

# FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도

## Concrete Shear Strength of FRP Reinforced Concrete Beam

조재민\* · 장희석\*\* · 김명식\*\*\* · 김충호\*\*\*\*

Cho, Jae Min · Jang, Hee Suk · Kim, Myung Sik · Kim, Chung Ho

### Abstract

This study is to develop equations that consider the elastic modulus ratio of FRP bar and steel reinforcement, shear span to depth ratio, and flexural reinforcement ratio of FRP bar, to determine concrete shear strength of FRP reinforced concrete beams without shear reinforcement. As experimental parameters, 2 types of FRP bar, 3 types of shear span to depth ratio, and 3 types of flexural reinforcement were used. Experimental results for two of shear span to depth ratio were quoted from previous study to evaluate effect of shear span to depth ratio in more detail. Shear strength correction factors needed for evaluating concrete shear strength were proposed from regression analysis using above experimental results. Equations suggested from this study and other codes were examined and compared with 31 experimental results available in the literature. From this comparison, it could be known that the equation suggested from this study gives the most approaching result to experimental results

**Keywords** : FRP bar, concrete shear strength, shear span to depth ratio, flexural reinforcement ratio, shear strength correction factor

### 요 지

본 연구에서는 전단보강이 없는 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 제작 및 파괴실험을 통하여 FRP bar와 철근의 탄성계수비, 휨보강근비 및 전단지간비의 영향을 동시에 고려하여 콘크리트 전단강도를 평가할 수 있는 수식을 제안하였다. 실험변수로서 2종류의 FRP bar, 3종류의 전단지간비 및 3종류의 휨보강근비를 사용하였으며, 총 36개의 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보를 제작하고 4점 휨 실험을 수행하였다. 전단지간비의 영향을 상세히 분석하기 위하여 앞서 연구된 2종류의 전단지간비에 대한 실험결과를 인용하였다. 실험자료들을 회귀분석하여 콘크리트 전단강도 계산에 필요한 전단강도보정계수를 구하는 수식을 제안하였다. 제안된 수식의 검증에 하기 위하여 여러 문헌으로부터 조사된 31개의 실험결과에 대하여 본 연구의 제안식과 다른 연구자들이 제안한 수식들을 함께 적용하여 비교 분석하였다. 그 결과, 본 연구에서 제안된 수식은 실험결과에 가장 근접하는 결과를 주는 것을 알 수 있었다.

**핵심용어** : FRP bar, 콘크리트 전단강도, 전단지간비, 휨보강근비, 전단강도보정계수

### 1. 서 론

철근콘크리트 구조물의 장기적인 내구성 확보는 건설 산업에서 지속적으로 주 관심사가 되어오고 있다. 철근콘크리트 구조물의 내구성 단축은 염해 및 해양환경 등에서의 사용에 따른 철근의 부식에 주로 기인하며, 이에 따라 과도한 보수·보강 및 유지 관리 비용을 초래하게 된다(문헌영 등, 2001; El-sayed *et al.*, 2006).

현재 철근콘크리트 구조물에서 철근의 대체제로서 연구가 진행되고 있는 신소재 재료는 대표적으로 FRP(Fiber Reinforced Polymer) bar이다. FRP bar는 중량대비 인장강도가 크고 비부식성, 비전·자기성 등의 장점 및 취성적인

특성을 갖고 있다. 따라서 1990년대 이후 미국, 유럽, 일본, 캐나다 등에서 철근콘크리트 구조물에 철근을 대신하여 FRP bar를 사용하기 위한 연구가 진행되어 왔으며, 현재 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 설계기준을 제시해 가고 있는 실정이다(ACI440.1R-06, 2006; CSA, 2002).

국내에서도 FRP bar 사용에 관한 연구가 많이 행해지고 있는데, 철근콘크리트 구조물의 보수·보강에 사용하는 단면 확대공법(SIM) 및 표면매립공법(NSM)에서 FRP bar의 활용(윤순중, 2002), 철근을 대체하여 휨보강근으로 사용 시 휨거동(윤순중 등, 2003), FRP bar의 부착응력 특성(문도영 등, 2005; 박찬기 2004), FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도 평가(노경배 등, 2006; 김재영 등,

\*부경대학교 대학원 토목공학과 석사과정 (E-mail : tm0515@nate.com)

\*\*정회원 · 교신저자 · 부경대학교 건설공학부 교수 (E-mail : janghs@pknu.ac.kr)

\*\*\*정회원 · 부경대학교 건설공학부 교수 (E-mail : kimms@pknu.ac.kr)

\*\*\*\*정회원 · 경성대학교 건설환경공학부 교수 (E-mail : chkim@ks.ac.kr)

2007; 정원일 등, 2007) 등으로 구분해 볼 수 있다.

위에서 언급한 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트의 전단강도 평가에 관하여 ACI 및 일본 토목학회에서는 전단지간비(a/d)의 변화를 고려하지 않고 단지 휨보강근비의 변화만 고려하여 콘크리트의 전단강도를 평가하고 있으나, 캐나다 기준에서는 휨보강근비 외에 전단지간비의 변화까지 고려한 식을 제시하고 있다(CSA, 2002).

FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도 평가에 관한 국내의 연구 중에서 노경배 등에 의한 연구는 휨보강근비의 변화만이 고려되었으며, 김재영, 정원일 등의 연구는 휨보강근비 외에 전단지간비의 변화도 고려하였으나, 실험 시 전단지간비가 적은 경우에 정착길이의 미확보로 인한 부작용이 발생되어 제안된 식의 재 고찰이 요구된다.

