



## 유한요소해석에 의한 GFRP 보강 콘크리트 보의 설계인자 분석

문도영<sup>1)</sup> · 오홍섭<sup>2)\*</sup> · 안광열<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>고려대학교 토목공학과 <sup>2)</sup>진주산업대학교 토목공학과 <sup>3)</sup>남해대학 토목공학과

### Parametric Study on Design Variables of Concrete Beam Reinforced with GFRP Rebar using Finite Element Analysis

Do-Young Moon,<sup>1)</sup> Hong-Seob Oh,<sup>2)\*</sup> and Kwang-Yeol Ahn<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Civil Engineering, Korea University, Seoul 136-713, Korea

<sup>2)</sup>Dept. of Civil Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil Engineering, Namhae Collage, Namhae 668-801, Korea

**ABSTRACT** Parametric study of beams with reinforced with FRP rebar is conducted in this study. Using ABAQUS program, the finite element analysis model is set and calibrated with the experimental results which have been conducted by the authors. The employed design parameters are reinforcement ratio, elastic modulus of rebar, and concrete strength. The obtained results from FE analysis are investigated in terms of normalized beam stiffness. In particular, the effect of reinforcement ratio on the flexural stiffness is investigated with comparing with the model code specified on ACI 440. From the analysis results, the reinforcement ratio in beam is the first parameter affecting on the beam stiffness. In addition, its effect could be increased with higher concrete strength.

**Keywords :** finite element analysis, FRP rebar, flexural stiffness, reinforcement ratio

#### 1. 서 론

FRP는 중량에 비하여 높은 강도 특성과 내부식성 등의 성질로 인하여 보 구조물 또는 바닥판과 같은 구조물의 재료로서 국내외에서 연구와 실제 구조물에 대한 적용이 점차 증가하고 이루어지고 있다. 특히 FRP 바(bar)를 철근 대신 콘크리트구조물의 보강근으로 적용하는 것은 지금까지 사용되고 있는 철근콘크리트 구조물에 대한 이론과 설계개념을 약간 변용함으로써 FRP 보강 콘크리트구조물을 설계, 시공할 수 있기 때문에 다른 형태의 FRP 구조물보다 많은 연구와 경험이 축적되어 있다. 그러나 FRP 보강근의 역학적 성질이 연성적인 철근의 그것과는 다르게 취성적이며, 재료의 미세구조 역시 철근이 균질 재료인데 비하여 FRP는 비균질 재료이기 때문에 기본 구조적 개념은 철근콘크리트의 경우와 크게 다르지 않으나, FRP의 취성을 보완하기 위한 설계개념상의 연성 확보 방법, 항복강도가 없는 탄성 재료의 특성으로 인한 설계하중의 산정 등과 같이 세부적인 부분들에 대한 연구와 검증이 계속 필요한 상태이다. 기존의 연구들에서 FRP 보강근으로 보강된 보의 휨거동은 사용된 보강근의 인장강도와 보강비, 콘크리트의 압축 성능

등에 의하여 크게 지배된다고 보고되고 있다.<sup>1,2)</sup> 특히 FRP는 동일한 섬유를 사용하는 경우라도 FRP 보강근의 설계와 제작 방법에 따라 강도, 탄성계수 및 최대변형률 등이 변화하기 때문에 각 설계인자들에 대한 민감도 해석 또는 검증이 필수적이다. 그러나 이와 같은 영향인자들에 대한 분석을 위해서는 다양한 기초 실험이 필수적이다. FRP 보강 콘크리트의 경우에는 많은 연구들이 진행중에 있으며, 기존의 결과들을 표준화하여 분석하기가 쉽지 않다.

따라서 본 연구에서는 기본적인 FRP 보강 콘크리트 보의 휨실험 결과를 기준자료로 활용하여 유한요소해석에 의한 보강근의 인장강도, 보강비, 콘크리트 압축강도 변화에 대한 휨거동을 이론적으로 고찰하고자 하였다.

#### 2. 보의 실험 및 해석적 휨거동 평가

##### 2.1 FRP 보강 콘크리트 휨부재의 설계

FRP 보강 콘크리트 휨부재의 파괴모드는 철근콘크리트 휨부재의 파괴모드와 마찬가지로 FRP 바의 보강량에 따라 콘크리트의 압축파쇄 (concrete crushing), 균형파괴 (balanced failure), FRP 바의 파단 (FRP bar rupture)의 3가지로 구분된다. FRP 바의 경우 철근과는 달리 항복점을 갖지 않으므로, 균형보강비를 계산하는데 있어서 설

\*Corresponding author E-mail : opera69@chol.com

Received November 13, 2007, Revised March 11, 2008, Accepted March 11, 2008

©2008 by Korea Concrete Institute

계인장강도를 사용하며, 균형보강비는 식 (1)과 같다.

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

여기서  $\rho_{fb}$ 는 균형보강비,  $f_{ck}$ 는 콘크리트  $f_{fu}$  압축강도,  $f_{fu}$ 는 FRP 보강근의 극한강도,  $E_f$ 는 FRP 보강근의 탄성계수,  $\varepsilon_{cu}$ 는 FRP 보강근의 극한변형률,  $\beta_1$ 은 콘크리트의 설계기준강도에 따라 결정되는 상수로서 철근콘크리트 휨부재에 적용하는 값과 같다.

FRP 바의 보강비 ( $\rho_f = A_f / bd$ )가 균형보강비 ( $\rho_{fb}$ )보다 큰 경우 (파괴모드 : 콘크리트의 압축파괴)에는 직사각형 단면보의 공칭휨강도 ( $M_n$ )는 단면력의 평형조건으로부터 식 (2)와 같이 유도된다.

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

여기서  $d$ 는 유효깊이이며, 콘크리트의 응력사각형의 깊이 ( $a$ )와 FRP 바의 응력 ( $f_f$ )은 각각 다음과 같다.

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

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

식 (3)의  $a$ 에 식 (4)를 대입하고 다시 정리하면, 과보강상태 (over reinforced condition)에서의 FRP 바의 응력 ( $f_f$ )은 다음과 같이 유도된다.

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

FRP 바의 보강비가 균형보강비보다 작은 경우 (파괴모드 : FRP 바의 파단)에는 콘크리트의 응력분포와 압축축 연단에서의 변형률을 정확하게 파악하기 어렵기 때문에 이러한 조건을 갖는 FRP 바 보강 콘크리트보의 공칭휨 강도를 정확하게 계산하기는 어렵다. 철근콘크리트보에서 철근이 먼저 파괴될 때의 공칭휨강도를 계산하는 과정과 유사하게 계산한다면, 식 (3), (10)과 같으며, 이 값은 실제 콘크리트의 응력분포를 고려할 때보다는 안전측이다.

$$M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{a}{2} \right) \quad (6)$$

식 (6)에서  $a$ 는 식 (3)에서  $f_f$  대신  $f_{fu}$ 를 대입하여 계산한다.

## 2.2 해석 대상 시험체의 실험 결과

본 연구에서는 GFRP로 보강된 콘크리트 보의 설계인자에 따른 거동 특성을 해석적 방법으로 평가하기 위하여 유한요소해석을 수행하였다. 본 연구에서 변수해석을 위하여 적용된 유한요소 모델의 적정성 검토를 위하여 본 논문의 저자들은 2.1절의 설계 방법에 의하여 실험체를 설계하였으며, 수행한 실험 결과 중 일부 실험체의 결과를 본 절에 제시하였다.

