

## 단기하중을 받는 FRP-보강근 콘크리트 보의 휨균열폭 특성

최봉섭\*

<sup>1</sup>청운대학교 건축공학과

### Characteristics of Flexural Cracking Widths in FRP-Reinforced Concrete Beams Subjected to Short-Term Loads

Bong-Seob Choi\*

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

**요약** 콘크리트 부재에서 FRP-보강근의 사용은 철근의 사용에 비해서 일반적으로 낮은 탄성계수와 부착성능으로 인하여 보다 넓은 균열폭을 초래 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 9개의 장방형보와 3개의 T형보로 구성된 총 12개의 시험체들로부터 4점가력 휨실험을 통하여 얻어진 균열폭 결과들과 기존 ACI 440.1R-06 제안식으로 계산된 결과들을 비교·분석하여 설계변수들이 균열폭에 미치는 영향과 적용 범위에 대한 문제점들을 파악하였다. 결과로서 주요 설계변수의 하나인 변동계수,  $k_b$  값은 0.6~1.88 범위에서 1.05의 평균값과 약 40%의 높은 변동계수를 나타냈다.

**Abstract** The use of FRP(Fiber-reinforced polymer) bars results in larger crack widths under service load due to the generally low elastic modulus and poor bond characteristics of FRP as compared with steel reinforcing bars. The work presented herein includes the results from 12 beams composed of nine rectangular beams and three T-beams reinforced with FRP bars tested under four-point bending. It was investigated that the bond coefficient,  $k_b$  in ACI 440.1R-06 equation had high variability which the coefficient of variation was 40% in the range of 0.6 to 1.88 with average 1.05.

**Keywords** : Bond coefficient, Concrete, Flexural cracking width, Fiber-reinforced polymer, Variability

## 1. 서론

### 1.1 연구배경 및 목적

최근 철근콘크리트 부재에서는 피할 수 없는 균열로 인한 철근의 부식문제를 해결하기 위해 철근의 대체재로서 비금속체인 Fiber-Reinforced Polymer(이하 FRP) 보강근이 대안으로 사용되고 있다. 이는 철근과 비교하여 인장강도가 우수하며 경량이고 내부식성, 내화학성 그리고 비전도 성능의 장점을 갖고 있어 고성능화 및 장수명화에 크게 기여할 수 있기 때문이다. 그러나 철근에 비해 상대적으로 낮은 탄성계수와 부착강도로 인하여 철근콘

크리트 부재에 비해 보다 넓은 균열폭이 발생될 수 있기 때문에 FRP-보강근 콘크리트부재에 합리적인 균열폭 예측이 필요하다.

이에 미국콘크리트학회에서는 최근 개정된 ACI 440.1R-06 Design Guide[1](이하 ACI 440.1R-06)를 통하여 FRP-보강근 콘크리트 부재의 균열폭에 대한 계산식을 제시하고 있다. 이는 철근콘크리트 구조부재들을 위한 설계기준인 ACI 318 Building Code[2](이하 ACI 318-08)에서 사용되고 있는 균열 모델을 FRP-보강근 특성에 맞게 적용하고자 부착계수를 도입하여 수정·보완하여 사용하고 있다.

본 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 일반연구지원사업(No.2011-0003200)임.

\*Corresponding Author : Bong-Seob Choi (Chungwoon University)

Tel: +82-32-770-8175 email: bschoi@chungwoon.ac.kr

Received August 3, 2015

Revised (1st September 8, 2015, 2nd October 6, 2015)

Accepted October 8, 2015

Published October 31, 2015

그러나 ACI 440.1R-06의 균열폭 모델의 경우 충분한 실험데이터의 부족으로 식에서 사용되고 있는 설계변수들이 균열폭에 미치는 영향과 적용범위에 대해 보다 충분한 실험적 연구와 합리적인 변수분석의 필요성이 제기되고 있다. 또한 최근 몇몇 연구들[3,4,5]에서도 이와 관련된 실험연구를 수행하였으나 단지 장방향단면의 GFRP나 CFRP-보강근 시험체를 위주의 연구로 건축물에서 보다 보편적으로 설계될 수 있는 GFRP, AFRP 그리고 CFRP-보강근을 사용한 T형보의 균열폭 특성을 살펴보는 데는 제한적일 수밖에 없다.

이에 본 연구에서는 T형단면을 포함한 FRP-보강근 콘크리트 보의 휨실험 결과들을 바탕으로 설계지침에서 사용되고 있는 기존 제안식의 결과와 비교·분석함으로써 FRP-보강근 콘크리트 보들의 균열거동 특성뿐만 아니라 기존 제안식의 적용범위와 그에 따른 문제점들을 파악하여 균열폭을 예측할 수 있는 모델을 제안하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 한다.

