

## FRP 보강근비에 따른 FRP 보강 콘크리트 슬래브의 파괴거동 분석

장낙섭<sup>1</sup>, 김영환<sup>2</sup>, 오홍섭<sup>3\*</sup>

### Analysis of Failure Behavior of FRP Rebar Reinforced Concrete Slab based on FRP Reinforced Ratio

Nag-Seop Jang<sup>1</sup>, Young-Hwan Kim<sup>2</sup>, Hong-Seob Oh<sup>3\*</sup>

**Abstract:** Reinforced concrete structures are exposed to various environments, resulting in reinforcement corrosion due to moisture and ions penetration. Reinforced concrete corrosion causes a decrease in the durability performance of reinforced concrete structures. One solution to mitigate such issues is using FRP rebars, which offer several advantages such as high tensile strength, corrosion resistance, and light-weight than conventional rebars, in reinforced concrete instead of conventional steel rebars. The FRP rebar used should be examined at the limit state because FRP reinforced concrete has linear behavior until its fracture and can generate excessive deflection due to the low elastic modulus. It should be considered while designing FRP reinforced concrete for flexure. In the ultimate limit state, the flexural strength of FRP reinforced concrete as per ACI 440.1R is significantly lower than the flexural strength by applying both the environmental reduction and strength reduction factors accounting for the material uncertainty of FRP rebar. Therefore, in this study, the experimental results were compared with the deflection of the proposed effective moment of inertia referring to the local and international standards. The experimental results of GFRP and BFRP reinforced concrete were compared with the flexural strength as determined by ACI 440.1R and Fib bulletin 40. The flexural strength obtained by the experimental results was more similar to that obtained by Fib bulletin 40 than ACI 440.1R. The flexural strength of ACI 440.1R was conservatively evaluated in the tension-controlled section.

**Keywords:** FRP Rebar, Design code, Failure mode, Effective moment of inertia, Deflection

## 1. 서론

FRP(Fiber Reinforced Polymer) 보강근은 철근에 비해 높은 인장강도, 비부식성, 경량성, 비전기 전자성 등 뛰어난 장점을 갖고 있으며, 철근 대체재로 사용할 경우 부식으로 인한 콘크리트 구조물의 노후화 방지, 내구수명 증가가 가능하다(Ko, 2014; Pecce et al., 2000). FRP보강근은 인장을 저항하는 섬유와 결합재 역할의 폴리머 수지로 구성되고 섬유는 탄소(Carbon), 유리(Glass), 아라미드(Aramid) 등이 있으며, 섬유와 폴리머 수지를 물리 및 화학적 특성에 맞게 조절하여 사용할 수 있다(ACI 440.1R, 2015; Fib bulletin 40, 2006). FRP Rebar의 강성은 주로 섬유로부터 결정되기 때문에 중요한 요소이며, 섬유

방향이 인장력이 작용하는 방향으로 배치되어 인장강도는 우수지만 전단강도는 취약한 특성을 가진다. FRP 보강근은 철근과 달리 항복구간이 없으며 파괴 전까지 선형탄성거동이 나타나고 파괴 시에는 취성파괴가 발생한다. FRP 보강근의 경우 섬유와 수지 사이의 강성의 차이가 매우 크기 때문에 단면의 중앙과 표면의 응력 차이가 발생하는 전단지연효과가 나타난다(You et al., 2007). 이와 같은 현상으로 직경이 증가함에 따라 인장강도 및 탄성계수가 줄어드는 경향이 있다(Faza and Ganga Rao, 1992). 또한 철근콘크리트와는 달리 길이 방향으로 콘크리트와 FRP 보강근의 박리가 발생하지 않을 정도로 피복 두께가 유지된 경우 콘크리트 자체의 강도에는 크게 영향을 받지 않는다고 알려져 있다(Benmokrane et al., 1996).

본 연구에서는 GFRP 및 BFRP 보강근으로 보강된 콘크리트 슬래브의 휨 실험을 실시하여 사용성 측면에서 중요한 요소인 처짐 예측을 위한 유효단면이차모멘트 대표 제안식과 비교하였으며, FRP 보강 콘크리트의 적절한 설계방법을 평가하고자 국내·외 FRP 보강 콘크리트 휨 실험 결과 데이터를 수집하여 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 설계휨강도와 비교 및 분석하였다.

<sup>1</sup>정회원, 경상국립대학교 건설환경공과대학 토목공학과 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 경상국립대학교 건설환경공과대학 토목공학과 박사과정

<sup>3</sup>중심회원, 교신저자, 경상국립대학교 건설환경공과대학 토목공학과 교수

\*Corresponding author: opera69@chol.com

Department of Civil Engineering, Gyeongsang National University, Jinju, 52725, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2021년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2021년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

## 2. FRP 보강 콘크리트 설계

FRP 보강근은 환경요인에 의해 장기 거동 시 인장강도가 감소될 수 있으며, 이러한 조건하에서의 강도 감소의 영향을 고려하기 위해 인장강도에 환경노출조건을 고려한 환경감소 계수(Environmental reduction factor,  $C_E$ )를 적용하도록 하고 있다. ACI 440.1R(2015)에서는 FRP 보강근의 종류와 환경노출조건에 따라 Table 1과 같이 환경감소계수를 제시하고 있다 (ACI-440.1R, 2015).

FRP 보강 콘크리트 부재의 파괴모드는 철근콘크리트 부재와 마찬가지로 FRP 보강근의 보강량에 따라 콘크리트 압괴, 균형파괴, FRP 보강근 파단으로 구분된다. FRP 보강 콘크리트 부재의 휨강도는 콘크리트의 압괴와 FRP 보강근 파단 중 어떠한 단면에 해당하는지에 따라 달라진다. FRP 보강근은 철근과 달리 낮은 탄성계수와 항복점을 갖지 않으므로 취성 파괴를 예방하기 위해 가급적 균형보강비 이상의 설계가 권장된다(Oh, 2020; Torres et al., 2012). 균형보강비는 환경감소 계수를 적용하는 ACI 440.1R(2015)의 Eq. (1)과 EC2의 가정을 적용한 Eq. (2)(Pilakoutas et al., 2002))가 대표적이다(ACI 440.1R, 2015; Fib bulletin 40, 2007).