보 제작에 사용된 콘크리트는 28일 압축강도 30 MPa의 레미콘 제품을 사용하였으며, 항복강도 40 MPa의 D10 철근을 압축 및 전단철근으로 사용하였다. 인장성능의 보강을 위하여 적용된 FRP 보강근은 비닐에스터와 유리섬유 (glass fiber)를 압출공법으로 생산한 국내 D사의 제품을 사용하였다. 유리섬유의 체적비 ( $V_f$ )는 70%이며, 제조사에서 제시한 극한강도 및 극한변형률은 Table 1에 정리하였다. 또한 실험체의 상세는 Fig. 1과 Table 2에 정리하였다. 사용된 보강근의 직경은 10 mm이며, 2개의 GFRP 보강근의 보강된 시험체는 G2-10, 4개의 보강근으로 2열 보강된 시험체는 G4-10으로 명명하였다.

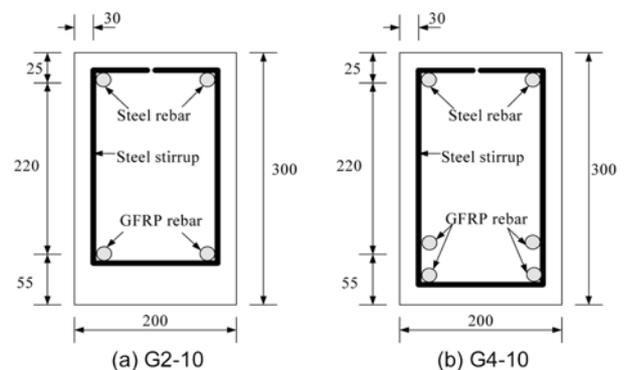
실험체 단면의 균형보강비는 0.00169로서 두 실험체 모두 과보강 상태이며, 각각 균형보강비의 1.84와 3.67배로서 콘크리트 압축파쇄가 발생하도록 설계되었다.

실험 결과, G2-10 시험체의 경우는 과보강보임에도 FRP 보강근 외부 섬유와 콘크리트가 같이 FRP pull-out되는 형태로 파괴되었으며, G4-10의 경우는 압축파괴되었다. 두 실험체의 균열모멘트는 보강량에 관계없이 거의 동일한 것으로 나타났으며, 이는 철근콘크리트보의 경우와 같이 균열휨강도의 경우는 콘크리트 휨강도에 지배를 받는다는 사실을 나타내는 것이다.

Table 3에는 실험 결과와 ACI 440의 제안식에 의한 해석 결과는 정리하였다. GFRP 보강근의 뿔힘 파괴가 발

**Table 1** Material properties of steel and FRP rebar

	Elastic modulus (GPa)	Strength (MPa)		Strain (%)	
		Yield	Ultimate	Yield	Ultimate
Steel rebar	200	400	600	0.2	2.0
GFRP rebar	35	-	1,107	-	3.1



**Fig. 1** Test specimens cross-section

**Table 2** Detail of specimens

	Concrete	Reinforcing bar		Reinforcement ratio
		Compressive steel rebar	Tensile GFRP rebar	
G2-10	Width : 200 mm Effective depth : 245 mm Clear span : 2000 mm	D10 : 2@140 mm ( $A_s = 157 \text{ mm}^2$ )	D10 : 2@140 mm ( $A_{frp} = 157 \text{ mm}^2$ )	0.0031
G4-10	Width : 200 mm Effective depth : 245 mm Clear span : 2000 mm	D10 : 2@140 mm ( $A_s = 157 \text{ mm}^2$ )	D10 : 2 layer 2@140 mm ( $A_{frp} = 314 \text{ mm}^2$ )	0.0062

**Table 3** Test results

	Ultimate strength (kN)			Deflection at peak point (mm)			Failure pattern
	Exp.	Theo.	E/T	Exp.	Theo.	E/T	
G2-10	45.0	66.4	0.68	16.5	24.1	0.68	F-P <sup>2</sup>
G4-10	106.8	89.8	1.19	23.3	30.1	0.78	F-C <sup>1</sup>

1; concrete crushing failure mode, 2; FRP pull-out.

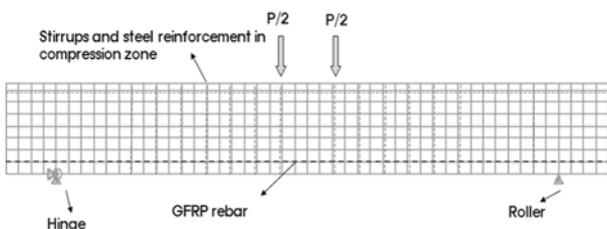
생한 G2010의 경우는 계산치보다 실험치가 작게 나타났으나, G410의 경우는 실험치보다 상회하는 것으로 나타났으며, 처짐의 경우는 두 경우 모두 실험값이 이론치보다 작은 것으로 계산되었다.

**2.3 적용된 유한요소모델**

유한요소해석은 범용 구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하였으며,<sup>3)</sup> 적용된 유한요소모델은 Fig. 2와 같다. 순 시간내 전단 및 압축철근과 인장축에 GFRP 보강근의 모델링되었다. 모델의 외부구속조건은 한편에는 힌지 구속, 다른 한편에는 롤러구속을 적용하였으며, 하중은 하중제어개념으로 해당 절점에 수직방향의 집중하중을 적용하였다.

본 해석에서 사용된 균열모델은 해석시간 및 결과에 대한 제약이 상대적으로 적은 smeared crack model을 사용하였으며, 콘크리트의 비선형 재료 모델은 콘크리트의 압축응력-변형률의 변화를 적절히 표현할 수 있는 Thorenfeldt et. al이 제안한 압축응력-변형률선도 (식 (7) 참조)를 이용하였다.<sup>4)</sup>

$$\frac{f_c}{f_c'} = \frac{n \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \right)^n}{n - 1 + \left( \frac{\epsilon_c}{\epsilon_c'} \right)^{n \cdot k}} \quad (7)$$



**Fig. 2** FE model

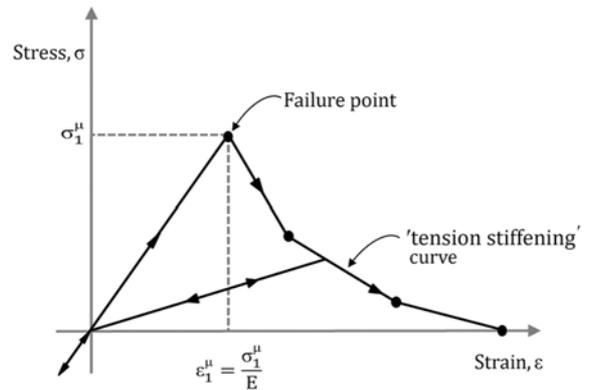
여기서  $f_c'$ 는 콘크리트의 최대압축응력,  $\epsilon_c'$ 은  $f_c'$ 가  $f_c'$ 에 도달할 때의 변형률 (0.00213 사용), n은 곡선적합계수 (3.20 사용), k는 최고점 후의 응력 감소계수 (1.34 사용) 한편, 콘크리트의 인장응력-변형률 관계는 Scanlon 및 Scordelis 등이 제안한 Fig. 3과 같은 응력-변형률 선도를 적용하였다.<sup>5)</sup>

**2.3.1 압축 및 전단철근**

압축 및 전단철근의 경우 2중 선형 모델을 채택하였다. 철근의 항복시까지 선형적인 거동을 나타내다가 항복 후 경화현상에 의하여 큰 변형률의 증가에 반해 응력의 증가는 크게 감소된다. 따라서 철근의 재료거동은 Fig. 4와 같이 2중 선형 곡선으로 모델링할 수 있으며, 항복시의 강도는 400 MPa로 고려하였고, 변형률경화구간에서의 탄성계수 ( $E_p$ )는 식 (8)에 의하여 계산되었다.