본 연구에서는 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 제작 및 파괴실험을 통하여 CSA에서 고려한 전단지간비 및 휨보강근비 이외에 추가로 FRP bar와 철근의 탄성계수비까지 동시에 고려하여 FRP 보강근을 사용한 콘크리트보의 콘크리트 전단강도를 평가할 수 있는 수식을 제안하고자 한다. 이를 위하여 본 연구에서 행해진 실험결과와 김재영 등(2007) 및 정원일 등(2007)의 연구에서 2종류의 전단지간비(3.5, 4.5)에 대한 실험결과를 함께 회귀분석하여 콘크리트의 전단강도 계산에 필요한 전단강도보정계수를 구하는 식을 제안하였다.

여러 문헌들에서 조사된 실험결과들에 대하여 본 연구에서의 제안식과 다른 연구자들에 의하여 제안된 식을 함께 적용 및 비교하여 제안된 수식의 타당성을 검토하였다.

## 2. 문헌조사

### 2.1 ACI 440.1R-06

ACI 440 위원회에서는 철근과 FRP bar의 축강성 비를 고려하여 식 (1)과 같이 FRP 보강근을 사용한 콘크리트보의 콘크리트 전단강도를 평가하는 식을 제안하였다(ACI 440.1R-03).

$$V_{c,f} = \frac{\rho_f E_f}{90 \beta_1 f'_c} V_c \quad (1)$$

여기서,  $V_{c,f}$ : FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도

$$\rho_f = A_f / b_w d$$

$E_f$ : FRP bar의 탄성계수

$$V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f'_c} b_w d$$

그러나 이 식은 휨보강근비가 0이면 콘크리트 전단강도가 0이 되며 또한 콘크리트 압축강도가 증가함에 따라 콘크리트 전단강도가 감소하는 모순을 가지고 있다. 이에 따라 ACI

440 위원회는 식(1) 대신에 균열이후 콘크리트 단면의 중립축 변화를 고려하는 식(2)와 같은 콘크리트 전단강도 식을 제안하였다(ACI 440.1R-06).

$$V_{c,f} = \frac{2}{5} \sqrt{f'_c} b_w c \quad (2)$$

여기서,  $b_w$ : 단면 폭(mm)

$c$ : 균열환산단면의 중립축(mm)= $kd$

$$k = \sqrt{2\rho_f n_f + (\rho_f n_f)^2} - \rho_f n_f$$

$$n_f = E_f / E_c$$

### 2.2 CSA

CSA에서는 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도 식을 아래와 같이 제안하였다. 여기서는 전단지간비 및 휨보강근비가 동시에 고려되었다.

$$V_{c,f} = 0.035 \lambda \Phi_c \left( f'_c \rho_f E_f \frac{V_F}{M_F} d \right)^{1/3} b_w d \quad (3)$$

여기서,

$$0.1 \lambda \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \leq V_{c,f} \leq 0.2 \lambda \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d$$

$\lambda$ : 콘크리트 밀도효과

$\Phi_c$ : 콘크리트 재료저항계수

단,  $d > 300$  mm인 경우,

$$V_{c,f} = \left( \frac{130}{1,000+d} \right) \lambda \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \geq 0.08 \lambda \Phi_c \sqrt{f'_c} b_w d \quad (4)$$

## 3. 실험

### 3.1 재료

시험체 제작에 사용된 콘크리트는 설계기준강도 27 MPa의 레미콘을 사용하였으며, 배합표는 표 1과 같다. 표준양생한 3개의 공시체를 사용하여 구한 압축강도의 평균값은 31 MPa이었다.

휨보강근으로 사용된 FRP bar는 국내 D사에서 인발성형 형식으로 제작되었으며, 콘크리트와의 부착을 위하여 표면에 나선형 이형을 갖고 있다(그림 1). 물성치는 제조사에서 제시된 값을 사용하였으며 표 2에 나타내었다.

### 3.2 시험체 제작

실험에 사용된 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보는 길이 3200 mm, 높이 250 mm, 폭 150 mm 및 200 mm로서 총 36개가 제작되었다. 실험의 정확성을 기하기 위하여 동일 조건의 시험체를 각각 2개씩 제작하였다.

FRP bar는 그림 2에서와 같이 보의 인장부에 피복두께를 30 mm로 하여 각각 2분씩 배근하였다. 사용된 FRP bar는  $\phi 9$  mm의 CFRP 및 GFRP bar와  $\phi 13$  mm의 CFRP 및 GFRP bar 4종류이며 전단보강근은 사용되지 않았다.

표 1. 콘크리트 배합표

슬럼프 (cm)	공기량 (%)	물-시멘트비 (%)	잔골재율 (%)	단위량(kg/m <sup>3</sup> )				
				시멘트	물	잔골재	굵은골재	혼화제
15	4.5	47.6	46.9	363	168	835	960	1.800

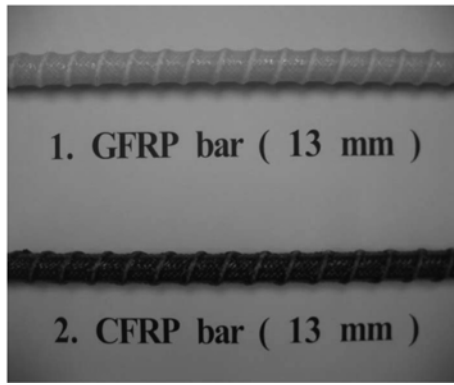
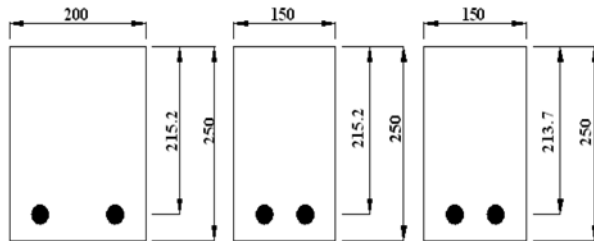


