

FRP로 보강된 철근콘크리트보의 열전도해석 및 내화성능 평가

임종욱¹, 박종태², 김정우², 서수연^{3*}

Heat Conduction Analysis and Fire Resistance Capacity Evaluation of Reinforced Concrete Beams Strengthened by FRP

Jong-Wook Lim¹, Jong-Tae Park², Jung-Woo Kim², Soo-Yeon Seo^{3*}

Abstract: The object of this paper is to find the characteristics of fire proof materials through an analytical method and to suggest a proper approach for fire-proof design of reinforced concrete beam strengthened with fiber reinforced polymer (FRP). Heating tests for fire-proof materials were conducted and the thermal conductivities and specific heats of them were simulated through finite element analyses. In addition, a finite element analysis on the beam specimen strengthened with FRP under high temperature, which was conducted by previous researchers, was performed and the analytical result was compared with test result. And then the compatibility of the analytical approach was evaluated. Finally, the heat resistance characteristic of RC beam strengthened with FRP was analyzed by the proposed analytical method and the strength decrease of the beam due to the high temperature was evaluated. From the comparison with analytical and test result, it was found that the heat transfer from outside to inside through the fire-proof materials can be suitably simulated by using the proposed analytical approach.

Keywords: Finite element analysis, Retrofit with FRP(Fire Reinforced Polymer), Reinforced concrete member, Fire resistance performance, Flexural strength

1. 서 론

1.1 연구배경

최근 철근콘크리트 구조물의 보수·보강에 있어서 가장 널리 사용되는 방법은 FRP(Fiber Reinforced Polymer)를 이용한 보강이다. 이는 보강재로 사용하는 FRP가 기존 공법에 사용되는 강판에 비하여 중량이 가볍고 강도가 높을 뿐만 아니라 그 시공이 용이하기 때문이다. FRP의 보강공법의 종류로써는 Fig.1과 같이 에폭시와 같은 부착재료를 사용하여 판 또는 시트형태의 FRP를 콘크리트 표면에 부착시킴으로서 구조체를 보강하는 표면부착공법(EBR, Externally Bonded Retrofit)과 부재 표면에 일정한 깊이로 홈을 성형하고 FRP-Bar 또는 Plate를 표면에 매입한 후 에폭시를 이용하여 마감하는 표면매입 보강공법(NSMR, Near Surface-Mounted Retrofit)이 있다. 표면부착공법은 시공성이 매우 우수하지만 보강부재인

FRP가 낮은 응력에서도 콘크리트로부터 탈락되기 쉽기 때문에 상대적으로 보강효율이 낮은 것으로 알려져 있다. 반면에 표면매입 보강공법은 표면부착공법의 문제점을 개선한 공법으로써 보강재를 콘크리트 표면에 매입함으로써 부착공법에 비하여 높은 보강효율을 보인다. 또한 보강재가 부재 내부에 위치하게 됨으로써 상대적으로 외부 환경에 민감하지 않은 장점이 있다.

하지만 이러한 보강공법에 사용되는 FRP나 접착제인 에폭시는 고온에 취약하다. 구조물 보강에 쓰이는 FRP보강재의 경우 약 200°C로 임계온도가 낮고, FRP보강재를 부착하기 위한 에폭시의 유리전이온도는 60~80°C로 매우 낮다.(Yeon,

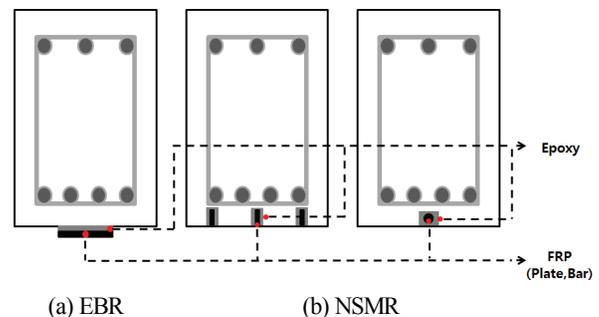


Fig. 1 Strengthening method by using FRP

¹정회원, 한국교통대학교 석사과정

²정회원, (주)대흥종합건설

³정회원, 한국교통대학교 건축학부 교수

*Corresponding author: syseo@ut.ac.kr

Department of Architectural Engineering, Korea National University of Transportation, Chung-ju, 27469, South Korea

• 본 논문에 대한 토의를 2018년 12월 1일까지 학회로 보내주시면 2019년 1월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

2014) 따라서 FRP보강재로 보강한 구조물의 경우 임계온도 이상의 온도가 가해지면 부착강도가 크게 저하되어서 콘크리트 부재에 내력을 전달할 수 없게 되고, 결국 급격한 내력저하가 발생하게 된다. 따라서 보강재로 사용된 FRP가 구조성능을 발휘하기 위해서는 에폭시가 유리전이온도에 도달하지 않도록 내화보강이 필요하다.