$$E_p = \frac{f_{0.005} - f_y}{0.005 - \epsilon_h} \quad (8)$$

여기서  $f_{0.005}$ 는 철근의 변형강화구역 내 0.005 변형률에서의 응력을 의미하며,  $\epsilon_h$ 는 변형강화의 시작경화구간이



**Fig. 3** Tensile stress-strain relationship for concrete

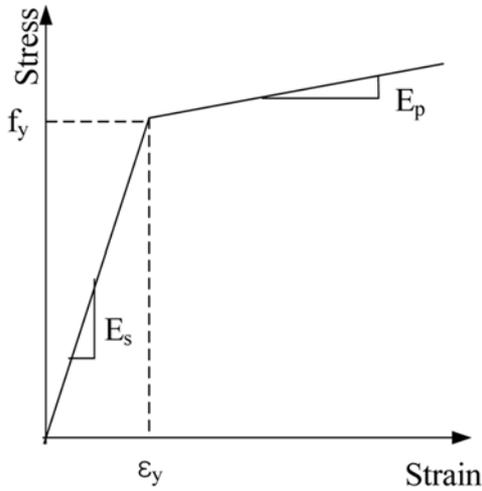


Fig. 4 Stress-strain relationship for steel rebar

시작되는 점에서의 변형률을 의미한다.

### 2.3.2 FRP 보강근

FRP는 독립적인 거동측면에서는 파괴시까지 선형거동을 하며, 파괴시 급작스럽게 파단되는 전형적인 취성재료이다. 따라서 FRP 보강근의 재료거동은 파괴시까지 선형으로 모사하였다.

## 2.4 유한요소해석 모델 검증

해석 결과는 하중-중양절점의 처짐 곡선, 전체의 응력도, 보의 중앙단면의 응력 그래프와 보의 압괴 파괴시 GFRP 보강근의 인장응력을 검토하였으며, 실험 결과와 비교·고찰하였다.

### 2.4.1 하중-처짐곡선 비교 및 고찰

Figs. 5와 6은 각각 G2-10와 G4-10 시험체의 실험에 의한 하중-중양절점 곡선과 유한요소해석을 통하여 획득한 곡선을 비교하여 나타내고 있다.

G2-10 해석 그래프는 실험 그래프에 비하여 훨씬 큰 강성을 나타내고 있으며, 초기균열하중도 큰 것으로 나타났다. 이와 같은 휨거동의 큰 차이는 실험 결과에서 언급한 것과 같이 시험체의 보강근이 뽑히면서 파괴되는 pull-out 파괴가 발생되었기 때문인 것으로 판단된다. G4-10 해석 그래프의 경우에는 실험 그래프와 전반적인 거동이 매우 유사하게 나타났다. 50 kN 이하에서 해석 그래프의 강성이 다소 큰 것으로 나타났으나, 차이는 크지 않다. 그래프에 보 압축단의 유한요소해석 결과로부터 응력이 30 MPa에 도달하는 하중값을 선을 표시하였으며, 이에 의하면 실제 본 시험체의 파괴가 콘크리트의 압괴에 의한 파괴임을 확인할 수 있다. 본 결과로부터 본 논문에 제시된 비선형 해석모델이 FRP로 보강된 보의 실제적인 거동을 거의 정확하게 모사할 수 있는 것으로 판단된다. 또한 본 비선형 해석모델을 통한 변수해석시 결과의 신뢰성을 확보할 수 있는 것으로 판단된다.

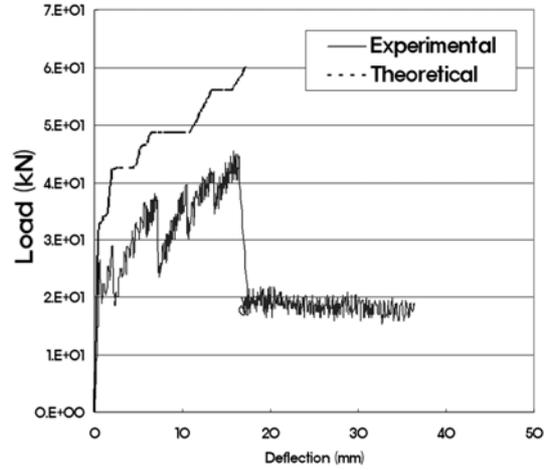


Fig. 5 Loads-deflection relationship of G2-10 specimen

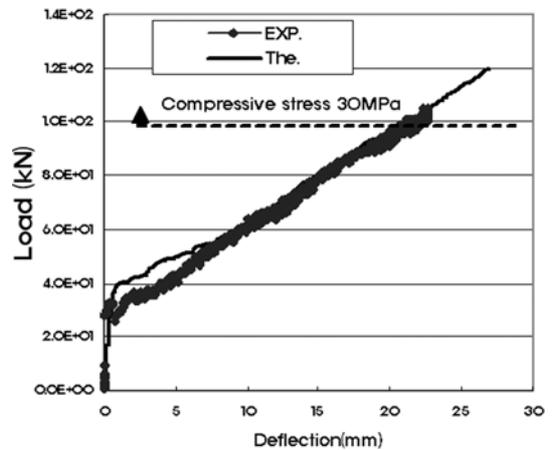


Fig. 6 Loads-deflection relationship of G4-10 specimen

### 2.4.2 콘크리트 응력 고찰

Fig. 7은 G2-10의 해석 결과 도출된 각 작용하중에 따른 중방향 응력도를 나타내고 있다. 20 kN 작용시의 응력이 약 2.1 MPa로 거의 직접인장강도 (압축강도의 10%)에 근접한 것을 볼 수 있다. 또한 하중이 증가하면서 사

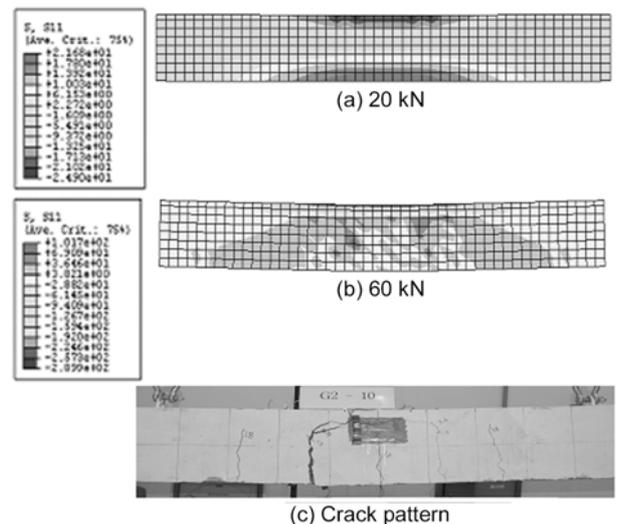
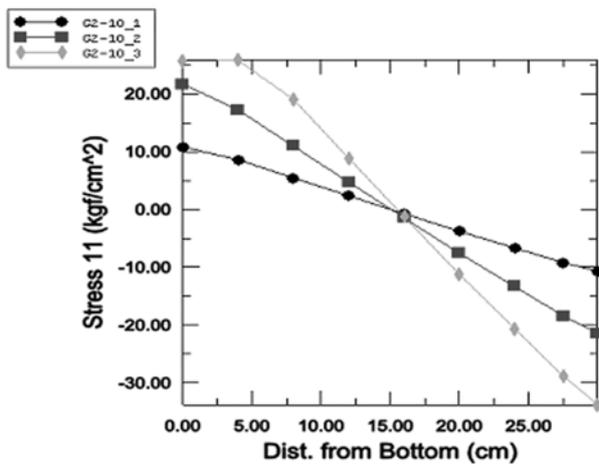


