



이형 GFRP Rebar로 보강된 보의 유효단면이차모멘트 산정식 제안

심종성¹⁾ · 오홍섭²⁾ · 주민관^{1)*} · 임준현³⁾

¹⁾한양대학교 토목공학과 ²⁾진주산업대학교 토목공학과 ³⁾(주)삼보기술단

New Suggestion of Effective Moment of Inertia for Beams Reinforced with the Deformed GFRP Rebar

Jong-Sung Sim^{1)*}, Hong-Seob Oh²⁾, Min-Kwan Ju^{1)*}, and Jun-Hyun Lim³⁾

¹⁾Dept. of Civil Engineering, Hanyang University, Ansan 426-791, Korea

²⁾Dept. of Civil Engineering, Jinju National University, Jinju 660-758, Korea

³⁾Sambo Engineering Co., Ltd., Seoul 138-834, Korea

ABSTRACT To fundamentally solve the problem of deterioration of concrete structures, it has been researched that the high durable concrete structure reinforced with the FRP rebar can be one of major solution to the newly-developed concrete structure. FRP rebar has lots of advantages such as non-corrosive, high performance and light weight against the conventional steel rebar. Among these kinds of FRP rebars, GFRP rebar has usually been considered as the best reinforcement because of its economic point of view. Even though the material capacity of the GFRP rebar was already investigated, there are some problems such as low modulus of elastic that will be cause for degrade of the serviceability of flexural concrete member reinforced with the GFRP rebar. Thus, the deflection characteristics of the GFRP rebar reinforced concrete structure should be considered then investigated. In this study, ACI 440 guideline (2003), ISIS Canada Design Manual (2001) and Toutanji et al. (2000) was considered for predicting the moment of inertia of the concrete beam reinforced with the GFRP rebar. And it was also evaluated that load-deflection relationship had a good accordance with the test and analysis result. In the result of this study, it could be estimated that the load-deflection relationship using the suggested equation of moment of inertia in this study indicated better accordance with the test result than that of the others until failure.

Keywords : deformed GFRP rebar, durability, effective moment of inertia, serviceability

1. 서 론

콘크리트구조물에서의 철근의 부식은 구조 성능 및 내구 성능을 저하시키는 주요한 요인이며 보수, 보강 등 유지관리상의 문제를 발생시키는 주요 인자이다. 이창수 등에 의하면 서울시의 대표적인 구조물 140개를 조사한 결과, 418개소에서 열화 상태가 보고되었으며, 철근부식으로 인해 보수 및 보강을 요하는 곳이 46개소 (11%)인 것으로 나타났다. 또한 미국의 경우 총 580,000개의 교량에 결함이 발견되어 즉시 보수보강이 필요하며 이것은 전체 교량 구조물의 약 31% 정도가 철근부식에 의한 노후화가 진행된 것으로 보고되었다. 현재 미연방도로국에서는 연간 교량 구조물의 보수에 약 2억 달러의 예산을 소요하고 있으며, 고속도로 및 고속도로교량의 유지관리 및 보수를 위해 매년 3억 1천만 달러를 사용하고 있다²⁾.

최근 이와 같은 콘크리트 열화와 같은 문제를 근본적으로 해결하기 위해 고내구성을 보유한 콘크리트구조물의 장수명화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데 기존의 철근 보강재보다 가볍고 고강도 및 고내구성을 보유한 건설 신소재에 대한 연구·개발 및 활용이 점차 증가되는 추세이다. 대표적인 건설 복합 신소재인 CFRP, GFRP 및 AFRP rebar의 경우, 이미 국내외적으로 활발한 연구개발이 이루어지고 있는 실정이다. 하지만 현재 콘크리트구조물에의 경제적인 측면에서 적용 가능한 FRP rebar로서는 GFRP rebar가 주목을 받고 있으며 그 사용성 또한 증대되고 있는 추세이다.

현재 GFRP rebar를 활용한 콘크리트구조물의 설계는 미국 ACI 440 위원회에서 지속적으로 연구 중인 설계지침이 이미 개발되어 있지만, GFRP rebar의 경우, 기존 철근보강재와는 다르게 기하학적 형상, 연성, 탄성계수 및 부착 특성이 일률적이지 못하기 때문에 GFRP rebar를 활용한 콘크리트구조물의 설계 시 각각의 형상에 적합한 FRP rebar의 설계식이 검토되어야 할 필요가 있다.

*Corresponding author E-mail: mkju@hanyang.ac.kr

Received August 20, 2007, Accepted December 15, 2007

©2008 by Korea Concrete Institute

GFRP rebar로 보강된 콘크리트구조물에 대한 휨모멘트 성능은 이미 그 우수성이 구명되어 있으나 GFRP의 단점 중 하나인 처짐에 대한 사용성 측면은 개선되어야 할 점으로 지적되고 있다. GFRP rebar에 대한 처짐량 예측 문제는 Larralde¹¹⁾가 연구한 바에 의하면 GFRP rebar의 경우, 휨하중의 30%까지는 Branson⁷⁾이 제안한 유효단면이차모멘트 제안식이 구조 거동을 충분히 예측할 수 있는 것으로 분석되었다.

