

# 고인성내화모르터(FR-ECC)를 사용한 장대터널 내화안전대책에 관한 연구

김세종<sup>1\*</sup>, 김동준<sup>2</sup>, 권영진<sup>3</sup>

## A study on the fire resistance method using FR-ECC in long tunnel

Soo-hyun So, Kyung-hwan Park

**Abstract** The spalling phenomenon occurs in high-strength concrete when several factors such as sharp temperature increase, high water content, low water/cement ratio and local stress concentration in material combine in the concrete material. On the basis of the factors, the preventing methods from the spalling are known as reduction of temperature increase, preventing of concrete fragmentation and fast drying of internal moisture. In this study, the reduction of temperature increase was proposed as the most effective spalling-preventing method among the spalling-preventing methods. Engineered cementitious composite for fireproof and repair materials was developed in order to protect the new and existing RC structures from exterior deterioration factors such as fire, chloride ion, etc. This study was carried out to estimate the fire-resisting performance of high strength concrete slab or tunnel lining by repaired engineered cementitious composite (ECC) or fiber reinforcement cementitious composite (FRCC) under fire temperature curve. and then we will describe the result of HIDA tunnel in Japan.

**Keywords:** Road tunnel, tunnel fire, fire resistance, fire safety design, FR-ECC

**요 지** 최근 이동거리와 물류수송의 급격한 증가로 인해 거리의 단축과 지형의 한계를 극복하기위해 장대터널의 수요가 급격히 증대되고 있으며 이에 따라 터널내화재사고에 대한 우려가 함께 증가하고 있다. 특히 터널 화재 온도는 일반 화재 온도와 달리 초기에 급격히 증가하는 현상을 보이고 있다. 하지만 국내에서는 이에 대한 대책마련이 미흡하고 실제시공한 사례가 없으므로 일본의 히다터널에 사용된 고인성 내화모르터의 사용과 국내에서 개발한 신기술의 현장적용을 통해 시공한 사례와 함께 그에 따른 앞으로의 터널구조물의 내화 및 내구성에 대한 방안을 제시해 보았다.

**주요어:** 도로 터널, 터널화재, 내화대책, 화재안전설계, 고인성내화모르터

## 1. 서 론

최근 세계적으로 터널대형 화재사고가 빈번히 발생하고 있다. 2002년의 대구지하철참사에서도 알 수 있듯이 터널 등과 같은 지하구조물에 발생하는 화재는 인명피해와 구조체의 손상 등 대형 참사로 이어질 가능성이 커 사회·경제적으로 미치는 영향이 매우 크다고 할 수 있다. 실제 화재 사고사례로 부터 터널의 최대온도는 1,000~1,200℃로서 이러한 온도는 터널 구조에 심각한 피해를 발생시킬 수 있으며, 특히 콘크리트 라이닝이 구조체로서 거동하는 쉴드, 침매, 개착터널 등에 화재가

발생하는 경우는 터널의 붕괴로까지 이어질 가능성이 높다고 할 수 있다. 한편 국내 대부분을 차지하고 있는 NATM 터널 라이닝은 비구조 부재 혹은 설계 암반 변형의 일부분만을 부담하도록 설계되기 때문에 저장도 콘크리트와 최소 철근으로 보강되며, 그 구조적인 중요성이 크게 인식 되지 않았다. 그러나 사용 중 터널은 예기치 않은 암반 변형의 증가 또는 지하수 유입 등과 같은 손상 요인에 의해 균열이 발생하며, 특히 이러한 터널 라이닝이 대형화재 등과 같은 고온에 노출될 경우에는 폭렬이 발생하고 이로 인해 암반 보강 구조체에의 급격한 온도 전달 및 내하력 저하로 구조체 붕괴의 원인이 될 수 있다는 것이 여러 사례를 통해 보고되고 있다. 또한 화재발생시 인명 대피시간의 확보 필요성으로 5 km이상의 터널에 있어서는 비구조 부재인 라이닝에도 내화성능을 확보하도록 권장하고 있는 실정이다. 그러

