

도로터널 화재시 터널콘크리트 폭렬방지대책



김낙영
한국도로공사 책임연구원
(ynagkm@ex.co.kr)



이찬영
한국도로공사 전임연구원
(leecy@ex.co.kr)



안태송
한국도로공사 수석연구원
(conc@ex.co.kr)

1. 서론

최근 국가기간 시설물 중 도로 터널 구조물에 각종 사고로 인한 대형화재가 종종 발생하여 엄청난 경제적 손실을 초래하고 있다. 폐쇄된 공간인 터널에서의 화재 발생시 콘크리트의 폭렬로 인한 구조체의 강도저하가 발생함에 따라 사회기반시설의 손실뿐만 아니라 인명피해까지 야기시키고 있다. 특히, 터널구조에서 라이닝 콘크리트는 화재시 직접적으로 급격한 고온에 노출되어 폭렬로 인한 탈락 및 붕괴 등으로 심각한 위험 요소를 내포하고 있다.

현재까지 국내에 건설된 각종 터널 구조물 대부분의 콘크리트 라이닝은 이러한 화재시 위험 및 안정성 확보에 대한 충분한 대책 없이 공사가 진행되었고, 추후 신규로 공사가 진행될 각종 터널 내의 라이닝 콘크리트 역시 설계지침/시방 및 규정부재로 인하여 화재에 의한 막대한 위협이 상존하고 있는 실정이다.

이러한 현실에도 불구하고 터널 구조체의 보호, 시험방법 및 방지대책에 대한 규정 및 연구는 이루어지지 않고 있

고, 일반적인 방재 대책 연구 수준에 머물러 있다. 유럽에서는 이미 오래전부터 화재의 안전성을 중요시하여 연구 개발이 활발히 진행되고 있으며, 일본에서도 터널 방재 개념으로 화재안전시설에 대한 관심으로 터널 콘크리트의 화재 안전성에 대한 위원회를 조직하여 보고서를 발간하는 등 터널의 내화성능에 깊은 관심을 나타내고 있다. 따라서, 본 연구에서는 도로터널에서 화재시 콘크리트 라이닝(구조체)의 폭렬을 방지하기 위한 방안을 비교 분석 하였다.

2. 실험에 의한 콘크리트 라이닝 폭렬방지 방안

2.1 내화공법에 따른 내화성능

소형 공사체 조건에서 유기섬유를 혼입하는 방식, 스프레이방식, 보드방식 등 내화공법 변화에 따른 내화특성을

HC 화재곡선에 의해 실험을 실시, 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 섬유유 혼입을 증가에 따라서 작업성은 저하하는 것으로 나타났으며, NY섬유를 혼합한 경우 유동성이 가장 양호하였다. 섬유유 혼입을 증가에 따라 NY섬유, PVA, PP순으로 공기량이 감소하였다.
- 2) 유기섬유를 혼입한 경화 콘크리트의 특성으로 압축강도는 7일 재령 40MPa 이상, 28일 재령에서 50MPa 이상으로 섬유유 혼입율이 증가할수록 크게 나타났으며, 인장강도는 압축강도의 약 1/10로 나타나, 섬유유 혼입에 따른 콘크리트의 강도발현에는 문제가 없는 것으로 나타났다.
- 3) 섬유유 혼입하지 않은 플레인 콘크리트는 시험체의 표면부에 폭렬이 발생하였지만, PVA섬유 0.10% 이상, PP섬유, NY섬유는 혼입율 0.05% 이상에서 폭렬이 발생하지 않았다.
- 4) 내화시험 후 잔존 압축강도율은 내부균열 등의 영향으로 크게 저하하였는데, 폭렬이 발생하지 않은 경우라도 잔존 압축강도율은 9% 전후인 것으로 나타났다. 따라서, 유기섬유를 혼입한 콘크리트 라이닝이 화재 피해를 받은 경우 표면부 피복 콘크리트는 제거 후 보수하여야 할 것으로 판단된다.
- 5) 스프레이 방식에서는 마감재 부분에서 부분적인 폭렬이 발생하였을 뿐, 모재 콘크리트는 폭렬이 발생하지 않고 본래의 형상을 유지하였다. 온도이력 특성에 있어 플레인과 뿔칠재(NY섬유 1.0% 혼입, 황구속재 두께 1.6T)를 플레인과 비교하면 띠근부 5.9%, 주근부 20.1%, 띠근과 중앙사이 9.9%, 중앙부 13.9%의 온도감소율을 나타내었다.
- 6) 일반 건식공법에 의해 시공된 보드방식은 모두 폭렬이 발생하였으나, 건식공법 시공 후 내화페인트로 연결철물을 도포한 경우, 내화모르타로 차폐한 경우, 경량기포 콘크리트로 그라우트 한 경우는 모두 폭렬이 발생하지 않고 본래의 형상을 그대로 유지하고 있었다. 따라서, 보드방식의 경우 연결철물 및 보드간 틈새 등에 대한 보강이 필요한 것으로 판단된다.

7) 온도이력 특성에 있어 내화처리 되지 않은 것을 100으로 설정한 경우 건식 보드공법은 콘크리트 표면부에서 69.6%, 내화페인트로 추가 보강한 경우 표면부 81.0%, 경량기포콘크리트 그라우트로 추가 보강한 경우는 가장 양호하게 표면부에서 92.1%의 온도감소율을 나타내었다.

