

## FRP-보강근 콘크리트 부재의 처짐 거동

최봉섭<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>청운대학교 건축공학과

### Deflection Behavior of Concrete Members Reinforced with FRP Bars

Bong-Seob Choi<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, Chungwoon University

**요 약** ACI 440.1R-06 설계지침에서는 FRP-보강근 콘크리트 부재의 처짐 계산을 위해 Branson에 의해 제안된 유효 단면2차모멘트를 수정·보완하여 제시하고 있다. 그러나 다수의 연구자들은 아직까지도 적용범위의 적절성에 대해 의문을 제기하고 있다. 이에 본 연구에서는 12개의 장방형 단면과 9개의 T형단면의 FRP-보강근 콘크리트 시험체를 제작하여 처짐 실험을 통해 얻어지는 실험값과 제안된 이론식에 의해 얻어진 계산값을 비교 분석하여 합리적인 처짐 설계를 위한 기초자료를 제안하고자 하였다. 결과로서 FRP-보강근 콘크리트 보의 처짐값은 장방형단면에서는 계산값이 실험값 보다 과소평가 되었으나, T형단면에서는 계산값이 실험값 보다 다소 과대평가 되어 나타났다.

**Abstract** The effective moment of inertia revising the expression proposed by Branson has been used in ACI 440.1R-06 design guide for calculating deflections of FRP-reinforced concrete members. However, its adequacy has been questioned by several researchers. The propose of this study is to provide fundamental data for the rational design of deflection by the comparison of the experimental results obtained from twelve specimens with rectangular section and nine specimens with T-shaped section to the theoretical results. As a result, it found that calculated results for specimens with rectangular section were underestimated comparing to test results, while calculated results for specimens with T-shaped section were overestimated comparing to test results.

**Key Words** : Deflection, Fiber Reinforced Polymer, Effective Moment of Inertia, Concrete, Tensile Stiffness, Modulus of Elasticity

### 1. 서론

건축구조물에 가장 많이 사용되고 있는 철근을 대체할 재료로서 비금속체인 FRP (Fiber Reinforced Polymer) 보강근이 대안으로 제시되고 있다. 이는 경량이면서 탁월한 내부식성과 내화학성 뿐만 아니라 높은 인장강도를 갖고 있어 콘크리트 구조물의 고성능화 및 장수명화에 기여할 수 있기 때문이다. 현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 리바(Reber)의 경우, 국내외적으로 활발한 연구 개발도 이루어지고 있다. 국내의 경우도 이러한 세계적인

추세에 맞추어 FRP를 활용한 콘크리트 구조물의 성능향상 및 유지관리를 위한 연구 및 활용도가 점차 증가하고 있으나, 이에 대한 국내의 설계기준은 아직까지 준비되지 못한 실정이다.

FRP-보강근은 이미 언급된바와 같이 철근에 비해 많은 장점들을 갖고 있으나 탄성계수의 경우는 철근보다 상대적으로 낮은 값을 갖고 있어 FRP-보강근을 사용한 콘크리트 부재의 처짐은 예상보다 크게 나올 수 있다. 근래에 개정된 ACI 440.1R-06[1] 설계지침에서도 처짐 계산을 위해 제시된 유효단면2차모멘트의 경우, 기존의

본 논문은 2009년 한국연구재단 일반연구지원사업(2009-0077363)으로 수행된 연구결과의 일부임.

\*교신저자 : 최봉섭 (bschoi@chungwoon.ac.kr)

접수일 10년 11월 23일

수정일 (1차 11년 01월 19일, 2차 11년 02월 09일)

게재확정일 11년 02월 10일

Branson[2]이 제시한 유효단면2차모멘트에 기초하여 FRP-보강근의 영향을 고려한 감소계수,  $\beta_d$ 를 적용하여 사용되고 있다. 그러나 Ospina and Nanni[3]는  $\beta_d$ 의 식이 장방형단면의 실험에 근거하여 보정된 것이기 때문에 T형단면의 보에는 적용하기 어렵다는 것을 지적하고 있다. 또한 Bischoff[4]는 FRP-보강근의 경우 철근에 비해 인장강성의 효과가 감소되어 나타내는데 Branson의 본래 식은, 특히 저보강된 보의 경우 인장강성효과를 과대평가하는 경향이 있어 FRP-보강근 부재에 맞는  $\beta_d$ 의 수정을 제기하고 있다.

