

# GFRP 보강근의 설계지침(안)

## Suggestion of the design guideline of the GFRP rebar

심종성\*

박영환\*\*

최동욱\*\*\*

박석균\*\*\*\*

박철우\*\*\*\*\*

오홍섭\*\*\*\*\*

Sim, Jong Sung Park, Young Hwan Choi, Dong Uk Park, Seok Kyun Park, Cheol Woo Oh, Hong Seob

### ABSTRACT

The GFRP rebar have been interested as the substituting material of the conventional steel rebar to the concrete structure for high durable concrete structure. The GFRP rebar, however, has different way to be fabricated and mechanical characteristics comparing with the conventional steel rebar. Therefore, to apply the GFRP rebar to the construction field, it needs the proper and reasonable design theory, codes and guidelines. In this study, for the design recommendation of the GFRP rebar, ACI440.1R and ISIS Canada design manual were investigated and concluded that the design theory of ISIS Canada design manual was relatively better design concept considering the limit state of the GFRP rebar in design and analysis. With this design concept, new design equation for the GFRP rebar was suggested and investigated with other design equations.

### 요약

GFRP 보강근은 최근 철근 대체 보강근으로서의 관심과 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, 장기 내구성 콘크리트 구조물을 구성하는데 있어 핵심재료로 각광받고 있다. 그러나 GFRP 보강근은 기존 철근 보강근과는 달리 제작방식 및 기계적 특성이 상이하여 실제 건설현장에서 사용하기 위해서는 설계 이론, 코드 및 지침등이 GFRP 보강근의 특성에 맞게 개발되고 제안되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 ACI318, ACI440.1R, CSA S806 및 ISIS Canada design manual을 분석하여 국내 적용 가능한 GFRP 보강근의 설계지침을 제안하고자 한다. 분석결과, GFRP 보강근의 불확실성을 충분히 반영할 수 있기 위해서는 한계상태설계법이 적합한 설계방법으로 분석되었으며, 따라서 본 연구에서는 ISIS Canada design manual을 준용하여 GFRP 보강근의 설계지침을 제안하였으며, 이를 ACI 설계식들과 장단점을 비교분석하였다.

\* 정희원, 한양대학교 토목공학과 교수

\*\* 정희원, 한국건설기술연구원 구조연구부 수석연구원

\*\*\* 정희원, 한경대학교 건축학부 부교수

\*\*\*\* 정희원, 대전대학교 토목공학과 부교수

\*\*\*\*\* 정희원, 강원대학교 토목공학과 조교수

\*\*\*\*\* 정희원, 진주산업대학교 토목공학과 조교수

## 1. 휨거동 설계식 비교분석

### 1.1 휨 모멘트 설계식 비교 분석

ACI 440.1R-06의 경우, GFRP 보강근의 변형률과 탄성계수를 직접 반영하여, 균형보강비를 기준으로 concret crushing failure 및 rebar fracture로 구분하였으나 KCI 2008 설계식은 콘크리트 강도에 따른 계수값, GFRP rebar의 재료특성계수 등 한계상태를 반영하기위한 세부 설계상수들이 추가되어있다.

표 1 휨 모멘트 설계식

	ACI 318-05	ACI 440.1R-06	KCI 2008
균형보강비	$\rho_b = 0.85k_1 \frac{f_{ck}}{f_y} \left( \frac{600}{600 + f_y} \right)$	$\rho_{fb} = 0.85\beta_1 \frac{f_c'}{f_{fu}} \frac{E_f \epsilon_{cu}}{E_f \epsilon_{cu} + f_y}$	$\rho_{fb} = \alpha_1 \beta_1 \frac{f_c'}{f_{fy}} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{frpu}} \right)$ $\alpha_1 = 0.97 - 0.0015f_c' > 0.67$ $\beta_1 = 0.97 - 0.0025f_c' > 0.67$
압축	$M_n = C \left( d - \frac{a}{2} \right)$	$\rho_f > \rho_{fb}$ $M_n = A_f f_f \left( d - \frac{a}{2} \right)$	$M_r = C \left( d - \frac{\beta_1 c}{2} \right)$ $C = \alpha_1 \phi_1 f_c' \beta_1 c b$
인장	$M_n = T \left( d - \frac{a}{2} \right)$	$\rho_f < \rho_{fb}$ $M_n = A_f f_{fu} \left( d - \frac{\beta_1 c_b}{2} \right)$	$M_r = T \left( d - \frac{\beta c}{2} \right)$ $T = A_{gfrp} \phi_{gfrp} \epsilon_{gfrp} E_{gfrp}$ $\beta = \text{설계표 C.1}^{\circ}\text{C.3}$

