

GFRP 보강근으로 겹이음된 콘크리트 보의 보강비에 따른 거동특성

Behavior of Reinforcement Ratio on Concrete Beams Reinforced with Lab Spliced GFRP Bar

최 윤 철¹⁾

박 금 성²⁾

최 현 기^{3)*}

최 창 식⁴⁾

Choi, Yun Cheul

Park, Keum Sung

Choi, Hyun Ki

Choi, Chang Sik

Abstract

The use of glass-fiber-reinforced polymer (GFRP) bars in reinforced concrete (RC) structures has emerged as an alternative to traditional RC due to the corrosion of steel in aggressive environments. Although the number of analytical and experimental studies on RC beams with GFRP reinforcement has increased in recent decades, it is still lower than the number of such studies related to steel RC structures.

This paper presents the experimental moment deflection relations of GFRP reinforced beam which are spliced. Test variables were different reinforcement ratio and cover thickness of GFRP rebars. Seven concrete beams reinforced with steel GFRP re-bars were tested. All the specimens had a span of 4000mm, provided with 12.7mm nominal diameter steel and GFRP rebars. All test specimens were tested under 2-point loads so that the spliced region be subject to constant moment. The experimental results show that the ultimate moment capacity of beam increasing of the reinforcement ratio. Failure mode of these specimens was sensitively vary according to the reinforcement ratio. The change of beam effective depth, which was caused by cover thickness variation, controlled the maximum strength and deflection because of cover spalling in tension face.

Keywords : GFRP Reinforcing bar, Concrete bar, Reinforcement ratio, Lab spliced, Flexural behavior

1. 서론

유리섬유보강폴리머(glass fiber reinforced polymer, 이하 GFRP)는 미국, 캐나다, 일본 등지에서 철근콘크리트 휨 부재에서 철근의 부식이 우려되는 경우 기존 이형 철근을 대체하여 사용되고 있는 복합재료 중 하나이다. GFRP 보강근은 철근보다 높은 설계 인장강도를 갖고 있으며 저중량, 비부식성, 비자기성 및 낮은 열전도성 등 뛰어난 장점을 가지고 있다. 이러한 재료를 보강재로 사용할 경우 부식으로 인한 콘크리트 구조물의 노후화 방지, 내구수명 증가가 가능해져 보수, 보강비 절감 및 장수명화로 경제적인 효과를 기대할 수 있다.

그러나 GFRP 보강근은 이형철근에 비해 낮은 탄성계수(이형철근에 비해 1/4~1/5 수준)로 인한 과도한 처짐, 균열이 발생할 수 있고, 보강근의 선형적 거동특성으로 취성파괴가 큰 문제로 제시되어 왔다. 이러한 문제

도 불구하고 캐나다 및 미국 등 해외에서는 철근 부식이 큰 문제로 지적되고 있는 지역(동해 방지용 염분 살포등)에서는 GFRP 보강근의 사용이 증가되고 있는 추세이다. 이러한 추세에 맞추어 ACI의 ACI 440.1R(2001) 및 ISIS CANADA(2001)의 Design Manual과 같이 표준화된 설계지침의 제시가 이루어지고 있다. 이러한 기준들은 기존의 철근콘크리트 설계기준에서 제시되고 있는 식을 실험결과를 반영하여 수정된 형태로 제시하고 있다. 이러한 방법은 설계식을 복잡하게 하며, 철근콘크리트와 특성이 다른 FRP 보강근을 적절히 반영하고 있는지는 의문시 된다. 또한, 기존 철근콘크리트 설계식의 수정된 형태에서는 안전계수와 같은 계수에 대한 신뢰성은 알지 못하며, 실험에 의한 경험적 값의 성격이 강하다.

국내외 적으로 설계 및 시공 지침을 포함한 다수의 연구 결과가 발표되었으나 정착길이, 겹이음 길이 등과 같은 보강상세에 대한 규정 및 뚜렷한 설계식이 제시되어

1) 정회원, 청운대학교 건축설비소방학과, 조교수
2) 정회원, 한국건설기술연구원, 수석연구원
3) 정회원, 한양대학교 건축환경공학과, 박사과정
4) 정회원, 한양대학교 건축공학과 교수

* Corresponding author : chk7796@hanyang.ac.kr 02-2220-2379

• 본 논문에 대한 토의를 2011년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 2011년 3월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

있지 않다. ACI 440-1R(2001)에서는 이음길이로서 정착길이의 130%를 사용하도록 규정하고 있으며, ISIS CANADA(2001)에서는 보강근 제작사의 사양을 따르도록 권고하고 있다. 또한 일본 토목학회의 경우, 이형철근에 대한 이음길이 규정에 준하여 설계하도록 하고 있다.

공장 생산되는 GFRP 보강근의 경우, 운반 및 작업성을 위해 일정길이(10m) 내외로 절단하여 사용할 수 밖에 없으며, 이는 이음작업이 필수적이다. 현재 보강근 제작에 사용되는 각종 수지는 열경화성 수지이며 이로 인해 현장에서의 변형이 불가능하여 섬유의 인장강도를 상회하는 기계적이음 방법이 충분히 제시되어 있지 않으며 보강근을 겹이음하여 시공하는 것이 가장 효율적이다. GFRP 보강근의 겹침이음에 가장 큰 영향을 미치는 GFRP 보강근의 부착강도는 보강근의 직경, 보강근의 표면형상, 부착길이, 피복두께 등이며 이른 근거로 겹이음 길이는 탄성 이론과 실험에 근거한 부착길이 공식에 할증 계수를 더하여 적용하고 있다(오홍섭, 2009).

