

터널구조물의 내화대책에 대한 ECC 적용 가능성

김정희* · 권영진* · 이해경** · 김재환*** · 한병찬***

호서대학교 소방방재학과* · ㈜피엔알시스템** · (주)AMS엔지니어링

New Fire Resistant Method of Reinforced Tunnel Structures Using Engineered Cementitious Composites

Kim, Jung Hee* · Kwon, Young Jin* · Lee, Hye Kyung**

· Kim, Jae Hwan*** · Han, Byung Chan

Dept. of Fire & Disaster Protection Eng., Hoseo Univ.*

· P&R System Co., Ltd.** · AMS-ENG Co., Ltd.***

요 약

화재에 대한 안전성 확보는 ECC 등과 같은 신소재를 실제 구조물에 적용 또는 실용화하기 위해 필요한 중요한 요소 중 하나이다. 본 논문은 터널구조물에 대한 내화대책의 일환으로써 ECC의 적용가능성을 평가하고자 하는 것을 목적으로 한다. 이를 위하여 터널구조물의 화재 온도조건인 RABT 화재온도이력곡선을 적용하여 내화성능을 실험적으로 평가하였다. 또한 비정상 온도분포해석 기법을 이용하여 이를 해석적으로 묘사·검증하였으며, 실험결과를 통해 검증된 해석기법을 이용하여 터널라이닝에 대한 열전달 해석을 수행하여 ECC의 적용가능성을 고찰하였다. 실험결과 ECC는 폭렬 및 화재상태에서의 모체콘크리트에 열화가 발생하지 않았으며, 기존 콘크리트 및 내화소재와의 상대 비교에 있어서도 가장 우수한 내화성능을 나타냈다. 이를 통하여 터널구조물의 내화대책에 있어 ECC 소재가 적용가능성이 있는 것으로 판단되었다.

1. 서 론

최근 전 세계적으로 수송량의 증가와 함께 터널시설의 급속한 증가, 장대화, 심층화가 진행되고 있으며, 이에 수반하여 대규모 화재에 의한 심각한 피해가 보고되고 있다. 국내의 경우에도 2005년 기준 도로터널은 817개소, 총 연장 551km에 달하며, 장대터널 비율 급증하고 있다. 실제 도로터널에서 1km 이상의 터널은 131개소로서 전체의 16%에 달하고 있으며, 그 연장은 227km로서 41.2%에 이르고 있다¹⁾. 이러한 장대터널은 화재발생시 피해가 커질 수 있으며, 특히 표 1과 같이 트럭, 유조차, 폭발물 탑재 차량 등과 같은 운반물의 다양화와 함께 터널 통과 차량의 대형화, 터널내 차량충돌 사고의 빈발 등 터널 내부에서 대형화재의 위험성이 급증하고 있어 더욱 내화의 필요성이 요구된다.

표 1. 우리나라 터널의 주요 화재 사례

발생장소	터널명	발생	화재 사고 개요
부 산	장지터널	2001	승용차 터널입구 추돌(사망 1명, 중산 4명)
영동고속도로	마성터널	2001	관광버스 등 11중 추돌(부상 100여명)
서 울	남산1호터널	2002	버스화재
경부고속도로	옥천4터널	2003	화물트럭 화재, 차량 10중 추돌
서울내부순환로	홍지문터널	2003	미니버스와 승용차 추돌
경부고속도로	옥천3터널	2003	6중 추돌(부상 10여명)
대전내부순환로	안영2터널	2003	화물차 적재물 낙하, 6중 추돌(부상 10여명)
대 구	지하철중앙로역	2003	객차 방화, 상부 slab 100mm 폭렬, 1,000 °C 이상 고온
구마고속도로	달성터널	2005	미사일추진체 운반차량 화재(추진체 고체연료 폭발)

도로터널 구조물의 내화는 기본적으로 사용자의 안전 확보, 터널시설물의 안전성 유지, 터널 붕괴에 따른 2차 피해방지 등을 목적으로 한다. 또한 화재 사고 이후 간단한 복구를 통하여 통행 재개 시간을 단축시킬 수 있는 급속 보수공법에 주안점을 둔 내화성능 확보가 요구된다고 할 수 있다. 더욱이 터널과 같이 외기에 직접 접하고, CO₂ 등과 같은 외적 열화요인에 노출되어 있으며, 상시 진동이나 피로를 경험하는 구조물의 경우에는, 적용 소재가 내화성능뿐만 아니라 강도, 내구, 보수성능 등을 동시에 발휘하는 것이 무엇보다 중요하다고 할 수 있다.