Fig. 7 Stress contour (S11) and crack pattern of G2-10

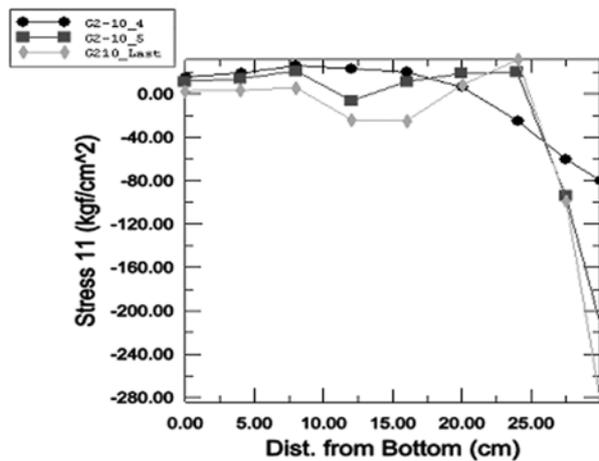
용된 콘크리트의 직접인장강도를 초과하는 인장응력이 보에 전반적으로 분포하는 것을 볼 수 있다. 60 kN의 하중 작용시에는 압축단의 콘크리트 응력이 28 MPa를 초과하는 것으로 나타났으며, 중립축이 상단으로부터 50 mm 이내에 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 중앙단면의 하단으로부터 거리에 따른 종방향 응력의 변화를 그래프로 나타낸 것이다. 그래프에서 시험체명 뒤에 제시된 숫자는 보에 재하된 하중수준을 나타내는 것이며, Last는 최대하중을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 낮은 하중 단계에서는 상단과 하단의 인장 및 압축응력이 동일한 것을 알 수 있으며, 중립축도 뚜렷한 상향이동을 보이지 않고 150 mm (단면 도심)에 위치한 것을 확인할 수 있다. 반면, 높은 하중 단계에서는 인장측 콘크리트의 균열이 전반적으로 발생하면서 중립축이 급격하게 상향 이동하여 하단으로부터 240 mm 부근에 위치하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 9는 G4-10의 각 하중 단계에 따른 응력도를, Fig. 10은 중앙단면의 하단으로부터 거리에 따른 종방향 응력의 변화를 그래프로 나타내고 있다. 전술한 바와 같이 G2-10 시험체의 경우와 유사한 결과를 확인할 수 있다.



(a) Initial



(b) Peak

Fig. 8 Concrete stress distribution of G2-10 specimen at mid-section

### 2.4.3 FRP 보강근의 응력 및 변형을 검토

상기 G2-10 및 G4-10의 하중-처짐 그래프에서 최대하중 도달시의 GFRP 보강근의 변형률 및 축방향응력을 Table 4에 나타내었다.

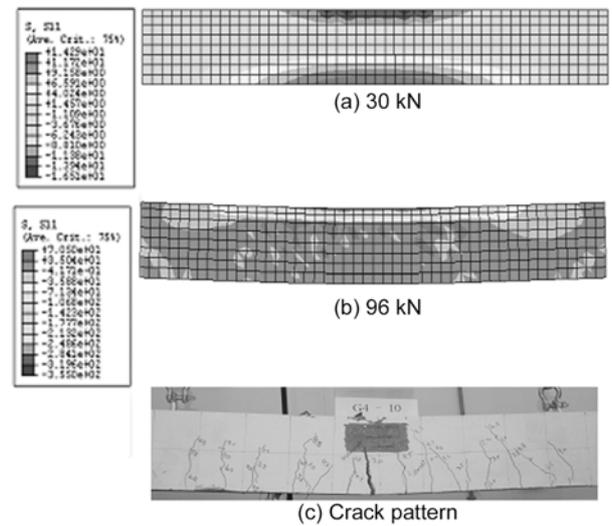
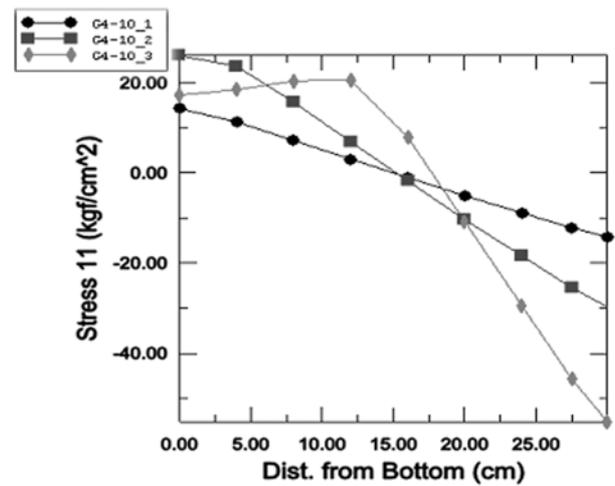
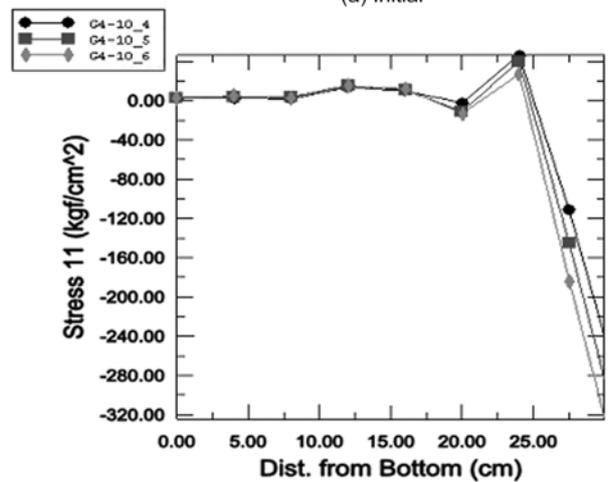


Fig. 9 Stress contour (S11) and crack pattern of G4-10



(a) Initial



(b) Peak

Fig. 10 Concrete stress distribution of G4-10 specimen at mid-section

**Table 4** Stress and strain of GFRP reinforcing bar at peak loads

	Peak loads (kN)	Tensile stress (MPa)	Tensile strain (%)	Remarks
G2-10	60	520	1.4	Design tensile strength according to ACI code: 775 MPa
G4-10	94	433	1.2	

Table 4의 결과를 보면, 최대하중, 즉 보의 콘크리트 압축단의 압괴파괴를 일으키는 시점에서 보강근의 응력은 인장강도 (1,107 MPa)에 40%에서 49% 정도의 응력을 나타내고 있다. ACI 440위원회<sup>6,7)</sup>의 보고에 의하면, 설계시 GFRP 보강근의 설계강도는 환경인자와 제작의 불확실성 등을 고려하여 외부에 노출된 콘크리트에 사용되는 경우 0.7의 강도감소계수를 고려하여 산정하도록 하고 있다. 따라서 본 해석 결과 극한거동시 보강근의 인장응력이 보강근의 인장강도에 50% 정도 발생하는 것으로 나타났으므로 ACI 설계기준에 의한 설계시 충분한 안전의 확보가 가능한 것으로 판단된다.

### 3. 변수해석

본 장에서는 앞에서 제시된 비선형 해석모델을 이용하여 주요설계변수에 대한 해석을 수행하였다. ACI 440.1R-03에 따르면, FRP로 보강된 보의 휨설계는 콘크리트 압축단의 압괴파괴를 지향토록 설계됨으로 FRP 보강근의 축강성 및 보강비에 의하여 크게 좌우된다. 또한 일반적으로 과보강 설계됨으로 콘크리트의 압축강도에 대한 영향도 크다. 따라서 본 변수해석에서 선정된 주요 설계변수는 보강비, 보강근의 축방향 탄성계수 및 콘크리트의 압축강도이다.