2.2 전용가열로 Mock-Up Test

전용가열로에서 내화공법별로 RABT, RWS 화재곡선 및 대형 바닥가열로에서의 HC 화재곡선에 따른 Mock-Up Test를 실시하였으며, 실험결과에 따른 내화특성 및 온도이력을 분석한 결과는 다음과 같다.

1) RABT 화재곡선에 따른 내화특성

- 내화공법이 시공되지 않은 플레인 콘크리트는 초기의 극심한 고온에 의한 수증기압 증대로 인해 심한 폭렬 현상이 발생하였다.
- 유기섬유를 혼입하는 방식의 경우는 140분간 가열시험 후 시험체 표면에 약간의 박리폭렬이 나타났지만 전반적으로 구조체는 본래의 모양을 그대로 유지하는 양호한 결과를 나타냈다.
- 스프레이 방식의 경우는 메탈라스가 고온에 용해되어 뿔칠재와 같이 탈락되면서 구조체 콘크리트가 철근이 노출되는 등 100mm 이상 깊이의 심한 폭렬이 발생하였다.
- 보드방식의 경우, 모재 콘크리트는 폭렬이 발생하지 않고 본래의 형상을 그대로 유지하는 양호한 결과를 나타냈다.
- 내화실험 중의 온도이력을 분석한 결과, 유기섬유를 혼입하는 방식의 경우, 주철근부의 온도를 유럽 및 미국의 기준인 250℃ 미만으로 낮추려면 철근 피복두께를 100mm 이상 확보해야 할 필요성을 알 수 있었고, 스프레이 방식의 경우 뿔칠재의 두께를 충분히 늘리고, 보강재로서 용해점이 높은 재료를 선정해야 폭렬방지가 가능할 것으로 판단되었다. 보드방식의 경우 양호한 온도이력을 나타내었다.

2) RWS 화재곡선에 따른 내화특성

- 유기섬유를 혼입한 경우는 콘크리트 표면이 약 5mm 이내 깊이의 응해현상이 발생하였으나, 폭발은 발생하지 않아 양호한 결과를 나타내었다.
- 스프레이 방식의 경우는 보강재인 메탈라스가 고온에 응해되어 뿔칠재와 같이 탈락되면서 구조체 콘크리트의 철근이 노출되는 등 100mm 이상 깊이의 심한 폭발이 발생하였다.
- 보드방식의 경우는 보드가 고온에 응해되면서 탈락하였으며, 구조체 콘크리트가 고온에 직접 노출되어 폭발현상이 발생하였다.
- 온도이력 특성분석에 있어, 유기섬유를 혼입하는 방식의 경우 주근부의 온도를 250°C 미만으로 낮추려면 철근 피복두께를 100mm 이상 확보해야 할 필요성이 있음을 알 수 있었고, 스프레이 방식의 경우 뿔칠재의 두께를 충분히 늘리고, 보강재로서 응해점이 높은 재료를 선정해야 폭발방지가 가능할 것으로 판단되었다. 보드방식의 경우 내화성이 양호한 마감소재와 연결철물 및 앵커 또는 내화성이 양호한 소재와 충분한 내화처리를 한 연결철물 및 앵커를 사용하여야 폭발방지가 가능할 것으로 사료된다.

3) HC 화재곡선으로 실시한 대형 시험체의 내화특성

- 유기섬유 혼입방식의 경우는 약간의 표면바리 현상이 발생하였으나 전체적으로 비교적 양호한 폭발방지 성능을 나타내었다.
- 스프레이 방식의 경우는 철근노출과 함께 심한 폭발이 발생하였다.
- 보드방식의 경우는 효과적으로 폭발이 방지되어 가장

양호한 것으로 나타났다.

- 온도이력 특성분석 결과, 유기섬유를 혼입하는 방식과 보드방식의 경우 양호한 온도이력을 나타내었고, 스프레이 방식의 경우 뿔칠재의 두께를 충분히 늘리고, 보강재로서 응해점이 높은 재료를 선정해야 폭발방지가 가능할 것으로 판단된다.

3. 경제성 분석

기존 방식, 섬유혼입 방식, 내화보드 방식, 내화스프레이 방식을 대상으로 공용년수(수명주기) 동안의 기존의 연구 고찰, 자료조사 및 70여명의 관련 전문가를 대상으로 설문 조사 및 2차 자료(통계자료)로서 유지보수비용 및 주기 등을 구하여 LCC를 예측하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

터널의 내구년한 60년 동안의 LCC 분석을 실시한 결과는 다음과 같다.

- 터널화재 상황을 배제하여 간접비용을 제외한 터널의 LCC(총생애주기비용)를 분석한 결과, 기존 라이닝 방식이 타 방식 대비 9.04~149.09억원(1.7~28.2%)의 비용절감으로 가치점수를 0.8~15.6점(1.1~28.3%) 향상시키는 것으로 분석되었다.(비용절감형)
- 터널화재 상황이 1회 발생한다는 전제하에 간접비용을 포함한 터널의 LCC(총생애주기비용)를 분석한 결과, 섬유혼입방식이 타방식 대비 133.36~256.50억원(24.5~47.2%)의 비용절감으로 가치점수를 13.4~23.2점(23.1~48.2%) 향상시키는 것으로 분석되었다.(가치혁신형)