



## GFRP 보강근의 부착파괴면

이정윤<sup>1)</sup> · 이종구<sup>2)\*</sup> · 김태영<sup>3)</sup> · 박지선<sup>4)</sup> · 박영환<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>성균관대학교 건축공학과, <sup>2)</sup>고려대학교 건축사회환경공학과, <sup>3)</sup>삼성물산 건설부문, <sup>4)</sup>한국건설기술연구원

## Bond Failure Surface of Glass Fiber Reinforced Polymer Bars

Jung-Yoon Lee,<sup>1)</sup> Chongku Yi,<sup>2)\*</sup> Tae-Young Kim,<sup>3)</sup> Ji-Sun Park,<sup>4)</sup> and Young-Hwan Park<sup>4)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architectural Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

<sup>3)</sup>Engineering and Construction, Samsung Corporation, Sungnam 463-824, Korea

<sup>4)</sup>Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-714, Korea

**ABSTRACT** The effects of concrete strength on bond-slip behavior and the failure mechanisms of glass fiber reinforced polymer (GFRP) bar embedded in concrete under direct pullout were investigated in this study. Total of twenty seven specimens were prepared by placing two different types of GFRP bars and conventional steel rebar in 25 MPa, 55 MPa, and 75 MPa concrete and tested according to CSA S806-02. The test results showed that the bond strength of the GFRP rebars as well as the steel increased with the concrete strength. However, the increase in the bond strength with respect to the concrete strength was not as significant in the GFRP series as the steel, and it was attributed to the interlaminar failure mechanism observed in the GFRP test specimens.

**Keywords :** glass fiber reinforced polymer bars, bond strength, high strength concrete, bond failure surface

### 1. 서 론

콘크리트구조물의 가장 일반적인 인장 보강재는 철근이라고 할 수 있다. 철근은 콘크리트와의 부착성, 열전도성, 고인장강도 (콘크리트의 인장강도와 비교할 경우) 등의 이유로 지금까지 콘크리트구조물의 보강재로 널리 쓰여 오고 있다. 그러나 철근은 이와 같은 장점과 함께 중요한 단점을 갖고 있는데, 그 중의 하나가 쉽게 부식할 수 있다는 점이다. 최근 건축 및 토목 분야 (특히 비부식이 요구되는 콘크리트구조물)에 FRP 보강근이 사용되는 범위가 점차 확대되어 있다. 1960년대부터 항공 분야 등 특수한 구조체에 사용되었던 섬유를 이용한 구조 보강재는 1990년대 이후에 본격적으로 건설 분야에 사용되기 시작하였다. 섬유 보강재는 콘크리트에 혼입하여 사용하는 단섬유를 비롯하여 구조물을 외부에서 감싸서 보강하는 장섬유가 많이 사용되고 있다. 또한 철근이 부식하기 쉬운 환경에서 철근을 대신하여 사용되는 섬유보강근 (fiber reinforced polymer bars, 이하 FRP 보강근) 이 교량의 상판이나 염해를 입기 쉬운 지역의 건물에 사용되고 있다. 이렇게 건설 분야에서 FRP에 대해 관심을 갖는 가장 큰 이유는 FRP가 전통적인 구조 재료인 강재

나 콘크리트에 비해 비부식성, 높은 인장강도 및 경량성 등의 장점을 갖고 있기 때문이다. FRP 인장재는 재료의 종류에 따라서 유리섬유, 아라미드섬유 및 탄소섬유로 구분된다. 3가지의 FRP 보강근 중에서 경제성 등을 고려하여 현재 가장 널리 사용되고 있는 것은 유리섬유를 이용한 FRP 보강근 (이하 GFRP)이다. FRP 보강근의 재료적 장점을 활용하여 콘크리트구조물에 사용하기 위해서는 무엇보다도 콘크리트와 FRP 보강근의 부착 성능을 평가하고 구조설계에서 요구하는 정착길이 및 이음길이에 대한 제시가 필요하다.

FRP 보강근의 부착성능에 대한 기존의 연구 결과에 의하면 FRP 보강근은 섬유의 재질과 외부 돌기의 형상 등의 영향을 받아 철근의 부착거동과 상이하다고 보고되고 있다. 특히 콘크리트의 압축강도가 FRP 보강근의 부착강도에 미치는 영향은 기존의 연구자에 따라서 서로 다르게 보고되고 있다. Achilides 연구<sup>1)</sup>에 의하면 콘크리트 압축강도 50 MPa 이후에 FRP 보강근의 부착강도는 거의 증가하지 않는다고 발표하였지만 최근에 발표된 Okelo 등의 연구<sup>2)</sup>에 의하면 FRP 보강근의 부착강도는 철근과 유사하게 콘크리트 압축강도의 제곱근에 비례하여 증가한다고 주장하고 있다.

국내에서는 김태영 등<sup>3)</sup>이 보통강도 및 고강도에 배근된 FRP 보강근의 부착거동을 실험에 의하여 평가하였지만 실험에 사용된 콘크리트의 압축강도의 분포가 보통강

\*Corresponding author E-mail: chongku@korea.ac.kr

Received December 13, 2007, Revised February 1, 2008, Accepted March 7, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

도와 초고강도로 양쪽에 극단적으로 편중된 경향이 있으며, 콘크리트에 배근된 FRP 보강근의 부착강도 증가와 밀접한 관계가 있는 FRP 보강근의 부착파괴면 등에 대한 연구가 보고되지 않았다.

이 연구에서는 콘크리트의 압축강도를 다양하게 변화시킨 후에 FRP 보강근의 부착실험을 통하여 콘크리트의 압축강도가 FRP 보강근의 부착강도에 미치는 영향을 파악하였다. 특히 파괴된 FRP 보강근의 부착면을 조사하여 콘크리트의 압축강도와 FRP 보강근 파괴면의 관계를 구명하였다.

