



섬유보강 콘크리트에 묻힌 GFRP 보강근의 부착거동에 대한 섬유영향 평가

강지은¹⁾ · 김병일¹⁾ · 박지선²⁾ · 이정윤^{1)*}

¹⁾성균관대학교 건설환경시스템공학과 ²⁾한국건설기술연구원

Influence Evaluation of Fiber on the Bond Behavior of GFRP Bars Embedded in Fiber Reinforced Concrete

Ji-Eun Kang,¹⁾ Byoung-Ill Kim,¹⁾ Ji-Sun Park,²⁾ and Jung-Yoon Lee^{1)*}

¹⁾Dept. of Civil and Environmental System Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

²⁾Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-714, Korea

ABSTRACT Though steel reinforcing bars are the most widely used tensile reinforcement, corrosion problems are encountered due to the exposure to aggressive environments. As an alternative material to steel, the fiber reinforced polymers have been used as reinforcement in concrete structures. However, bond strength of FRP rebar is relatively low compared to steel rebar. It has been reported that fibers in matrix can resist crack growth, propagation and finally result in an increase of toughness. In this study, high-strength concrete reinforced with structural fibers was produced to enhance interfacial bond behavior between FRP rebar and concrete matrix. The interfacial bond-behaviors were investigated from a direct pullout test. The test variables were surface conditions of GFRP bars and fiber types. Total of 54 pullout specimens with three different types of bars were cast for bond strength tests. The bond strength-slip responses and resistance of the bond failure were evaluated. The test results showed that the bond strength and toughness increased according to the increased fiber volume.

Keywords : pull-out test, fiber reinforced concrete, fiber reinforced polymer, bond strength

1. 서 론

콘크리트의 보강재로써 많이 쓰이는 철근은 염해에 의한 부식으로 내구성이 저하되는 문제를 가지고 있다. 이를 해결하기 위한 방법의 하나로 FRP 보강근(fiber reinforced polymer rebar)이 개발되었으며, 근년 휨, 전단, 부착, 재료 물성 등과 관련된 다양한 연구가 진행되고 있다. 기존의 연구에 따르면 FRP 보강근은 부식에 대한 저항성이 철근보다 좋으며 인장강도도 높고 경량이다.^{1,2)} 그러나 FRP 보강근은 철근과는 다른 표면 형태를 갖고 있기 때문에 철근과 상이한 부착거동을 나타냄이 지적되었다.^{3,4)} 즉, 리브나 마디를 갖고 있는 이형철근은 지압력이 작용하여 상대적으로 높은 부착강도를 나타내지만, 표면이 매끄럽거나, 모래 등이 부착된 FRP 보강근은 이형철근에 비하여 상대적으로 낮은 부착강도를 나타내었다.

따라서 FRP 보강근을 실제 건물에 적용하기 위해서는 적합한 부착강도의 평가 및 부착강도의 보강이 필요하다. 이 연구에서는 섬유를 보강하였을 때 달라지는 FRP 보강근의 부착성능을 평가하였다. 섬유를 보강하였을 때 콘크리트의 인장강도가 증가하고, 내구성이 개선된다는 것은 이미 많은 연구자들에 의해 증명되었다.⁵⁾ 또한 섬유에 의한 가교효과로 콘크리트와 철근의 부착성능이 개선됨이 Neven⁶⁾에 의하여 보고되었으며, Issa⁷⁾는 FRP 보강근을 섬유보강 콘크리트 보에 사용하여 보의 휨거동과 연성을 평가하여 섬유의 혼입이 보의 수직 처짐을 지연시키는데 효과가 있다는 것을 지적하였다. 근년 Won⁸⁾ 등은 FRP 보강근에 대한 부착강도 평가 실험을 통하여 PVA섬유가 혼입된 콘크리트와 브레이딩 기술로 표면 처리한 FRP 보강근의 부착 거동을 평가하였다. 이와 같이 섬유보강 콘크리트를 이용한 FRP 보강근의 성능평가가 이루어지고 있지만 FRP 보강근은 표면 형상에 따라서 거동이 달라지므로 다양한 종류의 보강근에 대한 부착거동의 평가가 필요하며, 또한 FRP 보강근의 부착성능 개선에 대한 연구가 필요하다. 이 연구에서는 3가지 종류

*Corresponding author E-mail: jylee@skku.ac.kr

Received November 12, 2011, Revised December 24, 2011,

Accepted January 3, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

의 섬유(강섬유, PVA섬유, PP섬유)를 적용함으로써 섬유 보강 콘크리트와 2종류의 FRP 보강근(모래분사형과 나선형) 표면 형상에 따른 부착 성능을 평가하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용 재료

부착성을 평가하기 위하여 사용된 보강근은 Fig. 1과 같이 3가지 종류이다. 이 중에서 이형철근은 FRP 보강근과 부착성을 비교 평가하기 위하여 사용되었으며 국내 I사의 제품을 사용하였다. FRP 보강근은 실제 공사 현장에서 많이 사용되는 GFRP 보강근(glass fiber reinforced polymer bars)이 사용되었다. GFRP 보강근은 현재 여러 종류의 제품이 생산되고 있어서 모든 보강근의 부착성을 평가하기에는 실험적으로 제한이 따른다. 따라서 이 연구에서는 나선형과 모래분사형의 두 종류의 FRP 보강근의 부착성을 검증하였다. GFRP의 보강근으로는 캐나다 A사의 모래분사형 GFRP 보강근(sand coating GFRP bars)과 미국 H사의 나선형 GFRP 보강근(herically rapping GFRP bars)을 사용하였다. 모래분사형 보강근은 Fig. 1(b)와 같이 직선형 섬유표면에 모래를 접착한 보강근이며, 나선형 보강근은 Fig. 1(c)와 같이 섬유를 꼬아 표면에 이형마디가 형성되도록 한 보강근이다. 보강근의 물리적 특성은 Table 1에 상세하게 제시되었다.

