

FRP보강근-콘크리트보의 휨성능과 휨설계식의 평가 연구

A Study on the Evaluation of Flexural Capacity and Design Equation of FRP Reinforcement-Concrete Beams

고 동 우*
Ko, Dong Woo

Abstract

In this paper, the flexural capacity equation of FRP-bar reinforced concrete beams was verified by comparing the experimental results and flexural capacity obtained according to the ACI procedure. And, also the economic feasibility of FRP-bar reinforced concrete beams was analyzed by comparing nominal moment capacity of beams. The results of analysis were as follows, 1) GFRP concrete beams have lower flexural performance than reinforced concrete beams, whereas CFRP concrete beams have similar flexural performance to reinforced concrete beams under the same reinforcement ratio 2) Although the design moment increased as the compressive strength of concrete increased, the flexural performance of GFRP reinforced concrete beams was found to be lower than the reinforced concrete beams for all reinforcement ratios.

Keywords : FRP bar, design moment, reinforcement ratio, flexural capacity

1. 서론

지난 수 십 년간 전 세계적으로 도시화와 공업화가 빠른 속도로 진행되면서 발생한 이산화탄소의 배출은 지구의 환경을 위협하는 중요한 요인으로 인식되고 있으며, 이를 해결하기 위한 각국의 노력이 지속되고 있다. 우리나라도 2021년 “지속가능한 녹색사회 실현을 위한 대한민국 2050 탄소중립전략”을 통해 2030년까지 탄소 배출량을 40%까지 줄이고, 2050년에는 탄소중립을 달성한다는 로드맵을 발표하기에 이르렀다. 세계적으로 건설산업에서 배출하는 탄소량은 전체 탄소배출량의 약 10%정도에 해당하는 것으로 알려져 있어 건설분야에서도 탄소배출량을 줄이기 위한 노력이 필요한 시점이다.

건설 분야에서 탄소배출량을 줄이기 위한 노력의 일환으로 섬유복합체(Fiber Reinforced Polymer,

FRP)를 철근의 대체재 활용하는 방안이 제시되었다. 이 경우 철근 생산과정에서 발생하는 막대한 탄소배출량을 줄일 수 있을 뿐만 아니라, 구조물의 경량화와 내구성 확보에서 크게 유리할 수 있다. 철근 대체재로 거론되는 섬유복합체는 섬유 성분의 재료에 따라 탄소섬유(CFRP), 아라미드섬유(AFRP), 바잘트섬유(BFRP), 유리섬유(GFRP) 등이 있으며, 이를 철근 대체재로 활용하기 위한 연구들이 수행되어 왔다.

캐나다를 비롯한 북미 지역은 눈이 자주 내리기 때문에 도로 또는 교량의 마모나 손상이 빠르게 진행되어 유지관리 비용이 증가하게 되어 철근을 FRP보강근으로 대체하고자 하는 시도가 이루어져 왔다.^{1),2),3)} 그리고, ACI 440위원회에서 FRP보강근-콘크리트구조를 설계하기 위한 설계지침⁴⁾을 내놓은 바 있으며, 우리나라도 이를 참고하여 2016년 콘크리트학회에서 FRP보강근 구조 설계지침⁵⁾이 발간되었다. 특히, FRP보강근-콘크리트구조의 휨성능평가와 관련하여 Getzlaf(2012)와 Issa et al. (2011)는 콘크리트압축강도와 보강근의 최대강도를 변수로 FRP보강근-콘크리트보의 휨거동을 실험적으로

* 정희원, 제주대학교, 건축학부, 교수, 공학박사
Department of Architectural Engineering, Jeju National University
Tel: 064-754-3708 Fax: 064-757-8691
E-mail: dongwko@jejunu.ac.kr

파악하였다.^{6),7)} Goldston et al.⁸⁾은 2016년 6개의 휨실험체를 제작하여 FRP보강근의 종류와 보강근비에 따른 휨거동을 비교하였다. 국내에서도 2005년 이상호와 안상호⁹⁾가 FRP보강근을 주근으로 사용한 콘크리트보의 휨거동에 대한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 ACI 440.1R-06⁴⁾기준식에 따라 구한 FRP보강근-콘크리트보와 철근콘크리트보의 휨거동을 비교 분석한 후, 기 수행된 FRP보강근-콘크리트 보의 휨실험 결과와 기준에 따른 성능평가 결과를 비교함으로써, FRP보강근-콘크리트구조의 경제성과 ACI기준에서 제시하는 설계식의 적절성을 평가하고자 한다.