변수해석 결과로부터 사용하중 상태에서의 강성 변화를 고찰하였으며, 식 (2)의 ACI 440의 모델식과 비교하였다.

#### 3.1 보강비 (reinforcement ratio)의 영향

ACI 440.1R-03에 따르면, 식 (1)의 평형보강비의 1.4배 이상의 보강비는 완전한 콘크리트 압괴파괴 모드에 의하여 파괴되고, 평형보강비 이하로 보강된 경우 FRP 보강근의 파단에 의한 보가 파괴된다.

상기한 바와 같이 FRP로 보강된 보의 파괴거동이 보강비에 따라 결정될 뿐 아니라 Toutanji<sup>8)</sup> 등에 따르면 보강비에 따라 보의 유효강성이 크게 영향을 받는다. ACI 440.1R-06에 의하면, 기존의 유효강성 ( $I_e$ ) 식에서 (식 (9) 참조) 보강근의 부착에 의한 영향인자를 제거하고, 식 (1)과 같이 평형보강비에 대한 실제보강비의 비에 대한 새로운 계수를 사용하는 것을 볼 수 있다. 즉 FRP 보강된 보의 경우 부착에 의한 영향 보다는 보강비에 의한 영향이 더욱 크다는 것을 의미하며, 최근에 개발되는 FRP 보강근의 부착성능이 크게 향상되고 있음을 의미하는 것으로 판단된다.

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

$$\beta_d = \alpha_b \left[ \frac{E_f}{E_s} + 1 \right] \tag{9}$$

여기서  $\alpha_b$ 는 부착에 의한 영향계수로써 철근과 동등한 부착성능을 가진 경우 0.5를 사용하도록하고 있다. 그러나 새롭게 제시된 모델은 이를 식 (10)과 같이 수정 제안하고 있다.

$$\beta_d = \frac{1}{5} \left[ \frac{\rho_f}{\rho_{fb}} \right] \leq 1 \tag{10}$$

따라서 본 논문에서는 다음의 Table 5와 같이 평형보강비인 경우와 다양한 과보강비를 선택하여 비선형해석을 수행하고 결과를 ACI 440의 최근 유효강성모델과 비교하였다.

Figs. 11~14에는 보강비가 보의 하중-처짐곡선에 미치는 영향을 나타내고 있다. 보강근의 보강비가 증가할수록 보의 휨강성이 크게 증가하는 것을 볼 수 있다. 특히 ACI 440의 유효강성 모델식에 의한 예측 결과를 해석 결과와 비교하여 나타내었다.

평형보강 상태의 보 (RRB)의 경우에는 비선형해석 결과와 ACI의 모델식의 결과가 전반적인 거동은 유사한 것으로 판단되지만, 초기항복강도에서 큰 차이를 나타내고 있다. 즉 ACI 모델이 해석 결과보다 보강된 보의 처짐을 과대평가하는 것으로 나타났다. 이와 같은 경향은 RR1.5에서도 나타났다.

**Table 5** Various FRP reinforcement ratios for parametric analysis

	Reinforcing detail	Reinforcement ratio ( $\rho_f$ )	Balanced reinforcement ratio ( $\rho_{fb}$ )	$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}$	Remarks
RRB	6 mm × 1	0.0019	0.0019	1.00	-
	10 mm × 1			1.58	G2-10
RR1.5	10 mm × 2	0.0030		3.16	G4-10
RR3	10 mm × 4	0.0060		5.00	-
RR5	10 mm × 8	0.00950			

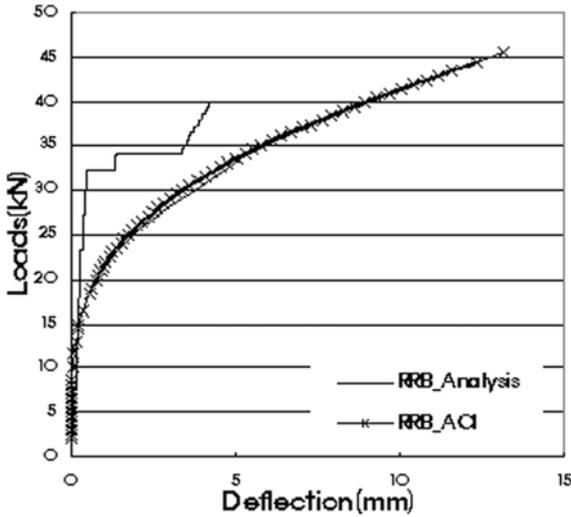


Fig. 11 Loads-deflection relationship of RB

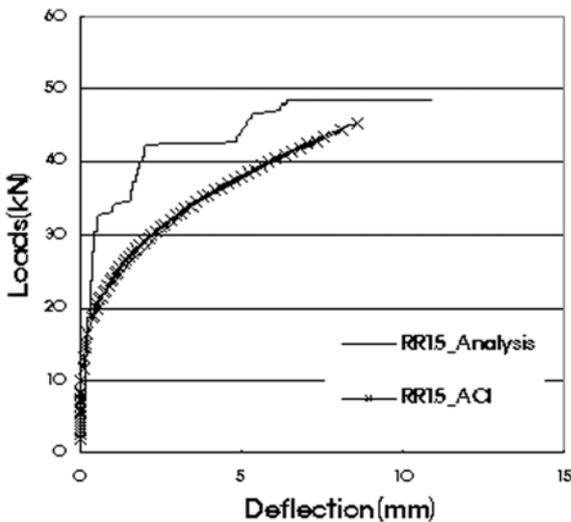


Fig. 12 Loads-deflection relationship of RR1.5

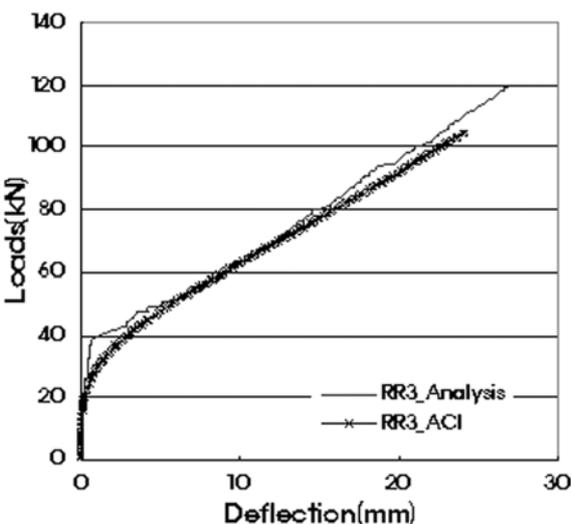


Fig. 13 Loads-deflection relationship of RR3

반면, 과대보강된 보, 즉 보강비가 큰 경우에는 ACI 모델에 의한 해석 결과와 비선형해석 모델이 매우 유사한

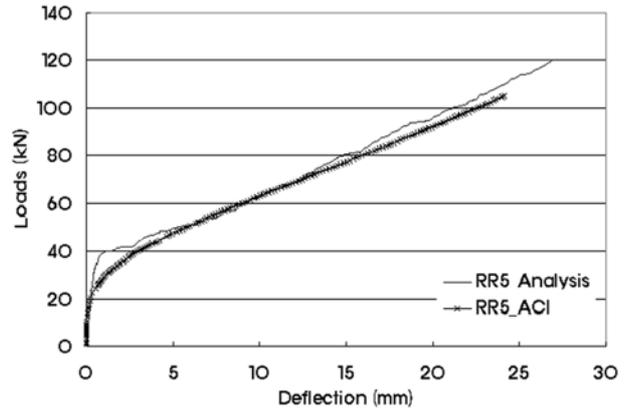


Fig. 14 Loads-deflection relationship of RR5

결과를 나타내는 것을 알 수 있다. 결과적으로 평형보강비의 1.5배를 초과하는 보에서는 ACI 모델식이 보의 휨 거동을 거의 정확하게 모사하고 있음을 알 수 있다. 반면, 저보강 상태의 보에서는 ACI 모델식이 보의 처짐을 과대평가하는 문제가 있는 것으로 판단된다. 이는 과보강 상태의 보에서는 보의 FRP 보강근이 휨거동 지배하지만, 저보강 상태의 보에서는 콘크리트의 물성 및 재료 거동이 보의 휨거동을 지배하기 때문으로 판단되며, 따라서 본 보강근으로 보강된 보의 설계시에는 보강비가 1.5% 이상의 보에 대해서는 ACI 모델식에 의한 평가가 가능한 것으로 판단된다.