이와 관련하여, Song (2013)은 내화보드를 FRP보강 철근콘크리트 표면에 부착한 뒤 가열 실험을 실시하여 내화보드 30mm를 철근콘크리트 표면에 부착한 RC보는 외부온도가 480°C에 도달할 때까지 에폭시의 유리전이온도인 65°C에 도달하지 않는 것을 확인하였다. 또한 고성능 내화모르타르를 먼저 도포하고 내화보드를 부착한 경우에는 외부 온도가 600°C에 도달할 때까지 FRP부분이 에폭시 유리전이온도에 도달하지 않음을 밝혔다. 해석적 연구와 관련하여, Dai 등 (2015)은 FRP 표면부착보강후 내화단열처리된 RC 보의 화재노출후 거동을 파악하기 위하여 FRP와 콘크리트사이 계면의 상태변화를 나타낼 수 있는 재료의 구성방정식을 제안하고 삼차원 유한요소해석을 실시하였다. 특히 Seo 등 (2013)은 CFRP의 온도에 따른 인장시험, 에폭시의 상태변화 실험, 그리고 온도변화에 따른 부착성능 실험연구를 실시하고 그 결과로서, 부착강도의 측면에서 콘크리트를 보강하기 위한 효율적인 보강방법은 표면매입 보강공법이지만 주변온도가 높아질 경우에는 여전히 보강효과가 현저히 저하될 수 있음을 확인하였다. 특히, 주변 온도가 에폭시의 화학적 성질이 변화하기 시작하는 유리전이온도인 65°C에 근접할 경우, 부착성능이 저하되므로 구조물의 안전한 내화설계를 위해서는 부착용으로 사용되는 에폭시의 성능개선이 시급한 것을 확인하였다.

1.2 연구목적 및 방법

본 연구의 목적은 FRP로 보강된 철근콘크리트 부재의 내화단열 재료의 특성을 규명하고 이를 활용하여 내화단열 설계를 위한 해석방법을 제공하는 것이다. 이를 위하여, 내화 단열재에 대한 이면온도 실험을 실시하고 내화재의 열적 특성인 열전도율과 비열을 구하였다. 그리고 고온에 노출된 FRP로 보강 보 실험체에 대한 유한요소 해석을 실시하고 이를 실험결과와 비교하여, 해석의 적합성을 평가하였다. 최종적으로는 제안된 해석방법에 따라 내화보강된 FRP 보강 보의 외부 온도조건에 따른 열적특성을 해석하고 그에 따른 보강효과 및 부재의 강도변화를 평가하였다.

2. 이면온도 실험 및 유한요소 해석

2.1 내화모르타르 및 내화보드에 대한 이면온도 실험

FRP로 보강된 부위에 내화단열을 위한 재료특성을 파악하기 위하여 이면온도 실험을 실시하였다. 이면온도 실험이란 재료의 한쪽 면을 가열하여 가열하지 않은 면의 온도를 측정하는 것으로써 재료의 열적 특성을 파악하기 위한 실험이다. 본 실험에서 대상으로 한 내화단열재는 Yeon 등의 연구결과(2014)를 근거로 하여, 내화모르타르 및 내화보드를 대상으로 하였고, 대상 제품은 A사의 2,360 kg/m³의 밀도를 가진 내화모르타르, 일본표준규격 JIS A 5430에서 요구하는 성능을 만족하는 JIC HOKUSEI사의 400 kg/m³의 밀도를 가진 내화보드이다. 내화모르타르와 내화보드 시험체는 220mm×220mm의 규격으로서 두 종류의 두께 (20mm, 30mm)로 제작하였다. Fig.2는 내화 모르타르 및 보드의 형상을 나타낸다.

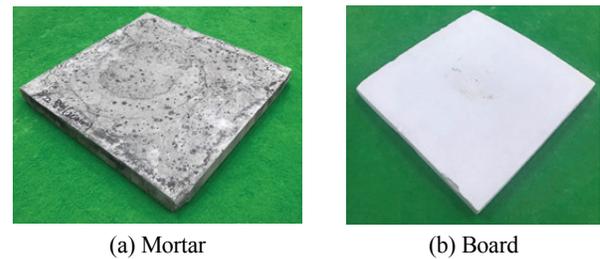


Fig. 2 Fire-proof mortar and board for test

실험도중 가열온도(T_1)과 외부온도(T_2)를 측정하기 위하여 시험체의 양면 중앙 위치(T_1, T_2)에 열전대를 설치하였다. Figs.3과 4는 가열로를 통해 내화재의 이면온도 실험을 모습을 정면과 단면으로 형상화한 것과 가열로 내부와 실험체 설치사진으로, 실험은 1면 가열을 실시하였으며, 가열온도는 Fig.5에서처럼 KS F 2257 (2014)에서 제시하고 있는 표준시간-가열곡선과 같이 진행하려 했으나, 전기가열로의 특성상 가열로의 최대 온도인 1,050°C까지 온도를 상승시킨 후 최대 온도에서 60분 동안 온도를 유지하였다.

