

## A Study on Fire Safety of Reinforced Concrete Beams Strengthened by FRCM

Ki Nam Hong<sup>1#</sup>, Yeong Mo Yeon<sup>1+</sup>, Su Gyu Lee<sup>2</sup>

<sup>1</sup> School of Civil Engineering, Chungbuk National University, 1 Chungdae-ro, Seowon-gu, Cheongju, Chungbuk, 362-763, Korea

<sup>2</sup> Land and Housing Institute, Korea Land and Housing Corporation, Daejoen, 34047, Korea

### Abstract

A concrete lining of a tunnel is spalled due to increasing internal air pressure when exposed to a prolonged fire caused by a car accident. The spalled-off concrete pieces expose steels to high temperature, which leads to their stress loss and eventually the collapse of a tunnel could be collapsed due to the deterioration of concrete and steel. Therefore, a fireproofing material should be applied to protect concrete lining and steel from high temperature. This paper selected a cementitious matrix with EVA polymer and a basalt fiber as the fireproofing materials and evaluated their fire-resistant performance by the RABT-ZTV fire loading tests using a liquefied petroleum gas(LPG). Their levels of depths are used as a test variable(20mm, 30mm or 40mm), and the interior temperatures of concrete, steel, and the cementitious matrix are obtained from embedded K-type thermocouples. Failure mechanism and thermal results of the interior concrete and cementitious matrix are discussed in detail.

**Key words:** fireproofing material, tunnel concrete lining, concretes spalling, RABT-ZTV, cementitious matrix, basalt fiber

### 1. 서론

철근콘크리트 구조물은 시간경과에 따라 노후화 등의 여러 가지 문제로 보수·보강이 필요하다. 철근콘크리트 보강공법은 외부부착공법(EBR), 표면매립공법(NSM)공법, 콘크리트 단면증대 등이 대표적으로 사용되고 있다(Kim, 2015). 특히 EBR 및 NSM 보강공법의 경우 강관, 섬유 등의 보강재를 에폭시를 이용하여 콘크리트 표면에 부착시켜 시공과정이 간편할 뿐 아니라 우수한 보강효과를 보이고 있다(Kim, 2005). 하지만

EBR 및 NSM 보강공법은 에폭시와 콘크리트간의 상이한 열팽창 계수와 탄성계수에 의해 보강 후 시간경과에 따라 콘크리트와 보강재 계면에서 에폭시의 접착력이 저하되어 보강재가 탈락된다. 뿐만 아니라 터널과 같이 습윤한 지역에서 적용이 어렵다(Triantafillou & Papanicolau, 2006; Ko, *et. al.*, 2014). 또한 유기계 물질인 에폭시는 낮은 유리전이 온도로 인하여 내화성능이 현저하게 저하되는 단점을 가지고 있다(Ko, *et. al.*, 2014; Lee, *et. al.*, 2018). EBR 및 NSM 보강공법의 낮은 내화성능은 화재시 구조물 손상 및 파괴로 인

# The 1st author: Ki Nam Hong, Tel. +82-43-261-2378, Fax. +82-43-261-2377, e-mail. hong@chungbuk.ac.kr

+ Corresponding author: Yeong Mo Yeon, Tel. +82-43-261-2378, Fax. +82-43-261-2377, e-mail. yym235@chungbuk.ac.kr

해 수많은 인명피해를 발생시키며 손상된 구조물을 보수·보강하기 위한 막대한 사회적 비용을 야기한다.

몽블랑 터널 화재(1999년), 미국 캘리포니아주 15번 프리웨이 교량 화재(2014년) 등 전 세계에 많은 화재가 발생하였다. 최근 들어, 대구지하철 화재(2003년), 서울외곽순환도로 부천고가교 화재(2010년), 서울 남산1호 터널 화재(2011년) 등 국내 또한 사회 기반 시설물의 화재사고가 점차적 증가하는 추세이며, 이로 인한 수많은 인명피해와 구조물의 손상이 발생되고 있다. 특히, 터널 또는 지하구조물과 같이 폐쇄된 공간에서의 화재는 일반 시설물의 화재보다 발생빈도는 적으나, 화재 발생시 5분 이내 1,000°C까지 내부 온도가 치솟아, 대형 인명피해뿐만 아니라 터널 구조물에 치명적인 손상을 입히게 된다(Kim, *et. al.*, 2009). 콘크리트 구조물은 기본적으로 콘크리트 재료 자체의 낮은 열전도율 특성으로 내화성능을 확보하고 있다. 하지만 밀폐된 공간에서 1,000°C이상의 고온에 노출된 콘크리트는 콘크리트 내부온도 상승으로 인하여 약 100°C에서 콘크리트 내부의 잉여수가 기화되며, 180°C 이상의 온도에서 시멘트와 화학적으로 결합하고 있던 수분이 증발하기 시작하며, 약 250~350°C의 내부온도에서 칼슘실리케이트수화생성물 체적 중 약 20%의 수분이 기화하게 된다(Kang, 2002). 화재로 인한 고온은 콘크리트 내부의 탈수현상 및 수화생성물을 분해시켜 콘크리트 내구성을 저하시킨다(Kang, *et. al.*, 2014). 이에 따라 밀폐된 공간에서 발생하는 화재에 대해 콘크리트 내부 온도 및 폭렬 등의 파괴양상에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다(Kim, *et. al.*, 2009; Kim, *et. al.*, 2007; Park, *et. al.*, 2004; Ahn, 2007). 고온의 화재에 노출된 콘크리트는 내부 온도가 증가하면서 폭렬과 같은 파괴양상을 보인다. 폭렬발생 및 화재손상범위에 따라 주철근이 노출되어 구조물 파괴로 이어질 수 있다. 이에 따라 내화성능이 확보된 구조물 보강공법인 FRCM(Fiber Reinforced Cementitious Matrix)공법에 대한 연구가 국내·외적으로 활발히 진행되고 있다(Lee, *et. al.*, 2018;

Babaeidarabad, *et. al.*, 2014; Ombers, S., 2011). 하지만 대부분의 연구가 FRCM 보강공법의 내력증진 효과를 규명에 관한 연구이며, FRCM 보강공법의 내화 성능 평가에 대한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 논문은 BFRP(Basalt Fiber Reinforced Polymer)를 이용하여 FRCM공법을 적용한 철근콘크리트 보의 내화 성능을 평가하였다.