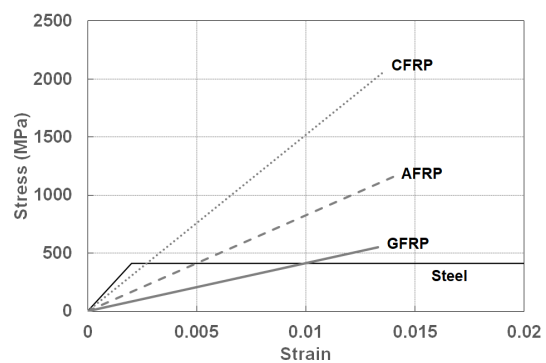
2. FRP보강근-콘크리트보의 휨거동

2.1 RC보와 FRP보강근-콘크리트보의 비교

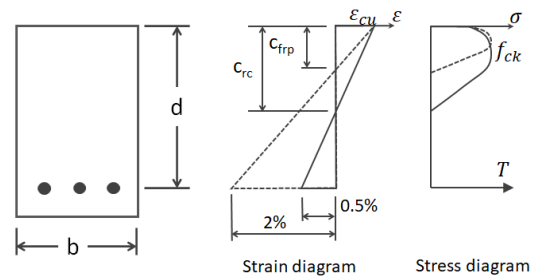
FRP보강근의 경우 철근과는 달리 부식이 발생하지 않기 때문에 철근콘크리트 구조보다 피복두께를 줄일 수 있으며, 보강근에 부식이 발생하지 않기 때문에 구조물의 내구성을 높일 수 있는 장점이 있다. 반면, <Fig. 1>에서 보듯이 FRP보강근은 파괴에 이르기까지 선형 탄성거동을 하여 최대강도에 도달한 후 바로 파단되는 취성적인 특징을 갖고 있다. FRP보강근의 최대 변형률은 0.013~0.014로서, 항복 후 항복마루를 거쳐 변형도 경화역까지 이르러 파단되는 철근의 최대변형량의 10% 정도에 불과하다. 그 결과 FRP보강근-콘크리트 구조의 휨설계개념은 철근의 항복을 가정하여 부재의 휨성능을 평가하는 철근콘크리트구조와는 확연히 다를 수 밖에 없다.

FRP보강근과 철근의 단면적이 동일하고, FRP보강근의 탄성계수가 철근 탄성계수의 1/4라고 가정할 때, 철근콘크리트보와 FRP보강근-콘크리트보의 변형률 다이어그램과 응력다이어그램을 <Fig. 2>에서 비교하고 있다. <Fig. 2>의 점선은 FRP보강근-콘크리트보의 변형률과 응력 다이어그램이고, 실선은 철근콘크리트보의 변형률과 응력다이어그램이다. FRP보강근의 탄성계수가 철근 탄성계수의 1/4에 불과하기 때문에 <Fig. 2>에서 보듯이 철근과 동일한 응력을 발휘하기 위한 FRP보강근의 요구 변형률은 철근의 4배에 해당하게 되고, 중립축의 높이는 c_{rc} 에서 c_{frp} 로 감소하게 된다. 이는 보의 단

면에서 압축을 받는 영역의 감소를 초래하여 그에 상응하는 FRP보강근의 응력 또한 다소 감소하는 결과를 초래하게 된다. 이 그림에서 보듯이 FRP보강근이 철근과 동일한 성능을 발휘하기 위해서는 철근보다 더 큰 변형이 발생하여야 하기 때문에 보강근과 콘크리트 사이의 전단응력이 증가하여 부착균열이 발생하고, 이는 부착성능의 저하와 처짐 증기를 초래할 수 있다. 또한 FRP보강근과 콘크리트 사이의 부착 미결립은 휨의 기본조건인 평면유지법칙을 유지하기 어렵게 하면서 FRP보강근에 작용하는 인장력의 감소를 초래할 수 있다.



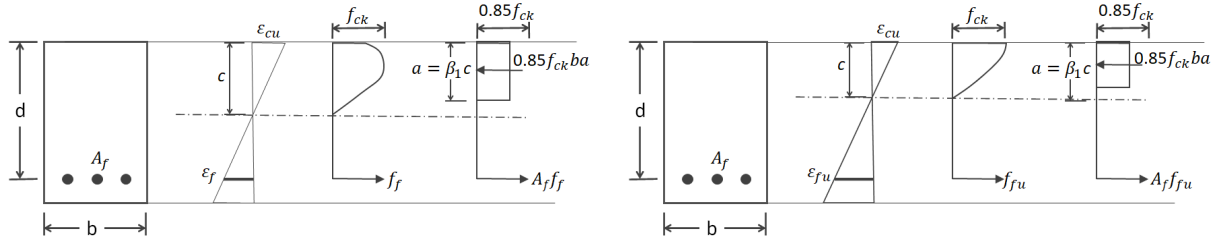
<Fig. 1> Stress-Strain curves of Steel and FRP