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

$$\rho_{fb} = \frac{0.81(f_{ck} + 8)\varepsilon_{cu}}{f_{fk} \left( \frac{f_{fk}}{E_{fk}} + \varepsilon_{cu} \right)} \quad (2)$$

여기서,  $\beta_1$ =콘크리트 압축강도에 따른 중립축 위치 계수 ( $0.85 - (0.007 \times (f_{ck} - 28)) \geq 0.65$ ),  $f_{ck}$ =콘크리트 압축강도,  $\varepsilon_{cu}$ =콘크리트 극한변형률(0.003 in Eq. (1), 0.0035 in Eq. (2)),  $f_{fu}$ =FRP 설계인장강도( $f_{fu}^* \times C_E$ ),  $f_{fu}^*$ =보장인장강도 =  $f_{fk} - 3\sigma$ ,  $\sigma$ =표준편차,  $C_E$ =환경감소계수,  $f_{fk}$ =FRP 인장강도

**Table 1** Environmental reduction factor for various fibers and exposure conditions

Exposure condition	Fiber Type	Environmental reduction factor
Concrete not exposed to earth and weather	Carbon	1.0
	Glass	0.8
	Aramid	0.9
Concrete exposed to earth and weather	Carbon	0.9
	Glass	0.7
	Aramid	0.8

ACI 440.1R(2015)에서는 콘크리트 압괴시( $\rho_f > \rho_{fb}$ ) 휨강도 Eq. (3)을 사용한다. 여기서, FRP 보강근은 선형 탄성으로 가정하므로 콘크리트 압괴시 FRP 보강근의 응력은  $f_{fu}$ 보다 작기 때문에 Eq. (4)을 제시하고 있다.

$$M_u = \phi A_f f_f \left( d - \frac{A_f f_f}{1.7b f_{ck}} \right), \text{ for } (\rho_f > \rho_{fb}) \quad (3)$$

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

여기서,  $A_f$ =FRP 보강근의 단면적,  $f_{ck}$ =콘크리트 압축강도,  $\beta_1$ =콘크리트 강도에 따른 중립축 위치의 계수,  $E_f$ =FRP 탄성계수,  $\varepsilon_{cu}$ =콘크리트 극한변형률,  $b$ =부재의 압축면의 유효폭,  $d$ =부재의 유효 깊이

Fib bulletin 40(2007)은 휨강도 Eq. (5)는 EC2의 설계방법에 기반하여 재료의 불확실성을 고려할 수 있도록 안전계수를 적용한다(ACI 440.1R, 2015; Fib bulletin 40, 2007). 여기서 FRP 보강근 인장변형률은 Eq. (6)을 제시하고 있다.

$$M_u = \eta f_{cd} b d^2 (\lambda \xi) \left( 1 - \frac{\lambda \xi}{2} \right) \quad (5)$$

여기서,  $f_{cd}$ =콘크리트 설계 압축강도( $=\alpha_{cc} f_{ck} / \gamma_c$ ),  $\alpha_{cc}$ =압축강도에 대한 장기적 영향으로 인한 감소 계수(EC2=1),  $\gamma_c$ =콘크리트 안전계수(EC2=1.5),  $\xi$ =유효깊이 대비 중립축 깊이 비( $=\varepsilon_{cu} / \varepsilon_f + \varepsilon_{cu}$ ),

$$\varepsilon_f = \frac{-\varepsilon_{cu} + \sqrt{\varepsilon_{cu}^2 + \frac{4\eta\alpha_{cc}f_{ck}\lambda\varepsilon_{cu}}{\gamma_c\rho_f E_f}}}{2} \quad (6)$$

여기서, 콘크리트 압축강도에 따른  $\lambda$ 와  $\eta$ 는 EC2에 따라 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda = \begin{cases} = 0.8, & f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ = 0.8 - \left( \frac{f_{ck} - 50}{400} \right), & 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (7)$$

$$\eta = \begin{cases} = 1, & f_{ck} \leq 50 \text{ MPa} \\ = 1.0 - \left( \frac{f_{ck} - 50}{200} \right), & 50 < f_{ck} \leq 90 \text{ MPa} \end{cases} \quad (8)$$

균형보강비가 보강근비 이상인 경우( $\rho_f < \rho_{fb}$ ) 부재의 파괴는 FRP 보강근의 파단으로 시작되고, FRP 보강근 변형률이 극한변형률에 도달될 때 콘크리트 극한압축변형률에 도달한

다는 보장이 없으므로 등가 압축 블록을 적용할 수 없으나 설계 필요에 따라 FRP 보강근 인장파괴를 부분적으로 허용하고 있다. 따라서 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin(2007)의 FRP 보강근 파단 시 휨강도를 Eq. (9)과 Eq. (10)을 제시하고 있다.

$$M_u = \phi A_f f_{fu} d \left( 1 - \frac{\beta_1}{2} \left( \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{cu} + \epsilon_{fu}} \right) \right) \quad (9)$$

$$M_u = \frac{A_f f_{fk}}{\gamma_f} \left( 1 - \frac{\xi}{2} \right) \quad (10)$$

여기서,  $\gamma_f$ : FRP 보강근 안전계수(Eurocode = 1.25),  $\xi$ : 유효 깊이 대비 중립 축 깊이 비 =  $A_f f_{fk} / \gamma_f f_{cd} b d$

### 3. 구조실험

FRP 보강 콘크리트 실험체는 FRP 보강근 종류, 보강근비에 따른 거동과 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 설계 휨강도 및 유효단면이차모멘트에 따른 처짐을 분석하기

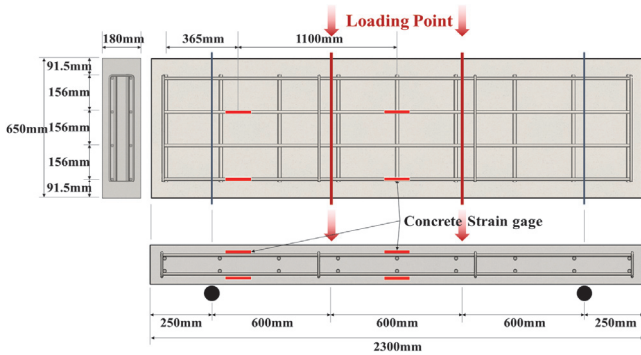


Fig. 1 Detail of FRP Reinforced concrete slab

Table 2 Material Properties of GFRP and BFRP Rebar

Reinforcing Material	Nominal Diameter	Area (mm <sup>2</sup> )	Tensile Strength (MPa)	Elastic Modulus (GPa)
GFRP	13	122	927.9±20.6	49.0±5.4
BFRP	13	122	1067.2±103.9	50.5±6.2