## 2. 실험 계획

### 2.1 사용 재료

실험에서는 3가지 종류의 보강근 (철근과 2가지 종류의 유리섬유 FRP 보강근)의 부착거동을 비교하였다. FRP 보강근은 국내외에서 널리 사용되고 있는 모래분사형 유리 FRP 보강근 (이하 GFRP-SC, P사 제품)과 나선형 유리 FRP 보강근 (이하 GFRP-HW, H사 제품)의 2종류를 사용하였다. 모래분사형 FRP 보강근은 Fig. 1 (a)와 같이 GFRP 주부재에 가는 모래를 접착제에 의하여 부착한 보강근이며, 나선형 FRP 보강근은 Fig. 1 (b)와 같이 주부재에 섬유를 나선형으로 부착하여 부착강도를 증대시킨 보강근이다. 실험에서 사용한 3가지 보강근은 공칭 직경이 12.7 mm이며, GFRP 보강근은 섬유량이 70%인 제품을 사용하였다. Table 1은 실험에서 사용한 철근 및

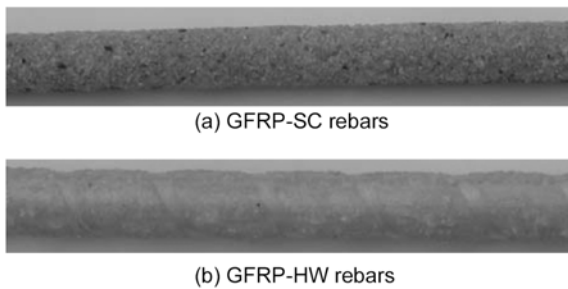


Fig. 1 FRP bars

Table 1 Material properties of rebars

Bars	Dia. (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Fiber content (%)	Specific gravity (g/cm <sup>3</sup> )	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	E (GPa)
Steel	12.7	126.7	-	7.90	410	560	200
GFRP-SC	12.7	129.0	70.0	2.04	N/A	690	42.0
GFRP-HW	12.7	144.8	70.0	2.00	N/A	617	40.8

Table 2 Composition and characteristics of concrete

Comp. strength (MPa)	W/C (%)	Fine/coarse aggr. (%)	Compositions (kg/m <sup>3</sup> )					
			Cement	Water	Fine aggr.	Coarse aggr.	Silica fume	Air content
25.6	53	40	319	172	868	945	-	-
56.3	40	35	523	209	569	1040	52.3	-
75.7	32	38	530	186.5	629	1026	53	10.6

GFRP 보강근의 물리적 특성을 나타내고 있다.

실험체에 사용된 콘크리트의 압축강도는 3종류 (25, 55, 75 MPa)이며, 정확성을 기하기 위해서 직접 배합설계를 통한 콘크리트 압축강도 시험 후 제작하였다. 콘크리트의 압축강도를 시험하기 위해서 100 × 200 mm 공시체를 제작, 재령 28일 강도를 측정하였다. 최적의 배합비를 찾기 위해 각 강도별 4가지의 배합비를 설계하여 각각 7개씩 공시체를 제작하였으며, 압축강도 시험은 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 만능재료시험기를 사용하여 매초 0.2 MPa의 재하속도로 실시하여 콘크리트 압축강도를 측정하였다. Table 2는 3가지 종류의 콘크리트 압축강도에 대한 배합비를 표시하고 있다.

### 2.2 실험체 특성 및 실험 방법

실험체는 콘크리트 압축강도의 종류와 보강근의 종류에 따라 Table 3과 같이 27개를 제작하였다. 실험체는 실험 순서에 따라서 번호 1, 2, 3으로 구분하였다. 실험체는 CSA S806-02 규격<sup>4)</sup>에 따라 제작하였으며, 콘크리트 타설 방향은 수직으로 하였다. 각각의 실험체의 크기는 Fig. 2와 같이 150 × 150 × 150 mm인 콘크리트 입방체로 하였고, 보강근을 수직으로 입방체의 중심축에 설치하였다. 실험체를 가력할 경우에 가력면에 접한 실험체면은 압

Table 3 Test specimens

		Compressive strength of concrete		
		25 MPa	55 MPa	75 MPa
Steel	1	F25A1	F55A1	F75A1
	2	F25A2	F55A2	F75A2
	3	F25A3	F55A3	F75A3
GFRP-SC	1	F25B1	F55B1	F75B1
	2	F25B2	F55B2	F75B2
	3	F25B3	F55B3	F75B3
GFRP-HW	1	F25C1	F55C1	F75C1
	2	F25C2	F55C2	F75C2
	3	F25C3	F55C3	F75C3

축력을 받게 되므로 가력면과 접하는 부분에 고무호스를 삽입하여 보강근이 콘크리트와 부착되지 않게 하였다. 보강근의 부착 길이는 CSA S806-02 규격에 따라서 보강근 직경의 4배로 하여 Fig. 2와 같이 50.8 mm가 되게 하였다. 부착 및 비부착 구역을 포함하여 보강근의 전체 길이는 810 mm였다. 이 중에서 콘크리트 입방체에서 그립까지 길이는 인장시험의 시편길이인 40d (50.8 mm)이고, 그립 길이는 302 mm이다.

굳지 않은 콘크리트 골재의 침하현상이 부착강도에 영향을 줄 것을 고려하여 콘크리트를 부어 넣는 면 (보강근이 돌출되는 부분)이 가력면이 되게 하였다. 가력면에 닿는 콘크리트의 바닥면을 평활하게 하기 위하여 콘크리트 타설 후 가력면을 캡핑하였다. 캡핑은 콘크리트 타설 후 4~6시간이 경과된 후, 표면의 레이턴스를 제거한 다음 실시하였다.

GFRP 보강근의 부착특성 시험은 CSA S806-02 표준<sup>4)</sup>에 따라서 실시하였다 (Fig. 2). 각 하중 단계에 대응하는 변위 (미끌림)를 측정하기 위하여 3개의 LVDT를 설치하여 하중점에서 측정되는 하중단 미끌림과 GFRP 보