Nawy¹²⁾는 FRP rebar로 휨 보강된 콘크리트 보의 처짐량은 FRP rebar의 보강비에 영향을 받는다는 연구 결과를 보이고 있으며, 0.7%의 보강비를 갖는 콘크리트 보의 거의 60%의 처짐량 저평가를 나타내는 반면, 2.2%의 보강비를 보유한 보의 경우 약 8% 이내의 처짐량 오차를 보이는 것으로 분석하였다. 본 연구 결과로서 FRP rebar로 보강된 보의 처짐량 예측은 FRP rebar의 보강비에 전적으로 의존하는 것으로 분석되었다.

본 연구에서는 자체 개발된 이형 GFRP rebar로 휨보강된 콘크리트보의 기본적인 설계변수 연구를 위해 처짐예측을 위한 유효단면이차모멘트 산정식을 제안하고자 한다. 이를 위해 이형 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보의 보강비별 휨 시험체를 제작하여 구조 실험을 수행하였다.

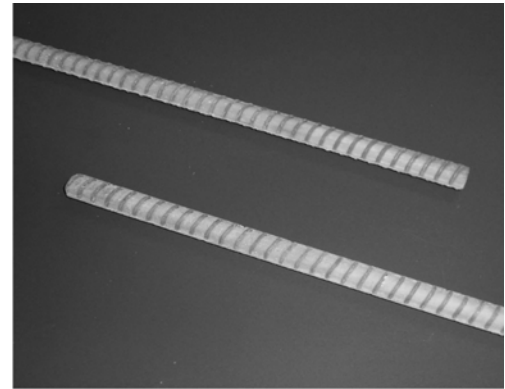
2. 실험 및 결과 분석

2.1 실험 개요 및 실험 변수

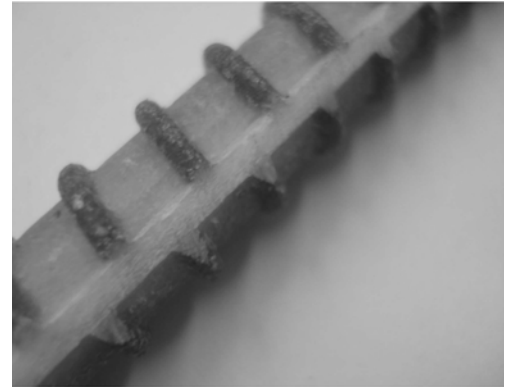
본 연구에서 적용된 이형 GFRP 보강근은 부착 성능 개선을 위하여 Fig. 1과 같이 표면에 형성된 이형철근과 같은 이형 리브를 제작하기 위해 유리섬유 (milled glass fiber)와 에폭시를 50대50으로 혼합하여 사용하였으며, 약 160°C 이상의 온도로 15분 정도 고온 양생하여 제작되었다. 외부 이형 리브의 배치 각도는 약 80°로 하였으며, 제작된 이형 GFRP rebar는 FRP 성형 제품의 제조 방법 중 마감성의 증진을 위하여 주로 사용되는 사출성형법 (injection molding)을 적용하였다.

Table 1은 이형 GFRP rebar 제작에 사용된 매트릭스와 유리섬유의 물성치를 나타낸다. 본 연구에서 사용된 이형 GFRP rebar는 공칭직경이 D10이고, 설계 인장강도가 $f_{d,GFRP} = 616 \text{ MPa}$ 인 제품을 사용하였다¹⁾.

Table 2는 본 연구에 적용된 휨 보강비 설계를 나타내고 있다. 보강 효과 및 파괴 모드 분석을 위하여 ACI 440 guideline 에 의해 계산된 균형보강비 0.0059를 기준으로 각각 저보강 (FSR2), 균형보강 (FSR3), 과보강 (FSR4) 단면이 되도록 설계하였다. Fig. 2는 본 연구에서 수행된 휨 재하 실험의 개요도를 나타내고 있다. 가력은 4점 휨 재하 시험을 적용하였으며 하중가력은 MTS사의 250 kN 용량의 유압식 하중가력기를 사용하여 1 mm/min의 변위 제어를 실시하였고, 휨 파괴를 유도하기 위하여 3.7의 전단스팬비 (a/d)를 적용하였다. 휨 보강근의 적용