그림 1. FRP bar의 형상

표 2. FRP bar의 물성치

종류	직경 (mm)	탄성계수 (MPa)	극한강도 (MPa)
CFRP	9	146,200	2,130
	13	147,900	2,023
GFRP	9	48,200	980.7
	13	49,100	940.6



(a)  $A_f = 2\phi 9$  (b)  $A_f = 2\phi 9$  (c)  $A_f = 2\phi 13$

그림 2. FRP bar 콘크리트 보 시험체의 단면 및 배근형태 (단위: mm)

사용된 콘크리트 보 시험체명에 대한 상세한 설명은 그림 3에 나타내었다. 즉, 첫 번째 문자는 두 종류의 FRP bar(CFRP

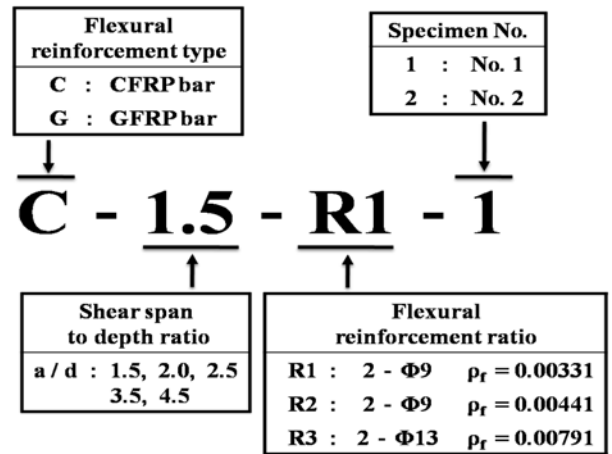


그림 3. 시험체 설명

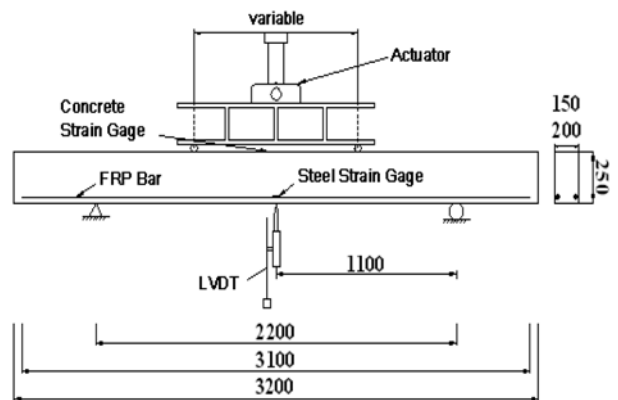


그림 4. 시험체 제원 및 재하 형태

및 GFRP bar), 두 번째는 다섯 종류의 전단지간비(1.5~4.5), 세 번째는 세 종류의 휨보강근비(0.00331~0.00791)를 나타내기 위하여 사용되었으며, 마지막 문자는 두개의 동일한 시험체 구분을 위한 것이다. 이에 따라 전단지간비 1.5, 2.0, 2.5에 대하여 급변에 실험된 36개의 보 시험체와 전단지간비 3.5, 4.5에 대하여 앞서 행한 연구(김재영 등, 2007; 정원일

표 3. 시험체 분류

시험체 명	전단 지간비	CFRP bar	단면 폭 (mm)	시험체 명	전단 지간비	GFRP bar	단면 폭 (mm)
C-1.5-R1-1,2	1.5	2φ9	200	G-1.5-R1-1,2	1.5	2φ9	200
C-1.5-R2-1,2		2φ9	150	G-1.5-R2-1,2		2φ9	150
C-1.5-R3-1,2		2φ13	150	G-1.5-R3-1,2		2φ13	150
C-2.0-R1-1,2	2.0	2φ9	200	G-2.0-R1-1,2	2.0	2φ9	200
C-2.0-R2-1,2		2φ9	150	G-2.0-R2-1,2		2φ9	150
C-2.0-R3-1,2		2φ13	150	G-2.0-R3-1,2		2φ13	150
C-2.5-R1-1,2	2.5	2φ9	200	G-2.5-R1-1,2	2.5	2φ9	200
C-2.5-R2-1,2		2φ9	150	G-2.5-R2-1,2		2φ9	150
C-2.5-R3-1,2		2φ13	150	G-2.5-R3-1,2		2φ13	150
C-3.5-R1-1,2	3.5	2φ9	200	G-3.5-R1-1,2	3.5	2φ9	200
C-3.5-R2-1,2		2φ9	150	G-3.5-R2-1,2		2φ9	150
C-3.5-R3-1,2		2φ13	150	G-3.5-R3-1,2		2φ13	150
C-4.5-R1-1,2	4.5	2φ9	200	G-4.5-R1-1,2	4.5	2φ9	200
C-4.5-R2-1,2		2φ9	150	G-4.5-R2-1,2		2φ9	150
C-4.5-R3-1,2		2φ13	150	G-4.5-R3-1,2		2φ13	150

등, 2007)에서 사용한 24개의 보 시험체에 대한 분류를 표 3에 함께 나타내었다.

### 3.3 실험 방법

그림 4와 같이 단순지지된 상태에서 3종류의 전단지간비의 변화( $a/d=1.5, 2.0, 2.5$ )를 주기 위하여 하중 가력점간의 거리를 변화시킬 수 있는 상태에서 4점 휨 실험을 수행하였으며, 250 kN의 Actuator를 사용하여 1 mm/min의 변위 제어 방식으로 보가 파괴될 때까지 가력하였다. 가력된 하중은 Load cell로 측정하고, 실험체 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 보의 처짐을 측정하였다. 또한 휨보강근의 중앙과 콘크리트 압축측 단면에 변형률게이지를 부착하여 각각의 변형률을 측정하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

