CFRP Rebar로 보강한 콘크리트 보의 휨 거동

Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with CFRP rebars

이영학¹⁾ · 원동민²⁾ · 김민숙³⁾ · 김희철⁴⁾

Lee, Young Hak · Won, Dong Min · Kim, Min Sook · Kim, Heecheul

국문 요약 >> 철근의 부식을 해결하기 위해 철근의 대체 재료로 적용 가능한 FRP에 대한 연구의 적용성이 대두되었다. 그러나 취성적인 성질과 탄성계수가 낮은 단점을 가지고 있어, FRP rebar로 보강된 휨 부재의 사용성 평가 즉 처짐에 대한 연구가 필요하다. 본 연구에서는 보강비를 변수로 한, CFRP rebar로 보강된 콘크리트 보의 휨 실험을 수행하였다. 실험 결과, CFRP rebar로 보강된 실험체는 보강비가 증가함에 따라 내력 및 강성이 증가하는 양상을 보였으며, 철근 실험체와 동일한 단면성능을 발휘하기 위해서는 약 1.3배의 보강비가 요구되는 것으로 나타났다. 또한 유효단면2차모멘트에 대한 기존 제안식의 비교 결과, Bischoff & Scanlon이 제안한 식이 가장 정밀해에 가까운 처짐을 예측하였다.

주요어 CFRP, 보, 처짐, 보강비, 유효단면2차모멘트

ABSTRACT >> To address the problems caused by the corrosion of steel rebar, active research has recently been carried out on members where fiber-reinforced polymer (FRP) is used in place of rebar. As FRP bar is highly brittle and has a low modulus of elasticity, further research is needed on the evaluation of serviceability, in other words on the deflection of flexural concrete members reinforced with FRP rebars. Taking the reinforcement ratio as a variable, this paper analyzes the flexural capacity of concrete beams reinforced with CFRP rebar. The test results of specimens reinforced with CFRP rebar show an increase in stiffness and resisting force along with an increase in the reinforcement ratio. A reinforcement ratio of about 1.3 is needed for the member reinforced with CFRP rebar to show same section property of a steel member. Through a comparison for the value of an effective moment of inertia, the equation suggested by Bischoff & Scanlon predicted values closest to the actual results.

Key words CFRP, Beam, Deflection, Reinforcement ratio, Effective moment of inertia

1. 서론

철근콘크리트는 시공성, 경제성 등의 장점으로 폭넓게 사용되고 있으나 사용연한에 따른 철근 부식 문제는 구조물의 내구성 저하를 유발하게 된다. 이에 콘크리트 피복두께 증가 및 에폭시 도막처리 등 철근의 부식을 제어하기 위한 연구가 오래 전부터 수행되고 있으며 특히, 최근 들어 인장 강도가 우수하고 비부식성, 비자기성, 비전기성 등의 장점을

가지는 Fiber Reinforced Polymer(FRP)를 이용한 보강근이 철근의 대체 재료로써 부각됨에 따라 그에 따른 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 FRP는 철근과 다른 역학적 성질로 인하여 기존 철근 콘크리트에 대한 품질관리 기준 및 설계방법을 따를 수 없으며¹⁾ 특히 철근에 비해 낮은 탄성계수로 인하여 동일한 단면의 철근 콘크리트보다 더 큰 처짐이 발생시킴으로 처짐에 관련된 사용성이 중요한 검토 사항으로 대두되고 있다. 따라서 본 연구에서는 철근을 대체하여 보강근으로 사용하고자 하는 FRP 중, 국내에서 생산된 CFRP(Carbon Fiber Reinforced Polymer) 보강근이 적용된 콘크리트 보의 휨 성능을 평가하고자 하였다. 또한 부재의 처짐은 유효단면2차모멘트에 의해 산정되기 때문에 기존 유효단면2차모멘트 산정식에 대한 유효성을 평가하여 향후 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 설계 및 적용에 있어 기초적인 자료를 제공하고자 하였다.