콘크리트를 보강하기 위한 섬유로는 실제 건설공사에서 많이 사용되는 구조용 강섬유와 PP섬유, PVA섬유를 사용하였다. 강섬유는 Table 2에 나타난 것과 같이 양단에 후크가 있는(hooked type) 섬유를 사용하였다. 또한

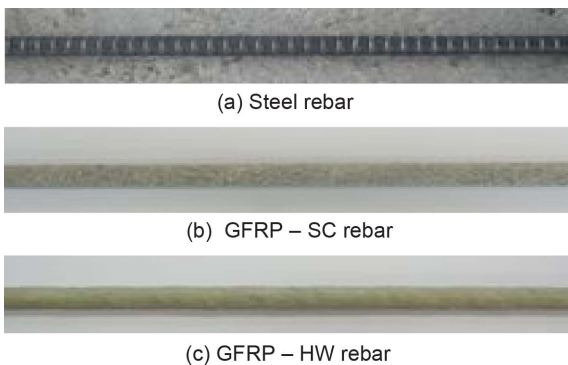





Fig. 1 FRP bars

Table 1 Material property of rebars

Bar type	Fiber	Diameter (mm)	Area (mm ²)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Steel	-	12.7	126.7	560	200
GFRP-SC	E-glass	12.7	129	690	42.0
GFRP-HW	E-glass	12.7	144.8	617	40.8

Table 2 Properties of structure fibers

Fiber	Length (mm)	Diameter (mm)	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
 Hookend steel fiber	30	0.56	1,100	200
 PP (Polypropylene)	30	0.5	600	7
 PVA (Polyvinyl alcohol)	30	0.66	900	29

콘크리트와의 역학적 부착성을 향상시키기 위해 표면을 절곡형으로 처리한 PP섬유와, 친수성으로 표면을 처리하여 화학적 부착성을 향상시킨 PVA섬유를 사용하였다. 사용된 섬유의 형상 및 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 배합 설계

섬유를 혼합한 콘크리트에 철근 및 GFRP 보강근과의 부착성을 평가하기 위하여 구조용 섬유를 사용하여 콘크리트를 배합하였다(Table 3 참조). 콘크리트는 1종 보통포틀랜드시멘트가 사용되었으며, 비중 2.65의 잔골재와 2.44의 굵은 골재가 사용되었다. 또한 폴리카르보산계의 고성능감수제가 사용되었다. 콘크리트에 사용된 섬유의 혼합량은 각각 0%, 0.5%, 1.0%의 3종류로 하였다. 콘크리트 혼합은 강제식 팬 믹서에 잔골재, 굵은 골재를 넣고 1분간 건비빔을 실시한 후 필요한 양의 1/2에 해당하는 물을 넣고 다시 1분간 재료를 혼합하였다. 이 후에 시멘트와 남은 물을 모두 넣고 2분간 재료를 혼합하였으며, 마지막으로 고성능감수제와 섬유를 첨가하고 1분

Table 3 Mix proportion of concrete

Mix type	W/B (%)	Unit materials contents (kg/m ³)					Fiber
		C	W	Coarse. agg	Fine. agg	HWA	
Plain	45	397	177	1040	697	1	0
Steel	45	394	177	1040	697	1	40
						1.97	80
PP	45	394	177	1040	697	0.75	4.5
							9.25
PVA	45	394	177	1040	697	1.5	6.5
						1.97	13

HWA : high water reducing admixture

Table 4 Test specimens

Bars		Volume fraction of fiber		
		0%	0.5%	1.0%
Steel	Steel fiber	S-PC-1,2,3	S-ST0.5-1,2,3	S-ST1.0-1,2,3
	PP	S-PC-1,2,3	S-PP0.5-1,2,3	S-PP1.0-1,2,3
	PVA	S-PC-1,2,3	S-PVA0.5-1,2,3	S-PVA1.0-1,2,3
GFRP-SC	Steel fiber	SC-PC-1,2,3	SC-ST0.5-1,2,3	SC-ST1.0-1,2,3
	PP	SC-PC-1,2,3	SC-PP0.5-1,2,3	SC-PP1.0-1,2,3
	PVA	SC-PC-1,2,3	SC-PVA0.5-1,2,3	SC-PVA1.0-1,2,3
GFRP-HW	Steel fiber	HW-PC-1,2,3	HW-ST0.5-1,2,3	HW-ST1.0-1,2,3
	PP	HW-PC-1,2,3	HW-PP0.5-1,2,3	HW-PP1.0-1,2,3
	PVA	HW-PC-1,2,3	HW-PVA0.5-1,2,3	HW-PVA1.0-1,2,3

간 추가적으로 재료를 혼합하여 실험체를 제작하였다.

실험체는 압축강도 실험체를 포함 Table 4와 같이 총 84개를 제작하였다. 실험체는 콘크리트의 압축강도를 고정하고 3가지 종류의 보강근(이형철근, 모래분사형 GFRP 보강근, 나선형 GFRP 보강근)과 3종류의 콘크리트 혼입용 섬유(강섬유, PP섬, PVA섬유) 및 섬유의 혼입량을 변수로 하였다. 실험체는 콘크리트 부착강도의 편차를 고려하여 동일 변수로 3개씩 제작하였다. Table 4에 표시된 실험체 이름의 S는 철근, SC는 모래분사형 FRP 보강근, HW는 나선형 FRP 보강근, ST는 강섬유를 나타낸다.