GFRP 보강근을 적용한 부재의 주요 설계 전략은 GFRP 보강근의 취성적인 재료적 특성을 감안하여 균형보강비 이상의 과보강 단면으로 설계하는 것이다. 이는 GFRP 보강근 파단에 의한 급작스런 파괴를 억제시키고자, 제한적이거나 콘크리트의 압축파괴가 소성적인 거동을 유도하고자 하는 것이다(서대원, 2009; 신성우 등, 2006; 최동욱 등, 2009; Benmokrane et al., 1996). ACI 440.1R에 따르면, 식(1)의 평형보강비의 1.4배 이상의 보강비를 갖을 경우 완전한 콘크리트 압축파괴 모드에 의해 파괴되며, 평형보강비 이하로 보강된 경우 보강근의 파단에 의해 보가 파괴된다. 또한 또한 Houssam and Toutanji (2000)는 보강비에 따라 보의 유효강성이 크게 영향을 받는 것으로 보고하고 있다. 즉, GFRP 보강비는 GFRP 보강근을 사용한 부재의 안전성 확보를 위한 주요한 변수가 되며, 적절한 보강비에 대한 검토가 요구된다.

따라서 본 연구에서는 국내 생산된 GFRP 보강근을 겹이음하여 보강비 및 피복두께에 따른 휨 부재의 성능평가를 수행하였으며, 휨 거동특성에 반영될 수 있는 자료를 제공하고자 한다.

2. 실험계획

2.1 GFRP 보강 콘크리트 휨 부재의 설계

GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재는 GFRP 보강근

의 취성적 성질과 낮은 탄성계수로 인하여 기존 철근콘크리트와는 다른 개념을 갖게 된다. 현재까지 미국, 캐나다, 일본 등에서는 GFRP 보강근의 성질을 반영한 설계에 대한 연구가 진행되고 있으며, 일련의 설계 제안식들이 발표되었다.

ACI 440 및 ISIS CANADA에서는 GFRP로 보강된 부재의 파괴유형을 철근콘크리트 휨 부재의 파괴모드와 마찬가지로 GFRP 보강근의 보강량에 따라 콘크리트의 압축파괴(concrete crushing), 균형파괴(balanced failure), GFRP 보강근의 파단(GFRP bar rupture), 콘크리트 계면과 피복면에서의 부착파괴로 구분하고 있다. 여기서 콘크리트 압괴, GFRP 보강재의 파단은 각각의 구성 재료극한응력에 도달하여 파괴되는 경우로 기존의 설계식으로 충분히 예측 가능하다. 그러나 GFRP 경우 철근과는 달라 항복점을 갖지 않으므로, 균형보강비를 계산하는데 있어서 설계 인장강도를 사용하며, GFRP 균형보강근비는 철근콘크리트 균형보강비로부터 유도되어 식(1)과 같다(ACI 440.1R-01, 2001).

$$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \frac{E_f \varepsilon_{cu}}{E_f \varepsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (1)$$

여기서, ρ_{fb} 는 균형보강비, f_{ck} 는 콘크리트 압축강도, f_{fu} 는 GFRP 보강근의 극한강도, E_f 는 GFRP 보강근의 탄성계수, ε_{cu} 는 GFRP 보강근의 극한변형률, β_1 콘크리트 설계기준강도에 따라 결정되는 상수로서 철근콘크리트 휨 부재에 적용하는 값과 같다. 힘의 평형과 변형률 적합 조건에 근거하여 직사각형 단면보의 공칭휨강도(M_n)은 식(2)와 같이 유도된다.

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

여기서, d 는 유효깊이이며, 콘크리트 사각형 응력블럭의 깊이 (a)와 GFRP 보강근의 응력(f_f)은 각각 식 (3), (4)와 같이 산정한다.

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f_{ck} b} \quad (3)$$

Table 1 Test variables for beam test

Specimen Index	f'_c [MPa]	Beam (L) [m]	Section(BxD) [mm]	L_s [mm]	d_b [mm]	L_s/d_b	ρ_f [%]	ρ_{bal} [%]	$\frac{\rho_b}{\rho_{bal}}$	Net cover or spacing[mm]		
										c_b	c_{so}	$2c_{si}$
3S-L45 d_b -c2.0	31	4.0	300 X 400	572	13	45	0.34	1.97	0.17	25.4	30	81.9
3F-L45 d_b -c2.0					12.7		0.34		1.05	25.4		
3F-L45 d_b -c2.5							0.34		1.05	32		
4F-L45 d_b -c2.0							0.45		1.4	25.4		
4F-L45 d_b -c2.5					0.45		1.4		32	46.1		
5F-L45 d_b -c2.0					0.56		1.7		25.4			
5F-L45 d_b -c2.5					0.57		1.7		32	28.3		

Notation) f'_c :compressive strength, L_s :splice length, d_b :bar diameter, L_s/d_b :splice length/bar diameter, ρ_f :reinforcement ration, ρ_{bal} : balanced ratio, c_b :net bottom cover, c_{so} :net side cover, c_{si} :clear spacing between bars/2

$$f_f = E_f \varepsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{\beta_1} \quad (4)$$

2.2 겹이음 길이 및 피복두께

GFRP 보강근의 이음길이 산정에 있어 GFRP 보강근의 낮은 탄성계수는 콘크리트와의 부착력과 정착길이에 영향을 미치며, 이러한 GFRP 보강근의 겹침이음 길이는 부착 또는 정착길이의 함수로 주어지게 된다. 정착길이는 GFRP 보강근의 응력이 0에서 극한강도까지 도달할 수 있는 최소한의 길이로 정의된다. GFRP 보강근의 정착길이는 캐나다와 미국콘크리트학회의 제안식이 동일하게설계강도와 보강근의 지름의 함수로 식 (5)와 같이 표현된

다. 이 식은 콘크리트의 균열(splitting)에 의해서가 아니라 GFRP 보강근의 인발(pullout)파괴에 의해서 GFRP 보강근의 정착길이를 계산하는 추정식으로 부착강도가 주요 변수이며 비교적 안전측의 큰 값을 얻는다.

$$l_{bf} = 0.054d_b f_{fu} \quad (5)$$

이때, 단면에서의 겹이음의 경우에는 보강근에 발생하게 되는 응력의 형태 및 크기에 따라 class A와 class B로 분류하여 겹이음하도록 규정하고 있으며 class A의 경우에는 $1.3l_{bf}$ 를 class B의 경우에는 $1.6l_{bf}$ 를 적용하도록 하고 있다. 그러나 기존연구결과(오흡섭, 2009; 최동욱 등, 2009) 부착강도에 영향을 주는 이음길이 및 피

