고온에 노출된 탄소섬유보강근의 계면전단강도 및 휨강도

Inter-laminar Shear and Flexural Strength of CFRP Rebar Subjected to Elevated Temperatures

문도영*

Moon, Do Young

Abstract

In this experimental study, a reduction in mechanical properties of CFRP reinforcing bars, which is domestically produced, subjected to elevated temperatures was investigated. The inter-laminar shear and flexural tests were conducted on the rebar specimens conditioned in a chamber for specified times at high temperatures. The rebar specimens were exposed to the temperatures, range 100~400°C, for 0.5 hr~4 hr. Based on the obtained results, linear equations were presented for evaluation of the reduced properties due to the applied conditions. It is predicted that the critical temperature and exposure time were 250°C and 2.5 hr, respectively.

Key words : High temperature, exposure time Inter-laminar shear strength, Flexural strength, CFRP rebar

요 지

본 연구에서는 국내에서 생산된 탄소섬유보강근의 고온하에서의 성능변화를 실험적으로 고찰하였다. 실험에서 고온전기로서 일정시간동안 고온에 노출된 탄소섬유보강근 실험편의 계면전단강도 및 강성, 휨강도 및 강성을 고찰하였다. 실험편의 노출온도 범위는 100°C~400°C, 노출시간은 0.5시간~4시간으로 하였다. 실험결과를 통해 노출온도와 노출시간을 고려한 간단한 평가식을 제안하였으며, 이를 이용하여 임계노출온도와 임계노출시간을 평가한 결과, 250°C와 약 2.5시간인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 고온, 노출시간, 계면전단강도, 휨강도, CFRP 보강근

1. 서 론

그간 콘크리트 구조물에 보강되는 이형철근을 유리 및 탄소섬유복합체로 대체하려는 연구는 섬유복합체의 매우 우수한 내부식성능에 동기하였다. 물론, 이에 추가하여 중량이 철근의 1/4에 불과하며, 고강도의 특성에 따라 그 장점이 부각되며, 북미에서는 실제 도로 및 교량 구조물에 인장보강재로 활용되고 있다.

탄소섬유복합체(이하 CFRP) 보강근의 주된 구성요소는 탄소섬유와 레진 매트릭스이며, 탄소섬유는 강도를, 레진은 섬유간 응력의 전달과 보호를 담당한다. 전술한 바와 같이 CFRP 보강근은 우수한 역학적, 구조적 성능을 가지고 있으나, 내열특성이 부족한 것으로 지적되어왔다(Saffi, 2002). 보강근의 부족한 내열특성은 주로 레진매트릭에 기인하며, 유리전이온도(T_g) 이상의 온도에 노출될 때 레진 매트릭스의 연약화가 열화 매커니즘 인것으로 보고되고 있다(Robert 등, 2010; AL-ZAHRANI 등, 2007). 심종성 등(2004)의 실험

결과로부터 이를 시각적으로 확인할 수 있는데, CFRP를 600°C의 고온에 노출시킨 결과, 탄소섬유는 남아있지만, 레진은 모두 연소하여 사라진것을 확인할 수 있다. 따라서 CFRP 보강재로 보강되거나 성능향상된 구조물이 화재와 같은 사고로 인해 고온에 노출되면 그 구조적 성능의 급격한 저하로 인한 문제가 발생할 수 있다.

고온하에서 섬유복합체 보강근의 성능평가를 위한 실험적 연구는 노출온도 수준에 따른 성능변화에 집중하고 있다. 즉, 실험편을 고온에 노출시킬 때 정해진 온도에 도달하면 실험을 수행하고 노출온도에 따른 성능변화를 고찰하였다(Bisby 등, 2007; Saffi, 2002; Wang 등, 2007; Wang 등, 2005). 이는 매우 중요한 공학적 기초자료를 제공한다. 그러나 노출 온도 뿐 아니라 노출시간도 성능저하의 주요한 요인이다. 문도영(2010)은 철근콘크리트 구조물의 화재노출시 노출시간의 중요성을 제시하고 그 영향을 고려할 수 있는 손상평가 방안을 제시하였다. 전술한 바와 같이 CFRP 보강근은 고온에 취약하기 때문에 고온지속 시간이 보강근 자체의 성능에 미치

*정회원 · 경성대학교 토목공학과(E-mail : dymoon@ks.ac.kr)

그림 1. 화재노출 콘크리트슬래브의 설계도표(Bisby and Kodur, 2007)

는 영향이 지배적일 수 있다. 그럼에도 불구하고 고온지속 시간이 CFRP 보강근의 역학적 성능에 미치는 영향에 대한 실험적 연구는 거의 없는 실정이다.