3. 실험 방법

3.1 압축강도 실험

압축강도 측정을 위해 100 × 200 mm인 원주형 공시체를 각각 3개씩 제작하였으며, 24시간 동안 초기양생을 실시한 후 탈형하여 28일간 수중양생을 실시하였다. 실험은 KS F 2405 기준에 따라 2,000 kN 용량의 만능시험기를 사용하여 매초 0.2 MPa의 재하속도로 압축강도를 측정하였다. 실험 결과는 Fig. 2에 나타내었다. 실험 결

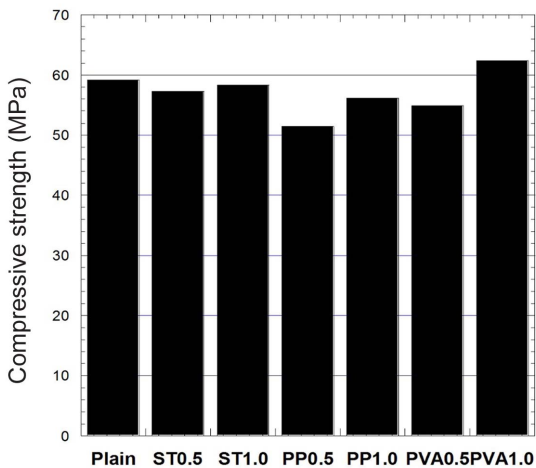


Fig. 2 Compressive strength of fiber reinforced concrete

과 기존 연구자의 실험 결과처럼 낮은 혼입률로 인한 압축강도의 영향은 콘크리트 모체의 영향이 더 크기 때문에 섬유의 혼입으로 인한 압축강도의 영향이 미비하여 압축강도의 변화는 크지 않았다.¹⁰⁾

3.2 부착 실험

섬유를 혼입한 콘크리트에 놓인 철근과 GFRP 보강근의 부착성능을 평가하기 위하여 뽑힘부착 실험을 수행하였다. 실험에서는 섬유의 종류와 혼입량에 따른 GFRP 보강근의 부착성능을 평가하고자 하였다. 실험체는 Fig. 3과 같이 102 × 152.4 × 190.5 mm의 입방형의 콘크리트 블록이며 콘크리트 내부에 GFRP 보강근을 넣어 수평방향으로 타설하여 제작하였다. GFRP의 부착길이는 하중가력시 콘크리트에 가해지는 압축력을 배제하기 위하여 기존 연구에서 사용된 실험체의 형태와 유사하게 보강근 직경의 5배로 하였다. 실험체의 상하 부위는 가력판에 직접 닿아 압축력이 작용하여 부착강도를 증대시킬 우려가 있으므로, 보강근 직경 5배를 제외한 위치에서는 보강근에 고무관을 끼워 비부착구간을 형성하였다.¹⁰⁾ 각각 3개의 실험체를 제작하였으며, 실내에서 24시간 초기양생한 후 탈형하여 28일간 수중양생하였다. 실험은 변위 제어 방식으로 2,000 kN 용량의 만능시험기를 사용하여 가력하였으며, 변위측정을 위해 LVDT를 실험체의 상하 부분에 설치하였다. 실험체의 형상 및 실험 모습은 Figs. 3, 4와 같다.

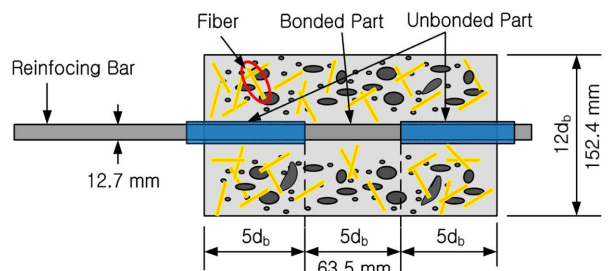


Fig. 3 Bond test specimens

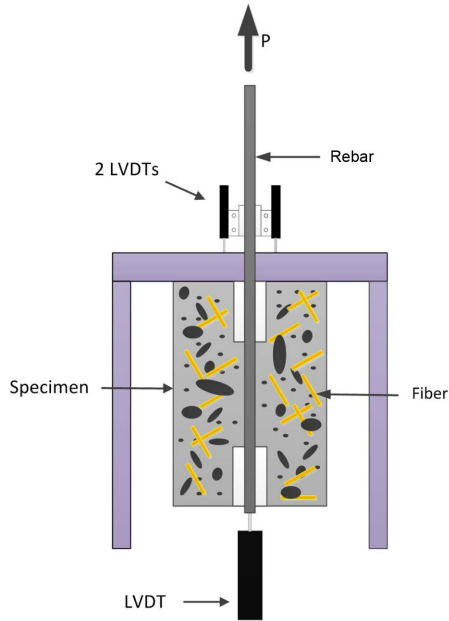


Fig. 4 Bond test set-up

4. 실험 결과

4.1 파괴 형태

고강도 콘크리트는 보통강도 콘크리트에 비해 보강근과의 접착력이 크게 작용한다. 모래분사형 보강근의 경우 콘크리트와 보강근 레진의 접착력이 보강근과 레진의 접착력보다 클 경우 뿔힘파괴가 발생하며, 나선형 보강근은 리브의 전단강성이 부족한 경우 리브의 파괴가 발생 하면서 뿔힘파괴가 발생하며 전단강성이 충분하거나 피복이 부족한 경우 쪼갬 파괴가 발생한다. 이 실험에서 사용된 보강근의 파괴형태는 뿔힘 파괴와 쪼갬파괴로 나눌 수 있다. 모래분사형 보강근의 경우 모두 뿔힘 파괴가 발생하였으며, 나선형 보강근의 경우 뿔힘 파괴와 쪼갬파괴가 발생하였으나, 대부분 보강근의 외피와 섬유보강근 자체의 부착면에서 파괴가 일어나면서 뿔힘파괴가 발생하였다.

4.2 하중과 미끄럼 곡선

섬유의 종류와 혼입량에 따른 콘크리트와 GFRP 보강근 사이의 부착하중과 미끄럼 관계를 Fig. 5에 나타내었다. 그림의 하중과 미끄럼 관계는 3개의 실험체 중의 대표 거동을 나타낸 것이며 모든 실험체의 부착강도와 부착강도에 상응하는 미끄럼은 Table 5에 나타내었다. 실험 결과에 의하면 3가지 보강근의 부착 거동은 상이하였다.