한편, 평형보강비를 갖는 보나, 저보강된 보의 경우에는 ACI 모델식에 의한 처짐 평가는 다소 문제가 있으며, 이를 제안하기 위해서는 많은 실험적 고찰이 필요한 것으로 판단된다.

보강비가 보의 강성에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 보의 휨 강성을 하중-처짐곡선으로부터 계산하였다. 보의 휨 강성은 보의 초기 항복하중에서부터 사용하중까지의 곡선 기울기를 통해 계산하였으며, 사용하중은 극한 하중의 60%로 결정하였다. 강성은 다음의 식 (11)에 의하여 결정하였다.

$$I = \frac{P_s - P_y}{\delta_s - \delta_y} \quad (11)$$

여기서  $P_s$ ,  $P_y$ 는 사용하중 및 보의 초기항복시의 재하하중,  $\delta_s$ ,  $\delta_y$ 는 사용하중 및 보의 초기항복시의 처짐값을 의미한다.

보강비의 변화에 따른 강성의 변화를 고찰하기 위하여 각 해석 경우의 강성 결과를 각 보강비로 나누어 Fig. 15에 나타내었다. 즉 보강비에 대하여 정규화된 보의 강성을 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이 평형보강비의 1.5배의 보강비를 갖는 RR1.5의 강성은 평형 보강비를 갖는 RR1 보다 강성이 증가한 것을 알 수 있으나, 3배 이상인 경우 즉 RR3, RR5의 경우에는 오히려 강성의 증가가 크지 않은 것을 알 수 있다. 즉 이와 같은 결과로부터 보강비를 과도한 증가는 1.5배까지는 효과적이지만,

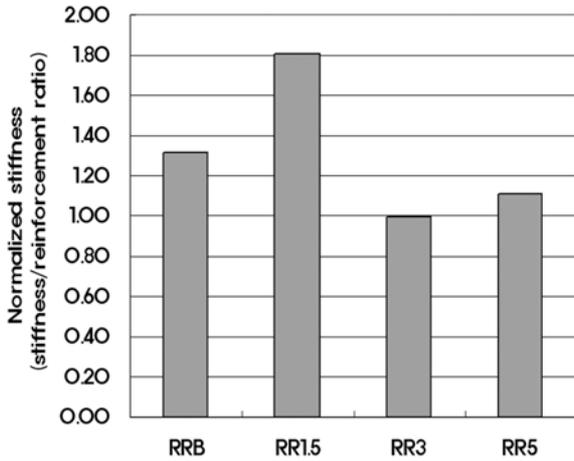


Fig. 15 Normalized flexural stiffness by Reinforcement ratio

그 이상에서는 효과적이지 않음을 알 수 있다. 따라서 FRP로 보강된 보의 설계시 적절한 보강비는 평형보강비의 1.5배 수준인 것으로 나타났다.

### 3.2 FRP 보강근의 탄성계수 영향

FRP 보강근의 탄성계수의 영향을 고찰하기 위하여 보강근의 탄성계수를 Table 4와 같이 변화시켜가면서 해석을 수행하였다. 본 해석에서 고려된 탄성계수는 제조사에서 제시하고 있는 CFRP 및 hybrid FRP의 탄성계수를 고려하였다. 또한 본 해석에서 고려된 보의 단면 및 상세는 Fig. 16과 같다. Table 6에 제시된 EH, EG 및 EC는 각각 hybrid, GFRP 및 CFRP의 탄성계수를 의미한다.

또한 표에 제시된 철근의 탄성계수와는 비는 각 보강근의 탄성계수를 철근의 탄성계수인 200 GPa로 나눈값으로 탄성계수의 영향을 정량적으로 고찰하기 위하여 정규화를 위한 계수로써 사용되었다.

Fig. 17은 상기 EH, EG 및 EC의 변수해석 결과를 하중-처짐곡선으로 나타내고 있다. 인장 보강근의 탄성계수가 증가하면, 보의 강성도 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 이와 같은 경향은 실험결과에서도 볼 수 있다.

또한 탄성계수의 변화가 보의 휨 강성에 미치는 영향을 분석하기 위하여 보의 휨 강성을 평가하였다. 보의

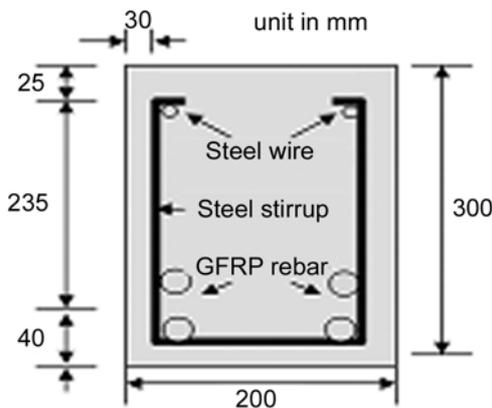


Fig. 16 Beam cross section for analysis

Table 6 Considered elastic modulus for FE analysis

	Ultimate strength (MPa)	Ultimate strain (%)	Elastic modulus (GPa)	Elastic modulus ratio with steel
EH	670	3.507	19	0.095
EG	1,107	3.12%	35	0.175
EC	1,857	1.79%	103	0.515

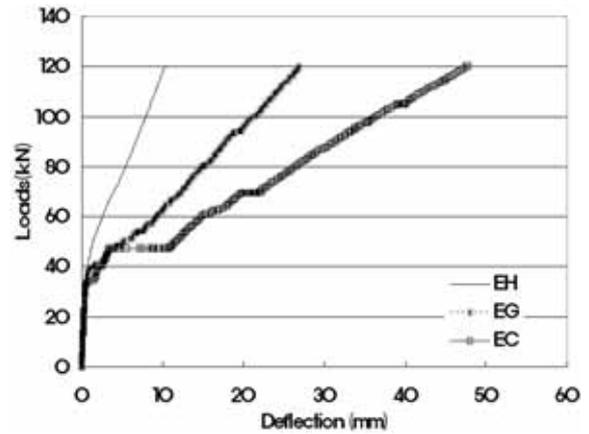


Fig. 17 Loads-deflection relationships of beams with various elastic modulus

휨 강성은 전장의 보강비의 영향 검토에서 사용된 방법과 동일한 방법에 의하여 수행하였다. 또한 상대적인 비교를 위하여 각 보강재의 탄성계수를 철근의 탄성계수로 나눈값으로 강성 결과를 정규화하여 사용하였다. 철근과의 탄성계수비로 정규화된 결과는 Fig. 18과 같다.

Fig. 18로부터 알 수 있듯이 보강근의 강성이 증가하면, 보의 휨 강성은 분명히 증가하지만, 그 증가의 정도는 탄성계수의 증가보다는 적은 것으로 판단된다.

### 3.3 콘크리트 압축강도의 영향

본 장에서는 콘크리트의 압축강도가 FRP 보강된 보의 휨 거동에 미치는 영향을 검토하기 위하여 콘크리트 압축강도를 변수로 해석을 수행하였다.