(a) Scheme of the GFRP rebar



(b) Detail of the GFRP rebar

Fig. 1 Newly-developed GFRP rebar and steel rebar

Table 1 The material properties of E-glass fiber and epoxy resin⁹⁾

		Epoxy resin	Fibers (E-glass)
Tensile	Strength (MPa)	74*	1,840*
	Modulus of elasticity (GPa)	2.73*	75.00*
	Elongation (%)	5%*	1.3%*
Compressive	Strength (MPa)	53	-
	Modulus of elasticity (GPa)	5.23	-
	Elongation (%)	1%	-
Flexural	Strength (MPa)	123*	-
	Modulus of elasticity (GPa)	3.03*	-
Specific weight (g/m^3)		1.18*	2.50*
Water absorption (%)		3.01*	-

*Provided by manufacturer

Table 2 The flexural design of reinforcement for the test beams

Specimens	Reinforcing material	Reinforcing ratio		Design of GFRP reinforcement
		Actual	Balanced	
FSR2	GFRP	0.00427	0.0059	Under reinforced
FSR3	GFRP	0.00640	0.0059	Balanced
FSR4	GFRP	0.00927	0.0059	Over reinforced

은 Fig. 2의 배근도와 같이 인장부에 D10 이형 GFRP rebar를 배근하였으며, 압축부의 경우, $f_y = 300 \text{ MPa}$ 의 D10의 압축철근을 배근하였다. 또한 전단에 의한 조기파괴

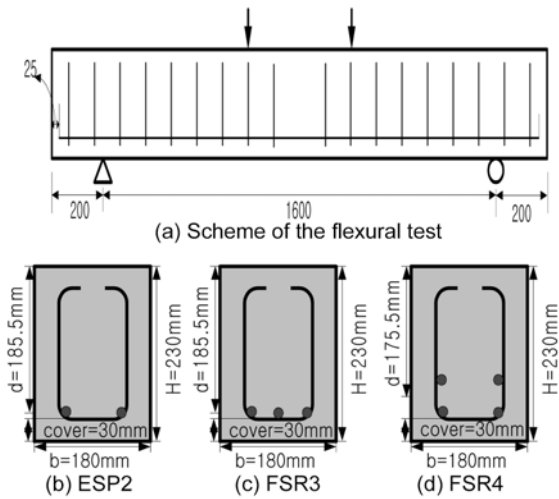


Fig. 2 The test setup and details of the test beams

를 방지하고자 D10 전단보강근을 100 mm 간격으로 보 전 지간에 배근하였다.

2.2. 구조 실험 결과

Fig. 3는 이형 GFRP rebar로 보강된 변수시험체에 대한 보강비에 따른 하중-처짐관계를 보여주는 그림이다. 그림에서 보이듯이 보강량이 증가할수록 전체적인 강성은 증진되는 것으로 나타났다. 초기 균열하중의 경우도 거의 유사한 값을 보였으며 모든 시험체가 극한강도에 도달한 후 최종 파괴 변위까지 꾸준한 변위의 증가를 보이는 것으로 확인되었다. 모든 변수 시험체는 응력 증가에 따른 급격한 하중 저하는 발생하지 않았으며 FSR2와 FSR4 시험체의 경우, 극한강도 도달 후 순간적인 하중 저하를 보였으나 취성적 거동은 보이지 않았으며 전반적인 구조거동에는 큰 영향을 미치지 못하였다.

다음의 Table 3은 각 시험체의 극한하중 및 휨모멘트, 파괴 모드를 표로 나타내었다. 설계시 예상한 것과 같이 FSR2 시험체는 휨인장파괴 되었으며, FSR3과 FSR4 시험체는 각각 휨압축파괴 되었다. 휨모멘트의 해석은 ACI 440 guideline⁹⁾을 기준으로 산정하였으며, 해석 결과 실험값에 비해 다소 보수적인 것으로 평가되었다¹⁾.

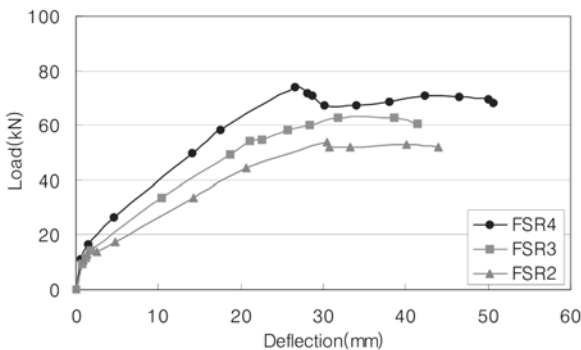


Fig. 3 Load-deflection relationship of the concrete beam reinforced with the GFRP rebar

Table 3 The summary of the test result

Specimens	Ultimate load (kN)	Flexural moment (kN·m)		Mode of failure
		Experiment	Analysis	
FSR2	57	19.5	12.1	Flexural tension
FSR3	64	22.0	18.1	Flexural compression
FSR4	74	25.4	20.8	Flexural compression

3. 기존식에 의한 유효단면이차모멘트 및 처짐량 분석

3.1 개요

RC 보의 유효단면이차모멘트는 탄성계수와 함께 휨 부재의 강성을 결정하는 주요 인자이며, 부재의 강성은 처짐 및 균열 등 사용성에 영향을 미친다. 따라서 부재의 유효단면이차모멘트의 산정은 부재의 사용성을 예측하는데 있어 매우 중요하다. 일반적인 RC 보의 Branson⁷⁾이 제안한 아래의 식 (1)을 사용한다.

