

# FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 처짐예측

## Deflection Prediction of Concrete Beams Reinforced with Fiber Reinforced Polymer(FRP) Bars

김재생\*      서대원\*\*      한범석\*\*\*      안종문\*\*\*\*      신성우\*\*\*\*\*      박영환\*\*\*\*\*

Kim, Chae-Saeng Seo, Dae-Won Han, Beom-Seok Ahn, Jong-Mun Shin, Sung-Woo Park, Young-Hwan

### ABSTRACT

Concrete beams reinforced with fiber reinforced polymer (FRP) bars exhibit large deflection and crack width as compared to concrete beams reinforced steel due to modulus of elasticity of FRP bars. Current design code for prediction and crack width developed in concrete structures reinforced with steel bars may not be used for concrete beams reinforced with FRP bars.

Thus a number of researcher have attempted to propose modifications to the ACI 318 empirical equation for estimating the effective moment of inertia of reinforced concrete beams. Others used numerical method to calculate the deflection. The purpose of this paper is to evaluation of methods of ACI 440.1 R-01, ISIS Canada design manual, and others for predicting deflection for glass fiber reinforced polymer reinforced concrete beams.

### 1. 서론

FRP 보강근은 철근의 부식에 대한 근본적인 대책으로서 경량, 고내구성, 높은 인장강도와 같은 재료역학적 장점들을 갖고 있다. 그러나 그림 1과 같이 FRP 보강근의 낮은 탄성계수와 항복점과 소성구간이 없는 역학적 특성으로 인하여 구조부재에 사용할 때 기존의 철근콘크리트 부재와는 다른 거동을 나타내기 때문에 이에 대한 고려가 필요하다. 일반적으로 FRP 보강근의 낮은 탄성계수는 부재의 처짐을 크게 하며, 이에 따라 구조부재로서 사용성에 문제가 발생할 수 있다. 또한 FRP 보강근의 높은 인장강도로 인하여 그림 2와 같이 균형보강비가 철근을 사용할 때에 비하여 1/7~1/10로 낮아지며, 이에 따른 파괴양상 및 거동특성을 고려하여야 한다. 따라서 FRP 보강근을 사용한 구조부재의 정확한 처짐량의 예측이 구조설계에 필요하며, 이러한 거동예측에 대한 연구가 미국, 캐나다 등 해외에서 진행되어 왔다.

그러나 국내의 경우 FRP 보강근을 사용한 구조부재에 대한 기준이 없으며, 실제 적용을 위한 연구가 부족하여 부재의 거동을 평가 및 예측하기 위한 연구가 필요하며, 기존 제안식들의 검증이 필요한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 FRP 보강근을 사용한 부재의 정확한 구조적 거동을 분석하고, 실제 구조물에 적용하기 위하여 제안된 ACI 440.1R-01, ISIS Canada design manual, 그리고 선행 연구자들의 제안식들을 FRP 보강근을 사용한 휨부재 실험결과와 비교하여 각 식의 적정성을 평가하였다 또한, 콘크리트강도, 보강비, FRP 보강근의 종류에 따른 각 식의 적용특성들을 분석하여 국내 구조물에 FRP 보강근을 적용하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