¹⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 조교수

²⁾ 경희대학교 건축공학과 석사과정
(교신저자: dmwon@khu.ac.kr)

³⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 박사과정

⁴⁾ 정회원·경희대학교 건축공학과 교수

본 논문에 대한 토의를 2010년 4월 30일까지 학회로 보내 주시면 그 결과를 게재하겠습니다.

(논문접수일 : 2009. 8. 13 / 수정일 1차: 2009. 11. 17, 2차: 2009. 12. 7 /

게재확정일 : 2009. 12. 7)

2. 실험 계획

본 연구에서는 CFRP 보강근으로 보강된 보의 휨 거동 및 기존 유효단면2차모멘트 산정식의 유효성 평가를 위해 보강비를 변수로 한 실험체 총 6개를 제작하여 실험을 수행하였다.

2.1 실험 재료

1) 콘크리트

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계강도 27MPa로 설계하였으며, 이에 대한 배합 설계는 표 1과 같다. 실험체의 압축강도 측정을 위해 공시체(Ø150×300)를 KS F 2405의 기준에 따라 제작하여 압축강도 실험을 실시하였으며 측정 결과, 평균 25.1MPa이 나오는 것으로 나타났다.

2) 보강근

표 2와 같이 CFRP 보강 실험체의 주근으로 D8 및 D10의 CFRP 보강근을 사용하였으며 철근 보강근과 스트립에 D10 철근을 사용하였다. CFRP 보강근의 형태는 카본 섬유와 에폭시 수지로 구성되어 있으며, 총 단면적에 대한 섬유 면적 비는 75%이다. 보강근 표면에 나선리브 및 Sand Coating을 하여 부착강도를 증진시켰으며 이는 기존 연구자⁽²⁾에 의해 그 성능이 증명되었다. 보강근의 재료 물성치는 표 2에 나타내었다.

2.2 실험 변수

균형 보강비보다 작게 설계된 FRP 실험체는 기존 연구들을 통해 FRP 파단에 의해 취성 파괴됨이 밝혀졌다.⁽³⁻⁵⁾ ACI440.1R-06에서도 FRP의 취성적인 재료 특성으로 인한 갑작스러운 파괴를 방지하기 위해 그림 1과 같이 각 보강비에 따른 강도 감소 계수를 제안하고 있으며 FRP 보강근의

〈표 1〉 콘크리트 배합설계

설계 기준강도 (MPa)	W/B (%)	슬럼프 (mm)	단위재료량(kg/m ³)				
			물	시멘트	잔골재	굵은 골재	혼화제
27	45.7	150	176	385	812	929	1.93

〈표 2〉 보강근의 재료적 특성

rebar	직경 (mm)	단면적 (mm ²)	인장강도 (MPa)	탄성계수 (GPa)
CFRP	8	50	2542.3	143.1
	10	79		
Steel	10	79	400	200

〈그림 1〉 보강비에 따른 강도 감소 계수⁽¹⁾

취성적인 파괴에 비해 콘크리트의 압축파괴가 제한적이거나 마 파괴 징후를 보일 수 있으므로 균형보강비 보다 큰 보강비를 요구하고 있다.

따라서 본 연구에서는 균형 보강비 이상의 보강비를 가지는 실험체의 거동에 대해서만 다루기로 하였다. 균형보강비는 ACI 440.1R-06⁽¹⁾에 따라 식 (1)과 같이 계산된다.

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f'_c}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (1)$$

여기서, f'_c : 콘크리트의 압축강도,

f_{fu} : FRP 보강근의 설계 인장강도,

E_f : FRP 보강근의 탄성계수,

ϵ_{cu} : 콘크리트의 극한 변형률

실험체의 단면은 폭 200mm, 유효 깊이 360mm의 크기로 제작하였으며 피복 두께는 40mm로 설계하였다. CFRP 보강근의 부착강도에 따른 정착길이를 고려하여 실험체의 총 길이는 3980mm, 순경간은 3180mm로 설계하였다. 또한 휨 파괴를 유도하고 전단 파괴를 방지하기 위하여 모든 실험체의 지점부를 기준으로 D10 전단 보강근을 150mm 간격으로 배근하였으며, 가력 지점과 전단 보강근의 겹침으로 인한 콘크리트 압괴를 피하기 위해 중앙 가력부의 전단 보강근은 300mm 간격으로 배근하였다. 실험체 제원 및 배근 상세는 그림 2와 같으며, 실험체 일람을 표 3에 나타내었다.

