

GFRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 휨파괴 거동

어석홍^{1*}, 하상훈²

¹창원대학교 토목공학과, ²한국농어촌공사

Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with GFRP Bars

Seok-Hong Eo^{1*}, Sang-Hoon Ha²

¹Department of Civil Engineering, Changwon National University

²Korea Rural Community Corporation

요약 본 논문은 철근대체재로서 유리섬유보강 플라스틱봉(GFRP : Glass Fiber Reinforced Plastic Bar)으로 보강한 콘크리트 보 및 일반 RC보의 휨파괴 실험결과를 비교하여 제시한 것으로 보강비와 콘크리트의 압축강도를 주요 실험변수로 설정하여 보의 균열발생 양상과 파괴모우드, 처짐, 변형률 및 최대하중을 측정하고 분석하였다. 실험결과, GFRP 보강보의 하중강도는 보강비와 콘크리트 강도가 증가할수록 크게 나타났으며, 동일 보강비일 경우 일반 RC보에 비하여 41.3~51.6% 증가하였다. GFRP 보강보의 처짐은 일반 RC보에 비하여 약 4.1~6.3배 증가하는 것으로 나타났으며, 실측처짐이 이론값보다 평균 31% 정도 작게 나타나 GFRP 보의 처짐계산시 사용되는 휨강성이 최대하중시 과소평가되기 때문인 것으로 판단된다. GFRP 보의 균열폭은 RC보에 비하여 1.87~2.79배 크게 발생하였으며, 보강비와 콘크리트 강도가 증가할수록 다소 작은 것으로 나타났다. ACI code 440에 의해 산정한 설계휨강도는 대체적으로 안전측의 값을 나타내었다.

Abstract This paper presents the results of flexural test of concrete beams reinforced with GFRP and conventional steel reinforcement for comparison. The beams were tested under a static load to examine the effects of the reinforcement ratio and compressive strength of concrete on cracking, deflection, ultimate capacity, and modes of failure.

The test results showed that the ultimate capacity of the GFRP-reinforced beams increased with increasing reinforcement ratio and concrete strength, showing a 41.3~51.6% increase compared to steel reinforced beams. The deflections at maximum loads of the GFRP reinforced beams were 4.1~6.3 times higher than that of steel reinforced beams. The measured deflections of GFRP reinforced beams decreased approximately 31% compared to the theoretical predictions because the theoretical flexural stiffness was underestimated at the maximum loads. For the GFRP-reinforced beams, the ACI code 440 design method resulted in conservative flexural strength estimates.

Key Words : Concrete strength, Cracking, Flexural failure behavior, GFRP bar, Reinforcement ratio

1. 서론

최근 콘크리트 구조물이 중성화되거나 제설제 및 해양환경에 의한 염화물의 침투, 확산 등 여러 가지 유해요

소로 인해 철근이나 PS강재가 부식되어 구조물의 성능이 저하되고 수명이 단축되는 심각한 문제점이 지적되고 있다. 국내의 경우 보고된 결과에 따르면 해양환경에 위치한 콘크리트 교량뿐만 아니라 고속도로 및 도심지에

본 논문은 2013~2014년도 창원대학교 연구비에 의하여 연구되었음.

*Corresponding Author : Seok-Hong Eo(Changwon National Univ.)

Tel: +82 10-4585-8049 email: esh@changwon.ac.kr

Received April 23, 2014

Revised June 10, 2014

Accepted August 7, 2014

위치한 콘크리트 교량 바닥판에서도 약 15% 정도 철근의 부식이 진행되고 있는 것으로 나타났다[1]. 여러 기술 선진국의 경우 이러한 문제를 해결하기 위하여 콘크리트 내 보강철근의 부식과 같은 내구성과 관련된 문제를 일으키지 않는 철근대체재에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 그 중의 하나가 섬유보강 플라스틱계 복합재료(Fiber reinforced plastics, FRP)로써 많은 연구결과와 현장적용 경험을 바탕으로 FRP를 보강한 콘크리트 구조물의 설계 기준을 확립해 가고 있는 실정이다[2,3]. 그러나 국내의 경우 FRP 보강 콘크리트 구조물의 거동에 대한 이론적, 실험적 연구가 아직 미흡한 실정이고 체계적인 설계기준이 확립되어 있지 않은 실정이다[4]. 특히, GFRP는 철근에 비하여 탄성계수가 상당히 작고 항복점과 소성구간이 없는 특성을 가지고 있어 부재의 과다한 처짐과 균열발생 등 사용성의 문제가 예상되며 또 한편으로는 매우 큰 인장강도로 인하여 극한하중시의 파괴거동이 일반 철근 콘크리트 부재와는 상이한 파괴모드가 발생됨을 여러 문헌에서 지적되고 있다[5,6].

본 연구에서는 FRP중에서도 가장 경제적이고 합리적인 것으로 평가되는 유리섬유보강 플라스틱(Glass fiber reinforced plastics, GFRP)을 보강근으로 사용하여 보강근비 및 콘크리트의 압축강도 변화에 따른 휨파괴실험을 수행하였다. GFRP 보강근비는 일반 철근에 비하여 현저히 작은 균형철근비가 파괴모우드에 미치는 영향을 분석하고, 콘크리트 압축강도를 변화시켜 높은 인장도를 가지는 GFRP 보강근과의 조합에 따른 상대적인 파괴모우드를 분석하였다. 시험결과를 토대로 부재의 강도, 하중-처짐 및 균열과 변형특성을 중심으로 ACI Committee 440에서 제안된 설계기준의 타당성과 적용성을 비교검토하였다.