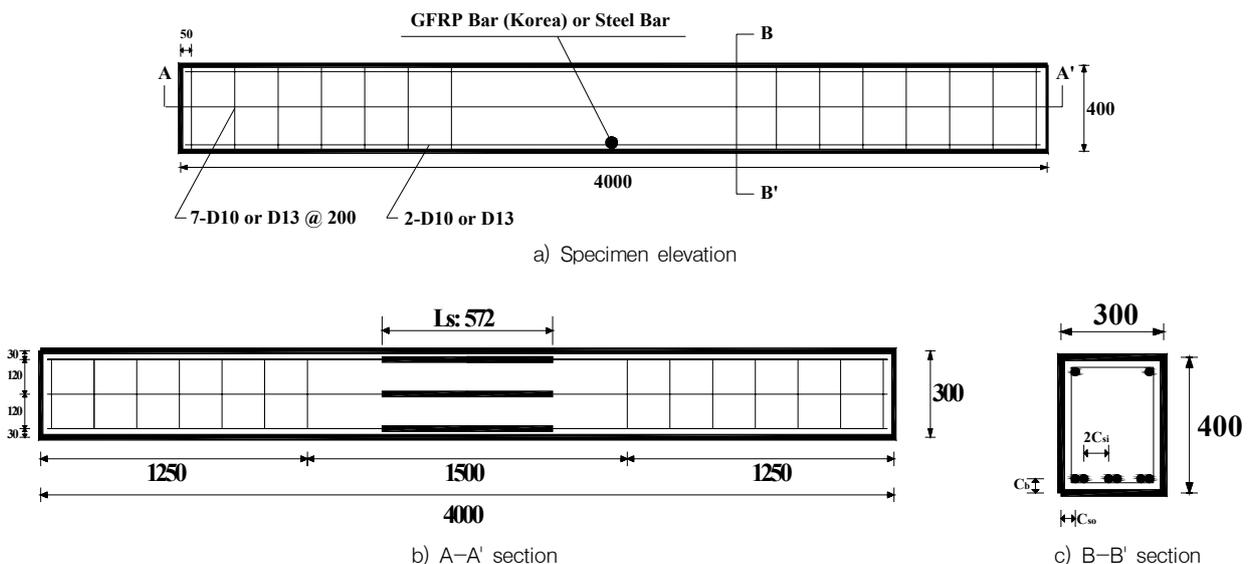


Fig. 1 Detail of specimen

Table 2 Mechanical properties of GFRP bars

Index	Nominal diameter [mm]	Cross-section area [mm ²]	Design tensile strength [MPa]	Elastic modulus [GPa]	Design rupture strain [%]
GFRP-Spiral (Korea)	12.7	127	741	49.3	1.5

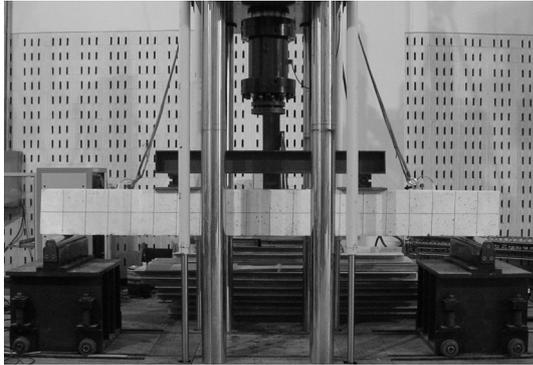


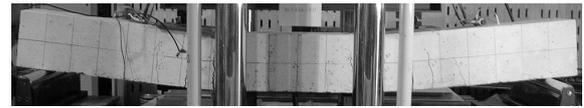
Fig. 2 Test setup

복두께에 따라 현행기준에서 제시하고 있는 이음길이는 피복두께에 따라 안전측의 값 및 경제적인 이음길이를 산정하지 못하는 것으로 나타났다.

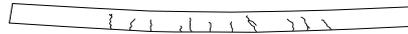
이에 본 연구에서는 Table 1과 같이 보강근의 종류 (Steel, GFRP) 및 균형보강비에 대한 비율 ($\frac{\rho_f}{\rho_{bal}}$)과 피복두께를 주요 변수로 하였다. 실험체의 배근 상세 및 특성은 Fig. 1과 같다.

2.3 사용재료 및 실험방법

모든 실험체는 단면 폭 300mm와 높이 400mm, 총 길이 4m, 전단지간-유효길이 비(a/d)를 4로 하였으며, 실험체서 중앙부(보강근 이음부)는 균일한 모멘트를 받도록 하였다. 부착강도를 보수적으로 평가하기 위하여 이음 구간내에는 스티럽을 설치하지 않았다. 실험변수는 보강비를 주변수로 하였으며, 하부 순 피복두께(c_b), 측면의 순피복 두께(c_{so}), 철근의 순간격($2c_{si}$)은 일정하도록 하였다. 또한 전단 파괴의 방지를 위해 200mm 간격으로 가력 지점부터 힌지까지 배근하였다. 사용된 GFRP는 국내에서 생산된 제품으로 직경은 D13으로 사용하였으며 모든 실험체에 사용된 콘크리트의 강도는 평균 31MPa였다. 이음 파괴 시점 및 이음 까지 철근의 변형량을 측정하기 위해 이음의 각 끝 지점에 스트레인 게이지를 부착하