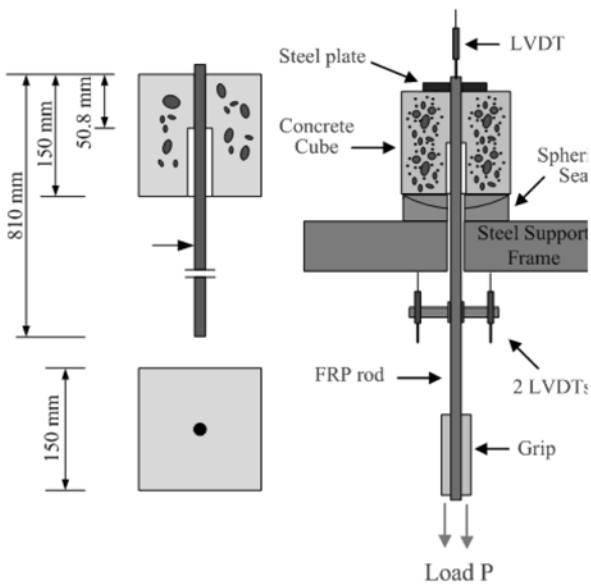


Fig. 2 Specimen dimensions and test setup



Fig. 3 Spherical seat

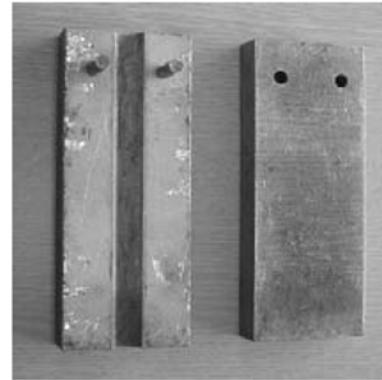


Fig. 4 Grip

강근의 매립 단부에서 측정되는 자유단 미끌림으로 구분하여 측정하였다. 하중단 미끌림은 GFRP 보강근의 하중단에 180° 간격으로 2개의 LVDT를 설치하여 측정하였으며, 자유단 미끌림은 하중작용점의 반대면 GFRP 보강근에 1개의 LVDT를 설치하여 미끌림을 측정하였다.

실험체를 가력할 때 보강근의 수직을 유지하기 위하여 ASTM에서 제안한 Fig. 3과 같은 반구형 힌지 형태인 구좌 (spherical seat)를 제작하여 사용하였다. 또한 GFRP 보강근은 강성이 작아서 인장력이 가해지는 가력면 (그립 부위)부근에서 보강근 자체가 으스러져 파괴되는 경우가 있으므로, Fig. 4와 같은 특수 그립을 제작하여 GFRP 보강근 그립면에서 발생할 수 있는 국부 압축파괴를 방지하였다.

### 3. 실험 결과

#### 3.1 보강근의 부착응력-미끌림 관계

모든 실험체는 보강근의 뽑힘 파괴에 의하여 파괴되었다. 실험체 중에서 철근 F75A1과 F75A2는 변위계의 문제로 최대부착응력-미끌림 관계까지만 측정하였고 그 이후의 거동은 측정할 수 없었다. Fig. 5는 콘크리트의 압축강도가 25 MPa, 55 MPa, 75 MPa인 경우의 철근과 FRP 보강근의 부착응력-미끌림 관계를 나타낸다. 부착응력은  $\tau = P / (dln)$  ( $P$  = 보강근이 받는 인장력,  $d$  = 보강근의 직경,  $l$  = 문힘길이) 식으로 계산된 값이며, 미끌림 값은 자유단에 설치된 LVDT를 사용하여 측정한 값이다 (Fig. 2).

철근의 부착응력-미끌림 관계는 Eligehausen 등<sup>5)</sup>의 실험 결과와 유사하게 철근과 콘크리트 사이에 접착력이 작용하는 초기에는 거의 미끌림이 발생하지 않았지만, 그 이후에는 미끌림이 점점 증가하였다. 최대 부착응력에 도달한 이후에 철근의 미끌림은 급격하게 증가하였으며 미끌림의 증가와 함께 부착응력이 감소하였다. 철근이 최대부착응력에 도달한 이후에 부착응력의 감소비율은 약 22%로 나선형 FRP 보강근에 비하여 철근의 부착응력은 큰 폭으로 감소하였다.