본 해석에서 고려된 콘크리트 강도는 일반적인 30 MPa

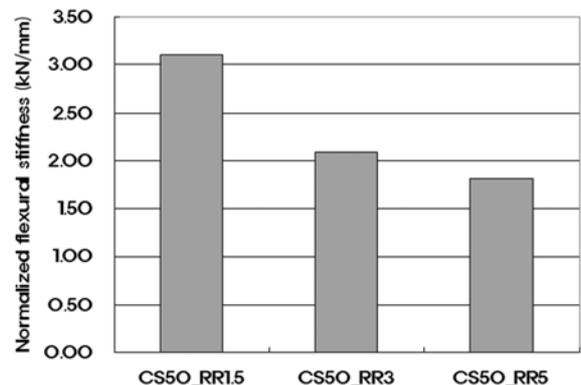


Fig. 18 Normalized flexural stiffness of beams with various elastic modulus

의 강도와 PSC 콘크리트에 많이 사용되는 40 MPa 및 50 MPa이다. 본 해석 모델에서 사용된 콘크리트의 재료거동모델은 전술한 바와 같이 일축압축강도-변형률의 관계, 균열 후 거동모델로써, 인장강화모델 (tension stiffening), 파괴면으로 정의된다.

본 변수해석에서는 콘크리트의 일축압축강도 변형률 모델만을 대상으로 해석을 수행하였다 (식 (7) 참조). 본래 인장강화 모델 및 파괴면은 콘크리트의 압축강도에 의하여 크게 의존하는 매우 민감한 변수이며, 고강도콘크리트의 경우 인장강화 모델 및 파괴면의 설정하기 위한 연구는 아직 진행중에 있다. 따라서 본 해석에서는 해석의 목적에 따라 변수를 단순화 시키고, 영향을 명확하게 하기 위하여 일축압축강도와 변형률만을 각 콘크리트에 강도에 맞게 수정하여 해석을 수행하였다. 또한 탄성구간 내에서 콘크리트의 탄성계수도 동일한 식을 사용하여 각 콘크리트의 압축강도에 따라 수정하여 고려하였다. 본 해석에서 사용된 변수는 다음의 Table 7과 같다. 또한 본 해석에서 사용된 보의 단면 및 보강근의 상세는 G4-10과 동일하다.

Fig. 19는 콘크리트 압축강도에 따른 GFRP로 보강된 보의 하중-처짐곡선을 나타내고 있다. 콘크리트의 압축강도가 증가할 때, 항복강도는 커지나, 강성의 증가는 거의 없는 것을 볼 수 있다. 이는 예상한바와 같이 보강재가 보의 전체거동에 미치는 영향이 크지 때문이다.

한편, 콘크리트의 강도변화는 타 설계변수의 영향에 간접적인 영향을 미칠 수 있으므로, 본 논문에서는 고강도 콘크리트 (강도 50 MPa, CS50)를 적용한 상태에서 보강비의 증가에 따른 영향과 보강근의 탄성계수의 변화에 따른 휨강성의 영향을 고찰하였다. 본 변수해석시 단면 및 기타 조건은 동일하며, 보강비의 경우 RR1.5, RR3, RR5의 경우에 대하여, 보강근의 탄성계수의 경우에는EH, EG, EC에 대하여 해석을 수행하였다 (Tables 6 및 7 참조). 본 변수해석시 적용된 조건은 Table 8에 제시하였다.

Fig. 20은 압축강도 50 MPa의 콘크리트가 사용된 보에 FRP 보강근의 보강비를 평형보강비에 대한 비로 정규화시킨 강성을 나타내고 있다. 본 그래프에서도 보강비의 증가에도 불구하고, 강성의 증가는 크지 않은 것을 확인할 수 있다. 그러나 CS50\_RR1.5의 정규화된 강성치가 3.0인데 반해 30 MPa의 콘크리트를 사용한 경우인 RR1.5의 강성치는 1.8이다 (Fig. 15 참조). 따라서 본 해석 결과로부터 고강도콘크리트를 사용하는 경우 보강근의 보강비에 의한 효과가 더 큼을 확인할 수 있다. 이는 보강

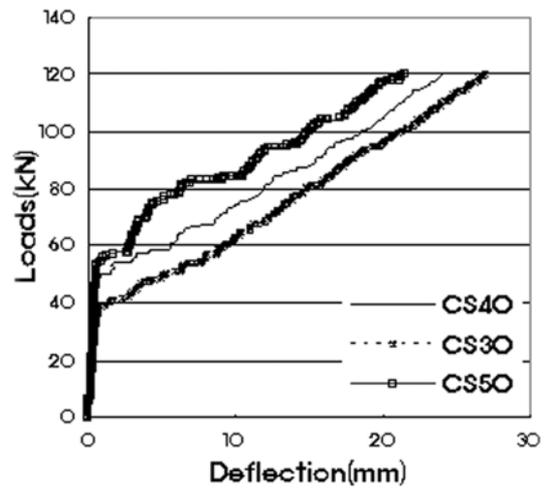


Table 19 Loads-deflection relationships due to the the compressive strength

Table 8 Parameter for the verification on the effect of reinforcement ratio and elastic modulus of FRP rebar on CS50

	Compressive strength (MPa)	Reinforcement ratio		Elastic modulus (GPa)
		Ratio	Balanced ratio	
CS50_RR1.5	50	0.0045	0.003	-
CS50_RR3	50	0.009		-
CS50_RR5	50	0.015		-
CS50_EH	50	0.0045	-	19
CS50_EG	50	0.0045	-	35
CS50_EC	50	0.0045	-	103

근의 성능이 보의 거동을 좌우함으로, 압축측에 사용하는 콘크리트의 강도를 증가시킨다면, 보강근의 효과를 극대화 시킬 수 있음을 의미한다.

본 변수해석 결과에 의하면, 설계시 보강근의 보강비는 평형보강비의 1.5배 정도로 설계하는 것이 사용하중 상태에서 강성의 확보에 가장 유리하며, 파괴모드를 변

Table 7 Considered concrete compressive strength and elastic modulus for FE analysis

	Compressive strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Remarks
CS30	30	25.9	G4-10
CS40	40	30.0	
CS50	50	33.5	

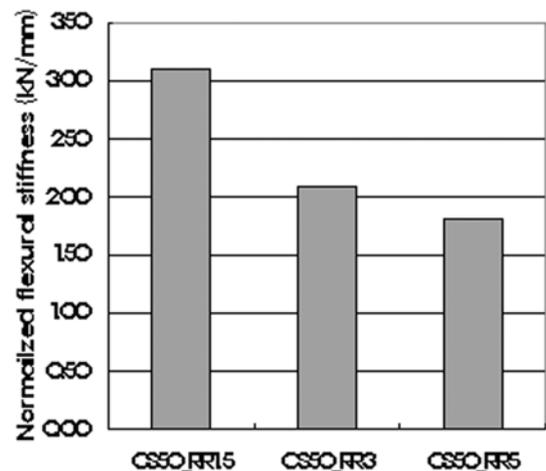


Fig. 20 Normalized flexural stiffness variation on the various reinforcement ratio

화시키지 않는 한계내에서 가능한 고강도의 콘크리트를 사용하는 것이 보강근의 고인장성능의 효율을 극대화할 수 있는 방안인 것으로 판단된다.