\* 정회원, 한양대학교대학원 석사과정

\*\* 정회원, 한양대학교대학원 박사과정

\*\*\* 정회원, 한양대학교 친환경건축연구센터 연구조교수

\*\*\*\* 정회원, 안산1대학 건축설계과 전임강사

\*\*\*\*\* 정회원, 한양대학교 건축학부 교수

\*\*\*\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 수석연구원

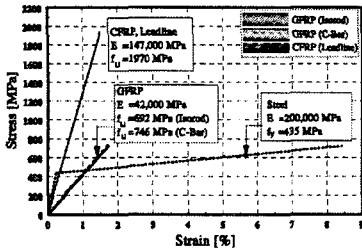


그림 1. FRP보강근의 재료성질<sup>1)</sup>

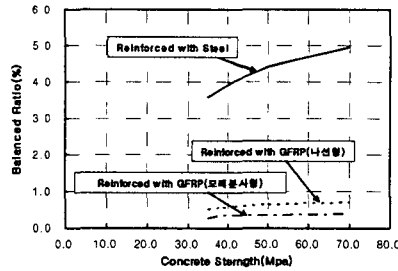


그림 2. 균형보강비의 비교



그림 3. 실험체 설치

## 2. 구조실험

FRP 보강근을 사용한 휨부재의 처짐을 평가하기 위하여 보강비 및 콘크리트 강도, FRP 보강근의 종류를 주요변수로 하여 그림 3과 같이 구조실험을 수행하였다. 사용된 FRP보강근은 Aslan사의 나선형(helical) GFRP보강근과 모래분사형 GFRP 보강근을 사용하였으며, 나선형 보강근은 탄성계수 40.8GPa, 인장강도는 690MPa이고, 모래분사형 보강근은 탄성계수 37GPa, 인장강도 898MPa이었다. 사용된 콘크리트는 각각 설계강도 30MPa, 50MPa 두 가지 종류를 사용하였다. 표 1은 각 실험체의 특성 및 실험결과를 나타내고 있다. 표 1에서와 같이 균형보강비 이하의 실험체들에서는 FRP파단에 의한 매우 급격한 파괴양상을 나타내었다. 그러나 균형보강비 이상의 FRP 보강근이 보강된 실험체들에서는 콘크리트 압축측의 파괴에 의하여 실험이 종료되었고 상대적으로 안정적 거동을 나타내었다.

표 1. 실험체일람 및 실험결과

실험체명	크기 (b×d×l)	보강근	$f_{ck}$ (MPa)	전단스팬비 (a/d)	보강비 ( $\rho$ , %)	$\rho/\rho_{fb}$	최대하중 (kN)	최대변위 (mm)	파괴모드
FB-2	300mm × 375mm × 4000mm	GFRP (Aslan)	30	3.4	0.24	0.46	114.9	39.8	FRP 파단
FB-3					0.36	0.70	185.3	45.3	FRP 파단
FB-4					0.48	0.93	209.8	56.1	FRP 파단
FB-6					0.72	1.39	285.9	53.3	콘크리트 압괴
FB-8					0.96	1.86	371.0	63.0	콘크리트 압괴
HFB-3			0.36		0.57	155.4	40.2	FRP 파단	
HFB-4			0.48		0.76	198.4	45.2	FRP 파단	
HFB-6			0.72		1.14	334.1	54.2	FRP 부착파괴	
HFB-8			0.96		1.51	363.4	56.8	콘크리트 압괴	
HFB-10			1.27		2.00	365.6	43.0	콘크리트 압괴	
NFB-2	300mm × 375mm × 4000mm	GFRP (모래분사형)	30	3.4	0.24	0.90	130.7	115.1	FRP 부착파괴
NFB-3					0.36	1.36	202.0	124.7	FRP 부착파괴
NFB-4					0.48	1.81	243.8	125.8	FRP 부착파괴
NFB-6					0.72	2.71	353.1	140.6	콘크리트 압괴
NFB-8					0.96	3.61	393.5	121.9	콘크리트 압괴

## 3. 처짐식 평가

### 3.1 ACI Committee 440 모델<sup>2)</sup>

ACI 318<sup>3)</sup>에서는 처짐을 계산하기 위한 보의 유효단면이차모멘트를 Branson의 균열후의 처짐계산식에 기초하여 식(1)과 같이 제안하고 있다.

$$I_e = \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 I_g + \left[ 1.0 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (1)$$

그러나 식 (1)은 철근 콘크리트 부재에 대한 경험식으로서 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 부재에 적용시에는 FRP 보강근의 재료적 특성을 반영하지 못하고 처짐을 과소평가하는 경향을 나타내었다. 따라서, ACI 440에서는 기존의 철근콘크리트의 처짐에 대한 Branson의 식<sup>3)</sup>을 수정하여 다음과 같은 식을 제안하고 있

다. 이 식은 두 개의 경험적 계수  $\alpha$ ,  $\beta$ 를 적용하여 FRP 보강근의 낮은 탄성계수와 FRP 보강근의 부착특성을 고려하였다.

$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 \beta_d I_g + \left[1.0 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right] I_{cr} \leq I_g, \quad \beta_d = \alpha \left(1 + \frac{E_f}{E_s}\right) \quad (2)$$

여기서,  $M_a$  : 최대휨모멘트,  $M_{cr}$  : 단면에서의 균열모멘트,  $I_g$  : 단면의 2차모멘트,  $I_{cr}$  : 단면의 균열 2차모멘트

그림 4는 실험결과와 ACI 440의 제안식에 의한 처짐결과를 비교하고 있다. 그림 3(a),(b)에서와 같이 나선형표면처리를 한 GFRP 보강근을 사용한 FB, HFB 실험체들의 경우 비교적 정확한 처짐예측을 하였으며, 균형보강비이상 보강비가 증가할수록 오차가 줄었다. 그러나 모래분사형 GFRP 보강근을 사용한 NFB 실험체들은 그림 3(c)에 나타난 바와 같이 오차가 크게 발생하였으며, 이는 나선형 GFRP 보강근에 비해 탄성계수가 작고, 표 1의 파괴모드에서 기술한바와 같이 부착파괴가 발생하여 처짐이 크게 발생한 때문으로 판단된다.