a) 3S-45d_b-C2.0



b) 3F-45d_b-C2.0



c) 3F-L45d_b-c2.5



d) 4F-L45d_b-C2.0



e) 4F-L45d_b-C2.5



f) 5F-L45d_b-c2.0



g) 5F-L45d_b-c2.5

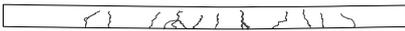


Fig. 3 Failure mode

였고 압축부의 콘크리트 변형률 측정을 위해 콘크리트 스트레인 게이지를 부착하였다. 또한 Fig. 2와 같이 보의 처

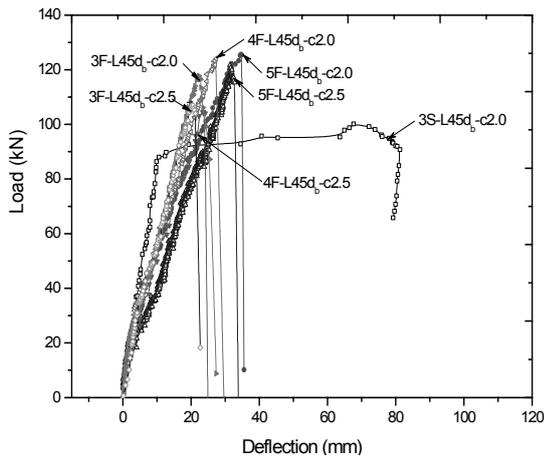


Fig. 4 Load-deflection relationship

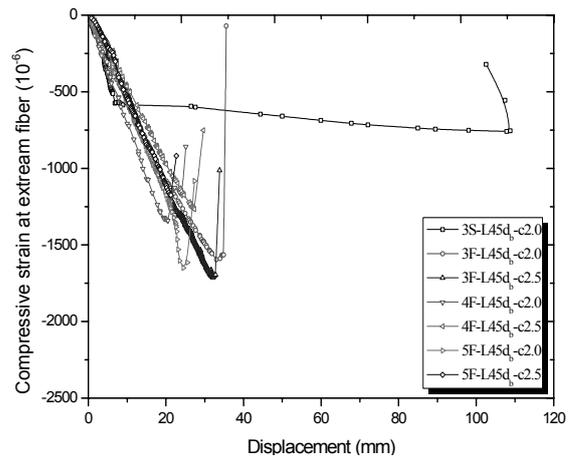


Fig. 5 Compressive strain at extreme fiber

짐은 가력지점 중앙부 및 좌우 가력 지점에 대해 LVDT를 사용하여 측정하였으며 가력 장치는 5000kN의 UTM(Universal Test Machine)을 사용하여 2점 가력을 하였으며, 분당 1mm의 변위제어로 하였다. 콘크리트는 레미콘 공장에서부터 보통강도 콘크리트를 주문하여 실험체를 제작하였으며 휨 실험 수행시 콘크리트의 압축강도는 29.0~33.0MPa(평균 31MPa)이었으며, 두 가지 지름의(D10, D13) 이형철근을 보의 주근 및 전단보강근으로 사용하였다. 이형철근의 항복강도는 각각 450MPa, 540MPa로 나타났다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 균열 및 파괴양상

철근을 사용하여 철근 직경의 45배만큼 이음된 3S-45d_b-c2.0 실험체의 경우 40kN에서 초기 균열이 관찰되었으며 겹침이음 부분에서 균열이 집중되는 양상을 보였다. 또한 항복하중 이후의 균열은 겹침이음 구간을 벗어나지 못 하였다. 최종 파괴양상은 Fig. 3의 (a)와 같이 전형적인 휨파괴 형상을 보였다.

GFRP 보강근을 적용한 실험체의 경우 15~40kN에서 초기 휨 균열이 보의 중앙부에서 관찰되었으며 겹침이음 부에서 보강근을 따라 횡방향 인장균열이 보 측면에 발생하였다(side split). 이는 보강근과 콘크리트 간 발생한 부착응력의 방사방향 분력에 의한 것으로 판단된다. 최종 파괴 단계에 있어서 가력지점 내 겹침이음부가 끝나는 지점에서 이음부의 주 균열에 의하여 파괴되었다.

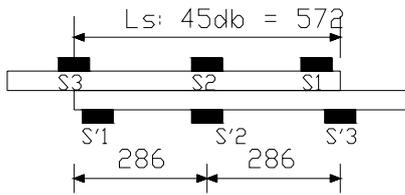
보강비 1.0(보강비= ρ_b/ρ_{bal})으로 균형보에 근접하도록 설계된 3F-L45d_b-c2.0,c2.5 두 실험체의 경우 초기 균열 발생 후 균열발생구간이 확대되지 못하였으며 급작스러운 GFRP 보강근의 파단과 함께 콘크리트가 박리되며 최종 파괴되었다. 보강비 1.4를 갖는 4F-L45d_b-c2.0, c2.5 두 실험체의 경우 보강비 1.0 실험체에 비해 균열이 폭넓고 빠르게 진행되었으며 GFRP 보강근의 겹침이음 부위의 미끄럼에 의한 콘크리트 박리와 함께 최종 파괴되었다. 그러나, 1.7의 보강비를 갖는 두 실험체(5F-L45d_b-c2.0, c2.5)의 경우 40kN에서 초기균열 발생 후 보의 전 구간에 걸쳐 균열이 확산되는 특징을 보였다.

현행 기준의 권고사항인 보강비 1.4를 적용하였을 경우 완전한 콘크리트의 압괴파괴 모드는 발생하지 않았으며, GFRP 보강근을 겹침이음 할 경우 보강비는 현행 권고 사항인 1.5배 이상의 보강비를 적용해야 할 것으로 판단된다.

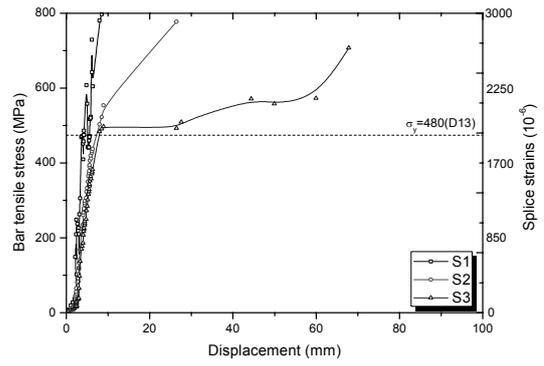
3.2 하중-변위 관계

각 실험체의 하중-변위 관계를 Fig. 4에 나타내었다. 철근콘크리트 실험체는 철근의 항복이후 연성적인 거동을 보이며, 하중의 증가 없이 변위가 증가하는 거동을 보였다. 보강근 직경의 45배로 이음을 실시한 3S-45d_b-c2.0 실험체의 경우 95kN 및 89mm에서 휨 파괴되었다. 철근을 보강근으로 사용할 경우 겹침이음에 있어 하중 및 처짐에 큰 변화가 없었다.