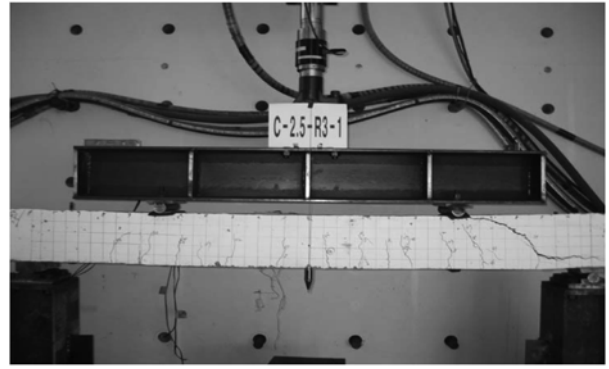
### 4.1 파괴 형상

최대하중 작용 시 각 실험체의 파괴 형상 중에서 대표적인 것을 그림 5에 나타내었다. 실험결과, 모든 실험체에서 휨 및 부착에 의한 파괴는 발생하지 않았고, 전단, 전단-압축 및 전단-인장 파괴가 발생하였다. 이는 전단파괴를 유도하기 위하여 전단보강근을 사용하지 않았고 또한 부착파괴를 방지하기 위하여 콘크리트 보를 양쪽 지점 외부로 500 mm 씩 돌출시켜서 정착길이를 확보하였기 때문인 것으로 판단된다.

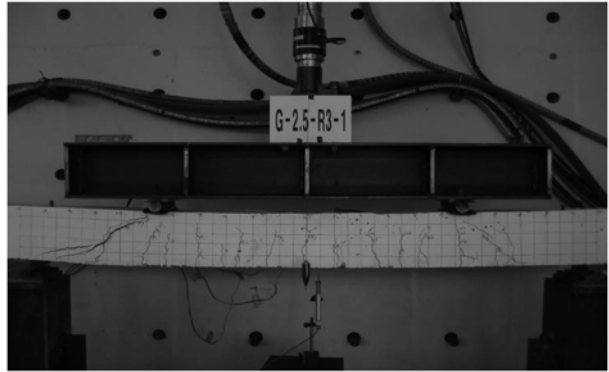
하중-처짐 그래프에서 대표적인 것을 그림 6에 나타내었다. 이 그림에서 휨강성의 크기는 R3 시험체, R1 시험체, R2 시험체의 순서로 나타나는데 이것은 단면의 크기와 휨보강근비의 영향에 의한 때문이다. 즉, R1 시험체는 R2 시험체에 비하여 휨보강근비는 작지만 단면적이 더 크므로 유효단면2차모멘트가 더 커지게 되고 따라서 휨강성이 증가하게 된다.

### 4.2 콘크리트 전단강도 분석

각각의 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보 시험체들에 대하여 정적파괴실험에서 구한 최대하중 값으로 부터 최대전



(a) C-2.5-R3-1의 전단-인장파괴



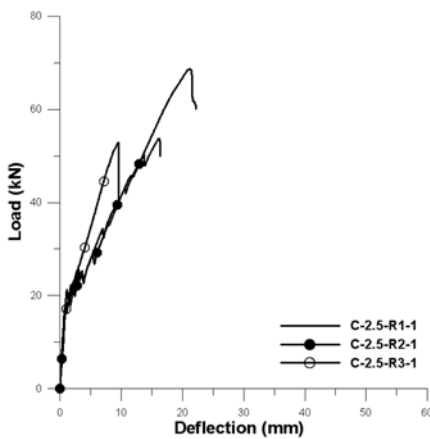
(b) G-2.5-R3-1의 전단파괴

그림 5. 시험체별 파괴형상

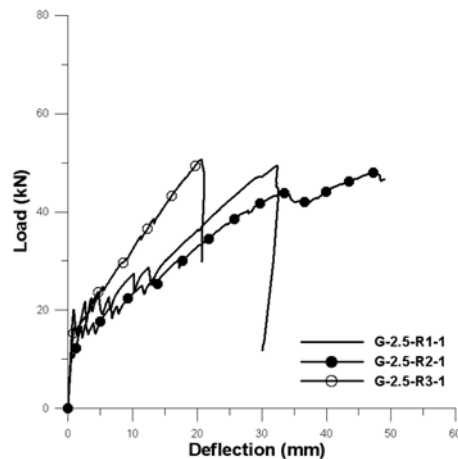
단력을 구하였다. 즉, 2개의 동일 시험체로부터 구한 최대하중 평균값의 1/2을 최대전단력으로 하였다.

그러나 3종류의 휨보강근비 변화를 주기 위하여 보 시험체의 단면적을 달리하였기 때문에 콘크리트의 전단강도 분석은 최대전단력이 아닌 최대전단력을 보의 단면적으로 나눈 평균전단응력을 구하여 행하였다.

표 4에 시험체 별 최대하중, 최대전단력, 평균 전단응력을 나타내었으며, 그림 7에 전단지간비 및 휨보강근비에 따른 평균전단응력을 나타내었다. 표 4와 그림 7에서 전단지간비 3.5, 4.5에 해당하는 자료들은 선행 연구(김재영 등, 2007; 정원일 등, 2007)에서의 실험 결과들이다.