Table 3 Balanced Ratio of FRP Reinforced Concrete Slab

Specimen	$\rho_f$ (%)	$\rho_{fb}$		
		Eq. (1)*	Eq. (1)	Eq. (2)
GFRP	0.562	0.421	0.636	0.722
BFRP		0.332	0.504	0.571

\*not applied an environmental coefficient

위해 GFRP와 BFRP 보강근을 횡방향으로 하는 배근하는 실험체로 설계하였다. 실험체는 Fig. 1과 같이 폭과 높이가 650×180mm의 단면을 갖고 전체길이는 2300mm, 순지간은 1800mm인 일방향 슬래브로 제작하였다. 실험에 적용된 콘크리트 설계압축강도는 45MPa이며, 5개의 콘크리트 공시체 압축강도를 측정하였고 평균압축강도는 45.4MPa로 나타났다. 실험체 제작에 사용된 FRP 보강근의 역학적 성질은 Table 2에 나타내었으며, 각각의 섬유와 에폭시 수지로 구성되어 있고 표면에는 나선형 리브 형태로 부착강도를 증진시켰다.

본 연구에서는 4점 재하 방식으로 하중을 가력하여 FRP 보강 콘크리트 실험체의 휨 거동을 평가하였다. 양 단부에서 250mm씩 떨어진 곳에서 반력 힌지를 위치시키고, 실험체 상부의 중앙에서 양쪽으로 300mm씩 떨어진 위치에 분당 2mm의 속도로 하중을 가력 하였다. 가력 하중은 액추에이터에 부착된 로드 셀을 통하여 측정하였으며, 실험체의 처짐을 측정하기 위하여 중앙과 1/3 지점에 LVDT를 1개씩 설치하였다. 하중 가력에 따른 FRP 보강근의 변형률을 측정하기 위해 실험체 중앙 및 1/3 지점의 상하부에 변형률 게이지를 부착하였다.

Table 3은 FRP 보강근 종류에 따른 균형보강비를 정리하였으며, 외부환경에 노출되지 않는 정적실험과 같은 경우 환경계수를 고려하지 않는 인장강도로 FRP 보강 콘크리트 부재를 평가하는 것이 적절한 것으로 판단된다(Oh, 2020).

### 4. 실험결과

#### 4.1 휨거동

FRP 실험체의 하중-처짐 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 실험체의 거동은 균열 하중 전까지 선형거동을 하였으며, 초기균열 발생 이후 하중등락현상이 발생하였다. 이후 하중이 증가함에 따라 파괴 시까지 선형적인 거동이 나타났다. Table 4는 각 실험체의 휨실험 결과를 요약하여 나타내었다. GFRP 실험체는 BFRP 실험체와 달리 비교적 연성적 파괴 거동이 관찰되었으며, BFRP 실험체는 파괴 시 압괴 또는 전단에 의해 갑작

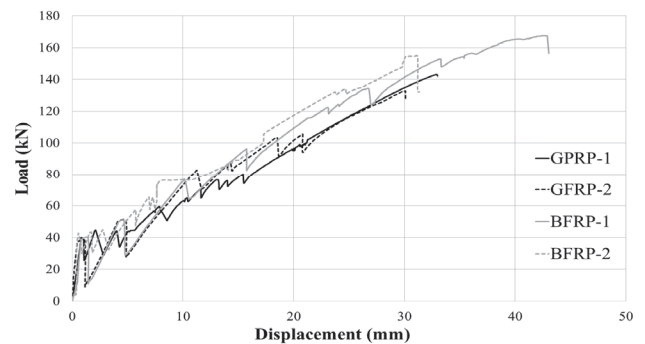
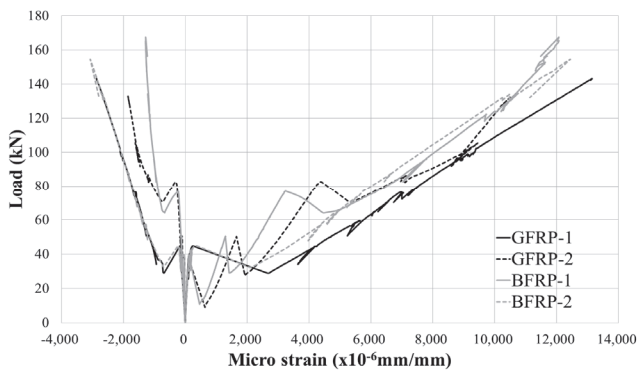


Fig. 2 Loads-deflection relationship

**Table 4** Summary of Flexural test result

Specimen	$P_{cr}$ (kN)	$\delta_{cr}$ (mm)	$P_{ult}$ (kN)	$\delta_{ult}$ (mm)	Crack spacing	Failure type
GFRP1	40.1	0.83	143.1	32.9	180 ~ 270	Concrete crushing & FRP rupture
GFRP2	37.3	0.48	132.9	30.0	140 ~ 240	Concrete crushing & Shear failure
BFRP1	39.0	0.82	167.6	42.7	130 ~ 210	Concrete crushing
BFRP2	42.7	0.54	154.6	31.7	110 ~ 200	Shear failure



**Fig. 3** Load-strain relationship

스러운 파괴가 발생하였다.

### 4.2 콘크리트 및 FRP 보강근 변형률

하중 증가에 따른 압축측 콘크리트와 인장측 FRP 보강근의 변형률을 Fig. 3에 나타내었다. FRP 보강 실험체는 보강근 비에 관계없이 균열하중 전까지 선형적으로 거동하였으며, 균열에 의해 강성이 저하된 후 추가 균열 발생에 따라 하중이 등락하면서 파괴시까지 선형거동이 나타났다.

### 4.3 처짐

FRP 보강 콘크리트 부재는 철근콘크리트와 달리 재료의 낮은 탄성계수로 인하여 동일한 단면에서 처짐이 더 크게 발생하며, 사용성의 문제가 발생할 수 있다. 따라서 FRP 보강 콘크리트 부재의 처짐 예측은 부재의 설계에 중요한 검토사항이다.