한편 고장력 폴리비닐알콜(PVA) 섬유를 시멘트 체적비 대비 2%정도 투입하여 직접인장 상태에서 유사변형경화(Pseudo strain hardening) 및 다수 미세균열(Multiple crack) 특성과 함께 3~6%의 인장 변형능력을 갖는 고인성시멘트복합체(Engineered Cementitious Composite, 이하 ECC)는 균열제어 및 박리·박락 방지, 인장력 부담, 내구성, 피로성능이 매우 우수하기 때문에, 내화성능을 만족시키는 경우 전술한 터널 구조물의 내화뿔칠 재료로 적용가능성이 있을 것으로 판단된다²⁾. 그러므로 본 연구에서는 터널라이닝의 내화뿔칠 재료로써 ECC의 적용가능성을 평가하기 위하여 화재 온도조건인 RABT 화재온도이력곡선을 이용하여 내화성능을 실험적으로 평가하고자 하였다. 또한 비정상 온도분포해석 기법(Nonlinear transient heat flow analysis)을 이용하여 이를 해석적으로 묘사·검증하였으며, 실험결과를 통해 검증된 해석기법을 이용하여 터널라이닝에 대한 열전달 해석을 수행하여 ECC의 적용가능성을 고찰하였다.

2. ECC의 내화성능에 관한 실험

2.1 실험체 및 제작

ECC에 대한 내화성능을 평가하기 위하여 표 2와 같은 변수로 실험체를 계획하였다. 실험체는 800×800mm(가열면 550×550mm), 300mm 두께의 실대형 직육면체로 제작하였으며, 1/2의 세그먼트 2개를 제작하여 쉘재로 부착하였다(gap=0mm). ECC에 대한 내화성능

을 평가하기 위하여 그림 2와 같이 360×150mm, 깊이 150mm의 접합부에 ECC를 충전하여 실험체를 제작하였다. 한편 모든 실험체는 깊이 방향으로 소정간격의 열전대를 설치하였다. 콘크리트 타설 후 실험체는 양생 초기조건이 내화실험에 영향을 미치지 않도록 기건 상태에서 90일 동안 충분히 양생하였으며, 세그먼트 및 접합부 내 모르터의 함수율이 5%이하임을 확인하였다. 또한 비교검토를 위하여 동일한 용도의 2가지 모르터를 번수로 설정하였다. 대상으로 하는 재료의 구성성분 및 압축강도 특성은 표 2와 같다.

표 2. 대상 모르터의 배합 및 물성값

실험체명	사용 첨유	첨유 혼입율 Vol.%	W/C wt.	슬럼프 mm	플로우 mm	비중 kg/m ³	재료 온도 ℃	외기 온도 ℃	재령 강도(28일) MPa
ECC	PVA	2.0	0.18	65	131×130	1,663	33.1	25.8	50.7
M-10H	PP	2.7	0.15	10	109×107	2,078	35.2	30.2	61.6
S96C	PP	2.7	0.13	65	151×148	2,273	30.9	29.7	62.7