## II. 고내화성 보강재료

콘크리트 슬래브 보를 제작하기 위하여 콘크리트, 강재, 폴리프로필렌(Polypropylene, PP) 섬유 혼입 시멘트계 매트릭스, Basalt 섬유가 사용되었다. 콘크리트와 강재는 일반적인 철근콘크리트 구조물에 사용되는 설계압축강도 30.0MPa의 레드믹스 콘크리트와 D16, D19 이형철근을 사용하였다.

본 실험에서 사용된 시멘트계 매트릭스는 플라이애쉬, 수축저감제, 폴리머 혼화제를 사용하여 부착성능 및 압축강도 성능을 향상시킨 모르타르이다(Moon, *et. al.*, 2018). 또한 부착성능확보 및 망상균열을 제어하기 위하여 인장력을 받는 길이방향으로 Basalt 섬유와 그와 직교하는 방향으로 유리섬유를 교차하여 격자형태로 Basalt 섬유 보강재를 직조하였다.

### 1. 폴리머 혼입 시멘트 매트릭스 및 Basalt Fabric

사용된 PP섬유 혼입 시멘트계 매트릭스의 물-시멘트비는 13%이며, 굳지 않은 매트릭스의 슬럼프는 160±10mm이었다. 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스는 10%의 플라이애쉬, 1% 수축저감제 및 4%의 EVA 폴리머를 사용한 시멘트계 매트릭스로 44MPa의 압축강도 성능을 보인다. 또한, 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스는 1.3MPa의 부착성능을 보이고 있다(Moon, *et. al.*, 2018). 사용된 매트릭스의 배합설계를 <Table 1>에 나타내었다.

Table 1. Mixture design of used cementitious matrix

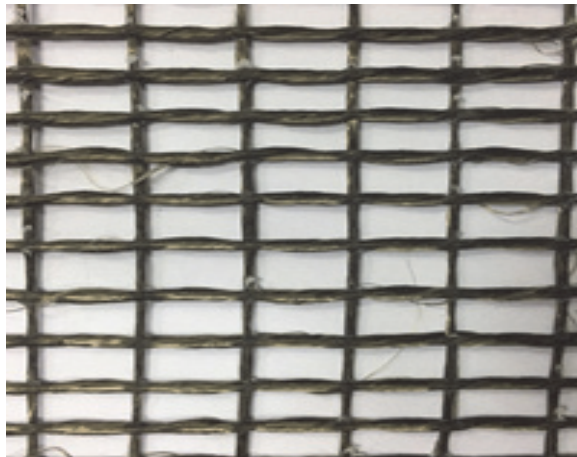
W/C (%)	Binder (%)		Slump (mm)	Shrinkage Reducing Agent (%)	EVA polymer powder (%)
	C	FA			
13.0	90	10	160	1.0	4.0

Table 2. Material properties of FRP fabric

Fabric	Nomina thickness (mm <sup>2</sup> /mm)	Ultimate tensile strain	Ultimate tensile stress (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
BFRP fabric	0.522	0.023	274.85	11.84



Figure 1. Coated concrete slab beam with polymer cementitious matrix as fire protection



※ Source: Lee, *et. al.*, (2018).

Figure 2. BFRP fiber

본 실험에서 보강재로 사용한 Basalt 섬유(Figure 2)는 구조물 보강재로 가장 많이 사용되는 탄소 섬유보다 역학적 특성은 다소 약하지만, 고내화성으로 터널 내 폭발과 같은 극한 상황에서 사용이 적합하다. Basalt 섬유는 600°C의 고온에서 Carbon 섬유나 Glass 섬유와 달리 90% 이상 잔류 성능을 유지할 수 있다(Sim, *et. al.*, 2005). <Table 2>에 basalt fabric의 역학적 특성을 나타내었다.

## 2. 레디믹스 콘크리트와 주철근

실험체 제작에 사용된 레디믹스 콘크리트와 주철근에 대한 재료시험은 KS 규정과 ASTM 규정에 맞추어 실시하였다. 콘크리트는 30.0MPa의 설계압축강도를 갖는 레디믹스 콘크리트를 사용 하였으며, 사용된 콘크리트의 배합설계를 <Table 3>에 나타내었다. 굵은 골재의 최대치수는 25mm이고, 잔골재율은 46.5%, 물-시멘트비는 43.5%이다. 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프는 150mm이었다. 또한, 혼화제로 건조수축을 감소시키기 위하여 고성능AE 감수제를 혼입하였다. 압축강도 측정을 위해, 힘 부재 타설 시 3개의 Ø100×200mm 실린더를 제작하였으며, 재령 28일째 KS F 2405에 따라 측정된 콘크리트의 압축강도는 33.4MPa이었다.

Ø13mm의 주철근은 인장부 표면으로부터 50mm 하

Table 3. Mixture design of used concrete

W/C (%)	S/a (%)	Gmax <sup>a)</sup> (mm)	Slump (mm)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )				
				W	C	S	G	Ad <sup>b)</sup>
43.5	46.5	25	150	116	311	327	936	3.03

a) Maximum gravel size

b) Water-reducing admixture

Table 4. Mechanical properties of used steel rebar

$E$ (GPa)	Diameter (mm)	$\sigma_{yield}$ (MPa)	$\sigma_{ult.}$ (MPa)	$\epsilon_{ult.}$ (mm/mm)
200.0	9.53	480	570	17.1
200.0	12.5	487	600	18.2

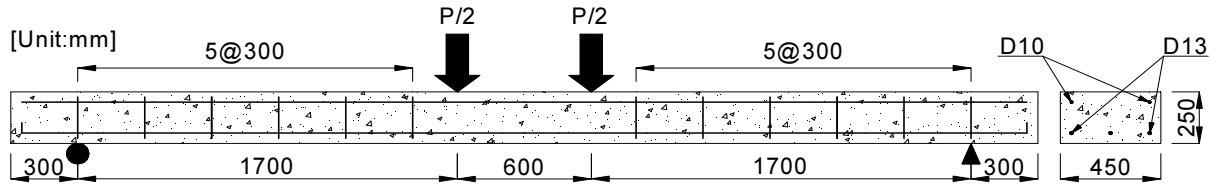


Figure 3. Configuration of test setup

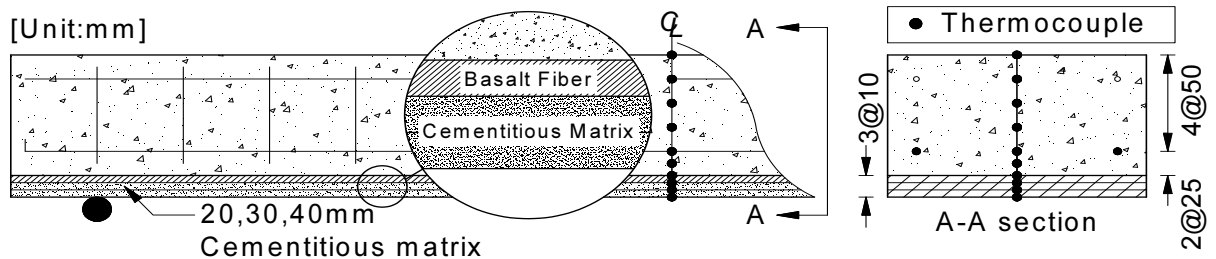


Figure 4. K-type thermal-couples inside concrete slab beam

단에 배근되었으며, Ø10mm의 압축철근은 압축부 표면으로부터 50mm 상단에 배근하였다. 보강철근의 물리적 특성을 파악하기 위하여 각 직경마다 3개의 시편에 대한 인장실험을 실시하였다. 그 결과를 <Table 4>에 나타내었다.