<Fig. 2> Strain distribution for GFRP and RC section

2.2 FRP보강근-콘크리트보의 휨설계식

FRP보강근의 설계와 관련한 식은 미국의 ACI에서 제정한 ACI 440.1-R06⁴⁾과 캐나다의 CSA S806-12¹⁰⁾이 대표적이며, 그 외에 북미 각 지역마다 도로교 설계기준과 시방서가 있다. 본 연구에서는 ACI기준에서 제시한 방법 따라 철근콘크리트보와 FRP보강근-콘크리트보의 휨성능을 비교하였다. ACI기준에서 제시하는 사각형 단면을 가진 FRP보강근-콘크리트 보의 보강비(ρ_f)와 균



(a) Compression failure of concrete (b) Fracture failure of FRP bar
 <Fig. 3> Strain and stress profile for ultimate state of FRP reinforced bar concrete beam

형보강비(ρ_{fb})는 식(1)과 식(2)와 같다.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd} \quad (1)$$

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2)$$

여기서, A_f 는 보강근의 단면적, b 와 d 는 각각 보의 폭과 유효깊이, β_1 은 등가응력블럭계수, f_{ck} 와 ϵ_{cu} 는 각각 콘크리트의 압축강도와 최대변형률, f_{fu} 와 E_f 는 각각 FRP보강근의 최대강도와 탄성계수이다.

FRP보강근-콘크리트보의 휨성능을 평가함에 있어 FRP 보강비가 균형보강비보다 큰 경우($\rho_f > \rho_{fb}$), <Fig. 3(a)>에 나타난 변형률 적합조건과 내력 평형식에 근거하여 공칭 휨강도를 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$M_n = A_f f_f \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (3)$$

여기서, $a = \frac{A_f f_f}{0.85 f_{ck} b}$ 와 같이 구할 수 있으며, 파괴 시 FRP보강근의 응력(f_f)은 식 (4)와 같이 구하되 FRP 보강근의 최대강도(f_{fu})를 초과할 수 없다.

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85\beta_1 f_{ck}}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \quad (4)$$

FRP보강비가 $\rho_f < \rho_{fb}$ 인 경우, 파괴 시 보의 변형률과 응력다이아그램은 <Fig. 3(b)>와 같으며, 식 (5)와 같이 공칭 휨강도를 계산할 수 있다.

$$M_n = A_f f_{fu} \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right) \quad (5)$$

여기서, $c_b = \left(\frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) d$ 이다.

또한, 철근콘크리트보와 마찬가지로 FRP보강근 콘크리트보도 균열발생 후 구조물의 급격한 파괴를 방지하기 위해 최소철근비 규정을 식 (6)과 같이 두고 있다.

$$\rho_{f,\min} = 0.41 \frac{\sqrt{f_{ck}}}{f_{fu}} \geq \frac{2.3}{f_{fu}} \quad (6)$$

2.3 FRP보강근-콘크리트보의 휨파괴양상

철근의 항복강도는 설계 시 주어지지만, FRP보강근의 경우 섬유유지 종류와 제조사에 따라 큰 차이를 나타낸다. 따라서, FRP보강근의 휨성능을 구할 때, 보강근의 설계 인장강도는 FRP의 종류와 FRP 보강근이 사용된 환경의 영향을 반영하여 구한다. 철근콘크리트구조의 경우 철근의 항복을 유도하는 과소철근에 의한 인장파괴를 권장하지만, FRP보강근-콘크리트 구조에서는 FRP보강근이 항복하지 않기 때문에 보강근의 양에 상관없이 취성파괴에 이른다. ACI 440.1-R06⁴⁾에 따르면, 만약 FRP 보강비가 균형 보강비보다 작으면($\rho_f < \rho_{fb}$), FRP가 과도한 갑작스런 파괴를 초래하기 때문에 FRP보강근 구조에서는 균형보강근비보다 낮은 때는 낮은 강도감소 계수 0.55를 적용하는 반면, 보강근비가 균형보강비보다 크면($\rho_f > \rho_{fb}$), 압축측 콘크리트가 파괴되므로 강도감소 계수를 압축파괴에 해당하는 0.65를 적용해야 한다.

