

# 장기하중이 FRP-보강근 콘크리트 보의 휨균열폭에 미치는 영향

최봉섭  
청운대학교 건축공학과

## Effect of Long-Term Load on Flexural Crack Widths in FRP-Reinforced Concrete Beams

Bong-Seob Choi

Department of Architectural Engineering, Chungwoon University

**요약** FRP-보강근 콘크리트 부재들은 FRP-보강근이 철근에 비해 낮은 탄성계수와 부착강도를 갖고 있어 철근콘크리트 부재에 비해 과도한 균열폭의 가능성이 클 수 있다. 따라서 외국의 기준들에서는 FRP-보강근 콘크리트 부재의 균열제어를 위하여 허용균열폭의 제한규정을 두고 있는데, ACI 440.1R-15 설계지침에서는 최대 보강근 간격으로 제어하는 간접적인 방법으로 제안하고 있다. 그러나 제안식은 아직까지 장기하중이 균열폭에 미치는 시간종속적인 효과를 반영하지 못하고 있다. 이에 본 연구에서는 장방형단면뿐만 아니라 T형단면의 FRP-보강근 콘크리트 보를 대상으로 장기실험을 통하여 얻어진 실험 결과를 바탕으로 단면형태별 균열폭 특성을 구분하여 파악하므로써 장기균열폭 예측모델을 제안하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다. 따라서 단면형태별로 각각 한 개씩의 철근콘크리트 비교시험체를 포함한 4개의 장방형보와 4개의 T형 보로 구성된 총 8개의 시험체를 제작하여 시공하중의 영향을 고려한 1년간 4점 가력 장기휨실험을 수행하였다. 결과로서 시간종속적인 영향을 받는 순수장기균열폭은 철근 시험체에 비해 보강근의 탄성계수가 낮은 GFRP나 AFRP-보강근 시험체에서는 2.6~3.0배 증가하였으나 CFRP-보강근 시험체에서는 1.1~1.4배 증가에 그쳤다. 또한 즉시균열폭을 포함한 총장기균열폭은 장방형단면과 T형단면 시험체에서 평균적으로 각각 즉시균열폭의 약 2.4와 3.1배 증가를 보여주어 보수적으로 각각 2.5와 3.5의 시간종속계수를 구분하여 제안하였다.

**Abstract** Larger crack widths can be observed more in FRP-reinforced concrete members than in steel-reinforced concrete members as a result of the lower elastic modulus and bond strength of FRP reinforcement. The ACI 440.1R-15 design guide provides equations derived as the maximum bar spacing to control the crack widths indirectly. On the other hand, it is not concerned with long-term effects on the crack control design provisions. This study provides suggestions for how to incorporate time-dependent effects into the crack width equation. The work presented herein includes the results from 8 beams composed of four rectangular and T-shaped FRP-reinforced concrete beams tested for one year under four-point bending. Over a one year period, the crack widths increased as much as 2.6~3.0 times in GFRP and AFRP-reinforced specimens and 1.1~1.4 times in the CFRP-reinforced specimens compared to steel-reinforced specimens. In addition, the average multiple for crack width at one year relative to the instantaneous crack width upon the application of the sustained load was 2.4 in the specimens with a rectangular section and 3.1 in the specimens with a T-shaped section. As a result, it is recommended conservatively that the time-dependent coefficient be taken as 2.5 for the rectangular beams and 3.5 for T-beams.

**Keywords** : Fiber-reinforced polymer, Concrete, Flexural cracking width, Long-term load, Creep

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

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

Received October 15, 2018

Revised (1st November 19, 2018, 2nd November 22, 2018, 3rd November 26, 2018)

Accepted December 7, 2018

Published December 31, 2018

### 1. 서론

최근 철근콘크리트 구조물에서는 철근의 부식문제를 해결하기 위하여 비금속체인 FRP- Reinforced Polymer (이하 FRP) 보강근을 철근의 대체재로서 사용하고 있다. 그러나 FRP-보강근 콘크리트 부재들은 철근에 비해 FRP-보강근이 상대적으로 낮은 탄성계수와 부착강도를 갖고 있어 철근콘크리트 부재에 비해 과도한 균열폭과 처짐이 발생될 수 있기 때문에 사용성능이 종종 FRP-보강근 콘크리트 부재의 구조설계를 지배할 수 있다. 특히 과도한 균열폭은 심미적인 두려움이나 전단성능의 저하를 가져올 수 있기 때문에 외국의 여러 나라 기준들[1-3]에서 허용균열폭의 제한규정을 두고 있다.