### III. FRCM 공법의 내화성능 평가

#### 1. 실험계획 및 실험개요

내화 성능 평가용 실험체의 제원 및 형상을 <Figure 3>에 나타내었다. 시멘트 매트릭스 두께에 따른 깊이별 수열온도를 총 3개의 실험체를 제작하여 평가하였다. 실험체의 단면치수는 450mm X 250mm이며, 상단 및 하부 콘크리트 피복두께는 50mm이다. 슬래브 보의 길이는 터널 내화로 기준에 맞춰 제작하였다. 슬래브 보의 총 길이는 4,600mm이며, 가열되는 하단 보의 순지간은 4,000mm이다. 열팽창에 의한 휨 인장에 저항하

기 위하여 3-D13의 주 인장철근 및 2-D10 압축철근을 배근하였다. 양생 완료 후 섬유 혼입 시멘트 매트릭스를 이용하여 Basalt fabric 1겹을 실험체 하단에 부착하였다. 본 실험의 목적인 RABT 가열곡선에 대한 시멘트 매트릭스 두께에 따른 콘크리트 수열온도를 측정하기 위하여 콘크리트 슬래브 내부와 내화용 시멘트계 매트릭스에 <Figure 4>에 보이는 것과 같이 깊이 방향으로 K-타입 열전대를 설치하였다. 시멘트계 매트릭스 타설 후 28일 동안 매트릭스 내 함수율을 낮추기 위해 기건 양생을 실시하였다.

철근콘크리트 슬래브 내부에 매립된 열전대 및 철근 변형률 게이지를 <Figure 5>에 나타내었다.

내화용 시멘트계 매트릭스의 두께에 따른 콘크리트 내 온도전이를 파악하기 위하여 시멘트 매트릭스의 두께를 변수로 설정하였다. 변수는 <Table 5>에 나타낸 것과 같이 20mm, 30mm, 40mm로 설정하였으며, 실험체 제작과정을 <Figure 6>에 나타내었다.



(a) Vertical thermocouples



(b) Enlarge of (a)

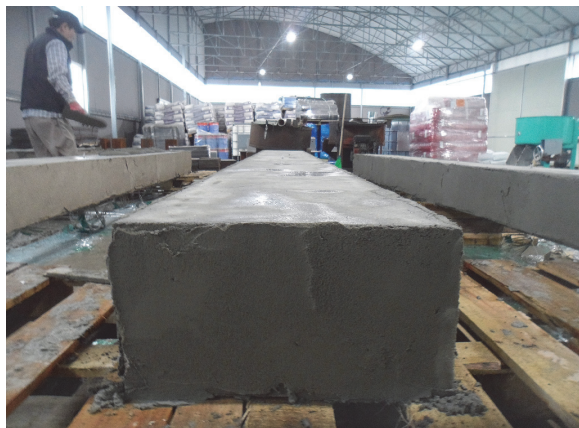
Figure 5. Thermocouples embedded inside concrete slab beam



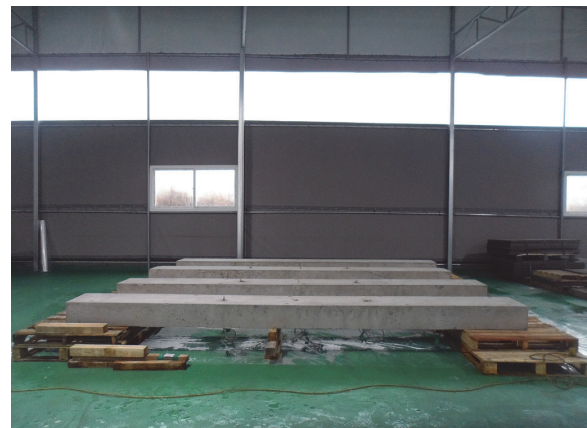
(a) Form work



(b) Placing of concrete



(c) Coated matrix on concrete



(d) Curing specimens

Figure 6. Specimen preparations

Table 5. Test variables

Specimen ID	Cementitious matrix thickness (mm)
S-20	20
S-30	30
S-40	40

2. 내화 실험 방법

본 내화 실험은 한국 건설기술연구원(Korea Institute of Construction and Building Technology, KICT)의 내화로에서 수행되었다. 슬래브 보 실험체 가열을 위해 RABT-ZTV(Train) 재하 화재온도곡선을 적용하였다. 일반적으로 화재 모사를 위해 ISO 834, Hydrocarbon Curve(HC), Hydrocarbon Modified Curve(HMC) RABT, RWS와 같은 화재온도곡선을 사용하고 있다. ISO 834는 건축 재료인 보드, 매트, 슬래브 및 스프레이 재료의 내화성능 검토를 위해 사용되는 화재곡선으로 최대온도는 1,100°C이다. ISO 834 화재곡선이 전 세계적으로 화재 모사를 위해 사용되지만, 가스폭발과 같은 순간적으로 온도가 치솟는 화재 모사에는 한계를 보이고 있다. 이에, HC 화재곡선은 ISO 834 화재곡선과 최대 온도는 같지만 최대온도 도달시간을 단축시킴으로써 화재의 온도가 순식간에 증가하는 가스폭발과 같은 시뮬레이션을 모사할 수 있게 되었다. HMC 화재곡선은 HC 화재온도곡선을 기본으로 개량된 온도곡선이다. 프랑스 기준에 의해 HC 화재 기본곡선에서 최대온도를 1,100°C에서 1,300°C로 증가시켜 사용하고 있다. RABT-ZTV 화재온도곡선은 독일에서 개발되었다.

