

# CFRP 쉬트로 보강된 사각형 콘크리트 압축부재의 보강 효과

문경태<sup>1</sup>, 박상렬<sup>2\*</sup>, 고광민<sup>3</sup>

## Strengthening Effect of Axial Square Concrete Members Wrapped by CFRP sheet

Kyoung-Tae Moon<sup>1</sup>, Sang-Yeol Park<sup>2\*</sup>, Kwang-Min Koh<sup>3</sup>

**Abstract:** This study deals with the strengthening effect and behavioral characteristics of square concrete column wrapped with carbon FRP sheet. The increase in axial compression capacity comes from the confinement effect of wrapped CFRP sheet. Because of the shape of square concrete column, the confinement effect is smaller than that in circular column. For the experimental program, four parameters including the number of sheet, the size of column specimen, the aspect ratio, the corner rounding, and the transformation in shape from square to circular were selected to examine the strengthening effect and behavioral characteristics for each parameter. Experimental program comprised fifty five square concrete column specimens for different eleven types. The compression test results confirmed that the strengthening effect can be increased by the confinement of wrapped and bonded CFRP sheet. However, the confining effect was decreased with the increase of square column size. The other hand, the ductility in square concrete column greatly increased due to caging effect of CFRP sheet. The transformation in shape from square to circular considerably increased both the compressive strength and the ductility of the concrete column wrapped with CFRP sheet. In addition, using test results and existing studies, accuracy and reliability of the existing strength models for CFRP-confined square concrete are verified.

**Keywords:** CFRP sheet, Confinement, Strength model, Strengthening effect, Stress-strain curve

### 1. 서 론

FRP(Fiber Reinforced Polymer)는 고강도, 비부식성, 경량성 등의 장점을 가지고 있어 콘크리트 구조물의 보수, 보강제로 널리 사용되고 있다. FRP 합성수지는 압축에 저항하는 콘크리트 기둥을 구속하기 위한 구속재 혹은 보나 슬래브 같이 휨 모멘트를 받는 휨 부재의 휨 또는 전단을 보강하기 위한 외부 부착 보강재로 사용되고 있다(Kaminski and Trapko 2006; Bulavs et al., 2005).

CFRP(Carbon FRP) 쉬트는 고강도, 고강성을 가지므로 콘크리트 기둥을 구속하여 보강하기에 매우 이상적인 재료로 주목되고 있다. CFRP 쉬트로 감싼 콘크리트에 압축력을 작용시키면 콘크리트는 하중 축의 직각방향으로 팽창하게 되며, 콘크리트 외부에 감싼 CFRP 쉬트가 이 팽창을 구속하게 되므로 심부 콘크리트는 3축 하중 상태에 놓이게 된다. 이런 상태에서 콘크리트의 압축 성능은 구속압에 의해 큰 영향을 받게

되는데, FRP는 선형탄성 거동을 하므로 콘크리트가 횡방향으로 팽창할수록 CFRP 쉬트에 의해 구속압은 증가하게 된다. 따라서, FRP 쉬트로 감싼 콘크리트 부재는 일반적으로 FRP 쉬트의 파괴강도에 도달했을 때 파괴된다(Mirmiran et al., 2000; Fam and Rizkalla 2001; Sadeghian et al., 2008).

FRP로 구속된 콘크리트에 대해 이론 및 실험연구가 많이 수행되었지만 대부분 원형 실험체에 대한 연구를 수행하였다. 따라서, 본 연구에서는 CFRP 쉬트로 감싼 각주형 부재의 보강효과와 거동에 대해 알아보기 위하여 몇 가지 변수를 가지고 실험연구를 수행하고, 실험결과와 기존 연구결과를 토대로 정사각형 단면의 콘크리트기둥에 대한 강도추정식을 제안하여 기존 강도추정모델과 비교평가하였다.