〈그림 2〉 실험체 제원 및 배근 상세

〈표 3〉 실험체 일람

실험체명	보강근	콘크리트 압축강도	$\rho(\%)$		보강 설계
			실제	균형 (최소)	
C2D8	CFRP	25.1MPa	0.14	0.11	Over
C4D8			0.28		Over
C4D10			0.44		Over
C5D10			0.55		Over
S2D10	Steel		0.22	1.79	Under
S4D10			0.44	(0.29)	Under

*실험체 표기방법

보강근 갯수 (2EA)
C2D8
 보강근 직경 (8mm)
 보강근 종류 (CFRP)

〈그림 3〉 실험체 세팅

2.3 실험 방법

실험체는 그림 2와 같이 단순지지 상태에서 2점 가력하였고, 지지점에서 가력점까지의 거리를 1290mm(전단경간 비: 3.6), 두 가력점 사이의 거리를 600mm가 되도록 설계하였다. 하중은 용량 1000kN 오일잭(Oil Jack)을 사용하여 실험체 중앙부의 상부 프레임에 고정하여 가력하였다. 하중은 오일잭 하부에 설치한 로드셀(Load Cell)을 이용하여 측정하였으며, 변위는 실험체 중앙의 상부와 하부에 2개의 LVDT를 설치하여 두 개의 평균값을 사용하였다. 그림 3은 가력 전 실험체 세팅이 완료된 모습이다.

3. 실험 결과

3.1 파괴 및 균열 양상

실험을 통한 최대 하중, 최대 변위 및 파괴 형태를 표 4에 정리하였다. 실험 결과에서 볼 수 있듯이 CFRP 보강근으로 보강된 실험체의 경우, 모든 실험체가 균형 보강비보다 큰 보강비를 가지도록 설계되어 ACI 및 기존 연구에서 검증된 바와 같이 콘크리트 압축면의 압괴(Crushing)에 의해 최종

〈표 4〉 최대 하중 및 최대 변위

	최대 하중 (kN)	최대 변위 (mm)	파괴 형태
C2D8	149.0	72.8	Concrete Crushing
C4D8	197.5	45.4	Concrete Crushing
C4D10	189.5	36.9	Concrete Crushing
C5D10	213.8	27.9	Concrete Crushing
S2D10	50.2	6.4	Tension Failure
S4D10	97.4	10.3	Tension Failure

(a) Concrete Crushing

(b) Tension failure

〈그림 4〉 파괴 형태

파괴되었다.^{(1),(3-5)} 또한 최대 하중에서 콘크리트 압축면에 압축 균열이 발생하고, 이후에 하중이 감소하면서 급격한 변위 증가와 함께 압괴로 인한 콘크리트 박리가 발생하였다. 이는 균형 보강비보다 크게 설계된 콘크리트 부재가 파괴 전 파괴 징후를 보이며 제한적이거나 연성적으로 거동한 결과라고 판단된다. 철근이 보강된 실험체의 경우 인장 파괴되었으며 그림 4는 실험을 통해 나온 두 가지 파괴 형태이다.

모든 실험체에서 초기 중앙부 휨 균열 발생 후 순수 휨 구간 바깥쪽으로 균열이 확산되는 양상을 보였고, 콘크리트 인장 측에서 시작된 균열들이 압축면으로 진행되면서 콘크리트 압괴(Crushing) 또는 인장 파괴(Tension failure)로 최종 파괴에 도달하였다. 보강비가 큰 실험체가 보강비가 작은 실험체보다 좁은 간격의 균열이 많이 발생하였으나 보강비가 작은 실험체가 균열이 더 빠르고 크게 진전되었다.

