을 때 상당히 우수한 내화성능을 보였다. PP섬유를 1.0kg 혼입한 Spec.3의 경우, 가열 개시 직후 일부구간에서 폭발로 인한 경미한 콘크리트 탈락이 발생하였으나 가열 20분경과 후부터 시험 종료까지 더 이상의 심각한 콘크리트 탈락은 발생되지 않았다. 3.0kg의 PP섬유를 혼입한 Spec.4의 경우도 가열 개시에 약간의 탈락이 발생하였으나 그 이후 가열이 끝날 때까지 거의 탈락이 발생되지 않았다. 이처럼 PP섬유를 혼입한 시험체에서 폭발에 의한 콘크리트 탈락이 적었던 이유는 본 시험에 사용된 PP섬유가 160℃ 라는 비교적 낮은 온도에서 용해되어 콘크리트 내부에 다수의 공극을 발생시킴으로써 수분의 이

등을 용이하게 하였으며 콘크리트 표면의 수증기압이나 열응력을 완화시켰을 것으로 사료된다. 발생된 폭열 깊이는 Spec.3이 약 5mm정도, Spec.4가 약 2mm 정도로 경미하였으며, 장시간 가열에 따라 두 시편 모두 변색되거나 표면의 골재가 일부 녹았지만 콘크리트 내부에 있는 철근은 확실하게 보호할 수 있었다. 하지만, 3.0kg의 PP를 사용할 경우 슬럼프 저하에 따른 작업성 문제가 제기되어 실제 적용하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

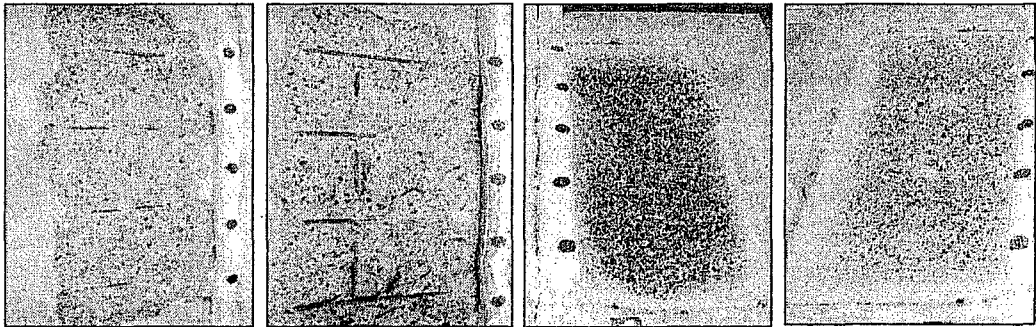


그림 5. 내화실험결과 사진 (왼쪽부터 Spec1, 2, 3, 4)

4. 결론

터널에서 대규모 화재사고가 발생할 경우, 인명피해는 물론 온도상승에 따른 터널 구조부재의 응력 저하 및 폭열로 인한 손상이 필연적으로 발생되며 더욱이 피해 복구까지의 장시간이 소요되어 사회적, 경제적으로 미치는 영향이 상당히 크다고 할 수 있다. 제한된 시험체를 통해 금번에 실시한 내화 실험결과, 약 1.0kg (m³ 당)의 폴리프로필렌 섬유 혼입은 쉘드터널 콘크리트 세그먼트의 내화성능 향상에 유리하게 작용할 것으로 판단되며, 향후 터널 콘크리트 구조물의 내화성능향상에 기여할 수 있는 내화대책의 한 방법으로 적용 가치가 높을 것으로 판단된다.

참고문헌

1. Haak, A., "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, 1998.
2. 日本コンクリート工学協会., "コンクリート構造物の火災安全性研究委員会報告書," 2002.6.
3. Koichi.Ono., "Fire Safety to Concrete Structure,"Concrete Journal, Vol.40, No.7, pp.10~15, Jul. 2002.
4. T.Morita., "トンネル火災におけるコンクリートの耐火性について,"日本コンクリート工学協会, Vol. 38, No.11, Nov. 2000.
5. 박해균, 이명섭, 김재권., "터널 콘크리트 구조물의 화재 안전성 평가와 대책", 한국콘크리트회지 제 16권 제1호, pp.74~79. 2004.
6. 박해균, 이승복, 이명섭, 김재권., "터널 콘크리트 구조물의 내화설계 Approach 및 내화대책공법", 한국터널공학회지 제5권 제3호, pp.64~71. 2003.