### 1.2 균열폭 설계식 비교 분석

현재 범용 적으로 사용되는 균열폭 설계식은 ACI 440.1R-06에 제시된 식이다. 이에, KCI 2008 균열폭 설계식은 기존 균열폭 식들보다 간편해졌으며, 국내 외부 전문가들의 자문 결과, 가장 효율적인 식으로 고려되고 있다.

표 2 균열폭 설계식

	ACI 318-05	ACI 440.1R-06	KCI 2008
균열폭	철근의 수량 및 간격, 콘크리트의 구성재료, 철근의 최소 피복두께 등을 검토함으로써 구조물에 발생하는 균열 제어	$w = 2 \frac{f_f}{E_f} \beta k_b \times \sqrt{d_c^2 + \left( \frac{s}{2} \right)^2}$	$w = 11 \frac{E_s}{E_{frp}} k_b \times f_{frp} (d_c A)^{1/3} \times 10^{-6}$

### 1.3 처짐 설계식 비교 분석

KCI 2008에서는 기존 ACI 318-05을 모태로 하여 한계상태이론을 바탕으로 처짐 설계식을 제안하고 있다. 기본 형태는 기존 식과 유사하게 구성되었으나, 휨 구조부재의 중앙부, 단부에 대한 처짐특성을 동시에 고려할 수 있는 상수가 새롭게 제안되었다.

표 3 처짐 설계식

	처짐	
ACI 318-05	$(\Delta_i)_{DL+LL} = \frac{5M_{DL+LL} l^2}{48E_c (I_e)_{DL+LL}}$	$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr}$

ACI 440.1R-06	$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$ $\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1.0$
KCI 2008	$\delta = \frac{l^2}{96} (\psi_{end1} + \psi_{mid} + \psi_{end2}), \quad \psi = \frac{M}{E_c I_e}$ $I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g, \quad \beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_{frp}}{E_s} + 1\right)$ <p style="text-align: center;">or <math display="block">I_e = \frac{I_t I_{cr}}{I_{cr} + \left(1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right) (I_t - I_{cr})}</math></p> $I_{cr} = \frac{bc^3}{3} + n_{frp} A_{frp} (d - c)^2 \quad \text{or} \quad I_{cr} = k x b d^3$

## 2. 전단거동 설계식 비교분석

ACI 440.1R-06의 전단설계식은 기존 ACI 318-05의 전단설계식에 GFRP 보강근에 대한 경험적 보정상수를 적용함으로 구성되었다. 이에 반해, 캐나다 CSA S806-02 전단설계식의 경우, 다양한 전단특성을 반영할 수 있는 설계상수들이 적용되어 사용되고 있다. 또한, KCI 2008에서 제안하는 전단설계식의 경우도 이와 유사한 형태로 구성되었다.