그러나 이러한 균열폭 제어규정은 단기하중 하의 장방형단면의 시험체에서 측정된 균열폭 데이터에 기초하여 제시된 것으로 최근까지도 장기하중(지속하중)을 고려한 균열폭에 대한 많은 연구가 이루어지지 못하고 있는 실정이어서 외국의 여러 나라 기준들뿐만 아니라 ACI 440.1R-15 설계지침[1]에서도 장기하중 하의 균열폭에 대한 시간종속적인 효과를 반영한 균열제어 모델을 제시하지 못하고 있다.

이에 본 연구에서는 장방형단면뿐만 아니라 T형단면의 FRP-보강근 콘크리트 보에 대하여 전체 시간종속적인 영향의 대부분을 차지하는 1년 동안의 장기 휨실험을 수행하였다. 또한 이 때 얻어진 실험결과들을 바탕으로 기존 제안식의 결과와 비교·분석하므로써 장방형과 T형단면의 FRP-보강근 콘크리트 보들의 균열폭 특성을 단면형태별로 구분하여 재평가하고 장기 균열폭을 예측할 수 있는 모델을 제안하는데 필요한 기초자료를 제공하고자 하였다.

### 2. 선행연구 동향

1999년 ACI 318-99[4] 설계기준에서는 그동안 사용되어온 Gergely-Lutz[5]의 균열폭 제안식을 Frosh[6]의 콘크리트 피복두께와 보강근 간격의 영향을 고려하여 최대허용보강근 간격으로 제어하는 간접적인 제안식으로 교체하였는데, 2006년 ACI 440.1R-06[7] 설계지침에서도 이러한 흐름을 같이하려는 의도에서 Frosh가 제안한 내용들을 대폭 반영은 하였으나 아래와 같이 여전히 직접적인 균열폭 계산으로 제어하는 방법을 유지하였다.

$$w = 2\beta \frac{f_{fs}}{E_f} k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \tag{1}$$

여기서,  $w$  = 균열폭(mm),  $\beta$  = 중립축에서 인장보강근 도심까지의 거리에 대한 중립축에서 인장연단까지의 거리 비,  $f_{fs}$  = 단기사용하중 하의 보강근 응력(MPa),  $E_f$  = 보강근 탄성계수(MPa),  $d_c$  = 인장연단과 인장연단에서 가장 가까운 보강근의 중심까지의 피복두께(mm),  $s$  = 보강근 간격(mm),  $k_b$  = 콘크리트와 보강근의 부착특성을 고려한 부착계수를 나타낸다.

2015년 ACI 440.1R-15 설계지침[1]에서는 균열제어를 위하여 결국 ACI 318 설계기준과 같은 기초를 유지하면서 FRP-보강근 콘크리트의 특성을 반영하고자 기준값으로 철근콘크리트의 탄성계수  $2.0 \times 10^5$  MPa과 허용균열폭 0.46mm를 적용하여 표준화시키고 이 전 기준과 같은 부착계수  $k_b$ 를 사용하여 보강근 간격을 제한하는 식(2a)와 함께, 또한 특별히 두꺼운 피복두께가 요구되어지는 경우 식(2b)도 만족하도록 아래와 같이 제시하고 있다.

$$s_{\max} = 1.15 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} - 2.5 C_c \leq 0.92 \frac{E_f w}{f_{fs} k_b} \tag{2a}$$

$$d_c \leq \frac{E_f w}{2f_{fs} \beta k_b} \tag{2b}$$

여기서,  $s_{\max}$  = 최대허용보강근간격(mm),  $C_c$  = 인장철근 표면에서 인장연단까지의 피복두께(mm)이다. 또한 설계지침에서는 균열로 인한 외관상 미적 제한을 고려하는 경우 허용균열폭 범위를 0.4~0.7mm로 하고 있다. 그러나 식 (1), (2a) 그리고 (2b) 는 단기하중 하에서 측정된 균열폭 데이터에 기초하여 제시된 것으로 장기하중 하에서 고려하여야만 하는 시간종속적인 변수인 건조수축이나 크리프의 효과를 담아내지 못하고 있다. 이에 ACI 440.1R-15 설계지침에서도 추후 연구를 통하여 기존 제안식에 장기하중의 영향을 합리적으로 반영할 필요성은 언급하고 있다.

Gross 등[8]의 연구에서는 총 12개의 장방형단면 시험체를 제작하여 약 3년간 측정된 휨균열폭 결과를 갖고 ACI 440.1R-06 식 (1)에 시간종속적인 효과를 반영한 수정식을 아래와 같이 제안하였다.

$$w = 2\beta \epsilon_{sus} k_t k_b \sqrt{d_c^2 + \left(\frac{s}{2}\right)^2} \tag{3}$$

여기서,  $\epsilon_{sus}$  = 지속사용하중 하의 보강근 변형률,

$k_t =$  장기하중으로 인한 균열폭 시간중속계수 (FRP-보 강근 콘크리트의 경우 2.0 권장).