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

여기서 I_c = The effective moment of inertia

M_{cr} = The cracking moment ($f_t I_g / y_t$)

M_a = The service moment

I_g = The gross moment of inertia

I_{cr} = The transformed cracked-section moment of inertia

하지만 식 (1)을 GFRP rebar로 보강된 휨 부재에 적용할 경우 GFRP rebar의 낮은 강성으로 인한 사용성 저하 및 처짐에 대한 과소평가에 우려가 있다³⁾. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 GFRP rebar에 적용가능한 유효단면이차모멘트 산정식이 여러 연구자들에 의해 제시되었다^{4,7,9)}. 그러나 이러한 제안식 또한 GFRP rebar의 제작 방법 및 표면 형상, 물성 등이 제품별로 차이가 있기 때문에 모든 GFRP rebar에 일반화하여 적용하기는 다소 어려움이 많다. 따라서 본 연구에서는 최근 제안된 GFRP rebar의 유효단면이차모멘트 제안식을 본 실험 결과와 비교한 후, 본 연구에서 개발된 이형 GFRP rebar에 적용가능한 유효단면이차모멘트 해석식을 제안하고자 한다.

3.2 기존 해석 모델의 적용

시험값과의 비교를 위한 기존 연구식은 ACI 440 guideline⁹⁾, ISIS Canada Design Manual¹⁰⁾에서 제시한 유효단면이차모멘트 산정식과 Toutanji et al.⁹⁾이 제안한 식을 적용하였으며, 이는 식 (3)~(6)에 나타내었다. 식 (2)는 실험값에 대한 유효단면이차모멘트 계산식을 나타낸다.

$$I_{e(\text{exp})} = \frac{P_{\text{exp}} / 2 \cdot a}{24 E_c \Delta_{\text{exp}}} (3L^2 - 4a^2) \quad (2)$$

여기서 a : span to depth ratio
 L : span length
 Δ_{exp} : deflection (exp.)

ACI 440 guideline;

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

여기서 $\beta_d = \alpha_b \left(\frac{E_f}{E_s} + 1\right)$, $\alpha_b = 0.5$

ISIS Canada Design Manual;

$$I_e = \frac{I_g I_{cr}}{I_{cr} + \left(1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right) (I_g - I_{cr})} \quad (4)$$

Toutanji et al.⁹⁾;

for $\frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} < 0.003$,

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{6 - \frac{10 \rho_{FRP} E_{FRP}}{E_s}} I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{6 - \frac{10 \rho_{FRP} E_{FRP}}{E_s}}\right) \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (5)$$

for $\frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} \geq 0.003$,

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right) \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (6)$$

Table 4는 ACI 440 guideline⁵⁾, ISIS Canada Design Manual¹⁰⁾ 및 Toutanji et al.⁹⁾의 제안 모델을 적용하여 유효 단면이차모멘트-적용모멘트 관계를 분석하기 위해 적용된 해석 변수들을 정리한 표이다. 본 해석 변수들을 사용하여 얻어진 결과는 Figs. 4~6에 나타나있다.

유효단면이차모멘트 분석 결과, FSR2, FSR3 및 FSR4 시험체 모두 ACI 440 guideline⁵⁾ 및 Toutanji et al.⁹⁾의 해석식과는 비교적 실험 결과와 유사한 경향을 나타내는 반면, ISIS Canada Design Manual¹⁰⁾의 해석식은 초기균열 직후, 변곡점 부근에서 다른 모델들에 비해 급격한 저하 현상을 나타내었으나, 이후 극한상태에 도달할수록 다른 해석 모델들에 수렴하는 경향을 나타내었다.

Table 4 Analysis parameters for calculating the moment of inertia

	FSR2	FSR3	FSR4
Centriod, x	16.40	19.90	22.10
y_i (mm)	213.60	210.20	207.90
I_g (mm ⁴)	182,505,000	182,505,000	182,505,000
M_{cr} (kN·m)	2.66	2.71	2.74
I_{cr} (mm ⁴)	8,288,067	11,966,056	13,738,339

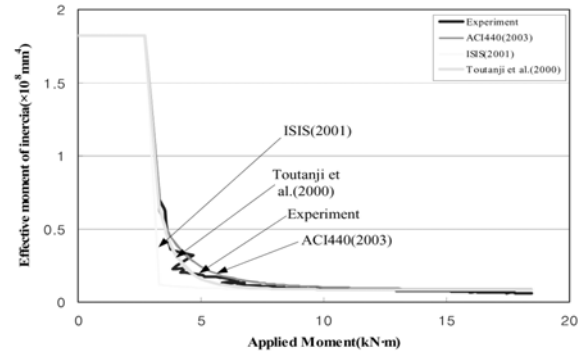


Fig. 4 The comparison of the moment of inertia by using the conventional equation for FSR2 specimen