2. 이론적 고찰

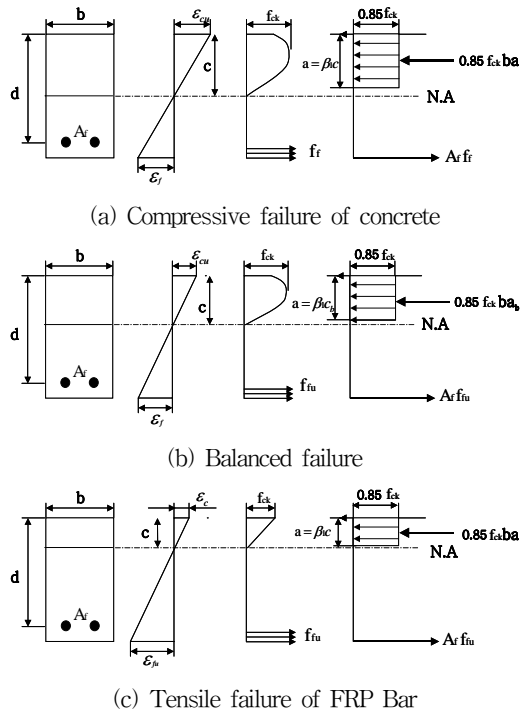
2.1 파괴모드와 휨강도 해석

FRP 보강 콘크리트 휨부재의 파괴모드는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 철근콘크리트 휨부재의 파괴모드와 마찬가지로 FRP Bar의 보강량에 따라 콘크리트의 압축파괴, 균형파괴, FRP Bar의 인장파괴의 3가지로 구분된다. FRP Bar의 경우 철근과는 달리 항복점을 갖지 않으므로, 철근의 항복응력 대신에 FRP Bar의 설계인장강도를 사

용하여 아래 식(2-1)과 같이 계산할 수 있다[7].

$$\rho_{fb} = 0.85 \beta_1 \frac{f_{ck}}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_{fu}} \quad (2-1)$$

식(2-1)에서 β_1 은 콘크리트의 설계기준강도 f_{ck} 에 따라 결정되는 상수로서 철근콘크리트 휨부재에 적용하는 값과 같다.



[Fig. 1] Stress and strain distributions according to failure modes of FRP Bar reinforced concrete beam

FRP Bar의 보강비($\rho_f = A_f/bd$)가 균형보강비(ρ_{fb})보다 큰 경우 직사각형 단면보의 공칭휨강도는 단면력의 평형조건으로부터 식(2-2)와 같이 유도된다.

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

식(2-2)에서 콘크리트의 응력사각형의 깊이 a와 FRP Bar의 응력 f_f 는 각각 다음과 같다.

$$a = \frac{A_f f_f}{0.85 f_{ck} b} \quad (2-3)$$

$$f_f = E_f \epsilon_{cu} \frac{\beta_1 d - a}{a} \quad (2-4)$$

식(2-4)의 a에 식(2-3)을 대입하고 다시 정리하면, 과보강상태에서의 FRP Bar의 응력은 다음과 같이 유도된다.

$$f_f = \left(\sqrt{\frac{(E_f \epsilon_{cu})^2}{4} + \frac{0.85 \beta_1 f_{ck}}{\rho_f} E_f \epsilon_{cu}} - 0.5 E_f \epsilon_{cu} \right) \leq f_{fu} \quad (2-5)$$

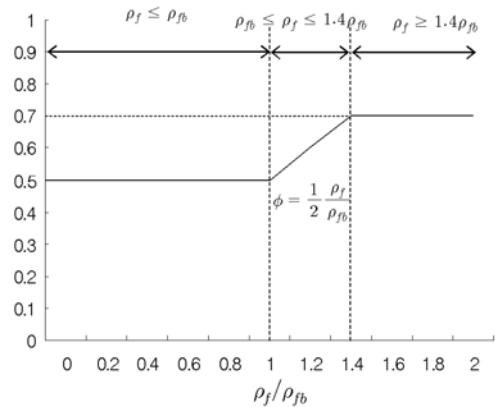
FRP Bar의 보강비가 균형보강비보다 작은 경우에는 콘크리트의 응력분포와 압축축 연단에서의 변형률을 정확하게 파악하기 어렵기 때문에 이러한 조건을 갖는 FRP Bar 보강 콘크리트보의 공칭휨강도를 정확하게 계산하기는 어렵다. 이 경우에는 식(2-2)와 식(2-3)에서 f_f 대신에 f_{fu} 를 사용하여 안전측으로 계산할 수 있다.