### 3. 실험

#### 3.1 시험체 계획 및 사용재료

본 실험에서는 FRP-보강근 콘크리트 보들의 장기하중 하의 균열양상 특성을 파악하고자 Table 1에서 보여주는 바와 같이 철근콘크리트 보를 포함하여 총 8개의 시험체를 제작하였는데 이 중 4개는 장방형단면으로 그리고 4개는 T형단면으로 계획하였다. 또한 철근콘크리트 시험체와 FRP-보강근 콘크리트 시험체의 상대비교를 위하여 단면의 크기를 각각 동일하게 계획하였다.

Table 1. Details of test specimens

Specimen	$\rho_f$ (%)	$\rho_{fb}$ (%)	$\frac{\rho_f}{\rho_{fb}}$	$s$ (mm)	$d_c$ (mm)	Size & Number of Bar
LRST-3	0.5	3.12	0.16	110	40	3-D10
LRGF-3		0.19	2.63			3- $\phi$ 10
LRAF-3		0.15	3.33			
LRCF-3		0.17	2.94			
LTST-4	0.3	3.33	0.09	40	40	4-D10
LTGF-4		0.19	1.58			4- $\phi$ 10
LTAF-4		0.15	2.00			
LTCF-4		0.17	1.76			

\* Identification Code : ABCC-X  
 A= L: Long-term, B= R: Rectangular, T: T-shaped,  
 CC= GF: GFRP, AF: AFRP, CF: CFRP  
 X = Reinforcement number

시험체의 보강근비는 철근콘크리트 시험체의 경우 인장파괴 거동을 유도할 수 있도록 균형철근비( $\rho_b$ ) 이하로 하였으며, FRP-보강근 콘크리트 시험체의 경우 압축파괴 거동을 유도하기 위하여 ACI 440.1R-15에서 제시한 균형보강근비( $\rho_{fb}$ ) 이상으로 하였다. 전단경간비( $a/d$ )는 휨거동을 유도하기 위해 장방형단면 시험체의 경우 약 8.6으로 하였고, T형단면 시험체의 경우 약 5.6으로 하였다. 그리고 T형단면의 플랜지 폭은 웹 폭에 2.1배로 계획하였다.

보 제작을 위해 사용된 콘크리트는 30MPa 레미콘 콘크리트를 사용하였고 평균 압축강도는 39.3MPa로

나타났다. 보강근은 철근, GFRP, AFRP, CFRP 네 종류를 사용하였고 철근의 경우 항복강도  $f_y = 400MPa$ 의 이형철근을, FRP는 D사의 나선형 홈 형태의 표면을 갖는 GFRP, AFRP, CFRP를 사용하였고 직경은 모두 10mm를 사용하여 단근으로 배근 하였다. Table 2에서는 사용된 보강근의 역학적 성질을 보여준다.

Table 2. Mechanical properties of reinforcing bars

Bar type	Diameter (mm)	$f_y$ or $f_u$ (MPa)	$E_s$ or $E_f$ (GPa)	$A_s$ or $A_f$ (mm <sup>2</sup> )
Steel	D10	400	200	73
GFRP	$\phi$ 10	1,360	60	71
AFRP	$\phi$ 10	1,630	70	71
CFRP	$\phi$ 10	2,150	148	71

장방형보의 크기는 폭  $b = 300mm$ , 깊이  $h = 180mm$ , T형보는 플랜지 폭,  $b_f = 420mm$  웹 폭,  $b_w = 200mm$  그리고 깊이  $h = 250mm$ 로 하였으며 순경간길이  $l_n = 3000mm$ 으로 모두 제작하였다. 보강근의 배근은 순수 장기처짐의 거동특성을 파악하고자 압축보강근과 전단보강근은 배근하지 않았고, 인장보강근의 경우 장방형 단면은 배근간격  $s = 110mm$ 로 3개씩, T형단면은  $s = 40mm$ 로 4개씩 배근하였다. Fig. 1에서는 시험체의 치수 및 보강근 상세를 보여준다.

