



강섬유 혼입률과 피복두께에 따른 GFRP 보강근의 부착특성

최윤철^{1)*}

¹⁾청운대학교 건축설비소방학과

Bond Properties of GFRP Rebar with Cover Thickness and Volume Fraction of Steel Fiber

Yun-Chul Choi^{1)*}

¹⁾Dept. of Building Services Engineering & Fire Protection System, Chungwoon University, Hongseong 350-701, Korea

ABSTRACT The purpose of this study is to investigate bond properties of GFRP used in SFRC (Steel fiber reinforced concrete) and normal concrete. The experimental variables were rebar diameter (D13, D16), steel fiber volume fraction (0~2%) and cover thickness ($1.5d_b$, $5.4d_b$). The experimental results showed a different failure mode depending on the cover thickness. Through the tested specimens, splitting failure occurred for the specimens with small cover thickness and pull out failure occurred in the specimens with large cover thickness. Introduction of steel fiber caused the specimens to have more ductile behavior of bond stress-slip after peak stress, but they did not increase the bond strength significantly. These failure modes were shown in both steel reinforcement and GFRP. However, from the difference of micro structure of bond failure mechanism between steel rebar and GFRP rebar, more ductile behavior was observed in GFRP-specimens after maximum bond strength was reached.

Keywords : steel fiber, GFRP rebar, cover thickness, bond stress-slip, bond properties

1. 서 론

콘크리트는 취약한 인장응력 하에서의 성능을 보완하기 위해 별도의 보강재료를 요구하며 오랜 기간 동안 철근이 대표적인 인장에 대한 보강재로 사용되어 왔다. 그러나 콘크리트의 중화에 따른 철근의 부식 문제는 최근 해양 구조물과 같은 극한 환경에서의 철근콘크리트 구조물의 성능에 심각한 영향을 주는 것으로 확인되어 이에 대한 해결 방안을 구축하는데 많은 연구가 진행되고 있다. 철근의 부식은 철근유효단면의 손실과 철근마디의 손상을 유발하여 철근과 콘크리트 사이의 부착력을 감소, 휨 및 전단에 대한 저항성을 감소시키는 현상을 유발한다. 이러한 철근의 내구성 문제를 해결하기 위해 예폭시 도막철근의 사용이나 피복두께의 증가 등 다양한 방법이 개발되어 적용되었으나 현재까지도 충분한 신뢰성을 획득한 부식방지기술은 개발되지 못하고 있는 실정이다. 이에 따라 최근에는 원천적 부식방지 방안의 일환으로 FRP(fiber reinforced polymer)에 대한 연구가 활발히

수행되고 있는 추세다.^{1,2)}

FRP 보강근은 재료의 종류에 따라 유리섬유, 아라미드 섬유 및 탄소섬유 등으로 구분되며 비부식성, 자중대비 높은 인장강도, 경량성 등의 장점이 있다. 그러나 FRP 보강근의 표면 형상 및 재료의 특성에 따른 부착강도 발현에 대해서는 철근의 부착특성과는 다른 것으로 보고되고 있어 이를 개선하기 위해 많은 연구자들에 의한 다양한 연구가 수행되어 왔으며, 이들의 실험 결과로부터 FRP 보강근의 부착특성은 철근과 유사하게 콘크리트의 압축강도, 리브와 마디의 형상, 보강근의 구속, 보강근의 피복두께, 섬유보강 콘크리트의 사용 등 다양한 요소에 의하여 영향을 받는다는 것이 밝혀졌다.^{3,4)}

보강근과 콘크리트 사이의 부착특성은 철근콘크리트 구조물의 설계측면에서 볼 때 정착길이에 가장 직접적으로 영향을 주고 있다. ACI 및 국내의 철근콘크리트 구조설계기준에서는 철근의 부착특성에 기인한 기본정착길이를 제시하고 있는데 이는 철근의 항복강도와 콘크리트의 인장강도를 가장 큰 영향요인으로 설정하고 있다. 따라서 콘크리트의 인장강도 증진에 따라 부착강도를 증진시킬 수 있음이 확인되어 있으며 ACI 440에 의하면 FRP 보강근이 사용될 경우 콘크리트 압축강도의 제곱근에 반비례하는 정착길이를 요구하는 바 콘크리트의 인장강도

*Corresponding author E-mail : 21ycchoi@chungwoon.ac.kr

Received October 4, 2012, Revised November 10, 2012,

Accepted November 30, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

증진을 통해 FRP 보강근을 사용할 경우 감소될 수 있는 보강근과 콘크리트 사이의 부착강도를 보완할 수 있을 것으로 예상된다.

따라서 이 연구에서는 FRP 보강근을 사용하였을 경우 부착 성능의 발현에 대한 주요 변수로 기존 연구에서 많이 수행되지 않은 피복두께와 보강근의 직경에 따른 파괴 형태에 대한 분석이 수행되었다. 또한 최근 발표된 연구에⁵⁻⁷⁾ 의하면 콘크리트에 섬유를 혼입함에 따라 FRP 보강근의 부착특성이 증가한다고 보고되고 있어 강섬유가 혼입될 경우의 부착특성변화 경향에 대해 분석하고, 충분한 피복두께를 갖는 경우에도 콘크리트의 섬유혼입량이 FRP 보강근의 부착특성에 미치는 영향을 평가하여 FRP 보강근의 낮은 부착강도 발현에 대한 개선 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 계획

2.1 재료 시험

섬유의 혼입률 및 피복두께에 따른 FRP 보강근의 부착특성을 알아보기 위한 실험체의 제작을 위해 이 연구에서는 1종 포틀랜드시멘트와 비중 2.6의 잔골재를 사용하였다. 굵은 골재는 실험체의 작은 크기를 고려하여 최대치수 13 mm의 굵은 골재를 사용하였으며, 강섬유의 도입시에 발생할 수 있는 시공연도 확보문제를 해결하기 위해 고성능 AE감수제를 사용하였다.