2.2 실험 방법 및 도입 화재온도곡선

일반적으로 터널에 발생하는 화재온도는 초기에 급격히 상승하여 최고 1,000~1,350℃까지 상승하며, 일정시간 지속되는 특성을 가지며, 이러한 조건은 일반적인 건축부재의 내화실험 방법(ISO 834)보다 가혹한 조건이라 할 수 있다. 현재 터널구조물에 대한 내화실험 방법은 크게 네덜란드의 RWS곡선과 독일 및 일본의 RABT 곡선이 이용되고 있다. RWS 곡선은 최고온도 1,350℃, 지속시간 120분이며, RABT 곡선은 최고온도 1,200℃, 지속시간 30~60분을 사용하고 있다. 국내의 경우 아직까지 터널화재를 상정한 시간가열온도곡선이 규정되어 있지 않으므로, 본 연구에서는 독일 및 일본에서 보편적으로 사용하고 있는 RABT 곡선을 이용하여 화재실험을 실시하였다. 즉 실험시작 후 5분내 1,200℃에 도달하여 60분간 지속된 이후 110분 동안 냉각(총 170분)시키는 방법(RABT-ZTV(Train))을 적

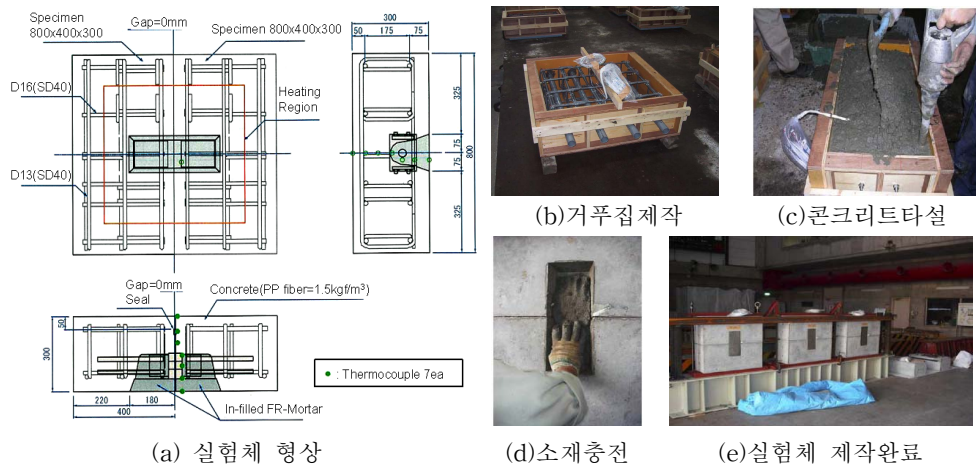


그림 1. 실험체 제작 과정

표 3. 내화실험 결과


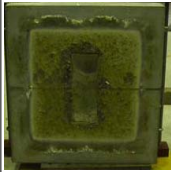

구분	ECC	M-10H	S96C
일반 거동	· 충전재내 폭렬 없음 · 미세균열	· 충전재 폭렬 발생 · 충전재와 모체 균열에 의한 분리	· 충전재내 폭렬 없음 · 충전재와 모체 균열에 의한 분리
폭렬 유무	무	면적 : 150×120mm thk. : 12mm	무
균열	0.1~0.2mm	1.5~2mm	1~2mm
최종 사진			

표 4. 내부온도분포특성

측정 위치	Disp (mm)	ECC	M-10H	S96C
표면	0	1,035	1,229	1,154
	20	-	-	-
	40	-	-	-
보강재면	60	165	261	201
	65	-	-	-
	80	-	-	-
콘크리트	100	-	-	-
	108	152	232	184
	125	-	-	-
PS강선	150	-	-	-
	155	143	212	171
콘크리트	190	115	155	127
	200	-	-	-
	220	100	122	109
	245	-	-	-
	250	-	-	-
철재 배면	300	83	78	76

용하였다. 실험체는 1면 열 재하로 이외의 모든 면은 외기에 노출하였으며, 실험체 가열면 적은 550mm×550mm로 하였다.