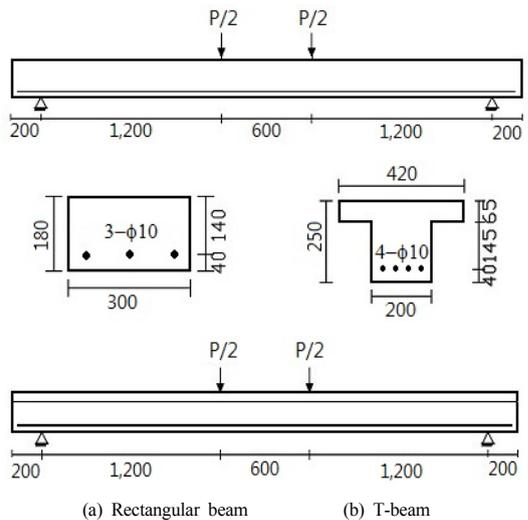


Fig. 1. Concrete dimensions and reinforcing details for beam specimens

### 3.2 실험방법 및 측정

재하방법은 장기하중 하의 균열거동을 살펴보고자 시공시 하중의 영향도 포함하여 두 단계로 실시하였다. 첫 번째 단계는 시공하중의 영향을 반영하기 위하여 최대용량 5000kN의 만능재료시험기(UTM)를 이용하여 분당 1mm의 속도로 장방향 시험체의 경우 5kN-10kN-5kN, T형 시험체의 경우 12kN-5kN-10kN으로 단기적인 반복하중을 재하하였다. 이는 반복하중을 재하하는 과정에서 발생된 인장측 콘크리트의 첫 균열시 의 모멘트  $M_{cr}$ 에 대략 2배 정도의 모멘트를 시공하중모멘트  $M_{con}$ 로 사용한 것이다. 그 후 두 번째 단계로 장기적인 사용하중하의 균열폭을 측정하기 위하여 장방향단면 시험체의 경우  $M_{cr}$ 에 약 1.5배, 그리고 T형단면 시험체의 경우  $M_{cr}$ 에 약 1.7배에 해당하는 무게의 콘크리트 블록을 지속적인 사용하중의 크기로 가정하여 다시 재하하였다. Table 3에서는 시험체별로 재하된 균열모멘트  $M_{cr}$ , 시공하중모멘트  $M_{con}$  그리고 지속하중모멘트  $M_{sus}$ 들의 크기를 보여주고 있다.

Table 3. Applied moments and relative ratios

Specimen	$M_{cr}$ (kN·m)	$M_{con}$ (kN·m)	$M_{sus}$ (kN·m)	$\frac{M_{con}}{M_{cr}}$	$\frac{M_{sus}}{M_{cr}}$
LRST-3	3	6	4.5	2.0	1.5
LRGF-3	3		4.5	2.0	1.5
LRAF-3	3		4.5	2.0	1.5
LRCF-3	3.3	7.2	5.0	1.8	1.5
LTST-4	3.5		6.0	2.1	1.7
LTGF-4	3.7		6.0	2.0	1.6
LTAF-4	3.4		5.7	2.1	1.7
LTCF-4	3.3		5.7	2.2	1.7

이러한 장기하중하의 균열폭 측정은 보다 정확하게 측정할 수 있는 전자 확대경을 갖춘 신형 측정 장비인 크랙커(Cracker)를 이용하였고, 1년(2011.05.22~2012.05.20)동안 매일 한 번씩 규칙적으로 같은 시각(14:00)에 단기하중 시 최대 응력구간에서 이미 발생된 최대균열폭을 선택하여 보강근 위치에서 이루어졌다. 또한 보 중앙부 압축측 콘크리트 상단 표면에 50mm 폭 간격으로 변형률게이지 2개와 인장보강근에 3~4개를 설치하여 데이터로거(TDS-602)로 변형률도 1년간 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 시공하중을 고려한 균열 거동 및 분석

시공하중의 영향을 반영하기 위하여 단기 반복하중이 재하된 모든 시험체들은 초기 균열 이후 하중이 증가하면서 반복적으로 진행됨에 따라 균열이 점점 성장하였으나 최대 반복하중의 근처에서는 균열의 성장은 멈추고 각각의 일정한 균열간격으로 안정화되는 모습을 보여주었다. 또한 상대적으로 탄성계수가 높은 철근으로 보강된 시험체들이 탄성계수가 상대적으로 낮은 FRP로 보강된 시험체들에 비해 균열의 성장이 가장 작게 나타났다. 평균균열간격은 T형단면에 장방향단면에 비해 약 20% 정도 넓게 형성되었다. 이러한 경향은 부재 단면의 강성이 크면 클수록 동일한 하중의 크기에서는 보강근의 변형률이 작아지기 때문에 균열간격도 넓게 형성되는 것으로 판단된다.