본 연구에서는 고온에 노출된 CFRP 보강근의 계면전단강도와 휨강도의 변화를 고찰하였다. 계면전단강도와 휨강도는 레진의 물성에 지배되는 인자로서, 열에 의한 레진의 연약화, 그로인한 응력전달 기능의 약화로 저하되며, 열손상 평가에 매우 중요하다. 100°C~400°C의 고온에 CFRP 보강근 실험편을 노출시키고, 2시간 이후에 ASTM D4475에서 규정하고 있는 계면전단강도실험과 ASTM D790에서 규정하고 있는 휨실험을 수행하였다.

노출온도 범위는 재료적 특성과 Bisby and Kodur(2007)의 실험연구 결과에 근거하여 설정하였다. 본 대상 보강근에 사용된 Vinyl-ester 레진의 유리전이온도는 시차주사열량측정법(DSC)분석에 의하여 분석하였으며, 112°C로 나타났다. 따라서 유리전이온도를 기준으로 하여 최저온도범위를 설정하였다. Bisby and Kodur(2007)는 CFRP 보강근의 고온노출시 임계온도를 250°C로 제시하였다(그림 1 참조). 논문에서 임계온도는 인장강도가 50%로 감소될때의 온도를 의미하며, 40 mm의 피복을 갖는 슬래브의 경우 1시간의 노출이 되면, CFRP 보강근의 온도가 임계온도에 도달한다고 주장하였다. 본 연구에서는 CFRP의 임계온도 이상의 고온에 의한 영향을 고찰하기 위하여 최고노출 온도를 400°C로 하였다. 실험변수는 온도뿐 아니라 노출시간도 포함하였다. 고온 노출시간은 0.5시간, 1시간, 2시간과 4시간으로 하였으며, 이 결과는 화재시 노출된 최고온도 뿐 아니라 노출지속시간에 따른 영향을 고찰할 수 있다는 점에서 그 의미가 있다.

2. 실험

2.1 CFRP 보강근

본 연구에서 사용된 CFRP 보강근은 국내에서 제작된 공칭 직경(=d_n) 9.5 mm의 CFRP 보강근으로 구조물의 보강에 사용되는 재료이다. 보강근의 표면에는 가넷모래(Garnet sand)라 불리는 거친 재료가 붙어있으며, 용융점이 1200도 이상인

표 1. 상온 실험결과

	평균	표준편차	변동계수(%)
계면전단강도	59.5 MPa	2.8 MPa	0.05
휨강도	892.3 MPa	123.8 MPa	0.14

<직경 9.5 mm>

매우 내열특성이 우수한 재료이다. 이는 콘크리트와의 부착성능을 확보하기 위하여 보강근의 표면에 살포되었다. 보강근에 사용된 섬유의 혼입률(Vol. fraction)은 70%이며, Vinyl-ester가 레진매트릭스로 사용되었다(표 1 참조). 성능비교를 위하여 상온(약 20°C)에서 각각 10개의 실험편에 대하여 CFRP 보강근의 계면전단강도 및 휨강도를 측정하였으며 결과를 표 1에 제시하였다.