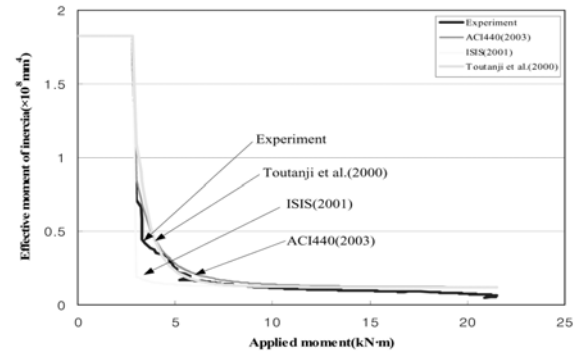


Fig. 5 The comparison of the moment of inertia by using the conventional equation for FSR3 specimen

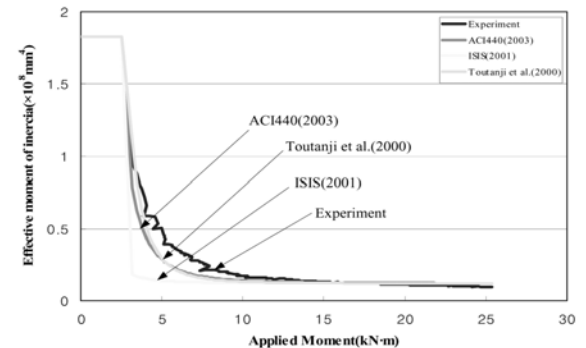


Fig. 6 The comparison of the moment of inertia by using the conventional equation for FSR4 specimen

3.3 기존 모델의 적용을 통한 처짐량 분석

FRP rebar로 보강된 콘크리트구조물의 구조 거동은 기존 철근 보강 시험체와는 달리 초기균열에 의한 강성 저하 후 뚜렷한 차후 강성저하 없이 파괴시까지 선형 거동이 지배적으로 나타난다. 따라서 본 연구에서는 FRP rebar로 보강된 콘크리트 보의 처짐량 예측 시 처짐량을 비교적 손쉽게 예측할 수 있는 선형해석식을 적용하였으며 이는 식 (6)에 나타내었다. 따라서 앞서 분석된 유효 단면이차모멘트 해석값을 적용하여 식 (1)의 역산을 통하여 식 (7)을 구하여 처짐량을 계산하였으며, 그 결과는 Figs. 7~9에 나타내었다.

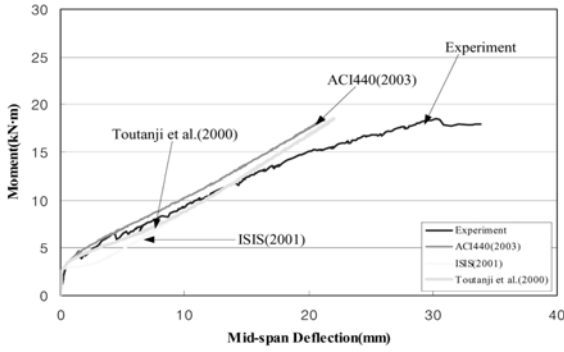


Fig. 7 The evaluation of the deflection for FSR2 specimen

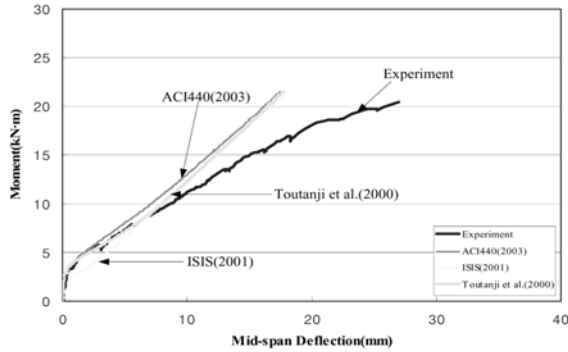


Fig. 8 The evaluation of the deflection for FSR3 specimen

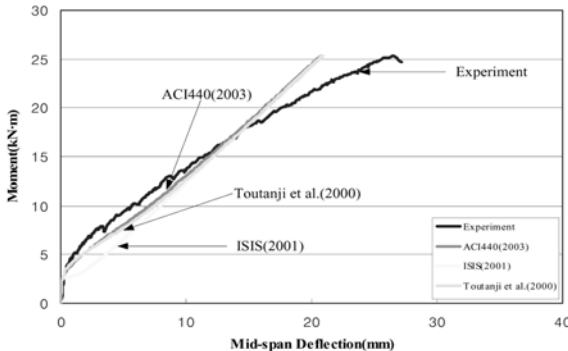


Fig. 9 The evaluation of the deflection for FSR4 specimen

$$\Delta = \frac{P \cdot a}{24E_c I_c} (3L^2 - 4a^2) \quad (7)$$

처짐량 분석 결과 FSR2 및 FSR3 시험체의 경우 극한 모멘트의 약 50% 수준까지는 비교적 유사한 거동을 나타내었으나, 이후 극한모멘트 도달시까지 다소 큰 차이를 나타내었다. FSR4 시험체의 경우, 다른 시험체에 비해 유효단면이차모멘트 해석값이 전반적으로 낮은 값을 나타내었기 때문에 처짐 해석의 경우도 실험값에 비해 다소 낮은 강성 효과를 나타내었다.