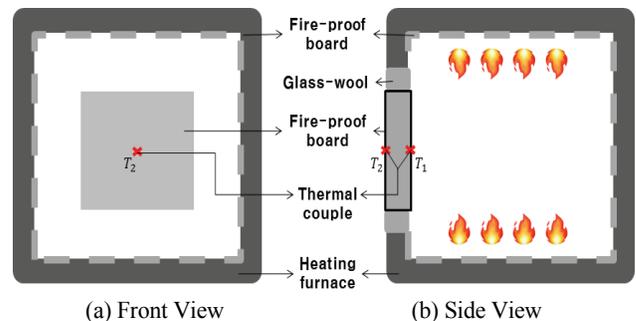


Fig. 3 Test concept for fire resistance of fire-proof materials

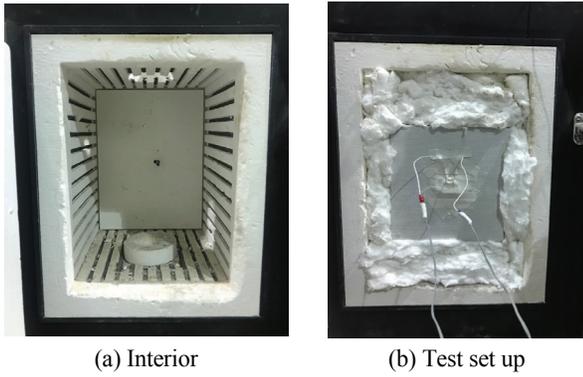


Fig. 4 Test set up for fire resistance of fire-proof materials

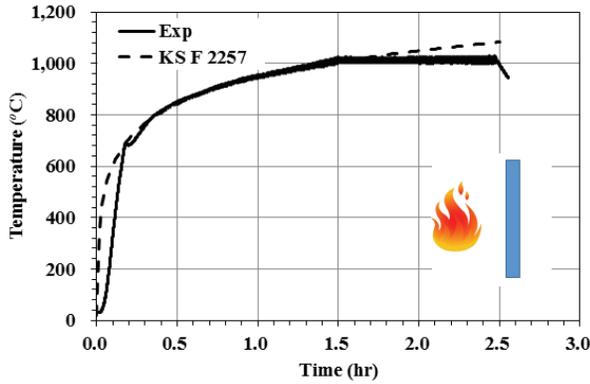


Fig.5 Time-heating temperature curve

2.2 유한요소 해석을 통한 열전도계수 선정

이면온도 실험을 통해 얻은 결과로부터 적합한 열전도계수를 찾기 위해서 유한요소 해석프로그램인 MIDAS FEA (2010) 를 사용하여 유한요소 해석을 진행하였다. 내화모르타르와 내화보드는 Fig.6과 같이 실제 이면온도 실험에 사용되었던 재료의 크기와 동일하게 모델링하였다. 내화모르타르의 비열값은 시멘트 모르타르의 제조 회사인 I사의 CM01 제품을 참고하여 $837 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ 을 고정 값으로 입력하였다. 열전도율은 반복해석을 통해 이면온도 실험결과를 도출하는 값으로 하였으며 내화보드의 열적 특성 또한 내화모르타르와 동일한 방법을 통해 열전도율을 구하였다. B사의 Calcium silicate 제품을 참고하여 비열 $1,000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ 를 고정 값으로 하고 반복해석을 통해 열전도율을 구하였다.

Figs.7과 8은 내화모르타르 및 내화보드의 실험결과와 해석결과를 비교한 그래프를 각각 나타낸다. 이면온도 실험으로부터 얻은 내부 온도가 유한요소모델링으로 근사하게 유추될 수 있음을 알 수 있다.

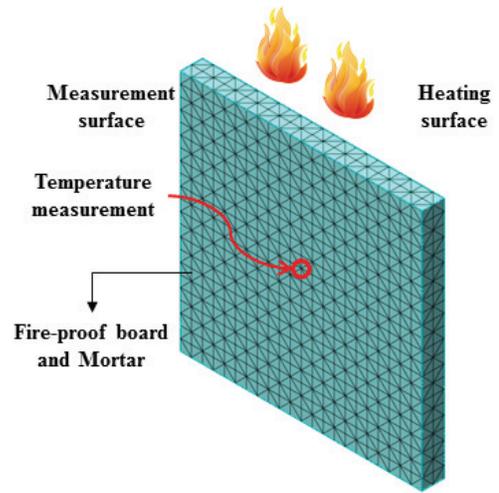


Fig. 6 Modeling for FE analysis of fire-proof mortar and board

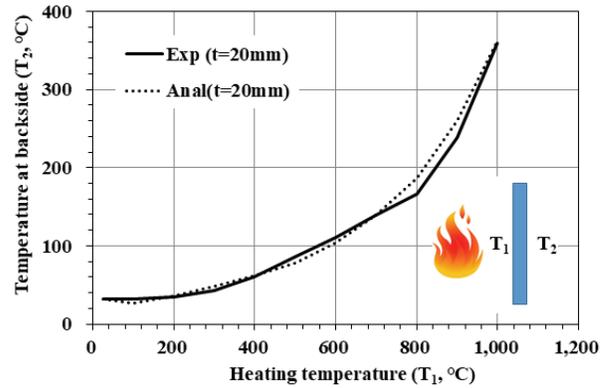


Fig. 7 Comparison of test and analytical result on backside temperatures of fire-proof mortar

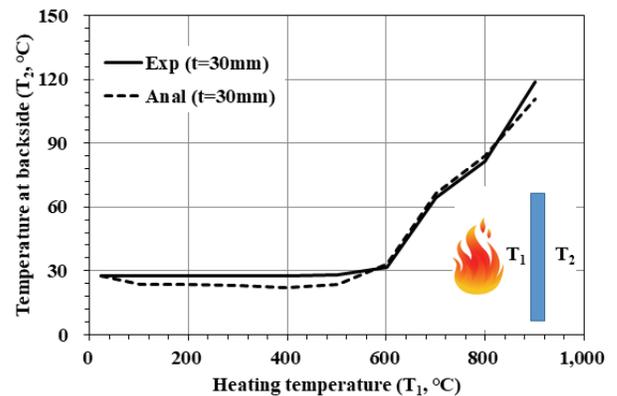


Fig. 8 Comparison of test and analytical result on backside temperatures of fire-proof board