콘크리트 압축강도는 현재 국내 시공 현장에서 일반적으로 사용되고 있는 21 MPa를 대상으로 배합설계를 진행하였다. 재료시험 및 실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 설계 압축강도와 배합비는 Table 1에 나타내었다. 100×200 mm 원주형 공시체는 15개를 제작하였으며, 타설 24시간 경과 후 공시체 틀을 탈형하였으며 재령 28일 강도를 측정하였다. 압축강도시험은 KS F 2405에 따라 2000 kN의 용량의 변위를 만능재료시험기(UTM)를 사용하였다. 압축시험시 하중속도는 2 mm/min으로 수행하였다. 압축강도 시험 결과 강섬유로 보강되지 않은 콘크리트는 22.4 MPa의 압축강도를 발현하였으며 1%와 2%의 부피비로 강섬유가 보강된 공시체는 각각 평균 25.2 MPa와 26.1 MPa를 발현하여 강섬유의 압축강도 증진 효과는 크게 나타나지 않은 것으로 나타났다.

Table 1 Mix proportion of concrete

f_{ck} (MPa)	W/C (%)	C	W	S	G	Admixture (%)	V_f (%)
21	57.7	1	0.58	2.95	3.06	0.5	-
							1
							2

f_{ck} : compressive strength of concrete, W/C: water to cement ratio, C: cement, W: water, S: sand, G: coarse aggregate, V_f : volume fraction of steel fiber

Table 2 Properties of steel fiber

Fiber type	ϕ (mm)	L (mm)	f_{ysf} (MPa)	E_{sf} (GPa)
	0.49	31.84	1195.5	200

ϕ : diameter of steel fiber, L: length of steel fiber, f_{ysf} : yield strength of steel fiber, E_{sf} : elastic modulus of steel fiber

실험체 제작에 사용된 보강 섬유는 여러 섬유 중 현재 비교적 건설현장에서도 널리 사용되는 강섬유, 폴리비닐알콜 섬유, 폴리프로필렌 섬유 중 연성효과가 크게 나타나는 강섬유(steel fiber)를 사용하였으며 강섬유의 재료적 특성은 Table 2와 같다.⁸⁾

강섬유의 혼입률은 0%, 1%, 2%로 섬유의 혼입률을 증가시켜 강섬유 도입에 따른 콘크리트의 인장강도 증가를 통해 작은 피복두께를 갖는 경우에도 뿔힘파괴를 유도할 수 있는지의 가능성을 평가하고자 하였으며, 충분한 피복두께를 갖는 경우에도 콘크리트에 섬유를 혼입함으로써 FRP 보강근의 부착특성에 어떠한 영향을 미치는지 평가하고자 하였다.

FRP 보강근은 극한 변형률이 다른 섬유에 비하여 크게 나타나는 GFRP(glass fiber reinforced plastic) 보강근을 사용하였다. 표면의 형상은 기계적 맞물림을 얻을 수 있는 이형철근과 유사한 형태로 만든 나선형 GFRP 보강근을 사용하였으며, 비교분석을 위하여 이형철근을 별도로 사용하였다. 실험에 사용된 이형철근 및 GFRP 보강근의 시험방법 및 파단 형태는 Fig. 1에 나타내었으며 물리적 특성은 Table 3과 4에 나타내었다.

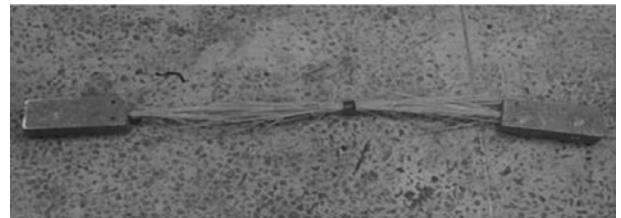


Fig. 1 GFRP coupon tests

Table 3 Mechanical characteristics of reinforcements

Index	Nominal diameter (mm)	Cross-section area (mm ²)	Yield strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Steel reinforcement	12.7	126.7	398	198
	15.9	198.6	403	203

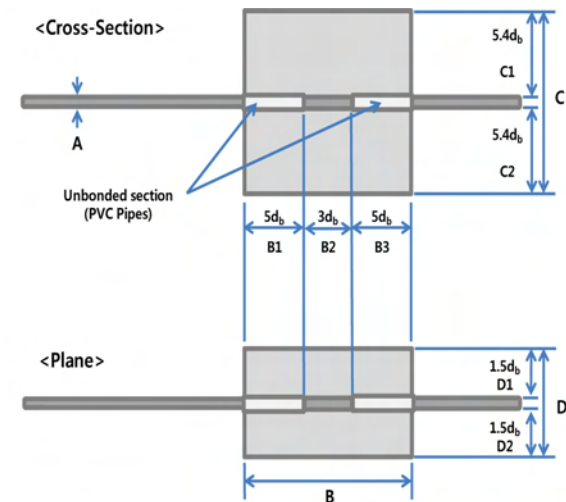
Table 4 Mechanical properties of GFRP bars