이에 본 연구에서는 철근을 포함한 FRP-보강근 콘크리트 보의 치짐 실험을 통해 얻어진 실험값과 제안된 설계기준식으로 얻어진 계산값을 비교·분석하여 설계식들의 적용범위와 그에 따른 문제점들을 파악함으로써 철근을 포함한 FRP-보강근 콘크리트 보의 치짐을 통합적으로 예측하는데 도움이 되는 기초자료를 제공 하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 계획

본 실험에서는 FRP-보강근 콘크리트 보를 철근콘크리트 보와 상대 비교를 통하여 치짐의 거동 특성을 파악하고자 표 1에서 보는 바와 같이 총 21개의 시험체를 제작하였다. 콘크리트의 설계강도는 30MPa로, FRP-보강근은 국내의 D사에 제작된 GFRP, AFRP, CFRP의 세 종류를 선택하였고 단면의 형태는 장방형과 T형으로 계획되었다. 이는 ACI 440.1R-06의 유효단면2차모멘트 제안식이 단지 장방형 FRP-보강근 콘크리트 보들에 대한 제한적인 실험 결과에 근거해서 제시되었기 때문에 주요 변수로 하였다.

또한 시험체 설계에 적용된 보강근비는 철근과 FRP-보강근의 단면적을 동일하게 하여 철근콘크리트의 경우는 균형 철근비( $\rho_s$ ) 아래로 보강되어 인장파괴거동을 유도하였고 FRP-보강근 콘크리트의 경우는 ACI 440.1R-06에서 권장하는 대로 균형보강근비( $\rho_{fb}$ ) 보다 크게 보강되어 콘크리트 압축파괴거동을 유도 하였다. 전단 스패닝( $a/d$ )는 순수 휨거동을 유도하기 위하여 대략 4.0으로 하였고, T형단면의 웹폭에 대한 플랜지폭의 비는 2.8로 계획하였다.

[표 1] 시험체 일람표

시험체명	단면 형태	보강근	$\rho$	$\rho/\rho_b$	보강근 개수 및 직경
RST-2	장방형	Steel	0.004	0.13	2-D13
RST-4			0.008	0.25	4-D13
RST-8			0.017	0.53	8-D13
RFG-2		GFRP	0.004	2.09	2- $\Phi$ 13
RFG-4			0.008	4.18	4- $\Phi$ 13
RFG-8			0.017	8.89	8- $\Phi$ 13
RFA-2		AFRP	0.004	2.03	2- $\Phi$ 13
RFA-4			0.008	4.06	4- $\Phi$ 13
RFA-8			0.017	8.64	8- $\Phi$ 13
RFC-2		CFRP	0.004	2.10	2- $\Phi$ 13
RFC-4			0.008	4.20	4- $\Phi$ 13
RFC-8			0.017	8.93	8- $\Phi$ 13
TST-3	T형	Steel	0.003	0.09	3-D16
TST-6			0.007	0.22	6-D16
TST-8			0.01	0.3	8-D16
TFG-3		GFRP	0.003	1.36	3- $\Phi$ 16
TFG-6			0.007	3.18	6- $\Phi$ 16
TFG-8			0.01	4.54	8- $\Phi$ 16
TFC-3		CFRP	0.003	1.30	3- $\Phi$ 16
TFC-6			0.007	3.04	6- $\Phi$ 16
TFC-8			0.01	4.35	8- $\Phi$ 16

\* 시험체명 설명 (Identification Code) : ABB-X

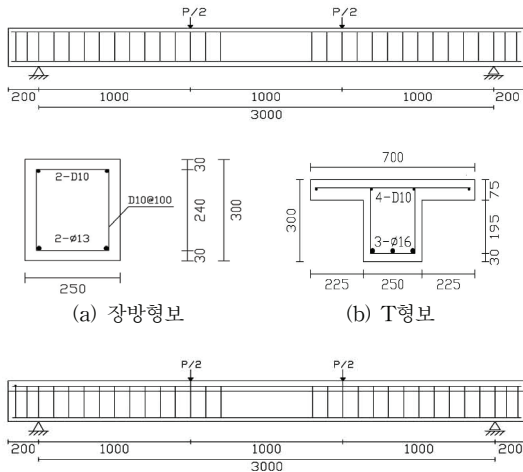
A = R : 장방형, T : T형 BB = ST : 철근, FG : GFRP,  
FA : AFRP, FC : CFRP X = 보강근 개수

### 2.2 시험체 제작

보 제작에 사용된 콘크리트는 28일 압축강도 30MPa의 레미콘 제품을 사용하였으며 평균압축강도는 31.2MPa로 나타났다. 전체 21개의 시험체 중 12개의 보들은 폭 250mm, 깊이 300mm의 장방형 단면으로 하였고, 9개의 보들은 플랜지폭 700mm, 웹폭 250mm 그리고 깊이 300mm의 크기를 갖는 T형단면으로 하였으며, 경간 길이는 모든 시험체들이 3000mm의 동일한 길이로 제작하였다. 보강근의 경우는 장방형보와 T형보에 각각 직경 13mm와 16mm의 주근을 배근하였고, 또한 전단보강을 위해 상부근과 전단보강근에는 직경 10mm의 철근을 사용하였다. 여기서 상부근은 압축철근의 역할보다는 전단보강근의 배근을 위한 보조철근 용도로 사용되었다. 그림 1에서는 시험체의 치수 및 보강근 상세를 보여준다. 표 2에서는 사용된 보강근의 역학적 성질들을 요약하여 보여주고 있다.