또한 CFRP 보강근으로 보강된 실험체가 철근 보강 실험체에 비해 균열 간격이 좁게 나타났다. 이는 1차 균열이 발생된 이후에 1차 균열 사이에 2차 균열이 발생하는 인장강성 효과(Tension Stiffening Effect)에 의한 것으로 CFRP 보강근으로 보강된 실험체가 철근 보강 실험체에 비해 콘크

리트로 전이되는 낮은 부작응력으로 인해 인장강성 효과가 더 길게 지속되었기 때문으로 판단된다.^{(6),(7)} 그림 5는 각 변수에 따른 실험체의 균열을 나타낸다.

3.2 하중-변위 관계

CFRP 보강근 및 철근으로 보강된 콘크리트 보의 보강비 변화에 따른 하중-변위 관계는 그림 6에 나타내었다. CFRP가 보강된 모든 실험체에서 보강비와 관계없이 균열 발생 직후 초기 강성의 변화가 나타났으며, 최대 하중에 이르기까지 선형거동을 보인 후 최대 하중을 지나 급격히 하중이 감소하였다. 실험체 C2D8, C4D8, C4D10 및 C5D10은 모두 최종 파괴 전 콘크리트 압괴(Crushing)가 발생하고 이어 하중이 급격히 감소하면서 처짐량이 증가하였다. 이는 콘크리트와 CFRP 보강근 모두 취성적인 특성을 가지고 있기 때문으로 판단된다. 이후 내력을 짧은 순간 유지하며 압축측 콘크리트가 박리되는 파괴 징후를 보였다. 철근 보강 실험체는 최대 하중 이후, 내력을 유지한 상태로 변위만 증가하는 결과를 보였다.

그림 6 (a), (b)에서 보는 바와 같이 보강비의 증가에 따라 강성(기울기)과 내력(최대하중)이 증가하는 양상을 보였으며, 균열하중은 보강비 증가와 무관한 것으로 판단된다.

CFRP는 철근에 비해 낮은 탄성계수를 가지고 있기 때문에 철근에 비해 비교적 낮은 강성을 보인다. 이는 동일한 보

강비를 적용하였을 때 동일한 하중에서 더 큰 처짐이 발생되며 사용성에 영향을 미친다고 할 수 있겠다.

그림 7 (a)에서 볼 수 있듯이, 동일한 보강비를 사용한 C4D10은 S4D10에 비해 큰 내력을 발휘하지만, 낮은 강성

으로 인해 동일한 하중에서 처짐이 크게 나타났다. 동일한 처짐량을 갖도록 균열단면2차모멘트, I_{cr} 값이 유사한 두 실험체를 비교하여 그림 7 (b)에 나타내었다. 철근 보강 실험체 S2D10과 동일한 I_{cr} 값을 갖는 실험체 C4D8을 비교한 결과, 항복 이전 시점까지 동일한 강성을 갖는 것으로 나타났으며, CFRP의 보강비를 철근 보강비 대비 1.3배가량 증가시켰을 때, 동일한 단면 성능을 보이는 것으로 나타났다.

3.3 휨 균열 강도 및 휨 극한 강도

표 5는 실험 결과로부터 도출된 휨 강도를 기존의 휨 강도식과 비교하여 나타내고 있다. 표 5에서는 실험에서 균열이 처음 발생되기 시작하는 하중을 측정하여 균열 모멘트 M_{cr} 을 산정하였고, 최대 하중으로 극한 모멘트 M_u 를 산정하여 ACI440.1R-06에서 제시한 계산식⁽¹⁾의 결과와 비교하였다. ACI440.1R-06은 균열 모멘트 M_{cr} 과 극한 모멘트 M_u 를 식 (2)와 식 (3)과 같이 제안하고 있다.

$$M_{cr} = \frac{2f_r I_g}{h} \quad (2)$$

여기서, $f_r = 0.62\sqrt{f'_c}$: 파괴계수,

$$I_g = \frac{bh^3}{12} : \text{전단면2차모멘트,}$$

h : 보의 높이

$$\begin{cases} (\rho_f > \rho_{fb}), & M_u = \rho_f f_f \left(1 - 0.59 \frac{\rho_f f_f}{f'_c}\right) b d^2 \\ (\rho_f < \rho_{fb}), & M_u = \rho_f f_f \left(d - \frac{\beta_1 c_b}{2}\right) \end{cases} \quad (3)$$