3. 실험결과

3.1 일반적인 거동

내화실험결과 일반적인 거동특성을 표 3에 정리하였다. 표를 통해 알 수 있듯이 ECC 실험체는 폭렬이 발생하지 않았으며, 균열 또한 미세균열인데 반하여 비교대상 실험체는 폭렬이 발생하거나(M-10H), 폭렬이 발생하지 않았다 하더라도 모체콘크리트와 분리되는(S96C)특성을 보였다. 일반적으로 화재시 시멘트 복합체의 폭렬현상은, 내부 잉여수 등의 위상변화(액체에서 기체)시 발생하는 공극압에 의해 3축 응력상태에 놓이게 되고, 이러한 응력이 균열을 발생시키며 발생된 균열이 확장되어 콘크리트의 탈락을 유발시키는 것으로

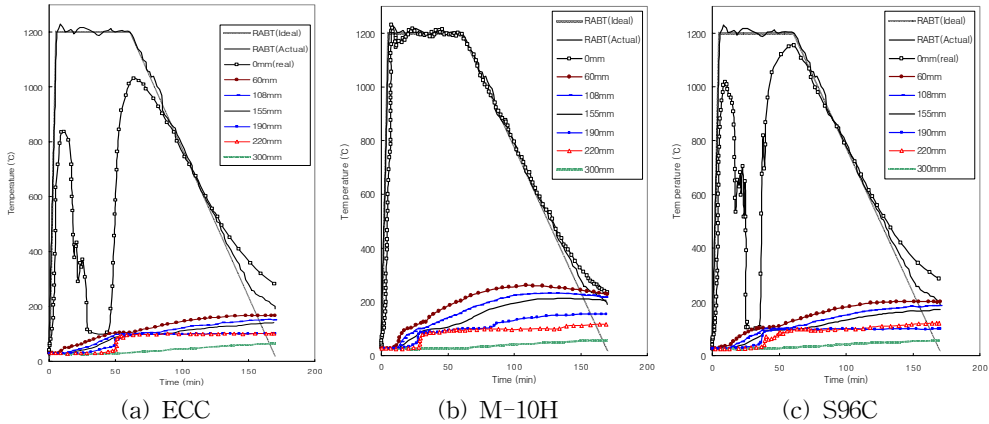


그림 2. 실험결과(내부 온도 이력 분포)

설명할 수 있다³⁾. 그러나 본 연구에서의 ECC에 혼입된 PVA 섬유는 200℃ 정도에서 용융되어 콘크리트내부에 다수의 공극을 발생시키고 이러한 공극이 통로 역할을 함으로써 공극압을 저하시키고 열응력을 완화시킨 것으로 판단되었으며, 이를 통하여 향후 터널 콘크리트 구조물의 내화성능 향상에 기여할 수 있는 내화대책의 한 방법으로 적용가치가 높을 것으로 판단되었다.

3.2 내부 수열온도 분포 특성

RABT 시간가열곡선에 의한 가열 시, 깊이별 소정간격으로 설치된 열전대를 이용하여 내부 온도를 측정하였으며, 가열시간에 대한 온도이력 곡선 및 내부열전대 위치에서의 최대 온도를 표 4에 나타냈다. 전반적인 온도 분포 특성은 가열 면에서 가까운 표면일수록 RABT 곡선의 온도이력과 유사한 온도 상승 및 하강 형태를 보였으나, 표면에서의 복사 및 대류에 의한 열전달 계수(convection coefficient)의 영향으로 외기 온도조건인 최대 1,200℃보다 낮은 1,100℃정도를 나타냈다. 한편 표면에서 100mm이상 떨어진 경우에는 60분 이후 가열온도의 하강에도 불구하고 점진적인 온도상승을 보였으며, 200mm이상의 경우에는 온도상승폭이 큰 차이를 보이지 않았다. 실험 중 ECC 및 S96C로 충전시킨 실험체는 실험개시 5분경부터 수증기로 보이는 기체가 분출하면서 표면(0mm)에 설치된 열전대의 온도가 급격한 변동성을 보이며 하강하는 특성을 보였으며, 이는 충전재에 첨가된 다량의 섬유가 용융되면서 통로가 형성되고 이를 통하여 수증기화 된 잉여수가 외기로 분출되었기 때문으로 판단되었다. 충전재의 사용 재료별 온도특성은 표로 ECC가 가장 낮은 특성을 보였으며, 철근 위치인 표면으로 부터 60mm에서의 온도는 각각 165℃, 261℃, 201℃로 한계온도 350℃이하임을 알 수 있었다. 이를 통하여 ECC가 가장 우수한 성능을 가지고 있는 것을 알 수 있었다.