Fig.9와 10은 반복해석을 통하여 구한 내화 모르타르와 내화보드의 노출온도에 따른 열전도계수를 나타낸 그래프이다. 내화모르타르의 경우에는 500°C까지 선형적으로 열전도율이 증가하다가 그 이후에는 다소 그 기울기가 커지며, 온도증가에 대하여 이차곡선으로 증가함을 알 수 있다. 반면에 내화보드의 경우에는 부분적으로 변동은 있으나, 온도증가에 따라 선형적으로 열전도율이 증가하는 것으로 나타났다.

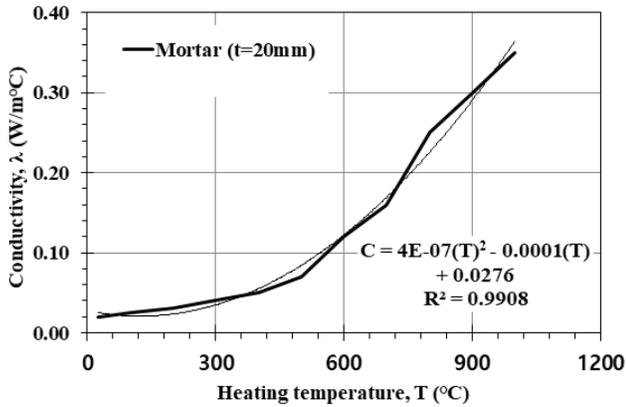


Fig. 9 Defined thermal conductivity of fire-proof mortar (t=20mm)

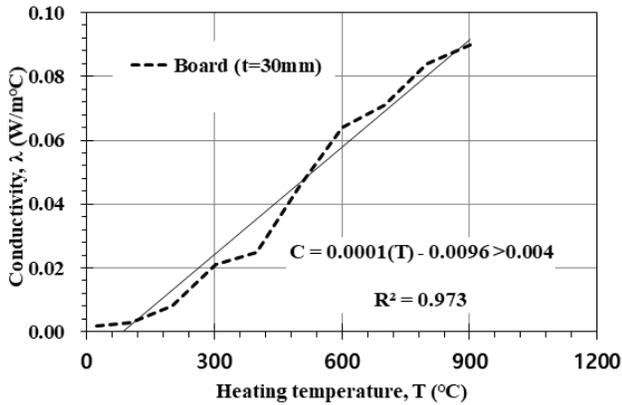


Fig.10 Defined thermal conductivity of fire-proof board (t=30mm)

Table 1 Mechanical properties of fire-proof mortar and board

Size (mm×mm×mm)	Density (kg/m³)	Specific Heat (J/kg°C)
220×220×20 (Mortar)	2,360	837
220×220×30 (Board)	400	1,000

Table 1은 내화모르타르와 내화보드의 모델링 설정 시 입력된 각 재료별 물리적 특성을 정리한 것이다. 열전도율은 노

출온도에 따라 변동하기 때문에 Fig.9와 10의 회귀식으로 나타낼 수 있다.

3. 내화재로 보강된 RC보의 열전도 해석

3.1 해석 모델

실험과 유한요소해석을 통하여 구한 내화 모르타르와 내화보드의 열적특성을 이용하여 내화재로 보강된 RC보의 열전도 해석을 실시하였다. 해석대상 보는 Lim 등에 의해 수행된 실험체(2017)로서, 단면이 200mm×300mm이고 길이가 2,000mm이다. 두께 10mm로 내화 모르타르를 보의 하부 중앙에 길이 1,600mm로 보강한 경우와 두께 30mm의 내화 보드를 보의 하부 중앙에 길이 1,600mm로 Fig 11과 같이 내화 보강한 경우를 해석 모델로 하였다. 그림에서 T_0 와 T_1 은 각각 가열면의 온도와 단열재 내부, 즉 FRP가 위치한 곳에서의 온도를 나타낸다.

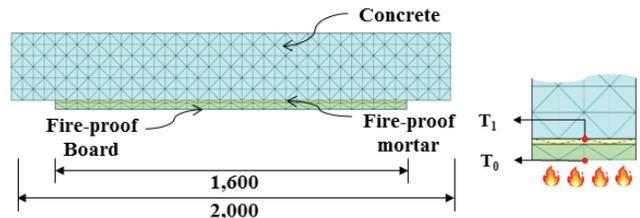


Fig. 11 Analysis Model

유한요소 해석 시 가열조건으로는 콘크리트의 열적 특성이 내부온도(T_1)에 영향을 미치지 않는다는 가정 하에 Fig 11과 같이 밑면에서 가열되는 1면가열을 설정하였다. 해석시 내화 모르타르와 내화 보드의 열적특성은 Table 1과 2의 값들을 사용하였고 열전도율은 Fig.9와 10의 추세선을 근거로 하였다.