우리나라의 FRP 구조설계기준⁵⁾에서는 대표적인 GFRP, AFRP, 그리고 CFRP의 물성을 <Table 1>과 같이 나타내었으며, 각각의 응력-변형률 곡선은 <Fig. 1>과 같다. FRP보강근의 최대강도는 섬유의 종류에 따라 철근의 1.3배부터 5배까지 큰 반면 탄성계수는 철근의 0.2배에서 0.7배 정도에 불과하였다. 그리고 최대강도 일 때 변형률은 철근의 항복변형률의 6.4배 정도로 FRP 종류에 상관없이 비슷하였다. <Table 1>의 우측열에는

<Table 1> Material properties of Steel and FRP bars

Reinforcement Type	f_y or f_{fu} (MPa)	E_f (GPa)	ϵ_{fu} (mm/mm)	ρ_b or ρ_{fb} (%)
Steel	414 (1.0)	200 (1.0)	0.002 (1.0)	3.6 (1.0)
GFRP	552 (1.33)	41.4 (0.21)	0.0133 (6.44)	0.78 (0.22)
AFRP	1,172 (2.83)	82.7 (0.41)	0.0142 (6.85)	0.35 (0.10)
CFRP	2,070 (5.00)	152 (0.76)	0.0136 (6.58)	0.2 (0.06)

콘크리트 압축강도가 34.5MPa일 때 균형보강근비를 정리하였는데, 철근콘크리트보에서 균형철근비는 3.6%인 반면, FRP보강근의 균형철근비는 FRP의 종류에 따라 0.2%~0.78%에 걸쳐져 철근콘크리트구조의 균형철근비의 0.06배에서 0.22배의 수준으로 크게 낮았다. GFRP보강근의 경우 최대강도는 철근과 거의 비슷하지만, 탄성계수가 철근의 1/5수준에 불과하기 때문에 균형보강근 상태일 때 보강근의 변형률은 철근의 4배가 되고, 이로 인해 중립축의 높이가 높아져 압축영역면적의 감소를 초래하게 되고, 이는 요구 철근량의 감소로 나타나게 된다. 반면, CFRP보강근은 탄성계수는 철근과 비슷한 수준이나 최대강도가 철근보다 5배 크다. 이는 균형상태일 때 보강근의 변형률은 동일하여 그에 상응하는 응력이 비슷하지만, 최대강도가 철근의 항복강도보다 5배 크기 때문에 요구철근량이 현저히 줄어들게 된다. GFRP와 CFRP의 경우를 볼 때, FRP보강근의 균형보강근비는 철근콘크리트 구조의 균형철근비보다 낮게 형성됨을 알 수 있다.