4. 비정상 온도분포해석 및 검증

4.1 해석개요

터널구조물 내 적용가능성이 있는 ECC의 해석 기반 기술 구축을 목적으로 비정상 온도분포해석(Nonlinear transient heat flow analysis)을 통한 열전달 해석을 수행하고 이를 실험결과를 이용하여 검증하였다. 해석 대상은 ECC로 충전한 실험체로 설정하였으며, 콘크리트 및 ECC에 대한 온도·시간의존 열적특성을 온도함수로 치환하여 이를 고려하였다. 해석 시 사용된 프로그램은 범용 FEA 프로그램인 DIANA를 이용하였으며, 열전달해석 시 도입되는 열 $q(t)$ 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$q(t) = c(T, r) \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

여기서, $c(T,r)$ 는 열용량으로 다음과 같은 수치근사해석으로 나타낼 수 있다.

$$r_m = \frac{Q_m}{Q_n}, Q_m \approx \sum_{i=1}^m c(T_i^*, r_i^*) \Delta T_i, \quad m = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

여기서,

$$\Delta T_i = T_i - T_{i-1}, r_i^* = \frac{r_{i-1} + r_i}{2}, T_i^* = \frac{T_{i-1} + T_i}{2} \quad (3)$$

콘크리트 및 ECC에 대한 열적특성은 참고문헌을 자료를 이용하였으며^{4,5)}, 재료의 열전도율 및 열용량에 대한 온도·시간의존해석을 위하여 제시된 열전도율을 기준으로 기준⁶⁾에서 제시하고 있는 열적특성에 대한 온도함수로 이를 치환하였다.

4.2 유한요소 모델링

그림 3은 전술한 실험체에 대한 유한요소(FE) 모델링 개요를 나타낸 것이다. 해석 대상은 실험체의 축 대칭성을 고려하여 반경 800×800×300mm 크기의 1/4인 400×400×300mm로 하였으며 각각의 경계조건을 부여하였다. 요소분할(Mesh)은 50×50mm를 기준으로 화체에 직접 노출되는 부분을 세분하였다. 요소는 콘크리트, ECC에 대하여 3D Solid 요소(CHX60)를 적용하였으며, 경계면은 가상의 요소(BQ4HT)로 모델링하였다. 해석에 이용된 온도이력은 내화실험조건과 동일하게 하였으며, 초기 온도조건은 실험조건인 25℃로 설정하였다. 콘크리트 및 ECC의 열전도 및 복사에 관한 경계조건은 대류경계(열전달 경계) q_0 과 복사열경계 q_r 를 동시에 고려한 등가대류계수(equivalent convection coefficient)를 적용하였으며 다음과 같다.

$$q_e = (h_c + \alpha_r)(T_f - T_s) \quad (4)$$

$$\alpha_r = \varepsilon\sigma(T_f^2 + T_s^2)(T_f + T_s) \quad (5)$$

여기서, h_c 는 대류계수 = 200 W/m²℃, σ 는 슈테판 볼츠만 상수 = 5.6697×10⁸ W/m²K, ε 는 콘크리트 표면 복사율 = 0.8이다.