<sup>1</sup>정희원, 호서대학교 소방방재학과 석사과정

<sup>2</sup>정희원, 호서대학교 소방방재학과 박사과정

<sup>3</sup>정희원, 호서대학교 소방방재학과 부교수, 공학박사

\*교신저자: 김세종 (E-mail: kingse@nate.com)

므로 유럽 등과 같은 선진국에서는 내화 콘크리트, 내화 도로 적용, 내화 뿔칠 2차 라이닝, 내화용 프리캐스트 판넬 설치 등과 같은 공법을 적용하여 터널의 내화성능 향상을 도모하고 있다. 한편 터널은 차량이나 열차 통과 시 발생하는 진동 및 내부공기압(약 25~600 Pa)이 매우 크기 때문에, 일반 구조물용 내화 뿔칠 재료를 적용하는 경우에는 작은 강도특성으로 인하여, 내화성능은 확보할 수 있다하더라도 내구성 측면에서 박리·박락될 가능성이 크다. 그러므로 터널에 적용되는 재료는 내화성능뿐만 아니라 부착강도 등과 같은 역학적 성능 및 열화 되더라도 박리·박락하지 않는 등, 제 성능을 만족해야 할 필요가 있다. 고강도 폴리비닐알콜(PVA) 섬유 등과 같은 합성섬유를 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(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, Engineered Cementitious Composite, HPRCC, ECC)는 균열제어 및 박리·박락 방지, 인장력 부담, 내구성, 내피로 성능이 매우 우수하기 때문에, 내화성능을 향상시키는 경우 전술한 터널라이닝의 내화뿔칠 재료로서 매우 적합할 것으로 판단된다.

## 2. FR-ECC 모르터의 특징 및 성능

### 2.1 FR-ECC의 시공성능

FR-ECC(Fiber Reinforced Engineered Cementitious Composite)는 현장에서 별도의 계량 공정 없이 간편하게 제조할 수 있으며, 프리캐스트 폴리머 시멘트 복합체와

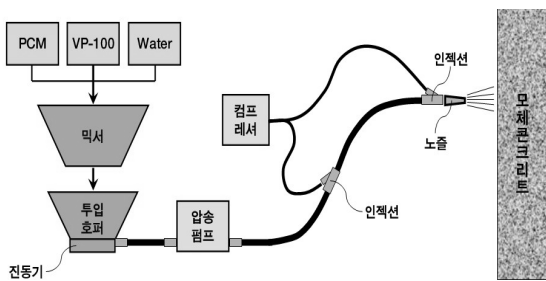


그림 1. 고인성모르터의 뿔칠시공시스템

단섬유제품 및 물을 팬타입믹서에 일괄 투입한 후 3분 이상 비빔하여 제조하고, 비빔직후 테이בל플로우(15회 타격)가 130~150 mm의 범위로 되도록 조정한다.

한편, FR-ECC의 시공은 미장시공 및 뿔칠시공 모두 가능하며, 뿔칠시공(그림 1)의 경우 현재 현장에서 가장 많이 사용되고 있는 스퀴즈 타입 압송펌프를 사용해도 뿔칠이 가능하다. 이는 종래의 섬유를 다량 혼입한 모르터 제품의 경우 특수한 뿔칠장비가 필요한 것에 반하여 기술개발을 통하여 뿔칠 성능을 개선함으로써 기존 장비의 사용이 가능하게 된 결과이다.

FR-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.

### 2.2 FR-ECC의 역학적성능

#### 2.2.1 압축강도 특성

FR-ECC의 압축강도 특성을 그림 2에 나타냈다. FR-ECC의 28일 평균 압축강도는 30 MPa~36 MPa의 값을 갖지만 특수한 경우 최대 80 MPa 까지도 설계가 가능하다. 또한 최대 압축강도시 변형률은 0.35~0.42%로써 모르터(0.24%)에 비하여 큰 압축변형률을 보이고 있음을 알 수 있다.