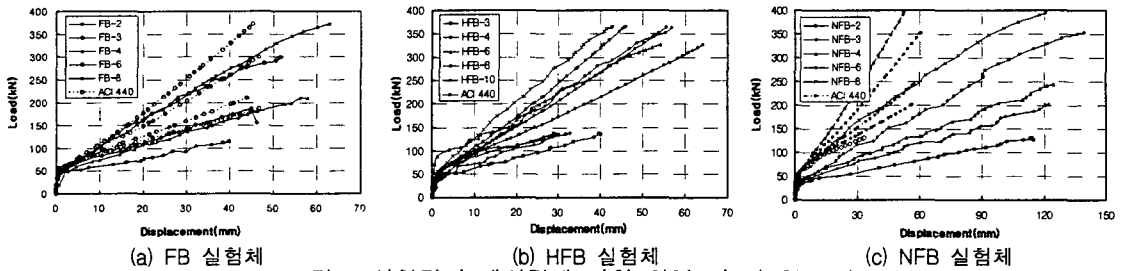


그림 4 실험값과 해석값에 의한 처짐 비교(ACI 440)

### 3.2 ISIS Canada 모델<sup>4</sup>

식 (2)에서의 계수들이 제한된 실험데이터에 근거한 경험식으로 제안된 부착계수  $\alpha$  값 0.5는 GFRP 단순지보에 대한 실험에서 얻은 값으로서 다양한 하중조건과 경계조건을 반영하지 못할 우려가 있으므로 CEB-FIP 콘크리트모델에서 유도된 식으로 ISIS Canada design manual에서는 식 (3)과 같이 유효 단면이차모멘트식을 제안하였다.

$$I_e = \frac{I_g I_{cr}}{I_{cr} + \left[1 - 0.5 \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^2\right] (I_g - I_{cr})} \quad (3)$$

그림 5는 식(3)에 의한 해석값과 실험값을 비교하고 있으며, 식(2)에 의해 얻은 처짐에 비해 큰 값을 나타내며 보다 정확한 결과를 나선형 GFRP 보강근실험체들에서 얻을 수 있었다. 그러나 모래분사형 GFRP보강근을 사용한 실험체에서는 식(2)에 의한 결과보다 큰 차이를 나타내었다. 그러나 ACI 제안식인 식 (2)를 적용한 경우보다 오차가 줄어 재료의 성질에 대한 변화를 보다 잘 반영하는 것으로 판단된다.

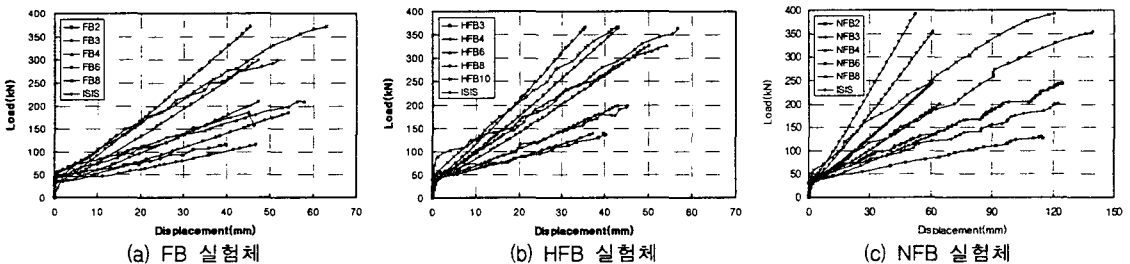


그림 5 실험값과 해석값에 의한 처짐 비교(ISIS Canada)