Index	Nominal diameter (mm)	Cross-section area (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Rupture strain (%)
GFRP-spiral (Korea)	12.7	127	741	49.3	1.5
	15.9	201	762	50.1	1.6

2.2 실험체 개요

실험체는 보강근의 종류에 따라 이형철근과 GFRP 보강근이 사용된 실험체로 크게 구분되었다. 또한 보강근의 직경에 따라 D13과 D16, 강섬유 혼입률에 따라 0%, 1%, 2%, 피복두께에 따라 $1.5d_b$ 와 $5.4d_b$ 로 변수를 적용하여 제작하였다. 실험체는 각 변수를 적용하여 24개로 각 변수당 2개씩 총 48개를 제작하였다. 강섬유 혼입률에 따라 각 실험체에 적용되는 콘크리트의 배합이 실시되었으며 콘크리트 믹서를 이용하여 배합하였다. 공시체는 강섬유 혼입률에 따라 5개씩 총 15개를 제작하여 재료 시험에 사용되었다.

보강근의 부착길이는 기존 연구 결과⁹⁾에서 보강근 직경의 4배에서 콘크리트 파괴시의 최대 부착강도를 발현했음을 참고하여 보강근 직경의 3배로 하였다. 뿔빔 실험의 특성상 실험체의 가력면은 압축력을 받게 된다. 이 압축력은 실험체 내부에 압축대를 형성하여 부착 구간에 대한 구속효과를 일으켜 부착강도에 영향을 미치므로 부착구간에 직접 접하지 않도록 비부착구간을 형성하였다. 비부착구간은 보강근 직경의 5배로 결정하였으며 PVC 관을 이용하여 형성하였다. 일반적으로 뿔빔 실험체의 제작에 있어서 PVC관과 보강근 사이의 미세틈으로 시멘트 페이스트가 유입되어 부착강도에 영향을 미치므로 이를 방지하기 위하여 고무링을 이용하여 비부착구간의 콘크리트 유입을 최대한 방지하였다. 가력단 및 자유단으로의 보강근의 연장 길이는 각 위치에서의 미끄러짐량의 측정을 위한 LVDT 설치를 고려하여 결정되었다. 보강근의 직경 및 피복두께의 비에 따라 실험체의 치수가 결정되



Cover thickness $1.5d_b$	D13	A : 12.7 mm B : 170 mm (B1:63.5 mm, B2:38.1 mm, B3:63.5 mm) C : 150 mm(C1:68.58 mm, C2:68.58 mm) D : 50 mm(D1:18.65 mm, D2:18.65 mm)
	D16	A : 15.9 mm B : 210 mm (B1:79.5 mm, B2:47.7 mm, B3:79.5 mm) C : 185 mm(C1:84.55 mm, C2:84.55 mm) D : 65 mm(D1:24.55 mm, D2:24.55 mm)

Fig. 2 Shape and site of specimen (cover thickness = $1.5d_b$)

었으므로 실험체의 형상 및 치수는 Fig. 2와 3에 나타내었으며 Table 5에 실험체명과 변수를 나타내었다.

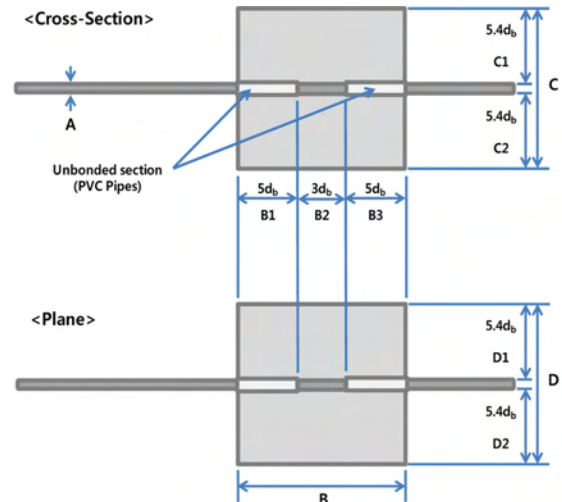
2.3 실험 방법

제작된 뿔빔 실험체의 실험은 최대 용량 500 kN의 스크류잭을 이용하여 수행되었다. 실험은 최대 부착응력 발현 이후의 감소 경향의 정확한 파악을 위해 변위제어방식으로 1 mm/min의 속도로 실시하였으며, 각 하중단계에 따른 변위 및 미끄러짐량을 측정하기 위하여 가력단과 자유단에 LVDT(변위계)를 설치하였다.

실험체 앞과 뒤에서의 미끄러짐량을 측정하기 위하여 가력단에 25 mm LVDT를 보강근을 중심으로 위쪽과 아래쪽에 두 개를 설치하였고 자유단에도 25 mm LVDT를 가력단과 같은 방식으로 설치하였다. 또한 100 mm LVDT를 스크류잭과 실험체 고정철물의 뒷면 좌우 양쪽에 설치하여 실험체 자체의 미끄러짐량을 측정하였으며 실험체의 횡방향 유동을 파악하기 위하여 실험체의 좌우 양쪽에도 50 mm LVDT를 설치하였다. 이와 같이 실험체의 변위를 측정하는데 총 10개의 LVDT를 설치하여 사용하였으며, 전체 실험체의 설치 상황과 LVDT의 설치위치는 Fig. 4와 5에 나타내었다.