4점 재하 방식의 처짐 산정식은 Eq. (8)와 같으며, 계산식에서 알 수 있듯이 유효단면이차모멘트는 탄성계수와 함께 부재의 휨 강성을 나타내는 주요 인자로서 부재에 진행되는 균열을 반영한 단면 성능을 보여주는 지표이다.

$$\delta = \frac{Pa}{48E_c I_e} (3L^2 - 4a^2) \tag{8}$$

여기서,  $a$  : 가력지점간 거리,  $L$  : 순지간 거리,  $E_c$  : 콘크리트 탄성계수,  $I_e$  : 유효단면이차모멘트

#### 4.3.1 기존 유효단면이차모멘트 고찰

일반적으로 콘크리트 부재 단면의 크기 및 하중 등에 대한 영향으로 인해 휨 균열이 발생하면 균열단면이차모멘트로 변화하게 된다. 그러나 휨 균열이 발생하지 않는 중앙부 외측 및 응력의 영향이 낮은 단면의 단면이차모멘트는 전단면이차모멘트와 같다고 가정하므로 유효단면이차모멘트는 균열단면이차모멘트와 전단면이차모멘트 사이에 위치하게 된다 (Alsays et al., 2000).

현행 콘크리트구조설계기준에서 제시하는 유효단면이차모멘트 Eq. (9)(Branson, 1965)은 실험을 통한 결과를 바탕으로 철근콘크리트 부재에 대한 인장강성과 부재 경간 전체를 걸친 휨 강성(EI)의 다양성을 고려하여 제안하였다(ACI 318, 2019).

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left( 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) I_{cr} \leq I_g \tag{9}$$

여기서,  $I_e$  : 유효단면이차모멘트,  $M_{cr}$  : 균열모멘트( $f_r I_g / y_t$ ),  $f_r$  : 콘크리트 파괴계수( $f_r I_g / y_t$ ),  $M_a$  : 처짐 발생까지 최대 모멘트,  $I_g$  : 전단면이차모멘트,  $I_{cr}$  : 균열환산이차모멘트

Branson의 식은 콘크리트 부재의  $I_g / I_{cr}$  값이 3~4 이상일 경우 부재의 강성을 과대 평가한다. 일반적으로 FRP 보강 콘크리트 부재는  $I_g / I_{cr}$  값이 5~25에 해당하며, 인장강성(Tension Stiffening)을 과대평가하고 처짐을 과소평가할 수 있으므로 FRP 보강 콘크리트 부재에 적합하지 않은 것으로 나타났다 (Benmokrane et al., 1996; Yost et al., 2003).

이러한 이유로 Table 5와 같이 다양한 연구자들이 FRP 보강 콘크리트에 대한 유효단면이차모멘트를 제안하였다. Faza and Ganga Rao(1992)의 식은 4점 재하 방식에서 평균 유효단면이차모멘트를 제안하였다. 부재의 중앙부에서는 균열환산이차모멘트를 사용하며, 부재의 양끝단에서는 유효단면이차모멘

**Table 5** Different equations for the effective moment of inertia of FRP-Reinforced concrete beam

Reference	Proposal Model
Faza and Ganga Rao (1992)	$I_m = \frac{23I_{cr}I_e}{8I_{cr} + 15I_e}$
Benmokrane et al. (1996)	$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \frac{I_g}{7} + 0.84 \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g$

Table 5 Continue

Reference	Proposal Model
Toutanji and Saafi (2000)	$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m\right] I_{cr} \leq I_g$ $\frac{E_f}{E_s} \rho_f < 0.3, m = 6 - 10 \frac{E_f}{E_s} \rho_f$ $\frac{E_f}{E_s} \rho_f > 0.3, m = 3$
ISIS Canda (2001)	$I_e = \frac{I_T I_{cr}}{I_{cr} + \left[1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right] (I_T - I_{cr})}$
Abdalla (2002)	$I_m = \frac{I_g I_{cr}}{I_{cr} \zeta + 1.15 I_g (1 - \zeta)}$ $\zeta = \frac{0.5 M_{cr}}{M_a}$
ACI 440.1R (2003)	$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g$ $\beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_f}{E_s} + 1\right), \alpha_b = 0.5$
Yost et al. (2003)	$\alpha_b = 0.064 \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) + 0.13$
ACI 440.1R (2006)	$\beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1$
Bischoff (2005)	$I_e = \frac{I_{cr}}{1 - \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right) \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2}$
Bischoff and Gross (2011)	$I_e' = \frac{I_{cr}}{1 - \gamma \left(1 - \frac{I_{cr}}{I_g}\right) \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2}$ $\gamma = \frac{3 \left(\frac{L_a}{L}\right) - 4 \left[4 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right) - 3\right] \left(\frac{L_a}{L}\right)^3}{3 \left(\frac{L_a}{L}\right) - 4 \left(\frac{L_a}{L}\right)^3}$

트를 계산한다. Toutanji and Saffi(2000)은 낮은 탄성계수와 보강근비를 고려하여 실험결과와 기존 연구자에 의한 실험 결과들의 회귀 분석을 통해 지수산정식을 제시하여 유효단면이차모멘트를 제안하였다. Benmokrane(1996)의 식은 Branson의 식의 형태를 유지하면서 실험 결과를 바탕으로 전단면이차모멘트 및 균열단면이차모멘트에 감소계수를 적용하며, ACI 440.1R(2003, 2006), Yost et al.(2003)의 식은 매개변수  $\beta_d$ 와  $\alpha_b$ 을 사용한다. ACI 440.1R(2003)의  $\beta_d$ 은 철근과 FRP 보강근의 탄성계수 비에 관한 매개변수로  $\alpha_b$ 은 0.5를 사용하며, Yost et al.(2003)에서는 ACI 440.1R(2003)의  $\alpha_b$ 의 값이 0.5가 전단면이차모멘트의 비중을 크게 두고 있으며, 낮은 보강근비에 대해 유효단면이차모멘트를 과대평가하고 있으므로 균형보강비에 대한 보강근비를 적용하여  $\alpha_b$ 을 제시하였다(Faza and Ganga Rao, 1992; Benmokrane et al., 1996; ACI 440.1R, 2003, 2006; Toutanji and Saafi, 2000; Yost et al., 2003). Bischoff(2005)은 Branson(1965)의 식이 보강근비가 1% 미만의 보에 대해서 처짐을 과소평가함에 따라 스프링의 직렬연결 모델을 적용함으로써 강성( $E_c$ )보다는 연성( $1/E_c$ )의 평균값에 가중치를 두어 유효단면이차모멘트 식을 제시하였다. Bischoff and Gross(2011)의 식은 부재의 길이에 따른 강성의 변화를 고려한 매개변수  $\gamma$ 를 적용하도록 수정하였다(Bischoff, 2005; Bischoff and Scanlon, 2007; Bischoff and Gross, 2011).