FRP 보강근은 부착강도는 콘크리트와 보강근의 마찰 작용 및 보강근의 표면요철에 의한 기계적 작용에 의해서 발생한다. 그러나 인발 하중을 가했을 때 이 부분에서 콘크리트 균열의 진행됨에 따른 할렬파괴로 인해 보강근과 콘크리트 사이의 부착파괴가 발생하게 되는데 섬

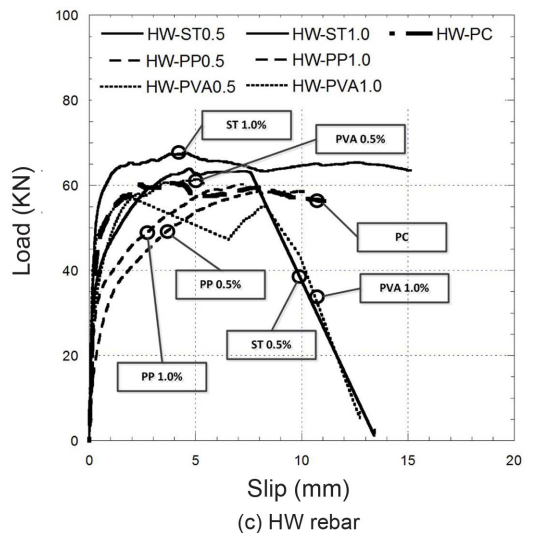
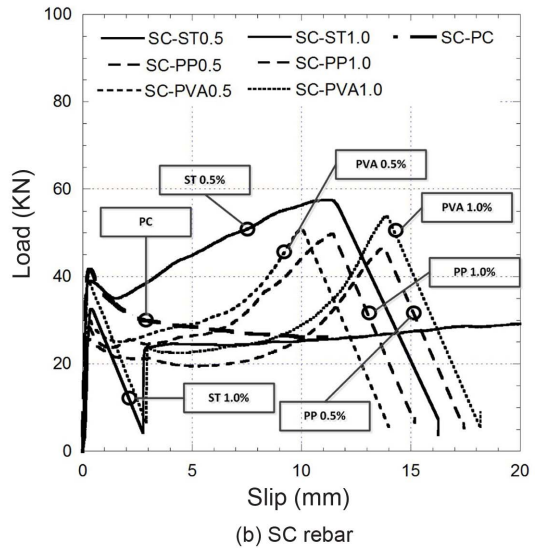
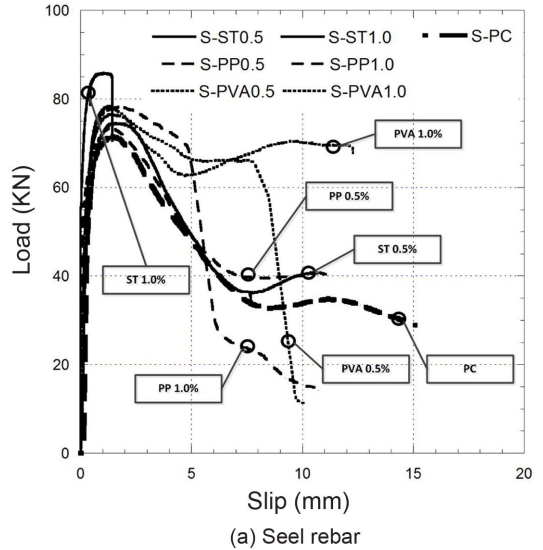


Fig. 5 Load vs slip behavior of GFRP rebars in fiber reinforced concrete

유를 보강 해줌으로써 균열 진행을 제어하여 할렬파괴를 억제해줌으로써 부착강도를 증가시킬 수 있다. 이 실험에서 섬유를 보강하여 부착실험을 한 결과 이형철근의 경우에는 Fig. 5(a)와 같이 강섬유와 PP섬유가 0.5% 혼

Table 5 Test results of bond stress - slip

Specimens	τ_m	s_m	τ_r	Specimens	τ_m	s_m	τ_r	Specimens	τ_m	s_m	τ_r
S-PC-1	27.83	1.35	-	SC-PC-1	16.33	0.19	-	HW-PC-1	23.73	3.37	-
S-PC-2	28.02	1.39	-	SC-PC-2	15.99	0.29	-	HW-PC-2	25.3	5.08	-
S-PC-3	27.93	1.34	-	SC-PC-3	10.66	0.28	-	HW-PC-3	23.97	3.76	-
S-ST0.5-1	29.46	1.59	3.83	SC-ST0.5-1	22.73	11.01	2.95	HW-ST0.5-1	26.07	9.73	3.39
S-ST0.5-2	29.50	1.24	3.83	SC-ST0.5-2	19.57	16.5	2.54	HW-ST0.5-2	25.25	4.69	3.28
S-ST0.5-3	29.27	1.31	3.80	SC-ST0.5-3	23.25	17.53	3.02	HW-ST0.5-3	23.97	5.29	3.12
S-PP0.5-1	30.70	1.35	3.99	SC-PP0.5-1	17.66	10.12	2.30	HW-PP0.5-1	23.87	7.22	3.10
S-PP0.5-2	28.50	1.57	3.70	SC-PP0.5-2	18.42	13.73	2.39	HW-PP0.5-2	23.20	8.01	3.02
S-PP0.5-3	29.03	1.35	3.77	SC-PP0.5-3	19.33	10.12	2.51	HW-PP0.5-3	22.06	6.83	2.87
S-PVA0.5-1	30.13	1.37	3.92	SC-PVA0.5-1	20.10	8.14	2.61	HW-PVA0.5-1	25.83	8.31	3.36
S-PVA0.5-2	30.31	1.82	3.94	SC-PVA0.5-2	20.15	9.96	2.62	HW-PVA0.5-2	24.25	4.93	3.15
S-PVA0.5-3	30.22	1.28	3.93	SC-PVA0.5-3	21.86	8.21	2.84	HW-PVA0.5-3	22.68	9.69	2.95
S-ST1.0-1	31.94	1.23	4.15	SC-ST1.0-1	12.89	0.36	1.68	HW-ST1.0-1	26.21	1.2	3.41
S-ST1.0-2	33.94	1.05	4.41	SC-ST1.0-2	13.13	0.28	1.71	HW-ST1.0-2	26.69	4.42	3.47
S-ST1.0-3	33.99	1.16	4.42	SC-ST1.0-3	21.34	0.32	2.77	HW-ST1.0-3	26.88	3.47	3.49
S-PP1.0-1	30.89	1.68	4.01	SC-PP1.0-1	19.14	6.89	2.49	HW-PP1.0-1	21.91	4.78	2.85
S-PP1.0-2	30.98	1.25	4.03	SC-PP1.0-2	19.67	10.7	2.56	HW-PP1.0-2	24.35	6.62	3.16
S-PP1.0-3	30.65	1.62	3.98	SC-PP1.0-3	19.67	11.36	2.56	HW-PP1.0-3	23.83	7.06	3.10
S-PVA1.0-1	30.13	1.37	3.92	SC-PVA1.0-1	20.91	10.11	2.72	HW-PVA1.0-1	21.07	2.76	2.74
S-PVA1.0-2	30.94	1.23	4.02	SC-PVA1.0-2	21.29	13.9	2.77	HW-PVA1.0-2	25.73	7.08	3.34
S-PVA1.0-3	31.79	1.28	4.13	SC-PVA1.0-3	23.73	11.46	3.08	HW-PVA1.0-3	22.87	1.64	2.97