3. 실험 결과

철근과 GFRP 보강근이 사용된 뿔빔 실험체의 실험 결과 철근의 경우 최대하중 도달 이후 급격한 강도감소 경향을 보이는 반면, GFRP 보강근의 경우 최대하중 도달



Cover thickness $5.4d_b$	D13	A : 12.7 mm B : 170 mm (B1:63.5 mm, B2:38.1 mm, B3:63.5 mm) C : 150 mm(C1:68.58 mm, C2:68.58 mm) D : 150 mm(D1:68.58 mm, D2:68.58 mm)
	D16	A : 15.9 mm B : 210 mm (B1:79.5 mm, B2:47.7 mm, B3:79.5 mm) C : 185 mm(C1:84.55 mm, C2:84.55 mm) D : 185 mm(D1:84.55 mm, D2:84.55 mm)

Fig. 3 Shape and site of specimen (cover thickness = $5.4d_b$)

Table 5 Test specimens and variables

No.	Type of rebar	Dia. of rebar (mm)	Cover thickness	V_f (%)	Index	
1	Steel	13	1.5d _b	0	S-13A0	
2		16			S-16A0	
3		13		1	S-13A1	
4		16			S-16A1	
5		13		2	S-13A2	
6		16			S-16A2	
7	GFRP	13		5.4d _b	0	G-13A0
8		16				G-16A0
9		13			1	G-13A1
10		16				G-16A1
11		13			2	G-13A2
12		16				G-16A2
13	Steel	13	5.4d _b	0	S-13B0	
14		16			S-16B0	
15		13		1	S-13B1	
16		16			S-16B1	
17		13		2	S-13B2	
18		16			S-16B2	
19	GFRP	13		5.4d _b	0	G-13B0
20		16				G-16B0
21		13			1	G-13B1
22		16				G-16B1
23		13			2	G-13B2
24		16				G-16B2

이후 완만한 강도 감소 경향을 보였다. D13과 D16 보강근을 사용하였을 경우 보강근 직경의 증가에 따라 철근은 확연한 부착강도의 증가를 보였으나, GFRP 보강근의 경우에는 부착강도의 변화가 거의 나타나지 않았다. 충분한 피복두께를 갖는 경우 강섬유 혼입량의 증가에 따라 부착강도의 증가를 보였으나, 작은 피복두께를 갖는 경우 부착강도의 변화가 거의 나타나지 않았다. 또한 강섬유 혼입량이 증가함에 따라 균열이후의 부착강도 감소 폭은 줄어드는 것으로 나타났다. 그리고 피복두께를 달리한 경우 작은 피복두께를 갖는 경우가 모든 실험체에서 쪼갬과괴 되었으며, 충분한 피복두께를 갖는 실험체는 모두 뺨힘과괴되었다.

이 실험을 통해 측정된 최대부착강도와 이에 대한 미끄러짐량을 섬유 혼입률 및 피복두께에 따라 정리하면 Table 6, 7, 8과 같다. 실험 결과는 각 변수당 2개씩 제작된 실험체의 평균값이다.

Table 6 0% volume fraction of steel fiber

Index	τ_m (MPa)	s_m (mm)
S-13A0	7.26	0.97
S-16A0	9.95	0.45
G-13A0	7.14	0.68
G-16A0	6.45	2.19
S-13B0	9.30	2.12
S-16B0	12.38	1.26
G-13B0	8.47	1.51
G-16B0	6.07	2.53

Table 7 1% volume fraction of steel fiber

Index	τ_m (MPa)	s_m (mm)
S-13A1	7.45	0.43
S-16A1	10.27	0.51
G-13A1	7.26	0.92
G-16A1	5.74	2.11
S-13B1	9.58	1.61
S-16B1	15.27	0.97
G-13B1	8.89	1.13
G-16B1	7.82	2.03

Table 8 2% volume fraction of steel fiber

Index	τ_m (MPa)	s_m (mm)
S-13A2	7.65	0.92
S-16A2	12.17	0.67
G-13A2	7.49	1.54
G-16A2	7.33	1.80
S-13B2	10.26	1.58
S-16B2	17.17	0.88
G-13B2	9.57	1.54
G-16B2	9.14	0.84