### 1.2 연구방법 및 범위

현재 FRP-보강근 콘크리트 부재의 균열폭 예측식을 제안하고 있는 ACI 440.1R-06 설계기준은 충분한 실험데이터의 부족으로 통합적이고 합리적인 계산값을 제시하는데 제한적이다. 이에 본 연구에서는 FRP-보강근 콘크리트 부재의 균열폭 특성을 합리적으로 파악하고자 우선 ACI 440.1R-06 설계기준과 이와 관련된 최근 연구내용들을 이해하고 제안된 예측식들의 적용범위와 문제점들을 파악한다. 또한 이를 기초하여 사용하중 범위에서 FRP-보강근 콘크리트 보의 단기하중 실험을 수행함으로써 아래와 같은 범위에서 균열폭 거동을 파악하고 기존 제안식과 비교·분석하여 본 연구의 목적을 달성하고자 한다.

- (1) 시험체 단면형태: 장방향 및 T형단면
- (2) 보강근의 재료: GFRP, AFRP 그리고 CFRP
- (3) 지지조건 : 단순지지

## 2. ACI 440.1R-06 휨균열 제안식 고찰

FRP-보강근 콘크리트의 균열 모델은 2006년 이전에는 아래에서 보여주는 ACI 318의 Gergely-Lutz[6]모델을 간단히 수정하는 방법으로 휨균열폭을 제어하였다.

여기서,  $w$  = 허용균열폭,  $\beta$  = 중립축에서 인장 보강근 도심까지의 거리에 대한 중립축에서 인장연단까지의 거리 비,  $f_s$  = 철근의 응력,  $d_c$  = 인장연단과 인장연단에서 가장 가까운 보강근의 중심까지의 피복두께,  $A_t$  = 유효 인장 면적(유효콘크리트 인장면적/보강근 개수)이다.

$$w = 1.08\beta f_s \sqrt[3]{d_c A_t} \times 10^{-5} \quad (1)$$

식 (1)은 이형 철근을 사용하는 휨부재의 균열 계산을 위해 제시되었기 때문에 FRP-보강근 부재의 균열 계산을 위해서 ACI 440.1R-01[7]에서는 식 (2)에서 보는 바와 같이 식 (1)에서 철근 응력의 1.08배 한 것을 보강근 변형률의 2.2배로 수정하고 부착계수  $k_b$ 를 새로 도입하였다. 여기서,  $k_b$  = 콘크리트와 부착특성을 고려한 부착계수 값으로 철근과 비슷한 부착특성을 가진 경우 1을 철근보다 낮을 경우 1보다 큰 값을, 높을 경우 1보다 작은 값을 사용한다. 또한  $\epsilon_r$  = 보강근의 변형률이다.

$$w = 2.2\beta k_b \epsilon_r \sqrt[3]{d_c A_t} \quad (2)$$

ACI 440.1R-06에서는 Frosch[8]가 콘크리트 피복두께와 보강근 간격을 근거하여 제안된 식을 아래와 같이 수정 보완하여 제시하였는데, 이는 ACI 318 위원회가 Gergely-Lutz모델을 Frosch모델로 교체하려는 흐름과 같이 하려는 의도로 여겨진다.

$$w = 2\beta \epsilon_r k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \quad (3)$$

여기서,  $s$ 는 보강근 간격이다. 식 (3)은 역학적인 이론에 근거한 결정론적인 계산 과정을 통하여 철근 콘크리트 부재 뿐 만 아니라 FRP-보강근 콘크리트 부재 모두에 적용할 수 있는 장점을 갖고 있다.

## 3. 실험

### 3.1 시험체 계획 및 사용재료

본 실험에서는 FRP-보강근 콘크리트 보들의 균열양상 특성을 파악하고자 총 12개의 시험체를 제작하였는

데 이 중 9개는 장방형단면으로 그리고 3개는 T형단면으로 계획하였다. 시험체 설계에 적용된 보강근비는 압축파괴 거동을 유도하기 위해 ACI 440.1R-06의 균형보강근비( $\rho_{fb}$ ) 이상으로 하였으며 전단경간비( $a/d$ )는 휨거동을 유도하기 위해 대략 4.0정도로 하였고, T형단면의 플랜지 폭은 웨브폭의 2.8배로 계획하였다.

보 제작을 위해 사용된 콘크리트는 30MPa 레미콘 콘크리트를 사용하였고 평균 압축강도는 35MPa로 나타났다. 보강근으로 사용된 FRP는 D사의 나선형 홈 형태의 표면을 갖는 GFRP, AFRP, CFRP를 사용하였고 직경은 10mm와 13mm를 사용하여 장방형단면 시험체는 1단배근 하였고 T형단면 시험체는 2단배근을 하였다.