RABT-ZTV곡선은 초기 급격한 온도 증가를 특징으

로 보이고 있으며, 주로 터널 내 자동차 폭발 및 열차 폭발과 같은 극한상황을 모사하는 데 적용되고 있다. 자동차와 열차의 폭발에 따라 최대온도 유지시간은 30분과 60분으로 차이를 보이고 있다. RABT-ZTV곡선의 최대온도는 1,200°C이다. 온도 유지 후 약 2시간의 냉각 시간을 갖는다. RABT-ZTV기준은 주철근의 최대 온도는 300°C미만으로 규정하고 있지만 콘크리트 표면과 내화용 보호재 계면온도에 관한 규정은 제시하고 있지 않다. 반면 네덜란드 교통국에서 300MW에 달하는 화재가 120분간 지속된 화재모사 실험을 기반으로 개발된 RWS 화재온도곡선은 주철근 온도 250°C와 콘크리트-내화재 계면온도 380°C로 규정하고 있다. <Figure 7>는 위에 설명된 화재온도곡선을 나타내고 있다.

본 논문에서는 터널 내 자동차 화재를 가장 잘 모사할 수 있는 RABT-ZTV 화재온도곡선을 적용하였다. <Figure 7>에 나타낸 것과 같이 RABT 화재곡선은 총 180분으로 구성되어 있으며 내화로는 가열 시작 후 5분 이내 최고온도인 1,200°C에 도달하며 60분간 온도를 유지한다. 이후 내화로 내부 온도는 110분 동안 대기온도까지 냉각된다.

본 실험에서 S-20, S-30 및 S-40 총 3개의 실험체 중 S-20과 S-40을 동시에 내화로에서 가열하였으며,

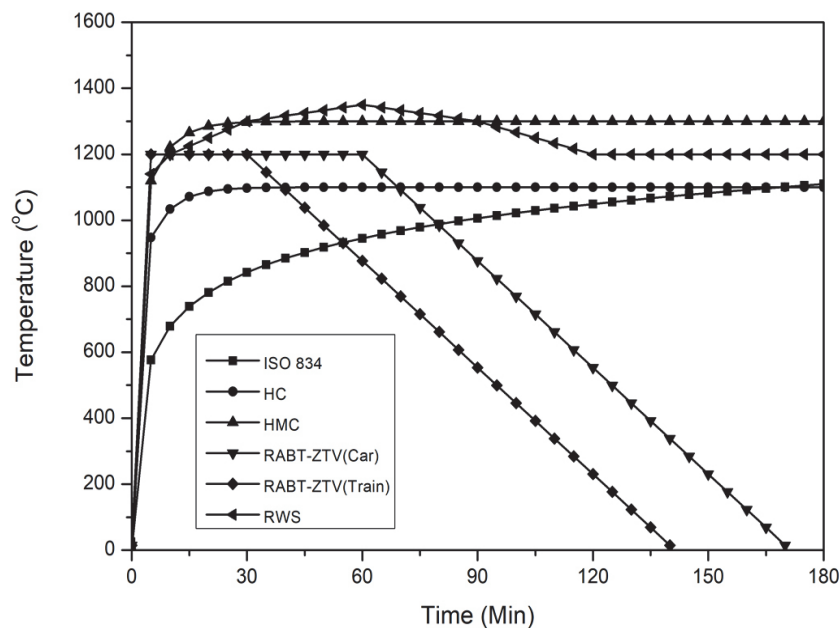


Figure 7. Different type of fire scenarios



(a) LPG furnace



(b) Specimen

Figure 8. Specimen setup on the LPG furnace

나머지 S-30 실험체를 단독으로 가열하였다. 아래 <Figure 8>과 같이 FRCM공법으로 보강된 슬래브의 하단을 가열 하였으며, 슬래브 옆면은 K사에서 개발된 내화 단열재를 사용하여 측면의 전도열을 차단하였다.

### 3. 내화 슬래브 보 실험결과

슬래브 보 내화 실험결과 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스는 1200℃의 고온에서 충분한 부착력을 확보하지 못하며 초기에 박락 되었다. 매트릭스 박락으로 인하여 열전대가 외부로 노출되면서 <Figure 10>, <Figure 11>, <Figure 12>에서 나타난 것과 같이 가열 시작 후 10분부터 매트릭스 내부에 매립된 열전대로부터 측정된 온도가 RABT 곡선과 동일한 속도로 증가하는 것을 볼 수 있다. 매트릭스 박락은 PP 섬유를 혼입하면 최소

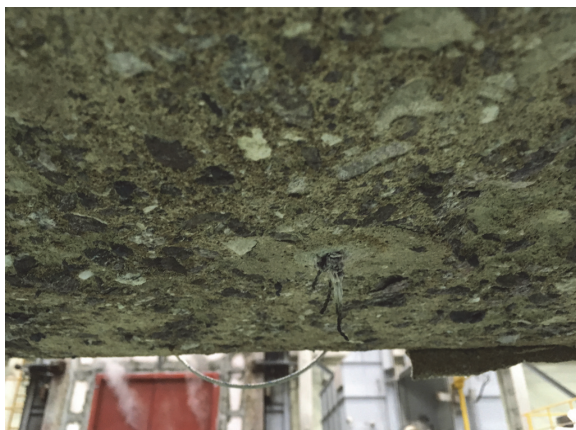


Figure 9. Interface surface of concrete slab after cementitious matrix spalling off

화 할 수 있다. 고온에서 용융된 PP 섬유는 공극을 만들고, 그 공극을 통해 공극압을 상쇄시킬 수 있다(Han, *et. al.*, 2014).

<Figure 9>은 매트릭스가 박락된 후 노출된 콘크리트 하부를 나타내고 있다. 매트릭스 박락 후 1,200℃의 고온에 노출된 콘크리트 표면은 부분적인 용해로 인한 파괴 형태를 보이고 있다.