Fig. 4 Setting of test specimen

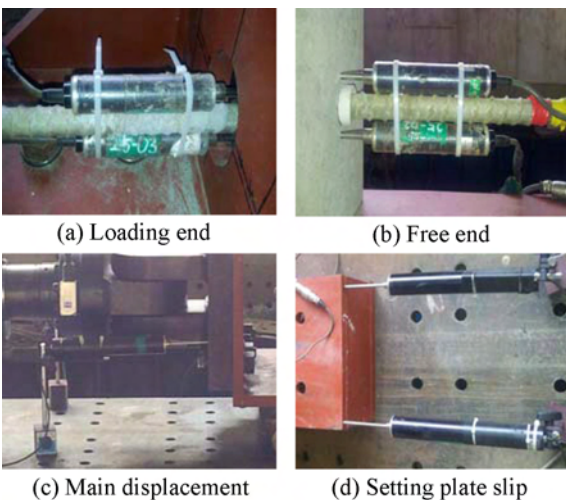


Fig. 5 Setting of LVDT

3.1 피복두께에 따른 GFRP 보강근의 부착특성

보강근에서 피복두께에 따른 주요 파괴모드는 작은 피복두께를 갖는 경우 쪼갬파괴 형태를 취하며, 충분한 피복두께를 갖는 경우 뽑힘파괴 형태로 나타났다. 이는 피복두께에 따라 철근의 인발에 의해 발생하는 인장력에 저항하는 콘크리트의 전체 면적이 달라지기 때문으로 판단된다. ACI 440.1R-03에 따르면 쪼갬파괴에 대한 별도의 식은 제안하지 않고 있으며, 콘크리트 피복두께를 보강근 직경의 1.5배로 제한하고 있을 뿐이다.^{10,11)} 이에 이 연구에서는 콘크리트의 피복두께 제한값인 보강근 직경의 $1.5d_b$ 피복두께와 기존 발표된 연구자료^{3,6,7)}에 따라 뽑힘파괴를 유도할 수 있는 충분한 피복두께인 보강근 직경의 $5.4d_b$ 피복두께를 선정하여 비교분석하였다. 피복두께 및 보강근 직경에 따른 실험결과는 강섬유로 보강되지 않은 실험체를 대상으로 부착응력-미끄러짐 관계 그래프를 통하여 Fig. 6, 7에 나타내었다.

보강근 직경의 $1.5d_b$ 인 작은 피복두께를 갖는 경우 모든 실험체는 최대하중 이후 부착응력의 급격한 감소로 쪼갬파괴되는 매우 취약적인 파괴양상을 나타내었다. 그러나 Fig. 7과 같이 D16 직경의 GFRP 보강근이 사용된 실험체는 최대 부착응력 발현 이후의 응력 감소가 완만하게 나타났다. 이는 최대하중 이후에도 GFRP 보강근의 특성인 외피의 미끄러짐 작용에 의하여 부착응력이 서서히 감소하였기 때문으로 판단된다. 또한, 보강근 직경의 증가에 따라 이형철근은 부착응력의 증가를 보였지만 GFRP 보강근은 부착응력의 변화가 거의 일어나지 않았다. 그리고 최대 부착응력 발현시 미끄러짐량은 철근이 다소 크게 나타났으며, 보강근의 직경과 피복두께에 비례하여 크게 나타남을 확인할 수 있었다.

3.2 강섬유 혼입률에 따른 GFRP 보강근의 부착특성

일반적으로 콘크리트와 보강근의 부착거동은 초기 미소 슬립 발생단계, 콘크리트 내부균열 발생단계, 최대 부착응력 도달 후 발생하는 인발단계로 나눌 수 있다.^{12,13)} 초기 미소 슬립 발생단계는 보강근의 하중이 증가하면서 부착응력은 급격히 증가하지만, 슬립은 거의 발생하지 않는 단계로 부착응력-미끄러짐 관계가 거의 선형적인 거동을 보이며, 이 실험에서도 모든 실험체는 이 단계에서 선형적인 거동을 보여주었다. 콘크리트 내부균열 발생단계는 하중의 증가는 적으며 최대부착응력을 향하여 서서히 접근하고 슬립이 증가하여 부착응력-미끄러짐 관계가 비선형적인 거동을 보이는 단계이다. 이 실험에서는 이형철근에 비하여 GFRP 보강근에서 슬립이 증가하여 부착응력-미끄러짐관계가 비선형적으로 크게 나타났다. 이는 GFRP 보강근의 경우 모체와 외피부분이 일체화되지 않기 때문으로 최대부착응력에 도달할 때까지 모체와 외피부분이 분리되는 현상이 슬립거동으로 나타나기 때문으로 판단된다. 실험 결과 Fig. 8과 10에 나타난 바와 같이 작은 피복

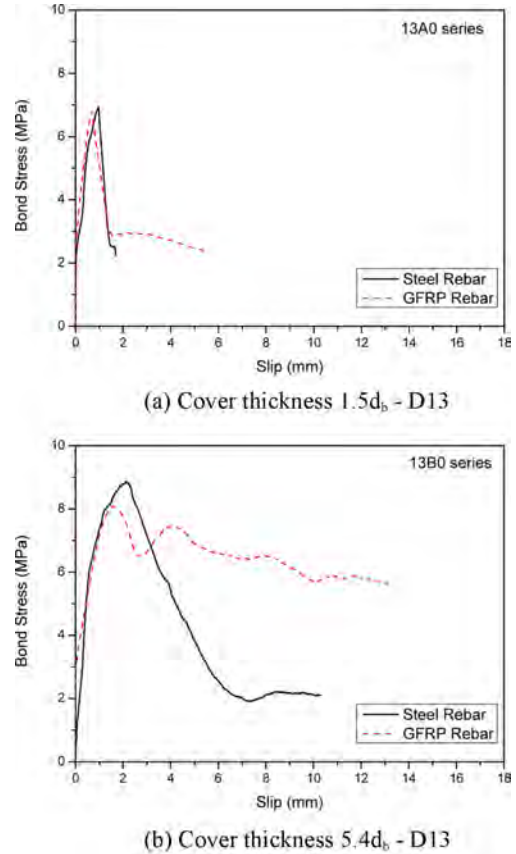


Fig. 6 Bond stress-slip relation (cover thickness): 0% vol. fraction of steel fiber, D13