### 2. 실험계획

#### 2.1 실험체 및 실험변수

실험체는 Fig. 1에 나타난 것과 같이 한 변의 길이가 100 mm인 정사각형 단면에 높이가 200 mm인 각주형 실험체를 표준으로 사용하였으며, 각 변수별로 5개씩, 총 55개의 실험체를 제작하여 일축압축시험을 수행하였다. 실험변수는

<sup>1</sup>정회원, 제주대학교 토목공학과, 박사과정

<sup>2</sup>정회원, 제주대학교 토목공학과, 교수, 교신저자

<sup>3</sup>정회원, (자)동남종합건설, 대표이사

\*Corresponding author: sypark@jejunu.ac.kr

Department of Civil Engineering, Jeju National University

•본 논문에 대한 토의를 2017년 4월 1일까지 학회로 보내주시면 2017년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

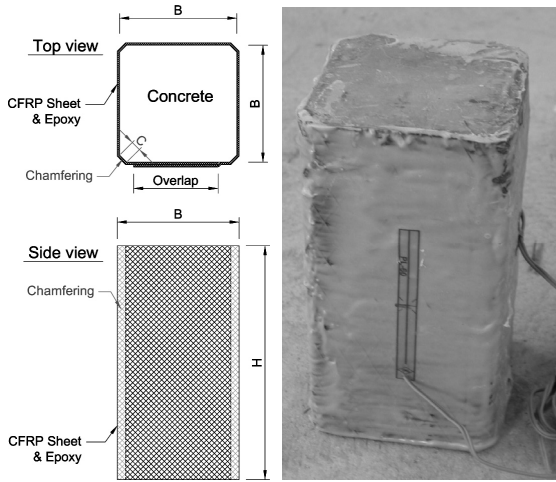


Fig. 1 Standard test specimen

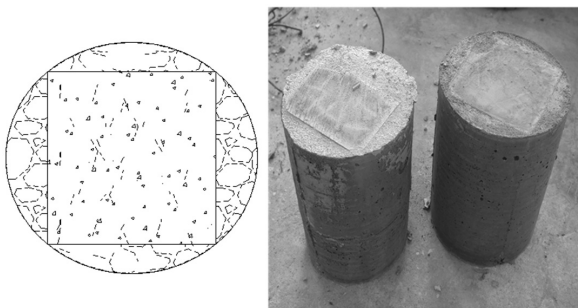


Fig. 2 Circular specimen transformed from square column

Table 1 Summary of experimental parameters

Parameter	Specimen	Layers	Dimension (mm)	H/B & Chamfering(mm)
-	C0	-	B=100 H=200	H/B=2.0
No. of layers	C1	1	B=100 H=200	H/B=2.0 (C=3.0)
	C2	2	B=100 H=200	
	C3	3	B=100 H=200	
Specimen size	C4	-	B=75 H=150	H/B=2.0 (C=3.0)
	C1	1	B=100 H=200	
	C5	-	B=125 H=250	
Aspect ratio (H/B)	C4	-	B=75 H=150	H/B=2.0 (C=3.0)
	C6	1	B=75 H=225	H/B=3.0 (C=3.0)
	C7	-	B=75 H=300	H/B=4.0 (C=3.0)
Chamfering (C)	C8	-	-	H/B=2.0 (C=0)
	C9	1	B=100 H=200	H/B=2.0 (C=1.5)
	C10	-	B=100 H=200	H/B=2.0 (C=4.5)
Transformation of shape	C11	1	D=141 H=200	H/D=1.4

CFRP 쉬트의 보강겹수, 실험체의 크기, 형상비(H/B), 모따기 크기이며, 실험변수를 Table 1에 정리하였다. 보강량에 대한 영향을 검토하기 위하여 CFRP 쉬트를 1, 2, 3겹으로 보강하여 거동을 검토하였으며, 크기 효과를 확인하기 위하여 각 변의 길이가 75, 100, 125 mm로, 형상비(H/B)는 2.0, 3.0, 4.0로 변화시켰고, 모따기의 경우 모따기 길이를 0, 15, 30, 45 mm로 변수를 두었다. 또한 Fig. 2에 나타낸 것과 같이 단면을 원형으로 개량하여 부재의 내력증진 및 보강 효과를 비교, 평가하였다.

## 2.2 사용 재료

### 2.2.1 콘크리트

실험체 제작에는 일반 레미콘 제품을 사용하였으며, 사용된 콘크리트의 재료시험결과를 Table 2에 정리하였다.

### 2.2.2 탄소섬유쉬트(CFRP sheet)

본 연구에서는 일본 T사에서 제조된 FTS-C1-30을 사용하였으며 이 쉬트는 폴리아크릴니트랄(Polyacrylonitrile, PAN) 계인 탄소섬유쉬트로 콘크리트 구조물의 유지보수에 많이 사용되고 있는 제품이다. Table 3에 제조사에서 제공한 재료의 물성치를 정리하였다.