### 2.3 재하 및 측정방법

치짐 거동을 파악하기 위해 재하 방법은 최대용량 1,000kN의 액츄에이터(Actuator)를 사용하여 단순지지 시험체를 4점가력 하였고, 중앙하부에 200mm의 변위까지 측정할 수 있는 선형 변위측정기(LVDT)를 설치하여 각 단계별 하중과 변위를 측정하였다. 또한 변형률은 스트레인게이지를 콘크리트의 압축측 상단과 인장철근에 각각 2~3개씩 설치하여 측정하였다.



[그림 1] 시험체 치수 및 보강근 상세

[표 2] 보강근의 역학적 성질

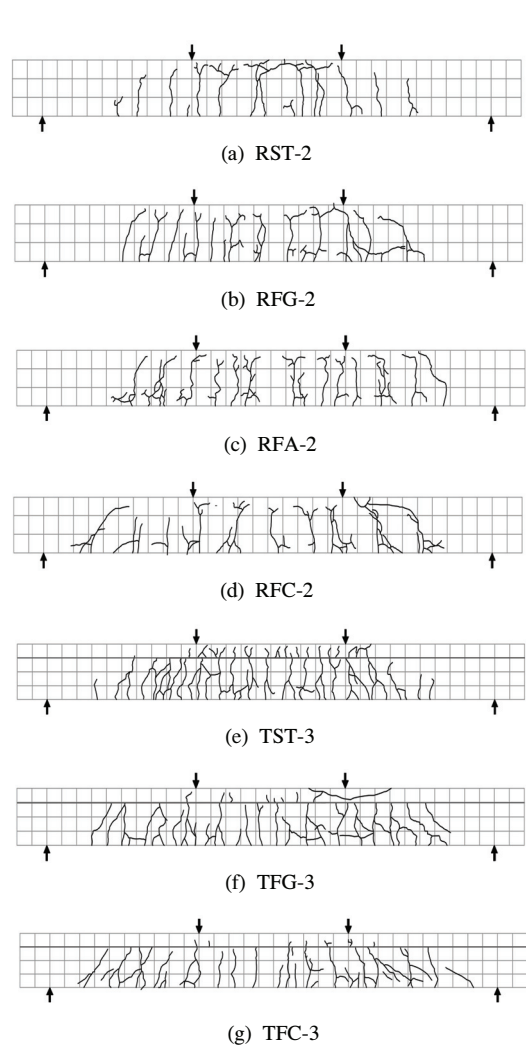
보강근 종류	직경 (mm)	$f_y$ (MPa)	$E_s$ (GPa)	$f_{tu}$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	단면적 (mm <sup>2</sup> )
Steel	D13	409	202	-	-	126.7
	D16	400	199			198.6
GFRP	φ13	-	-	1,194	47.7	126.6
	φ16	-	-	1,038	40.8	200
AFRP	φ13	-	-	1,318	60.8	126.6
CFRP	φ13	-	-	1,842	120.8	126
	φ16	-	-	1,580	109.8	199

## 3. 실험결과 및 분석

### 3.1 균열양상 및 파괴거동

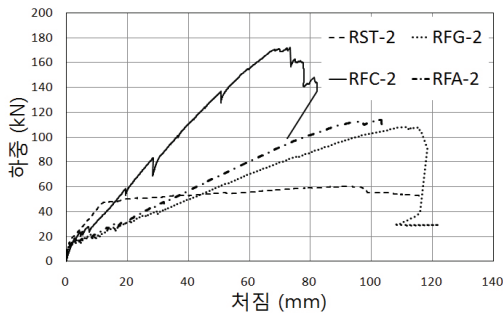
그림 2은 대표적으로 장방형보의 경우 보강근비,  $\rho = 0.004$ 의 시험체들과 T형보의 경우 보강근비,  $\rho = 0.003$ 의 시험체들의 최종파괴 양상을 보여주고 있다. 철근콘크리트의 경우는 초기하중부터 파괴하중에 도달 할 때까지

순수모멘트 구간과 비슷하게 대부분 휨균열로 이루어져 있으나 FRP-보강근 콘크리트의 경우 초기하중에는 순수모멘트 구간과 비슷하게 휨균열이 발생 되었으나 하중이 증가하면서는 전단응력에 의한 사인장균열과 함께 번져나간 양상을 보여주었다. 또한 평균 균열간격의 경우 초기하중에서는 철근콘크리트 보와 FRP-보강근 콘크리트 보와의 차이가 크게 나타나지 않았으나 사용하중 단계를 지나면서 부터 FRP-보강근 콘크리트 보의 평균균열간격이 철근콘크리트 보 보다 좁게 나타났다.