입되었을 때 섬유가 혼입되지 않은 기준 실험체보다 최대 부착하중이 다소 증가하였지만, 최대 하중에 도달한 이후의 거동은 거의 유사하였다. 강섬유가 1.0% 혼입된 경우 이형철근의 부착강도는 섬유가 보강되지 않은 경우보다 1.2% 증가하였다. PP섬유를 혼입했을 때 거의 선형적으로 하중이 증가하며 하중의 감소가 완만해지는 것을 알 수 있다. 이것은 섬유의 가교효과로 미세균열이 섬유가 없는 콘크리트보다 더 많이 발생하고, 이미 발생한 균열의 진전을 억제했기 때문으로 판단된다. PVA섬유의 경우 PP섬유를 혼입했을 때와 거의 유사한 거동을 나타냈다. 0.5%의 PVA섬유가 혼입되었을 때 부착파괴가 발생하기 전까지 완만한 하중 감소를 보이고 있으며, 1.0%의 PVA섬유가 혼입되었을 때 하중 감소가 매우 적은 것을 알 수 있는데 이것은 섬유가 보강근과 콘크리트 사이의 균열의 증가를 억제하여 부착감소를 지연시켰기 때문으로 판단된다. 이러한 결과는 기존의 철근에 섬유를 넣어 측정된 부착 실험 결과와 유사하다.¹¹⁾

모래분사형 FRP 보강근의 하중-미끌림 관계가 Fig. 5(b)에 표시되어 있다. 그림에서 섬유를 보강한 경우 모래분사형 FRP 보강근의 하중-변위 곡선에는 두 개의 하중 변환점이 나타남을 알 수 있다. 즉 미끌림이 0.5 mm 이하에서 하중의 증감이 나타나고 미끌림이 약 12 mm일 때 하중의 증감이 나타난다(이 연구에서는 초기의 하중 증감을 초기 최대 부착하중, 미끌림이 약 12 mm일 때 하중의 증감을 후기 최대 부착하중으로 정의하였다). 그림

에서 섬유가 보강된 경우에도 섬유가 없는 기준 실험체(SC-PC)와 비교해 초기 최대 부착하중은 거의 유사함을 알 수 있다. 그러나 섬유가 보강됨에 따라서 후기 최대 부착하중은 크게 증가하였다. 즉 기준 실험체(SC-PC)는 초기 최대 부착하중만 나타났지만, 섬유가 보강된 FRP 보강근에는 후기 최대 부착하중이 나타나며 이 값은 초기 부착하중의 거의 1.5배였다. 또한 최대 하중에 상응하는 미끌림도 섬유가 사용됨으로써 증가하였다. Fig. 5(b)에서 SC-ST 1.0과 SC-PVA 1.0 실험체는 초기 최대 부착하중에 도달한 이후에 급격한 하중 감소가 나타나고 그 이후에 다시 하중이 증가하여 후기 최대 부착하중에도 도달하고 있음을 알 수 있다. 이러한 현상은 보강근의 외부 표피인 레진의 전단강도가 콘크리트의 전단강도보다 낮아 보강근에 부착된 콘크리트의 전단파괴에 의한 부착파괴가 아닌 보강근의 레진의 파괴에 의한 부착파괴가 일어났으나, 지속적인 섬유의 균열 제어와 부착파괴가 일어나지 않은 부분이 고강도 콘크리트와의 부착계면에서의 마찰작용으로 인해 부착강도가 증가하는 결과를 보이고 있다.

나선형 FRP 보강근의 하중-미끌림 관계가 Fig. 5(c)에 표시되어 있다. 섬유가 보강되지 않은 나선형 FRP 보강근의 부착거동은 모래분사형 FRP 보강근의 부착거동보다 양호하며 최대 하중 도달 이후에 급격한 강도 저감이 나타나지 않는다. 섬유가 보강된 경우에도 나선형 FRP 보강근의 하중-미끌림 관계는 섬유가 보강되지 않는 실

험체의 하중-미끄러짐 관계와 유사한 거동을 보이지만 최대 하중은 섬유 양에 따라서 다소 증가하였다. 즉, 혼입량이 증가할수록 다량의 섬유들로 인해 균열제어 효과가 증대되어 부착강도 증진에 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.3 섬유에 의한 부착강도와 부착강도에 상응하는 미끄러짐

이 연구에서는 실험 결과에 근거하여 FRP 보강근의 부착강도를 식 (1)에 의하여 계산하였으며 이 결과를 Table 5에 정리하였다.

