

# FRP Re-bar 보강 직사각형 단면 콘크리트 보의 구조적 거동 및 설계방법에 관한 연구

주형중\*·옥동민\*\*·박주경\*\*\*·윤순종\*\*\*\*

## A Study on the Structural Behavior and Design Criteria of FRP Re-bar Reinforced Rectangular Concrete Beam

Joo, Hyung-Joong, Ok, Dong Min, Park, Ju-Kyung, Yoon, Soon-Jong

### Abstract

FRP Composite materials are widely applicable in the construction industries as a load-bearing structural element or a reinforcing and/or repairing materials for the concrete. In this paper, we presented the flexural behavior of FRP Re-bar and steel reinforced concrete beams and only FRP re-bars reinforced concrete beams. FRP Re-bar manufactured by different fibers but the same vinylester resin. Also, surface of FRP Re-bars is coated garnet and glass fiber by epoxy to increase the adhesive to concrete. Experimental investigation pertaining to the load-deflection and load-strain characteristics of two classified specimens is presented and the theoretical prediction is also conducted. In the investigation, the effects of FRP Re-bar reinforcement are estimated. The experimental results are compared with theoretical predictions. Good agreements are observed.

**Key Words:** FRP Re-bar, Experiment, Application, Reinforcement

### 1. 서론

산업이 발전하고 사회가 급변하면서 구조물에 요구되는 기능이 다양해지고 있으며, 구조물 설계시 설계변수가 증가되는 등 기존의 건설재료로써 해결하기 어려운 문제점이 부각되고 있기 때문에 토목업계에서도 신소재에 대한 연구의 필요성이 점증되고 있다.

FRP는 내부식성, 단위중량당 강도 등 기존 건설재료가 가지는 문제점들을 해결할 수 있고 보강섬유, 섬유함유량, 레진의 종류 등에 따라 재료의 성질을 변화시킬 수 있기 때문에 요구되는 구조물의 기능을 충족시키기에 부족함이 없다. 건설분야에서 신소재로서 활발히 연구가 진행되고 있는 FRP는 기존 건설재료가 가지는 단점을 보

완하기 위한 보수 또는 보강 단계에서 현재에는 FRP를 사용한 구조물이 시공되고 있다. 그러나 FRP를 구조물에 적용하여 시공할 경우 국내에는 설계 및 해석에 대한 규준이 마련되어 있지 않기 때문에 자체실험 등의 연구를 통해 제한적으로 사용하고 있다.

본 연구는 토목분야에서 FRP를 활용하기 위한 연구의 일부로서 FRP Re-bar를 콘크리트 휨보강 용으로 사용한 경우 실험을 통해 구조물의 거동을 조사하였고 실험결과를 ACI Committee 440의 설계기준과 비교, 분석하였다. 또한, 기존 철근콘크리트 구조물의 보강재로 FRP Re-bar를 사용한 경우 보강효과를 실험을 통해 조사하였으며, 철근콘크리트 해석방법을 수정, 보완하여 FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 휨부재의 설계방안을 제안하였다.

\* 홍익대학교 대학원 토목공학과 박사과정

\*\* (주)대우건설 상무이사

\*\*\* (주)대한이엔씨 대표이사

\*\*\*\* 홍익대학교 토목공학과 교수

### 2. 재료의 역학적 성질

본 연구에서는 FRP Re-bar 보강 콘크리트 휨부재 및 철근콘크리트 휨부재의 실험체 제작에 사용된 재료들의 역학적 성질을 인장 및 압축 강도 실험을 통해 다음과 같이 결정하였다.

## 2.1 FRP Re-bar의 역학적 성질

콘크리트 보강용 FRP Re-bar는 콘크리트와의 부착을 고려하여 펠트루전 방법으로 생산한 후 GFRP 표면에 에폭시와 유리섬유를 사용하여 요철을 두었고, 철근콘크리트 보강용으로 사용된 FRP Re-bar는 3가지 섬유(carbon, aramid, glass)로 각각 제작한 후 표면에 가넷으로 코팅하였다. 재료의 역학적 성질은 1998년 Castro 등에 의해 연구된 결과를 참고, 수정하여 각각 5개의 시편을 제작하여 인장실험을 수행하였다. 5개의 시편에서 얻은 인장실험결과를 평균하여 표 1에 나타내었다.