장방형보의 크기는 폭  $b = 250mm$ , 깊이  $h = 300mm$ , T형보는 플랜지 폭,  $b_f = 700mm$  웨브 폭,  $b_w = 250mm$  그리고  $h = 300mm$ 로 하였으며 경간길이,  $l_n = 3000mm$ 으로 제작하였다. 전단 보강근은 D10 철근을 사용하였으며, 전단보강근 배근을 위해 상부철근으로는 D6 철근을 사용하였다. Fig. 1에서는 시험체의 치수 및 보강근 상세를 보여주며 Table 1에서는 사용된 보강근의 역학적 성질을 보여준다.

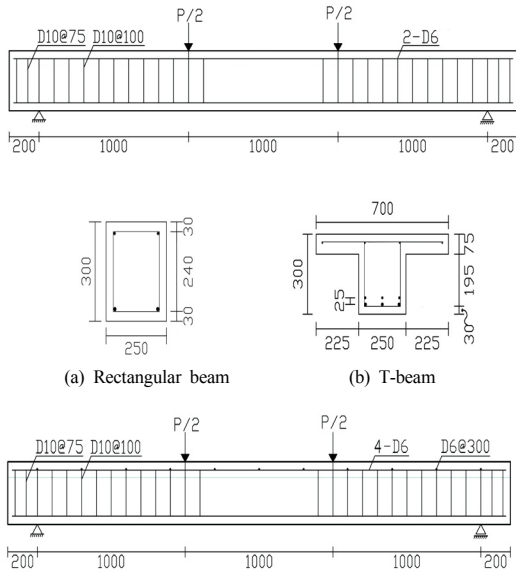


Fig. 1. Concrete dimensions and reinforcing details for the beam specimens

Table 1. Mechanical properties of reinforcing bars

Bar type	Diameter (mm)	$f_u$ (MPa)	$E_f$ (GPa)	$A_f$ (mm <sup>2</sup> )
GFRP	$\phi 10$	1,360	60	71
	$\phi 13$	1,200	51	129
AFRP	$\phi 10$	1,630	70	71
	$\phi 13$	1,470	65	129
CFRP	$\phi 10$	2,150	148	71
	$\phi 13$	1,890	120	129

### 3.2 실험방법 및 측정

재하방법은 단순지지된 시험체를 최대용량 5,000kN 인 만능재료시험기(UTM)을 사용하여 시험체 4점가력 하였다. 균열폭 측정은 두 가지의 측정 장비를 이용하였는데 파이게이지(Pi-gage)와 크랙커(Cracker)이다.

측정은 첫 균열 발생 시 하중을 일시 정지시킨 후 크랙커(Cracker)를 이용하여 첫 균열의 폭을 측정하였다. 그리고 곧바로 그 균열폭 중심으로 양쪽 면에 파이게이지 (Pi-gage)를 부착한 후 계속 하중을 가력하면서 첫 균열의 폭을 최대 폭으로 생각하여 두 측정 장비로 동시에 측정이 가능한 범위까지, 즉 대략 극한하중의 80~90% 까지 측정하고자 하였다. 또한 변형률도 스트레인 게이지를 콘크리트의 압축측 상단과 인장철근에 각각 2~4 개씩 설치하여 측정 하였다.

Table 2. Details of test specimens

Specimen	$\rho_f$ (%)	$\rho_{fb}$ (%)	$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}$	Size & Number of Bar
RGF-10-2	0.2	0.18	1.11	2- $\phi 10$
RAF-10-2		0.15	1.33	
RCF-10-2		0.17	1.18	
RGF-13-2	0.4	0.20	2.00	2- $\phi 13$
RAF-13-2		0.17	2.35	
RCF-13-2		0.18	2.22	
RGF-13-4	0.8	0.20	4.00	4- $\phi 13$
RAF-13-4		0.17	4.70	
RCF-13-4		0.18	4.44	
TGF-1310-6	0.3	0.2	1.50	3- $\phi 10$
TAF-1310-6		0.17	1.76	3- $\phi 13$
TCF-1310-6		0.18	1.67	

\* Identification Code : ABB-CC-X

A = R: Rectangular, T: T-shaped

BB= GF: GFRP, AF: AFRP, CF: CFRP

CC = Diameter of bars

X = Number of bars

### 4. 실험결과 및 분석

시험체들의 균열은 하중이 균열하중( $P_{cr}$ )에 도달되면서 발생하는데 처음에는 순수 휨모멘트 구간에서만 주인장응력 방향에 수직으로 휨균열이 발생되었으나 하중이 증가하면서 전단응력에 의한 사인장 균열과 함께 가력점으로 번져가는 모습을 보여주었다. 또한 보강근비가 큰 시험체일수록 파괴하중이 커지기 때문에 압축파괴가 일어날 때 까지 충분히 휨균열과 사인장 균열이 차체로 진행되면서 균열 간격도 대체적으로 좁게 나타나는 경향을 나타냈다.