Table 2 Properties of concrete

Uniaxial compressive strength(MPa)	27.6
Slump(cm)	9.8
Maximum size of aggregate(mm)	25
Type of cement	Portland Type 1
Air content(%)	3.2

Table 3 Properties of CFRP sheet

Model	FTS-C1-30
Tensile strength(MPa)	3,480
Modulus of elasticity(MPa)	$2.30 \times 10^5$
Thickness(mm)	0.17
Density(g/cm <sup>3</sup> )	1.82
Ultimate elongation at break(%)	1.5

Table 4 Properties of epoxy resin

Model	Sikadur-31
Tensile strength(MPa, 14-day)	25
Bond strength(MPa, 14-day)	16.8
Modulus of elasticity(MPa, 7-day)	2,689.7

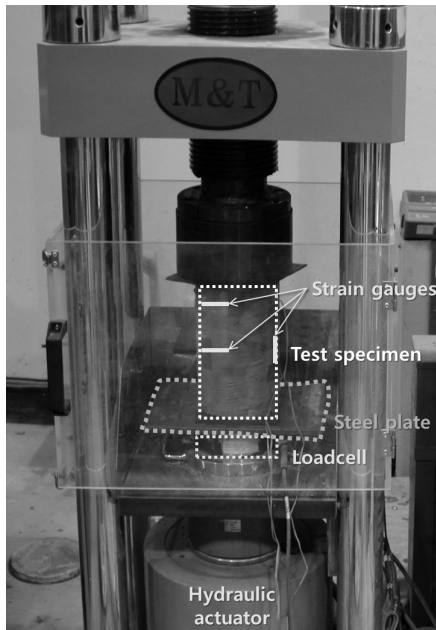


Photo 1 Overall view of test set-up

### 2.2.3 에폭시(Epoxy)

탄소섬유쉬트를 접착하는 데 사용된 에폭시는 S사의 Sikadur-31 제품을 사용하였다. 이 에폭시는 모체의 습윤여부에 상관없이 시공이 가능하고 다양한 건설재료에 대한 접착력이 매우 우수하며, 고강도, 고탄성, 내마모성, 내충격성이 우수한 것으로 알려져 있다. Table 4에 에폭시의 물성을 정리하였다.

### 2.3 시험 장치 및 측정 데이터

실험은 M사에서 제작한 압축강도시험기, MT-150AC(1,470 kN)를 사용하였으며, Photo 1에 나타난 것과 같이 실험체를 설치하여 실험을 수행하였다. 실험시 측정된 데이터는 축방향 하중과 변위, 실험체 중앙에서의 종, 횡 변형률을 측정하였으며, 데이터 수집은 M사의 동적변형률측정기(MDS16)를 사용하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

CFRP 쉬트로 보강한 각주형 실험체에 대하여 일축압축시험을 수행한 결과 Table 5와 같은 결과를 얻었다. Table 5에는 각 실험체 및 변수별 최대하중(1st peak), 압축강도, 강도비를 정리하였다.

### 3.1 보강 겹수에 따른 영향

CFRP 쉬트의 겹수에 따른 보강효과를 검토하기 위하여 쉬

Table 5 Summary of experimental test results

Parameter	Specimen	1 <sup>st</sup> peak load (kN)		UCS(MPa)		$f_{cc}'/f_{cc}'$		
		Each	Ave.	Each	Ave.			
Unconfined	C0	1	284.50		28.45	1.03		
		2	266.81		26.68	0.97		
		3	276.90	276.20	27.69	27.62	1.00	
		4	282.98		28.30		1.02	
		5	269.83		26.98		0.98	
1	C1	1	360.71		36.08	1.31		
		2	359.07		35.91	1.30		
		3	345.26	354.57	34.53	35.46	1.25	
		4	350.36		35.04		1.27	
		5	357.48		35.75		1.29	
No. of layers	2	C2	1	384.01		38.41	1.39	
			2	368.50		36.86	1.33	
			3	379.51	374.72	37.96	37.48	1.37
			4	374.81		37.49		1.36
			5	366.78		36.68		1.33
3	C3	1	413.14		41.32	1.50		
		2	410.14		41.02	1.49		
		3	371.24	393.92	37.13	39.40	1.34	
		4	398.65		39.87		1.44	
		5	376.41		37.65		1.36	
150/75	C4	1	248.98		44.28	1.60		
		2	256.60		45.63	1.65		
		3	263.89	255.75	46.93	45.48	1.70	
		4	249.82		44.43		1.61	
		5	259.48		46.15		1.67	
Specimen size	200/100	C1	1	360.71		36.08	1.31	
			2	359.07		35.91	1.30	
			3	345.26	354.57	34.53	35.46	1.25
			4	350.36		35.04		1.27
			5	357.48		35.75		1.29
250/125	C5	1	426.20		27.28	0.99		
		2	445.34		28.51		1.03	
		3	446.96	441.19	28.61	28.24	1.04	
		4	448.94		28.74		1.04	
		5	438.49		28.07		1.02	
(150/75)	C4	1	248.98		44.28	1.60		
		2	256.60		45.63	1.65		
		3	263.89	255.75	46.93	45.48	1.70	
		4	249.82		44.43		1.61	
		5	259.48		46.15		1.67	
Aspect ratio (H/B)	3 (225/75)	C6	1	278.45		49.52	1.79	
			2	277.33		49.32	1.79	
			3	264.58	272.93	47.05	48.54	1.70
			4	270.18		48.05		1.74
			5	274.12		48.75		1.76
(300/75)	C7	1	257.89		45.86	1.66		
		2	262.92		46.76	1.69		
		3	265.27	262.05	47.17	46.60	1.71	
		4	263.10		46.79		1.69	
		5	261.09		46.43		1.68	