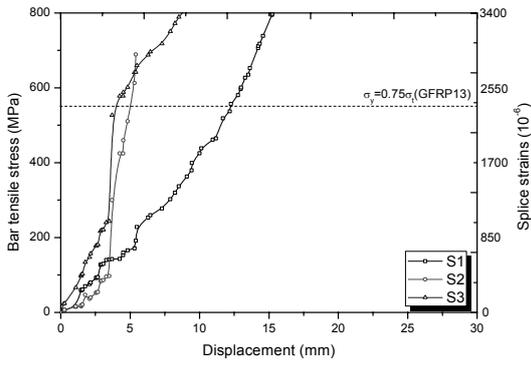
GFRP 보강근을 사용한 실험체에 있어 균열 발생이 후 초기강성의 급격한 감소 현상을 보였으며 파괴시까지 선형적인 거동을 나타내었다. 또한 보강근량의 증가에 따라



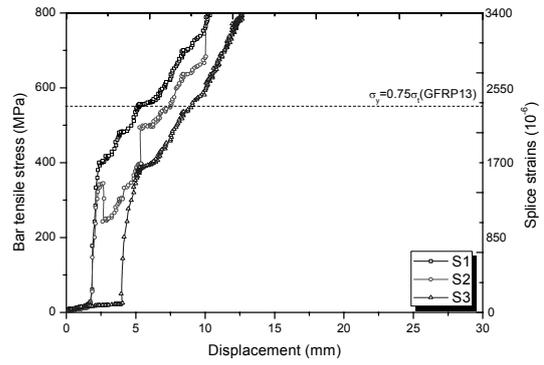
a) Location of W.S.G



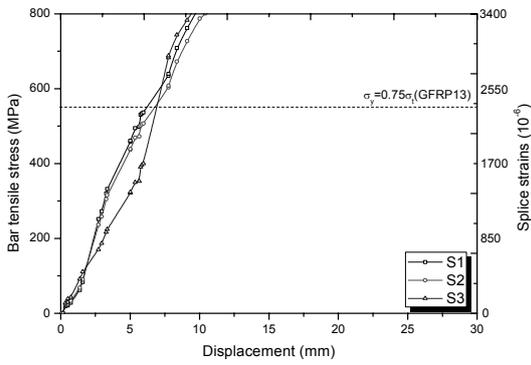
b) 3S-L45 d_b -c2.0



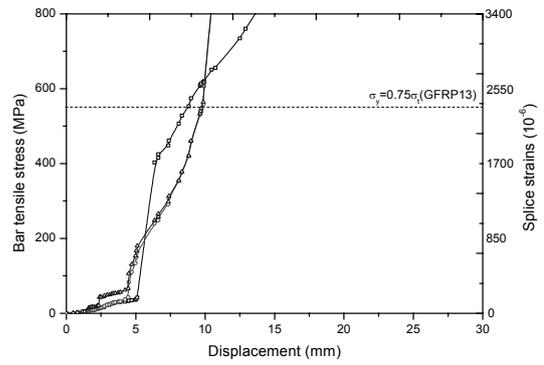
c) 3F-L45 d_b -c2.0



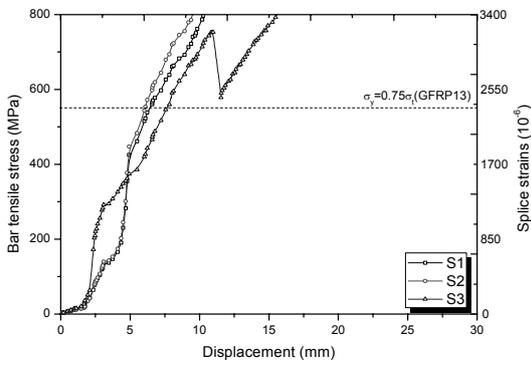
d) 3F-L45 d_b -c2.5



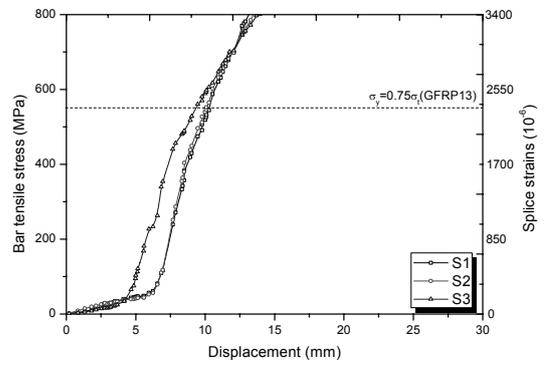
e) 4F-L45 d_b -c2.0



f) 4F-L45 d_b -c2.5



g) 5F-L45 d_b -c2.0



h) 5F-L45 d_b -c2.5

Fig. 6 Steel & GFRP strains

Table 3 Test result

Specimen Index	Test data				ACI318-05, ACI 440.1R-01		Test/Cal.		Deformation factor			Remarks
	$M_{cr/test}$ (kN·m)	Δ at M_{cr} (mm)	M_{ult} (kNm)	Δ at M_{ult} (mm)	$M_{cr/cal}$ (kNm)	M_{ult} (kNm)	Non factor	strength reduction factor	Φ_m	δ	μ	
3S-L45d _b -c2.0	20	3.2	50	89.5	26.6	55.3	0.90	-	1.6	8.95	14.3	Flexure
3F-L45d _b -c2.0	15	3	62	22		76	0.81	1.63	4.13	2.2	9.1	Failure by GFRP
3F-L45d _b -c2.5	15	3	54	20		75	0.72	1.44	4.15	2.0	8.3	Failure by GFRP
4F-L45d _b -c2.0	38	4.5	63	28		100	0.63	0.9	4.84	2.8	13.5	Side&face split
4F-L45d _b -c2.5	38	4	53	24		100	0.53	0.75	3.53	3.42	12.1	Side&face split
5F-L45d _b -c2.0	40	4.2	65	35		123	0.52	0.75	4.64	3.5	16.2	Flexure
5F-L45d _b -c2.5	41	4.1	60	32		124	0.48	0.7	3.33	4.57	15.2	Flexure

$M_{cr/test}$: test at initial cracks, M_{ult} : $A_f f_f (d - \frac{a}{2})$, $M_{cr/cal}$: $\frac{2f_r I_g}{h}$, Φ_m : ultimate moment / moment at concrete strain 0.001, δ : ultimate displacement / displacement at concrete strain 0.001, $\mu = \Phi_m \times \delta$

강성 및 내력의 증가를 보이고 있었으나, 철근보강 실험체에 비해 낮은 강성을 나타내었으며, 소성구간이 발생하지 않고 급격하게 하중이 감소되는 향상을 보였다.