여기서, ρ_f : 실험체의 보강비,

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f'_c}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \leq f_{fu},$$

f_{fu} : FRP 보강근의 설계 인장강도,

$\beta_1 c_b$: 등가응력블록의 깊이,

b : 보의 폭,

d : 보의 유효 깊이

최근 연구에 따르면, 사용하중 모멘트가 균열 모멘트보다 약간 높을 때, M_{cr} 값의 차이는 처짐 계산에 상당한 영향력이 있기 때문에 실험에 의해 얻어진 M_{cr} 값이 처짐에서 사용된다.^{(3),(8),(9)} 연구결과, 계산된 M_{cr} 값은 실험값과 0.81~1.22의 차이를 보였으며, M_{cr} 의 실험값과 계산값의 차이는 균열모멘트를 감소시키는 수축 잔류 응력과 실제 파괴 계수의 선천적 변이에 의해 설명될 수 있다.^{(10),(11)} 극한모멘트 M_u 값의 실험값에 대한 계산값의 비는 평균 0.82로 비교적 적은 오차를 나타냈으며, ACI 제안식이 정확한 예측을 하고 있다고 판단된다.

3.4 유효단면2차모멘트

앞서 언급했듯 FRP 보강근으로 보강된 콘크리트 보는 FRP의 낮은 탄성계수로 인하여 철근 콘크리트 보다 큰 균열폭과 처짐을 갖게 된다. 그러나 FRP는 비부식성 재료로써 환경에 의한 부식의 영향이 적기 때문에 철근과 달리 균열폭 보다는 처짐이 사용성 측면에서 보다 중요한 검토사항이라 할 수 있다.

전형적으로 강도가 부재 설계를 결정하는 철근 콘크리트 부재에서는 공칭 성능의 60%가 사용 하중으로 적용되는 것과 달리, FRP로 보강된 콘크리트 부재는 철근에 비해 낮은 강성을 갖기 때문에 공칭 성능의 30%가 사용하중으로 적용되어야 한다.^{(6),(12)} 따라서 본 연구에서는 FRP에 대해서는 사용 하중 $0.3P_u$ 에 대한, 그리고 철근에 대해서는 사용 하중 $P_u/1.7$ 에 대한 처짐값을 비교하여 나타내었다. 실험결과를 통한 유효단면2차모멘트와 기존 식에 대한 유효성 평가를 위해 Branson⁽¹³⁾, ACI440.1R-06⁽¹⁾과 Bischoff & Scanlon⁽¹²⁾의 제안식을 사용하였다. Branson의 제안식⁽¹³⁾은

〈표 5〉 균열 모멘트와 극한 모멘트 비교

	$M_{cr} (kN \cdot m)$		$\frac{(M_{cr})_{theo}}{(M_{cr})_{exp}}$	$M_u (kN \cdot m)$		$\frac{(M_u)_{theo}}{(M_u)_{exp}}$
	theoretical	experimental		theoretical	experimental	
C2D8	16.6	18.9	0.88	72.8	96.1	0.76
C4D8		18.6	0.89	96.7	127.4	0.76
C4D10		15.0	1.11	114.6	122.2	0.94
C5D10	18.5	22.9	0.81	124.3	137.9	0.90
S2D10	16.6	13.6	1.22	22.9	32.4	0.71
S4D10		15.3	1.08	54.2	62.8	0.86

일반적인 철근 콘크리트에서 사용되는 유효단면2차모멘트 계산식으로 식 (4)와 같다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (4)$$

$$\text{여기서, } I_{cr} = \frac{bd^3}{3} k^3 + n_f A_f d^2 (1-k)^2,$$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f,$$

$$n_f = \frac{E_f}{E_c}.$$

Branson의 식⁽¹³⁾은 보강비가 1%를 넘는 철근 콘크리트 부재에 대해서 처짐을 비교적 잘 예측해 왔으나, FRP의 낮은 탄성계수로 인해 일반적으로 보강비가 1%를 넘지 않는 FRP로 보강된 부재에 대해서는 강성을 지나치게 크게 보아 처짐을 과소평가하는 경향을 보였다.⁽¹²⁾