4.3.2 실험결과와 유효단면이차모멘트 비교

GFRP와 BFRP 실험체의 하중-처짐 곡선과 Table 5의 대표 유효단면이차모멘트의 제안식에 의한 해석결과를 비교하여 Fig. 4, 5로 나타내었다. GFRP와 BFRP 실험체 초기 균열 하중은 해석결과와 초기하중에 미치지 않았으며, ACI 318의 해석 결과는 비선형적인 거동과 함께 실험체의 처짐을 과소평가하는 것으로 나타났다.

GFRP 실험체의 경우 Toutanji and Saafi의 식은 균열 하중 직후 ACI 318-95의 식과 유사한 비선형 거동을 보여주고 있

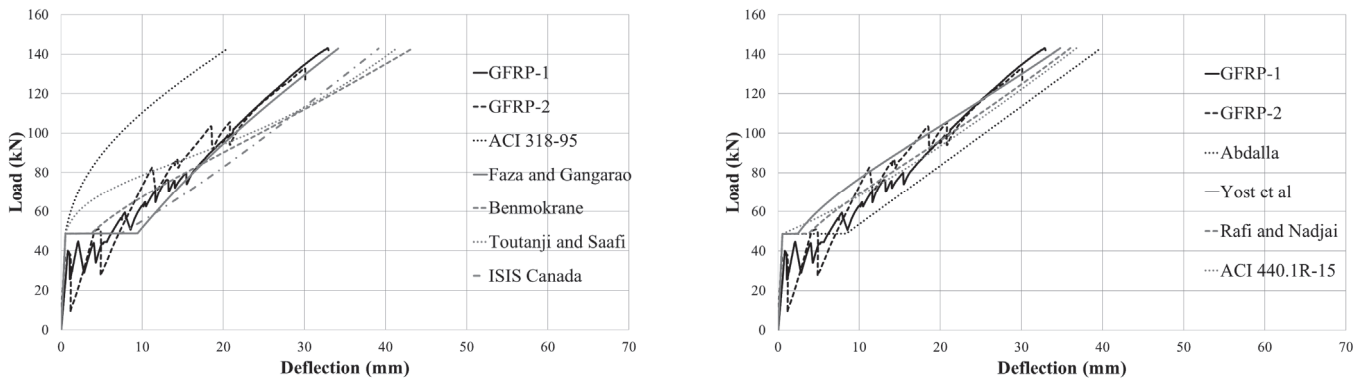


Fig. 4 Comparison of load-deflection relationship between analysis and GFRP Reinforced Concrete

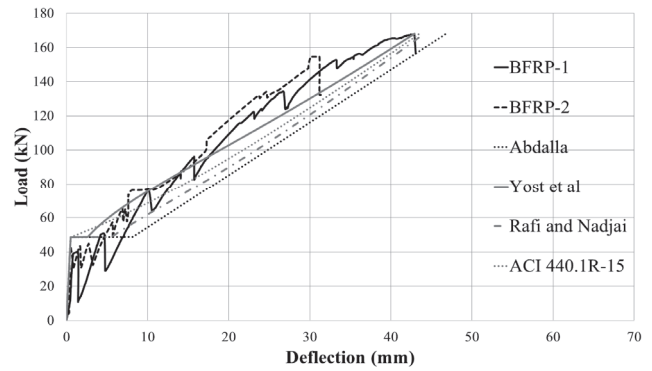
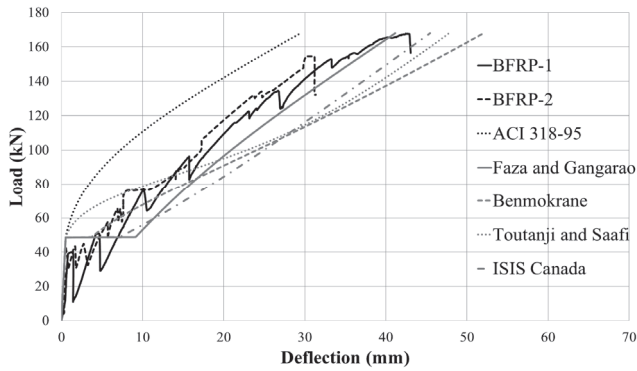


Fig. 5 Comparison of load-deflection relationship between analysis and BFRP Reinforced Concrete

으며, 최대 하중의 60%에서는 비교적 정확한 처짐을 예측하였고 하중의 증가하면서 처짐을 과대평가하는 것으로 나타났다. Benmokrane et al.의 식은 균열 하중에서 상당히 유사한 처짐이 나타났으나, 하중이 증가하면서 실험결과와 제안식에 의한 처짐의 차이가 증가되었다. Yost et al.의 식은 전반적으로 하중에 대한 처짐을 비교적 유사한 예측을 나타내며, ISIS Canada와 Abdalla의 제안식은 전반적으로 처짐을 과대평가하고 있다. Faza and Gangarao의 식은 균열하중에서 많은 처짐을 예측하고 있으며, 하중이 증가하면서 실험결과와 제안식에 의한 처짐의 차이가 감소하여 파괴 하중에서 가장 유사한 처짐을 예측하였다. ACI 440.1R-15와 Rafi and Nadjai의 식은 균열 하중에서 상이한 처짐을 예상하였으나, 최대 하중의 40% 이후 유사한 거동이 나타났다.

BFRP 실험체의 경우 GFRP 실험체에 비해 비교적 높은 인장강도와 탄성계수로 인해 유효단면이차모멘트의 제안식에 따른 해석결과의 처짐을 과대평가하고 있으나 하중이 증가함에 따라 최대하중에서의 처짐은 Faza and Gangarao, Yost et al., ACI 440.1R(2015)와 유사하였다.