Table 4. Comparison of measured crack widths with calculated crack widths

Specimen	$w_{iexp}$ (mm)	$w_{cal(1)}$ (mm)	$w_{cal(2)}$ (mm)
LRST-3	0.075	0.155	0.143
LRGF-3	0.265	0.678	0.643
LRAF-3	0.285	0.585	0.553
LRCF-3	0.090	0.320	0.297
LTST-4	0.035	0.064	0.064
LTGF-4	0.150	0.284	0.290
LTAF-4	0.141	0.232	0.237
LTCF-4	0.040	0.113	0.114

Table 4에서는 단기 반복하중 종료 후 지속적인 사용하중이 다시 없던 직후 바로 측정된 순간최대균열폭  $w_{iexp}$ 과 ACI 440.1R-06에서 제시하고 있는 식(1)과 ACI 440.1R-15에서 제시한 (2a)에 의하여 계산된 균열폭들  $w_{cal(1)}$ ,  $w_{cal(2)}$ 과 비교한 결과를 보여주고 있다. 여기서  $w_{cal(2)}$ 의 결과는 인장보강근의 최대허용간격으로 나타낸 식(2a)를 식(1)과 같이 비교하기 위하여 균열폭 식으로 재정리한 후 계산된 값으로 식(2b)로 계산된 결과보다는 보수적이기 때문에 선택하였다. 그리고 계산을 위해 사용된 부착계수  $k_b$ 는 철근콘크리트 보의 경우 1.0 그리고 FRP-보강근콘크리트 보의 경우는 1.4를 적용하였다.

실험에서 측정된 즉시균열폭  $w_{iexp}$ 은 ACI 440.1R에서 제안된 식(1)과 식(2a)의 계산된 결과와 비교하여 보면 평균적으로 각각 2.3배와 2.2배 크게 나타나 설계지침에서 제시된 1.0과 1.4의 부착계수는 본 시험체들의 결과와 비교할 때 보수적인 값으로 판단된다. 따라서 보강근들의 부착성능을 알아볼 수 있는 부착계수 식으로 식(2a)를 재정리한 후 역으로  $w_{iexp}$ 를 대입하여 부착계수 값을 계산하여 보았다. 결과적으로 철근콘크리트 보의 경우는 단면형태와 상관없이 0.6, FRP-보강근 콘크리트 보의 경우는 평균 장방형단면에서 0.6, T형단면에서는 0.7로 계산되어 설계지침에서 상수로 제시된 1.0과 1.4의 부착계수는 본 실험결과와 비교해서 상당히 보수적인 값으로 나타났다. 따라서 이러한 변동성은 장기균열폭을 결정하는데도 많은 영향을 줄 수 있기 때문에 추후 연구에서 보다 추가적인 실험데이터를 갖고 변수분석을 통하여 합리적인 예측모델이 요구된다.

#### 4.2 장기하중에 의한 균열폭 결과 및 분석

단기 시공하중의 영향을 받은 모든 시험체에 장기 사용하중이 재하되면서 새로운 균열의 발생은 극히 제한적이었으나 기존 균열들의 추가적인 성장은 다소 진전되는

모습을 나타냈다. 다만 시간이 지남에 따라 더 이상 크게 발전하지는 않으면서 균열폭만 증가하는 양상을 나타냈는데, Fig. 2에서는 즉시균열폭에 365일 동안 시간에 따라 증가하는 순수 장기균열폭을 더한 총장기균열폭을 보여주고 있다.

GFRP나 AFRP-보강근을 배근한 시험체의 경우 보강근의 탄성계수가 대략 2~3배 정도 큰 CFRP나 철근을 배근한 시험체에 비해 전체 1년의 재하기간 동안 일어나는 총장기균열폭에 약 90% 가까이 초기 100일 안에 발생한 반면, CFRP나 철근을 배근한 시험체에서는 상대적으로 전 실험기간 동안 완만하게 증가하는 모습을 보여주고 있다.

특히 탄성계수가 상대적으로 낮은 GFRP나 AFRP-보강근의 경우 100일 동안에서도 초기 30~50일 동안에 가장 급격하게 균열폭이 증가하면서 높은 기울기를 나타내었고, 그 후 100일까지의 기간에는 상대적으로 다소 완만한 기울기를 나타내고 있으나 이 기간 동안 철근이나 CFRP-보강근 콘크리트 시험체에 비해 약 3~4배의 높은 균열폭의 증가를 보여주었다. 이러한 결과는 총장기균열폭의 특정 시간대별 영향을 살펴보기 위하여 요약한 Table 5에서도 확인할 수 있다.