따라서 본 연구에서는 GFRP rebar로 보강된 콘크리트 보 구조물의 합리적인 처짐 예측을 위해 이형 GFRP rebar의 구조 특성에 적합한 해석 모델로의 개선 및 적용이 필요할 것으로 판단된다.

4. 유효단면이차모멘트 산정식 제안 및 처짐량 분석

본 연구에서 제안하고자 하는 유효단면이차모멘트 모델은 Toutanji et al.⁹⁾이 제안한 해석 모델을 기초하였다. ISIS Canada Design Manual¹⁰⁾ 모델의 경우, 초기균열 이후 실험값에 대한 예측이 다소 어려운 측면이 있다. ACI 440 guideline⁵⁾ 해석 모델의 경우, 실험상수인 α, β 를 경험적으로 도출하여 제안하였으나 실험상수를 정량화하기에는 다소 어려움이 있다. 이에 GFRP의 보강비 산정 시 단순한 직경과 단면을 위주로 한 보강비 적용보다는 철근보강비로 환산하여 적용하는 것이 바람직한 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 Toutanji et al.⁹⁾이 제안한 유효단면이차모멘트 해석 모델을 바탕으로 철근과 이형 GFRP rebar의 보강비 및 탄성계수비에 대한 적용 범위를 적용한 변수 해석을 통해 활하중모멘트와 균열모멘트가 반영된 유효단면이차모멘트 해석식을 제안하고자 한다.

4.1 GFRP Rebar로 휨보강된 보의 유효단면이차모멘트 제안식

식 (8)과 (9)는 Branson⁷⁾이 제안한 균열이 발생된 철근 콘크리트 보에서의 유효단면 이차모멘트 해석식이다. 지수 m값은 시험을 통해 얻어진 3이 사용된다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^m\right) \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (8)$$

$$m = \frac{\log[(I_{e(\text{exp})} - I_{cr}) / (I_g + I_{cr})]}{\log\left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)} \quad (9)$$

여기서 $I_{e(\text{exp})}$ = the moment of inertia from the test result

위의 식을 바탕으로 GFRP rebar의 보강비 ρ_{FRP} 와 탄성계수 E_{FRP} 를 고려한 회귀분석을 실시한 지수 m값은 다음 식 (10)~(12)에 나타내었다. 보강비에 경계점의 경우, Toutanji et al.⁹⁾이 Branson⁷⁾의 제안식에 근거하여 Yost¹³⁾, 및 Benmokrane⁶⁾ 등 기존 연구자들의 다수의 실험 결과를 바탕으로 도출한 1% 보강비 경계조건을 고려하여 이형 GFRP의 탄성계수와 보강 시험체의 보강비를 적용함으로써 결정되었다.

$$\text{for } \frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} < 0.0025, \quad m = 6 - \frac{13E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} \quad (10)$$

$$\text{for } \frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} \geq 0.025, \quad m = 3 \quad (11)$$

여기서 ρ_{FRP} = the reinforcing ratio of the specimen reinforced with the GFRP rebar

E_{FRP} = the modulus of elasticity of the GFRP rebar

E_s = the modulus of elasticity of the steel rebar

위와 같이 도출된 지수 m 값과 극한모멘트의 50% 이후의 하중 증가에 따른 처짐량을 고려하면 아래 식 (12) 와 (13)으로 재구성 할 수 있다.

$$\text{for } \frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} < 0.025, I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^{6 - \frac{13 \rho_{FRP} E_{FRP}}{E_s}} I_g + \left(1 - \left(\left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^{6 - \frac{13 \rho_{FRP} E_{FRP}}{E_s}} + \left(\frac{M_g}{10 M_{cr}} \right)^4 \right) \right) \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (12)$$

for

$$\frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} \geq 0.025, I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right) \cdot I_{cr} \leq I_g \quad (13)$$