FRP Bar로 보강된 콘크리트 부재의 강도감소계수는 부재의 충분한 예비강도를 확보하기 위해 철근콘크리트 부재보다 안전한 감소계수를 적용해야 한다. 두 재료 모두 극한상태에서 매우 취성적인 파괴거동을 보이기 때문이다. ACI Committee 440에서는 식(2-6)과 같이 FRP Bar의 보강비에 따라 구분하여 강도감소계수를 적용하였다. 이 관계식을 그래프로 나타내면 Fig. 2와 같다.

$$\phi = \begin{cases} 0.50 & \text{for } \rho_f \leq \rho_{fb} \\ 0.70 & \text{for } \rho_{fb} \leq \rho_f \leq 1.4\rho_{fb} \\ \frac{\rho_f}{2\rho_{fb}} & \text{for } \rho_f \geq 1.4\rho_{fb} \end{cases} \quad (2-6)$$

GFRP 부재는 기존의 많은 연구를 통해 취성적 파괴를 막고 안전측의 여유내력을 확보하기 위해 과보강 설계가 바람직하다고 알려져 있다[7,8].

본 연구에서는 GFRP 보강근비를 달리하여 파괴모드를 관찰하였으며 이론적인 공칭휨강도로부터 이론적인 최대하중을 구하여 실험값과 비교분석하였다.



[Fig. 2] Relations between strength reduction factor and reinforcement ratios of FRP Bar

2.2 사용성 검토

FRP Bar로 보강된 콘크리트 휨부재는 FRP Bar의 낮은 강성으로 인해 균열발생 후 철근으로 보강된 콘크리트 휨부재에 비해 부재 전체의 휨강성이 작아지며, 이로 인한 처짐이 크게 발생한다. FRP Bar로 보강된 단순지지된 직사각형보에 대한 실험적 연구결과에 따르면 철근콘크리트 휨부재의 사용성 검토에 적용되는 Branson의 유효단면2차모멘트를 FRP Bar로 보강된 콘크리트 휨부재에 적용할 경우 단면의 능력이 과대평가되는 것으로 나타났다. 이러한 실험결과는 FRP Bar의 탄성계수가 철근에 비해 작고, 부착강도가 상대적으로 작기 때문이므로, 철근콘크리트 휨부재에 적용하던 Branson의 유효단면2차모멘트식을 수정하여 ACI Committee 440에서는 이러한 연구결과를 바탕으로 다음과 같이 FRP Bar 보강 콘크리트 휨부재의 유효단면2차모멘트식과 유사한 형태의 아래 (2-7)을 제안하였으며, 이 식에서 β_d 는 식(2-8)과 같이 결정된다[7].

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_u}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_u}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g \quad (2-7)$$

$$\beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_f}{E_s} + 1\right) \quad (2-8)$$

식(2-7)에서 E_s 는 철근의 탄성계수이며, α_b 는 콘크리트와 FRP Bar의 부착력과 관련된 계수로서, GFRP Bar의 경우 0.5를 사용하도록 권장하고 있다. 여기서, E_f

대신 E_s 를 대입하면 β_d 는 1이 되므로 식(2-7)은 기존 Branson의 식과 같게 된다.

FRP Bar로 보강된 콘크리트 부재의 균열폭을 예측하기 위하여 ACI Committee 440에서는 철근콘크리트 부재를 대상으로 개발된 균열폭 계산식을 토대로 FRP Bar와 콘크리트의 부착강도의 영향을 고려한 보정계수를 적용하여 다음과 같이 FRP Bar의 균열폭 계산식을 제안하였다.

$$w = \frac{2.2}{E_f} \beta k_b f_f^3 \sqrt{d_c A} \quad (2-9)$$

여기서 A는 콘크리트의 유효인장면적(mm²)을 Bar의 수로 나눈 값이며, d_c 는 인장철근의 도심으로부터 인장측 연단까지의 거리(mm), β 는 중립축으로부터 콘크리트의 인장연단까지의 거리에 대한 중립축으로부터 Bar의 도심까지의 거리의 비이다. 식(2-9)에서 f_f 와 E_f 의 단위는 MPa이며, k_b 는 FRP Bar와 콘크리트의 부착강도를 반영한 계수로서, FRP Bar의 종류에 따라 달라질 수 있다. ACI Committee 440에서는 일반적인 이형 FRP Bar에 대해서 1.2를 사용하도록 제안하고 있다. 본 연구에서는 ACI 설계기준식을 적용하여 계산한 이론적인 처짐 및 균열폭을 계산하고 실험결과와 비교분석하였다.

3. 실험계획 및 방법

3.1 GFRP 보강

본 연구에서는 GFRP로 보강된 휨부재의 파괴거동을 분석하기 위하여 실험변수로 GFRP Bar의 보강비 및 콘크리트의 압축강도를 설정하였으며, 비교를 위하여 동일한 직경과 단면적의 철근보강 콘크리트 보를 설정하였다. Table 1에 각 실험변수를 정리하였다. 표에서 일련번호 앞부분의 FRP와 ST는 각각 GFRP 보강근과 일반 철근을 나타내며, 뒷부분의 NC와 HC는 각각 보통강도 콘크리트와 고강도 콘크리트를 나타낸다. 전단파괴를 방지하기 위하여 $\phi 8$ 굵은철사를 스티럽으로 사용하여 5cm 간격으로 배근하였다. 이때 스티럽을 설치하기 위한 압축철근으로 $\phi 8$ 굵은철사 2개를 배근하였다.