모래분사형 GFRP 보강근의 초기 부착응력-미끌림 관

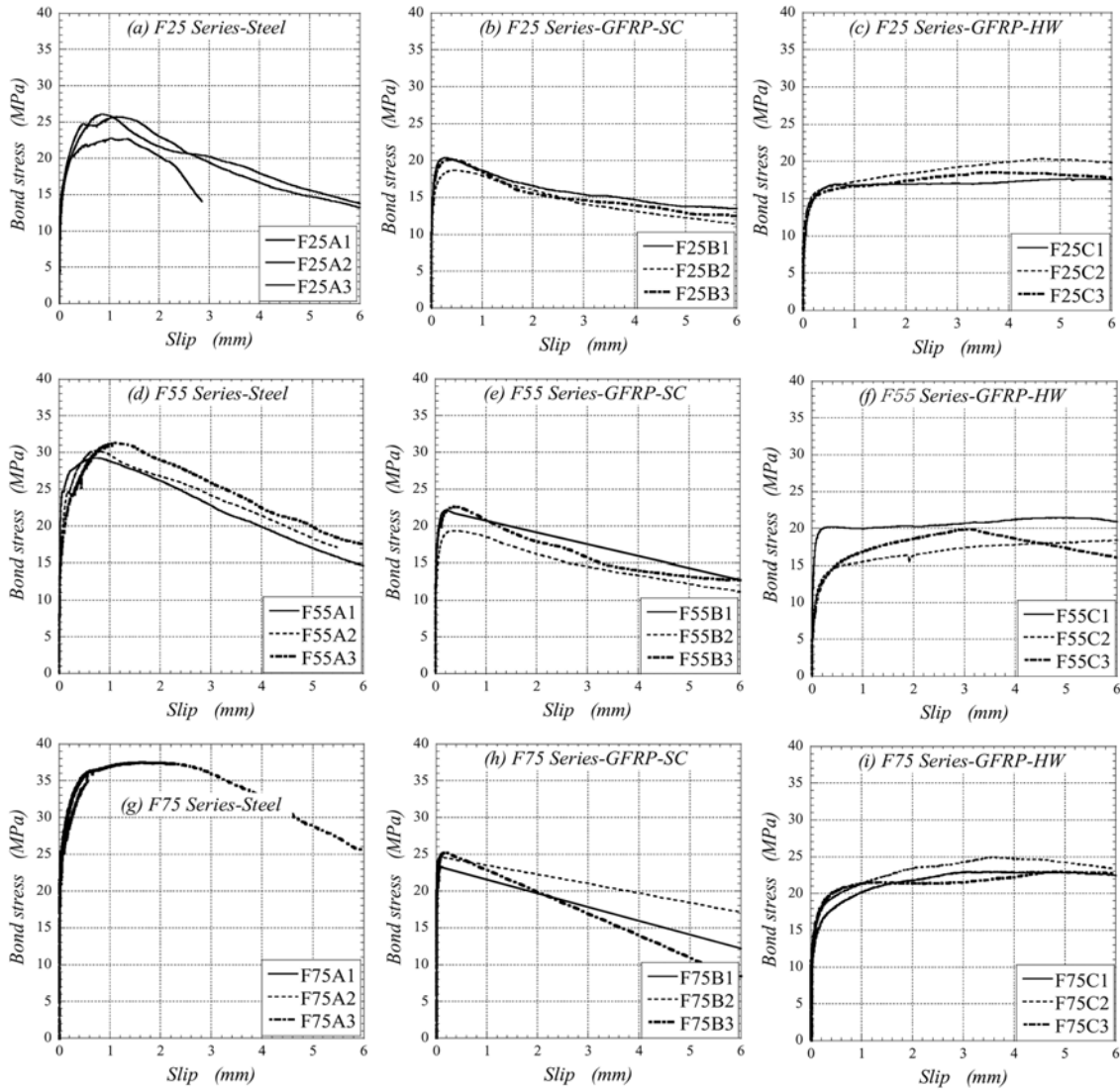


Fig. 5 Bond stress versus slip curves of test specimens

계는 철근의 부착응력-미끄럼 관계와 유사하였다. 보강근과 콘크리트의 접착력이 작용하는 구간에서는 미끄럼이 거의 발생하지 않았지만 접착력을 상실한 이후에 미끄럼이 점차 증가하였다. 모래분사형 GFRP 보강근의 부착강도는 철근의 부착강도보다 낮았다. 모래분사형 GFRP 보강근은 최대부착응력에 도달한 이후에 급격하게 부착응력이 감소하였다.

나선형 GFRP 보강근은 철근과 모래분사형 GFRP 보강근과 다소 상이한 부착거동을 나타내었다. 접착력을 상실한 이후에 부착응력은 서서히 증가하였으며 최대 부착응력에 도달했을 때의 미끄럼은 철근과 모래분사형 GFRP 보강근의 미끄럼보다 약 4배 이상이었다. 또한 최대 부착응력에 도달한 이후에 철근이나 모래분사형 GFRP 보강근에 비하여 매우 완만하게 감소하였다.

콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 철근과 GFRP 보강근의 부착강도는 증가하였다. 그러나 GFRP 보강근의 부착강도의 증가 비율은 철근의 부착강도 증가비율에 비하여 작았다. Table 4에는 실험에서 측정된 부착강도 및 부착강도에 상응하는 미끄럼 관계를 나타내었다.

Table 4 Bond strengths and corresponding slips

Specimens	Bond strength (MPa)	Slip (mm)	Specimens	Bond strength (MPa)	Slip (mm)
F25A1	24.59	0.66	F55B3	22.63	0.43
F25A2	22.77	0.56	F55C1	21.45	5.15
F25A3	24.79	0.47	F55C2	18.51	6.81
F25B1	20.40	0.31	F55C3	19.90	3.09
F25B2	18.70	0.47	F75A1	37.53	1.63
F25B3	20.17	0.40	F75A2	35.50	-
F25C1	17.67	5.50	F75A3	34.90	-
F25C2	20.41	4.70	F75B1	23.36	0.09
F25C3	18.59	3.71	F75B2	24.67	0.08
F55A1	29.28	0.72	F75B3	25.20	0.15
F55A2	30.28	0.74	F75C1	23.03	3.53
F55A3	31.31	1.08	F75C2	25.00	3.57
F55B1	22.15	0.21	F75C3	23.02	4.81
F55B2	19.39	0.39	-	-	-

#### 4. GFRP 보강근의 부착파괴 형태

서론에서 지적한 것과 같이 기존 연구에 의하면 GFRP 보강근의 부착강도는 콘크리트의 압축강도 약 50 MPa 이상에서는 증가하지 않는다는 연구와 50 MPa 이후에도 콘크리트의 압축강도의 증가와 함께 부착강도가 증가한다는 실험 결과로 나누어져 있다. 이 연구에서는 이러한 상반된 이견을 보다 구체적으로 파악하기 위하여 하중 가력을 종료한 후에 실험체를 절단하여 GFRP 보강근의 부착파괴 형태를 조사하였다.

Fig. 6 (a)에 도식적으로 나타낸 것과 같이 콘크리트에 묻힌 철근은 철근과 콘크리트의 2가지 재료로 구분된다. 즉 이형철근의 마디나 리브도 철근 보강근과 동일한 성질의 재료이기 때문에 재료는 콘크리트와 철로 구분할 수 있다. 그러나 콘크리트에 묻힌 GFRP 보강근은 철근과 다르게 3가지의 이질 재료로 구성되어 있다. 즉, 콘크리트, 섬유보강근, 섬유보강근의 외피 (matrix)이다. 외피는 일반적으로 섬유보강근과 다른 재료 (레진)를 사용한다. 따라서 콘크리트에 묻힌 철근의 부착파괴면은 콘크리트와 철근사이의 부착면 (1면)이 되지만 콘크리트에 묻힌 GFRP 보강근의 부착파괴면은 Fig. 6 (b)와 같이 2면에서 파괴가 발생할 가능성이 있다.

- 1) Interface 1 : 콘크리트와 보강근 외피 사이의 부착면
- 2) Interface 2 : 보강근 외피와 섬유 보강근 자체 사이의 부착면

1면의 부착면을 갖고 있는 철근은 콘크리트의 압축강도가 증가하여도 철근보다 콘크리트의 강도가 낮기 때문에 파괴는 항상 콘크리트 면에서 발생한다. 따라서 철근의 부착강도는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 증가하게 된다. 그러나 2면의 부착파괴면을 갖고 있는 GFRP 보강근의 부착강도는 콘크리트의 압축강도와 외피의 접착강도에 따라서 파괴의 면이 달라질 수 있다.