ACI440.1R-06의 제안식은 식 (5)와 같으며, 기존 연구자들의 실험 데이터를 기반으로 Branson의 식⁽¹³⁾에 감소계수 β_d 를 적용하였다.⁽¹⁾

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (5)$$

$$\text{여기서, } \beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right) \leq 1.$$

또한 Bischoff & Scanlon⁽¹²⁾은 유효단면2차모멘트 I_e 를 계산함에 있어서 가중치가 적용된 평균값 I_e 에 대한 I_g 의 영향을 감소시키도록 감소계수 β_d 를 정의하는 방법 대신에 강정보다는 연성의 평균값에 가중치를 적용하자는 아이디어로부터 다음과 같은 식 (6)을 제안하였다.^{(6),(12)}

$$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^2 \left[1 - \frac{I_{cr}}{I_g} \right]} \leq I_g \quad (6)$$

식 (4), (5), (6)을 사용하여 계산된 유효단면2차모멘트 값에 대해, 2점 가력된 실험체에 대한 사용 하중 $0.3P_u$ (CFRP) 및 $P_u/1.7$ (Steel) 하에서의 처짐값 δ 는 다음과 같

〈표 6〉 사용하중에서의 처짐량 비교

	처짐 δ (mm)			
	실험값	Branson	ACI440.1R-06	Bischoff & Scanlon
C2D8	5.9	1.20	2.57	3.84
C4D8	6.1	3.06	3.95	5.90
C4D10	7.2	5.31	5.33	7.40
C5D10	5.1	3.51	3.51	4.68
S2D10	2.1	0.94	0.94	1.85
S4D10	4.0	3.76	3.76	4.28

〈그림 8〉 실험값 및 이론값 비교 처짐 곡선

이 구할 수 있다.

$$\delta = \frac{Pa}{48E_c I_c} (3L^2 - 4a^2) \quad (7)$$

여기서, P : 작용 하중,

a : 전단 경간 (=1290mm),

L : 순경간 (=3180mm)

표 6과 그림 8에서 비교한 것처럼 Bischoff & Scanlon이 제안한 식⁽¹²⁾이 감소계수 β_d 없이도 ACI 440.1R-06에서 제안한 식⁽¹⁾보다 비교적 잘 예측하는 것으로 나타났다. ACI 440.1R-06의 제안식⁽¹⁾은 Branson의 식⁽¹³⁾이 FRP로 보강된 보의 강성을 지나치게 높게 평가하여 기존 연구자들의 데이터 분석을 통한 감소계수 β_d 를 적용하였지만, 여전히 강성을 높게 평가하여 처짐을 과소평가한 것으로 나타났다. 이는 경험적 통계 방법을 사용함에 따라 다양한 변수 및 실험 환경에 대해 유동성 있는 예측을 할 수 없음에서 기인한 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 CFRP 보강근으로 보강한 콘크리트 보의 휨 실험을 통하여 보강비에 따른 휨 성능 및 기존 유효단면2차모멘트 산정식의 유효성을 평가하였으며 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 실험체에서 중앙부 휨 균열이 발생 후 순수 휨 구간 바깥쪽으로 균열이 확산되는 양상을 보였으며, 철근에 비해 CFRP 보강근으로 보강된 실험체에서 1차 균열 이후 균열 사이의 2차 균열이 많이 발생하였다. 또한 보강비가 증가할수록, 균열 간격은 좁게 나타났고, 균열폭은 줄어드는 경향을 나타내었다.
2. 철근 보강 실험체는 항복점 이후 내력을 유지하는 연성적인 거동을 보이는 것과 달리 CFRP 보강근으로 보강된 실험체는 최대 하중 이후 급격히 파괴되었다. 철근 보강 실험체와 동일한 보강비를 갖는 CFRP 실험체는 비교적 낮은 강성을 보였으며, 철근 보강 실험체와 동일한 단면 성능을 갖기 위해서는 약 1.3배 이상의 보강비가 필요할 것으로 판단된다.
3. 극한 모멘트에 대한 실험값과 계산값의 비교에서는, ACI 440.1R-06에서 제안한 식에 의한 값에 대한 실험값이 평