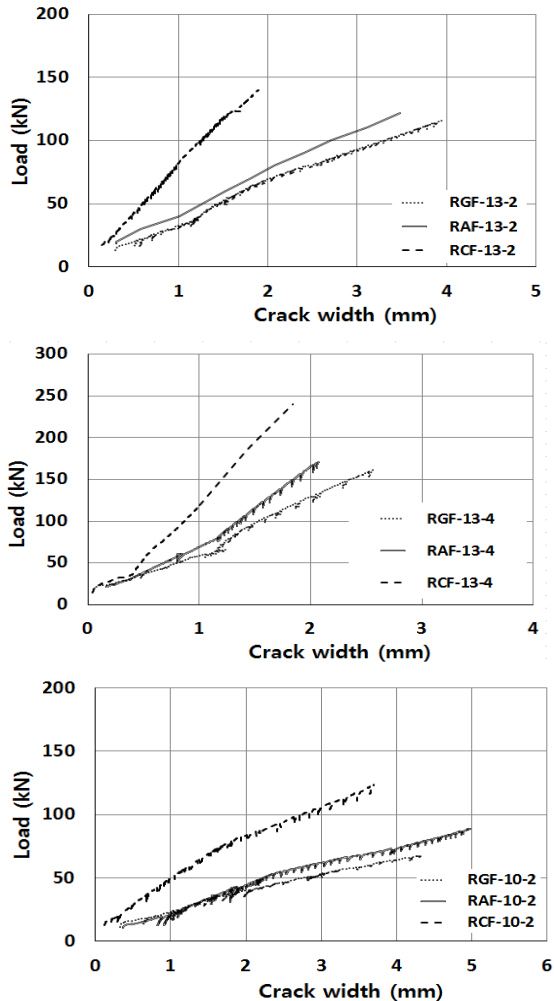


Fig. 2. Load-to-crack curve of the rectangular section specimen  
 (a)  $\rho_f = 0.002$  (b)  $\rho_f = 0.004$  (c)  $\rho_f = 0.008$

Fig. 2는 장방향단면 시험체에 대한 보강근비에 따른 보강근 재료별 하중-균열폭 비교 그래프로서 균열폭이 최대로 측정되어진 범위까지 보여주고 있다. 또한 Fig. 3에서는 보강근비  $\rho_f = 0.003$ 인 T형단면 시험체에 대한 보강근 재료별 하중-균열폭 비교 그래프를 보여주고 있다. 모든 시험체에서 균열폭의 크기는 대체로 보강근 종류와 보강근비에 따라 좌우되는 것을 알 수 있다. 하중이 증가하면서 균열폭은 증가하는데 보강근의 종류에 따라, 즉 탄성계수가 큰 CFRP, AFRP, GFRP 순으로 또한 보강근비가 클수록 균열폭은 좁게 나타났다. 또한 단면의 크기에 따라, 즉 장방향단면에 비해 크기가 상대적으로 큰 T형단면에서 균열폭이 좁게 나타났다.

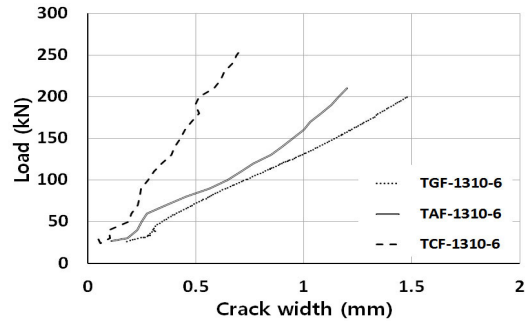


Fig. 3. Load-to-crack curve of the T-shaped section specimen with  $\rho_f = 0.003$

이러한 경향은 보강근의 변형률이 균열폭과 비례적인 관계를 갖고 있기 때문이다. 다시 말하면 보강근비, 탄성계수 그리고 시험체 단면의 크기가 크면 클수록 보강근의 변형률이 작아지기 때문에 균열폭도 좁게 나타나는 것이다.

Table 3. Crack widths in the service load

Specimen	Allowable crack width (mm)	$P_u$ (kN)	$\omega_s$ (mm)	
			$0.35P_u$ (mm)	$0.45P_u$ (mm)
RGF-10-2	0.7	85	1.32	1.88
RAF-10-2		98	1.55	1.99
RCF-10-2		155	1.11	1.53
RGF-13-2		145	1.48	1.88
RAF-13-2		153	1.36	1.78
RCF-13-2		175	0.75	0.97
RGF-13-4		200	1.20	1.39
RAF-13-4		213	1.09	1.31
RCF-13-4		300	0.90	1.10
TGF-1310-6		250	0.62	0.84
TAF-1310-6		262.5	0.57	0.71
TCF-1310-6		317.5	0.32	0.41