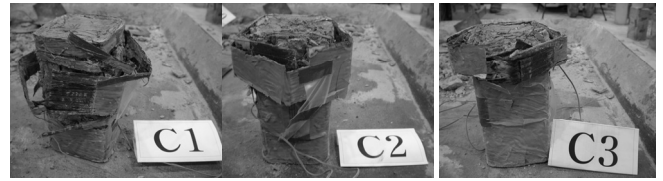
**Table 5** Summary of experimental test results(Continued)

Chamfering	C=0	C8	1	325.98		32.60	1.18	
			2	338.08		33.81	1.22	
			3	317.23	327.43	31.72	32.74	1.15
			4	334.64		33.46		1.21
			5	321.19		32.12		1.16
	C=1.5	C9	1	383.40		38.34	1.39	
			2	366.81		36.68	1.33	
			3	388.22	380.38	38.82	38.04	1.41
			4	379.60		37.96		1.37
			5	383.84		38.39		1.39
	C=3.0	C1	1	360.71		36.08	1.31	
			2	359.07		35.91	1.30	
			3	345.26	354.57	34.53	35.46	1.25
			4	350.36		35.04		1.27
			5	357.48		35.75		1.29
C=4.5	C10	1	347.05		34.72	1.26		
		2	364.01		36.42	1.32		
		3	362.47	358.39	36.26	35.85	1.31	
		4	363.61		36.38		1.32	
		5	354.79		35.49		1.29	
Transformation of shape	C11	1	672.97		43.12	1.56		
		2	621.03		39.79	1.44		
		3	596.53	623.54	38.22	39.95	1.38	
		4	607.11		38.90		1.41	
		5	620.09		39.73		1.44	

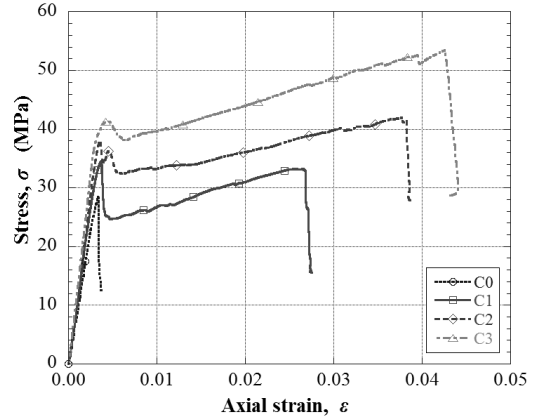
트를 1겹(C1), 2겹(C2), 3겹(C3)으로 보강하여 압축강도시험을 수행하고, 무보강 실험체(C0)와 비교하였다. Photo 2는 파괴된 실험체의 변수별 사진을 나타내고 있는데, 심부 콘크리트가 실험체의 상하단에서 심하게 으스러져 있고, 콘크리트를 감싸던 CFRP 슈트는 실험체의 모서리부분에서 인장파단된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 3은 변수별 응력-변형률 선도를 보여주고 있으며, 보강 겹수가 증가함에 따라 1차 파괴응력(1st peak)과 변형률이 증가하고 있고, 슈트로 보강된 실험체의 경우 1차 파괴 이후 큰 변형을 보인다. 최종 파괴되었다. 이는 콘크리트의 변형한계에서 심부 콘크리트의 파괴에 의한 1차 파괴를 보이고, 그 후 CFRP 슈트의 구속력에 의해 하중을 지지하다가 슈트의 구속한계에서 최종적으로 파괴되므로 이러한 경향을 나타내는 것이다. 슈트 1겹으로 보강한 C1 실험체의 경우에는 1차 파괴 응력보다 낮은 응력에서 파괴되었으나 2~3겹으로 보강한 C2, C3 실험체는 1차 파괴응력보다 큰 응력에서 파괴됨을 확인할 수 있다. 또한 C1 실험체는 무보강 실험체 대비 극한변형률이 약 10배 증가하여 부재의 연성이 매우 크게 증가하며, 보강 겹수의 증가에 따라 극한변형률 또한 함께 증가함을 확인할 수 있다.