2.2 실험방법

보강근의 고온 노출에 의한 중량변화를 측정하였다. 중량은 상온실험편의 중량에 대한 고온노출실험편 중량감소량의 백분율로 식(1)과 같이 정의하였다. W_e는 노출후의 중량을, W_i는 노출전 중량을 의미한다.

$$W\% = \frac{W_e - W_i}{W_i} \quad (1)$$

보강근의 계면전단강도는 ASTM D4475-02R08에 규정된 방법으로 측정하였다. 규정된 방법에 따라 경간은 47.5 mm (=5d_n)로 하였으며, 하중재하속도는 4 mm/min으로 하였다. 전단강도는 최대하중으로부터 식(2)를 통하여 계산하였다.

$$f_s = 0.849 \frac{P_s}{d_n^2} \quad (2)$$

여기서, f_s는 계면전단강도(MPa), P_s는 실험편의 계면전단파괴시 하중(N), d_n는 실험편의 공칭직경으로 본 실험에서는 9.5mm이다.

보강근의 휨강도는 ASTM D790-10에 규정된 방법으로 측정하였다. 경간은 152 mm(=16d_n)로 하였으며, 하중재하속도는 4 mm/min으로 하였다. 휨강도는 최대하중으로부터 식(3)을 통하여 산정하였다.

$$f_f = \frac{8P_f L}{\pi d_n^3} \quad (3)$$

여기서, f_f 는 휨강도(MPa), P_f 는 실험편의 휨파괴시 하중(N)이다.

2.3 실험절차 및 변수

표 2에는 실험변수를 정리하여 나타내었다. 그림 3과 같이 고온노출은 1000°C까지 실험이 가능한 전기로를 사용하였다. 노출온도는 100°C, 150°C, 200°C, 300°C 및 400°C로 하였으며, 각 온도에 대하여 노출시간에 대한 영향을 고찰하기 위하여 0.5시간, 1시간, 2시간 및 4시간동안 고온에 노출하였다. 동일한 실험변수에 대하여 10개의 실험을 수행하였으며, 모든 결과는 평균치, 표준편차, 변동계수값을 제시하였다.

계면전단강도실험편과 휨강도 실험편은 각각 76 mm(=8 d_n)와 190 mm(=20 d_n)의 길이로 2.2장에 제시된 경간길이 보다 길게 여유길이를 두어 절단하였으며 그림 2와 같이 고열에 강한 세라믹 그릇에 담긴 상태로 고온에 노출되었다. 지정된 온도와 노출시간에 도달하면, 실험편을 꺼내어 중량을 잰 후 그림 3, 그림 4와 같이 경간길이 규정에 맞게 지지부를 조정하여 계면전단강도 및 휨강도 실험을 수행하였다.

3. 실험결과 고찰

3.1 고온노출에 따른 외관변화

고온노출후 실험편의 외관을 그림 5에 비교, 고찰하였다. 100°C에 0.5시간동안 노출된 실험체의 경우 색변화, 변형 및 균열 등이 전혀 발생하지 않아, 상온노출 실험편과의 외관상 큰 차이가 없었다. 반면, 200°C에 0.5시간 동안 노출된 실험편에서는 단면에 균열이 발생하였고, 노출시간이 2시간으로 증가함에 따라 그 균열이 진전되어 있음을 확인할 수 있다. 300°C에 2시간 노출된 실험체의 경우에는 온도 증가에 따라

표 2. 실험변수

노출온도(°C)	노출시간(hr)	비고
100	0.5, 1, 2, 4	* : 0.1hr에서 보강근이 일부가 발화, 연소되어 실험중지
150		
200		
300		
400	0.1 hr*

그림 3. 계면전단강도 실험

그림 4. 휨강도 실험

단면에 추가적인 균열이 발생한 것을 볼 수 있으며, 4시간 노출된 경우에는 균열개수가 증가하고 폭도 확대된 것을 확인할 수 있다. 400°C에 노출된 실험편의 경우 0.5시간의 노출시간 전에 1/6시간에서 발화, 연소되었으며, 이로 인해 표면 형상은 측면사진에서 보는 바와 같이 전면적인 균열과 심각한 단면손실이 발생하였음을 확인할 수 있다. 400°C에 노출된 실험체는 손상이 너무 심하여 강도실험 수행이 불가능하였기 때문에 이후의 실험결과 고찰에서 제외되었다. 예상대로 노출온도가 증가할수록 외관상 색의 변화와 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있으며, 이와 같은 변상은 노출시간에도 크게 영향을 받는 것으로 확인되었다. 주목할 것은 유리전이온도(T_g)이하의 온도에서는 노출온도 및 노출시간의 증가에도 거의 변상이 발생하지 않았다.