3.3 철근 및 GFRP 보강근과 콘크리트의 변형률

Fig. 5는 압축 연단에서의 콘크리트의 변형률 변화를 나타내었다. 이음 실험체가 콘크리트의 최대 하중을 나타내는 범위까지 변형률 하는 것으로 나타났으며 철근의 항복시점에서 기울기가 변화하는 것으로 분석되었다. 콘크리트 압축변형률의 증가는 보강비가 증가함에 따라 증가되며, 이는 GFRP 보강근의 설계전략인 과보강 단면설계를 겸침이음을 실시한 단면에 대해 적용 가능한 것으로 판단된다. 다만, 그 보강비에 있어 추가적 연구가 필요할 것으로 사료된다. 다만, 철근을 보강근으로 사용하였으며 이음을 실시한 3S-45d_b-c2.0 실험체의 경우 초기 급격한 변형률 증가에 따른 압축연단의 초기 박리에 의해 충분한 데이터를 습득하지 못한 결과이다.

Fig. 6은 각 실험체의 하중 증가에 따른 주근의 변형률을 나타내었다. 철근을 주근으로 사용한 실험체의 경우 주근의 이음과 관계없이 철근의 항복이후 비선형적인 변형경화구간을 나타내고 있었으며, 철근의 항복 이후 이음부 끝단에 미끄럼 현상이 나타났다.

그러나 GFRP 보강근을 겸침이음하여 제작한 실험체의 경우 선형적인 거동 형태를 보여다. 균형보강비로 설계된 두 실험체(3F-L45d_b-c2.0, c2.5)의 경우 보강근 파단에 따른 미끄럼 현상으로 인해 보강근의 응력이 급격히

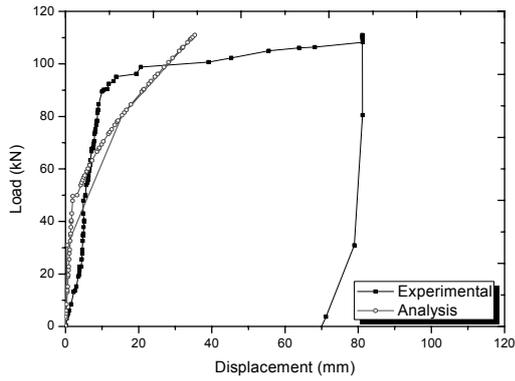
증가되고 있는 것으로 나타났다. 또한 GFRP 보강근의 보강비가 증가 할수록 보의 휨 균열이후 응력은 선형적으로 증가하였으며 이음구간내의 미끄럼 현상은 뚜렷하게 감소되는 것으로 나타났다.

3.4 휨 강도

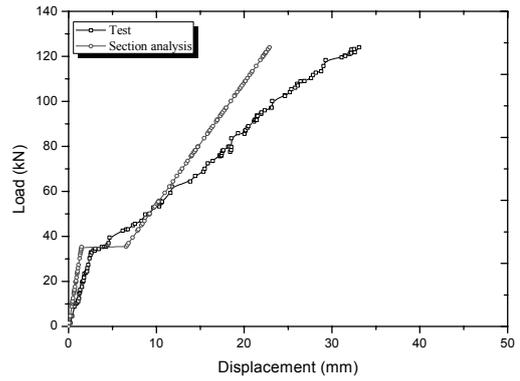
Table 3에 실험값과 ACI 440.1R-01(2001)에서 제안하고 있는 휨강도식을 비교하여 나타내었다. 철근을 보강으로 사용하였으며 겸침이음된 실험체의 경우 기준에서 제시하고 있는 식으로 휨강도를 비교적 정확하게 예측하고 있는 것으로 나타났다.

그러나 GFRP 보강근 및 이음을 실시한 6개 실험체의 경우 기준에서 제시하고 있는 이음길이를 초과하여 제작된 실험체 임에도 불구하고 휨강도를 과대평가하고 있는 것으로 나타났다. 특히, 보강비가 증가됨에 따라 그 차이는 커지는 것으로 나타났으며, 이는 이단배근, 묶음, 이음 등 배근방법에 대한 고려가 식에 반영되지 않은 이유로 판단된다. 즉, 현행 기준에서는 이음부의 미끄럼등에 의해 부착응력의 분포가 균일하지 않으며 보강근의 겸침이음부에서 콘크리트와 보강근간 비선형으로 발생하는 부착응력의 크기를 정확히 예측할 수 없어 평균부착응력을 사용하기 때문으로 판단된다(하상수 등, 2009; 신성우 등, 2006; 이영)학 등, 2008).