#### 1) 폴리머 혼입 시멘트 매트릭스

RABT-ZTV 가열곡선에 따른 두께별 폴리머 혼입 시멘트 매트릭스의 수열곡선을 <Figure 10>, <Figure 11>, <Figure 12>에 나타내었다. 실험결과 처음에 언급한 것과 같이 급격한 가열로 인하여 S-20, S-30 및 S-40의 내화용 폴리머 혼입 시멘트 매트릭스는 가열 시작 후 3분에서 5분 사이에 탈락되어 고온에서 충분한 부착능을 확보하지 못함을 확인할 수 있었다. 이러한 시멘트 매트릭스의 박락은 S-20, S-30 및 S-40 시편의 매트릭스 내부온도 결과인 <Figure 10>, <Figure 11>, <Figure 12>에 나타나듯이 100℃이상의 온도에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이는 내화용 폴리머 혼입 시멘트 매트릭스 내부에 존재하는 잉여수의 기화로 발생한 공극압과 열응력에 의한 시멘트 매트릭스의 박락으로 판단된다(Consolazio, *et. al.*, 1998; Han, *et. al.*, 2007). <Figure 10>에서 볼 수 있듯이, 시멘트계 매트릭스는 가열 6분 후 박락 되었으며 이후 Basalt 섬유가 내화로

Table 6. Occurrence time of cementitious matrix spalling and exposed basalt fiber

Fracture type	S-20	S-30	S-40
Cementitious matrix spalling (min)	6	5	4
Exposed basalt fiber grid (min)	9	8	6

내부 1,200°C 온도에 노출되며 연소되어 가열 10분 이후부터 콘크리트와 시멘트계 매트릭스 계면의 온도가 급격하게 상승하게 된다. <Table 6>에 시멘트계 매트릭스 박락 및 Basalt 섬유 노출 시간을 정리하였다.

<Table 6>에 나타난 것과 같이 시멘트 매트릭스 박락은 두께가 두꺼울수록 조기에 발생하는 것으로 나타났다. 이는 두께 증가에 따른 자중 증가로 인한 것으로 판단된다. 실험결과 FRCC 보강공법을 이용하여 보강된 구조물이 충분한 내화성능을 확보하려면 온도상승에 따른 매트릭스 내부의 열응력 및 공급압을 낮출 필요가 있다고 판단된다. 또한 시멘트 매트릭스 및 Basalt 섬유를 구조물에 부착시킬 정착장치가 필요할 것으로 판단된다.

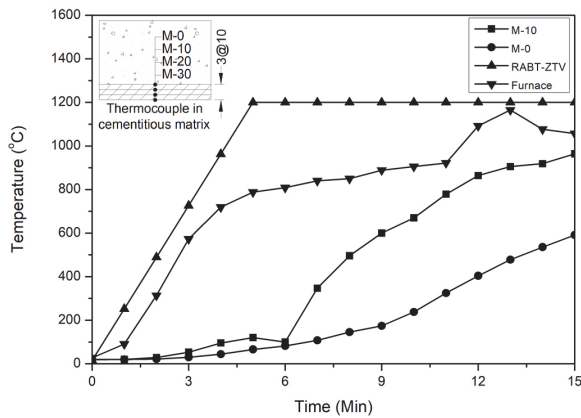


Figure 10. Temperature results of cementitious matrix (S-20)

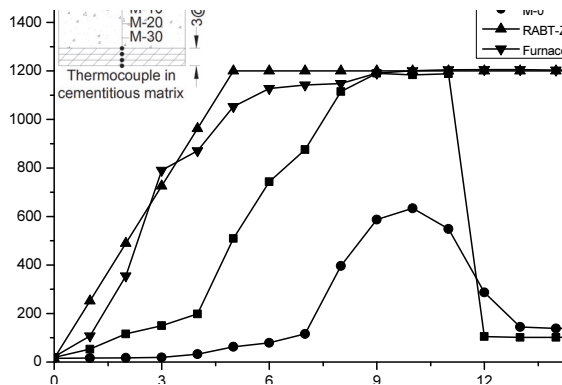


Figure 11. Temperature results of cementitious matrix (S-30)

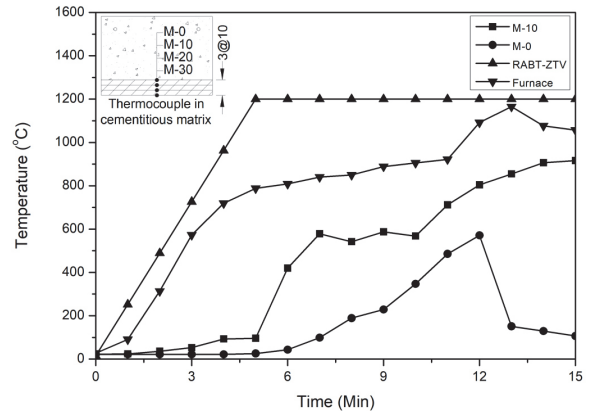


Figure 12. Temperature results of cementitious matrix (S-40)

2) 콘크리트 슬래브 보 내부 온도전이

<Figure 13>은 깊이 방향으로 콘크리트 내부에 매립된 열전대로부터 RABT-ZTV 가열곡선에 따른 가열온도를 나타내고 있다. 시멘트계 매트릭스의 탈락으로 인해 시멘트계 매트릭스 두께에 따른 콘크리트 깊이별 내부온도의 직접 비교가 불가능하여, 가열곡선에 따른 콘크리트 내부 온도는 20mm의 시멘트계 매트릭스로 보강된 실험체(S-20)의 경우로 대표한다.

콘크리트 슬래브 보 하단과 시멘트계 매트릭스 계면으로부터 25mm 떨어진 깊이에서 측정된 수열온도(C-25)와 50mm에서 측정된 수열온도(C-50)는 내화로의 내부 온도가 증가하였다가 감소함에 따라 증가와

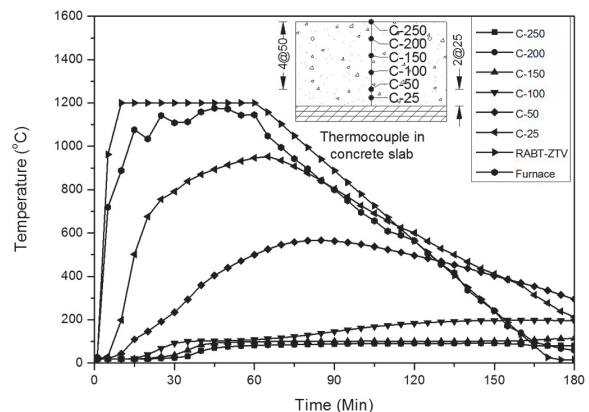


Figure 13. Temperature results of concrete slab beam (S-20)

감소 양상을 보이거나, 최외단으로부터 100mm(C-100) 이상의 두께를 갖는 열전대는 200°C이하의 내부 온도를 보이고 있다.