Fig. 7은 철근과 GFRP-SC 보강근의 파괴면 사진이다. Fig. 7 (a)에서 철근의 파괴면은 고강도콘크리트의 경우에도 철근의 마디 주변에서 콘크리트가 부분 압축파괴함

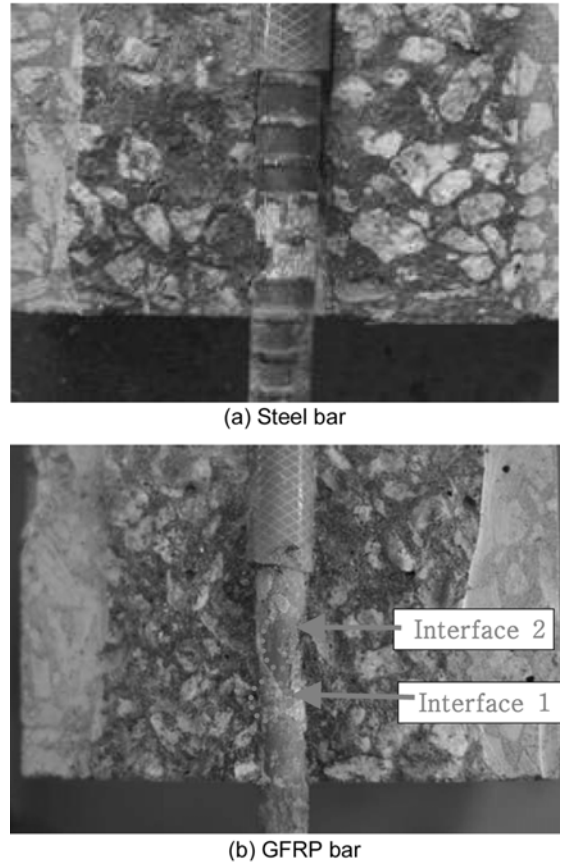


Fig. 7 Photos of bond failure interfaces

을 알 수 있다. 그러나 GFRP 보강근의 파괴면은 Fig. 6 (b)에서 정의된 것과 같이 Interface 1과 Interface 2의 두 면에서 파괴가 발생함을 알 수 있다 (Fig. 7 (b)).

Fig. 8은 콘크리트의 압축강도가 각각 25 MPa, 55 MPa, 75 MPa에 배근된 GFRP 보강근의 파괴면 사진을 나타낸다. 그림에서 보통강도와 고강도콘크리트에 배근된 GFRP 보강근의 파괴면이 서로 상이함을 알 수 있다. 보통강도 콘크리트에 배근된 GFRP 보강근은 주로 Interface 1이 파괴되었지만, 고강도콘크리트에 배근된 GFRP 보강근은 주로 Interface 2에서 파괴가 발생하였다. 이와 같이 콘크리트의 압축강도에 따라서 부착파괴면이 달라지는 이유는 다음과 같이 추정할 수 있다. 보통강도 콘크리트에 배근된 GFRP보강근의 경우, 콘크리트의 접착력이 작기 때문에 파괴는 콘크리트와 보강근 외피 사이인 Interface 1에서 발생한다. 고강도콘크리트의 접착력은 보통강도 콘크리트의 접착력에 비하여 크므로 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 GFRP 보강근의 파괴는 콘크리트와 외피 사이의 파괴면 (Interface 1)에서 외피와 섬유보강근 자체의 부착면 (Interface 2)으로 바뀌게 된다.

#### 5. 고강도콘크리트의 영향

##### 5.1 GFRP 보강근의 외피파괴비율

Fig. 8에서 나타난 것과 같이 콘크리트 강도가 증가할

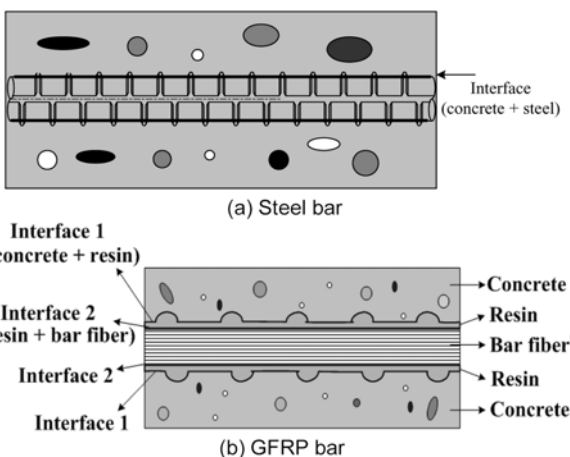
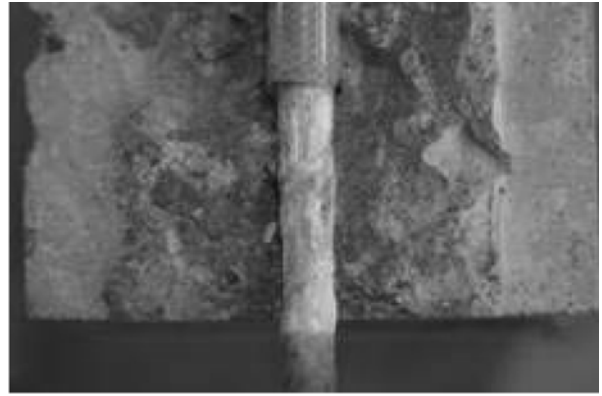