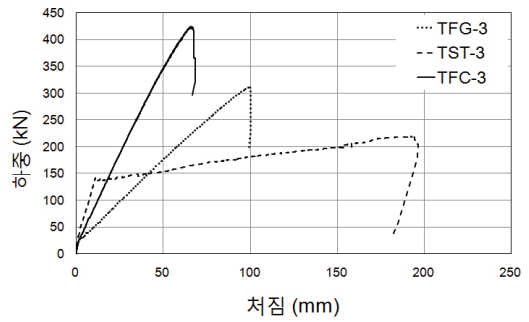


[그림 2] 시험체들의 최종 파괴양상

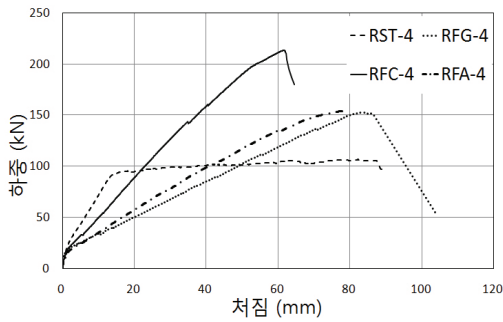
이는 시험체를 설계할 때 설계기준에서 권장한대로 철근콘크리트 보와 FRP-보강근 콘크리트 보를 각각 인장파괴와 압축파괴를 유도할 수 있도록 계획하였기 때문이다. 결과적으로 최대 파괴하중 크기에서 FRP-보강근 콘크리트



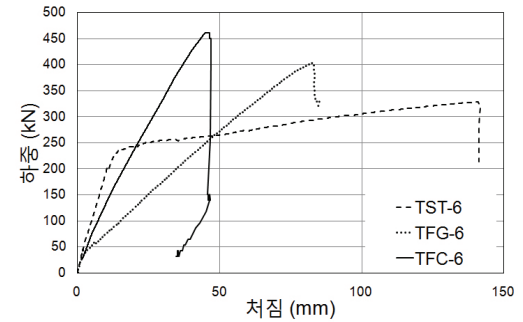
(a)  $\rho = 0.004$



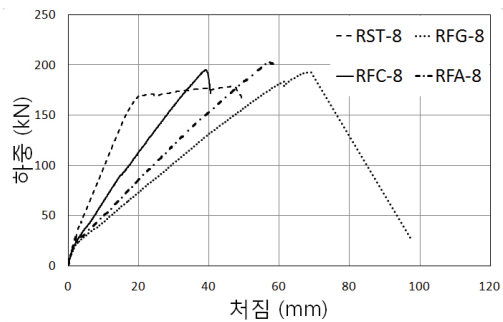
(a)  $\rho = 0.003$



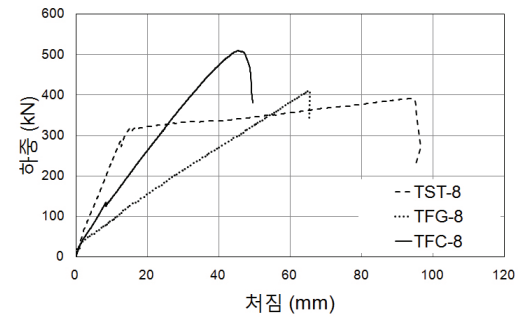
(b)  $\rho = 0.008$



(b)  $\rho = 0.007$



(c)  $\rho = 0.017$



(c)  $\rho = 0.01$

[그림 3] 장방형단면 시험체의 하중-처짐 곡선 비교

[그림 4] T형단면 시험체의 하중-처짐 곡선 비교

트보가 철근콘크리트 보 보다 약 1.8~2.8배 정도 크게 나타났고, 또한 압축파괴가 일어날 때 까지 충분히 휨균열과 사인장균열이 차례로 진행되면서 균열 간격도 보다 촘촘하게 보여주었다. 그러나 철근콘크리트 보는 상대적으로 작은 파괴하중을 갖고 있기 때문에 거의 휨균열로만 진행되면서 인장파괴가 일어났기 때문에 균열간격도 상대적으로 넓게 나타났다.

### 3.2 하중-처짐 관계

그림 3와 4는 전형적인 각 시험체에 대한 하중-처짐 관계를 보여준다. 그림 3에서는 장방형 단면의 시험체들에 대해, 보강근비 별로 철근, GFRP, AFRP, 그리고 CFRP-보강근 콘크리트 시험체들의 하중-처짐 곡선들을 비교하였다. 최대강도는 장방형단면의 모든 시험체에서 CFRP, AFRP, GFRP 그리고 철근 콘크리트 시험체 순으로 크게 나타나고 있으나 철근콘크리트 시험체에 대한 FRP-보강근 콘크리트 시험체의 평균최대강도의 비는 보강근비가 크면 클수록 줄어드는 경향을 보여주고 있다.