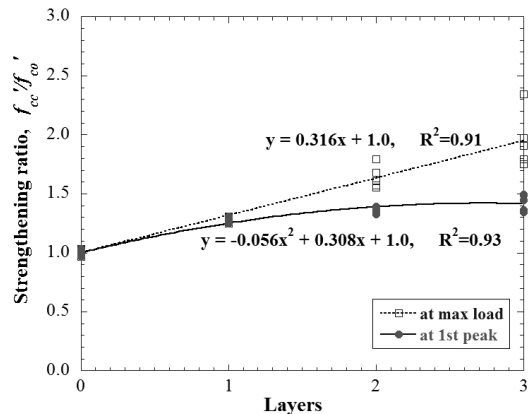
CFRP 슈트의 보강 겹수에 대한 보강효과를 확인하기 위하여 보강 겹수에 대한 강도비(Strengthening ratio,  $f'_{cc}/f'_{co}$ )를



**Photo 2** Failure modes of specimen C1, C2, and C3



**Fig. 3** Stress-strain curves for different number of layer



**Fig. 4** Strengthening effect of number of layer

Fig. 4에 나타내었다. CFRP 슈트 보강 겹수의 증가에 따라 1차 파괴응력(1st peak)은 증가폭이 크게 감소하지만, 극한응력의 경우 선형적으로 증가하는 경향을 나타내고 있다. 이는 CFRP 슈트의 고탄성적 특성으로 인해 보강 겹수가 증가함에 따라 횡구속압이 선형적으로 증가하며, 이로 인해 압축강도가 증가하기 때문이다. 따라서 보강 겹수에 대한 1차 파괴강도비와 극한강도비를 회귀분석한 결과를 식 (1)과 (2)에 나타내었으며, 본 실험결과에서 결정계수( $R^2$ )가 0.93, 0.91로 높은 상관성을 보이고 있다.

$$\frac{f'_{cc}(y)}{f'_{co}} = -0.056n^2 + 0.308n + 1 \quad R^2 = 0.93 \quad (1)$$

$$\frac{f_{cc(u)'}}{f_{co}'} = 0.316n + 1 \quad R^2 = 0.91 \quad (2)$$

여기서,  $n$ 은 보강재의 겹수이다.

### 3.2 실험체의 크기의 영향

실험체의 크기에 따른 보강효과를 검토하기 위해 실험체의 폭( $B$ )을 75, 100, 125 mm로 변화하여 실험을 수행하였다. 형상비( $H/B$ )는 2.0으로 고정하였으며, CFRP 쉬트는 모두 1겹으로 보강하여 결과를 비교하였다. Photo 3은 실험체의 파괴 형상을 보여주고 있으며, Fig. 5는 변수별 응력-변형률 선도를 보여주고 있다. 실험체 모두 1차 파괴 이후 연성 구간을 길게

나타내다 파괴되었으며, 실험체의 폭이 커질 수록 최대응력은 작아졌고, 최대변형을 또한 감소하였다. Fig. 6은 폭에 대한 강도비를 나타낸 것으로 본 실험 구간에서 실험체의 폭이 증가함에 따라 보강효과는 감소하였으며, 식(3)은 폭에 대한 강도비를 회귀분석한 결과로, 결정계수  $R^2$ 이 0.99로 실험한 범위 내에서 매우 높은 상관성을 보이고 있다.

$$\frac{f_{cc}'}{f_{co}'} = 91.66B^{-0.93} \quad R^2 = 0.99 (75 \leq B \leq 125) \quad (3)$$

여기서,  $B$ 는 실험체의 폭이며, 단위는 mm이다.