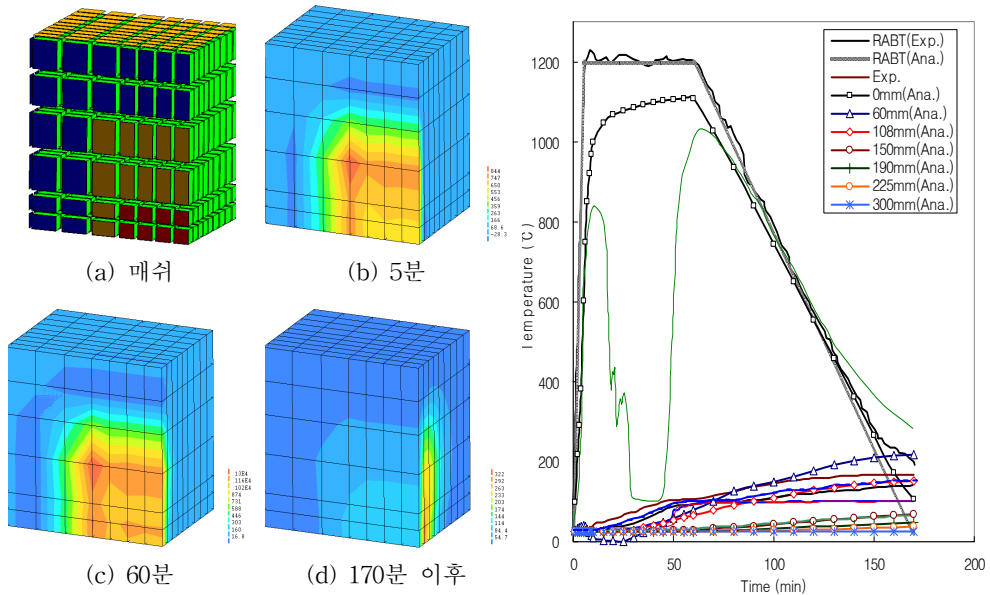


그림 3. 해석 모델링 및 해석 결과

4.3 해석결과와 검증

비정상 온도분포해석과 실험결과를 비교하여 나타낸 그림 3으로부터, ECC로 충전한 실험체의 경우 표면에서의 급격한 온도변화를 예측하지는 못하고 있으나 내부의 온도분포는 비교적 정확한 예측을 하고 있음을 알 수 있다. 이를 통하여 향후 터널 내화대책으로써 ECC가 적용되는 경우 해석기술로 적용할 수 있을 것으로 판단되었다.

5. 터널 내화 공법으로써 ECC의 적용 가능성 평가

5.1 내화공법의로의 적용가능성

일반적으로 도시지역의 쉘터터널에서 사용되는 세그먼트(Segment)는 입지 조건 상 화재 사고가 터널 내 및 지표부에 있어 붕괴 등과 같은 중대한 사태로 발전할 가능성이 있기 때문에 보다 안전한 내화 구조가 요구된다. 반면 NATM 터널과 같이 세그먼트가 단순히 복공 개념으로 적용된 경우에는 쉘터터널에서 적용되고 있는 내화 구조와 동등의 성능까지는 확보하지 않아도 되지만, 폭발에 의한 구조체의 손상이 없어야 하며, 화재이후 급속보수를 통한 개통시간을 단축하는 것이 매우 중요하다고 할 수 있다.

내화공법으로서 ECC를 적용할 수 있는 방안은 부재에 내화층을 형성하여 표층부의 온도상승 및 온도구배를 저감시키는 방안을 고려할 수 있다. ECC의 도포 개념을 그림 4에 나타냈다. 시공방법은 내화모르터를 시공현장에서 물과 혼합하여 뿜칠 또는 미장하고 마감하는 것으로 이루어 질 수 있다. 또한 시공 전에는 구조체 표면을 고압수 등으로 세정하고 사전에 박리·탈락을 방지하는 금속망 또는 지지대를 설치하여 화재 시 또는 화재 후 내화모르터의 박리·탈락을 방지해야 한다.