#### 2.2.2 휨강도 및 직접인장강도 특성

FR-ECC의 휨강도-중앙부 처짐 곡선 및 직접 인장강도-변형률 곡선을 그림 3 및 그림 4에 각각 나타냈다. FR-ECC의 휨강도는 11 MPa~12 MPa로 모르터(1.5 MPa)의 7~8배, 최대 휨강도에서의 중앙부 처짐 또한

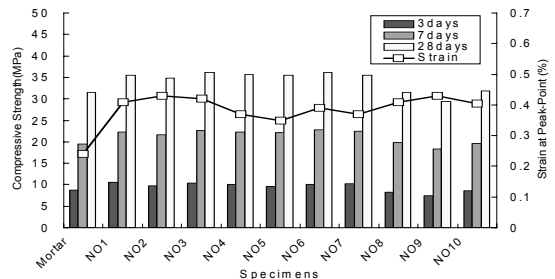


그림 2. FR-ECC의 압축강도 특성

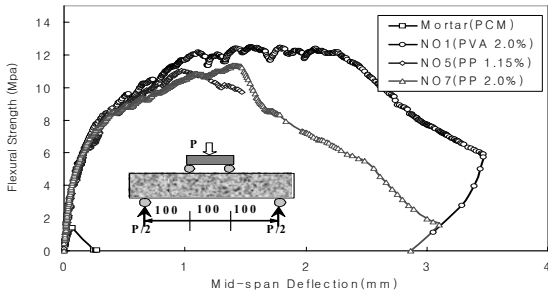


그림 3. FR-ECC의 휨강도 특성

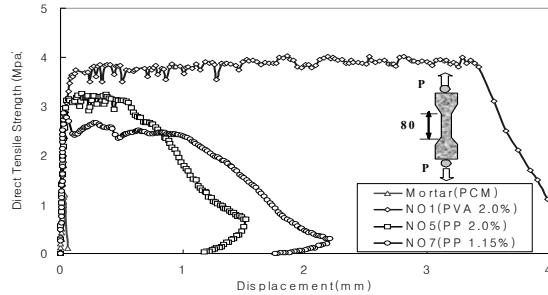
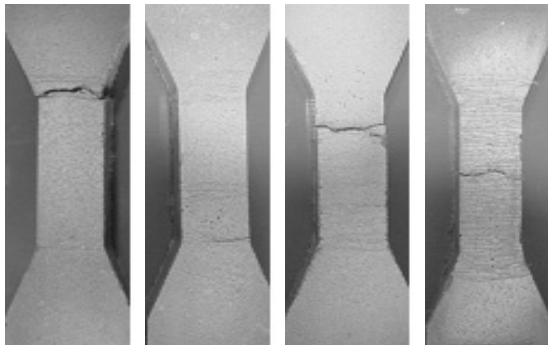


그림 4. FR-ECC의 직접인장강도 특성



(a) Mortar (b) FR-ECC

그림 5. 직접 인장하중 하에서 FR-ECC의 다수균열특성

1 mm(PP 함유 1.15%)~2.8 mm(PVA 함유 2.0%)로 16~47배 크다.

FR-ECC의 직접 인장강도는 3 MPa~4 MPa로 모르타(1.2 MPa)의 2.5~3배 높다고 할 수 있다. 특히 직접 인장강도-변형률 관계로 부터 일반적인 모르타가 최대 인장강도 이후 급격히 파괴되는 것에 비하여, FR-ECC는 유사 변형경화거동 및 균열 분산 특성을 보이며, 최대 인장변형률은 0.6%~3.3%로 모르타(0.015%)에 비

표 1. FR-ECC의 물성평가 결과 일례

평가항목	FR-ECC		KS F 4042
	측정	자체기준	
압축강도 (MPa)	35.2	30 이상	20 이상
휨강도 (MPa)	12	10 이상	6 이상
부착강도 (MPa)	2.3	1.5 이상	1.0 이상
직접인장강도 (MPa)	3.5	3 이상	-
직접인장변형률 (%)	2.0	0.5 이상	-
재료거동	연성거동	연성거동	-
멀티플크랙의 유/무	유	유	-
변형경화거동의 유/무	유	유	-
모체의 균열전달	매크로→ 마이크로	매크로→ 마이크로	-
경화 수축률 (%)	-0.030	±0.05이내	±0.15이내

하여 50~275배 큰 변형능력을 갖는다.