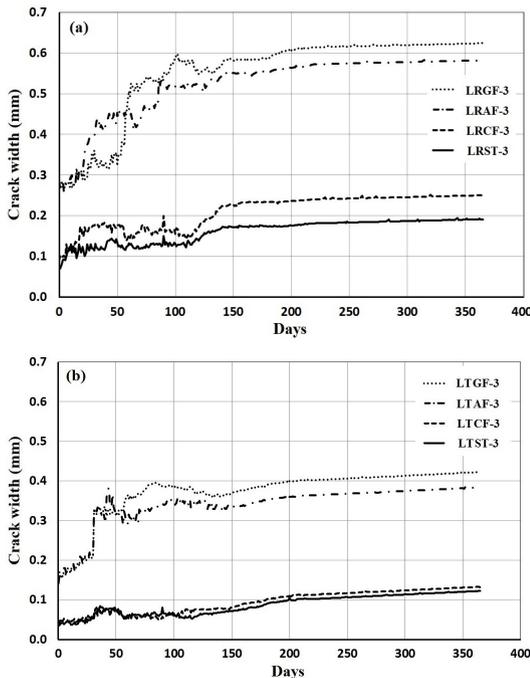


Fig. 2. Measured crack widths for test specimens (a) rectangular section (b) T-shaped section

Table 5. Total long-term crack widths at several time stages

Specimen	$w_{iexp}$ (mm)	Total long-term crack widths (mm)			
		30 Days	90 Days	180 Days	365 Days
LRST-3	0.075	0.114	0.150	0.173	0.191
LRGF-3	0.265	0.361	0.549	0.590	0.625
LRAF-3	0.285	0.393	0.532	0.553	0.584
LRCF-3	0.090	0.175	0.200	0.233	0.250
LTST-4	0.035	0.053	0.080	0.090	0.123
LTGF-4	0.150	0.210	0.388	0.390	0.422
LTAF-4	0.141	0.209	0.342	0.352	0.384
LTCF-4	0.040	0.056	0.057	0.101	0.132

Scott and Beeby[9]와 Gilbert[10]의 연구에서 비록 철근콘크리트 부재이지만 재하 초기에는 시간종속적인 영향보다는 인장강성(Tension stiffening)의 빠른 감소를 보여주면서 보강근의 응력과 변형률이 급격히 증가하는 결과를 보여주었는데, 본 연구의 실험에서도 이 기간 동안 측정된 보강근의 변형률이 급격히 증가하는 결과를 보여주어 인장강성의 급격한 감소현상이 초기 균열폭 증가의 주된 원인일 수 있다는 것을 뒷받침하였다.

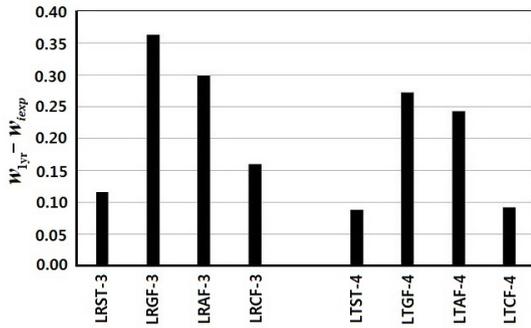


Fig. 3. Crack width increase over 1 year of sustained loading

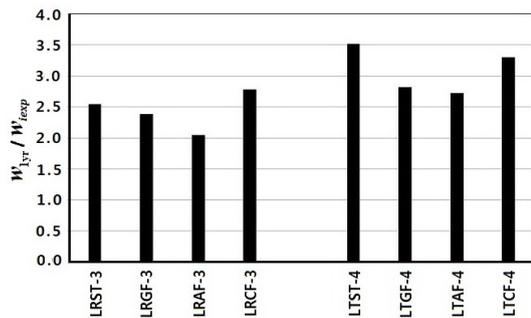


Fig. 4. Crack width increase over 1 year of sustained loading as a multiple of immediate crack width

Fig. 3과 4에서는 시험체별로 각각 1년 동안 시간중속적인 영향으로 순수 증가된 절대적인 균열폭의 크기와 즉시균열폭에 대한 총장기균열폭의 비를 보여주고 있다. Fig. 3에 의하면 순수장기균열폭의 증가는 철근시험체에 비해 GFRP나 AFRP-보강근 시험체에서 2.6~3배 크게 나타난 반면 CFRP-보강근 시험체에서는 1.1~1.4배 정도만 크게 나타나 상대적으로 증가율은 작았다. 이는 Gross 등[8]의 연구에서 균열단면에서는 크리프 응력의 재분배와 보강근의 부착성능 저하로 보강근 변형률이 크게 증가하면서 균열폭 증가의 원인으로 지적하였는데 본 연구결과에서도 상대적으로 탄성계수가 낮은 보강근 시험체에서 더욱 이러한 경향이 두드러진 것을 확인할 수 있었다.

또한 단면형태별 비교에서는 장방형단면의 시험체가 T형단면의 시험체보다는 균열폭의 증가가 1.3~1.5배 크게 일어났으나 차이는 크지 않은 것을 알 수 있다. 이는 본 시험체들의 경우 시간중속적인 영향을 받는 압축 측 콘크리트의 단면적 차이가 크지 않기 때문으로 생각된다.