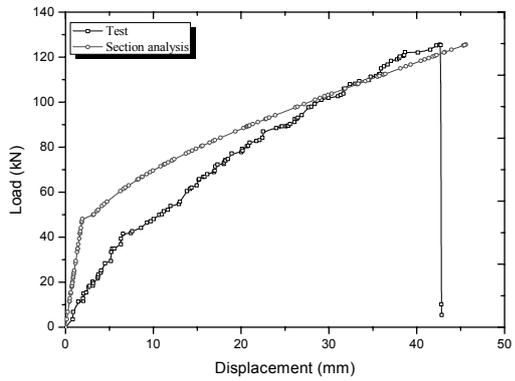
다만, 현행 기준에서는 GFRP 보강근의 취성적 재료특성을 고려하여 보강근의 보강비에 따라 0.5(균형보강비이하)~0.7(균형보강비 이상)의 강도감소계수를 사용한다. 이



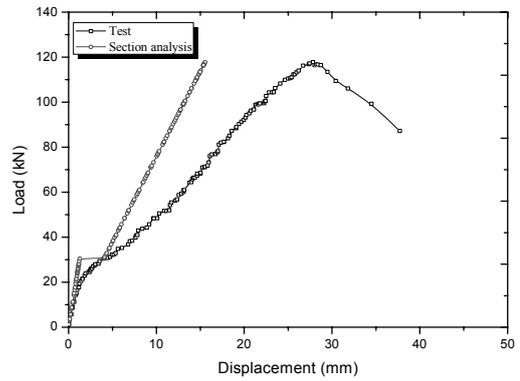
a) 3S-L45 d_b -c2.0



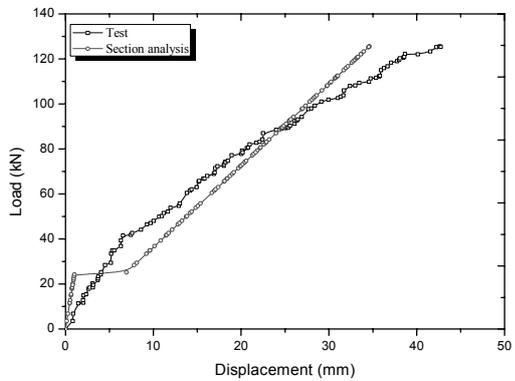
e) 4F-L45 d_b -c2.5



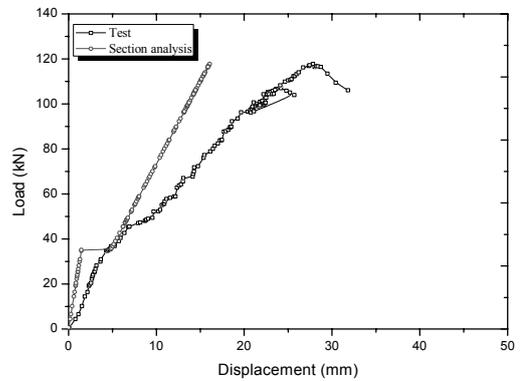
b) 3F-L45 d_b -c2.0



f) 5F-L45 d_b -c2.0



c) 3F-L45 d_b -c2.5



g) 5F-L45 d_b -c2.5

Fig. 7 Load-deflection relationship (section analysis)

러한 강도 감소계수를 적용했을 경우 균형보강비 이하에서는 지나치게 안전측의 값을 사용하게 되며, 균형보강비 이상의 보강비에서는 불안정한 결과를 얻는 것으로 나타났다.

3.5 연성 및 변형능력

GFRP 보강근을 적용한 콘크리트 부재의 경우 뚜렷한 항복변위를 정의할 수 없어 철근콘크리트 부재의 연성능력을 정의하는 방법을 적용할 수 없다. 이에 Jaeger 등

(1995)에 의해 정의된 변형도계수를 사용하여 GFRP 보강근이 사용된 보의 연성능력을 평가하였다.

변형도 계수는 모멘트계수(ϕ_m)와 처짐계수(δ)와의 곱으로 평가되며, 모멘트계수는 극한모멘트에 대한 콘크리트 압축변형이 0.001일때의 모멘트 비로 정의되며, 처짐계수는 극한상태의 처짐에 대한 콘크리트압축변형률이 0.001일 때의 처짐의 비로 정의되며, 표 3에 나타내었다. 철근을 보강근을 사용한 실험체의 경우 변형도계수 14.3으로 상대적으로 우수한 연성능력을 보여주는 것으로 나타났다. 그러나 균형보강비를 적용한 실험체의 경우 철근 보강근을 적용한 실험체에 대해 평균 40%정도 감소된 연성능력을 보여주는 것으로 평가되었다. 그러나 보강비가 1.4의 과보강 단면을 갖는 경우 기준 실험체와 유사한 변형능력을 확보하는 것으로 나타났으며, 1.7배의 보강비를 확보할 경우 기준실험체에 비해 9%정도 증가되는 연성능력을 확보하는 것으로 분석되었다.

3.6 처짐

GFRP 보강근의 파괴거동은 보강근의 보강비에 의해 결정된다. 이러한 보강비는 휨부재의 유효강성에 큰 영향을 미치며 이는 균열 및 사용성의 문제가 발생된다. 즉, 철근보다 낮은 탄성계수를 갖고 있는 GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재의 처짐은 중요한 검토사항 중 하나이다.

현행 기준(ACI 440.1R-01, 2001)에서 제시하고 있는 휨부재의 처짐은 식(6)과 같은 유효단면이차모멘트 식을 사용하고 있다. 그러나 GFRP 보강근의 낮은 탄성계수 및 균열양상, 부착특성을 반영하여 식(7)과 같이 수정된 식을 사용하고 있다. 그러나 이는 이음을 하지 않은 실험체를 대상으로 도출된 경험식이며 이에 대한 사용성을 평가하기 위해 Fig. 7과 같이 실험값과 이론값을 비교하였다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left[1.0 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (6)$$

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1.0 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g, \quad (7)$$

$$\beta_d = \alpha \left(1 + \frac{E_f}{E_s}\right)$$

철근을 보강근으로 사용한 기준 실험체의 경우 탄성구

간까지의 처짐 예측은 오차가 있으나 비교적 잘 예측하고 있는 것으로 나타났다. 그러나 GFRP 보강근으로 겹침이음된 6개의 실험체에 있어 균형보강비로 보강된 두 실험체(Fig. b, c)에서는 초반 탄성구간내의 처짐 및 강성예측에 있어 오차가 큰 것으로 나타났다. 그러나 1.4이상의 보강비를 갖을 경우 탄성구간내의 처짐 및 강성예측은 비교적 일치하는 것으로 나타났다. 그러나 균열 이후의 처짐 예측은 보강비 증가에 따라 과대평가 되는 결과를 보였다. 이는 이음부에 집중된 응력에 의한 균열이 보다 크게 진전되어 나타나는 현상으로 판단되며, 이에 대한 추가적 연구가 필요한 것으로 사료된다.