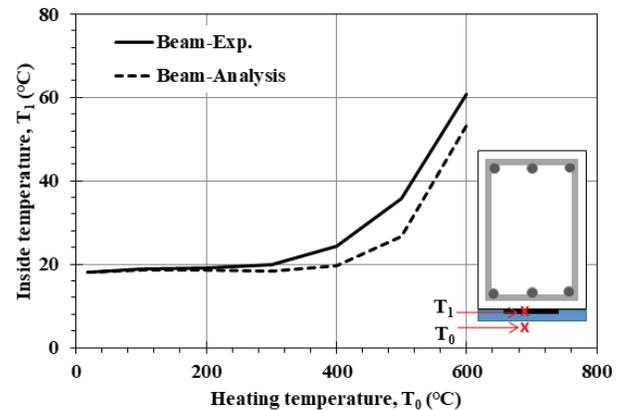
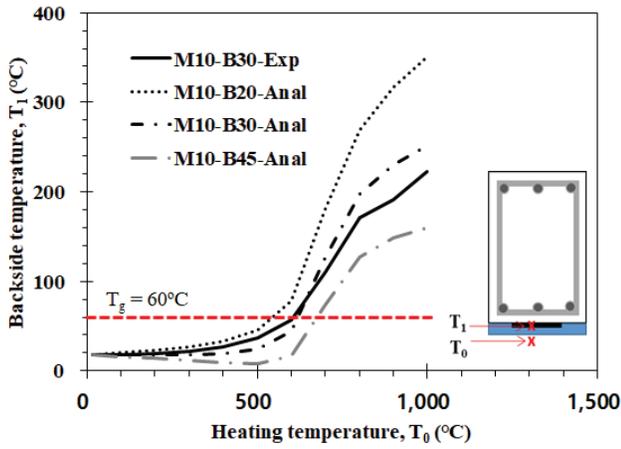
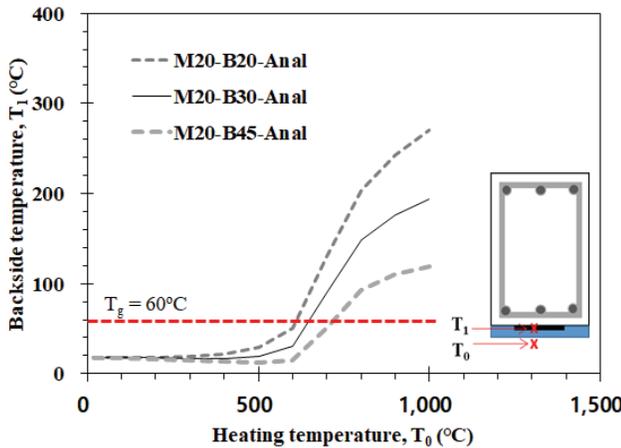


Fig.12 Comparison of test and analysis result of RC beam



(a) With mortar thickness of 10mm



(a) With mortar thickness of 20mm

Fig.13 Temperature at FRP in RC beam strengthened with fire-proof mortar and board from analysis

3.2 해석결과와 실험결과의 비교

유한요소 해석결과를 실험결과와 비교하여 Fig.12에 나타내었다. 실험결과에 비하여 해석결과의 내부온도가 다소 낮게 나타나는 경향을 보이고 있다. 이는 실제 실험에서는보의 측면도 고온에 노출되었지만 본 해석에서는 측면에서의 열전달을 고려하지 않음에 따른 것으로 보여진다. 전체적으로 2장에서 제시된 내화재료의 열적특성으로 고려하여 유한요소해석을 실시할 경우, 실제 내화단열에 따른 내부 온도를 추정할 수 있을 것으로 사료된다.

3.3 내화재 두께에 따른 열전도 해석

기존 실험결과와의 비교를 통하여 해석방법의 적합성을 확인한 뒤, 전술한 재료 모델을 이용하여 내화재 두께별로 유한요소 해석을 통해 내부온도를 예측하였다. 유한요소 해석 시 내화모르타르 두께를 10, 20mm로 하였으며, 내화보드 두께는 20, 30, 45mm로 해석하였으며 그 결과를 Fig.13에 나타내었

다. 그림으로부터, 두께가 두꺼워질수록 내부온도가 낮아지는 것을 볼 수 있다. 이를 통해 유한요소 해석으로 에폭시가 유리전이 온도에 도달하는 가열온도를 찾을 수 있으며 내화재료를 보강한 구조물의 강도저하를 예측할 수 있다. Fig.13(a)에서 M10-B30-Exp는 모르타르의 두께 10mm와 보드 두께가 30mm로 내화보강된 경우의 실험결과를 나타낸다. 유한요소 해석결과인 M10-B30-Anal과 비교해 보면, 해석결과가 다소 높은 온도를 보이고 있으나, 전반적으로 적절하게 보강된 FRP 위치에서의 온도를 예측하고 있음을 알 수 있다. 또한 내화 모르타르의 두께가 10mm이고 내화 보드의 두께가 30mm인 경우 외부온도 증가에 따른 내부 온도변화를 Table 2에 나타내었다. 외부 온도가 700°C에 도달하였을 때 단열재 내부온도는 60°C 이상으로 나타났다. 따라서 이후의 온도에서 FRP의 탈락으로 보강재로써의 기능을 상실하고 이에 따라 보강에 의한 내력기여는 없어지는 것으로 간주할 수 있다. Fig.13의 해석결과로부터, 내화 모르타르의 두께를 20mm로 하고 보드를 45mm 두께로 한 경우에는 외부 온도가 720°C 이상이 될 경우, 내화재료 내부의 FRP부근의 온도는 에폭시 유리전이온도인 60°C 부근에 도달하는 것으로 나타났다.