#### 4.4 문헌조사 결과와 휨 설계방법 비교

FRP 보강 콘크리트 부재의 대표적인 설계방법에 따른 설계휨강도와 국내·외에서 실시한 FRP 보강 콘크리트 부재의 휨 실험 결과를 비교·분석하기 위해 문헌조사를 실시하였다. Table 6는 국내·외 21개 문헌의 125개 실험체의 데이터를 조사하였으며, 주요 데이터로는 FRP 보강근 및 콘크리트의 역학적 성질, 실험체 단면 및 크기, 휨 실험 결과, 파괴 모드를 수집하였다. 수집된 데이터를 활용하여 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin(2007)의 설계방법에 따른 균형보강비와 휨강도를 계산하여 실험결과와 비교·분석하였다.

FRP 보강 콘크리트 부재의 역학적 성질을 활용하여 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin40(2007)의 설계휨강도를 계산하여 문헌조사에서 나타난 실험결과와 비교하여 Fig. 6과 같이

Table 6 Experimental studies of FRP Reinforced concrete beams

Study	Number of Specimen
Brown&Batholomew(1993)	6
Yost et al(2001)	12
Matthys&Taerwe(2000)	6
Al-Sunnna(2006)	20
Benmokrane et al(1996)	4
Duranovic(1997)	5
Alsayed et al(2000)	4
Barris et al(2009)	12
Al-musallam et al(1997)	3
Sonobe et al(1997)	5
Theriault et al(1998)	5
Aiello&Ombres(2000)	3
Toutanji&Saafi(2000)	6
Ashour(2006)	6
Pecce et al(2000)	2
Minkwan Ju et al(2016)	3
Dae-Won Seo(2007)	10
Mousavi and Esfahani(2012)	9
Iman Chitsazan(2010)	4

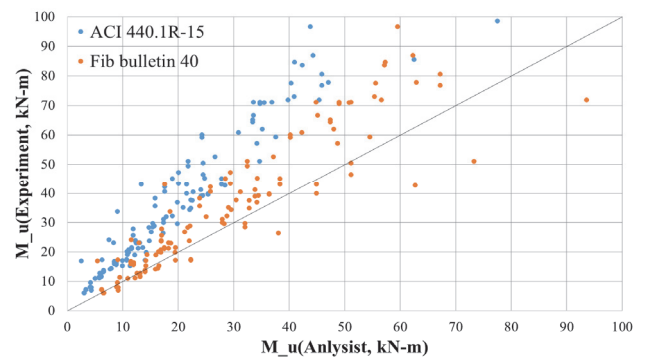


Fig. 6 Comparison of experiment-analysis relationships

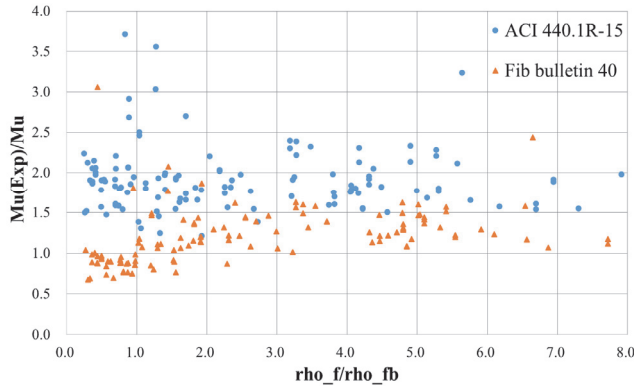


Fig. 7 Comparison of FRP reinforcement ratio and flexural strength

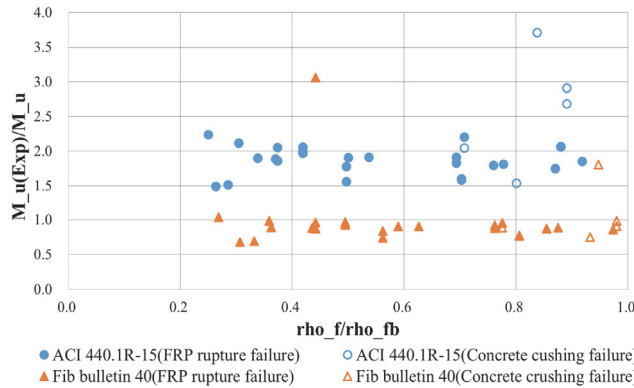


Fig. 8 Comparison of FRP ratio and failure type in tension-controlled section

나타내었다. ACI 440.1R(2015)의 설계방법에 비해 Fib bulletin 40(2007)의 설계휨강도가 실험결과와 유사한 경향이 확인되었다. ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 설계휨강도와 실험결과와 평균오차는 각 46.16%와 21.30%로 2배 이상의 차이가 확인되었으며, ACI 440.1R(2015)의 설계휨강도가 보수적인 설계방법을 제시하는 것으로 판단된다. FRP 보강 콘크리트 부재의 휨강도 값이 증가할수록 각 설계휨강도와 실험결과 간의 편차가 증가하였다. 이는 ACI 440.1R(2015)의 FRP 보강 콘크리트 부재의 설계휨강도는 부재파괴 형태에 따른 불확실성을 고려한 강도감소계수와 내구성 설계를 위한 환경감소계수의 영향의 요인이 큰 것으로 판단된다. 그에 반해 Fib bulletin 40(2007)은 재료의 불확실성에 기반한 부분안전계수를 반영하므로 상대적으로 안전율이 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 7는 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)에서 제시하는 균형보강비에 따른 실험결과와 설계휨강도 비를 나타내었다. 인장지배단면에 해당하는 FRP 보강 콘크리트 부재의 경우 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 설계휨강도와 실험결과의 차이가 뚜렷하게 나타났다. ACI 440.1R(2015)의 설계휨강도는 다양한 단면에서 보수적으로 평가하고 있다.