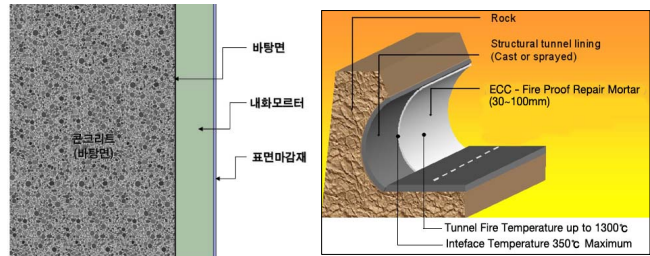


그림 4. ECC 도포 개념도 및 터널 내화대책

5.2 ECC의 시공성능 평가

ECC는 현장에서 별도의 계량공정 없이 간편하게 제조할 수 있으며, 프리팩트 폴리머 시멘트 복합체와 단섬유제품 및 물을 팬 타입 믹서에 일괄 투입한 후 3분 이상 비빔하여 제조한다. 한편 ECC의 시공은 미장시공 및 뿜칠시공 모두 가능하며, 뿜칠시공(그림 5)의 경우 현재 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 스퀴즈 타입 압송펌프를 사용해도 뿜칠이 가능하다. 이는 종래의 섬유를 다량 혼입한 모르터 제품의 경우 특수한 뿜칠장비가 필요한 것에 반하여 기술개발을 통하여 뿜칠 성능을 개

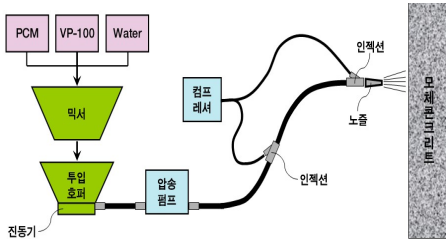


그림 5. ECC의 뿜칠시공에 의한 급속 보수시공 시스템

선함으로써 기존 장비의 사용이 가능하게 된 결과이다. ECC의 압송거리는 수평 최대 약 60 m, 수직 최대 약 25 m까지 가능하였으며, 이때 1회 뿔칠두께가 벽면에서는 최대 200 mm, 천정면에서는 최대 100 mm까지 가능하여 국내 대부분의 터널에 사용이 가능할 것으로 판단된다.

6. 결 론

터널의 내화대책에 있어 신소재인 ECC의 적용가능성을 평가하기 위한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 충전재에 대한 내화성능 평가결과 폭발발생 여부, 세그먼트와의 균열 및 탈락여부, 내부 온도제어성능 등에서 ECC가 가장 우수한 것으로 평가되었으며, RABT 화재곡선에 의한 최대온도는 철근 매입위치(60mm)에서 165℃로 나타났다.

2) ECC는 기존의 대표적인 보수재료인 PCM의 제 요구사항을 만족하고 있을 뿐만 아니라 내화성능까지 우수하기 때문에 터널등과 같은 구조물의 내화성능 확보 및 보수/보강에 적용가능성이 클 것으로 판단된다.

3) ECC 재료의 역학적 성능인 휨 및 인장하중 하에서의 변형성능 및 균열제어성능 등이 탁월하여 하자 발생을 및 유지관리비용의 저감이 가능하고, 구조물의 고내구화가 가능할 것으로 판단되며 향후 활용 확대가 기대된다.

참고문헌

1. 도로교량 및 터널 현황 조사, 건설교통부, 2006.
2. 특허 “고인성·고내화성 혼합 모르타르 조성물과 이를 이용한 보수공법 및 이의 시공장치”, PNR SYSTEM
3. 原田和典, “耐火試験におけるコンクリートの温度上昇の豫測に関する研究”, 京都大學博士論文, 1992
4. 한병찬, 권영진, 김재환, “화재온도를 받는 고인성·고내화성 시멘트 복합체의 거동”, 한국콘크리트학회논문집, 제 19권 제 2호, 2007, pp189-197
5. 한병찬, 권영진, 김재환, 신영수, 최은규, “온도의존성 열특성계수를 고려한 화재에 노출된 철근콘크리트 골조의 해석적 연구”, 한국콘크리트학회논문집, 제 19권 제 3호, 2007, pp283-292
6. Eurocode2, “Design of Concrete Structures Part 1, 2 General Rules-Structural Fire Design”, DO ENV 1992, 1996
7. Eurocode4, “Design of composite steel and concrete structures Part 1,2 ”, Structural Fire Design, CEN/TC250/SC4, N39, prENV 1994-1-2, 2nd Draft, 1992