4. 고온에 노출된 FRP보강 RC 보의 휨 내력

4.1 열 손상에 의한 강도 저하

고온에 노출된 철근콘크리트 구조는 화재발생에 따른 휨성능과 압축성능의 저하가 일어난다. 고온에 노출될수록 콘크리트와 철근의 강도 감소가 일어나고 이는 구조물의 취성적 파괴의 원인이 된다. FRP 보강 전의 구조는 기본적인 콘크리트와 철근의 강도저하가 파괴의 원인이 되는 반면에, FRP 보강 후에는 접착제인 에폭시의 부착성능 저하로 탈락이 발생하여 강도가 저하된다. 이러한 열 손상정도를 고려하여 보의 휨 내력을 산정하였다.

4.2 재료의 물리적 특성

대상으로 하는 보는 전술한 Lim 등 (2017)의 보 실험체와 동일한 규격으로서, 단면이 200mm×300mm이고 길이가 2,000mm이다. 콘크리트의 압축강도는 21 MPa이며 보 주근은 D10로서 항복강도와 최대 강도는 각각 486.7 MPa, 833.2 MPa이다. 보강된 CFRP의 인장강도와 탄성계수는 각각 2,800 MPa, 160,000MPa이며 에폭시는 압축강도 70MPa, 인장강도 28MPa, 탄성계수 128,000MPa, 전단강도 18MPa 이다. 표면 매입 공법은 두께 1.2mm 폭 16mm인 FRP를 폭 50 mm간격으로 3열 매입하였고 표면 부착 공법은 두께 1.2 mm이고 폭 50 mm인 FRP를 한 장 부착하였다.

화재 시 콘크리트의 최대 압축강도 변화는 Schneider의 식과 BS규격에 의하면 350 °C에서부터 강도저하가 시작되며, Eq (2)에 의해 산정할 수 있다. (Schneider, 1988)

$$f_{ck}' = k_{ct} f_{ck} \quad (2)$$

여기서, f_{ck} 는 상온에서 콘크리트 압축강도이고 k_{ct} 는 온도에 따른 콘크리트 압축강도 잔존율로써 BS 8110 (1985)에서 다음과 같이 정하고 있다.

$$\begin{aligned} T \leq 350^\circ\text{C} \quad k_{ct} &= 1.0 \\ T > 350^\circ\text{C} \quad k_{ct} &= (910 - T)/560 \end{aligned} \quad (3)$$

실험체 내부의 평균 온도는 ACI committee 216 (2007)에서 제시한 피복두께에 따른 부재 내부의 온도분포도를 적용하여 내부 콘크리트의 평균 온도를 계산하였다. 온도에 따른 철근의 강도 잔존율은 Eq (4)로 정리하였다. (Bobrowski, 1975) Eq (4)는 고온을 받는 철근의 특성을 가열온도에 따른 강도 감소 계수 k_{st} 를 적용하여 나타내고 있다.

$$\begin{aligned} f_y' &= k_{st} f_y \\ 20^\circ\text{C} < T \leq 300^\circ\text{C} \quad k_{st} &= 1.0 \\ 300^\circ\text{C} \leq T < 826^\circ\text{C} \quad k_{st} &= 1.0 - \frac{T-300}{526} \end{aligned} \quad (4)$$

실험체 내부 철근의 온도는 콘크리트와 동일하게 ACI

committee 216 (2007)에서 제시한 피복두께에 따른 부재 내부의 온도분포도를 적용하여 압축철근의 평균 온도를 계산하였다. 철근의 경우 300°C에서부터 강도저하가 시작되지만 내화 단열재가 보강된 보는 콘크리트 내부의 인장철근의 온도가 300°C를 넘지 않는 것으로 나타나 강도저하가 발생하지 않는 것으로 하였다.

4.3 열 손상에 따른 FRP보강 보의 휨 내력 산정

4.3.1 열 손상이 없는 무 보강 RC보의 휨 내력

보강 전 복근보의 부재는 압축철근의 항복유무에 따라 계산을 다르게 한다. 본 실험에 사용한 실험체의 경우 압축철근이 항복하지 않는다. 따라서 휨 강도 Eq (5)는 다음과 같이 사용하여 내력을 산정하였으며 그 값은 34.16 kN·m이다.

$$M_n = C_w \left(d - \frac{a}{2} \right) + C_c (d - d') \quad (5)$$

여기서, C_w 는 콘크리트의 압축력(MPa), d 는 인장철근의 유효깊이(mm), a 는 등가응력블록깊이(mm), C_c 는 압축철근의 압축력(MPa), d' 는 압축철근의 유효깊이(mm)이다.