그림 5은 직접인장 공시체의 균열 패턴으로, 모르타가 큰 단일 균열에 의해 파괴되는 반면 FR-ECC는 미세한 다수의 균열(Multiple micro cracks)이 발생하는 것을 볼 수 있다.

표 1은 FR-ECC의 전반적인 물성평가 일례로서, 현재 가장 대표적으로 터널 보수에 사용 중인 폴리머시멘트 모르타와 비교하여 나타낸 것이다. 표로부터 FR-ECC는 휨 및 인장하중 하에서의 거동특성이 크게 다르다는 것을 알 수 있는데, 기존 폴리머시멘트모르타는 휨 또는 인장하중 작용 하에서 초기균열의 발생과 동시에 응력이 급격히 저하되어 파괴에 도달하는 취성적인 거동을 보이는 반면, FR-ECC는 초기균열이 발생한 후에도 균열면의 고장력 섬유가 가교작용을 하여 균열 폭의 진전을 억제하여 변형의 증가와 함께 응력이 지속적으로 증가하는 금속과 같은 변형경화거동을 보이기 때문이다. 더욱이, 이러한 과정에서 균열 폭이 제어된 미세균열이 주변의 매트릭스로 점점 진전되어 다수의 미세균열이 멀티플크랙을 발현하며, 탁월한 변형능능을 발현하게 된다.

### 3. 일본히다터널의 내화대책 배경

히다 터널 본궤도는 TBM으로 굴착하며 지질조건이 까다로워 굴진속도가 향상되지 않는 상태였다. 아울러

지보의 랭크 업에 동반하여 공비도 증가하고 있었다. 한편 딱딱한 지반에 의한 것이라고 판단되는 기계 고장 등이 자주 발생하여, 굴착 능력의 저하에 의해 공정 면에서도 영향을 미치기 시작하고 있었다. 이 구간의 공용 예정 시기는 2007년으로, 관통 시기가 늦으면 공용 공정에도 영향을 미치므로 2006년 말 관통은 반드시 이루어져야 하는 상황이었다. 그러나 피난경도로 부터 수집된 지질 등을 고려하면 관통 시기도 다소 늦어지게 될 것으로 판단되었으며, 관통 후 TBM 해체(5개월), 하단 복공(2개월), 상단 복공(3개월)의 공정을 고려하면 당초 예정하고 있던 2007년 7월이 2007년 11월이 되어야 포장 및 시설 인도가 될 것으로 보여 사용 시점에 문제가 발생할 것으로 판단되었다. 이러한 문제점에 대하여, 공정 확보를 목적으로, 현재 TBM로 시공되고 있는 세그먼트를 그대로 이용하면서 2차복공을 생략함으로써 공정을 단축하는 방안이 고려되었다. 히다 터널의 2차 복공 생략형 RC라이닝은, 유기 섬유 혼입 콘크리트를 이용한 폭발 억제형 세그먼트 방식으로 내화에 대한 대책을 수립하였다. 폭발 메카니즘은 아직까지 명확하게 밝혀지지 않고 있으며, 콘크리트의 배합이나 사용 재료, 함수율 등에 의해 폭발의 정도가 다르다고 알려져 있으나, 폭발 억제 효과를 기대할 수 있는 유기 섬유의 필요 혼입량은, 기존문헌이나 연구 개발의 과정에서 가열 실험 등의 결과로 부터 추측하여 결정하였다. 또한 유기 섬유는 일반적으로 많이 이용되고 있는 폴리프로필렌 섬유(이하 PP섬유)를 채택하였다.