표 4 전단 설계식

	$V_c$	$V_{frp}$ or $V_s$
ACI 318-05	$V_c = 2\sqrt{f'_c} b_w d$	$V_s = \frac{A_v f_{yt} d}{s}$
ACI 440.1R-06	$V_c = \left(\frac{5}{2}k\right) 2\sqrt{f'_c} b_w d$	$V_f = \frac{A_{fv} f_{fv} d}{s}$
KCI 2008	$V_c = \left(\frac{260}{1000 + d}\right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{frpl}}{E_s}}$ $\geq 0.10 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{frpl}}{E_s}}$	$V_{frp} = \frac{\phi_{frp} A_{frp} x f_{frpv} d}{s}$ $\leq 0.08 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{frpv}}{E_s}}$
CSA S806-02	$V_c = \left(\frac{130}{1000 + d}\right) \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d$ $\geq 0.08 \lambda \phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \sqrt{\frac{E_{frpl}}{E_s}}$	$V_{sF} = \frac{0.4 \phi_F A_v x f_{fu} d}{s}$

## 3. 정착거동 설계식 비교분석

정착길이 설계식에서, ACI 440.1R-06의 경우 정착 후 구조거동과 상관없이 하나의 단일식을 제안하고 있다. 반면 ACI 318-05는 인장, 압축, 표준갈고리 세 가지 정착특성을 반영하고 있다. 그러나 정착 후 구조거동에 따른 한계상태를 구분하여 적용하기 위해서는 대표적인 정착파괴인 concrete splitting failure 및 pull-out failure에 적용가능한 설계식의 제안이 필요하다. 따라서 KCI 2008에서는 이러한 정착파괴 구분별로 적용할 수 있는 정착 설계식을 제안하였다.

표 5 정착 및 이음 설계식

	정착 길이	비고
ACI 318-05	$l_{db} = \frac{0.6d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}}$	인장
	$l_{db} = \frac{0.25d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \geq 0.04d_b f_y$	압축
	$l_{hb} = \frac{100d_b}{\sqrt{f_{ck}}}$	표준갈고리( $f_y=400\text{MPa}$ )
ACI 440.1R-06	$L_d = \frac{\alpha \frac{f_{fr}}{0.083 \sqrt{f'_c}} - 340}{13.6 + \frac{C}{d_b}} d_b$ <p>where <math>L_d \geq 20d_b</math> and <math>\frac{C}{d_b} \leq 3.5</math></p>	-
KCI 2008	$l_{frpd} = 0.028 \frac{A_{frp} f_{frp}}{\sqrt{f'_c}}$	Straight bar (Splitting failure)
	$l_{frpd} = 0.054 d_b f_{frpu}$	Straight bar (Pull-out failure)
	$l_{frpdh} = 166 \frac{d_b}{\sqrt{f'_c}}$	Hooked bar
CSA S806-02	$l_d = 1.15 \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 k_5}{d_{cs}} \times \frac{f_F}{\sqrt{f'_c}} A_b$	Normal requirement
	$l_d = 0.5 k_1 k_2 k_3 k_4 k_5 \times \frac{f_F}{\sqrt{f'_c}} d_b$	Permitted variation

### 3. 결론

GFRP 보강근 보강 콘크리트 구조물의 휨, 전단, 정착과 관련된 설계식의 비교분석결과, 현재 GFRP 보강근 및 실험연구에 따라 다양한 연구결과들이 제시되고 있다. 본 연구에서는 기존 설계식을 비교하여 그 특성을 분석하였으며, 기존 설계식들보다 성능중심적으로 적용할 수 있는 한계상태설계법에 기준한 설계식을 제안하였다.

### 감사의 글

본 연구는 국무총리실 산하 공공기술연구회 연구과제의 일환으로서 한국건설기술연구원의 위탁을 받아 한국콘크리트학회 주관으로 수행되었으며, 저자들은 이에 감사드립니다.

### 4. 참고문헌

1. ACI 440 Committee, Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars (ACI 440.1R-06), American Concrete Institute, Detroit, Michigan, 2006.
2. Design and Construction of Building components with Fibre-Reinforced polymers, CSA Standard S806-02, CSA, 2002.
3. Reinforcing Concrete Structures with Fibre Reinforced Polymers, ISIS Canada Design Manual, 2001