즉 보강근비( $\rho$ )가 0.004, 0.008 그리고 0.017로 증가할 때 평균 최대 강도의 비는 2.4, 1.6 그리고 1.2로 줄어들었다. 또한 보강근비 별로 철근콘크리트 시험체 최대강도의 50% 수준인 사용하중( $P_{scr}$ ) 하에서 철근콘크리트와 FRP-보강근 콘크리트의 처짐값을 비교한 결과 철근에 비해 FRP-보강근이  $\rho=0.004(P_{scr}=30\text{kN})$ 인 경우 1.5~3.0배,  $\rho=0.008(P_{scr}=50\text{kN})$ 인 경우 1.9~3.8배 그리고  $\rho=0.017(P_{scr}=100\text{kN})$ 인 경우 1.7~2.8배의 큰 처짐을 보여주고 있다.

그림 4에서는 T형단면의 시험체들에 대한 보강근비 별로 철근, GFRP 그리고 CFRP-보강근 콘크리트 시험체들의 하중-처짐 곡선들을 비교하였다. 대체적으로 보강근 종류별 강도의 크기의 순서나 보강근비 크기에 따라 철근콘크리트 시험체에 대한 FRP-보강근 콘크리트의 평균 최대강도비가 줄어드는 경향은 장방형 단면의 시험체들과 유사한 거동을 보여주고 있다. 즉  $\rho=0.003, 0.007$  그리고 0.01로 증가할 때 평균 최대강도의 비는 1.7, 1.5 그리고 1.2로 줄어들었다. 장방형단면과 마찬가지로 철근콘크리트 시험체 최대강도의 50% 수준인 사용하중 하에서 철근콘크리트와 FRP-보강근의 처짐값을 비교한 결과 철근에 비해 FRP-보강근이  $\rho=0.003(P_{scr}=100\text{kN})$ 인 경우 CFRP, GFRP순으로 각각 1.5와 3.0배,  $\rho=0.007(P_{scr}=150\text{kN})$ 인 경우, 1.3과 1.7배, 그리고  $\rho=0.01(P_{scr}=200\text{kN})$ 인 경우 1.9와 4.0배정도 크게 나타났다.

### 3.3 기존 제안식 결과와의 비교 및 분석

#### 3.3.1 기존 제안식 고찰

ACI 318-08 설계기준[5]에서는 철근콘크리트 부재의 처짐 계산을 위해서 1965년 Branson[2]에 의해 제안된 유효단면2차모멘트,  $I_e$ 를 사용하고 있다.

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

여기서,  $m=3$

위 식은 부재에 균열이 발생 되었을 때 휨강성의 손실과 경간길이에 따른 강성의 차이를 고려하고 있고, 균열 단면2차모멘트에 대한 전단면2차모멘트의 비,  $I_g/I_{cr}$ 의 비가 3보다 작은 일반적인 철근비를 갖는 부재에 맞추어 제안 하였다. 따라서 최근의 연구[6,7,8]에서는, 철근비가 0.6% 이하의 부재의 경우 처짐값이 과소평가 된다는 것을 꾸준히 지적하고 있다.

ACI 440.1R-06의 설계지침에서는 FRP-보강근 콘크리

트 부재의 처짐 계산을 위해 철근콘크리트 부재에 비해 상대적으로 낮은 인장강성의 영향을 고려하여 수정된 유효단면2차모멘트 식을 아래와 같이 제안하였다.

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

$$\text{여기서, } \beta_d = \frac{1}{5} \left(\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}\right) \leq 1.0$$

2006년에 재개정된 보정계수,  $\beta_d$ 는  $I_g/I_{cr}$ 의 비가 5~33범위의 GFRP와 CFRP-보강근 콘크리트 부재들의 실험 결과에 근거해서 제안된 것이다. 그러나 Bischoff[4]는 위 식(2)에 대해 식(1)을 기초해서 수정 보완하였기 때문에 식(1)이 갖는 단점을 극복하지 못하였고, 또한 보정계수,  $\beta_d$ 에서 사용된 균형 FRP-보강근비  $\rho_{fb}$ 의 잘못된 개념에 대해서 지적하고 있다.

Bischoff[6]는 스프링의 직렬연결 모델을 기존의 식(1)에 적용함으로써 강성 보다는 연성의 평균값에 가중치를 적용하자는 생각으로 부터 아래와 같은 식을 제안하였다.