### 3.1 터널복공 단면의 구조 안정성 검토

히다 터널용 RC라이닝의 화재시 구조 안정성에 대해서는, RC라이닝의 화재시 종곡 내력(M-N Curve)이 상시 허용 응력도에 상당하는 저항 모멘트-축력 관계를 상회하고 있어 터널내의 위치(아치부, 측벽부)나 발생 단면력의 형태(정 휨 · 부 휨)에 무관하게 화재시의 구조 안정성은 확보하고 있음을 알 수 있었다. 화재에 의해 열화된 RC라이닝을 상정한 콘크리트의 중성화 진행과 보수에 대해서는, 기존 문헌을 참고하면, 철근의 피복 콘크리트는 내화 모르터 또는 이와 상응한 재료를 이용하여 보수하는 방법 등을 생각할 수 있다. 또한 본 터널은 2차 복공을 생략했기 때문에 내공단면에 여유가 있어, 라이닝 외측에 추가 복공(2차 라이닝)을 실시하는

보수 방법도 적용할 수가 있을 것으로 판단되었다.

콘크리트의 피복두께는 RC라이닝을 영구 구조물화하기 위해 내구성을 고려해 설정할 필요가 있으며, 「콘크리트 표준시방서 구조 성능 대조 조사 편」에 따라 결정하였다. 구조 해석 결과 RC 세그먼트에는 축력이 크게 작용하는 것으로 나타나기 때문에, Co는 기둥의 값을 적용하였으며, 환경조건은 지반내 구조물로서 부식 환경은 아니지만, 안전을 고려하여 어려운 부식성 환경으로 설정하였고, 프레캐스트 부재이기 때문에 20%를 저감하여 56 mm로 하였다.  $\alpha$ 는 설계 기준 강도가 42 N/mm<sup>2</sup>이기 때문에 0.8이 되어,  $c_{min} = 44.8$  mm가 된다. 따라서 주철근 지름을 16 mm, 전단보강근 지름을 13 mm로 하면, 콘크리트 표면으로부터 주철근 중심 위치까지의 거리는 70 mm가 된다. 이것은 「터널 표준시방서 실드(shield) 공법 편」에 나타나는 경우(일반적으로 2차 복공을 가지는 경우)의 2배 정도가 된다. 그러므로 세그먼트의 두께는, 철근의 피복은 설계 조건으로부터 300 mm(기존 가설 라이닝 : 250 mm)로 설정하였다.

일본 히다터널은 산악 지역에 위치한 장대터널이며, 실드 및 NATM가 복합된 터널이다. 처음은 2차복공으로 설계되었지만 공사비 절감을 목적으로 2차복공을 생략해 프리캐스트 RC 라이닝으로 재설계를 할 때 내화 검토를 수행하게 되었다.

프리캐스트 내화 세그먼트에 대해서는 내화규준을 완화하여 폴리프로필렌섬유를 0.3%혼입한 콘크리트를 사용하는 것으로 결정하였으나 세그먼트를 강재로 긴장 연결하는 접합부는 시공 상 「세그먼트 시공 → 강재 긴장접합 → 접합부 충전」의 공정이 필요하며, 이때 접합부 충전용 내화재료가 필요하게 되었다. 문제가 된 것은 접합부에 충전할 모르타가 기존의 모르타를 사용하는 경우 폭발 및 온도에 의한 긴장력을 상실할 우려가 있어 세그먼트와 동일한 강도(42 MPa 이상)와 내화 성능을 동시에 만족하는 소재가 필요하였으며, FR-ECC가 그 대안이 되었다.