(a) 계면전단강도 실험체

(b) 휨실험체

그림 2. 전기로를 이용한 고온노출

그림 5. 고온노출에 따른 보강근의 외관변화

3.2 파괴모드

그림 6과 그림 7은 계면전단강도실험과 휨실험으로 파괴된 실험편을 나타내고 있다. 계면전단파괴는 실험 중 섬유와 레진간의 계면에서 종방향 균열이 발생하고 하중이 증가함에 따라 단부로 균열이 진전되었으며, 최대하중에서 갑작스러운 계면분리에 의한 파괴가 발생하였다. 반면, 휨 파괴는 큰 휨 변형이 발생하면서 재하위치 하부의 섬유가 인장 파단되고 섬유의 파단이 상부로 진전하면서 파괴된 것을 확인할 수 있다.

3.3 중량변화

중량변화는 계면전단강도 실험편을 사용하여 측정하였다. 76 mm 크기로 절단된 10개 실험편의 상온에서의 평균중량은

약 10.20 g인 것으로 나타났다. 구성재료별 중량의 구성비를 산정하기 위하여 코어부와 표면부의 중량을 조사하였다. 표면 재료를 코어부로부터 제거한 후 보강근의 평균중량은 7.45 g으로 측정되었다. 따라서, 표면재료의 평균중량은 2.75 g임을 알 수 있다. 코어부의 레진과 섬유의 체적비로부터 코어부를 구성하는 재료별 중량비를 산정하였다. PAN계 탄소섬유의 단위중량이 약 $1.6 \text{ g/cm}^3 \sim 1.8 \text{ g/cm}^3$, 레진의 단위중량이 약 $1.0 \sim 1.2 \text{ g/cm}^3$ 임을 감안할 때, 전체 중량에 대한 섬유, 레진의 중량비는 각각 59%~67%, 16%~19% 범위에 있음을 알 수 있다.

그림 8은 온도에 따른 중량의 변화를 나타내고 있다. 그림과 같이 100°C~200°C 범위에서 중량의 감소는 0.5%이하에 불과하며, 노출시간의 증가에 따른 중량의 감소가 명확하지

그림 6. 계면전단파괴

그림 7. 휨파괴

그림 8. 고온노출에 따른 중량의 변화

않다. 반면, 300°C에서는 노출시간이 증가함에 따라 매우 급격한 중량의 감소를 확인할 수 있다. 0.5시간의 노출에서는 약 1.3%, 1시간에서는 약 2%의 수준이지만, 4시간의 노출에서는 20% 이상의 중량감소를 나타내었다. 이는 레진의 중량비에 해당한다. 200°C이하의 낮은 온도에서 표면재료가 탈락되거나 연소되지 않았기 때문에 표면재료의 손실로 인한 중량 감소는 없다고 판단되며, 탄소섬유의 손실도 발생하지 않았다. 300°C에서 2시간 노출의 경우에는 표면재료의 탈락이 일부 관측되었으므로 약 20%의 중량 감소에는 이로 인한 중량의 감소도 포함되어 있다. 그러나 300°C 이상의 온도에서 주요한 중량감소의 원인은 레진의 연소와 그로 인한 중량감소인 것으로 판단된다. 이 결과를 종합해보면 보강근내 레진의 손실은 200°C 이상의 온도에서 발생하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이보다 낮은 온도에서 레진은 연약화 되는 등 상태의 변화를 일으키기는 하지만 손실되지는 않으며, 레진의 본격적인 손실은 최소한 300°C의 온도에서 1시간 이상 노출되었을 때 발생하고, 2시간 이상 노출됨으로써 거의 모든 레진매트릭스가 연소, 손실되는 것으로 판단된다. 이와 같은 판단은 전술한 구성재료의 중량비 산정 결과에 근거한다.