균 0.82의 차이로 비교적 정확한 예측을 하는 것으로 나타났다지만, 초기 균열 모멘트는 이론식에 의한 값과 비교하여 0.81~1.22의 비교적 큰 오차를 나타내었다. 이러한 균열모멘트 산정의 어려움은 낮은 보강비를 갖는 부재의 처짐 산정에 상당한 영향을 미칠 수 있으므로 정확한 산정식에 대한 연구가 필요하다.

4. 사용 하중 하의 처짐에 대한 실험값과 계산값의 비교에서, Branson 및 ACI 440.1R-06에서 제안한 식에 의한 값은 여전히 보의 강성을 높게 평가하여 처짐을 과소평가하는 것으로 나타난 반면에, Bischoff & Scanlon이 제안한 식은 비교적 정밀해에 가장 가까운 처짐값을 예측하였다. Bischoff & Scanlon의 제안식은 FRP 보강근으로 보강된 보의 처짐에 대해 가장 잘 예측하고 있는 것으로 보이나, 다양한 보강근의 종류, 직경, 보강비 및 콘크리트 압축강도에 대한 추후 연구를 통한 검증이 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2007년도 첨단도시개발사업(과제번호:07도시재생B03)의 지원 사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

1. ACI Committee 440, *Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars*(ACI 440.1R-06), Farmington Hills, Michigan, 2006.
2. 이영학, 최준호, 김희철, 김동혁, 나성준, “CFRP 보강근의 부착강도에 대한 실험적 연구,” 대한건축학회논문집 구조계, 제 24권, 제 11호, 53-60, 2008년 11월.
3. Habeeb, M. N., and Ashour, A. F., “Flexural Behavior of Continuous GFRP Reinforced Concrete Beams,” *Journal of Composite for Construction*, Vol. 12, No. 2, 115-124, 2008
4. Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R., “Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars,” *ACI Structural Journal*, V. 91, No. 2, 46-55, 1995.
5. 신성우, 안종문, 한범석, 서대원, “FRP 보강근을 주근으로 사용한 콘크리트보의 보강비효과,” 대한건축학회논문집 구조계, 22권, 2호, 19-26, 2006년 2월.
6. Bischoff, P. H., “Deflection Calculation of FRP Reinforced Concrete Beams Based on Modifications to the Existing Branson Equation,” *Journal of Composites for Construction*, V. 11, No. 1, 4-14, 2007.

7. Nayal, R., Rasheed, H. A., "Tension Stiffening Model for Concrete Beams Reinforced with Steel and FRP Bars," *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 18, No. 6, 831-841, 2006.
8. Rashid, M.A., Mansur, M.A., and Paramasivam, P., "Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams Under Bending," *Journal of Composites for Construction*, V. 9, No. 2, 117-127, 2005
9. Rafi, M. M., Nadjai, A., Ali, F., and Talamona, D., "Aspects of behaviour of CFRP reinforced concrete beams in bending," *Construction and Building Materials*, 22, 277-285, 2008.
10. Scanlon, A., and Bischoff, P. H., "Shrinkage Restraint and Loading History Effects on Deflection of Fiber-Reinforced Polymer Reinforced Beams," *ACI Structural Journal*, V. 105, No. 4, 498-506, 2008.
11. ACI Committee 435, *Control of Deflection in Concrete Structures(ACI 435R-95)*, Farmington Hills, Michigan, 1995.
12. Bischoff, P. H., and Scanlon, A., "Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement," *ACI Structural Journal*, V. 104, No. 1, 68-75, 2007.
13. ACI Committee 318, *Building Code Requirement for Structural Concrete(ACI 318-05)*, Farmington Hills, Michigan, 2005.