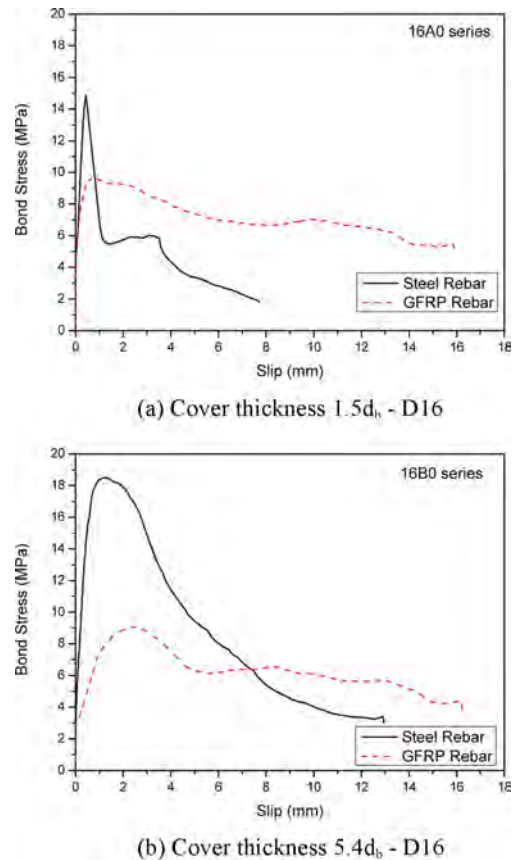


Fig. 7 Bond stress-slip relation (cover thickness): 0% vol. fraction of steel fiber, D16

두께를 갖는 경우에는 강섬유 혼입률을 0%, 1%, 2%로 증가시켰음에도 모든 실험체에는 쪼개짐 파괴가 발생하였다. 그러나 최대 부착응력의 발현 이후 강섬유를 혼입한 실험체의 경우 강섬유 혼입률의 증가에 따라 최대하중 이후 취성적인 부착응력 감소폭이 감소하였다. 이는 섬유유의 가교작용(matchmaker effect)에 의해 콘크리트 내부의 미소균열 및 쪼개짐 균열의 성장을 억제하였기에 나타난 결과로 판단된다. 충분한 피복두께를 가질 경우에는 Fig. 9와 11에 나타난 바와 같이 강섬유 혼입률 1%, 2%의 경우 최대 부착응력은 혼입률 0%인 실험체와 비교하였을 시 부착응력이 증가함을 확인할 수 있었다. 따라서 피복두께의 차이에 따라 파괴거동에 차이가 발생함에 따라 강섬유의 보강에 따른 콘크리트 인장강도 증가량과 피복 두께가 주요 변수임을 확인할 수 있었다. 특히, Naaman¹⁴⁾의 연구 결과를 통한 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도 평가 모델을 사용하였을 경우 섬유가 보강되지 않았을 경우와 1% 및 2%의 섬유를 보강할 경우 각각 2.89 MPa, 7.02 MPa, 11.13 MPa의 인장강도를 나타내는 것으로 보아 철근이 보강근으로 사용될 경우 섬유의 보강효과가 부착강도에 선형적으로 반영할 수 있을 것으로 판단된다. 반면 GFRP 보강근이 사용될 경우에는 2%의 섬유 혼입률이 사용될 경우 콘크리트의 인장강도의 증가분을 섬유 혼입률에 따라 선형적으로 반영하기 어려울 것으로 판단되며 콘크리트의 인장강도가 직접적으로 반영되는 쪼개짐 파괴시의 부착강도에 대해서는 추가 연구

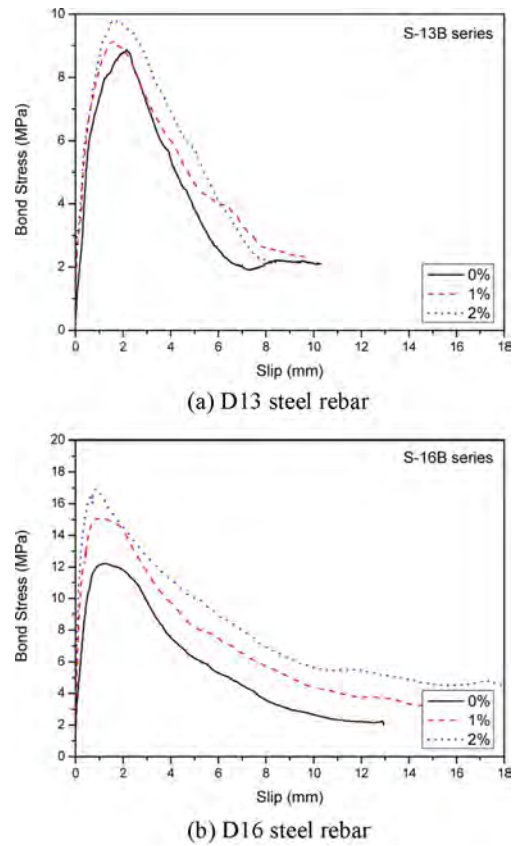


Fig. 9 Bond stress-slip relation (fiber vol. fraction): steel rebar with $5.4d_b$ cover thickness