표 1 FRP Re-bar의 역학적 성질

Type		탄성계수 (kgf/cm <sup>2</sup> )	극한강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )
콘크리트 보강용	GFRP	249,400	7,800
	AFRP	733,000	17,000
철근콘크리트 보강용	GFRP	548,000	12,300
	CFRP	1,012,000	20,500

## 2.2 콘크리트 및 고강도 폴리머 모르타르

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 두가지 종류로 표준원형공시체를 제작하여 3일, 7일, 14일, 실험당일에 압축강도 시험을 수행한 후 강도이력 곡선으로부터 압축강도를 약 270 kgf/cm<sup>2</sup>, 380 kgf/cm<sup>2</sup>으로 추정하였다. 폴리머 모르타르는 KS L 5105에 준하여 실험을 수행하였으며 3일, 7일, 14일, 21일에 압축강도 시험을 하고 강도이력곡선으로부터 압축강도를 약 400 kgf/cm<sup>2</sup>으로 추정하였다.

## 3. 휨실험

본 연구에서 수행한 실험에서는 FRP Re-bar의 활용방안으로 두 종류의 실험체를 제작하였다. 신설구조물 축조시 철근의 대체제로 FRP Re-bar를 사용하는 경우에 대한 실험체와 노후된 구조물의 휨보강 방안으로 기존 휨부재의 하부를 치

평한 후 FRP Re-bar를 배근하여 보강하는 실험체이다. 각 실험체의 제작방법 및 휨실험 수행과정은 다음과 같다.

### 3.1 실험체 설계 및 제작

FRP Re-bar는 철근과 같은 항복점이 없고 선형에 가까운 응력-변형률 거동을 보이다가 갑작스럽게 취성파괴되므로 실험체의 설계에서 철근콘크리트 보에서와 같은 연성파괴를 유도하는 것은 불가능하다. 따라서 본 연구에서는 실험체를 ACI Committee 440기준에 의해 콘크리트에 압축파괴가 발생하도록 설계하였다. 모든 실험체에서 GFRP Re-bar의 보강량은 균형보강비 이상으로 결정하여 콘크리트의 압축파괴를 유도하였다. 각 실험체는 직사각형 단면으로 치수는 30cm × 50cm이고 길이는 4m (경간 3.6m)이다. 실험체별 보강에 사용된 GFRP Re-bar의 지름은 9.53mm이며 보강량은 표 2에 나타내었다. FRP Re-bar보강 실험체는 FRP Re-bar를 배근한 후 거푸집을 제작하고 레디믹스트 콘크리트를 타설하여 총 3개의 실험체를 제작하였다.

표 2 FRP Re-bar보강 콘크리트 실험체의 변수

실험체	보강량 $A_f$ (cm <sup>2</sup> )	보강비 $\rho_f$
No. 1	8.57	0.00621
No. 2	12.85	0.00931
No. 3	17.13	0.01242
균형보강비 : $\rho_{fb} = 0.00399$		

FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 실험체는 FRP Re-bar의 보강효과를 조사하기 위해 FRP Re-bar가 보강되지 않은 철근콘크리트 보를 실험대상에 포함하여 총 12개의 실험체를 제작하였다. FRP Re-bar가 보강되지 않은 철근콘크리트 보는 길이가 3.4m(경간 3m)이고 폭이 30cm, 높이가 31cm인 직사각형 단면 과소철근보로 설계하여 인장철근의 항복으로 파괴되는 휨파괴를 유도하였다. FRP Re-bar 보강 실험체에 사용된 FRP Re-bar는 지름이 6mm, 단면적이 28.3mm<sup>2</sup>이고, 섬유의 종류는 Aramid, Carbon, Glass 세가지인 FRP Re-bar를 사용하였으며, 보강량은 각각 3, 6, 9개로 결정하였다. 실험체의 제작은 시공과정을 고려하여 다음과 같은 순서에 의해 제작하였다.

- ① 철근콘크리트 직사각형단면 보 제작
- ② 대기온도(15 °C)에서 5일간 양생 후 콘크리트 보 하부 치핑 및 고압 물세척
- ③ FRP Re-bar 부착을 위한 모르타르 도포
- ④ FRP Re-bar 설치 및 고성능 모르타르 마감

### 3.2 실험방법 및 하중재하

각 실험체들의 하중재하 및 계측기 설치위치는 그림 1에 나타내었다. FRP Re-bar 보강 콘크리트 실험체는 콘크리트내 FRP Re-bar 중앙에 스트레인게이지를 부착하였고, FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 실험체는 철근 및 FRP Re-bar에 스트레인게이지를 부착하였다. 모든 실험체는 경간중앙에 LVDT를 설치하여 하중증가에 따른 처짐을 측정하였고, 삼등분점재하실험을 수행하였으며, 하중은 변위제어방식으로 재하하였다.