[Table 1] Experimental program

Specimen No.	A_f (mm ²)	Concrete Strength (MPa)	Reinforcement ratio (ρ_f/ρ_b)
FRPNC-1	143	26.5 (Normal Strength)	1.23
FRPNC-2	214		1.84
FRPNC-3	285		2.46
STNC-1	143		0.14
STNC-2	214		0.21
STNC-3	285		0.30
FRPHC-1	143	49.0 (High Strength)	0.71
FRPHC-2	214		1.07
FRPHC-3	285		1.45
STHC-1	143		0.17
STHC-2	214		0.26
STHC-3	285		0.35

3.2 사용재료

본 연구에서 사용된 GFRP Bar는 국내 D사에서 제조한 것으로 물리적 특성은 Table 2와 같고, 철근은 D-10으로서 GFRP와 동일한 직경의 SD300을 사용하였다.

[Table 2] Physical properties of GFRP Re-bar [9]

Type	Nominal Diameter (mm)	Cross-Sectional Area (mm ²)	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (MPa)	Ultimate Tensile Strain
GFRP	9.53	71.3	597	26,184	0.0228

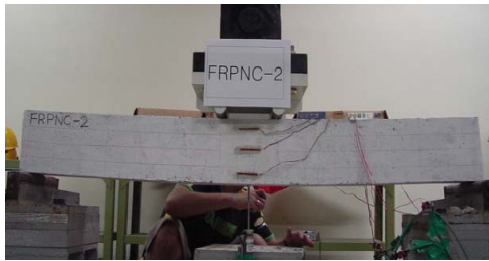
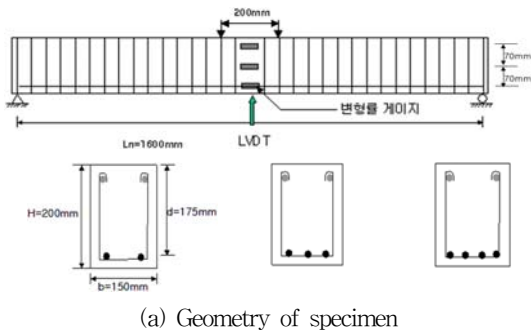
콘크리트의 설계기준강도는 보통강도 콘크리트의 경우로 26.5MPa와 고강도 콘크리트의 경우로 49.0MPa를 각각 목표로 하였으며, 압축강도 시험결과 23.5MPa와 50.0MPa로 각각 나타났다. NC 및 HC의 조깅인장강도는 각각 2.95MPa와 3.0MPa로 나타났다. 실험에 사용된 콘크리트의 배합비는 Table 3과 같다.

[Table 3] Mix-proportions of the concrete

Type	Cement (kg/m ³)	Water (kg/m ³)	Fine Aggregate (kg/m ³)	Coarse Aggregate (kg/m ³)	Admixture (kg/m ³)
NC	248	181	738	1033	-
HC	401	165	687	914	172

3.3 실험방법

본 연구에서 설계, 제작한 휨시험체는 실험변수를 고려하여 각각 두 개씩 모두 24개를 제작하였으며 28일간 습윤양생후 4점휨 재하실험을 수행하였다. 하중은 변위 제어 방식으로 가하였으며 2mm/min의 속도로 재하하였다. 시험체 중앙단면의 GFRP와 철근에는 매립용 변형률 게이지를 그리고 콘크리트 표면에는 부재 중앙 상면에 1개, 측면 중앙과 중앙에서 각각 70mm 상하에 3개의 일반 변형률게이지를 각각 부착하여 부재의 변형률 변화를 관찰하였다. 보의 중앙에 LVDT를 설치하여 부재의 처짐을 측정하였다. 각 시험체의 형상, 하중재하 및 측정 장치의 설치 위치는 Fig. 3과 같다.



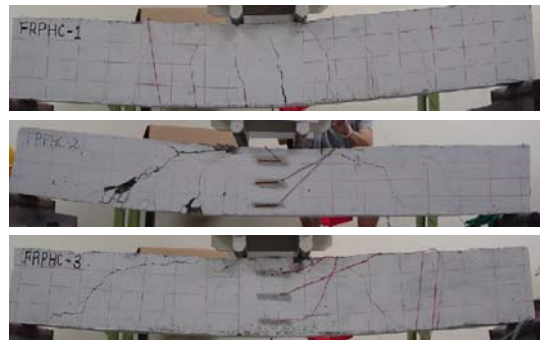
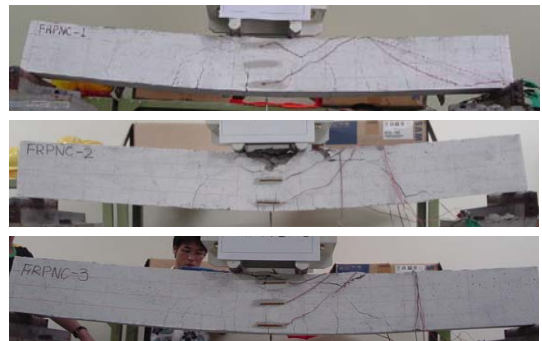
[Fig. 3] Specimen geometry and loading apparatus