## 4. FR-ECC의 선정 과정 및 적용

### 4.1 내화공법의 구성 및 특징

FR-ECC 내화공법의 특징은 화재 발생 시에는 FR-ECC 층이 화열을 차단하여 모체(라이닝)콘크리트의 폭발 및

내력저하를 방지하고, 화재 진압 이후 간단한 보수/보강에 의해 빠른 재사용이 가능하며, 중국적으로 비용의 최소화를 달성할 수 있다는 점을 들 수 있다. 또한, 평상시에는 FR-ECC 층이 터널을 보수 및 보강하는 효과를 발휘하며, 소요 요구 성능을 만족시키기 위해 필요한 피복 두께를 최소화 함으로써 내공단면의 감소를 방지할 수 있고, 표층에 변형성능이 우수한 FR-ECC 층이 형성됨으로서 라이닝콘크리트의 박리/박락을 방지할 수 있다는 점도 본 공법의 특징 중 하나이다. 마지막으로 본 재료가 ECC 계열이기 때문에 모체콘크리트에 매크로크랙이 발생하여도 이를 마이크로크랙으로 분산시켜 누수 및 외부열화인자의 침입을 방지할 수 있으며 1회 뽐칠시공이 가능하고 보수공정이 간편하여 공기단축이 가능하다.

#### 4.2 내화재료의 필요 부위

그림 2는 세그먼트의 설치상황에 대한 개요를 나타낸 것이다. RC라이닝은 설계기준 압축강도가 45MPa급의 콘크리트에 폴리프로필렌섬유를 혼입하여 내화성을 향상시킨 프리캐스트 세그먼트를 현장에서 조립하는 건식공법으로, 조립은 세그먼트를 설치하고 내부에 설치된 강재를 결합한 후 결합부위를 모르터로 충전함으로써 이루어지며 프리캐스트 세그먼트 사이의 틈(Gap)은 에폭시계 실을 주입하게 된다. 그러므로 화재발생시 취약부위는 세그먼트 자체(A), 접합 충전 부(B), 세그먼트 사이의 실(C)이 될 것으로 판단된다.

전술한 바와 같이 세그먼트 자체는 PP 섬유 혼입을 통하여 폭력을 억제함으로써 필요 보유내력을 확보하였지만, 프리캐스트 부재의 특성상 부재와 부재를 결합하는 접합부는 시공 후 모르터를 채움으로써 마감하게 되는데 이러한 부분이 열적 취약부위가 될 것으로 판단되

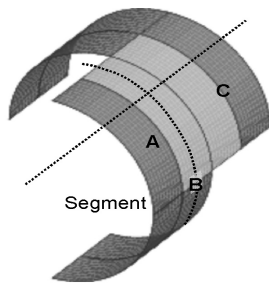


그림 6. 화재발생시 세그먼트의 취약부위

었다. 또한 일반적인 내화뽐칠 재료는 강도특성(압축강도 및 부착강도)이 매우 낮기 때문에 안전성, 내구성에서 문제가 될 것으로 판단되어 내화성을 갖으면서도 충분한 강도특성(압축강도, 휨 및 인장강도)을 발휘하는 새로운 내화 신소재가 필요하다고 사료되었다.

#### 4.3 내화재료의 선정과정 및 적용

히다터널의 발주처인 일본 도로공단에서는 접합부에 충전할 소재의 선정 및 내화검증 자료를 요구하였으며, 표 2와 같이 일본 A, 일본 B, 그리고 본 연구실의 ECC 총 3사가 목표 성능을 만족하는 충전용 내화모르터를 제시하였다. 재료선정을 위한 비교 검증시험은 그림 7과 실 시험체를 제작하였고 RABT 곡선(1시간)으로 진행되었으며 그림 8는 시험체의 크기와 열전대 위치를 나타낸 곡선으로 각각의 깊이에 따른 분포를 알 수 있다. 시험 결과 3 종류 모두 대상 재료는 폭열이 발생하지 않았지만 시험결과인 표 3과 표 4에 나타난 것처럼 철근 위치에서의 온도가 본FR-ECC의 경우가 165℃로 타재료(261, 201℃)에 비해 현저하게 낮아지는 결과가 되어, 선정되었다. 이러한 선정 과정에 의해 FR-ECC는 일본에서 처음으로 장대터널의 내화 성능 향상을 위하여 시공되었다.