$$\tau = \frac{P_{max}}{2\pi rL} \quad (1)$$

여기서, τ = 부착강도, P_{max} = 최대인발하중, r = 철근 및 GFRP 보강근의 직경, L = 보강근의 정착길이이다. 동일한 변수에 대하여 3개의 실험체에 대한 실험이 이루어졌으므로 3개 실험체의 평균 부착강도를 Fig. 6에 표시하였다. Fig. 6(a)에서는 철근, 모래분사형 FRP 보강근, 나선형 FRP 보강근의 평균 부착강도를 섬유의 종류와 양에 따라서 비교하였다. 그림에서 이형철근과 나선형 FRP 보강근의 부착강도는 대체적으로 섬유의 양이 증가함에 따라서 보강근의 부착강도도 증가함을 알 수 있다. 이형 철근의 기준 실험체의 부착강도는 27.93 MPa이었으며, 강섬유와 절곡형 폴리프로필렌 섬유, 친수성 PVA섬유 1.0%가 혼입된 경우 부착 강도는 각각 33.29와 30.84 및 30.95의 MPa이었다. 나선형 FRP 보강근의 경우에 기준 실험체의 부착강도는 24.3 MPa이었으며, 강섬유와 절곡형 폴리프로필렌 섬유, 친수성 PVA섬유 1.0%가 혼입된 경우 부착 강도는 각각 26.59와 23.36 및 23.22 MPa이었다. 모래분사형 FRP 보강근의 경우에는 강섬유가 1.0% 함유 되었을 때 평균 부착강도는 오히려 감소하였다. 이는 Fig. 5의 하중 및 미끄러짐 관계에서 설명한 것과 같이 초기 최대 하중에 도달한 이후에 섬유가 부착응력을 지지하지 못하고 급도 비교를 통하여 섬유보강은 실험체의 균열 성장을 억제함으로써 부착강도를 증가시키는데 영향을 주지만 보강근의 종류에 따라 상이한 영향을 줄 수 있다. 절곡형 PP 섬유와 표면을 친수성 처리한 PVA를 1.0% 사용했을 때의 부착거동을 비교해보면, PP섬유가 PVA섬유보다 초기 균열을 억제하는데 효과가 좋으나 지속적으로 발생하는 균열을 억제하는데는 PVA섬유가 더 효과적인 것으로 나타났다. Fig. 6(b)에서는 섬유 및 보강근의 종류에 따른 미끄러짐을 비교하였다.

Fig. 6(b)의 미끄러짐은 부착강도에 상응하는 미끄러짐이다. 그림에서 철근의 경우에는 섬유의 혼입과 무관하게 최대 강도에 상응하는 미끄러짐이 거의 일정하며, 섬유의 혼입이 부착 미끄러짐을 증대시키지는 못하고 있음을 알 수 있다. 그러나 모래분사형과 나선형 보강근의 경우에는 섬유가 혼입됨으로 부착강도에 상응하는 미끄러짐이 크게 증가하였다. 미끄러짐에 대한 비교에서 섬유가 함유되지 않

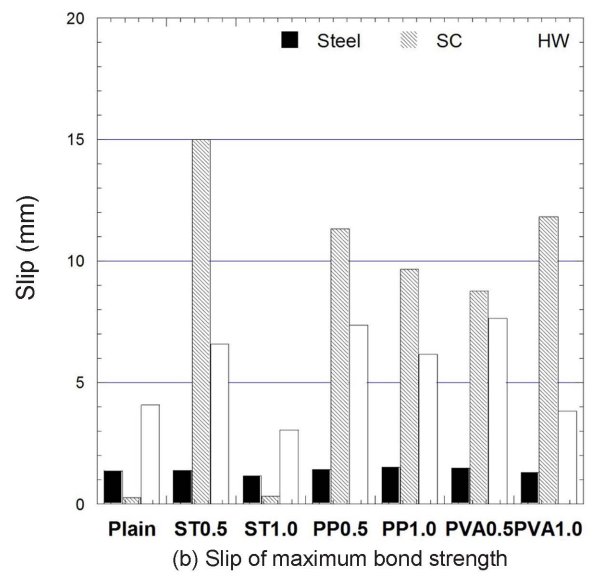
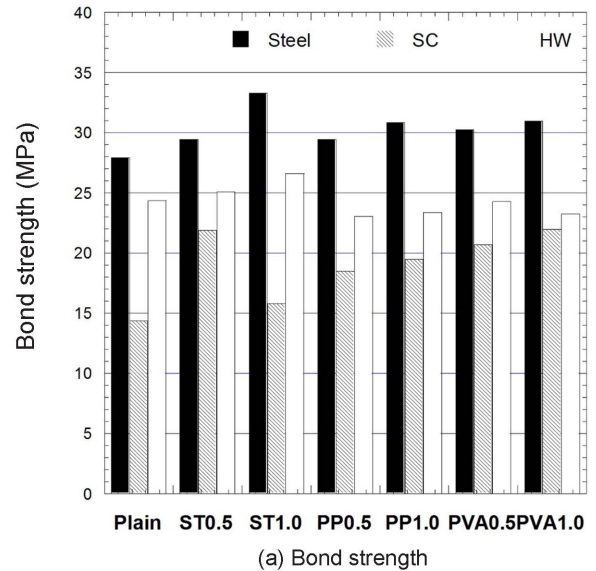
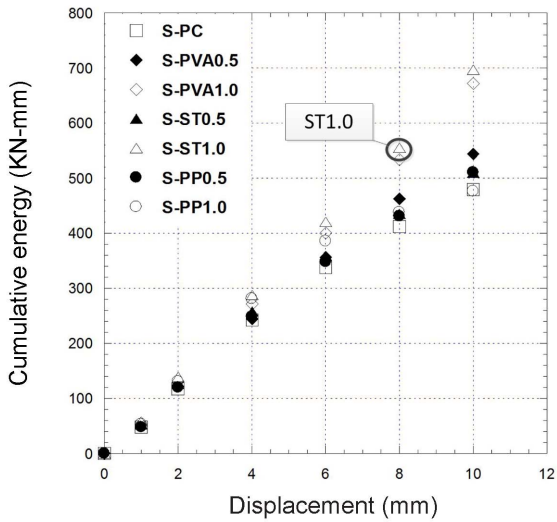