4.2 제안된 식을 적용한 유효단면이차모멘트 및 처짐량 평가

Figs. 10~12는 FSR2, FSR3 및 FSR4 시험체에 대하여, 새로 제안된 유효단면이차모멘트 해석식을 적용한 모멘트-처짐관계를 나타내고 있다. ACI318에 규정되어 있는 해석식으로서 Branson⁷⁾이 제안한 유효단면이차모멘트 해석식의 m 값이 3인 경우, GFRP로 보강된 보 구조물의 모멘트-처짐관계를 과대평가 할 수 있는 것으로 분석되었다. 또한 본 실험 결과, $(E_{FRP}/E_s)\rho_{FRP}$ 보강비 환산값의 경우, 본 연구에서 제안한 0.0025 이하의 값을 보이는 것으로 분석되었으며, 이로 인해 식 (12)를 적용하여 각 시험체에 대해 모멘트-처짐관계를 도식한 그림이 Figs. 10~12에 나타나있다. 해석 결과, 제안식에 의한 moment-deflection 관계는 극한하중 50% 이후의 구조 거동에 대하여 극한하중시까지 실험값과 거의 유사한 경향을 나타내는 것으로 분석되었다.

5. 결 론

FRP rebar로 휨 보강된 콘크리트 보는 일반 철근콘크리트 보에 비해 높은 극한하중과 경량화 및 내부식성 등 많은 장점을 지니고 있다. 그러나 철근 대비 낮은 탄성계수로 인하여 균열과 처짐이 다소 큰 경향이 있다. 따라서 기본적인 휨 성능의 구명뿐만 아니라 사용성에 대한 연구도 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 이형 GFRP rebar로 휨 보강된 보의 단점이 큰 처짐량을 예측할 수 있는 유효단면이차모멘트 산정식을 제시하였으며 결론은 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 개발된 이형 GFRP rebar로 보강 콘크리트 보 구조물에 대해 기존의 유효단면이차모멘트

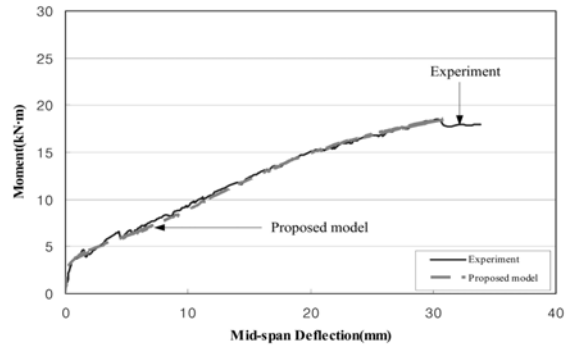


Fig. 10 The evaluation of the deflection by using the suggesting equation for FSR2 specimen

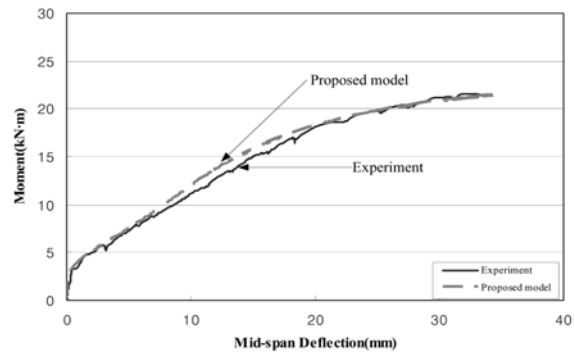


Fig. 11 The evaluation of the deflection by using the suggesting equation for FSR3 specimen

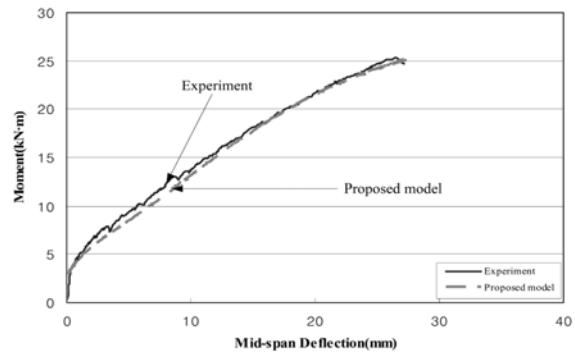


Fig. 12 The evaluation of the deflection by using the suggesting equation for FSR4 specimen

제안식들과 비교 분석하였으며, 그 결과 기존의 유효단면이차모멘트 산정식은 균열모멘트 이후 극한모멘트의 50% 수준까지의 유효단면이차모멘트는 비교적 정확히 예상할 수 있었으나, 이후에는 실제 유효단면이차모멘트보다 다소 높은 값을 나타냄으로써 최종 파괴시까지의 처짐량을 과소평가하는 경향이 있는 것으로 분석되었다.

- 2) 본 연구에서는 탄성계수 환산비를 적용 보강비를 사용한 Toutanji et al.⁹⁾의 유효단면이차모멘트 제안식을 바탕으로 이형 GFRP rebar로 보강된 콘크리트 보에 대한 유효단면이차모멘트 제안식을 도출하였으며, 이를 적용하여 각 시험체의 시험 데이터와 비교 분석을 통하여 기존식에 비해 최종 파괴시까지

의 하중-처짐관계를 비교적 정확히 예측할 수 있는 것으로 판단된다.