4. 결론

본 연구에서는 GFRP 보강근으로 겹침이음된 6개의 실험체 및 철근 기준실험체를 대상으로 휨 실험을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) GFRP 보강근을 사용한 보의 거동은 철근콘크리트 보에 비하여 낮은 강성을 보였으며, 균열이후의 거동은 선형적인 거동 특성을 보였다. 또한 겹침이음을 실시한 실험체의 거동 또한 유사한 것으로 나타났다. 또한, 철근을 보강근으로 사용할 경우 겹침이음에 따른 극한하중의 변화는 크지 않았다.
- 2) GFRP 보강근을 겹침이음하여 사용할 경우 안전측의 파괴거동을 유도하기 위해, 현행 기준에서 제안하고 있는 1.4배 이상의 과보강 단면은 안전측의 파괴거동을 유도하지 않았다.
- 3) 현행 기준에서는 GFRP 보강근의 취성적 재료특성을 고려하여 보강근의 보강비에 따라 0.5(균형보강비이하)~0.7(균형보강비 이상)의 강도감소계수를 사용한다. 겹침이음을 사용한 경우 이러한 강도 감소계수를 적용한다면, 균형보강비에서는 지나치게 안전측의 값을 사용하게 되며, 균형보강비이상에서는 불안전측의 값을 사용할 수도 있어, 겹침이음시의 강도감소계수에 대한 추가적 연구가 필요하다.
- 4) 겹침이음에 따른 연성능력의 차이는 크게 나타나지 않았으며, 보강비에 따른 연성능력 차이가 크게 나타났다. 즉, 겹침이음을 실시한 경우 과보강 단면 적용시 겹침이음에 따른 연성능력 감소는 나타나지 않았다.

5) 1.4이상의 보강비를 갖을 경우 탄성구간내의 처짐 및 강성예측은 현행기준식에서 비교적 잘 예측하고 있었다. 그러나 균열 이후의 처짐 예측은 보강비 증가에 따라 과대평가 되는 결과를 보였다. 이는 이음부에 집중된 응력에 의한 균열이 보다 크게 진전되어 나타나는 현상으로 판단되며, 이에 대한 추가적 연구가 필요한 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국과학재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2009-0066646)

참고문헌

- 문도영, 오홍섭, 안광렬, "유한요소해석에 의한 GFRP 보강콘크리트 보의 설계인자 분석", 한국콘크리트학회논문집, 제 20권, 3호, 2008, pp.357-367.
- 서대원, 일계 이차모멘트법을 이용한 FRP RC 휨부재의 구조 안전성 평가, 박사학위논문, 한양대학교 대학원 건축공학과 건축구조 전공, 2009, pp.8-32.
- 신성우, 안종문, 한범석, 서대원, "FRP 보강근을 주근으로 사용한 콘크리트보의 보강비효과", 대한건축학회논문집, 제 22권, 제2호, 2006, pp.19-16.
- 오홍섭, "겹이음된 FRP 보강근으로 보강된 콘크리트 보의 휨 거동", 구조물진단학회지, 제13권, 1호, 2009, pp.186-194.
- 유영찬, 박지선, 유영준, 박영환, 김공환, "GFRP 보강근의 설계 인장강도 발현을 위한 적정 그립시스템 개발", 한국콘크리트학회논문집, 제17권, 6호, 2005, pp.947-953.
- 이영학, 최준호, 김희철, 김동혁, 나성준, "CFRP보강근의 부착강도에 대한 실험적 연구", 대한건축학회논문집, 제24권, 11호, 2008, pp.53-60.
- 최동욱, 천성철, 하상수, "RC 부재 휨 실험체 의한 GFRP 보강근의 이음길이 제안", 한국콘크리트학회논문집, 제21권, 1호, 2009, pp.65-74.
- ACI Committee 440, ACI 440.1R-01, Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, 2001, pp.18-44
- Benmokrane B., Chaallal O. and Masmoudi R., "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP reinforcing Bars", ACI Structural Journal, Vol.93, No.1, 1996, pp.46-55.
- Houssam A. Toutanji and Mohamed Saafi, "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) Bars", ACI Structural Journal, vol. 97, No. 5, 2000, pp.712-719.
- ISIS CANADA, Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers, 2001
- Jager, L. G. and Mufti, A., "Balanced Section, Ductility and Deformability in Concrete with Reinforcement", Research Report No.2-1995, Industry's Center for Computer-Aided Engineering, Technical University of Nova Scotia, Halifax, Canada, 1995, p.29.

(접수일자 : 2010년 7월 16일)
(심사완료일자 : 2010년 8월 23일)

요 지

기존의 철근 콘크리트 구조물에서 나타나는, 극한 환경하에서의 철근의 부식 문제 때문에 GFRP 보강근으로 철근을 대체하고 있다. 최근 들어 GFRP를 보강근으로 사용한 보의 성능에 대한 해석적, 실험적 연구가 지속적으로 행해지고 있지만 아직 철근 콘크리트 보의 연구에 대한 수에 비하여 이에 대한 연구 결과는 매우 적어 신뢰성을 얻기 힘든 상황이다.

이에 본 연구에서는 겹침이음된 GFRP 보강근을 보에 적용하여 모멘트-처짐 관계에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 실험 변수는 GFRP의 보강비와 피복 두께에 대한 것으로 총 6개의 GFRP 보강 콘크리트 보의 실험체가 제작되었다. 모든 실험체는 4000mm의 스패를 가지고 있으며 12.7mm의 지름을 가지는 GFRP 보강근을 사용하였다. 보강근이 겹침이음된 부분에 일정한 모멘트가 작용하게 하기 위해 2점 가력 방식을 사용하였다. 실험 결과 보강근비의 증가에 따라 극한 하중의 크기가 증가하였다. 파괴 모드는 보강근비에 따라 매우 민감하게 변화하였으며 피복 두께는 인장측의 콘크리트의 탈락에 의해 최대 강도와 처짐량을 결정하는 요인이 되는 것으로 나타났다.

핵심 용어 : GFRP 보강근, 콘크리트 보, 보강비, 겹침이음, 휨거동