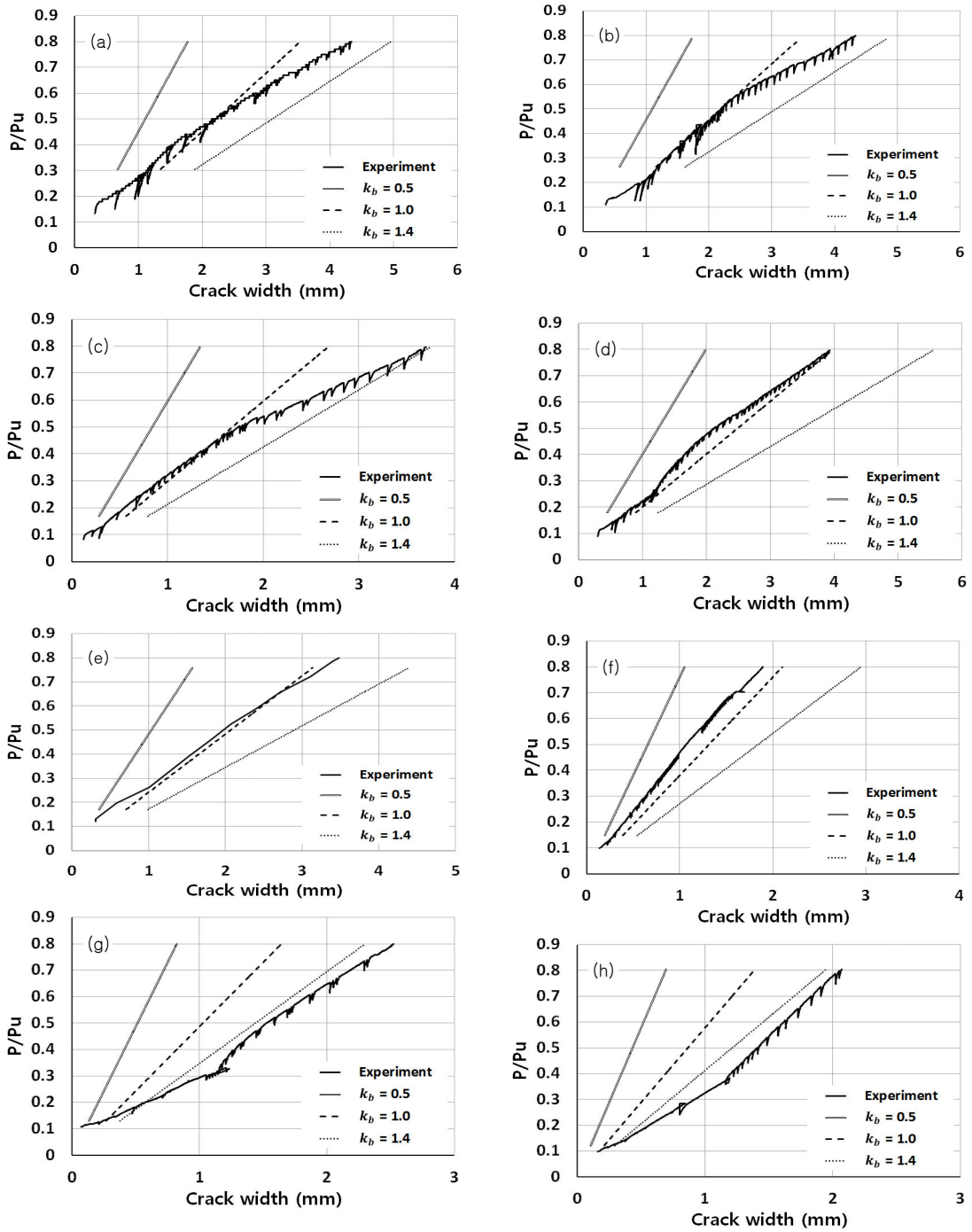


Fig. 4. Comparison between experimental and calculated results of the rectangular beam along  $k_b$  values  
 (a)RGF-10-2 (b)RAF-10-2 (c)RCF-10-2 (d)RGF-13-2 (e)RAF-13-2 (f)RCF-13-2 (g)RGF-13-4 (h)RAF-13-4

Table 3에서는 각 시험체의 최대균열폭을 사용하중 범위( $0.35P_u \sim 0.45P_u$ )에서 상대 비교하였고 또한 허용 균열폭과도 비교하였다. 콘크리트구조에서 사용하중의 범위는 극한하중의 30~60% 범위를 폭넓게 사용되고 있으나 Veysey and Bischoff[9] 최근 연구에서 최대허용 처짐을 만족하는 사용하중 범위는 보의 경우 35~45%로 제한하고 있다. 이에 본 연구에서는 이 범위를 사용하중 범위로 적용하여 비교하였다.

허용균열폭은 여러 설계기준 및 지침에서 제시하고 있는데 ACI 440.1R-06의 설계 지침에서는 내부노출 부재의 경우 0.7mm, 외부노출 부재의 경우 0.5mm로 권고하고 있다. 다만 FRP-보강근이 부식에 강하기 때문에 철근이 배근되지 않은 경우로서 임시 구조물이라든지 또는 부재의 외관이 크게 중요치 않다면 이러한 허용균열폭 제어를 고려하지 않을 수 있다.