- 3) 추후 추가적인 실험 및 해석적 연구를 통하여 다양한 특성을 갖는 이형 GFRP rebar로 보강된 콘크리트구조물에 대한 설계·해석식의 적용 및 개발이 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 심중성, 광계환, 박석균, 김장호, “Hybrid FRP Rod를 활용한 콘크리트 구조 모니터링 시스템 개발”, 산학연03 연구보고서, 건설교통기술평가원, 2006, pp.1~303.
2. 이창수, 윤인석, “서울시내 위치한 콘크리트 고가차도의 내구성능 조사 및 평가”, 한국방재학회논문집, 12권, 1호, 2002, pp.143~152.
3. Al-Salloum, Y. A., Alsayed, S. H., Almusallam, T. H., and Amjad, M. A., “Evaluation of Service Load Deflection for Beams Reinforced by GFRP Bars”, *Proceedings of the Second International Conference on Use of Advanced Composite Materials in Bridges and Structures*, ACMBISII, Montral, Quebec, Canada, 1996, pp.165~172.
4. ACI 318R-05, *Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary*, ACI Committee 318, 2005, pp.95~108.
5. ACI 440.1R-03, *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars*, ACI Committee 440, 2003, pp.17~22.
6. Benmokrane, B., Chaallal, O., and Masmoudi, R., “Flexural Response of Concrete Beams Reinforced with FRP Reinforcing Bars”, *ACI Structural Journal*, Vol.92, No.2, 1996, pp.46~55.
7. Branson, D. E., *Deformation of Concrete Structures*, McGraw-Hill, New York, 1977, pp.1~546.
8. Moon, Do-Young, *Bond Behavior of Newly Developed Deformed GFRP Bars*, Ph.D Thesis, Hanyang University, 2006, pp.1~224.
9. Houssam, A. Toutanji, H. A. , and Saffi, M., “Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer(GFRP) Bars”, *ACI Structural Journal*, Vol.97, No.5, 2000, pp.712~719.
10. ISIS Canada, *Design Manual Strengthening Reinforced Concrete Structures with Externally-Bonded Fibre Reinforced Polymer*, ISIS Canada, 2001.
11. Larralde, J., *Fiber Glass Reinforced Plastic Rebars in Lieu of Steel Rebars*, TRB Annual Meeting, Task Force A2C510, Structural, Application of Fiber Reinforced Concrete, 1988.
12. Nawy, E. G., “Fiberglass Reinforced Concrete Slabs and Beams”, *Journal of Structural Division, ASCE*, Vol.103, 1977, pp.421~404.
13. Yost, J. H., *Fiber Reinforced Plstic Grids for Structural Reinforcement of Concrete Beams*, Ph.D thesis, University of New Hampshire, USA, 1983.

요 약 최근 콘크리트 열화와 같은 문제를 근본적으로 해결하기 위해 고내구성을 보유한 콘크리트구조물의 장수명화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있는 가운데, 신설 구조물로의 철근대체 FRP rebar를 적용한 고내구성 콘크리트구조물에 대한 연구·개발 및 활용이 점차 증가되는 추세이다. 이에 대해 콘크리트구조물의 경제적인 측면에서 적용 가능한 FRP rebar로서는 GFRP rebar가 주목을 받고 있으며 그 사용성 또한 증대되고 있다. 하지만 GFRP rebar로 보강된 콘크리트구조물에 대한 휨모멘트 성능은 이미 그 우수성이 구명되어 있으나 GFRP의 단점 중 하나인 처짐에 대한 사용성 측면은 개선되어야 할 점으로 지적되고 있다. 본 연구에서는 개발된 이형 GFRP rebar로 보강 콘크리트 보 구조물의 처짐 거동 예측을 위해 기존의 유효단면이차모멘트 제안식들과 비교 분석을 실시하였으며, 그 결과 기존의 유효단면이차모멘트 산정식은 균열모멘트 이후 극한모멘트의 50% 수준까지의 유효단면이차모멘트는 비교적 정확히 예상할 수 있었으나 이후에는 실제 유효단면이차모멘트보다 다소 높은 값을 나타냄으로써 최종 파괴시까지의 처짐량을 과소평가하는 것으로 분석되었다. 따라서 본 연구에서는 탄성계수 환산비를 적용한 보강비를 사용한 Toutanji et al. (2000)의 유효단면이차모멘트 제안식을 바탕으로 이형 GFRP rebar로 보강된 콘크리트보에 대한 유효단면이차모멘트 제안식을 도출하였으며, 그 결과 제안된 식을 적용하여 각 시험체의 시험데이터와 비교 분석을 통하여 최종 파괴시까지의 하중-처짐관계를 비교적 정확히 예측할 수 있는 것으로 분석되었다.

핵심용어 : 이형 GFRP rebar, 내구성, 유효단면이차모멘트, 사용성