즉시균열폭에 대한 총장기균열폭의 상대적인 비로 나타낸 Fig. 4의 결과에 의하면 보강근의 재료와 상관없이 1년간 장방형단면 시험체에서는 평균적으로 약 2.4배, T형단면 시험체에서는 약 3.1배 정도 증가한 것으로 나타났다. 다만 절대적인 균열폭의 증가는 다소 작았던 T형단면 시험체에서 오히려 상대적인 증가율은 다소 큰 결과를 보여주었다. 이는 지속하중이 재하된 직후 발생하는 즉시균열폭의 경우 T형단면에 비해 장방형단면이 크게 나오는 반면, Fig. 3에서 살펴보았듯이 순수 장기균열폭의 증가량은 상대적으로 양 단면에서의 차이가 크지 않기 때문으로 판단된다.

### 5. 기존 제안식의 고찰 및 제언

이 전의 절에서 언급되었듯이 Gross 등[8] 연구에서는 장기하중하의 시간중속적인 효과를 반영하고자 단순히 ACI 440.1R-06의 식(1)에서 단기하중 대신에 지속적인 사용하중의 변형률로 대체하였고, 2.0의 시간중속계수  $k_t$ 를 적용하여 식(3)과 같이 수정식을 제안하였다. 그러나 본 연구에서는 시간중속계수가 단면형태별로 차이가 있는 것을 확인하였고 또한 균열폭 고유의 변동성을 고려하여 보수적으로 구분하여 장방형단면의 경우  $k_t=2.5$ , T형단면의 경우  $k_t=3.5$ 를 제안하였다.

Fig. 5에서는 1년간 장기하중 실험으로 얻어진 총장기균열폭  $w_{exp}$ 에 대한 ACI 440.1R-15의 식(2a)을 재정의한 값에 시간중속계수를 곱하여 계산된 총장기균열폭  $w_{cal}$  비를 두 그룹으로 나누어 비교한 결과를 보여주고 있다. 이는 부착계수  $k_b$ 와 시간중속계수  $k_t$ 가 장기균열폭에 어떻게 영향을 미치는지 살펴보기 위함이다.

여기서 사용된 시간중속계수는 그룹 1에서는 본 연구에서 제안된 2.5와 3.5를 각각 단면형태별로 나누어 적용하였고, 그룹 2에서는 식 (3)에서 권장한 2.0을 단면형태별로 구분하지 않고 모든 시험체에 사용하였다. 부착계수도 마찬가지로 그룹 1에서는 본 실험결과에 의해 계산된 결과를 적용하여 철근콘크리트 시험체의 경우 모든 단면에 0.6을, FRP-보강근 콘크리트 시험체의 경우는 단면형태별로 각각 장방형단면과 T형단면 시험체에 평균값으로 얻어진 0.6과 0.7을 적용하였다. 그룹 2에서는 기존 설계지침에서 보강근 종류별로 보수적으로 제안된 1.0과 1.4를 각각 적용하였다.

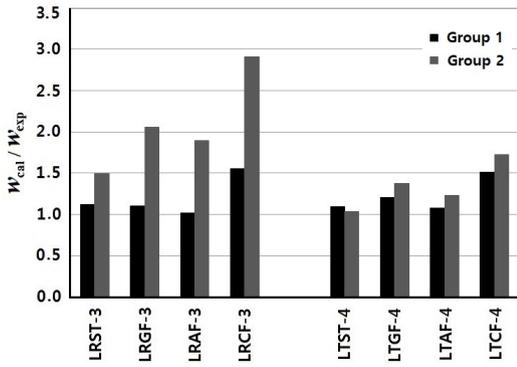


Fig. 5. Comparison of calculated to experimental results under sustained loading

Fig. 5에서 보여주는 바와 같이 예상대로 본 실험에 기초하여 평균값으로 얻어진 부착계수와 시간중속계수를 적용한 그룹 1의 결과가 기존 설계지침과 제안식에서 제안된 값들을 적용한 그룹2의 결과 보다는 실험결과에 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 그룹 2의 결과를 놓고 본다면 설계지침에서 보수적으로 권장한 1.4의 부착계수는 T형단면보다는 장방형단면에서 더욱 민감하게 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 또한 T형단면의 경우 1.0 보다 작은 부착계수의 사용 가능성이 높은데 이를 적용한다면 적용된 2.0의 시간중속계수는 실제 장기균열폭 보다 작게 계산되는 결과를 보여줄 수 있다.

이러한 결과들을 종합하여 본다면 지속하중을 받는 FRP-보강근 콘크리트 보의 합리적인 균열제어 식을 제안하기 위해서는 보다 추가적인 실험데이터에 기초한 변수분석을 통하여 단면형태별로 구분할 수 있는 부착계수와 시간중속계수의 제안식과 더불어 지속하중에 의한 최대허용균열폭 범위에 대한 논의가 요구된다.