표 2. 충전용 모르터의 특성 비교

재료명	사용 섬유	혼입률 %	비중 kg/m <sup>3</sup>	압축강도, MPa		
				7일	28일	39일
FR-ECC	PVA+PP	2.0	1,663	19.2	50.7	53.5
M-10H	PP	2.7	2,078	27.3	61.6	72.1
S96C	PP	2.7	2,273	34.6	62.7	77.5

표 3. 3개사의 내화시험시 온도 측정 결과

Critical point	Disp (mm)	ECC	JAPAN 1	JAPAN 2
Cover	0	1,035	1,229	1,154
Reinforcement	60	165	261	201
Concrete	108	152	232	184
	155	143	212	171
	190	115	155	127
Concrete	220	100	122	109
	300	83	78	76
판정결과		선정	△	△

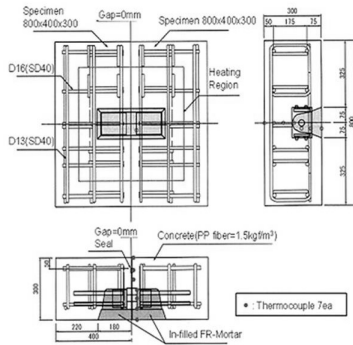


그림 7. 시험체 제작방법

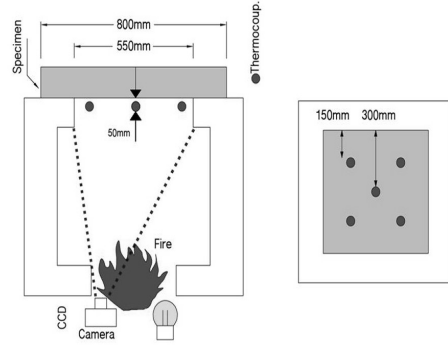


그림 8. 시험방법 및 열전대위치

표 4. 프리캐스트 세그먼트의 내화성능 실험결과

Specimen No.	PP 1.2%	ECC	JAPAN A	JAPAN B
수열온도 DATA				
수열온도 분석	60 mm 깊이측정 319°C	60 mm 깊이측정 165°C	60 mm 깊이측정 261°C	60 mm 깊이측정 201°C
화재 손상				
SPALLING	None	None	Area 105 × 120mm Thk. : 2 mm	None
CRACK	None	0.1~0.2 mm	1.5~2 mm	1~2 mm

## 5. 결 론

FR-ECC는 기존의 대표적인 터널 보수재료인 폴리머 시멘트모르타의 요구사항을 만족하고 있을 뿐만 아니라 내화성능까지 우수하기 때문에 터널의 보수/보강 및 내화공법에 매우 적합한 재료라 할 수 있다. 또한 재료의 역학적 성능인 휨 및 인장하중 하에서의 변형성능 및 균열제어성능 등이 탁월하여 하자 발생을 및 유지관리 비용의 저감이 가능하고, 구조물의 고내구화가 가능할

것으로 사료되며 향후 터널 내화 성능 향상을 위한 내화 재료의 성능평가기준에 대한 정립이 필요할 것으로 사료 된다.

## 감사의 글

본 연구는 2008년 한국과학재단 특정기초연구과제 R0120080002052702008 지원에 의하여 수행하였으며 관계자에게 감사를 드립니다.

---

## 참고문헌

1. Kwon, Y.J (2008), "Structural Behaviors of Reinforced Concrete Frames Exposed to Fire" Tokyo University of Science 3rd International Symposium.
2. 李在永 (2008), "高強度コンクリートにおけるECC被服層の爆裂現像に関する研究"日本火災學會.
3. 金世宗 (2008), "高引性耐火モルタルの耐火特性に関する研究" 日本建築學會.
4. 이재영 (2008), "철근콘크리트 구조물의 폭발현상을 고려한 구조내화 성능설계를 위한 연구", 호서대학교석사학위 논문.

---

접수일(2010.8.20), 수정일(2010.9.6), 게재확정일(2011.1.10)