3.4 계면전단강도 및 강성의 변화

그림 9와 그림 10은 노출온도와 노출시간에 따른 계면전단강도비의 결과를 변동계수와 함께 나타내고 있다. 계면전단강도비는 고온에 노출되지 않은 보강근의 계면전단강도와와의 비를 의미한다. 200°C까지는 노출시간과 상관없이 큰 강도의

그림 9. 온도에 따른 계면전단강도 변화

그림 10. 노출시간에 따른 계면전단강도 변화

저하가 발생하지 않는다. 그러나 300°C에서 2시간의 노출에는 약 40%의 강도저하가 발생하며, 4시간의 노출에서는 약 90%의 강도저하가 발생한다. 특히, 계면전단강도의 본격적인 저하를 발생시키는 임계온도와 임계노출시간은 200°C~300°C, 1시간~2시간 범위에 있다. 그러므로 300°C 미만의 온도에서는 노출시간과 상관없이 계면전단강도의 저하가 거의 없다. 한편 300°C에 노출된 직경 9.5 mm CFRP 보강근의 노출시간에 대한 잔존계면강도비는 식(4)를 통해 평가가 가능하다. 식(4)는 실험결과와 선형보간의 결과로부터 도출되었다. 식(4)에서 IL_{strm} 은 잔존 계면전단강도비(%)를 의미하며, t 는 노출시간(hr), T 는 노출온도(°C)를 의미한다. 더욱이 계면전단강도 실험결과는 중량변화 결과와 매우 일관된 결과를 나타내었다. 따라서, 고온노출로 인한 보강근 내부 레진의 손실이 계면전단강도와 매우 밀접한 관계가 있으며 레진이 계면전단거동에 주요한 역할을 담당하고 있음을 알 수 있다. 그림 11은 노출온도와 노출시간에 따른 계면전단강도비를 3차원 그래프로 나타내고 있다. 이 그래프는 200°C를 초과하는 온도에서 계면전단강도의 저하가 노출온도 뿐 아니라 노출시간에 대해 크게 영향을 받는다는 것을 명확하게 보여준다.

$$IL_{strm} = 100 \quad (20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C})$$

$$IL_{strm} = 100 \quad (0 \text{ hr} \leq t \leq 1 \text{ hr}, T = 300^{\circ}\text{C}) \quad (4)$$

$$IL_{strm} = -28.8t + 125 \quad (1 \text{ hr} < t \leq 4 \text{ hr}, T = 300^{\circ}\text{C})$$

고온노출에 따른 보강근의 계면전단강성비 변화를 고찰하였다. 강성은 최대하중시 변위의 70%인 1.5 mm에 해당하는

그림 11. 노출시간과 온도에 따른 계면전단강도 변화

그림 12. 노출시간과 온도에 따른 계면전단강성 변화

하중(kN)을 사용하여 강성을 산정하고 이를 고찰하였으며, 고온노출 되지 않은 실험편의 강성으로 나누어 강성비를 계산하였다. 고온에 따른 계면강성의 변화는 그림 12와 같다. 보강근의 계면전단강성은 계면강도의 실험결과와 거의 유사한 것을 확인할 수 있으며, 잔존 강성비(%)는 식 (5)를 통해 평가할 수 있다. 식 (4) 및 식 (5)는 직경 9.5 mm의 CFRP 보강근의 실험결과에 근거한 것이며 다른 직경의 평가를 위해서는 추가적인 실험을 통해 다양한 직경의 영향에 대한 실험적 연구가 필요하다.