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

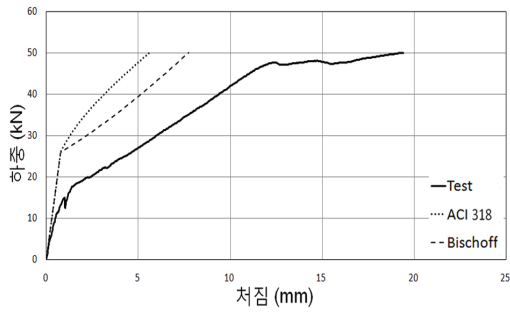
최근에 심중성 et al.[9]의 논문에서 GFRP- 보강근 콘크리트 보의 유효단면2차모멘트를 제안하였는데 이는 Toutanji et al.[10]이 제안한 모델을 수정 · 보완하는 것으로 기존의 연구자들의 실험 결과를 바탕으로 GFRP 보강근비와 탄성계수를 고려한 회귀분석을 통하여 식(1)의 지수  $m$ 과 극한 모멘트의 50% 이후의 하중 증가에 따른 처짐량을 고려한 식을 아래와 같이 제안하였다.

$$\frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} < 0.0025 \text{ 인 경우,}$$

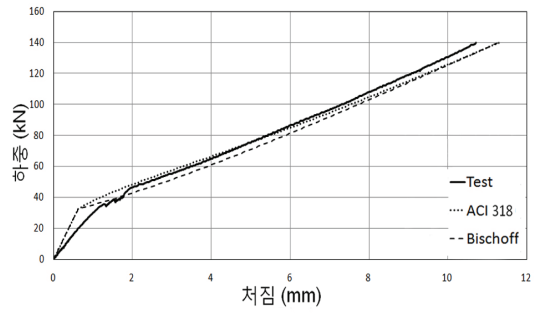
$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{6 - \frac{13\rho_{FRP}E_{FRP}}{E_s}} I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^{6 - \frac{13\rho_{FRP}E_{FRP}}{E_s}} + \left(\frac{M_a}{10M_{cr}}\right)^4\right) I_{cr} \leq I_g \quad (4)$$

$$\frac{E_{FRP}}{E_s} \rho_{FRP} \geq 0.0025 \text{ 인 경우,}$$

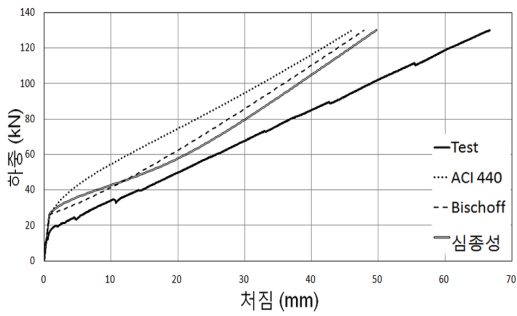
$$I_e = \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3 I_g + \left(1 - \left(\frac{M_{cr}}{M_a}\right)^3\right) I_{cr} \leq I_g \quad (5)$$



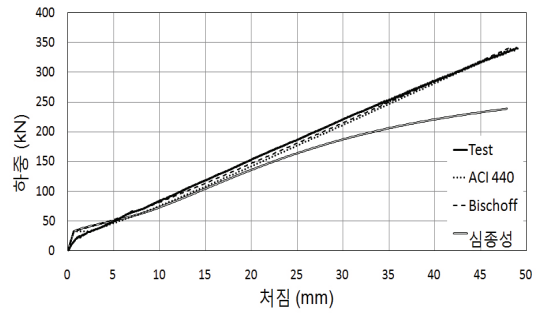
(a) RST-2 ( $n\rho=0.028$ )



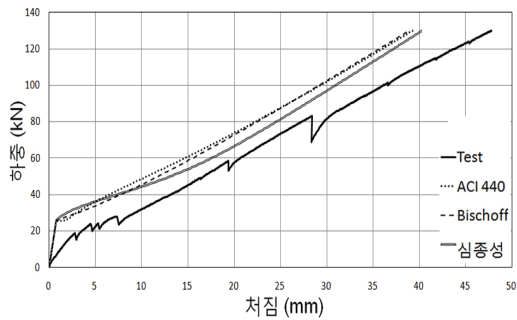
(a) TST-3 ( $n\rho=0.021$ )



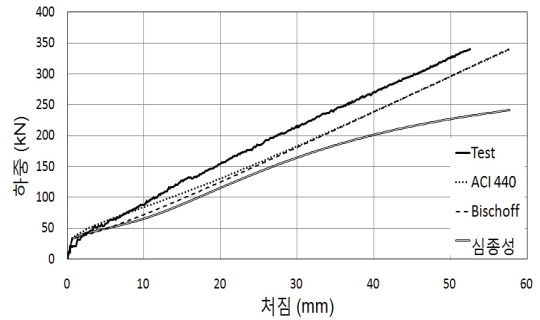
(b) RFG-4 ( $n\rho=0.013$ )