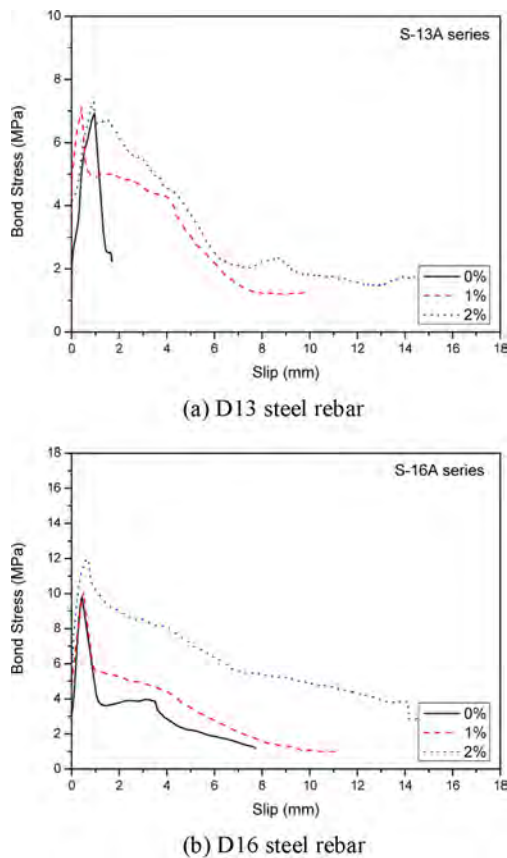


Fig. 8 Bond stress-slip relation (fiber vol. fraction): steel rebar with $1.5d_b$ cover thickness

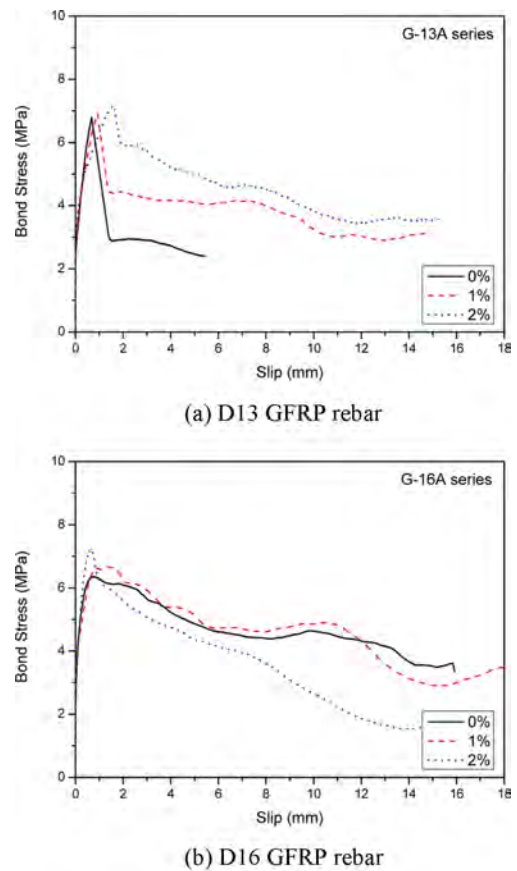
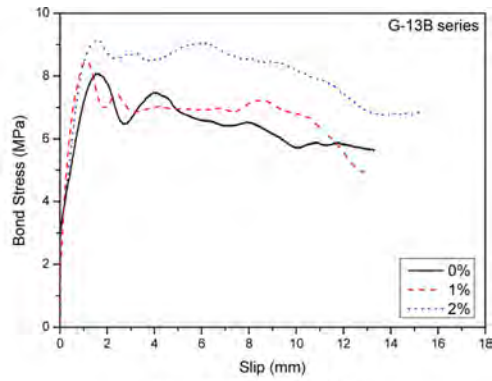
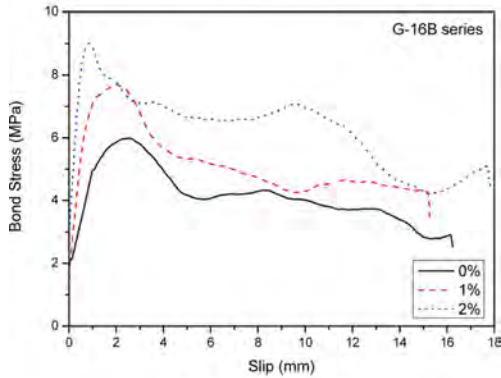


Fig. 10 Bond stress-slip relation (fiber vol. fraction): GFRP rebar with $1.5d_b$ cover thickness



(a) D13 GFRP rebar



(b) D16 GFRP rebar

Fig. 11 Bond stress-slip relation (fiber vol. fraction): GFRP rebar with $5.4d_b$ cover thickness

가 필요할 것이다.

4. 결 론

이 연구에서는 강섬유 혼입률 및 피복두께, 그리고 보강근의 직경 및 이형철근과 GFRP 보강근을 변수로 하여 실험체를 제작·실험하였으며, 이형철근과 GFRP 보강근의 부착특성을 부착응력-미끄러짐 관계를 통하여 비교 평가하였다. 강섬유 혼입률은 최대 부착응력 발생 후 거동에도 영향을 미치는 것으로 나타났으며, 피복두께에 따라 상이한 파괴형태를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 이에 따른 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 이형철근의 경우 보강근 직경의 증가에 따라 확실한 부착응력의 증가를 보였지만, GFRP 보강근의 경우 그 차이는 미소하였다. 그러나 최대부착응력 이후 이형철근은 급격한 하중감소를 보이는 반면, GFRP 보강근은 완만한 하중 감소를 보였다.
- 2) 보강근 직경의 1.5배의 작은 피복두께를 갖는 경우 보강근의 종류에 관계없이 취성적인 쪼갬파괴 형태를 취하며, 1.5배 이상의 충분한 피복두께를 갖는 경우 뿔힘파괴 형태를 취함을 알 수 있었다.
- 3) 강섬유 혼입률의 증가에 따라 쪼갬파괴 이후 급작스런 부착응력의 감소폭이 감소하였다. 이는 강섬유의 가교작용으로 인해 콘크리트 내부의 미소균열 및 쪼갬균열의 성장을 억제하였기 때문인 것으로 판단

된다.