3. 힘거동 비교

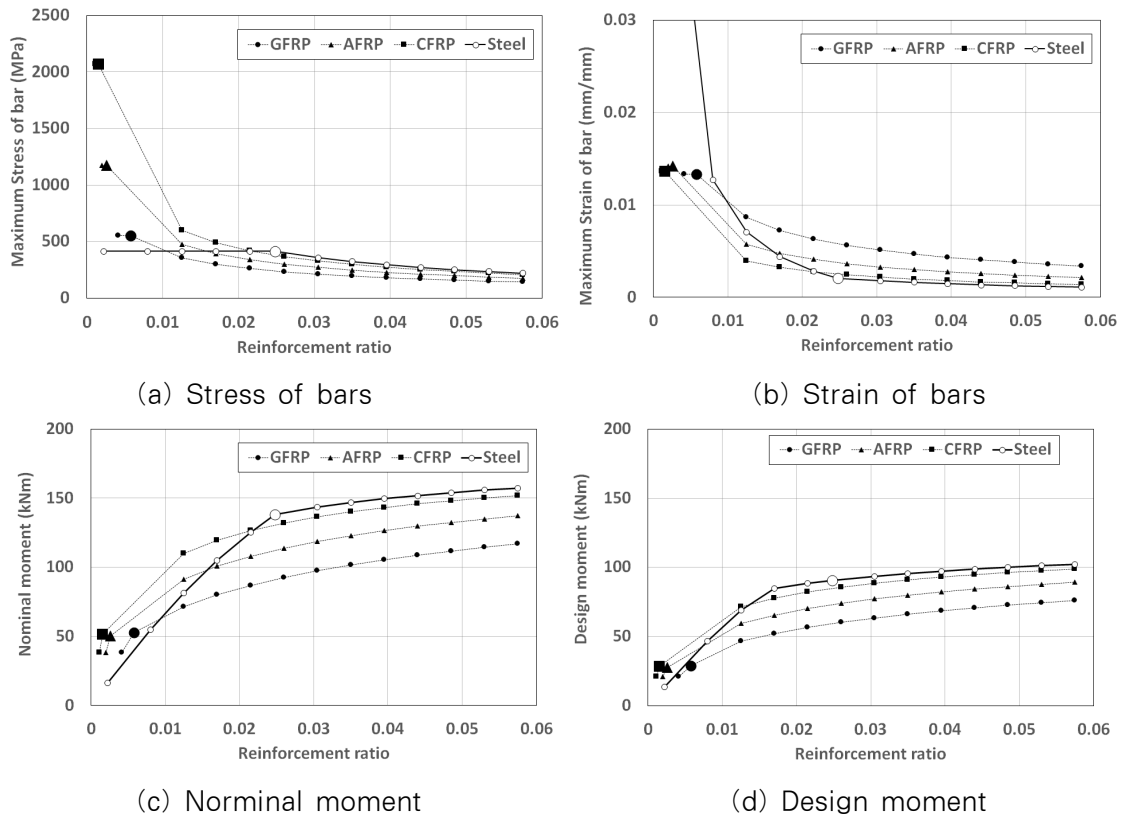
3.1 보강근의 종류에 따른 휨성능 비교

FRP 보강근-콘크리트 보의 보강근량에 따른 휨성능을 비교하기 위해 폭과 깊이는 200×300(mm)이면서 콘크리트 압축강도 24MPa인 보가 철근, GFRP, AFRP, CFRP보강근으로 보강되었을 때, 보강근비의 변화에 따른 보강근의 응력과 변형률, 보의 공칭모멘트와 설계모멘트를 <Fig. 4>에서 비교하였다. 이때 보강근의 물성은 <Table 1>의 값을 적용하였으며, 식(3)과 식(5)를 사용하여 공칭모멘트를 구하였다. <Fig. 4>의 빈 원형 기호가 철근콘크리트구조이고, 사각기호, 삼각기호 원형 찬기호는 각각 CFRP, AFRP, GFRP보강근을 나타낸다.

<Fig. 4(a)>는 보강비에 따라 보강근에 작용하는 응력의 변화로서, 철근에 발생하는 응력은 균형철근비를 넘어서면서 철근에 작용하는 응력이 감소하였다. 반면 선형탄성거동을 하는 FRP보강근은 철근비가 작을수록 보강근에 작용하는 응력이 급격히 증가하였는데, 탄성계수가 높은 CFRP보강근에서 가장 큰 응력이 발생하고, 보강근비가 증가함에 따라 보강근에 발생하는 응력은 지속적으로 감소하였다. GFRP보강근 보에서는 보강근비가 1%일 때 철근보다 FRP보강근의 응력이 작았으며, CFRP보강근-콘크리트보는 보강근비가 2.3%를 넘어서면서 보강근의 응력이 철근보다 낮게 나타났다. 특히, AFRP와 CFRP는 보강근비 1%를 넘어서면서 보강근에 작용하는 응력이 최대응력의 1/2수준 미만으로 떨어졌다.

<Fig. 4(b)>는 보강비에 따른 보강근의 변형률의 변화이다. 균형철근비보다 클 때는 철근이 항복하지 않은 상태이기 때문에 동일한 보강근비에서 철근의 변형률이 가장 작지만, 균형철근비보다 작으면 철근이 항복하면서 변형률이 급격하게 증가하는 반면 FRP보강근은 선형거동을 하기 때문에 변형률의 증가가 급격하게 발생하지는 않았다.

<Fig. 4(c)>는 주어진 단면의 보강근의 종류에 따른 공칭모멘트를 비교하고 있다. 탄성계수가 가장 낮은 GFRP보강근-콘크리트보의 공칭모멘트가 가장 낮았으며, CFRP보강근-콘크리트보는 보강근비 2% 미만인 영역에서는 철근콘크리트보보다 공칭모멘트가 컸으나, 2%를 넘어서면서 철근콘크리트보와 공칭모멘트가 비슷하였다. 공칭모멘트에 강도감소계수를 적용한 설계모멘트를 <Fig. 4(b)>에서 비교하였다. 철근콘크리트구조는 최외단 철근의 변형률에 따라 0.65~0.85의 강도감소계수를 적용하지만, FRP보강근-콘크리트구조는 보강근의 항복에 의한 연성거동을 하지 않기 때문에, 균형보강근비를 기준으로 보강근비에 따라 0.55~0.65의 강도감소계수를 적용하여야 한다. 따라서, <Fig. 4(d)>에서 보듯



〈Fig. 4〉 Variation of properties of beams for FRP bar ratio

이 FRP보강근-콘크리트보의 설계모멘트는 철근콘크리트보의 설계모멘트보다 현저히 떨어졌다. 설계모멘트 측면에서 본다면 GFRP보강근을 사용하여 일반철근과 동일한 배근을 할 경우 모든 보강근비에 대해 설계모멘트가 철근콘크리트보에 미치지 못하였으며, CFRP보강근을 사용한다면, 보강근비가 1.5%정도에 이를 때까지는 CFRP보강근-콘크리트보의 설계모멘트가 철근콘크리트보의 설계모멘트보다 크지만 그 이상의 보강근이 배근 되면 철근콘크리트보 보다 휨성능이 떨어졌다. FRP보강근의 종류에 따른 FRP보강근-콘크리트보의 휨성능을 비교하면 CFRP보강근-콘크리트보를 제외한 GFRP와 AFRP보강근은 철근콘크리트구조보다 설계모멘트가 낮은 것으로 나타났다.