Bisby and Kodur(2007)는 고온에 의해 CFRP 보강근의 인장강도가 50%가 되는 임계온도를 250°C로 제시하고 있다. 본 연구에서 실행한 실험결과로부터 잔존 계면전단강도가 50%가 되는 임계온도가 약 250°C임을 알 수 있으며 인장강도의 결과와 동일한 것을 확인할 수 있다. 또한, 본 연구에서 제안된 식(5)를 이용하여 300°C에 노출될 때 CFRP 보강근의 임계노출시간은 약 2.5시간인 것으로 예측할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 IL_{strn} &= 100 \quad (20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C}) \\
 IL_{strn} &= 100 \quad (0 \text{ hr} \leq t \leq 1 \text{ hr}, T = 300^{\circ}\text{C}) \\
 IL_{strn} &= -30.0t + 134 \quad (1 \text{ hr} < t \leq 4 \text{ hr}, T = 300^{\circ}\text{C})
 \end{aligned} \quad (5)$$

3.5 휨강도 및 강성의 변화

그림 13과 그림 14는 노출온도 및 노출시간에 따른 휨강도비의 결과를 변동계수와 함께 나타내고 있다. 휨실험결과의 변동계수는 계면전단실험 결과에 비하여 상대적으로 매우 큰 것으로 나타났다. 따라서 실험의 민감도가 계면전단강도에 비하여 상대적으로 큰 것을 알 수 있다.

그림 13의 노출온도에 따른 결과를 보면, 노출시간에 상관없이 200°C이하의 온도에서 휨강도의 저하가 나타났지만 미미하며, 200°C를 초과하는 온도에서 급격한 휨강도의 저하가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 노출시간과 무관하게 노출온도가 200°C이하일 때는 휨강도의 저하가 없다. 한편, 노출온도 300°C에서는 그림 15와 같이 계면전단강도의 결과와는 달리 0.5시간의 노출에도 적지만 휨강도의 저하가 발생하며, 이후 노출시간의 증가에 따라 선형적인 휨강도감소를 나타내고 있다. 즉, 휨강도의 경우에는 노출시간에 대하여 급격한 강도저하가 발생하는 임계시간이 명확하지 않고 노출온도

그림 13. 온도에 따른 휨강도 변화

그림 14. 노출시간에 따른 휨강도 변화

의 증가에 따라 지속적인 강도저하가 발생하는 것으로 판단된다. 따라서, 300°C에 노출된 직경 9.5 mm CFRP 보강근의 노출시간에 대한 휨강도 저하는 노출시간에 따른 결과를 1차 선형보간을 통해 식 (6)과 같이 평가할 수 있다. 식(6)에서는 잔존 휨강도비를 나타낸다. 그림 15는 노출온도 및 노출시간이 휨강도에 미치는 영향을 3차원 그래프로 나타내고 있다. 300°C에 4시간 노출된 보강근의 휨강도는 원강도의 27%에 불과한 것으로 나타났다.

$$\begin{aligned}
 F_{strn} &= 100 \quad (20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C}) \\
 F_{strn} &= -18.1t + 93 \quad (0 \text{ hr} < t \leq 4 \text{ hr}, T = 300^{\circ}\text{C})
 \end{aligned} \quad (6)$$

그림 15. 노출시간과 온도에 따른 휨강도 변화

그림 16. 노출시간과 온도에 따른 휨강성 변화

고온노출에 따른 보강근의 휨강성을 고찰하였다. 강성은 최대하중시 변위의 70%인 4 mm에 해당하는 하중(kN)을 사용하여 강성을 산정하여 고찰하였으며, 그림 16은 고온노출에 따른 강성의 변화를 나타내고 있다. 강성변화 분석결과 휨강도의 변화와 매우 유사한 것으로 나타났으며, 이 결과를 근거로 식 (7)과 같은 휨강성의 평가식을 제안할 수 있다.

$$F_{strm} = 100 \quad (20^{\circ}\text{C} \leq T \leq 200^{\circ}\text{C})$$

$$F_{strm} = -19.0t + 100 \quad (0 \text{ hr} < t \leq 4 \text{ hr}, T = 300^{\circ}\text{C}) \quad (7)$$

그림 13을 통해 CFRP 보강근의 휨성능에서 임계온도는 계면전단강도와 동일하게 약 250°C임을 알 수 있으며, 300°C의 노출온도에서 임계노출시간은 식(7)을 통해 2.6시간임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 국내생산의 CFRP 보강근을 고온전기로 사용하여 노출온도와 노출시간을 변수로 하여 고온에 노출시킨 후 중량의 변화, 계면전단강도 및 강성, 휨강도 및 휨강성의 변화를 고찰하였다. 본 실험적 연구를 통해 획득된 결과를 다음에 요약하였다.