Fig. 6 Bond strength and slip of rebars in fiber reinforced concrete

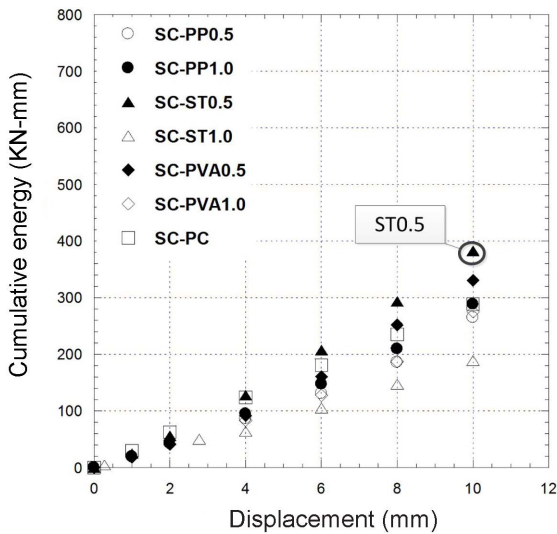
았을 때 나선형 보강근의 미끄러짐(실험체 HW-PC-1,2,3)은 약 4.07 mm이었지만, 모래분사형의 미끄러짐(실험체 SC-PC-1, 2,3)은 0.25 mm에 지나지 않았다. 그러나 섬유가 포함되었을 때 모래분사형 실험체의 부착강도에 상응하는 미끄러짐은 크게 증가하였다. 그림에서 강섬유 1.0%를 제외하고는 모래분사형보강근의 미끄러짐이 다른 보강근과 비교하여 가장 크다는 것을 알 수 있다. 이것은 초기부착강도 발생 이후 섬유의 균열제어 효과로 인한 부착강도 증가와 함께 미끄러짐이 증가하였기 때문으로 판단된다. 섬유를 보강함으로써 내부균열 발생 이후 섬유가교효과로 인해 부착강도가 증가하였고 부착강도에 상응하는 미끄러짐도 증가하였다.

4.4 섬유의 에너지 소산 능력

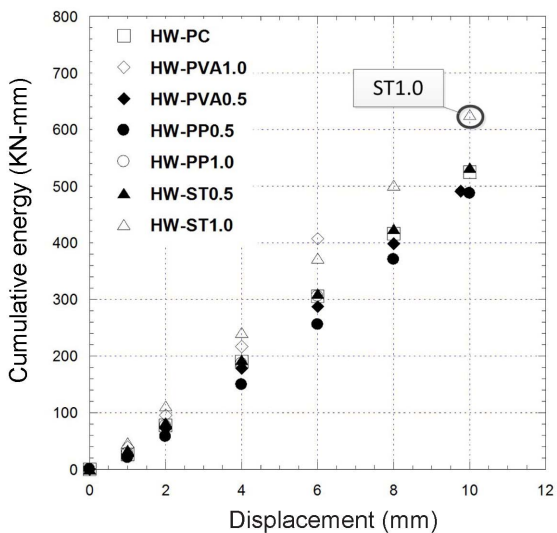
Fig. 7은 보강근 종류에 따라 달라지는 섬유의 에너지 소산 능력을 나타낸다. 섬유의 에너지 소산 능력은 미끄러



(a) Steel rebar



(b) SC rebar



(c) HW rebar

Fig. 7 Accumulated energy of rebars

림이 10 mm에 도달할 때까지의 보강근의 하중-슬립의 면적을 2 mm 간격으로 누적하여 계산하였으며, 동일 변수를 갖고 있는 세 가지 실험체 중에서 중간 부착 강도

를 나타낸 실험체의 에너지 소산 능력이다. Fig. 7(a)는 철근에 대한 에너지 소산능력으로 섬유가 포함된 실험체의 에너지 소산 능력을 섬유가 포함되지 않은 기준 실험체(S-PC)의 에너지 소산 능력과 비교한 값이다. Fig. 7(a)에서 이형 철근의 에너지 소산 능력은 섬유의 혼입량이 증가할수록 증가하였으며, 특히 강섬유가 1.0% 보강되었을 때 이형 철근의 에너지 소산 능력이 가장 많이 증가하는 것을 알 수 있었다. Fig. 7(b)는 모래분사형 FRP 보강근에 대한 에너지 소산능력으로 섬유가 포함된 실험체의 에너지 소산 능력을 섬유가 포함되지 않은 기준 실험체(SC-PC)의 에너지 소산 능력과 비교한 값이다. Fig. 7(b)에서 모래분사형 FRP 보강근이 0.5% 보강되었을 때 에너지 소산 능력이 가장 많이 증가하였다. 그러나 강섬유가 1.0% 보강된 경우에는 부착강도의 평가에서와 동일하게 기준실험체보다 감소하였다. 이는 Fig. 5(b)와 같이 초기 최대 부착하중에 도달한 이후에 급격한 하중 감소가 나타나고 그 이후에 하중이 크게 증가하지 않았기 때문이다. Fig. 7(c)는 나선형 FRP 보강근에 대한 에너지 소산능력을 나타낸다. 그림에서 나선형 FRP 보강근의 에너지 소산 능력은 기준 실험체와 비슷한 연성을 보이거나 다소 증가하였으며, 특히 강섬유와 친수성 PVA섬유 1.0%가 함유된 경우 기준 실험체와 비교해 높은 연성 효과를 나타냈다. 세 가지 종류 보강근의 에너지 소산 능력을 비교했을 때 강섬유를 보강하는 것이 에너지 소산 능력에 가장 효과적임을 알 수 있다.