3) 주 인장 철근

콘크리트 내부온도와 같이, 조기 시멘트계 매트릭스 박락으로 인하여 RABT-ZTV 가열곡선에 따른 주 인장 철근 온도는 S-20 실험체의 데이터로 대표한다. 주 인장철근의 수열온도는 시멘트계 매트릭스 박락 전후로 급격한 온도 상승을 보이고 있다. 이후 콘크리트 피복(50mm)에 의해 약 10분 가량 약 100°C 가량의 수열온도를 유지하다 30분 이후 상승하는 것을 확인할 수 있다. 시멘트계 매트릭스 조기박락으로 인하여 콘크리트 내부 주인장 철근의 수열온도를 RABT-ZTV 기준과 비교할 수 없지만, 콘크리트 피복이 직접 노출된 콘크리트 내부 주인장 철근의 평균 수열온도는 363.3°C로 측정되었다. 이는 RABT-ZTV에서 규정하는 300°C보다 21.1% 높은 온도로, 폭발로 인한 내화 모르타르의 박락시 콘크리트 피복두께 50mm는 내화성능을 확보하기에 충분치 않음을 확인할 수 있다. 또한, 강재의 온도가 150°C까지는 상온에서의 항복응력을 보이지만 150°C 이상부터 급격하게 강도가 저하되기 때문에, <Figure 15>에 나타난 휨 균열 및 처짐은 주 인장철근의 열팽창 및 응력손실로 인한 자중에 의한 처짐으로 판된다(Park, et. al., 1999).

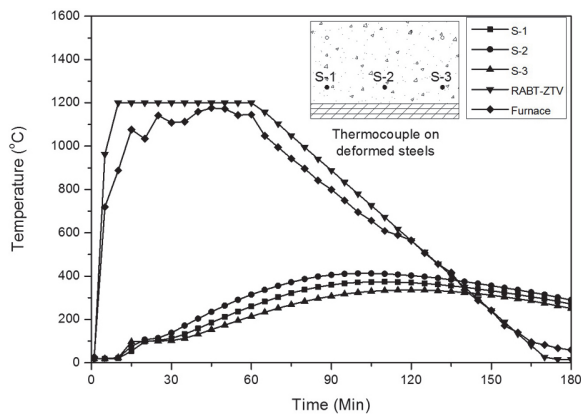


Figure 14. Temperature results of tensioning steel (S-20)

IV. 결론

본 연구는 내화 보강재로 개발된 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스와 Basalt 섬유를 이용한 FRCM공법으로 보강된 보의 내화성능을 평가하고자 하였다. 내화성능 평가를 위하여 RABT-ZTV 가열온도곡선에 따른 내화로 가열 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

본 연구는 FRCM 공법에 사용된 시멘트 매트릭스 두께에 따른 콘크리트 내부 온도의 영향을 분석하고자 계획 되었으나, 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스의 박락으로 인하여 실험 및 분석이 계획대로 진행되지 못하였다. 시멘트계 매트릭스의 박락은 보강재 타설 후 시멘트계 매트릭스 내 잉여수가 기화하면서 발생하는 공극압과 열응력에 의한 균열로 판단된다.

시멘트계 매트릭스의 박락은 Basalt 섬유의 노출을 야기하며, 1,200°C 고온에서 연소되어 구조물 보강재로서의 역할을 수행하지 못한다. 이에 따라 FRCM 공법을 통해 보강된 구조물이 충분한 내화성능을 확보하기 위하여 시멘트 매트릭스 및 Basalt 섬유 부착용 정착장치가 필요할 것으로 판단된다. 또한, 시멘트계 매트릭스가 갖는 내화성의 장점 대비 자중 증가에 따른 박락이 발생할 수 있으므로 매트릭스의 경량화에 관한 연구의 진행이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2015년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단 기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (NRF-2015R1D1A1A01057453).

References

Ahn, Tae Song. 2007. Needs of Fireproofing for Tunnel. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 19(1): 12-14  
 Al-Salloum, A. Yousef, M. Hussein, Elsanadedy, H. Saleh,

- Alsayed, and Rizwan A. Iqbal. 2012. Experimental and Numerical Study for the Shear Strengthening of Reinforced Concrete Beams Using Textile Reinforced Mortar. *Journal of Composites for Construction*. 16(1): 74-90.
- Babaedarabad, Saman, Giovanni Loreto, and Antonio Nanni. 2014. Flexural Strengthening of RC Beams with an Externally Bonded Fabric-reinforced Cementitious Matrix. *Journal of Composites for Construction*. 18(5): 1-117.
- Consolazio, Gary, R. Michael, C. McVay, and W. Jeff Rish. 1998. Measurement and Prediction of Pore Pressures in Saturated Cement Mortar Subjected to Radiant Heating. *Materials Journal*. 95(5): 525-536.
- Gonzalez-Libreros, J. H., C. Sabau, L. H. Sneed, C. Pellegrino, and G. Sas. 2017. State of Research on Shear Strengthening of RC Beams with FRCM Composites. *Journal of the Construction and Building Materials*. 149: 444-458.
- Han, Byung Chan, Kazunori Harada, Young Jin Kwon, and Yun Yong Kim. 2014. Fire Resistance Performance of Precast Segmental Concrete Lining for Shield Tunnel. *Journal of The Korean Society of Civil Engineers*. 34(1): 95-105.
- Han, Min Cheol, Young Sun Heo, and Cheon Goo Han. 2007. Investigation of Spalling Mechanism in High Strength Concrete. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 19(1): 94-100.
- Hong, Chang Woo, Won Kyong Jeong, Kyong Jin Kim, and Kyong Ku Yun. 2006. Basic Properties of Latex-Modified Concrete Using Fly-ash. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 26(1): 205-211.
- Hong, Geon Ho and Yeong Soo Shin. 2004. Applicability of Epoxy Injection Method to Cracked RC Beams Considering Pre-Loading Conditions. *Journal of Korea Concrete Institute*. 16(1): 88-93.
- Hong, Geon Ho. 2008. Construction Method Improvement of the FRP-plate Strengthening Method using the Velcro. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance Inspection*. 12(6): 225-232.
- Hwang, Eui Hwan, Taek Sung Hwang, and Yoshihiko Ohama. 1994. The Strength and Durability of Polymer - Cement Mortars. *Applied Chemistry for Engineering*. 5(5): 786-794.
- Ju, Hyun Jin, Sun Jin Han, Hae Chang Cho, Deuck Hang Lee, and Kang Su Kim. 2016. Flexural Performance of Slabs Strengthened by Fiber-Reinforced Polymer Sheet with Hydrophilic Epoxy. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 28(1): 85-94.
- Jun, Zhang, Wang Qing, and Wang Zhenbo. 2016. Optimizing Design of High Strength Cement Matrix with Supplementary Cementitious Materials. *Journal of the Construction and Building Materials*. 120: 123-136.
- Jung, Kyu San, Ki Nam Hong, Snag Hoon Han, Jae Kyu Park, and Jae Hyun Kim. 2015. Prediction of Flexural Capacity of RC Beams Strengthened in Flexure with FRP Fabric and Cementitious Matrix. *International Journal of Polymer Science*. 2015: 1-11.
- Kang, Beung Hee. 2002. Properties of High-heated Concrete. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 14(2): 17-23.
- Kang, Yong Hak, Choong Hyun Kang, Hyun Guk Choi, Hyun Jun Shin, and Wha Jung Kim. 2014. Compressive Properties of Ultra High Strength Concrete Exposed to High Temperature. *Journal of Korea Concrete Institute*. 26(3) 377-384.
- Kim, Haeng Joon. 2005. Failure Behavior of Reinforced Concrete Beams with Flexural Strengthened by Steel Plates. Ph.D. Dissertation. Chonnam University.
- Kim, Heung Youl, Hyung Jun Kim, Kyung Suk Cho, Jae Sung Lee, and Ki Hyuk Kwan. 2009. An Experimental Study on Thermal Damage and Spalling of Concrete Lining in Tunnel Fire. *Journal of Korean Institute of Fire Science*. 23(3): 110-112.
- Kim, Hyung Jun, Sang Hoon Han, and Seng Kwan Choi. 2007. Review of Spalling Effect on Concrete Element in Fire. *Journal of Korean Institute of Fire Science*. 21(3): 54-63.
- Kim, Joo Hyung, Byoung Sun Park, Sang Hwa Jung, and Young Cheol Choi. 2016. Effect of Properties of Fly-ashes on the Characteristics of Fly-ash Mortars. *Journal of the Korean Recycled Construction Resources Institute*. 4(4): 439-445.
- Kim, Sung Won. 2015. Experimental Study on Bond Flexural Behavior of RC Members Using CFRP-bar NSM System. Ph.D. Dissertation. Yeungnam University.
- Ko, Hunebum, Matthys Stijn, Palmieri Aniello, and Sato Yuichi. 2014. Development of Simplified Bond Stress-slip Model for Bonded FRP-Concrete Interfaces. *Construction and*