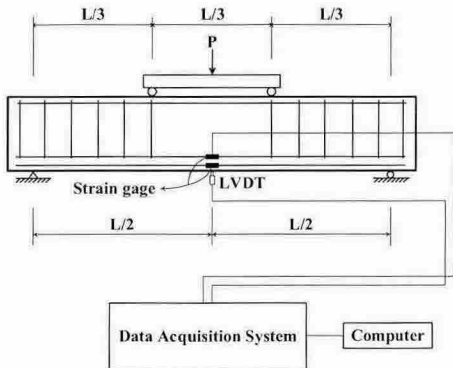


그림 1. 계측기 설치위치 및 실험개요

### 3.3 실험결과 및 분석

#### 3.3.1 FRP Re-bar 보강 콘크리트 휨부재

FRP Re-bar 보강 콘크리트 실험체에 대해 예측한 파괴모드는 콘크리트의 압축파괴에 의한 파괴였지만 실험결과 모든 실험체의 파괴양상은 지점으로부터 30~50cm 정도 떨어진 곳에서 전단에 의해 발생한 균열이 압축부까지 연결되다가 갑작스럽게 파괴되는 현상을 나타내었다. 실험결과로부터 GFRP Re-bar의 보강량에 따른 이론적으로 계산한 공칭휨모멘트와 실험에서 측정된 최대휨모멘트의 변화를 그림 2에 나타내었다. 그림에서 GFRP Re-bar 보강량이 증가할수록 최대휨모멘트는 거의 선형으로 증가함을 알 수 있다.

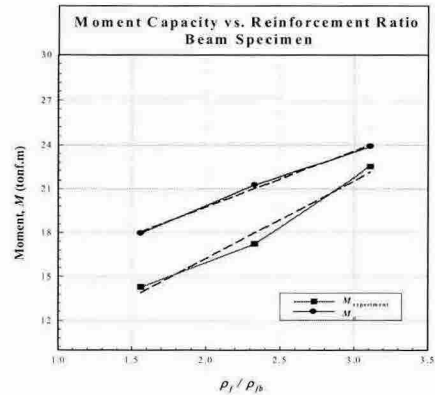


그림 2. GFRP Re-bar 보강량에 따른 실험체의 휨모멘트 변화

#### 3.3.2 FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 휨부재

FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 보는 이론적으로 과소철근보로 설계되었고, 실험결과 인장철근이 항복되어 파괴되는 휨파괴를 나타내었다. FRP Re-bar를 보강하지 않은 실험체는 하중재하단계 초기에는 하중-처짐, 하중-변형률 곡선이 선형으로 증가하다가 균열 이후 기울기가 감소하면서 다시 선형으로 증가하고, 철근의 항복 이후 하중의 증가 없이 처짐이 증가하는 현상을 나타내었다.

FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 보의 거동은 보강하지 않은 실험체와 유사한 거동을 보였으나 초기균열 이후 보강하지 않은 실험체에 비해 하중-처짐, 하중-변형률 곡선의 기울기가 증가하였고 철근이 항복하는 하중의 크기도 또한 증가하였으며 철근의 항복 이후에도 하중은 계속 증가하였다. 이러한 현상은 보강량 및 보강된 Re-bar의 종류에 따라 차이를 나타내었으며 보강으로 인한 실험체의 휨강성이 각각 다르기 때문에 보강량이 증가하고, 보강된 Re-bar의 탄성계수가 클수록 기울기가 증가하며 철근이 항복되는 하중의 크기도 증가하였다. 또한, 철근의 항복이후에도 하중이 증가하는 것은 FRP Re-bar가 파괴되지 않고 하중에 저항하고 있기 때문이다. 실험결과 각 실험체에서 얻은 결과를 표 3에 정리하여 나타내었는데 아랫첨자 A, G, C는 각각 보강섬유의 종류로 Aramid, Glass, Carbon을 나타내며 B<sub>0</sub>실험체는 FRP Re-bar로 보강하지 않은 실험체이다. 표 3에서 공칭휨모멘트는 철근이 항복할 때 단면에 발생하는 모멘트이며, 최대휨모멘트는 실험체가 파괴될 때 단면에 발생하는 모멘트이다.