4. 실험결과 및 분석

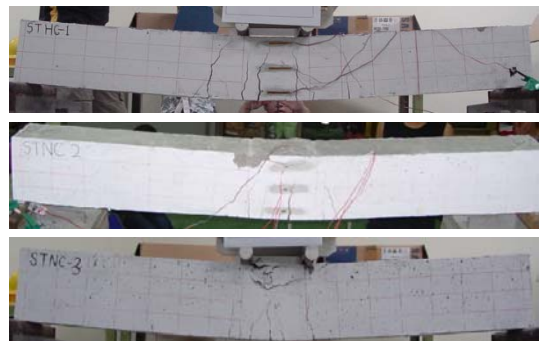
4.1 파괴모드 및 하중-변위곡선

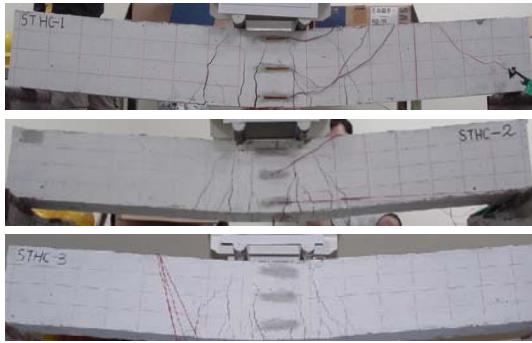
각 부재별 시험체에 대한 실험결과는 Table 4와 같고, 모든 GFRP 시험체는 콘크리트의 압축파괴 형태로 파괴되었고, RC보는 철근의 항복에 이은 인장파괴 양상을 보였다. FRPNC, FRPHC는 모두 콘크리트의 압축파괴로 취성파괴를 일으켰으나 GFRP Bar는 항복하지 않아 구

조물의 붕괴는 일어나지 않았으며 파괴 이후 하중을 제거하자 GFRP Bar 탄성에 의해 부재의 처짐 변형이 어느 정도 회복되는 것으로 관찰되었다. 특히, 균형보강비 이상으로 과보강된 FRPHC-2,3 시편의 경우에는 사인장균열에 이은 압축파괴의 전단파괴 양상을 나타내었다. 이상의 파괴양상으로 보아 GFRP Bar의 휨부재를 설계할 때에는 과보강비의 설계가 바람직함을 알 수 있었다. 각 시험체의 파괴양상을 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타내었다.



[Fig. 4] Failure modes of GFRP reinforced beams



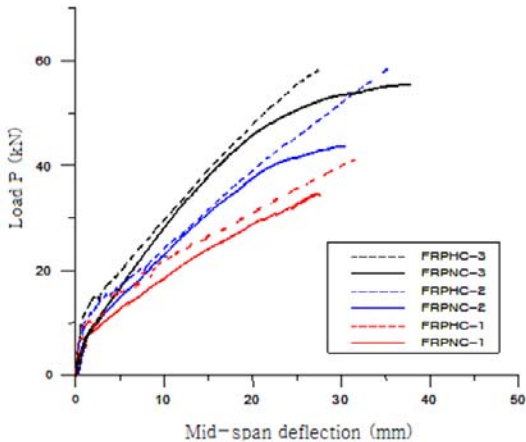


(b) High strength concrete

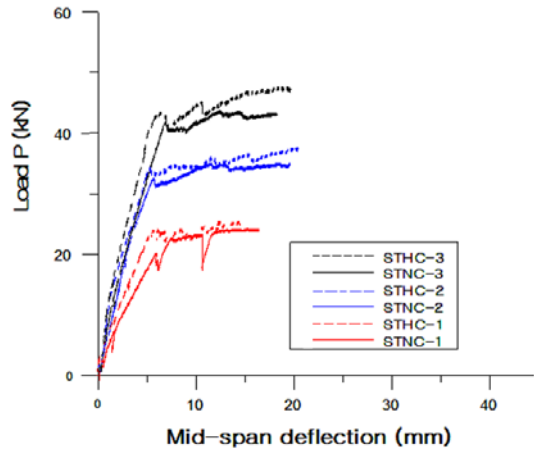
[Fig. 5] Failure modes of steel reinforced beams

파괴시의 최대하중은 GFRP보의 경우 RC보에 비하여 보통강도 콘크리트의 경우에 41.3%, 고강도 콘크리트의 경우 51.6% 증가한 것으로 나타났다. Table 4에 정리한 바와 같이 식(2-2)~식(2-5)에 따라 이론적으로 분석할 경우 고강도 콘크리트를 사용한 GFRP 시험체는 보통강도 콘크리트를 사용한 경우보다 8.3~39.6%정도 하중 재하능력 증진을 기대할 수 있으나, 실험결과 FRPHC-2,3 시험체의 경우 예상치 못한 사인장 파괴로 인해 하중 재하능력의 증가는 8.2~24.3% 정도로 이론적 예상치에 크게 못미치는 것으로 나타났다.