4.3.2 열 손상이 없는 FRP 보강 RC보의 휨 내력

FRP를 보강한 보의 내력은 보강 전과 유사하나 FRP내력은 Eq (6)을 이용한다. 식은 다음과 같으며 그 값은 표면 매입과 부착이 각각 56.84 kN·m, 51.49 kN·m 이다. 표면부착보강일 때의 k_m 은 Eq (7)을 이용하여 산정한다. Seo 등의 선행연구 (2012)에 따라, 표면매입보강일 때, 매입된 CFRP 판의 부착길이가 400 mm 이상인 경우 부착감소계수는 0.9를 사용하여 실

Table 2 Flexural strength variation due to the Drop-out of Epoxy(The case with thicknesses of mortar and board are 10mm and 30mm, respectively)

Fire loading condition	Time (min)	Heating temperature (°C)	Internal temperature of Epoxy (°C)	State of epoxy	Average temperature of concrete (°C)	Strength reduction factor		Flexural strength (kN.m)		
						Compression steel	Concrete	W/O FRP ¹⁾	NSM-FRP ²⁾	EB-FRP ²⁾
Before fire	0	17	17	Bonded	-	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	5.80	100	17	Bonded	-	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	9.20	200	17	Bonded	-	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	12.00	300	17	Bonded	-	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	14.98	400	19	Bonded	-	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	19.23	500	24	Bonded	-	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	27.82	600	43	Bonded	245.91	1.00	1.00	34.16	56.84	51.49
	59.10	700	125	Drop-out	353.18	0.77	0.99	34.12	34.12	34.12
	92.81	800	197	Drop-out	432.27	0.59	0.85	33.72	33.72	33.72
	108.73	900	230	Drop-out	487.27	0.49	0.75	33.46	33.46	33.46
118.00	1,000	250	Drop-out	510.91	0.46	0.71	33.31	33.31	33.31	

¹⁾ Without FRP retrofit and fire-protection

²⁾ With FRP retrofit and fire-protection

힘체의 내력을 계산하였다.

4.3.3 열 손상이 있는 FRP 보강 RC보의 휨 내력

온도 변화에 따른 감소계수를 적용한 강도는 각 구간별 감소계수를 적용하고, 에폭시의 탈락 여부를 확인하기 위하여 유한요소 해석프로그램의 해석결과를 이용한다.

$$M_n = A_s f_y (d - d') + (A_s - A_s') f_s (d - \frac{\beta_1 c}{2}) + k_m A_f f_f (d_f - \frac{\beta_1 c}{2}) \quad (6)$$

$$k_m = \frac{1}{60 \epsilon_{fu}} (1 - \frac{n E_f t_f}{360,000}) \leq 0.90, n E_f t_f \leq 180,000 \quad (7)$$

$$\frac{1}{60 \epsilon_{fu}} (\frac{90,000}{n E_f t_f}) \leq 0.90, n E_f t_f > 180,000$$

여기서, A_s 는 인장철근의 단면적(mm²), A_s' 는 압축철근의 단면적(mm²), β_1 는 중립축 거리계수, c 는 콘크리트 압축연단에서 중립축까지의 거리(mm), d' 는 압축연단에서 압축철근 중심까지의 거리(mm), A_f 는 FRP보강재의 단면적(mm²), F_y 는 철근의 항복강도(MPa), f_s 는 철근의 응력(MPa), f_f 는 FRP의 응력(MPa), k_m 는 부착시와 매입시의 부착효율을 고려한 감소계수, d_f 는 압축연단에서 보강재까지의 깊이(mm), n 은 FRP 판의 겹수, E_f 는 FRP의 탄성계수(MPa), t_f 는 FRP 판의 두께(mm)이다.

4.4 계산 결과

FRP로 보강된 실험체는 에폭시가 유리전이 온도에 도달하면 기능을 완전히 상실하게 된다. 전술한 해석 결과로부터, 외부 온도가 700°C에 도달하였을 때 단열재 내부온도는 60°C 이상으로 나타났다. 따라서 이후의 온도에서 FRP의 탈락으로 보강재로서의 기능을 상실하고 이에 따라 보강에 의한 내력 기여는 없어진다.

Fig. 14는 Table 2에 나타난 보강조건, 즉 내화 모르타르의 두께가 10mm이고 그 위에 설치한 내화 보드의 두께가 30mm인 경우, 보의 외부 노출온도 증가에 따른 내력변화를 나타낸다. 여기서, W/O FRP는 FRP보강이 없고 또한 내화단열보강되지 않은 RC 부재를 나타내고, W NSM-FRP와 W EB-FRP는 각각 FRP로 표면매입과 표면부착보강되고 모두 10mm의 내화 모르타르와 30mm두께의 내화보드로 보강된 경우를 나타낸다. FRP보강이 없는 보는 외부온도 700°C까지 내력의 변화가 없지만, 그 이후에는 콘크리트와 철근의 재료물성변화에 따라 내력이 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 반면에, FRP가 보강된 경우에는 600°C에서부터, 에폭시의 기능이 상실되기 때문에 보강효과가 상실되는 것으로 간주할 수 있

다. 하지만, 하부의 단열재에 의해 인장철근의 강도가 저하되지 않음으로서, 보강되지 않은 RC보의 내력을 유지하는 것으로 나타났다.