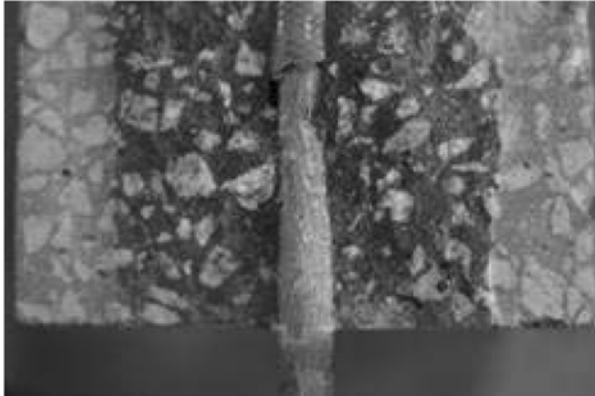
Fig. 6 Bond failure interfaces of bars



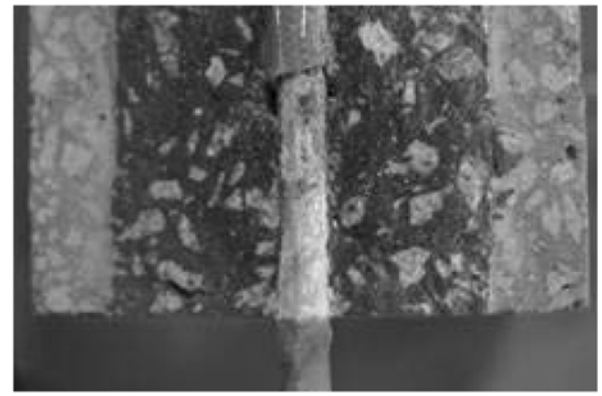
(a) F25-GFRP-SC



(b) F25-GFRP-HW



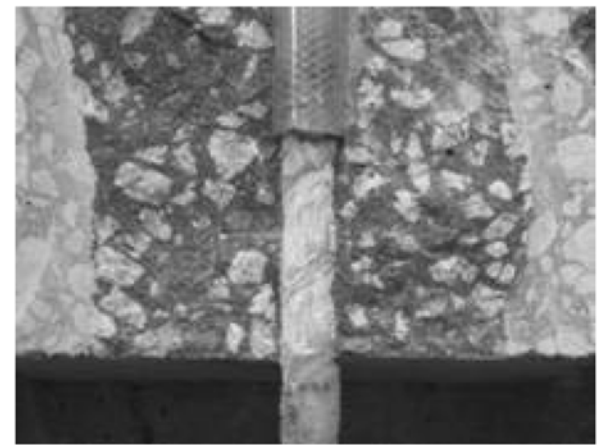
(c) F55-GFRP-SC



(d) F55-GFRP-HW



(e) F75-GFRP-SC



(f) F75-GFRP-HW

**Fig. 8** Photos of bond failure interfaces (25, 55, 75 MPa)

수록 Interface 2의 파괴 면적이 증가한다. 콘크리트의 압축강도와 부착파괴면의 관계를 정량적으로 평가하기 위해서 Interface 2의 파괴면적을 보강근의 전체 부착면적으로 나누어 식 (1)과 같이 외피파괴비율로 정의하여 측정하였다.

$$\text{외피파괴비율} = \frac{\text{Interface 2 파괴면적}}{\text{전체부착면적}} \quad (1)$$

Table 5는 실험에서 측정된 외피파괴비율을 나타내며, Fig. 9는 외피파괴비율과 콘크리트의 압축강도 관계를 나타낸다. 그림에서 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라

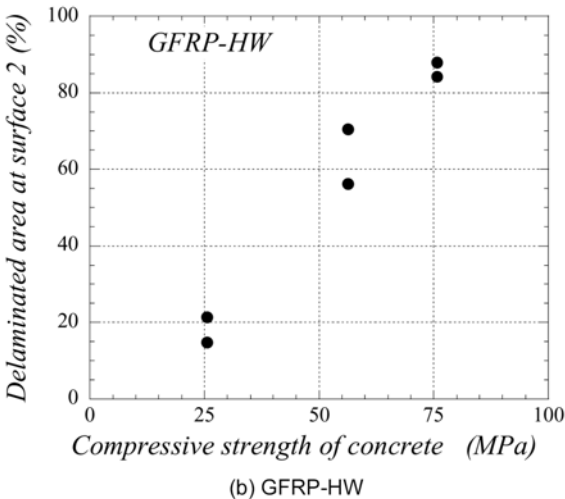
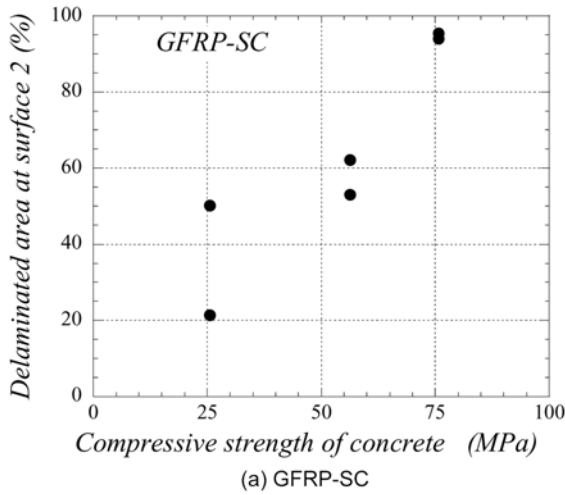
서 모래분사형 GFRP와 나선형 GFRP의 부착파괴면은 Interface 1에서 Interface 2 (섬유외피와 보강근 자체 사이의 부착면)로 보강근 자체의 부착력과 콘크리트와 섬유외피사이에 작용하는 부착력의 상호관계에 따라서 변화함을 알 수 있다.

## 5.2 콘크리트의 압축강도와 부착강도의 관계

Fig. 10은 콘크리트의 압축강도와 보강근의 부착강도의 관계를 나타낸다. Fig. 10 (a)에서 철근의 경우 부착강도는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 일정하게 증가함을 알 수 있다. 모래분사형과 나선형 GFRP 보

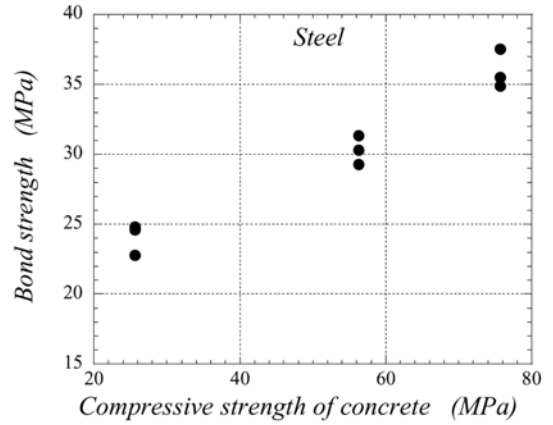
**Table 5** Delaminated area

Specimens		Total bond area (mm <sup>2</sup> )	Interface 2 delaminated area (mm <sup>2</sup> )	Rate (%)
F25 series	F25B1	3005	640	21.3
	F25B2	3105	1557	50.14
	F25C1	3116	665	21.34
	F25C1	2849	422	14.81
F55 series	F25B1	2880	1526	52.99
	F25B1	3019	1877	62.17
	F25C1	2626	1477	56.24
	F25C1	3088	2178	70.53
F75 series	F25B1	2872	2743	95.50
	F25B1	3182	2990	93.96
	F25C1	3041	2671	87.83
	F25C1	2869	2415	84.17