본 연구에서는 내부노출의 허용균열폭을 사용하여 비교하였는데 장방형단면의 경우는 모든 시험체들에서 허용균열폭 0.7mm를 최대 2.8배까지 초과하였다. 그러나 T형단면 시험체에서는 대체적으로 0.7mm를 넘지 않은 것으로 나타났으나 GFRP나 AFRP 시험체에서 일부 허용균열폭을 초과하는 것을 보여주었다. 이러한 결과는 이전의 연구[6]에서도 언급된바와 같이 본 실험에서 사용된 나선형 홈 표면을 갖는 FRP-보강근의 부착성능이 상대적으로 우수하지 못하기 때문으로 판단된다.

### 5. 기존 제안식 결과와의 비교 및 고찰

ACI 440.1R-06에서 제시하고 있는 균열폭 식 (3)은 보강근의 종류나 보강근비에 따른 부착계수  $k_b$  값을 명확하게 정의하고 있지 않다. 이는 부착계수  $k_b$ 의 평균이 1.10으로 범위는 0.6부터 1.72까지 폭넓게 나타났기 때문이다. 따라서  $k_b$ 는 철근의 경우를 1.0으로 하였을 때, 철근보다 낮은 부착성능을 갖는 FRP의 경우 1.0 보다 큰 값으로, 높은 경우는 1.0 보다 작은 값을 권장하고 있으나, 이것조차도 명확하지 않은 경우는 1.4를 권장하고 있다.

이에 본 절에서는 Fig. 4과 5에서 볼 수 있는 바와 같이 극한하중의 0.8배( $0.8P_u$ )까지 각각 실험으로부터 얻어진 장방형과 T형단면의 균열폭을 부착계수 0.5~1.4 범위에서 계산된 결과값과 비교하여 보강근 종류, 보강

근비, 그리고 단면형태에 따른 부착계수의 특성을 살펴보고자 하였다.

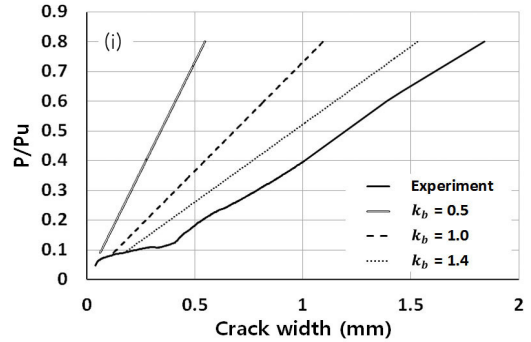


Fig. 4. Comparison between experimental and calculated results of the rectangular beam along  $k_b$  values(Cont.) (i) RCF-13-4

우선 장방형단면의 경우 Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 보강근비,  $\rho_f = 0.002$  인 시험체들의 경우 이전의 절에서 언급한 사용하중 범위에서  $k_b = 1.0$  을 적용하여 계산된 결과값이 FRP-보강근 종류와 상관없이 실험값과 잘 일치하였다. 보강근비,  $\rho_f = 0.004$  인 시험체들에서도 사용하중 범위에서 1.0의 부착계수 값이 다소 보수적으로 실험값과 잘 일치하였다.

다만 RAF-13-2의 시험체의 경우 재하도중 예기치 못한 균열측정 장비인 파이게이지의 분리로 촘촘한 데이터를 얻을 수는 없었으나 같이 사용된 크래커를 이용하여 10kN 간격으로 균열폭을 측정할 수 있었다. 또한 이러한 상황은 TAF-1310-6의 시험체에서도 일어나 같은 방법으로 측정하였다.  $\rho_f = 0.008$  시험체들의 경우는  $k_b = 1.4$  를 적용하여 계산된 결과값도 보수적이지 못할 수가 있다는 것을 보여주고 있어 부착 계수,  $k_b$  값의 변동성은 예상보다 더 클 수도 있다는 것이 확인되었다.  $\rho_f = 0.003$  을 갖는 T형단면 시험체들의 경우 Fig. 5에서 보여주고 있는데  $k_b$  값은 장방형 시험체에 비해 0.5에 보다 가까운 값에서 실험값과 비교적 잘 일치하는 것으로 나타났다. 이는 이전의 절에서도 언급하였던 바와 같이 같은 보강근비를 갖는 경우 T형단면이 장방형단면에 비해 큰 단면을 갖기 때문에 상대적으로 보강근의 변형률이 크지 않아 부착계수도 작게 나타난 것이다.