Fig. 21은 압축강도 50 MPa의 콘크리트가 사용된 보에 FRP 보강근 탄성계수를 변수로 해석한 결과이며, 강성 계산 후 정량적인 비교를 위하여 각 보강근의 탄성계수와 철근과의 탄성계수 비로 강성을 나누어 정규화한 결과를 나타내고 있다. 정규화된 강성 그래프에는 탄성계수가 크게 증가함에도 불구하고, 정규화된 강성은 오히려 유리섬유의 탄성계수인 35 GPa인 경우가 더욱 큰 것으로 나타났다. 또한 강성의 범위도 본 해석에서는 14 kN/mm ~18 kN/mm인 것으로 나타났다. 따라서 콘크리트의 압축강도가 증가하여도 보강근의 탄성계수가 보의 휨강성에 미치는 영향은 보통강도의 콘크리트를 사용한 경우와 유사한 것으로 나타났다.

#### 4. 고찰

본 장에서는 FRP로 보강된 보의 휨거동 특성을 해석적으로 고찰하기 위하여 비선형해석 모델을 수립하고, 실험 결과를 통해 검증하였다. 또한 본 비선형해석 모델을 이용하여 FRP 보강근의 보강비 및 탄성계수, 콘크리트의 압축강도 등을 주된 설계변수로 선정하여 다양한 변수값에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과 도출된 하중-처짐곡선으로부터 각 변수가 보의 휨 강성에 미치는 영향을 고찰하였다. 특히 보강비의 영향은 최근의 ACI440의 유효강성모델을 통한 처짐 결과와 비교·고찰하였다. 본 변수해석을 통해 도출된 결론은 다음과 같다.

- 1) 변수해석을 위한 비선형유한요소 모델을 수립하였으며, G2-10 및 G4-10 실험체의 실험 결과를 토대로 검증하였다. 수립된 비선형유한요소해석 모델은 FRP로 보강된 콘크리트보의 압축축 콘크리트 압괴 및 인장축 콘크리트 균열 등을 적절하게 모사할 수 있는 것으로 나타났다. 특히 보의 항복 및 파괴시 보강근의 인장응력을 파악하는데 유용한 것으로 판단되며, FRP로 보강된 보의 설계 및 해석시 휨거동

고찰을 위하여 활용될 수 있다.

- 2) FRP 인장보강근의 보강비가 보의 휨강성에 미치는 영향을 본 해석을 통해 분석한 결과, 보강비의 증가에 따른 보의 유효강성의 증가를 확인할 수 있었다. 이는 최근에 발표된 ACI 440.1R-06의 유효강성 모델식에서 FRP로 보강된 보의 휨강성이 평형철근비와 실제 사용된 철근비의 비에 의존한다는 모델식에 의한 예측 결과와 동일한 것으로써, 본 FRP로 보강된 보의 처짐평가는 ACI의 모델식이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 그러나 낮은 보강비의 경우 ACI의 모델식이 보의 휨강성을 과소평가하는 문제가 있는 것으로 나타났으며, 특히 보강비가 평형보강비의 1.5배 이상일 때, ACI 모델식이 보의 처짐을 적절하게 예측하는 것으로 판단된다.
- 3) 보강근의 탄성계수가 보의 휨강성에 미치는 영향을 분석한 결과, 보강근의 탄성계수가 증가할수록 보의 휨강성이 크게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 보강근의 탄성계수의 증가율과 강성의 증가율은 비례 관계에 있지 않으며, 강성의 증가율은 탄성계수의 증가율에 못 미치는 것으로 나타났다. 또한 콘크리트의 압축강도를 일반강도인 30 MPa에서 50 MPa로 증가시켜 해석한 결과에서도 보강근의 탄성계수 증가에 따른 강성의 증가가 유사한 경향과 크기를 나타냈다. 따라서 콘크리트의 압축강도가 증가하여도 보강근의 탄성계수의 영향은 동일하다.
- 4) 콘크리트 압축강도가 보의 휨강성에 미치는 영향을 해석한 결과, 보강근의 물성 및 재료거동이 보의 휨거동에 지배적인 영향을 미치기 때문에 압축강도의 영향은 크지 않은 것으로 나타났다. 그러나 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 FRP 보강근의 보강비의 영향이 크게 증가하는 것으로 나타났다.
- 5) 본 장의 해석 결과를 종합하여 보면, FRP 보강근으로 보강된 보의 설계시에 가장 중요한 설계 변수는 보강근의 보강비이며, 가능한 범위 내에서 보강근의 효율성을 증대시키기 위해서는 콘크리트의 강도를 증가시키는 것이 유리하다.

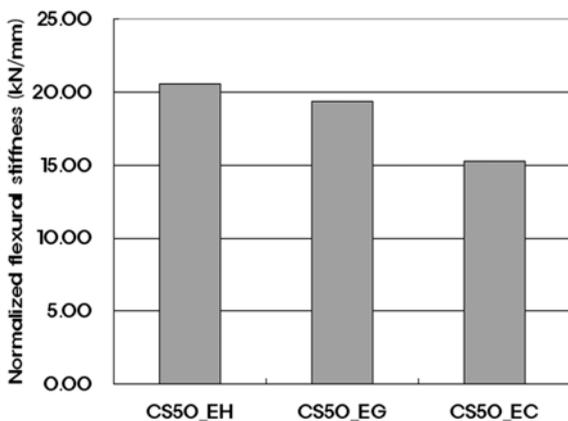


Fig. 21 Normalized flexural stiffness variation on the various elastic modulus

#### 참고문헌

1. Pecce, M., Manfredi, G., and Cosenza, E., "Experimental Response and Code Models of GFRP RC Beams in Bending," *J. Compos. Construct.*, Vol. 4, No. 4, 2000, pp. 182~190.
2. Rashid, M. A., Mansur, M. A., and Paramasivam, P., "Behavior of Aramid Fiber-Reinforced Polymer Reinforced High Strength Concrete Beams under Bending," *J. Compos. Construct.*, Vol. 9, No. 2, 2005, pp. 117~127.
3. ABAQUS, *Analysis User's Manual Ver. 6.4 Volume III Materials*, ABAQUS, 2003, pp. 11.5.1-1~11.5.2-10.
4. Michael P., Collins and Denis Mitchell, *Prestressed Concrete Structure*, Prentice- Hall Inc., 1996, 225 pp.
5. Edward G. Nawy, *Prestressed Concrete : A Fundamental*

- Approach*, Prentice-Hall Inc., 1998. 103 pp.
6. American Concrete Institute (ACI), "Guide for the Design and Construction of Structural Concrete Reinforced with FRP Bars," *Technical Committee Document 440.1R-06*, Farmington Hills, Mich., 2006, pp. 45~56.
  7. American Concrete Institute (ACI), "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars," *Technical Committee Document 440.1R-03*, Farmington Hills, Mich., 2003, pp. 32~45.
  8. Toutanji, H. and Saafi, M., "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer (GFRP) Bars," *ACI Structural Journal*, Vol. 97, No. 5, 2000, pp. 712~719.

---

**요 약** 본 연구에서는 FRP 보강근으로 보강된 콘크리트보의 설계변수들에 대한 영향을 고찰하기 위하여 유한요소 해석을 수행하여 휨거동 특성을 해석적으로 분석하였다. 유한요소해석은 범용구조해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 해석 모델을 구성하였으며, 기 실험된 실험 결과와 거동과 응력등에 대하여 비교 분석함으로써 모델의 적절성을 검증하였다. 검증된 모델을 기준으로 설계변수인 보강비, FRP 보강근의 탄성계수 및 콘크리트 압축강도 등의 변화에 따른 부재의 휨-변위 관계와 휨강성의 영향을 ACI 440에 제시된 이론적인 강성과 비교하였다. 고찰 결과, FRP 보강 콘크리트 보의 거동은 보강비의 영향이 가장 큰 것으로 나타났으며, 콘크리트의 압축강도가 증가할수록 FRP 보강근의 보강비의 영향이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

**핵심요약** : 유한요소해석, FRP 보강근, 휨강성, 보강비