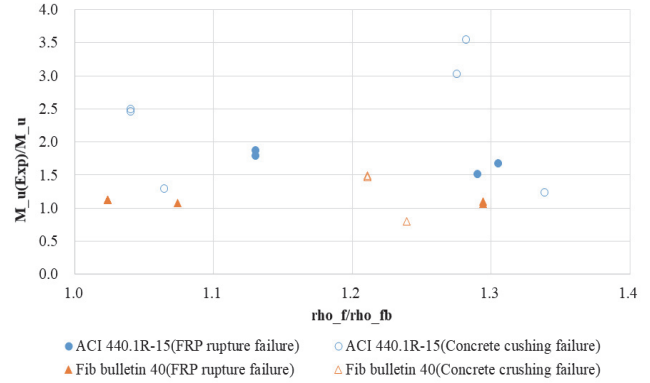


Fig. 9 Comparison of FRP ratio and failure type in transition section

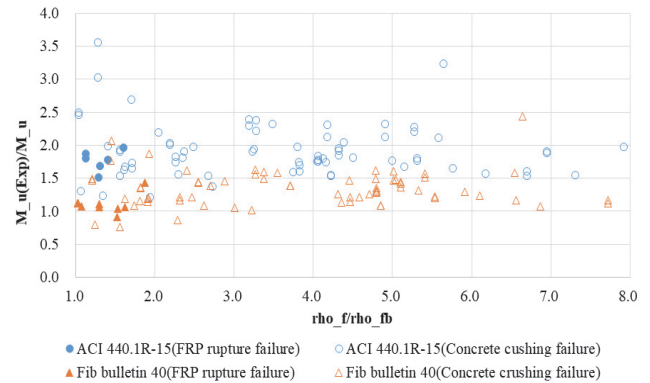


Fig. 10 Comparison of FRP ratio and failure type in compression controlled section

Fib bulletin 40(2007)의 설계휨강도는 인장지배단면에서 실험결과보다 약 5~25% 낮게 산정하므로 FRP 보강근 파단에 의한 파괴모드가 발생할 수 있으므로 주의하여 설계를 실시할 필요가 있을 것으로 판단된다.

Fig. 8~10은 FRP 보강 콘크리트 부재의 파괴모드가 서술되어 있는 실험 데이터에 한하여 ACI 440.1R(2015) 및 Fib bulletin 40(2007)에서 제시하는 인장지배단면, 균형단면, 압축지배단면 구간에 속한 실험체의 파괴모드를 나타내었다. ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 균형보강비에 의한 인장지배단면에서 FRP 보강근 파단으로 파괴모드가 발생할 확률은 각 85.29%, 79.17%로 ACI 440.1R(2015)의 파괴모드가 더 정확한 것으로 확인되었다. 균형단면에서는 ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 큰 차이가 없이 콘크리트 압괴와 FRP 보강근 파단 파괴모드가 비슷하게 발생하였다. ACI 440.1R(2015)와 Fib bulletin 40(2007)의 균형보강비에 의한 압축지배단면에서는 Fib bulletin 40(2007)은 상대적으로 FRP 보강근 파단에 의한 파괴모드가 발생하였으며, ACI 440.1R(2015)의 설계가 비교적 정확하게 파괴모드를 예측하는 것으로 판단된다.

## 5. 결 론

FRP Rebar 실험체는 초기 균열 이후 FRP Rebar의 섬유가 부분적인 파단 등으로 인하여 하중등락현상이 발생하였으며, 파괴시까지 선형적인 거동을 보이다 취성적인 양상이 나타났다.

FRP Rebar 실험체의 하중-처짐에 따른 유효단면이차모멘트는 Faza and Gangarao(1992), Yost et al(2003), ACI 440.1R(2015)의 식으로 계산한 처짐이 상대적으로 실험의 처짐과 유사한 것으로 관찰되었다.

국내·외 실험결과에 따른 휨강도는 ACI 440.1R(2015)보다 Fib bulletin 40(2007)의 설계휨강도와 유사한 경향을 확인할 수 있었으며, 상대적으로 ACI 440.1R(2015)가 보수적인 평가를 하는 것으로 분석되었다. 보강근비에 따른 파괴 모드 예측은 ACI 440.1R(2015)가 높은 신뢰도를 가지는 것으로 확인되었다.

FRP Rebar의 종류 및 역학적 성질에 따라 유효단면이차모멘트 및 보강근비에 따른 파괴 모드 예측이 상이한 결과를 나타내고 있으므로 다양한 보강근비에 따른 합리적인 통합 처짐식과 파괴 모드 예측에 대한 연구의 필요성이 제기된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CFRP-C163381-01).

## References

1. Abdalla, H. A. (2002), Evaluation of deflection in concrete members reinforced with fibre reinforced polymer (FRP) bars, *Composite structures*, 56(1), 63-71.
2. ACI 318. (2019), "Building code requirements for structural concrete and commentary," *ACI 318-19*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.
3. ACI Committee 440. (2003), "Guide for the design and construction of concrete reinforced with FRP bars." *ACI 440.1R-03*, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Mich.
4. ACI Committee 440. (2006), "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars." *ACI 440.1R-06*, American Concrete Institute (ACI), Farmington Hills, Mich
5. ACI-440.1R (2015), "Guide for the design and construction of structural concrete reinforced with fiber-reinforced polymer (FRP) bars," Farmington Hills, MI.
6. Aiello, M. A., & Ombres, L. (2000). Load-deflection analysis of FRP reinforced concrete flexural members. *Journal of Composites for Construction*, 4(4), 164-171.
7. Almusallam, T. H., Al-Salloum, Y. A., Alsayed, S. H., & Amjad, M. A. (1997), Behavior of concrete beams doubly reinforced by FRP bars, *In Proceedings of the third international symposium on non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structures (FRPRCS-3)*, Japan (Vol. 2, pp. 471-478).
8. Alsayed, S. H., Al-Salloum, Y. A., & Almusallam, T. H. (2000), Performance of glass fiber reinforced plastic bars as a reinforcing material for concrete structures, *Composites Part B: Engineering*, 31(6-7), 555-567.
9. Al-Sunna, R. A. S. (2006), Deflection behaviour of FRP reinforced concrete flexural members (*Doctoral dissertation*, University of Sheffield).
10. Ashour, A. F. (2006), Flexural and shear capacities of concrete beams reinforced with GFRP bars, *Construction and Building Materials*, 20(10), 1005-1015.
11. Barris, C., Torres, L., Turon, A., Baena, M., & Catalan, A. (2009), An experimental study of the flexural behaviour of GFRP RC beams and comparison with prediction models, *Composite Structures*, 91(3), 286-295.
12. Benmokrane, B., & Masmoudi, R. (1996), Flexural response of concrete beams reinforced with FRP reinforcing bars, *Structural Journal*, 93(1), 46-55.
13. Bischoff, P. H. (2005), Reevaluation of deflection prediction for concrete beams reinforced with steel and fiber reinforced polymer bars, *Journal of structural engineering*, 131(5), 752-767.
14. Bischoff, P. H., & Gross, S. P. (2011), Design approach for calculating deflection of FRP-reinforced concrete, *Journal of composites for construction*, 15(4), 490-499.
15. Bischoff, P. H., & Scanlon, A. (2007), Effective moment of inertia for calculating deflections of concrete members containing steel reinforcement and fiber-reinforced polymer reinforcement, *ACI Structural Journal*, 104(1), 68.
16. Branson, D. E. (1965), "Instantaneous and Time-dependent deflections of simple and continuous reinforced concrete beams." *HPR Report No. 7*, Part 1, Alabama Highway Dept., Bureau of Public Roads, AL, (Dept. of Civil Engineering and Auburn Research Foundation, Auburn Univ., Aug. 1963).
17. Brown, V. L., & Bartholomew, C. L. (1993), FRP reinforcing bars in reinforced concrete members, *Materials Journal*, 90(1), 34-39.
18. Duranovic, N., Pilakoutas, K., & Waldron, P. (1997), Tests on concrete beams reinforced with glass fibre reinforced plastic bars, *Non-metallic (FRP) reinforcement for concrete structure*, 2, 479-486.
19. Faza, S. S., & GangaRao, H. V. S. (1992), Pre-and post-cracking deflection behaviour of concrete beams reinforced with fibre-reinforced plastic rebars, *In Proceedings of The First International Conference on the use of advanced composite materials in bridges and structures*.
20. Fib bulletin 40 (2007), *FRP reinforcement in RC structures*, TG9.3.
21. Chitsazan, I., Kobraei, M., Jumaat, M. Z., & Shafiq, P. (2010), An experimental study on the flexural behaviour of FRP RC beams and comparison of the ultimate moment capacity with ACI, *Journal of civil engineering and construction technology*, 1(2), 27-42.
22. ISIS Canada Corporation. (2001), "Reinforcing concrete structures with fiber reinforced polymers." *ISIS Canada: Design Manual No.3*, The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, Winnipeg, Manitoba, Canada.