GFRP 보강비를 2배로 증가하였을 때 최대하중이 보통강도에서 51.1%, 고강도에서 40.2% 증가한 것으로 나타났다으나, 고강도 콘크리트 보의 경우 휨강도에 도달하기 전에 사인장 전단파괴가 먼저 유발되어 최대 휨파괴 하중에 미치지 못한 것으로 실제의 내력증가는 고강도 콘크리트에서 더 크게 일어나는 것으로 판단된다.



(a) GFRP Re-bar



(b) Steel

[Fig. 6] Load-deflection curves

[Table 4] Maximum loads and failure modes

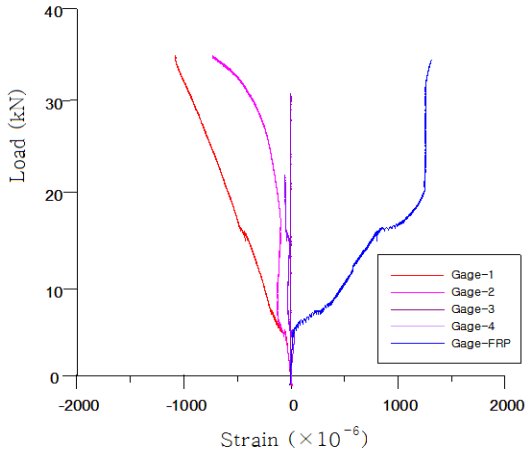
Specimen No.	P _{exp} (kN)	P _{theory} (kN)	P _{exp} /P _{theory}	Failure mode
FRPNC-1	35.6	35.4	1.01	Concrete crushing
FRPNC-2	46.1	42.7	1.08	
FRPNC-3	53.8	46.2	1.16	
FRPHC-1	41.5	32.7	1.27	
FRPHC-2	57.3	58.2	0.98	
FRPHC-3	58.2	65.9	0.88	Yield of reinforcing bars(steel)
STNC-1	22.3	20.5	1.09	
STNC-2	32.2	30.2	1.07	
STNC-3	41.4	39.1	1.06	
STHC-1	23.5	21.0	1.12	
STHC-2	36.0	31.2	1.15	
STHC-3	44.0	41.2	1.07	

4.2 하중-변형률 곡선

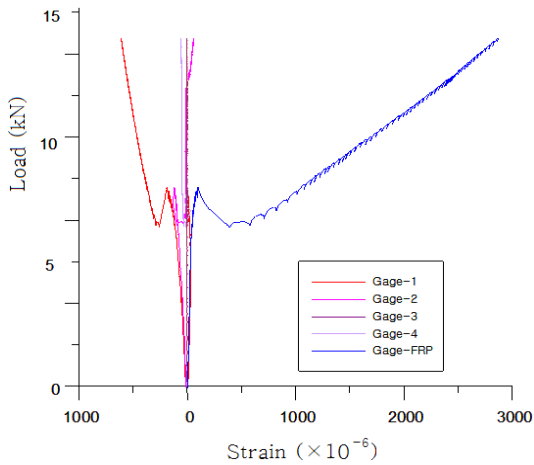
하중 재하시 콘크리트 및 GFRP-Bar의 변형률을 측정 하였으며, 이를 토대로 시험체의 중립축 변화, 파괴시 GFRP Bar와 콘크리트의 부착여부를 조사하였다. 그 결과 GFRP-Bar와 콘크리트의 부착상태는 양호한 것으로 판단되었으며, 하중이 증가함에 따라 중립축이 변화하여 GFRP-Bar의 위치에 부착한 콘크리트 변형률 계지는 초기에 인장력을 받다가 결국 계지의 기능을 상실한 것으로 판단되었다.

Fig. 7에 나타난 하중-변형률 곡선을 살펴보면 모든 시험체에서 GFRP Bar는 항복하지 않은 것으로 판단되며, Table 1에서 알 수 있듯이 균형보강비에 대한 GFRP

보강비의 비율이 0.71로 GFRP bar의 인장파괴를 예상했던 FRPHC-1 부재의 GFRP Bar의 변형률이 가장 크게 나타났다.



(a) FRPNC-1



(b) FRPHC-1

[Fig. 7] Load-strain curves for GFRP and concrete

4.3 처짐 및 균열폭

시험체의 처짐값은 ACI Code 440의 방법으로 식(2-7)의 균열환산단면2차 모멘트를 사용하여 계산하였으며 그 결과를 Table 5에 실험값과 비교하였다. 표에서 RC보의 경우에는 항복하중과 그에 대한 처짐값을 나타낸다. GFRP 시험체의 처짐은 철근보강보 보다 약 4.1~6.3배 정도 크게 발생하였고, 고강도 콘크리트보다 보통강도 콘크리트를 사용한 경우에 평균 5.6% 크게 발생하였다.

RC보의 경우와는 달리 GFRP 보강보의 경우에 최대하중시의 처짐이 이론값보다 평균 31% 정도 작게 나타났다. 이는 GFRP 보의 처짐계산시 사용되는 휨강성이 최대하중시 과소평가되기 때문인 것으로 판단된다. 그리고 GFRP Bar의 보강량이 증가할수록 이론값과 실험값의 차이가 다소 줄어드는 경향을 보였다.