3.2 콘크리트 강도에 따른 설계모멘트 비교

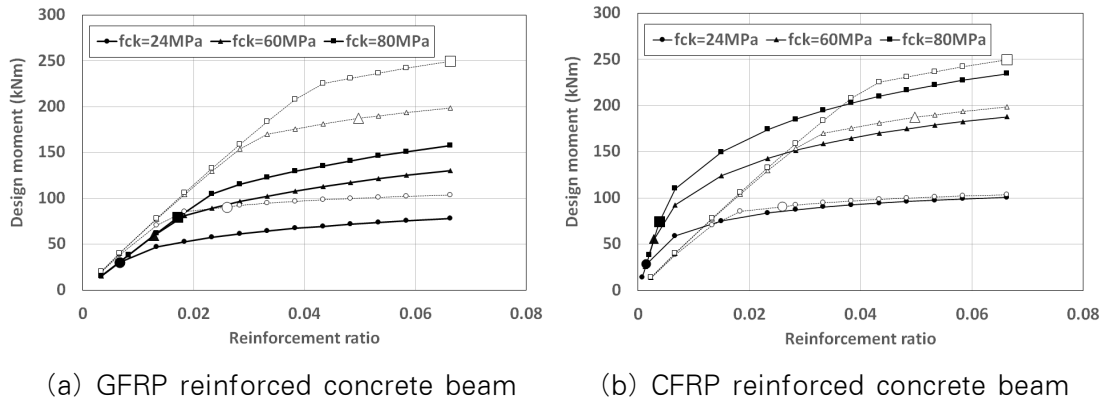
GFRP보강근-콘크리트보와 CFRP보강근-콘크리트보의 보강근비와 콘크리트 강도에 따른 FRP보강근-콘크리트구조의 휨거동을 〈Table 2〉와 〈Fig. 5〉에서 비교하였다. 이때 사용된 철근과 FRP의 물성은 〈Table 1〉과

같다. 콘크리트의 압축강도는 일반적으로 건축구조물에서 많이 사용되는 강도인 24MPa와 고강도에 해당하는 60MPa와 80MPa를 대상으로 하였다. 그림에서 균형보강근비에 해당하는 철근비는 다른 곳보다 큰 기호로 표시하였으며, 〈Table 2〉에 각각의 경우에 대한 균형보강근비를 정리하였다. 콘크리트의 강도가 증가함에 따라 균형보강근비가 증가하였는데, 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 철근콘크리트구조는 2.6%부터 6.63%까지 증가하였고, GFRP와 CFRP보강근-콘크리트보의 균형보강근비는 각각 0.67%부터 1.71%와 0.15%부터 0.39%까지 증가하였다.

콘크리트의 강도가 24MPa, 60MPa, 그리고 80MPa 일 때 공칭모멘트의 크기를 〈Fig. 5〉에서 비교하고 있다. 속이 찬 기호는 FRP보강근-콘크리트보의 설계모멘트이고 속이 빈 기호는 철근콘크리트보의 설계모멘트이다. GFRP보강근의 경우 모든 보강근비에 대해서 콘크리트의 압축강도에 상관없이 철근콘크리트보보다 설계모멘트가 낮은 것으로 나타났다. CFRP보강근-콘크리트구조는 통상 건축구조물의 수평부재에 많이 사용되는

〈Table 2〉 Comparison of balanced bar ratio

	$f_{ck} = 24\text{MPa}$	$f_{ck} = 60\text{MPa}$	$f_{ck} = 80\text{MPa}$
Steel	0.0260 (1.0)	0.0497 (1.0)	0.0663 (1.0)
GFRP	0.0067 (0.26)	0.0128 (0.26)	0.0171 (0.26)
CFRP	0.0015 (0.06)	0.0029 (0.06)	0.0039 (0.06)



〈Fig. 5〉 Comparison of Design moment for GFRP and CFRP reinforced concrete beam

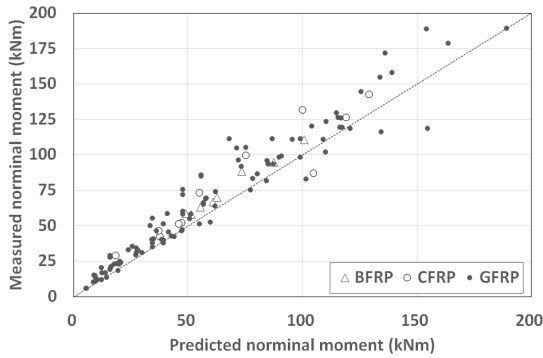
24MPa의 압축강도를 갖는 콘크리트로 만들 경우 1%미만의 보강근비일 때 FRP보강근-콘크리트보의 설계모멘트가 철근콘크리트보보다 큰 것으로 나타났으며, 그 이후에는 거의 비슷한 수준의 설계모멘트를 보여주었다. 콘크리트의 강도가 60MPa과 80MPa로 증가하면, FRP 보강근-콘크리트보의 설계모멘트는 보강근비 1.25%일 때 철근콘크리트보의 설계모멘트보다 최대 1.67배와 2.07배 큰 것으로 나타났다.