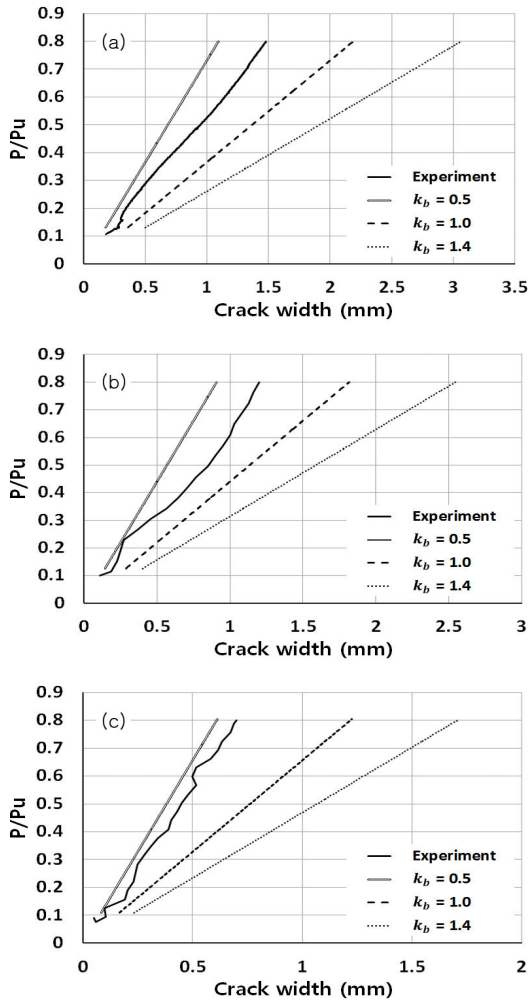


Fig. 5. Comparison between experimental and calculated results of the T-shaped beam along  $k_b$  values  
(a)TGF-1310-6 (b)TAF-1310-6 (c)TCF-1310-6

Table 4에서는 사용하중 범위( $0.35P_u \sim 0.45P_u$ )에서 ACI 440.1R-06에서 보수적으로 권고하고 있는 부착계수,  $k_b=1.4$ 를 사용하여 계산된 균열폭은 실험을 통하여 측정된 균열폭과의 차이를 알아보기 위해 균열폭비 ( $w_{exp}/w_{cal}$ )로 비교하였다. 계산값은  $\rho_f = 0.008$  을 갖는 장방형단면 시험체를 제외한 모든 시험체에서 실험값에 비해 보수적으로 나타났으며 특히 T형단면은 충분한 시험체들의 결과는 아니지만 장방형단면에 비해 상당히 보수적인 결과를 보여주고 있다.

Table 4. Crack width ratio( $w_{exp}/w_{cal}$ ) and predicted  $k_b$  value in the range of service load

Specimen	$w_{exp}/w_{cal}$		$k_b$		
	$0.35P_u$	$0.45P_u$	$0.35P_u$	$0.45P_u$	
RGF-10-2	0.61	0.67	0.85	0.95	
RAF-10-2	0.72	0.72	1.00	1.00	
RCF-10-2	0.67	0.72	0.94	1.01	
RGF-13-2	0.61	0.60	0.85	0.84	
RAF-13-2	0.67	0.68	0.94	0.96	
RCF-13-2	0.58	0.59	0.81	0.82	
RGF-13-4	1.19	1.07	1.67	1.51	
RAF-13-4	1.28	1.20	1.80	1.68	
RCF-13-4	1.34	1.28	1.88	1.79	
Average	0.85	0.84	1.19	1.17	
Standard deviation	0.32	0.27	0.45	0.38	
Coefficient of variation (%)	37.6	32.1	37.8	32.5	
TGF-1310-6	0.46	0.49	0.65	0.68	
TAF-1310-6	0.51	0.5	0.72	0.69	
TCF-1310-6	0.43	0.43	0.60	0.60	
Average	0.47	0.47	0.66	0.66	
Standard deviation	0.04	0.04	0.06	0.05	
Coefficient of variation (%)	8.5	8.5	9.1	7.6	
Total	Average	0.76	0.75	1.06	1.04
	Standard deviation	0.32	0.28	0.45	0.4
	Coefficient of variation (%)	42.1	37.3	42.5	38.5

더불어 Table 4에서는 사용하중 범위에서 부착계수,  $k_b$  값들의 변동성을 알아보기 위해서 실험으로부터 얻어진 균열폭을 사용하여 계산된 결과를 보여주고 있다. 우선 하중이 증가할 때  $k_b$  값들의 차이 정도를 살펴볼 수 있는데 모든 시험체에서  $0.35P_u$  사용하중에서는  $k_b=0.6 \sim 1.88$  범위에서 1.06의 평균값과 42.5%의 변동계수를 나타내 상당히 큰 변동성을 보여주고 있다. 그리고  $0.45P_u$  에서도 다소 변동성의 감소가 있었으나  $0.35P_u$  결과값들과 큰 차이가 없음을 보여주고 있어, 사용하중 범위에서 하중의 증감은 부착계수  $k_b$  값에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.