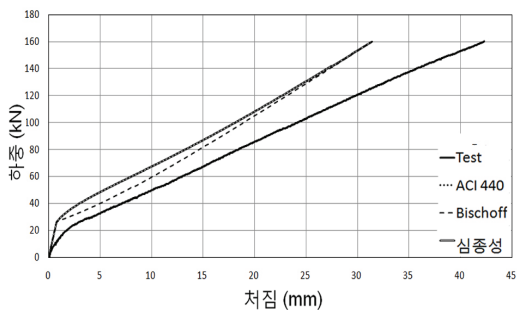
(b) TFC-3 ( $n\rho=0.012$ )



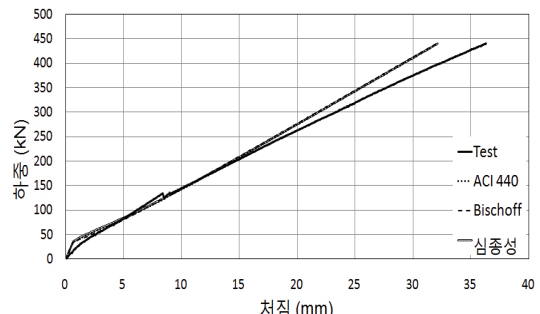
(c) RFC-2 ( $n\rho=0.016$ )



(c) TFG-8 ( $n\rho=0.014$ )



(d) RFA-8 ( $n\rho=0.036$ )



(d) TFC-8 ( $n\rho=0.038$ )

[그림 5] 장방형 단면 시험체의 처짐에 대한 실험값과 이론값 비교

[그림 6] T형단면 시험체의 처짐에 대한 실험값과 이론값 비교

### 3.3.2 결과들의 비교 분석

그림 5과 6은 실험으로부터 얻어진 처짐값과 이론식에 의해 계산된 처짐값을 최대하중의 80%범위의 사용하중에서 비교한 그래프이다. 특히 같은 이론식으로 비교하였을 때 장방형단면 시험체와 T형단면 시험체의 처짐 거동을 서로 교차 비교하기위한 목적으로 등가계수,  $n$  ( $= E_s/E_c$  또는  $E_f/E_c$ )을 적용한 등가보강근비( $n\rho$ )를 사용하여 등가보강근비가 비슷한 대표적인 네 쌍의 시험체들을 등가보강근비 별로 보여주었다. 다만 철근콘크리트 시험체의 경우 적용 가능한 ACI 318의 식(1)과 Bischoff의 식(3)만을 이용하여 비교하였다.

장방형단면의 경우 이론식에 의해 계산된 값이 실험값에 비해 과소평가 되어있는 반면, T형단면의 경우는 일반적으로 과대평가되어있는 것을 살펴볼 수 있다. 특히 장방형단면의 경우 낮은 보강근비를 갖는 부재가 보다 과소평가되는 경향을 보여주고 있다. 이는 등가보강근비가 같은 경우 상대적으로 인장강성의 크기를 살펴볼 수 있는,  $I_g/I_{cr}$ 가 장방형단면에서 T형단면보다 1.5배 정도 크게 나타났기 때문이다. 이러한 결과는 인장강성의 효과를 실제 보다 과대평가하여 처짐을 과소평가 하는 결과를 초래한다. 따라서 처짐 설계 측면에서 본다면, 추후 제안되는 식은 T형단면의 결과와 마찬가지로 장방형단면에서도 처짐을 다소 과대평가 되도록 하는 것이 합리적인 설계일 것이다.

FRP-보강근의 장방형단면에서는 Bischoff의 식(3)과 심종성 et al.의 식(4)에 의해 계산된 결과가 ACI 440.1R-06의 식(2)를 이용하여 계산된 결과보다는 비교적 실험결과와 잘 일치하는 것을 보여주고 있으나, 그림 5(d)에서 보는 바와 같이 높은 보강근비를 갖는 경우 Branson 식과 같은 식(5)가 사용되어지기 때문에 처짐이 과소평가되어진다. FRP-보강근의 T형단면에서는 그림 6(d)에서 보여주는 바와 같이 세 이론식의 차이가 거의 나타나지 않았으나 그림 6 (b)와 (c)에서는 식(4)로부터 계산된 처짐값은 하중이 150kN 이상 되는 구간에서는 처짐이 상당히 과대평가 되는 것을 볼 수 있다.

이는 심종성 et al.의 식(4)가 장방형 GFRP-보강근 콘크리트 보에 한정해서 제안되었기 때문에 적용모멘트 ( $M_a$ )가 균열모멘트( $M_{cr}$ )의 10배 이상이 되면 두 번째 항의 값이 음(-)의 값이 되어 유효단면2차모멘트 값은 하중이 증가하면 증가할수록 0으로 수렴하고 결국 음(-)의 값을 갖게 되는 경우도 발생하게 된다. 따라서 하중을 높게 받을 수 있는 장방형이나 T형단면의 부재에서는 적용하기가 어려울 것으로 판단된다.