5. 결론

이 연구에서는 섬유를 혼입한 콘크리트와 FRP 보강근의 부착 성능을 실험적으로 평가하였다. 실험에서는 섬유보강 콘크리트에 매립된 GFRP 보강근의 종류, 섬유의 종류, 섬유의 혼입량이 부착거동에 미치는 영향을 평가하였다. 실험을 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1) 섬유가 혼입될 경우에 FRP 보강근의 부착거동은 섬유의 종류와 양에 따라서 효과가 달라졌다. 콘크리트와의 부착력이 좋은 강섬유와 PVA섬유가 혼입되었을 때 FRP 보강근의 부착강도가 증진되었지만, 표면이 소수성을 갖는 폴리프로필렌 섬유의 경우에는 부착강도 증진 효과는 미비하였다.

2) PP섬유는 초기미소균열제어에 효과가 있었으며, PVA섬유의 경우 PP섬유와 비교해 후반부로 갈수록 균열제어에 더 좋은 효과를 보였다. 이것으로 섬유가 갖는 성질에 따른 효과는 다르나 섬유혼입이 보강근의 부착강도 증진에 영향을 미쳤다.

3) 섬유가 혼입됨으로써 FRP 보강근의 부착강도에 상응하는 미끌림이 크게 증가하였다. 철근의 경우에는 섬유의 혼입과 상관없이 미끌림이 거의 일정하였지만, 모래분사형과 나선형 보강근의 경우에는 섬유가 혼입됨으로 부착강도에 상응하는 미끌림이 크게 증가하였다.

4) 부착강도가 낮고 취성적인 부착거동을 나타낸 모래

분사형 FRP 보강근에 섬유를 혼입함으로써 부착성능이 개선되었다. 모래분사형 FRP 보강근은 초기 최대 하중 도달 이후에 섬유가 균열의 성장을 억제하는 가교 역할을 함으로써 부착하중이 다시 증가하였다.

5) 섬유의 에너지 소산능력 평가에서 섬유의 혼입이 증가할수록 연성이 증가하는 결과를 보였으며, 연성효과는 강섬유 > PVA섬유 > 폴리프로필렌 섬유 순으로 3가지 보강근 모두 강섬유를 혼입했을 때 높은 연성효과가 나타났다. 이것은 강섬유의 양단을 후크 처리함으로써 콘크리트와의 부착력이 증가하였기 때문으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 2009년 한국연구재단 기초연구사업의 중견 연구자 핵심연구지원사업(2009-0078981)의 재원으로 수행되었으며 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고문헌

1. Micelli, F. and Nanni, A., "Durability of FRP Rods for Concrete," *Construction and Building Materials*, Vol. 18, 2004, pp. 491~503.
2. Saafi, M., "Effect of Fire on FRP Reinforced Concrete Members," *Composite Structures*, Vol. 58, 2002, pp. 11~20.
3. Davalos, J. F., Chen, Y., and Ray, I., "Effect of FRP Bar Degradation on Interface Bond with High Strength Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 30, No. 8, 2008, pp. 722~730.
4. Baena, M., Torres, L., Turon, A., and Barris, C., "Exper-

- imental Study of Bond Behaviour between Concrete and FRP Bars Using a Pull-Out Test," *Composites, Part B: Engineering*, Vol. 40, No. 8, 2009, pp. 784~797.
5. Taylor, M., Lydon, F. D., and Barr, B. I. G., "Toughness Measurements on Steel Fibre-Reinforced High Strength Concrete," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 19, No. 4, 1997, pp. 329~340.
6. Neven, K. O., Watson, K. A., and LaFave, J. M., "Effect of Increased Tensile Strength and Toughness on Reinforcing-Bar Bond Behavior," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 16, No. 2, 1994, pp. 129~141.
7. Issa, M. S., Metwally, I. M., and Elzeny, S. M., "Influence of Fibers on Flexural Behavior and Ductility of Concrete Beams Reinforced with GFRP Rebars," *Engineering Structure*, Vol. 33, 2011, pp. 1754~1763.
8. 박찬기, 원종필, 차상선, "보강섬유의 표면처리에 따른 섬유보강 고강도콘크리트와 CFRP 보강근의 부착특성," 콘크리트학회 논문집, 21권, 3호, 2009, pp. 275~282.
9. ACI 440.1R-03, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," ACI Commottee 440, 2003, 42 pp.
10. 정연걸, 이정윤, 이종구, "반복하중을 받는 GFRP 보강근의 부착거동," 대한건축학회 논문집, 24권, 8호, 2008, pp. 93~101.
11. Bentur, A. and Mindess, S., "Concrete Beams Reinforced with Conventional Steel Bars and Steel Fibers: Properties in Static Loading," *The International Journal of Cement Composites and Lightweight Concrete*, Vol. 5, No. 3, 1983, pp. 199~202.
12. 양근혁, 오승진, "섬유보강 콘크리트의 역학적 특성에 대한 섬유체적비와 길이의 영향," 한국건축시공학회, 8권, 1호, 2008, pp. 43~488.

요 약 이 연구에서는 콘크리트에 보강된 섬유의 종류 및 함유량이 FRP 보강근 부착강도에 미치는 효과를 조사하였다. 실험체는 3종류의 보강근과 구조용 강섬유, 절곡형 PP섬유와 친수성 PVA섬유를 사용하여 제작하였으며 직접부착 강도시험을 실시하여 부착강도를 평가하였다. 실험 결과 섬유의 종류 및 함유량에 따라 섬유보강 콘크리트와 보강근 사이의 부착강도에 영향을 미침을 알 수 있었다. 섬유의 가교효과로 인해 할렬균열을 제어함으로써 함유량이 증가함에 따라 부착강도가 증가하였으며, 연성 또한 증가하였다. 부착강도 및 연성증가 효과는 강섬유 > PVA섬유 > PP섬유 순으로 나타났다.

핵심용어 : 인발실험, 섬유보강 콘크리트, 섬유보강 폴리머, 부착강도