(a) C-2.5 계열 시험체



(b) G-2.5 계열 시험체

그림 6. 시험체별 하중-처짐 곡선

표 4. 시험체별 최대하중, 최대전단력, 평균전단응력

Specimen	$P_{max}$ (kN)	$V_{max}$ (kN)	$v_c$ (MPa)	Specimen	$P_{max}$ (kN)	$V_{max}$ (kN)	$v_c$ (MPa)
C-1.5-R1-1,2	170.124	85.12	1.98	G-1.5-R1-1,2	127.128	63.56	1.47
C-1.5-R2-1,2	101.734	50.87	1.57	G-1.5-R2-1,2	123.818	61.91	1.92
C-1.5-R3-1,2	158.354	79.18	2.47	G-1.5-R3-1,2	147.889	73.95	2.31
C-2.0-R1-1,2	97.823	48.91	1.13	G-2.0-R1-1,2	100.423	50.21	1.17
C-2.0-R2-1,2	87.621	43.81	1.36	G-2.0-R2-1,2	86.377	43.19	1.34
C-2.0-R3-1,2	113.798	56.90	1.78	G-2.0-R3-1,2	84.983	42.49	1.33
C-2.5-R1-1,2	68.695	34.35	0.80	G-2.5-R1-1,2	49.445	24.72	0.57
C-2.5-R2-1,2	48.472	24.24	0.75	G-2.5-R2-1,2	47.285	23.64	0.73
C-2.5-R3-1,2	50.604	25.30	0.79	G-2.5-R3-1,2	52.862	26.43	0.83
C-3.5-R1-1,2	57.055	28.53	0.66	G-3.5-R1-1,2	49.700	24.85	0.58
C-3.5-R2-1,2	52.390	26.30	0.81	G-3.5-R2-1,2	40.840	20.42	0.63
C-3.5-R3-1,2	57.860	28.93	0.90	G-3.5-R3-1,2	39.660	19.83	0.62
C-4.5-R1-1,2	51.580	25.79	0.60	G-4.5-R1-1,2	38.430	19.22	0.45
C-4.5-R2-1,2	47.915	23.96	0.74	G-4.5-R2-1,2	33.160	16.58	0.51
C-4.5-R3-1,2	55.100	27.55	0.86	G-4.5-R3-1,2	39.860	19.93	0.62

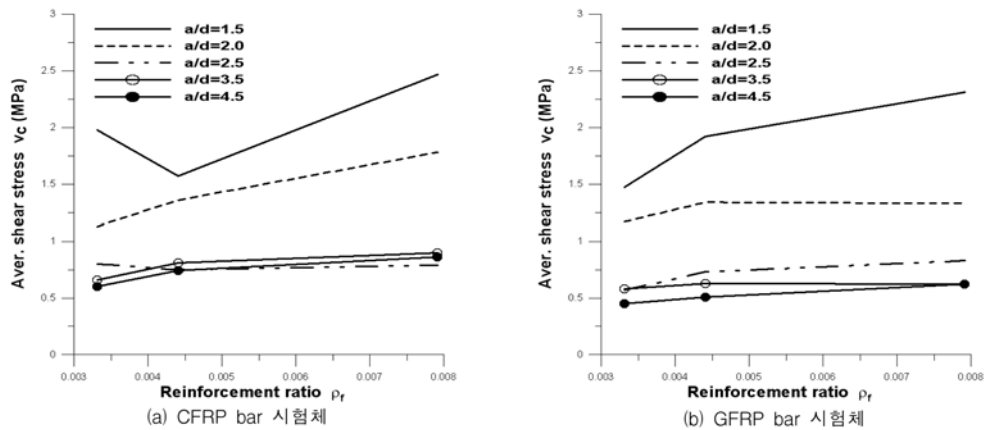


그림 7. 시험체별 전단지간비 및 휨보강근비 변화에 따른 평균전단응력( $v_c$ )

표 4와 그림 7에서 알 수 있듯이 평균전단응력은 CFRP 보강근을 사용한 시험체에서 GFRP 보강근을 사용한 시험체보다 크게 나타났고, 전단지간비가 작을수록 또한 휨보강근비가 증가할수록 증가하는 것으로 나타났다. 한편, 그림 7(a)에서 전단지간비 1.5, 휨보강근비 R2의 시험체(C-1.5-R2-1,2)의 전단응력은 전체적인 분포로 판단해볼 때 상대적으로 낮은 값을 나타내므로 실험에서 오류가 있었다고 판단된다.

### 4.3 콘크리트 전단강도보정계수 제안

기존 철근콘크리트 구조물에서 사용하는 콘크리트 전단강도 식 (5)는 일반적으로 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보의 콘크리트 전단강도를 과대평가하게 된다. 이러한 점을 보완하기 위하여 FRP bar와 철근의 축강성비, 휨보강근비, 전단지간비 등의 매개변수를 고려하므로써 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 콘크리트 전단강도를 정확히 평가하려는 연구가 계속되고 있다.

본 연구에서는 식 (6)과 같이 철근콘크리트 구조물의 콘크리트 전단강도 식 (5)에 FRP bar와 철근의 탄성계수비, 전단지간비, 휨보강근비들이 고려된 계수  $\beta_f$ 를 곱하여 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 콘크리트 전단강도를 구하고

자 하였다. 여기서  $\beta_f$ 는 전단강도보정계수라고 정의하였다.

$$V_c = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}b_w d \quad (5)$$

$$V_{c,f} = \beta_f V_c = \beta_f \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}b_w d \quad (6)$$

먼저 각각의 시험체들의 전단강도보정계수  $\beta_f$ 값을 실험으로부터 구한 최대전단력과 식 (6)을 이용하여 계산하였다. 이들 값을 그림 8에 나타내었는데, 횡축의 하부는 GFRP 보강근을 사용한 보에 대한 휨보강근비를, 횡축의 상부는 CFRP 보강근을 사용한 보에 대한 휨보강근비를 나타내고 있다. 이 그림에서 전단지간비가 작을수록, 휨보강근비가 증가할수록 전단강도보정계수  $\beta_f$ 가 증가함을 알 수 있다. 그리고 GFRP bar 보에 비하여 CFRP bar 보에서 전단강도보정계수  $\beta_f$ 가 더 크게 되는 것을 알 수 있다.