23. Ju, M., Oh, H., Lim, J., & Sim, J. (2016), A modified model for deflection calculation of reinforced concrete beam with deformed GFRP rebar, *International Journal of Polymer Science*, 2016.
24. Ko, S. H. (2014), Experimental study for GFRP reinforced concrete beams without stirrups, *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 18(2), 21-29.
25. Matthys, S., & Taerwe, L. (2000), Concrete slabs reinforced with FRP grids. I: One-way bending, *Journal of Composites for Construction*, 4(3), 145-153.
26. Mousavi, S. R., & Esfahani, M. R. (2012), Effective moment of inertia prediction of FRP-reinforced concrete beams based on experimental results. *Journal of Composites for Construction*, 16(5), 490-498.
27. Oh, H. S., Kim, Y. S., Jang, N. S. (2020), Prediction of Structural Behavior of FRP Rebar Reinforced Concrete Slab based on the Definition of Limit State, *JOURNAL OF THE KOREAN SOCIETY OF CIVIL ENGINEERS*, 40(4), 371-381.
28. Pecce, M., Manfredi, G., & Cosenza, E. (2000), Experimental response and code Modelsof GFRP RC beams in bending, *Journal of Composites for Construction*, 4(4), 182-190.
29. Pilakoutas, K., Neocleous, K., & Guadagnini, M. (2002), Design philosophy issues of fiber reinforced polymer reinforced concrete structures, *Journal of Composites for Construction*, 6(3), 154-161.
30. Seo, W. S., Han B. S., Shin, S. W. (2007), Behaviour of One-Way Concrete Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars, *Journal of the Korea Concrete Institute*, 19(6), 763-771.
31. Sonobe, Y., Fukuyama, H., Okamoto, T., Kani, N., Kimura, K., Kobayashi, K., ... & Teshigawara, M. (1997), Design guidelines of FRP reinforced concrete building structures, *Journal of composites for Construction*, 1(3), 90-115.
32. Torres, L., Neocleous, K., & Pilakoutas, K. (2012), Design procedure and simplified equations for the flexural capacity of concrete members reinforced with fibre-reinforced polymer bars, *Structural Concrete*, 13(2), 119-129.
33. Toutanji, H., & Deng, Y. (2003), Deflection and crack-width prediction of concrete beams reinforced with glass FRP rods, *Construction and Building Materials*, 17(1), 69-74.
34. Yost, J. R., Goodspeed, C. H., & Schmeckpeper, E. R. (2001), Flexural performance of concrete beams reinforced with FRP grids, *Journal of composites for construction*, 5(1), 18-25.
35. Yost, J. R., Gross, S. P., & Dinehart, D. W. (2003), Effective moment of inertia for glass fiber-reinforced polymer-reinforced concrete beams, *Structural Journal*, 100(6), 732-739.
36. You, Y. J., Park, K. T., Seo, D. W., & Hwang, J. H. (2015), Experimental Study on GFRP Reinforcing Bars with Hollow Section, *Journal of the Korea institute for structural maintenance and inspection*, 19(1), 45-52.

Received : 09/15/2021

Revised : 09/23/2021

Accepted : 09/30/2021

---

**요 지 :** 철근콘크리트 구조물은 다양한 환경에 노출되어 수분 침투로 인한 철근 부식이 발생하며, 부식으로 인한 구조물의 내구성능 저하 문제가 발생할 수 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 철근에 비해 인장강도, 비부식성, 경량화 등 뛰어난 장점을 가진 FRP 보강근에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FRP 보강근은 철근과 달리 항복 구간이 없으므로 파괴 시까지 선형탄성거동이 나타나고 탄성계수가 낮아 과도한 처짐이 발생할 수 있으므로 한계상태 조건에 대한 적용성 검토가 필요하다. 한계상태에서 FRP 보강 콘크리트의 휨 설계 시 ACI 440.1R은 FRP 보강근의 재료적 불확실성을 고려하여 환경감소계수와 강도감소계수를 모두 적용하여 휨강도가 크게 낮아진다. 따라서 본 연구에서는 국내·외 다양한 문헌을 조사하여 유효단면이차모멘트 제안식의 처짐 해석 결과와 실험결과를 비교하였으며, ACI 440.1R 및 Fib bulletin 40의 설계휨강도를 분석하였다. 실험 결과에 따른 휨강도는 ACI 440.1R에 비해 Fib bulletin 40의 설계휨강도와 유사한 경향이 확인되었으며, 인장지배단면에서 ACI 440.1R은 설계휨강도를 보수적으로 평가하는 것으로 나타났다.

**핵심용어 :** FRP 보강근, 설계코드, 파괴모드, 유효단면이차모멘트, 처짐

---