이상으로 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 설계모멘트는 증가함에도 불구하고 GFRP보강근-콘크리트구조는 모든 보강근비에 대해 철근콘크리트보의 설계모멘트비보다 낮은 것으로 나타났으며, CFRP보강근-콘크리트보에서는 보강근비가 1.25%일 때, FRP보강근 콘크리트보의 설계모멘트가 철근콘크리트의 설계모멘트보다 가장 큰 것으로 나타났다.

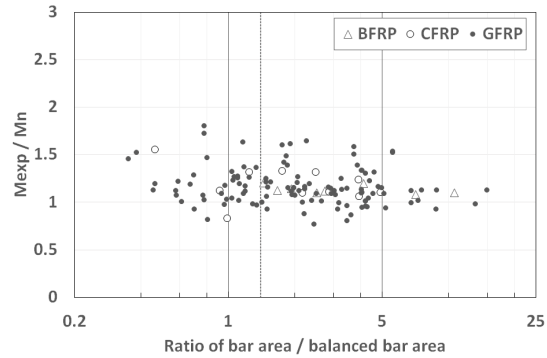
4. 휨실험 결과와 비교

기존 수행된 FRP보강근-콘크리트구조 보에 대한 134개 휨 실험체에 대한 실험결과 나타난 모멘트와 구조설계기준에서 예측한 공칭모멘트를 비교함으로써 구조설계기준에서 제시한 휨성능식의 적절성을 검토하였다. 총 134개의 실험체 가운데 GFRP보강근을 사용한

실험체는 115개, BFRP보강근을 사용한 실험체는 8개이고 CFRP보강근을 사용한 실험체는 11개로서, 86%의 실험체가 GFRP보강근-콘크리트 보에 대한 실험으로 이루어졌다. 〈Fig. 6〉은 FRP구조설계기준에 따라 구한 각 실험체의 휨강도(x 축)와 실험결과 측정된 보의 휨강도(y 축)사이의 상관관계이다. 속이 찬 원형기호는 GFRP 보강근을 사용한 실험체이고, 속이 빈 원형은 CFRP 보강근을 사용한 실험체, 그리고 속이 빈 삼각형은 BFRP 보강근을 사용한 보이다. 전체적으로 보강근의 종류에 상관없이 실험값이 구조설계기준에 따라 구한 휨강도보다 큰 경향을 보여주고 있다. 실험결과 나타난 휨강도와 구조설계기준에 따라 구한 공칭모멘트의 비의 평균은 1.162이고, 표준편차는 0.192으로 나타나 실험값이 약 16%정도 큰 것으로 나타났다. 실험결과 나타난 휨성능과 공칭모멘트의 비율을 균형보강근비에 대한 보강근비의 비율(ρ_f/ρ_{fb})에 따라 〈Fig. 7〉에 나타내었다. 균형보강근비에 대한 보강근비의 비율(ρ_f/ρ_{fb})이 1보다 작을 때, 1과 1.4 사이일 때, 그리고 1.4보다 클 때 실험값과 공칭모멘트 비율(M_{exp}/M_n)의 평균과 표준편차를 〈Table 3〉에 정리하였다. 균형보강근비에 대한 보강근비의 비율(ρ_f/ρ_{fb})이 1보다 작을 때의 공칭강도비의 평균은 1.196으로 작지만, 표준편차가 0.284로 커서 변동



〈Fig. 6〉 Comparison of predicted and measured moment



〈Fig. 7〉 Ratio of measured moment/predicted moment for the ratio between bar area and balanced bar area

〈Table 3〉 Comparison of the ratio of expected and measured capacity about reinforcement ratio

ρ_f / ρ_{fb}	M_{exp} / M_n	
	Average	Standard Deviation
$\rho_f / \rho_{fb} < 1.0$	1.196	0.257
$1.0 \leq \rho_f / \rho_{fb} < 1.4$	1.211	0.160
$1.4 \leq \rho_f / \rho_{fb}$	1.147	0.177
Total	1.162	0.192