[Table 5] Comparison of deflection between measurement and prediction

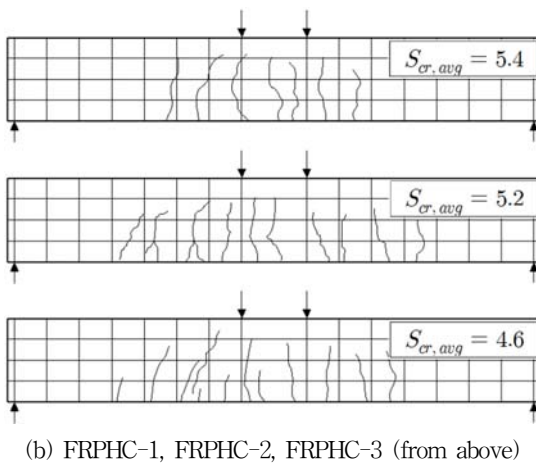
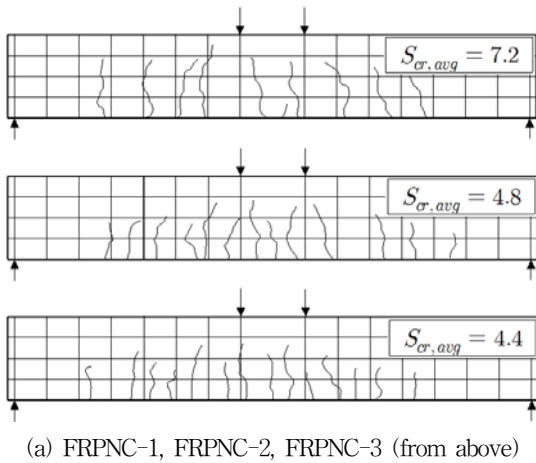
Speciman No	Deflection at max. load (mm)		
	$\delta_{max, theory}$	$\delta_{max, exp.}$	$\delta_{exp}/\delta_{theory}$
FRPNC-1	48.1	27.5	0.57
FRPNC-2	43.1	31.2	0.72
FRPNC-3	37.6	37.2	0.99
FRPHC-1	54.5	29.8	0.55
FRPHC-2	49.2	34.5	0.70
FRPHC-3	44.2	26.5	0.60
STNC-1	6.2	6.3	1.02
STNC-2	6.6	5.8	1.14
STNC-3	6.8	7.1	0.96
STHC-1	6.3	6.2	1.02
STHC-2	6.1	5.5	1.11
STHC-3	6.5	6.5	1.00

균열폭 측정은 순수휨구간에서 5kN 간격의 하중단계별로 측정하였으며 그 결과를 이론값과 비교하여 Table 6에 나타내었다. 사용하중하에서 균열폭을 산정하기 위하여 각 시험체의 최대하중 P_{max} 의 50%에서 균열폭을 이론적으로 계산하였다. GFRP 시험체의 균열은 순수 휨구간에서 최초 발생하였고 하중이 증가할수록 점차 지점부로 발전하는 형태로 진전되었다. 측정된 GFRP 보의 균열폭은 RC보에 비하여 보통콘크리트의 경우에 약1.87배, 고강도콘크리트의 경우에 약2.79배 크게 발생하였다.

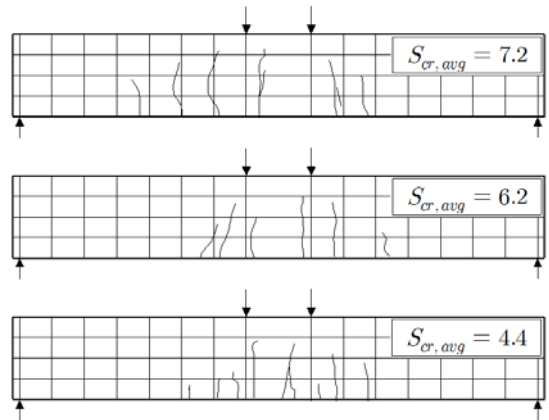
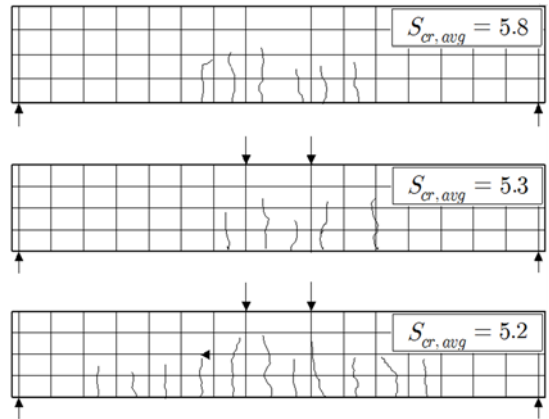
Fig. 8 및 Fig. 9에 대표적인 균열발생양상과 평균균열간격을 나타내었다. 철근 및 GFRP 보강비가 증가할수록 평균균열간격은 대체적으로 감소하는 것으로 나타났고, RC보의 경우와 달리 GFRP보의 경우 보통강도 콘크리트를 사용할 때보다 고강도 콘크리트 사용한 경우에 평균 균열간격이 약 7.3% 정도 작은 것으로 나타났다.

[Table 6] Comparison of crack width between measurement and prediction.