- 1) CFRP 보강근의 중량, 계면전단강도 및 휨강도 실험의 결과를 분석한 결과, 노출온도 뿐 아니라 노출시간에 의하여 큰 성능의 변화를 나타내었다. 이로부터 노출시간도 매우 중요한 열손상의 인자임을 확인하였다.
- 2) 400°C에서는 보강근의 연소되는 것으로 파악되었으며, 200°C~300°C의 온도범위에서 큰 성능 저하를 나타내었다. 노출시간의 영향은 계면전단강도 및 강성, 휨강도 및 강성의 저하가 미세한 차이를 나타내었는데, 계면전단강도 및 강성의 경우 1시간 이하의 노출에서는 성능 저하가 무시할 정도인 반면, 휨강도 및 강성은 0.5시간~4시간의 노출시간동안 지속적이며, 연속적인 성능저하 양상을 나타내었다.
- 3) 다양한 노출온도 및 노출시간에 따른 실험결과를 근거로 300°C의 온도에 노출되었을 때, CFRP 보강근의 계면전단과 휨성능비를 노출시간에 대하여 평가할 수 있는 1차 선형평가식들을 제안하였다. 또한 이를 이용하여 원성능의 50%가 저하되는 예측된 임계노출시간은 계면전단의 경우 2.5시간, 휨성능의 경우 2.6시간인 것으로 나

타났다. 물론 이와 같은 결론은 본 연구에서 실험한 보강근(탄소섬유와 비닐에스터로 구성되며, 섬유의 체적비가 70%인 공칭직경 9.5mm)에만 해당된다. 그러나, 본 논문의 결과는 가장 전형적이며, 일반적으로 사용되는 보강근 종류와 직경에 대한 것으로서, 실용적인 측면에서는 의미가 크다고 판단된다.

- 4) CFRP 보강근의 더욱 범용적인 손상평가 모델의 개발을 위하여 다양한 종류의 레진매트릭스 종류, 보강근의 직경을 변수로 한 추가적인 실험이 필요하다.

감사의 글

이 논문은 2010학년도 경성대학교 신임교수정착연구비에 의하여 연구되었음.

참고문헌

- 문도영 (2010) 표준화재곡선을 이용한 잔존부착강도 평가 간략방법 제안, **한국방재학회논문집**, 한국방재학회, 제10권, 제5호, pp. 41-47.
- 심종성, 박석균, 문도영, 박성재 (2004) Basalts 섬유보강재의 내구성 및 휨보강성능에 관한 연구, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제24권, 제4호, pp. 673-681.
- Al-zahrani, M.M., Al-dulaijan S.U., Al-idi, S.H., and Al-mehthel, M.H. (2007) High temperature effect on tensile strength of GFRP bars and flexural behavior of GFRP reinforced concrete beams, *FRPRCS-8*, Patras, Greece
- Bisby, L.A. and Kodur, V.K.R. (2007) Evaluating the fire endurance slabs reinforced with FRP bars: Considerations for a holistic approach, *Composites Part B*, Vol. 38, pp. 547-558.
- Robert, M. and Benmokrane, B. (2010) Behavior of GFRP Reinforcing bars subjected to extreme temperature, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 14, No. 4, pp. 353-360.
- Saffi, M. (2002) Effect of fire on FRP reinforced concrete members, *Composite Structures*, Vol. 58, pp. 11-20.
- Wang, Y.C., Wong, P.M.H. and Kodur, V. (2007) An experimental study of the properties of fibre reinforced polymer(FRP) and steel reinforcing bars at elevated temperatures, *Composite Structures*, Vol. 80, pp. 131-140.
- Wang, Y.C. and Kodur, V. (2005) Variation of strength and stiffness of fibre reinforced polymer reinforcing bars with temperature, *Cement & Concrete Composites*, Vol. 27, pp. 864-874

© 논문접수일 : 11년 10월 31일
 © 심사의뢰일 : 11년 11월 03일
 © 심사완료일 : 11년 11월 18일