성이 큰 것으로 나타났고, 균형보강근비에 대한 보강근비의 비율(ρ_f / ρ_{fb})이 1과 1.4 사이일 때 표준편차는 0.160으로 감소한 반면 평균값은 1.211로 증가하였다. 그리고 균형보강근비에 대한 보강근비의 비율(ρ_f / ρ_{fb})이 1.4보다 커서 콘크리트 압축과파가 되는 보강근비에 서 평균값과 표준편차는 각각 1.147과 0.177로 가장 작았다. 균형보강근비에 대한 보강근비의 비율(ρ_f / ρ_{fb})이 1.4보다 큰 구간에서 실험값의 편차가 다소 줄어들고 실험값과 휨성능의 차이가 감소한 것으로 보아, 기준에서 보강근비와 균형보강근비의 비율이 1.4를 기준으로 차이를 둔 것은 적절한 것으로 나타났다.

5. 결론

최근 들어 콘크리트구조물의 내구성을 확보하기 위한 방안으로 제시되는 FRP보강근-콘크리트구조의 휨거동과 휨설계식으로 구한 성능을 기존의 실험결과와 비교한 결과 다음과 같은 결론에 도달하였다.

(1) ACI 440R에 따라 GFRP, AFRP, CFRP보강근-콘크리트보의 보강근비에 따른 휨성능을 철근콘크리트보의 휨성능과 비교한 결과, GFRP보강근을 사용하면 대부분의 보강근비영역에서 GFRP보강근-콘크리트보의 휨성능이 철근콘크리트보의 휨성능보다 낮게 나타났으며, CFRP보강근 콘크리트구조는 보강근비 1.5%보다 낮을 때는 CFRP보강근-콘크리트보의 휨성능이 철근콘크리트보의 휨성능보다 큰 것으로 나타났다.

(2) 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 설계모멘트는 증가함에도 불구하고 GFRP보강근-콘크리트구조는 모든 보강근비에 대해 철근콘크리트보의 설계모멘트비보다 낮은 것으로 나타났으며, CFRP보강근-콘크리트보에서는 보강근비가 1.25%일 때, FRP보강근 콘크리트보의 설계모멘트가 철근콘크리트의 설계모멘트보다 가장 큰 것으로 나타났다.

(3) 설계식으로 부터 구한 공칭모멘트에 대한 기존 FRP보강근-콘크리트보의 휨실험결과 나타난 모멘트의 비를 비교한 결과, 실험결과가 평균과 설계식으로 부터 구한 공칭모멘트의 비의 평균은 1.196으로 약 20% 높은 것으로 나타났으며, 보강근비에 대한 균형보강근비율이 1.4를 넘어서면서 실험값과 공칭모멘트의 비율은 1.147로 떨어지면서 표준편차도 감소하였다.

감사의 글

이 논문은 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음. (과제번호 21CFRP-C163381-01)

References

1. El-S.alakawy, E., Benmokrane, B. and Desgagn, G., "Fibre-reinforced polymer composite bars for the concrete deck slab of Wotton Bridge" Canadian Journal of Civil Engineering, V30, 861-870, 2003
2. Denty, L., Nolan, S. and Propps, L., "Skyway South Rest Area Seawall Rehabilitation," 2ndInternational Workshop on GFRP bars for Concrete Structures, 2019
3. Cadenazzi, T., "The halls river bridge case study: constructibility, economical and sustainability aspects for an FRP reinforced concrete bridge," Ph. D Thesis of University of Miami, 2019.
4. ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Structural Reinforced with FRP Bars," American Concrete Institute, 2006
5. Korea Concrete Institute, "Design guide for FRP reinforced concrete structures," Korea Concrete Institute, 2019.
6. Getzlaf, D.D., "An Investigation into the Flexural Behaviour of GFRP Reinforced Concrete Beams," thesis submitted in conformity with the requirements for the degree of Master's of Applied Science Graduate Department of Civil Engineering University of Toronto, 2012
7. Issa, M.S., Metwally, I.M., Elzeiny, S.M., "Influence of fibers on flexural behavior and ductility of concrete beams reinforced with GFRP rebars," Engineering Structures Vol. 3 pp.1754-1763, 2011
8. Goldston, M., Remennikov, A., Sheikh, M., "Experimental investigation of the behaviour of concrete beams reinforced with GFRP bars under static and impact loading," Engineering Structures Vol. 113, pp.220-232, 2016
9. Lee, S.H., Ahn, S.H. "Flexural behavior of concrete beam members with longitudinal FRP reinforced rod reinforcement," Journal of Architectural Institute of Korea, Vol. 21, No. 1, pp.67-74, 2005
10. Canadian Standard Association(CSA), "Design and construction of building structures with fibre-reinforced polymers (CSA S906-12)," Canadian Standard Association, 2012

- Received : February 28, 2022

- Revised : March 10, 2022

- Accepted : March 10, 2022