- Building Materials*. 68: 142-157.
- Ko, Man Chun. 2015. Mechanical Characteristics of FRCM Mortar for Strengthening RC Structures. Master's Thesis. Chungbuk National University.
- Koh, Kyung Taek, Jung Jun Park, Gum Sung Ryu, and Su Tae Kang. 2006. Shrinkage Properties of High Performance Concrete Used Expansive Additive and Shrinkage Reducing Agent. *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*. 26(4): 787-794.
- Lee, Su Gyu, Ki Nam Hong, Yeong Mo Yeon, and Kyu San Jung. 2018. Flexural Behavior of RC Slabs Strengthened in Flexure with Basalt Fabric Reinforced Cementitious Matrix. *Advances in Materials Science and Engineering*. 2018: 1-12
- Medeiros, M. H. F., P. Helene, and S. Selmo. 2009. Influence of EVA and Acrylate Polymers on Some Mechanical Properties of Cementitious Repair Mortars. *Journal of the Construction and Building Materials*. 23(7): 2527-2533.
- Moon, Kwang Kyun, Ki Nam Hong, and Su Gyu Lee. 2008. Properties of Polymer Cementitious Matrix for Strengthening Structures Damaged by Natural Disasters. *Crisisonomy*. 14(3): 91-102.
- Oh, Byung Hwan and Chae Koon Koh. 1991. A Study on the Strength and Mechanical Characteristics of Normal and High Strength Fly-Ash Concrete. *Journal of the Korea Concrete Institute*. 3(2): 87-95.
- Ombres, Luciano. 2011. Flexural Analysis of Reinforced Concrete Beams Strengthened with a Cement Based High Strength Composite Material. *Composite Structures*. 94(1): 143-155.
- Paik, Min Su, Young Do Lee, and Sang Jin Jung. 2002. The Study on the Strength Properties of High Volume Fly-Ash Concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*. 2(4): 169-176.
- Park, Hae Geun, Myeong Sub Lee, and Jae Kwon Kim. 2004. Evaluation of Fire Safety and Countermeasure of Tunnel Concrete Structure. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 16(1): 74-79.
- Park, Hyung Jung and Young Wung Kwon. 1999. Concrete Cover & Fire Resistance. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 11(4): 25-31.
- Park, Jong Pil and Yong Wook Jung. 2015. Fundamental Properties on the Development of High Performance Shrinkage Reducing Agent for Concrete. *Journal of Korea Academia-Industrial cooperation Society*. 16(6): 4298-4307.
- Sim, Jong Sung and Cheol Woo Park. 2005. Characteristics of Basalt Fiber as a Strengthening Material for Concrete Structures. *Composites Part B: Engineering*. 36(6-7): 504-512.
- Song, Hyung Soo, Chin Yong Lee, and Chang Shik Min. 2006. Effects of Polymer in Properties of Pre mixed Type Mortar for Concrete Repair. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 10(4): 153-159.
- Song, Hyung Soo, Chin Yong Lee, and Chang Shik Min. 2007. Effects of Admixtures in Properties of Polymer Cement Mortar for Concrete Repair. *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*. 11(1): 85-94.
- Triantafillou, Thanasis C. and Catherine G. Papanicolau. 2006. Shear Strengthening of Reinforced Concrete Members with Textile Reinforced Mortar(TRM). *Materials and Structures*. 39(1): 93-103.
- Korean References Translated from the English*
- 강병희. 2002. 화재와 콘크리트의 재료성능. 콘크리트학회지. 14(2): 17-23.
- 강용학, 강충현, 최현국, 신현준, 김희중. 2014. 고온에 노출된 초고강도 콘크리트의 압축특성. 콘크리트학회 논문집. 26(3): 377-384.
- 고경택, 박정준, 류금성, 강수태. 2006. 팽창재와 수축저감제를 사용한 고성능 콘크리트의 수축 특성. 대한토목학회. 26(4): 787-794.
- 고만춘. 2015. 철근콘크리트 구조물 보강을 위한 FRCM 모르타르의 역학적 특성. 충북대학교 석사학위논문.
- 김성원. 2015. CFRP-bar NSM 시스템으로 보강된 철근콘크리트 부재의 부착 및 휨 거동에 관한 연구. 영남대학교 박사학위논문.
- 김주형, 박병선, 정상화, 최영철. 2016. 플라이애시 종류에 따른 플라이애시 모르타르의 특성에 대한 연구. 한국건설생활환경학회. 4(4): 439-445.
- 김행준. 2005. 강판으로 휨 보강한 철근콘크리트 보의 파괴거동에 관한 연구. 전남대학교 박사학위논문.