그러나 그림 8에서도 알 수 있듯이 전단지간비가 2.5보다 큰 경우에는 전단강도보정계수에 대한 전단지간비의 영향이 미소하였다. 따라서 전단지간비 2.5를 경계로 하여 각각 회귀분석을 실시한 결과 식 (7), (8)과 같이 전단강도보정계수 산정식을 얻었고, 두 식 모두 결정계수가 0.961, 0.916으로 1에 근접하는 신뢰도를 나타내었다. 회귀분석 시, 실험과정에

서 오류가 있었던 것으로 판단되는 C-1.5-R2-1,2 시험체의 결과는 제외하였다.

$\frac{a}{b} \leq 2.5$ 의 경우;

$$\beta_f = 3.944 + 0.256 \frac{E_f}{E_s} - 1.472 \frac{a}{d} + 73.886 \rho_f \quad (7)$$

$\frac{a}{d} > 2.5$ 의 경우;

$$\beta_f = 0.716 + 0.466 \frac{E_f}{E_s} - 0.095 \frac{a}{b} + 32.101 \rho_f \quad (8)$$

#### 4.4 여러 제안식들의 비교 분석

본 연구에서 제안된 식의 타당성을 검토하기 위하여 여러 연구자들에 의하여 실험되었던 31개의 실험결과에 식 (6)-(8)을 적용하여 보았다. 또한 비교를 위하여 ACI 440.1R-06의 제안식 (2), CSA(2002)의 제안식 (3), (4)를 함께 적용하여 분석하였으며, 이들 결과를 표 5와 그림 9에 나타내었다.

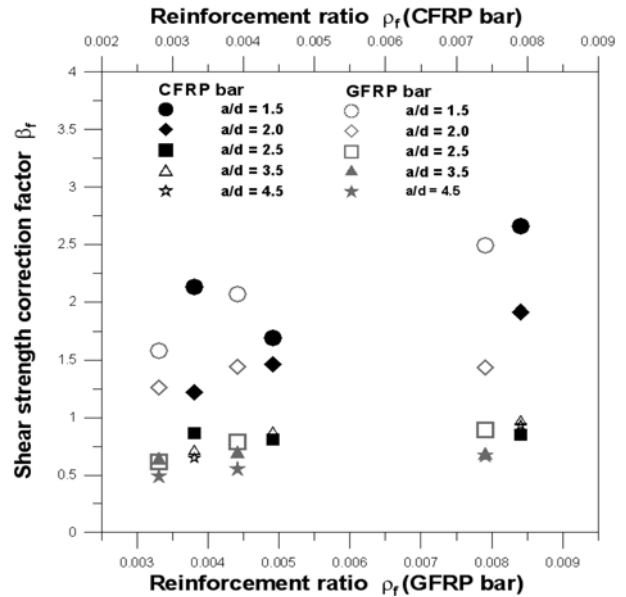


그림 8. FRP bar 콘크리트 보의 전단강도 보정계수( $\beta_f$ ) 변화

표 5. 여러 제안식들의 비교 결과

Researcher	No.	$E_f$ (GPa)	a/d	f (%)	$V_{test}$ (kN)	$V_{code}$			$V_{test}/V_{code}$		
						ACI	CSA	Proposed	ACI	CSA	Proposed
A.Ghani <i>et al.</i>	1	145	1.82	0.50	96.18	22.24	39.80	86.87	4.32	2.42	1.11
	2	145	2.67	0.25	36.11	16.23	27.80	42.02	2.22	1.30	0.86
	3	145	2.67	0.50	46.95	23.88	37.32	50.44	1.97	1.26	0.93
	4	145	2.67	0.63	47.23	24.64	37.83	47.85	1.92	1.25	0.99
	5	145	2.67	0.88	42.71	28.49	42.29	51.68	1.50	1.01	0.83
	6	145	3.56	0.50	46.99	22.24	31.82	41.82	2.11	1.48	1.12
	7	145	4.50	0.50	38.45	22.24	29.43	37.56	1.73	1.31	1.02
Alkhradji <i>et al.</i>	8	40	2.69	2.30	53.40	22.35	35.11	52.50	2.39	1.52	1.02
	9	40	2.61	0.77	36.10	14.05	25.33	33.79	2.57	1.43	1.07
	10	40	2.61	1.34	40.10	18.09	30.47	41.44	2.22	1.32	0.97
El-sayed <i>et al.</i>	11	128	3.10	0.87	77.50	52.68	56.50	95.95	1.47	1.37	0.81
	12	39	3.10	0.87	70.50	30.81	56.50	76.04	2.29	1.25	0.93
	13	134	3.10	1.24	104.0	59.88	53.36	102.7	1.74	1.95	1.01
	14	42	3.10	1.22	60.00	35.71	53.36	82.64	1.68	1.12	0.73
	15	134	3.10	1.72	124.5	67.96	52.76	115.3	1.83	2.36	1.08
	16	42	3.10	1.71	77.50	41.24	52.76	95.82	1.88	1.47	0.81
Maurizio <i>et al.</i>	17	45	2.20	1.28	89.40	15.22	26.20	62.33	5.87	3.41	1.43
	18	45	1.10	1.28	162.0	15.22	33.01	121.4	10.64	4.91	1.33
Tureyen <i>et al.</i>	19	40.5	3.40	0.96	108.1	60.83	99.09	137.4	1.78	1.09	0.79
	20	37.6	3.40	0.96	94.80	58.89	99.34	136.6	1.61	0.95	0.69
	21	40.5	3.40	1.92	137.0	85.27	102.3	196.8	1.61	1.34	0.70
	22	37.6	3.40	1.92	152.6	82.64	102.5	196.1	1.85	1.49	0.78
Yost <i>et al.</i>	23	40.3	4.06	1.11	38.10	19.65	28.63	40.38	1.94	1.33	0.94
	24	40.3	4.06	1.42	31.50	17.08	24.15	35.39	1.84	1.30	0.89
	25	40.3	4.06	1.66	44.40	23.57	32.74	49.52	1.88	1.36	0.90
	26	40.3	4.06	1.81	45.30	29.85	41.05	63.37	1.52	1.10	0.71
	27	40.3	4.06	2.05	45.10	28.72	48.96	62.11	1.57	1.16	0.73
	28	40.3	4.06	2.27	42.20	27.08	36.33	59.65	1.56	1.16	0.71
Zhao <i>et al.</i>	29	105	3.00	1.51	45.00	24.42	34.48	42.47	1.84	1.31	1.06
	30	105	3.00	3.02	46.00	32.32	43.44	60.22	1.42	1.06	0.76
	31	105	3.00	2.27	40.50	28.88	39.50	51.40	1.40	1.03	0.79
Mean								2.41	1.54	0.92	
St. deviation								1.94	0.80	0.18	