그러나 단면형태별로 구분하여 본다면 T형단면의 경우 부착계수는 평균 0.66을 나타내고 있고 변동계수 또한 상대적으로 아주 낮게 보여주고 있어 장방형단면에 비해 보강근 부착능의 상승효과가 큰 것으로 나타나  $k_b=1.0$  이하의 값을 고려할 수 있을 것으로 판단된다. 물론 T형단면에 대해서는 추후 보다 많은 실험데이터에 의한 비교분석이 필요하다.

이러한 결과들을 종합하여 본다면 기존 ACI 440.1 R-06의 균열폭 식에서 상수로 제시되고 있는 부착계수

$k_b$ 는 균열폭을 결정하는데 많은 영향을 주는 변수 중에 하나라는 것을 알 수 있었고, 보강근의 탄성계수, 보강근 비 그리고 단변형태에 따른 단면2차모멘트의 크기에 따라 영향을 받기 때문에 이러한 주요 변화들을 고려한  $k_b$ 의 제안식이 필요한 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 FRP-보강근 콘크리트 보의 균열폭 특성을 파악하고 ACI 440.1R-06 제안식의 적용범위와 그에 따른 문제점들을 지적하여 추후 보다 합리적인 균열폭 식을 유도할 수 있는 기초자료를 제공하고자 하였다. 이에 장방형과 T형단면을 갖는 FRP-보강근 콘크리트 보에 대한 단기 휨실험을 통하여 얻어진 결과들을 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 균열폭의 크기는 보강근 탄성계수가 큰 CFRP, AFRP, GFRP 순으로 보강근비가 클수록 그리고 T형단면 시험체에서 균열폭은 좁게 나타났다.

둘째, 이러한 결과는 보강근의 탄성계수, 보강근비, 그리고 부재의 단면2차모멘트가 클수록 보강근 변형률을 감소시켜 좁은 균열폭을 유도하기 때문으로 판단된다.

셋째, ACI440.1R-06에서 권고하고 있는 내부노출의 허용균열폭 0.7mm를 장방형단면의 경우는 모든 시험체에서 초과하였으나 T형단면 시험체에서는 대체적으로 초과하지 않은 것으로 나타났다.

넷째, ACI440.1R-06의 균열폭 식에서 사용되고 있는 부착계수,  $k_b$ 는 0.6~1.88범위에서 1.05의 평균값과 약 40%의 변동계수를 보여주고 있어 고유의 큰 변동성을 갖고 있는 것을 확인할 수 있었다.

이러한 결론으로부터 얻어진 내용들을 바탕으로 추후의 연구에서는 이번 연구에서 많이 실험하지 못했던 T형단면 시험체에 대한 추가실험과 더불어 기존 연구자들의 실험데이터에 근거한 주요 설계 변수들에 대한 변수 분석을 통하여 보다 합리적인 균열폭 식을 제안하고자 한다.

## References

[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, 44pp., 2006.

- [2] ACI Committee 318-05, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318M-05) and Commentary (ACI 318M-05)". American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 430pp., 2005.
- [3] El-Nemr, A., Ahmed E. A. and Benmokrane B., "Flexural Behavior and Serviceability of Normal-and High-Strength Concrete Beams Reinforced with Glass Fiber-Reinforced Polymer Bars", ACI Structural Journal, V. 110, No. 6, pp.1077-1087, 2013.
- [4] Bouguerra, K., Ahmed, E. A., El-Gamal, S., and Benmokrane, B., "Testing of Full-Scale Concrete Bridge Deck Slabs Reinforced with Fiber Reinforced Polymer (FRP) Bars," Construction and Building Materials, V. 25, No. 10, pp. 3956-3965, 2011.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.04.028>
- [5] Lee, W. K., Jansen, D. C., Berlin, K. B. and Cohen, I. E., "Flexural Cracks in Fiber-Reinforced Concrete Beams with Fiber-Reinforced Polymer Reinforcing Bars", ACI Structural Journal, V. 107, No. 3, pp. 321-329, 2010.
- [6] Gergely, P. and Lutz, L., "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members", Causes, Mechanism and Control of Cracking in Concrete, ACI SP-20, pp. 87-117, 1968.
- [7] ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar (ACI 440.1R-01)", American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 41pp., 2001.
- [8] Frosch, R. J., "Another Look at Cracking and Crack Control in Reinforced Concrete". ACI Structural Journal, V. 96, No. 3, pp. 437-442, 1999.
- [9] Veysey, S. and Bischoff, P. H., "Designing FRP Reinforced Concrete for Deflection Control", Fiber-Reinforced Polymer Reinforcement for Concrete Structures, ACI SP-275, pp. 3.1-3.23, 2011.

최 봉 섭(Bong-Seob Choi)

[정회원]



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

<관심분야>

철근콘크리트구조, FRP-보강근 콘크리트구조 등