지금까지 살펴본바와 같이 제안식들을 철근이나 FRP-

보강근처럼 보강근의 종류와 장방형이나 T형과 같은 단면의 형상의 특성을 함께 반영하여 제안된 것이 아니기 때문에 설계 변수에 따라 적용범위가 제한적일 수 있다. 추후연구에서는 이러한 변수들의 영향을 고려한 합리적인 통합 처짐식을 제안할 필요성이 제기된다.

## 4. 결론

본 연구에서는 철근을 포함한 FRP-보강근 콘크리트 보의 처짐 실험을 통해 얻어진 실험값과 이론식을 사용하여 얻어진 계산값을 비교분석하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 모든 시험체에서 보강근비가 증가할수록 철근콘크리트 보에 대한 FRP-보강근 콘크리트 보의 평균최대강도의 비는 줄어드는 경향을 보여주는 반면, 철근콘크리트 시험체 최대강도의 50% 수준인 사용하중 하에 처짐값은 보강근비가 증가할수록 철근콘크리트 시험체에 비해 FRP-보강근 콘크리트 시험체가 대략 1.5배에서 4.0배까지 증가하는 것을 보여주었다.
2. 낮은 철근비를 갖는 장방형 철근콘크리트 보의 경우 계산된 처짐값이 과소평가되어 나타났으나, T형 단면 철근콘크리트 보의 경우, 실험값과 잘 일치하는 것으로 나타났다.
3. FRP-보강근 콘크리트 보는 등가보강근비가 같은 경우 장방형 단면에서의 처짐값은 계산값이 실험값보다는 과소평가 되었으나, T형단면에서는 계산값이 실험값보다 다소 과대평가되어 나타났다. 이는  $I_g/I_{cr}$ 의 비가 장방형단면의 시험체보다는 T형단면의 시험체에서 작게 나오기 때문이다.
4. 위의 결과로부터 Bischoff 식의 결과가 ACI 440.1R-06 식이나 심종성 et al. 식의 결과 보다는 실험결과에 보다 근접한 것을 보여주고 있으나 추후의 연구에서는 장방형 단면뿐만 아니라 보다 다양한 플랜지폭을 갖는 T형단면의 특성도 고려한 합리적이고 통합적인 처짐식의 필요성이 제기된다.

## 참고문헌

- [1] ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar (ACI 440.1R-06)". American Concrete Institute,

- Farmington Hills, Michigan, 44 pp., 2006.
- [2] Branson, D.E., "Instantaneous and Time-Dependent Deflection of Simple and Continuous Reinforced Concrete Beams", HPR Report No. 7, Part 1, Alabama Highway Dept. AL., 1965.
- [3] Ospian, C.E. and Nanni, A., "Current FRP-Reinforced Concrete Design Trend in ACI 440.1R", FRPRCS-8, Patras, Greece, 2007.
- [4] Bischoff, P.H., "Deflection Calculation of FRP Reinforced Concrete Beams Based on Modifications to the Existing Branson Equation", Journal of Composites for Construction, ASCE, V. 11, No. 1, pp. 4-14, 2007.
- [5] ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-08) and Commentary", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan. 465 pp., 2008.
- [6] Bischoff, P.H., "Effective Moment of Inertia for Calculating Deflections of Concrete Members Containing Steel Reinforcement and FRP- Reinforced Polymer Reinforcement," ACI Structural Journal, V. 104, No. 1, pp. 68-75, 2007.
- [7] Bischoff, P.H., "Reevaluation of Deflection Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars," Journal of Structural Engineering. ASCE, V. 131, No. 5, pp. 752-767, 2005.
- [8] Gilbert, R.I, "Discussion of Re-evaluation Prediction for Concrete Beams Reinforced with Steel and Fiber Reinforced Polymer Bars," by P.H. Bischoff, Journal of Structural Engineering, ASCE, V. 132, NO. 8, pp. 1328-1330, 2006.
- [9] 심중성, 오홍섭, 주민관, 임준현, "이형 GFRP Rebar 로 보강된 보의 유효단면이차모멘트 산정식 제안", 한국콘크리트학회 논문집, 20권 2호, pp.185-191, 2008.
- [10] Houssam, A. Toutanji, H. A. and Saffi, M., "Flexural Behaviour of Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber Reinforced Polymer(GFRP) Bars", ACI Structural Journal, V. 97, No. 5, pp. 712-719, 2000.

## 최 봉 섭(Bong-Seob Choi)

[정회원]



- 1983년 2월 : 인천대학교 건축공학과(공학사)
- 1994년 6월 : 뉴욕주립대 토목공학과(공학석사)
- 1998년 12월 : 펜실베니아주립대 토목공학과(공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 청운대학교 건축공학과 교수

<관심분야>

철근콘크리트구조, FRP콘크리트구조 등