## 6. 결론

본 연구에서는 장기하중을 받는 FRP-보강근 콘크리트 보의 균열제어를 위한 합리적인 균열폭 식을 유도할 수 있는 기초자료를 제공하고자 장방형과 T형단면을 갖는 철근과 FRP-보강근 콘크리트 보에 대한 장기 휨실험을 통하여 얻어진 결과들을 비교·분석함으로써 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 시공하중을 고려한 단기사용하중 제하 직후에 측정된 최대균열폭으로 계산된 평균 부착계수는 철근콘

크리트 보의 경우는 단면형태와 상관없이 0.6, FRP-보강근 콘크리트 보의 경우는 장방형단면에서 0.6, T형단면에서는 0.7로 계산되어 설계지침에서 제시된 1.0과 1.4의 부착계수와 큰 차이를 보여주고 있어 콘크리트와 FRP-보강근이 갖고 있는 고유의 변동성을 고려한 보다 합리적인 설계식의 필요성이 제기된다.

둘째, 순수장기균열폭은 철근시험체에 비해 GFRP나 AFRP-보강근 시험체에서는 2.6~3.0배 증가하였으나 CFRP-보강근 시험체에서는 1.1~1.4배의 증가를 보여주었다. 이는 상대적으로 탄성계수가 낮은 보강근 시험체에서 시간중속적인 영향으로 인한 보강근의 변형률이 더 크게 증가할 수 있는 것을 확인하였다.

셋째, 즉시균열폭에 대한 총장기균열폭의 비는 보강근의 재료와 상관없이 1년간 장방형단면 시험체에서는 평균적으로 약 2.4배, T형단면 시험체에서는 약 3.1배 정도 증가한 것으로 나타나 시간중속계수를 보수적으로 각각 2.5와 3.5로 제안한다.

이러한 결과들을 종합하여 본다면 지속하중을 받는 FRP-보강근 콘크리트 보의 합리적인 균열제어를 위해서는 추가적인 실험데이터에 기초하여 다양한 변수분석을 수행하므로써 보다 합리적인 부착계수와 시간중속계수의 설계식과 더불어 장기하중에 의한 최대허용균열폭 범위에 대한 논의가 요구된다.

## References

- [1] ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar (ACI 440.1R-15)", p. 83, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2015.
- [2] Canadian Standards Association, "Canadian Highway Bridge Design Code(CAN/CSA-S6-06)", p. 28, Fiber Reinforced Structures, Section 16, 2006.
- [3] Japan Society of Civil Engineers, "Recommendation for Design and Construction of Concrete Structures Using Continuous Fiber Reinforcing Materials", p. 325, Concrete Engineering Series No. 23, 1997b.
- [4] ACI Committee 318-99, "Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-99) and Commentary (ACI 318R-99)", p. 391, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan 48333-9094, 1999.
- [5] P. Gergely and L. A. Lutz, "Maximum Crack Width in Reinforced Concrete Flexural Members", Causes, Mechanism and Control of Cracking In Concrete, SP-20, American Concrete Institute, pp. 87-117, 1968.
- [6] R. J. Frosch, "Another Look at Cracking and Crack

- Control in Reinforced Concrete", *ACI Structural Journal*, V. 96, No. 3, pp. 437-442, 1999.
- [7] ACI Committee 440, "Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP Bar (ACI 440.1R-06)", p. 44, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, 2006.
- [8] S. P. Gross, J. R. Yost and D. J. Stefanski, "Effect of Sustained Loads on Flexural Crack Width in Concrete Beams Reinforced with Internal FRP Reinforcement", *SP-264-2*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan, pp. 13-31, 2009.
- [9] R. H. Scott and A. W. Beeby, "Log-Term Tension Stiffening Effects in Concrete", *ACI Structural Journal*, V. 102, No. 1, pp. 31-39, 2005.
- [10] R. I. Gilbert, "Tension Stiffening in Lightly Reinforced Concrete Slabs", *Journal of Structural Engineering*, V. 133, No. 6, pp. 899-903, 2007.  
DOI: [https://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2007\)133:6\(899\)](https://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2007)133:6(899))

최 봉 섭(Bong-Seob Choi)

[정회원]



- 1994년 6월 : 뉴욕주립대 토목공학  
학과(공학석사)
- 1998년 12월 : 펜실베이니아주립대  
토목공학과(공학박사)
- 2002년 3월 ~ 현재 : 청운대학교  
건축공학과 교수

<관심분야>

철근콘크리트구조, FRP-보강근 콘크리트구조