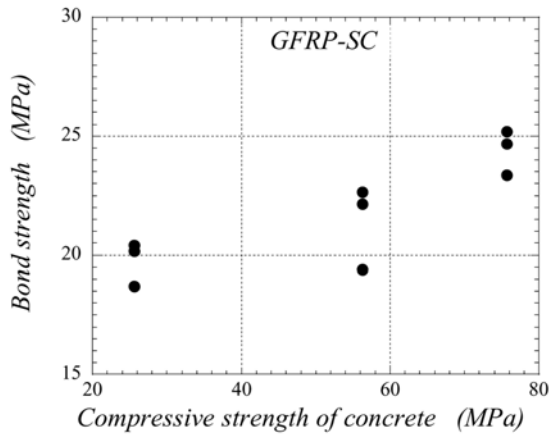


**Fig. 9** Delaminated area at interface 2 vs. compressive strength of concrete

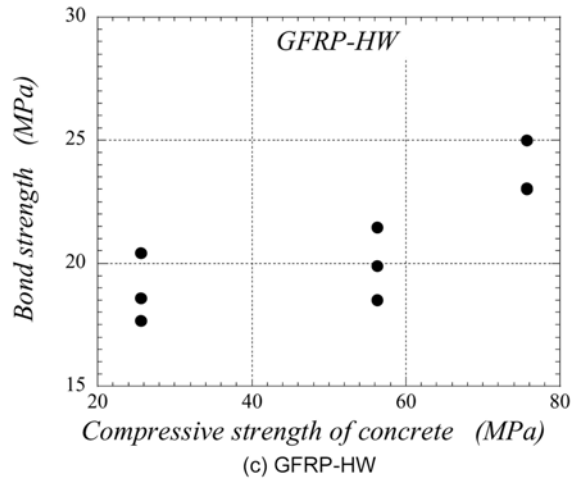
강근의 부착강도도 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 증가하였다. 그러나 GFRP 보강근의 부착강도의 증가는 철근에 비하여 크지 않음을 알 수 있다. 이와 같이



(a) Steel



(b) GFRP-SC



(c) GFRP-HW

**Fig. 10** Bond strength vs. compressive strength of concrete

부착강도의 증가가 콘크리트의 압축강도에 따라서 다른 이유는 앞에서 이야기한 두 재료의 부착 파괴 메커니즘의 차이 때문으로 판단된다.

ACI<sup>6)</sup> 및 CEB-FIP<sup>7)</sup>에서는 철근의 부착강도를 식 (2)와 같이 표현하여 계산하고 있다.

$$\mu = a(f_{ck})^\beta \quad (2)$$

여기서  $\mu$ 는 최대 부착응력,  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 압축강도,  $a$

는 보강근의 부착강도에 영향을 주는 보강근의 직경, 위치 등의 영향이 포함되어 있다.  $\beta$ 는 콘크리트의 압축강도가 철근에 미치는 영향에 대한 변수로 1/2에서 2/3까지 변화한다. ACI<sup>6)</sup>나 CEB-FIP<sup>7)</sup>에서는  $\beta$ 를 0.5로 하여 철근의 부착강도가  $\sqrt{f_{ck}}$ 에 비례하여 증가하는 식을 사용하고 있다. 한편 GFRP 보강근에 대해서는 Achilides<sup>1)</sup>는 콘크리트 압축강도 50 MPa 이후에 FRP 보강근의 부착강도는 거의 증가하지 않는다고 발표하였고, Okelo 등<sup>2)</sup>은 철근과 유사하게  $\sqrt{f_{ck}}$ 에 비례하여 증가한다고 보고하고 있다.

이 연구에서는 본 연구에서 실시한 실험 결과와 김태영 등<sup>3)</sup>이 발표한 연구의 실험 결과를 포함하여 콘크리트의 압축강도와 GFRP 보강근의 부착강도의 관계를 조사하여 Fig. 11에 나타내었다. Fig. 11에서 철근은 ACI와 CEB-FIP의 부착강도식과 유사하게  $\sqrt{f_{ck}}$ 에 비례하여 변화함을 알 수 있다. 한편 GFRP 보강근의 부착강도는 김태영 등의 제안식과 유사하게  $\beta = 0.3$ 에 비례하여 증가함을 알 수 있다. 연구자에 따라서 이와 같이 GFRP 보강근의 부착강도와 콘크리트 압축강도와의 관계가 차이는 이유는 콘크리트 압축강도의 차이 (Achilides의 연구는 모두 실험체의 콘크리트 압축강도가 60 MPa 이하의 실험 결과에 근거)와 콘크리트의 성분 및 보강근의 종류 등에 기인 한 것으로 판단되며, 보다 신뢰할 만한 GFRP 보강근의 부착강도를 평가하기 위해서는 앞으로 많은 실험 및 해석적 연구가 필요할 것으로 판단된다.

### 5.3 콘크리트의 압축강도와 미끌림 관계

Fig. 12는 콘크리트의 압축강도와 보강근이 최대 하중에 도달했을 때의 미끌림 (이하 최대 미끌림)의 관계를 나타낸다. Fig. 12에서 나선형 GFRP 보강근의 최대 미끌림은 철근이나 모래분사형 GFRP의 최대 미끌림에 비하여 매우 크음을 알 수 있다. 나선형 GFRP 보강근의 최대 미끌림은 약 4 mm였지만, 철근이나 모래분사형 GFRP의 최대 미끌림은 약 1 mm 전후였다. 이러한 최대 미끌