- 김형준, 한상훈, 최승관. 2007. 화재시 콘크리트 요소 폭발영향성 고찰, 한국화재소방학회 논문지. 21(2): 54-63.
- 김홍열, 김형준, 조경숙, 이재승, 권기혁. 2009. 터널화재시 콘크리트 라이닝의 폭발 및 화재손상에 관한 실험적 연구. 한국화재소방학회. 23(3): 110-120.
- 문광균, 홍기남, 이수규. 2018. 자연재해로 손상된 구조물을 보강하기 위한 폴리머 시멘트 매트릭스의 특성. Crisisonomy. 14(3): 91-102.
- 박종필, 정용욱. 2015. 콘크리트용 고성능 수축저감제 개발에 대한 기초적 특성. 한국산화기술학회. 16(6): 4298-4307.
- 박해균, 이명섭, 김재권. 2004. 터널 콘크리트 구조물의 화재 안전성 평가와 대책. 콘크리트학회지. 16(1): 74-79.
- 박현준, 권영웅. 1999. 콘크리트 피복두께와 내화성. 한국콘크리트학회지. 11(4): 25-31.
- 백민수, 이영도, 정상진. 2002. 플라이애쉬를 다량 치환한 콘크리트의 강도특성에 관한 연구. 한국건축시공학회. 2(4): 169-176.
- 송형수, 이진용, 민창식. 2006. 폴리머가 프리믹스 타입의 보수용 모르타르의 성질에 미치는 영향. 한국구조물진단유지관리공학회. 10(4): 153-159.
- 송형수, 이진용, 민창식. 2007. 혼화재료가 보수용 폴리머 시멘트 모르타르의 성질에 미치는 영향. 한국구조물진단유지관리공학회. 11(1): 85-94.
- 안태송. 2007. 터널화재에 대한 내화의 필요성. 콘크리트학회지. 19(1): 12-14.
- 오병환, 고재균. 1991. 플라이애쉬 콘크리트의 강도 및 역학적 특성에 관한 연구. 콘크리트학회. 3(2): 87-95.
- 주현진, 한선진, 조해창, 이득행, 김강수. 2016. 친수성 에폭시를 사용하여 FRP 시트로 보강된 슬래브의 휨거동 평가. 콘크리트학회. 28(1): 85-94.
- 한민철, 허영선, 한천구. 2007. 고강도 콘크리트의 폭발발생 및 방지 메커니즘. 콘크리트학회지. 19(1): 94-100.
- 한병찬, 하라다카즈노리, 권영진, 김윤용. 2014. 쉘드 터널용 프리캐스트 세그먼트 콘크리트 라이닝의 내화성능. 대한토목학회. 34(1): 95-105.
- 홍건호, 신영수. 2004. 재하상태를 고려한 RC 보의 에폭시 주입 보수공법의 적용성 평가. 콘크리트학회. 16(1): 88-93.
- 홍건호. 2008. 벨크로를 이용한 FRP 플레이트 보강공법의 시공공법 개선. 한국구조물진단유지관리공학회. 12(6): 225-232.
- 홍창우, 정원경, 김경진, 윤경구. 2006. 플라이애쉬를 이용한 라텍스 개질 콘크리트의 기초물성 연구. 대한토목학회. 26(1A): 205-211.

Received: Nov. 9, 2018 / Revised: Dec. 17, 2018 / Accepted: Dec. 26, 2018

## FRCM으로 보강된 RC구조물의 화재 안전성에 관한 연구

**국문초록** 고온의 화재에 노출된 터널 내 콘크리트는 폭렬로 인해 박락되게 된다. 충돌 또는 화재와 같은 외부 위협으로부터 주철근을 보호하고 있는 콘크리트 커버의 박락은 주철근의 급격한 온도 상승을 일으키며 이는 철근의 응력 손실로 귀결된다. 결국 손상된 콘크리트와 응력이 손실된 강재는 제 역할을 다 할 수 없게 되며, 구조물의 파괴로 이어지게 된다. 따라서 화재로 인한 철근콘크리트 구조물의 피해를 최소화하기 위하여 내화재료와 같은 보호용 재료개발에 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 열 전도성이 낮고 충분한 부착강도 및 압축강도를 발현할 수 있는 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스와 열 전이성이 낮아 내화성이 우수한 Basalt 섬유를 사용한 내화용 복합체의 내화성능을 평가하고자 한다. 내화성능을 실험적으로 평가하기 위하여 5분 이내 최대온도 1,200℃까지 가열할 수 있는 RABT-ZTV 화재시나리오를 적용하였으며 보강 두께(20mm, 30mm, 40mm)에 따른 복합체의 내화성능을 평가하기 위하여 콘크리트 깊이 방향으로 K 타입 열전대를 설치하여 콘크리트, 주철근 및 내화용 시멘트 매트릭스 내부 수열온도를 측정하였다. 실험결과 개발된 폴리머 혼입 시멘트계 매트릭스는 400℃이상의 온도에서 내부 잉여수의 기화로 발생한 공극압 및 열응력에 의해 균열이 발생하였고, 균열로 인한 매트릭스의 초기 박락이 발생하였다.

주제어 : 내화성능, 내화용 시멘트계 매트릭스, Basalt 섬유, 터널 콘크리트 화재모사 실험, RABT-ZTV 화재온도곡선

**Profiles** **Ki Nam Hong** : He has been received his Ph.D. in Department of Civil Engineering from Tohoku University in Japan. He works for a Professor in the Department of Civil Engineering at the Chungbuk National University. There are main paper "Mechanical properties and carbonation resistance of water-soluble sulfur concrete(2014)", "Prediction of flexural capacity of RC beams strengthened in flexure with FRP fabric and cementitious matrix(2015)", "Evaluation of stability in reinforced earth retaining wall by vehicle collision(2010). He is particularly interested in the earthquake resistant design, seismic retrofit, structure analysis(hong@chungbuk.ac.kr).

**Yeong Mo Yeon** : He received his Bachelor's degree in Department of Civil Engineering from Chungbuk National University, Republic of Korea in 2017, Master's degree in Department of Civil Engineering from Chungbuk National University, Republic of Korea in 2018. His research areas are development of construction material and retrofitting of structures and infrastructures (yym235@chungbuk.ac.kr).

**Su Gyu Lee** : He earned his Ph.D. degree in the Department of Civil Engineering from the University of Texas at Arlington in 2017. He has worked for the Land and Housing Institute of the Korea Land and Housing Corporation. His research is about the developing waterproofing system for structures and the reinforced concrete structures strengthened with the FRP(glee@lh.or.kr).