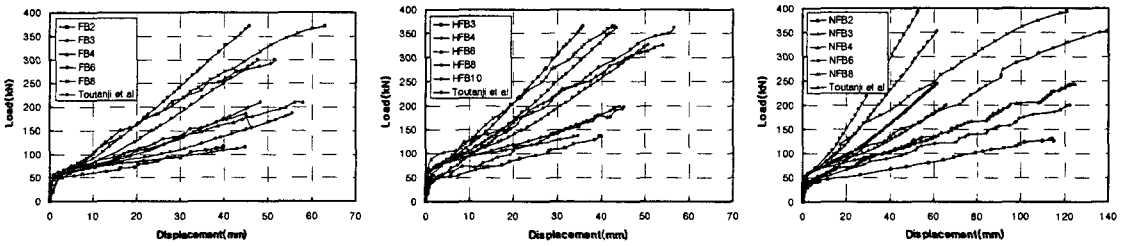
### 3.3 Toutanji, Saafi<sup>5</sup>

Toutanji와 Saafi는 식(4)와 같은 방법에 의해 GFRP 보강근을 사용한 실험체들에서 보다 정확한 처짐값을 예측하였다.

$$\frac{E_f}{E_s} \rho_f < 0.3, I_e = \left[ \frac{M_{cr}}{M_a} \right]^6 - \frac{10 \rho_f E_f}{E_s} I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^6 - \frac{10 \rho_f E_f}{E_s} \right] I_{cr} \leq I_g \quad (4.a)$$

$$\frac{E_f}{E_s} \rho_f \geq 0.3, I_e = \left[ \frac{M_{cr}}{M_a} \right] I_g + \left[ 1 - \left( \frac{M_{cr}}{M_a} \right)^3 \right] I_{cr} \leq I_g \quad (4.b)$$

이 식을 적용하여 처짐을 비교한 결과를 그림 6에 나타내었다. 그림에서와 같이 대체로 FB, HFB 실험체들의 실험결과와 유사한 값을 나타내고 있으며, 상대적으로 일반강도 실험체인 FB 실험체에서 보다 양호한 결과를 나타내었다. 모래분사형 실험체의 경우는 부착파괴로 인한 처짐과 균열의 증가로 인하여 큰 오차를 나타내었다.



(a) FB 실험체 (b) HFB 실험체 (c) NFB 실험체  
그림 6 실험값과 해석값에 의한 처짐 비교(Toutanji, Saafi)

#### 4. 결론

FRP 보강근을 사용한 휨부재는 재료적 특성으로 인하여 철근콘크리트 부재에 비하여 큰 처짐 및 균열을 나타내며 이의 정확한 평가를 위하여 FRP 보강근을 사용한 보의 구조실험결과와 기존 연구자들의 제안된 제안식을 검토하였다. ACI 440의 제안식은 초기에는 정확한 결과를 나타내었으나, 균열이 크게 진전된 이후의 최대처짐에서는 다소 오차를 나타내었으며, 탄성계수가 작은 모래분사형 FRP 보강근의 사용시 오차가 발생하였다. ISIS Canada의 제안식과 Toutanji, Saafi의 제안식의 경우 FRP 보강비, 콘크리트의 강도와 관계없이 대체로 실험결과와 유사한 처짐예측을 나타내었다. 기존의 제안된 제안식들은 균형보강비이상 보강비가 증가할수록, 콘크리트의 강도가 증가할수록 실험체들과의 비교에서 대체로 양호한 예측값을 나타내었다. 그러나 국내에서 실제구조물에 FRP 보강근을 사용한 구조부재의 적용을 위해서는 FRP 보강근의 형상 및 재료적 특성에 따른 정확한 처짐예측을 위한 식의 개발과 균열, 연성 등과 같은 다양한 구조적 거동에 대한 연구가 요구된다.

#### 감사의 글

이 연구는 공공기술연구회 2005 정책연구사업 "FRP 복합재료 보강재 개발 및 이를 활용한 콘크리트구조물 건설기술 개발"의 연구비 지원에 의한 결과의 일부이며, 과학기술부 우수연구센터육성사업의 지원으로 수행되었으며 (과제번호:R11-2005-056-01003-0), 지원에 감사드립니다.

#### 참고문헌

- H. A. Abdalla, "Evaluation of Deflection in Concrete Members Reinforced with Fiber Reinforced Polymer Bars", Composite Structures 56, 2002. pp.64~71
- ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bars, American Concrete Institute, 2001, pp.1023~34
- ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary(ACI 318-05)", American Concrete Institute, 2005, pp.112
- ISIS Canada "Reinforcing Concrete Structures with Fiber Reinforced Polymers", The Canadian Network of Centers of Excellence on Intelligent Sensing for Innovative Structures, 2001. 7
- Toutanji H, Saafi M., "Flexural Behavior of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) Bars", ACI Structural Journal, 2000. V.97, No.5, pp.712~719
- 신성우, 안종문, 한범석, 서대원, "FRP 보강근을 사용한 콘크리트보의 보강비 효과", 대한건축학회 논문집 제22 권 2호, 2006. 2