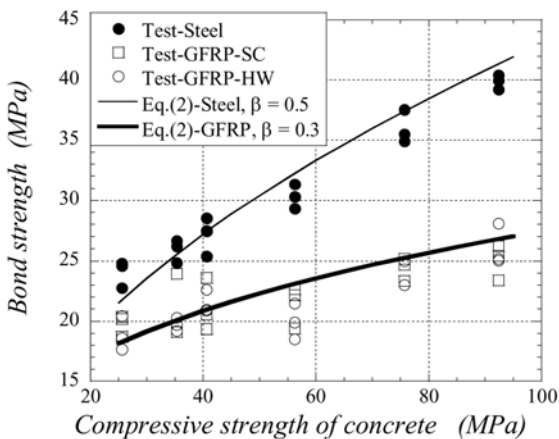


Fig. 11 Bond strength vs. compressive strength of concrete of all test results

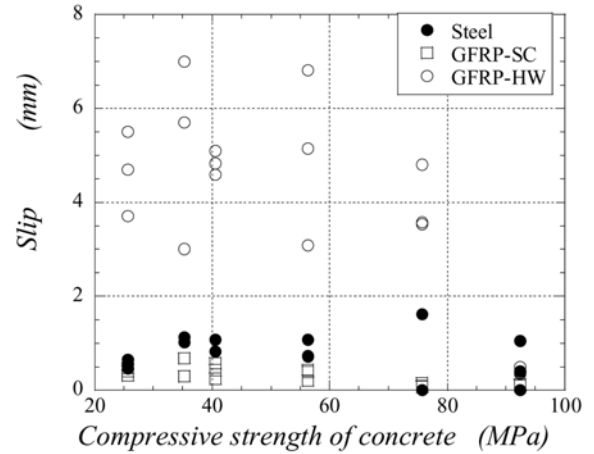


Fig. 12 Slip vs. compressive strength of concrete

림의 차이는 GFRP 보강근이 철근이나 모래분사형 GFRP와 다른 부착파괴 메커니즘을 가짐을 나타낸다. 앞서 언급했듯이 철근이나 모래분사형 보강근의 경우 작은 미끌림에서 일어날 수 있는 콘크리트의 부분 압축파괴와 Interface 1과 Interface 2에서 발생하는 접촉면파괴에 의한 것으로 사료되나, 나선형 GFRP 보강근의 경우 표면에 존재하는 완만한 나선형홈 (groove)의 영향으로 콘크리트와 나선형 GFRP 보강근 사이의 mechanical debonding은 보다 긴 미끌림을 저항하며 점진적으로 진행됨을 알 수 있다.

실험체의 최대 미끌림의 분포는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 다소 증가하였고, 보강근의 최대 미끌림은 GFRP 보강근의 경우 다소 감소하였으나 철근의 경우 작은 증가를 보였다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 고강도콘크리트가 GFRP 보강근의 부착강도에 미치는 특성을 조사하였다. 콘크리트의 압축강도를 3종류로 구분하여 모두 27개의 실험체에 대한 부착강도를 비교하였다. 특히 실험체를 절단하여 철근과 GFRP 보강근의 부착파괴의 특성을 조사하였다. 이 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) GFRP 보강근의 부착파괴면은 보강근의 외피를 중심으로 2개의 면으로 구분될 수 있다. 각각의 부착면은 콘크리트의 접착력과 외피 (레진)의 접착력의 상호관계에 의하여 결정되었다. 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 모래분사형 GFRP와 나선형 GFRP의 부착파괴면은 콘크리트와 외피 사이의 면 (Interface 1)에서 섬유외피와 보강근 자체 사이의 부착면 (Interface 2)으로 변화하였다.
- 2) GFRP 보강근의 부착강도는 부착파괴면과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있었다. 실험에서 관찰된 외피파괴비율에 근거하여 판단할 때, 보강근과 외피의 접착력을 증대시킬 경우에 콘크리트의 압축강도



가 증가함에 따라서 GFRP 보강근의 부착강도가 증가할 것으로 판단된다.

- 3) GFRP 보강근의 부착강도는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 증가하였다. 하지만 증가비율은 철근의 부착강도의 증가비율에 비해서는 낮았다. 이번 연구에 사용된 GFRP 보강근의 경우 부착강도가 콘크리트 압축강도의 0.3승에 비례하였다. 하지만 GFRP 보강근의 형태와 표면처리에 따라 부착강도의 특성이 변할 수 있으므로 보다 다양한 변수에 대한 GFRP 보강근의 부착거동에 대한 연구가 지속적으로 필요할 것으로 판단된다.

### 감사의 글

본 연구는 공기술연구회의 정책연구사업인 “FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트 구조물 건설기술 개발”의 지원에 의하여 수행되었으며 이에 깊이 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Achillides, Z., Pilakoutas, K., and Waldron, P., “Bond

Behaviour of FRP Bars to Concrete,” *Proceedings of the 3rd International Symposium on Non-metallic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, Sapporo, Japan, October 1997, pp. 341~348.

2. Okelo, Roman and Yuan, Robert L., “Bond Strength of Fiber Reinforced Polymer Rebars in Normal Strength Concrete,” *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 9, No. 3, 2005, pp. 203~213.
3. 김태영, 박지선, 이정운, 김공환, “GFRP 복합재료 보강근의 부착강도에 미치는 영향,” 대한건축학회 논문집, 21권, 12호, 2005, pp. 69~76.
4. CSA Standard, *S806-02 Design and Construction of Building Components with Fibre-Reinforced Polymers*, Canadian Standard Association, 2002, 177 pp.
5. Eligehausen, R., Popov, E. P., and Bertero, V. V., *Load Bond Stress-Slip Relationships of Deformed Bars Under Generalized Excitations*, Report No.UCB/EERC82-83, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley, California, Oct. 1983, 162 pp.
6. ACI 440.1R-03, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI Committee 440, 2003, 44 pp.
7. CEB-FIP, *Bond of Reinforcement in Concrete, State-of-Art Report*, Bulletin, 2000, 427 pp.

---

**요 약** 이 연구에서는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 변화하는 GFRP 보강근의 부착 특성을 조사하였다. 실험에서는 3종류의 콘크리트에 배근된 27개의 보강근의 부착응력-부착미끄러짐 관계를 측정하였다. 하중가력이 종료한 후에 실험체를 절단하여 고강도콘크리트가 GFRP 보강근의 부착에 미치는 영향을 살펴보았다. 실험 결과에 의하면 GFRP 보강근의 부착파괴면은 철근과 상이하게 2개의 면으로 구분되었다. 파괴면은 콘크리트와 외피 사이의 파괴면과 외피와 섬유보강근 사이의 파괴면으로 구분 할 수 있었다. 이와 같은 GFRP 보강근의 부착파괴면은 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 콘크리트의 접착력과 외피의 접착력의 상호관계에 따라서 달라졌다. GFRP 보강근의 부착강도는 콘크리트의 압축강도가 증가함에 따라서 증가하였지만, 증가 비율은 철근의 부착강도보다 낮았다.

**핵심용어** : 유리섬유보강근, 부착강도, 고강도콘크리트, 부착파괴면