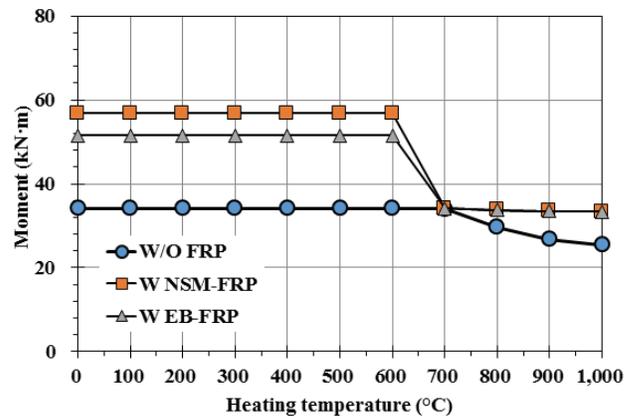


Fig. 14 Strength variation of RC beam according to heating temperature

5. 결론

본 연구에서는 유한요소 해석프로그램을 통해 내화재를 보강한 RC보를 모델링하여 해석하였다. 선행연구를 통해 얻은 내화재를 보강한 RC보의 실험 값과 유한요소 해석을 통해 얻은 해석 값을 비교하여 다음과 같은 결과를 도출하였다.

- 1) 내화재의 이면온도 실험과 유한요소 해석을 실시하여 내화보드와 내화모르타르의 열전도율과 비열을 구하였고 이를 이용하여 기존의 실험체에 적용한 결과, 실험 결과를 근사하게 예측할 수 있는 것으로 나타났다. 이에 따라 제안된 해석방법을 적용할 경우, 내화보드와 내화 모르타르로 보강된 철근콘크리트 부재의 고온 노출 시의 온도 분포 등을 예측할 수 있을 것으로 사료된다.
- 2) 제안된 해석방법으로 FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 내화성능을 평가한 결과, 20mm 이하의 내화보드를 이용할 경우에는 700°C에서 에폭시가 접착 성능을 상실하고 이는 FRP의 탈락이 발생하는 것으로 나타났다.
- 3) MIDAS-FEA의 해석 값을 보다 정확하게 도출하기 위해서 각 재료의 이면온도 실험 시 정밀 측정 기구를 이용해야 한다. 이러한 과정을 통해 재료의 열적 특성을 정확히 측정하여 해석 모델링의 개선 및 실제 실험 값과 비교하는 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비 지원(17CTAP-C130221-01)에 의해 수행되었습니다.

References

- Yeon, J. Y. (2014), Improvement of Fire Resistance of Reinforced Concrete Member Strengthened by FRP, Korea National University of Transportation.
- Lim. J. W., Song, S. G., and Seo. S. Y. (2017), Experiment for the Improvement of Fire Resistance Capacity of Reinforced Concrete Flexural Member Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer, *Journal of Architectural Institute of Korea* (In press).
- Dai, J., Gao, W., and Teng J. (2015), Finite Element Modeling of Insulated FRP-Strengthened RC Beams Exposed to Fire, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, 19(2), 04014046.
- Seo, S. Y., and Kim, M. S. (2013), Bond Strength of Near Surface-Mounted FRP Plate in Concrete Corresponding to Space and Bond Length, *Journal of Korea Concrete Institute, KCI*, 25(1), 37-43.
- Midas FEA (2010), MIDAS Information Technology “midas FEA 2.0.0”.
- Schneider, U. (1988), Concrete at High Temperatures-A General Review, *Fire Safety Journal*, 13, 55-68.
- BS 8110. (1985), Structural Use of Concrete, British Standards Institution.
- Bobrowski, J. (1975) Design and Detailing of Concrete Structures for Fire Resistance, Interim Guidance by a Joint Committee of the Institution of Structural Engineers and the Concrete Society, the Institution of Structural Engineers London.
- ACI Committee 216. (2007), Code Requirements for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies (ACI216.1-07), American Concrete Institute.
- Seo, S. Y., Choi, K. B., Kwon, Y. S. (2012), Retrofit Capacity of Near-Surface-Mounted RC Beam by Using FRP Plate, *Journal of The Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, JKSMI*, 16(1), 18-26.
- KS F 2257. (2014). Methods of Fire Resistance Test for Elements of Building Construction General Requirements. Korea Standards Association.

Received : 11/15/2017

Revised : 02/09/2018

Accepted : 03/05/2018

요 지 : 본 연구의 목적은 해석적 방법을 통하여 내화 재료의 특성을 파악하고 섬유 강화 폴리머로 보강된 철근콘크리트의 보의 적절한 내화 설계 방법을 제안하는 것이다. 이를 위해, 내화재료의 가열 실험을 실시하고 유한요소해석을 통해 열전도율과 비열을 구하고 또한 고온에서 FRP로 보강된 철근콘크리트 보 실험체에 대한 유한요소 해석을 통해 실험결과와 해석결과를 비교하였다. 이 과정에서 실험과 해석적 접근의 신뢰성을 확인하였다. 최종적으로 FRP로 보강된 철근콘크리트 보의 열적 특성을 제안된 해석 방법으로 분석하고 고온으로 감소된 휨내력을 계산하였다. 최종적으로 제안된 방법을 이용하여 FRP로 보강된 부재에서 고온 노출시 열특성을 반영한 부재의 열전도를 파악하고 이를 이용하여 내력을 산정할 수 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 유한요소해석, 섬유강화폴리머보강, 철근콘크리트 부재, 내화성능, 휨내력