표 3 FRP Re-bar 보강 철근콘크리트 보의  
공칭휨모멘트 및 최대휨모멘트

시편	공칭휨모멘트	최대휨모멘트
	$M_{Im}$ (tonf · m)	$M_{Rmax}$ (tonf · m)
BA1	11.80	13.54
BA2	13.44	15.78
BA3	13.92	17.03
BG1	12.68	14.27
BG2	13.45	15.47
BG3	14.92	18.19
BC1	12.89	15.89
BC2	14.34	17.99
BC3	15.07	19.35
B <sub>0</sub> 의 공칭휨모멘트 : 12.01 tonf · m		

#### 4. 설계제안 및 결론

실험결과로부터 국내에서 생산된 FRP Re-bar 보강 콘크리트 휨부재를 ACI Committee 440에 의해 설계할 경우 요구되는 휨강도를 발휘하게 하기 위해서는 충분한 전단보강이 필요하며 과도한 처짐과 균열이 발생한 후에 전단파괴가 발생하므로 처짐이나 균열 등 사용성과 관련된 설계기준을 적용하여 휨부재를 적절히 설계해야 한다고 판단된다.

노후된 철근콘크리트 구조물의 휨보강 방안으로 FRP Re-bar를 사용할 경우 본 연구에서 얻은 결과로부터, 설계에 적용하기 위한 FRP Re-bar의 설계인장강도는 실험체가 파괴될 때 Re-bar의 응력과 탄성계수를 곱하여  $0.5f_{fu}$ 로 결정하였다. FRP Re-bar의 보강량은 작용하중에 의한 계수휨모멘트가 단면의 설계휨모멘트보다 크면 부족휨모멘트 이상으로 보강을 해야 하며, 보강량은 식 1과 같이 FRP Re-bar의 보강비를 정의하면 식 2의 해로부터 얻을 수 있다.

$$\rho_f = \frac{A_f}{bd_s} \frac{0.5f_{fu}}{f_y} \quad (1)$$

$$A\rho_f^2 + 2B\rho_f + C = 0 \quad (2)$$

식 1에서  $b$ 는 직사각형 단면 보의 폭이고,  $d_s$ 는 직사각형 단면 보의 상단으로부터 철근의 도심까지 거리이며  $A_f$ ,  $f_{fu}$ ,  $f_y$ 는 각각 FRP Re-bar의 단면적과 극한강도, 철근의 설계인장강도이다.

식 2에서 변수 A, B, C는 각각 휨부재의 단면 치수, 철근의 보강비, 철근 및 FRP Re-bar의 설계인장강도에 관계된 변수로 강도설계법의 설계휨

모멘트가 계수휨모멘트보다 크다는 조건으로부터 유도할 수 있다.

철근의 대체재로 FRP Re-bar를 사용할 경우 과도한 처짐이 발생한 후 전단파괴가 발생하는 거동을 보이고 있으므로 국내에서 생산된 FRP Re-bar를 사용하여 ACI Committee 440에 의해 설계할 경우 충분한 전단보강이 요구되며 FRP Re-bar의 배근방법 및 강도제한 등에 대한 연구가 선행되어야 할 것으로 생각된다. 또한, 국내에서 생산된 FRP Re-bar로 철근콘크리트 휨부재를 보강할 경우 철근의 항복 이후에도 하중이 증가하기 때문에 공칭휨모멘트는 최대휨모멘트와의 차이만큼 여유 휨모멘트가 확보되고, 강도감소계수를 고려한 설계휨모멘트는 파괴강도에 대해 약 18% 이상의 여유 휨모멘트를 갖게 되며 실험결과로부터 보강효과 및 보강량을 결정할 수 있는 방법을 제안하였다.

#### 후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(No. 01-2005-000-10395-0)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- (1) ACI Committee 440R (1996). *State-of-the-Art Report on Fiber Reinforced Plastic (FRP) Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute, U.S.A.
- (2) ACI Committee 440 (2000). *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar*, American Concrete Institute, U.S.A.
- (3) Castro, P. F. (1998). "Tensile and Nondestructive Testing of FRP Bars," *Journal of Composites for Construction*, ASCE, Vol. 2, No. 1, February, pp. 17-27.
- (3) 윤순중 (2004). 가넷코팅한 FRP Rod와 고성능 폴리머 모르타르를 이용한 철근콘크리트 구조물용 보강공법의 성능 및 보강효과에 관한 연구, *연구보고서*, 홍익대학교 부설 과학기술연구소, (주)리포시스템.
- (4) 한국건설기술연구원, 장수명 합리화 교량바닥판 개발(I), 2003. 12.