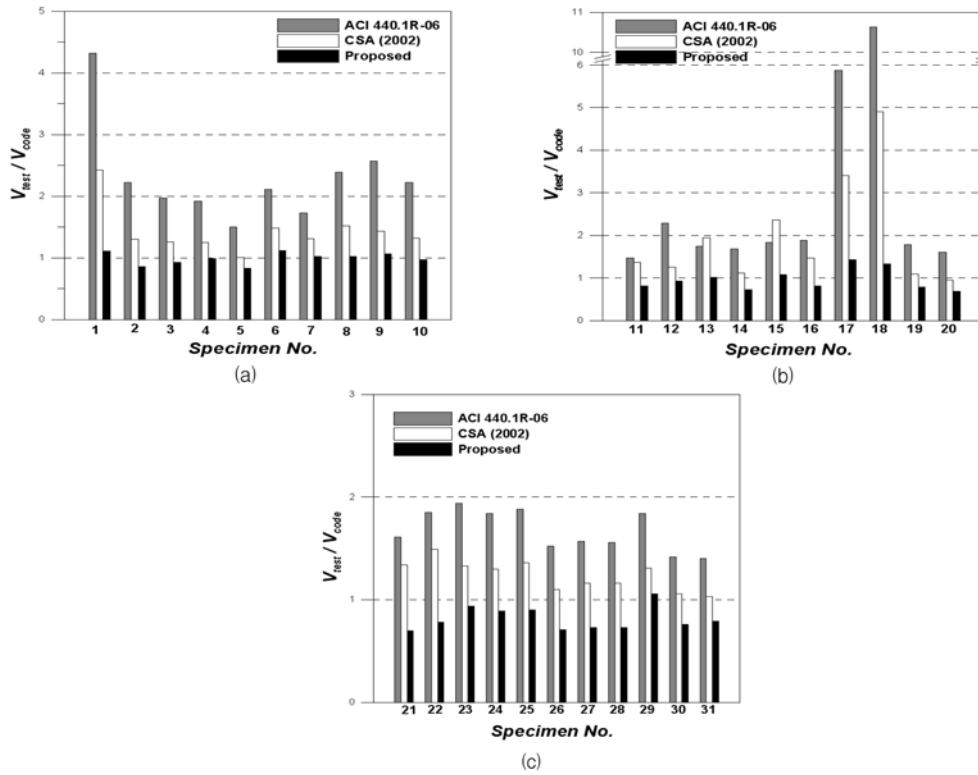


그림 9. 여러 제안식들의 비교

표 5에서  $V_{test}$ 는 여러 연구자들에 의해 수행된 실험결과 값을 나타낸 것이고,  $V_{code}$ 는 각각의 제안식으로부터 구한 제안값을 나타낸 것이다.

표 5와 그림 9에서 확인할 수 있듯이 ACI 440.1R-06에서 제안한 식은 전반적으로 콘크리트 전단강도를 과소평가하고 있다. 반면에 전단지간비와 휨보강근비를 모두 고려한 CSA(2002)의 제안식은 ACI 440.1R-06에 비하여 상당히 실험치에 근접하는 결과를 보여주었다. 그러나 전반적으로 전단강도를 과소평가하며, 특히 전단지간비가 2.5 이하인 1, 17, 18번 시험체에서는 타 시험체들에 비해 상당히 과소평가되는 경향이 있다. 이는 CSA에서도 언급한 바와 같이 전단강도 추천식 제안 시 전단지간비 2.5 이하에 해당하는 시험체들의 자료 부족에 기인한 결과라고 판단된다.

본 연구의 제안식에 의하면  $V_{test}/V_{code}$ 의 평균값이 0.92이며 표준편차가 0.18로서 다른 제안식들에 비하여 실험값에 더 근접하는 결과를 나타내어 제안식의 우수성을 보여주고 있다. 특히 본 실험의 전단지간비 1.5~4.5 및 휨보강근비 0.331~0.791%에 해당하는 1, 3, 4, 6, 7, 9번 시험체는  $V_{test}/V_{code}$  값이 0.93~1.11로 실험값을 잘 예측하고 있다.

그러나 일부 시험체에 대하여 콘크리트 전단강도를 다소 과대평가하여 CSA에 비하여 상대적으로 떨어지는 예측을 하고 있다. 이는 본 연구의 제안식은 FRP bar 휨보강근비가 0.331~0.791%의 범위인 것에 기인한다고 판단된다. 따라서 보다 확장된 휨보강근비 범위에서의 연구가 필요함을 보여주고 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 FRP 보강근을 사용한 콘크리트 구조물의 콘크리트 전단강도를 정확하게 평가하기 위하여, FRP bar와

철근의 탄성계수비, 전단지간비, 휨보강근비를 달리한 일련의 콘크리트 보의 제작 및 파괴 실험을 수행하고 실험결과를 분석하였으며, 이들로부터 얻어진 결론들은 다음과 같다.

1. FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보에서 콘크리트의 평균 전단응력은 전단지간비가 작을수록, 또한 FRP bar와 철근의 탄성계수비 및 휨보강근비가 증가할수록 증가하였다.
2. FRP 보강근을 사용한 콘크리트 보에서 콘크리트 전단강도 산정에 필요한 전단강도보정계수  $\beta_f$ 를 다음과 같이 FRP bar와 철근의 탄성계수비, 전단지간비 및 휨보강근비의 함수로 제안하였다

$$V_{c,f} = \beta_f V_c = \beta_f \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (6)$$

$\frac{a}{d} \leq 2.5$ 의 경우;

$$\beta_f = 3.944 + 0.256 \frac{E_f}{E_s} - 1.472 \frac{a}{d} + 73.886 \rho_f \quad (7)$$

$\frac{a}{b} > 2.5$ 의 경우;

$$\beta_f = 0.716 + 0.466 \frac{E_f}{E_s} - 0.095 \frac{a}{d} + 32.101 \rho_f \quad (8)$$

3. ACI 440.1R-06, CSA(2002) 및 본 연구의 제안식을 여러 연구자들의 실험결과에 적용해본 결과, ACI의 제안식은 콘크리트 전단강도를 과소평가하는 경향을 보였다. CSA(2002)의 제안식은 실험치에 근접하는 결과를 보여주었으나, 전단지간비 2.5 이하에서는 과소평가하는 경향을 나타내었다. 본 연구의 제안식은 위의 제안식들에 비하여 평균적으로 실험 결과에 더욱 근접하는 결과를 보여주었다. 본 연구에서 제안된 식들은 휨보강근비가 0.331~0.791% 범위에 한정된 시험체들로부터 구한 식이므로, 보다 일반화하기 위하여 추후 휨보강근비 범위의 확장에 따른 연구가 필요하다고 판단된다.

## 감사의 글

이 논문은 2007학년도 부경대학교 기성회 학술연구비에 의하여 연구되었습니다(과제번호: PK-2007-027).

## 참고문헌

김재영, 김명갑, 김충호, 장희석(2007) GFRP bar 콘크리트 보의 전단지간비 및 휨보강근비 변화에 따른 콘크리트 전단강도, 2007 가을학술발표회 논문집, 한국콘크리트학회, 제19권 2호, pp. 113-116.

노경배, 진치섭, 장희석, 김희성, 황금식(2006) FRP bar 콘크리트 보의 휨보강근비 변화에 따른 콘크리트 전단강도, 한국구조물진단학회논문집, 한국구조물진단학회, 제10권 2호, pp. 76-82.

문도영, 오홍섭, 심중성(2005) 이형 리브를 갖는 CFRP 보강근의 부착성능에 관한 실험적 연구, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제25권 제5A호, pp. 719-726.

문헌영, 김성수, 김홍삼(2001) 우리나라 콘크리트 구조물의 철근 부식 현황, 콘크리트학회지, 한국콘크리트학회, 제13권 5호, pp. 58-63.

박찬기(2004) 콘크리트 보강용 FRP 보강근의 수분 민감성 및 열화 특성, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제24권 제2A호, pp. 381-390.

윤순중, 김병석, 정상균, 정재호(2003) 유리섬유 보강 플라스틱 보강근 다발로 보강된 콘크리트보의 휨거동, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제23권 제6A호, pp. 1067-1075.

윤순중(2002) FRP 보강 콘크리트 바닥판의 거동에 관한 연구, 홍익대학교 부설과학기술연구소.

정원일, 장희석, 김충호, 황금식(2007) CFRP bar 콘크리트 보의 전단지간비 및 휨보강근비 변화에 따른 콘크리트 전단강도, 2007년도 정기학술대회논문집, 대한토목학회, pp. 2250-2253.

ACI Committee 440 (2003) *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars(ACI 440.IR-03)*,

American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

ACI Committee 440 (2006) *Guide for the Design and Construction of Concrete Reinforced with FRP bars(ACI 440.IR-06)*, American Concrete Institute, Farmington Hills, Michigan.

Ghani, A. Razaqpur, Burkan, O., Isgor, S. Greenaway, and Alistair Selley (2004) Concrete contribution to the shear resistance of fiber reinforced polymer reinforced concrete members, *Journal of Composites for Construction, ASCE* Vol. 8, No. 5, pp. 452-460.

Ahmed, K. El-sayed, Ehab, F. El-Salakawy, and Brahim Benmkrane (2006) Shear strength of FRP reinforced concrete beam without transverse reinforcement, *Structural Journal, ACI*, Vol. 103, No. 2, pp. 235-243.

Canadian Standard Association (2002) *Design and Construction of Building Components with Fibre Reinforced Polymers*, Canadian Standard S806-02, Rexdale, Ontario, Canada. pp. 177.

Gross, S.P., Yost, J.R., and Dinehart, D.W. (2002) Shear strength of normal and high strength concrete beams reinforced with GFRP bars, *American Society of Civil Engineers*, Kona, HI. pp. 426-437.

Maurizio, Guadagnini, Kypros Pilakoutas, and Peter Waldron (2006) Shear resistance of FRP RC Beam : Experimental Study, *Journal of Composites for Construction, ASCE* Vol. 10, No. 6, pp. 464-474.

Stratford, T. and Burgoyne, C. (2003) Shear analysis of concrete with brittle reinforcement, *Journal of Composites for Construction, ASCE*, Vol. 7, No. 4, pp. 323-330.

Tureyen, A.K and Frosch, R.J. (2002) Shear tests of FRP-Reinforced concrete beams without stirrups, *Structural Journal, ACI*, Vol. 99, No. 4, pp. 427-434.

Yost, J.R., Gross, S.P. and Dinehart, D.W. (2001) Shear strength of normal strength concrete beams reinforced with deformed GFRP Bars, *Journal of Composites for Construction, ASCE* Vol. 5, No. 4, pp. 268-275.

(접수일: 2009.1.14/심사일: 2009.3.16/심사완료일: 2009.5.11)