- 4) 작은 피복두께를 갖는 경우 최대부착응력 도달 전에 쪼갬파괴되면서 강섬유 혼입률에 따른 부착응력의 변화가 거의 없었지만, 충분한 피복두께를 갖는 경우 최대부착응력에 도달이후 강섬유 혼입률의 증가에 따라 부착응력이 증가하였다.
- 5) 강섬유 혼입률에 따른 부착강도 상승치의 정량적 산정방안에 대한 연구가 필요하며 기존 부착응력-미끄러짐 관계의 수정에 대한 연구가 추가되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2012년 산학협동재단의 지원을 받아 수행된 연구이며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. Abdalla, H. A., "Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars," *Composite Structures*, Vol. 56, Issue 1, 2002, pp. 63-71.
2. Choi, Y. C., Park, K. S., Choi, C. S., and Choi, H. K., "Bond Properties of GFRP Rebar in Fiber Reinforced Concrete (Engineered Cementitious Composite)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 6, 2011, pp. 809-815. (doi: <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2011.23.6.809>).
3. Ha, S. S. and Yoon, J. S., "Comparison of Development Length Equation of Bottom and Top GFRP Bars with Splitting Failure," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 9, No. 6, 2009, pp. 141-149.
4. Park, C. G., Won, J. P., and Kang, J. W., "Recommendations of Environmental Reduction Factor of FRP Rebar for Durability Design of Concrete Structure," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 16, No. 4, 2004, pp. 529-539.
5. Haddad, R. H. and Abendeh, R. M., "Effect of Thermal Cycling on Bond between Reinforcement and Fiber Reinforced Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 26, Issue 6, 2004, pp. 743-752.
6. Lee, J. Y., Yi, C. K., Kim, T. Y., Park, J. S., and Park, Y. H., "Bond Failure Surface of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 20, No. 3, 2008, pp. 383-391.
7. Won, J. P., Park, C. G., Kim, H. H., and Lee, S. W., "Bond Properties of GFRP Rebar and High Strength Concrete with Steel Fiber Reinforcements," *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 2, 2007, pp. 265-270.
8. Kang, Y. J., "A Study on Bond Behavior of GFRP Rebars Embedded in Fiber Reinforced Concrete," *Journal of the SungKyunKwan University*, 2012, pp. 1-64.
9. Park, J. S., You, Y. J., Park, Y. H., and Kim, K. H., "An Experimental Study on the Bond Characteristics of GFRP Rebars with Bond Length," *Journal of the Korea Society of Civil Engineers*, Vol. 10, No. 10, 2007, pp. 2326-2329.
10. Ha, S. S. and Choi, D. U., "Bond Characteristics of GFRP Bars with Small Cover Thickness," *Journal of the Han-*

Kyong National University, 2007, pp. 39-48.

11. Park, J. S., "Flexural Bonding Characteristics of Embedded Length of FRP rod Types," *Journal of the HanYang University*, 2010, pp. 1-58.
12. Xial, J. and Falkner, H., "Bond Behavior between Recycled Aggregate Concrete and Steel Rebars," *Construction and Building Materials*, Vol. 21, Issue 2, 2007, pp. 395-401.
13. Tepfers, R., "Cracking of Concrete Cover along Anchored

Deformed Reinforcing Bars," *Magazine of Concrete Research*, Vol. 31, No. 106, 1979, pp. 3-12.

14. Naaman, A. E. and Reinhardt, H. W., "Characterization of High Performance Fiber Reinforced Cement Composites," *Proceeding of Second International Symposium on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites*, 1996, pp. 1-24.

요 약 이 연구는 강섬유 혼입률에 따른 피복두께와 GFRP 보강근의 부착특성을 부착응력-미끄러짐 관계를 통하여 평가하였다. 실험변수로는 강섬유 혼입률을 0%, 1%, 2%로 하였고 피복두께는 보강근 직경(d_b)의 $1.5d_b$ 와 $5.4d_b$ 로 하였다. GFRP 보강근의 직경은 D13과 D16 두 가지를 사용하였으며, 비교실험을 위하여 이형철근을 사용하였다. 실험 결과 피복두께에 따라 상이한 파괴형태를 취했으며, 작은 피복두께를 갖는 $1.5d_b$ 의 경우 쪼갠파괴 형태를 취했고 충분한 피복두께인 $5.4d_b$ 를 갖는 경우 뽀뽀파괴 형태를 취했다. 이에 강섬유 혼입률을 증가시켰음에도 파괴형태에는 영향이 없었다. 그러나 강섬유 혼입률의 증가에 따라 최대부착응력 도달 후 급작스런 부착응력 감소폭이 감소하였다. 또한, 작은 피복두께를 갖는 경우 최대부착응력에 도달 전에 파괴되면서 강섬유 혼입률에 따른 부착응력의 차이가 거의 없었지만, 충분한 피복두께를 갖는 경우에는 최대부착응력에 도달 하면서 강섬유 혼입률 증가에 따라 부착응력이 증가하였다. 이는 강섬유의 가교작용으로 인해 콘크리트 내부의 미소균열 및 쪼개짐 균열의 성장을 억제하였기 때문으로 판단되었다.

핵심용어 : 강섬유, GFRP 보강근, 피복두께, 부착응력-미끄러짐, 부착특성