Specimen No	Crack width (mm)		
	$\omega_{cr, theory}$	$\omega_{cr, exp.}$	$\omega_{exp}/\omega_{theory}$
FRPNC-1	1.9	1.4	0.74
FRPNC-2	1.6	1.4	0.88
FRPNC-3	1.5	1.3	0.87
FRPHC-1	1.6	1.2	0.75
FRPHC-2	1.5	1.3	0.87
FRPHC-3	1.2	1.1	0.92
STNC-1	1.2	0.8	0.67
STNC-2	1.0	0.8	0.80
STNC-3	1.1	0.6	0.55
STHC-1	0.5	0.4	0.80
STHC-2	0.7	0.4	0.57
STHC-3	0.8	0.5	0.63



[Fig. 8] Crack patterns for beams reinforced with GFRP bar.



[Fig. 9] Crack patterns for beams reinforced with normal steel bar.

5. 결론

본 연구에서는 보강비와 콘크리트 강도를 변수로 하여 일반 RC보와 GFRP보에 대한 비교시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 보강비를 동일하게 한 경우 GFRP bar 보강보의 경우 일반 RC보의 경우에 비하여 파괴시 최대하중이 41.3~51.6% 증가하였으며, 그 정도는 고강도 콘크리트에서 더 효과적인 것으로 나타났다.
- 2) ACI Code 440에 의하여 휨강도를 계산한 결과, 예상치 못한 사인장 전단파괴가 발생한 FRPHC-2와 FRPHC-3 시편의 경우를 제외한다면 이론값보다

실험값이 약13%정도 크게 나타나 GFRP 부재를 ACI Code 440에 의하여 설계할 경우 다소 안전측의 설계로 평가됨을 알 수 있다.

- 3) GFRP 시험체의 처짐은 RC보 보다 평균 4.1~6.3배 정도 크게 발생하였고, RC보의 경우 이론값 대비 실험값이 0.96~1.14로 유사하나 GFRP보의 경우 실험처짐이 이론값보다 평균 31% 정도 작게 나타나 GFRP 보의 처짐계산시 사용되는 휨강성이 최대하중시 과소평가되기 때문인 것으로 판단된다.
- 4) 측정된 GFRP보의 균열폭은 RC보에 비하여 보통 콘크리트의 경우에 약1.87배, 고강도콘크리트의 경우에 약2.79배 크게 발생하였다. 철근 및 GFRP 보 강비가 증가할수록 평균균열간격은 대체적으로 감소하는 것으로 나타났고, RC보의 경우와 달리 GFRP보의 경우 보통강도 콘크리트를 사용할 때보다 고강도 콘크리트 사용한 경우에 평균균열간격이 약 7.3% 정도 작은 것으로 나타났다.

References

- [1] Han-Young Moon, Seoung-Soo Kim, and Hong-Sam Kim, "Investigation on Steel Corrosion in Domestic Concrete Structures", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.13, No.5, pp.58-63, 2001.
- [2] Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R. "Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with GFRP Rebars," ACI Structural Journal, Vol.93, No.1, pp. 46-55, 1996.
- [3] Masmoudi, R., Theriault, M., and Benmokrane, B, "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced Plastic Reinforcing Rods," ACI Structural Journal, Vol.95, No.6, pp.665-676, 1998.
- [4] Chae-Saeng Kim, "An Experimental Study on Structural Behavior of Concrete Members Reinforced with FRP Re-Bars", M.S. Thesis, Hanyang University, Feb. 2007.
- [5] Soon-Jong Yoon, Byung-Suk Kim, Sang-Kyoon Jeong, and Jae-Ho Jung, "Flexural Behavior of GFRP Re-Bar Bundle Reinforced Concrete Beams", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.23, No.6, pp.1067-1075, November 2003.
- [6] Jong-Sung Sim, Hong-Seob-Oh, Se-jun Oh, Won-Gi Jung, and Jun-Hyun Lim, "Study on the Deflection of Beams Reinforced with GFRP Rebar", Journal of the Korea Concrete Institute, Vol.19, No.1 pp.477-480, May

2007.

- [7] ACI Committee 440, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, U.S.A., 2000.
- [8] Design Manual No.3, Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, ISIS Canada, Sep. 2001.
- [9] Soon-Jong Yoon, Byung-Suk Kim, Sung-Kun You, Jae-Ho Jung, and Sang-Kyoon Jeong, "Experimental Investigations on the Flexural Behavior of One-way Concrete Slabs Reinforced with GFRP Re-Bar Bundle" Journal of the Korean Society for Composite Materials, Vol.16, No.3, pp.32-40, 2003.

어 석 흥(Seok-Hong Eo)

[정회원]



- 1987년 2월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학석사)
- 1991년 8월 : 한국과학기술원 토목공학과 (공학박사)
- 1992년 3월 ~ 1993년 2월 : 미국 일리노이대학교 토목공학과 Post-Doc.
- 1993년 3월 ~ 현재 : 창원대학교 토목공학과 교수

<관심분야>

콘크리트구조, 장기거동 및 성능평가

하 상 훈(Sang-Hoon Ha)

[정회원]



- 2006년 8월 : 창원대학교 일반대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2006년 10월 ~ 현재 : 한국농어촌공사 대리

<관심분야>

콘크리트구조