Photo 3 Failure modes of specimen C4, C1, and C5



Photo 4 Failure modes of specimen C4, C6, and C7

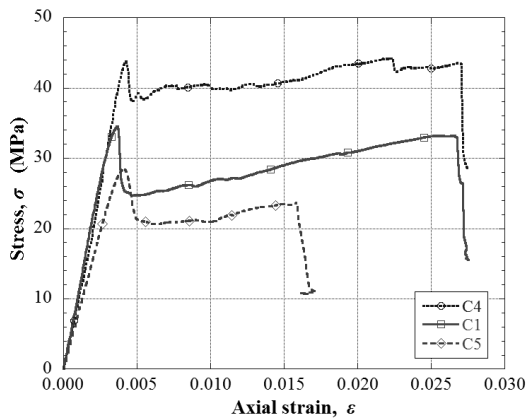


Fig. 5 Stress-strain curves for different specimen size

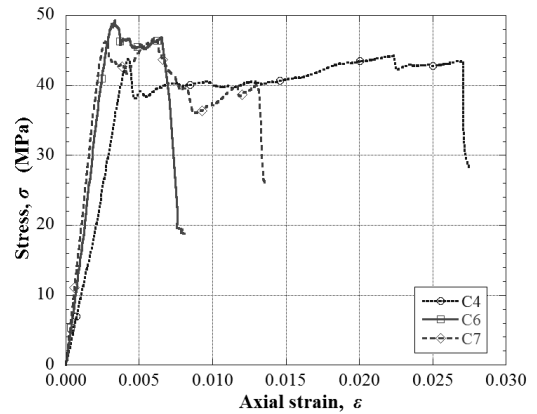


Fig. 7 Stress-strain curves for different aspect ratio

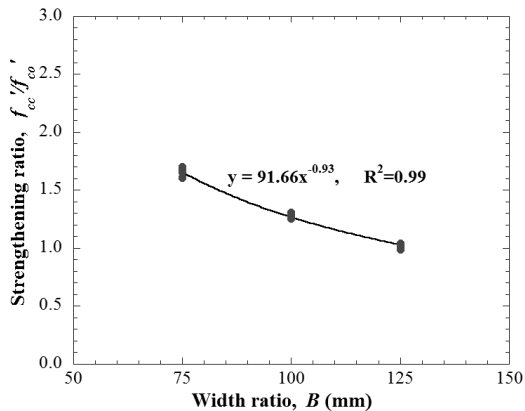


Fig. 6 Strengthening effect of specimen size

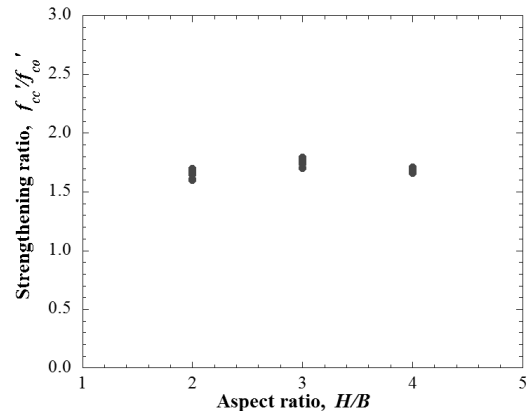


Fig. 8 Strengthening effect of aspect ratio

### 3.3 형상비 영향

실험체의 형상비(H/B)에 따른 보강효과를 확인하기 위하여 동일한 직경(75 mm)에서 형상비를 2, 3, 4로 변화시켜 보강효과를 비교하였다. Fig. 7은 C4, C6, C7 실험체의 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로, 형상비의 변화에 따라 최대 응력에는 큰 차이가 없었으나 최대 변형률은 급격히 감소하여 연성 구간이 줄어든 것을 확인할 수 있다. 이는 실험체에 축하중 작용시 단부에 응력이 집중되는데 실험체의 높이가 낮을 때에는 그 영향범위가 실험체에 전체적으로 작용하게 되나 높이가 높아짐에 따라 단부에 응력이 집중되면서 변형 구간이 짧아지므로 실험체 전체적인 연성구간이 줄어든 것으로 판단된다. Photo 4는 파괴된 실험체를 나타낸 것으로 C4 실험체의 경



Photo 5 Failure modes of specimen C8, C9, and C10

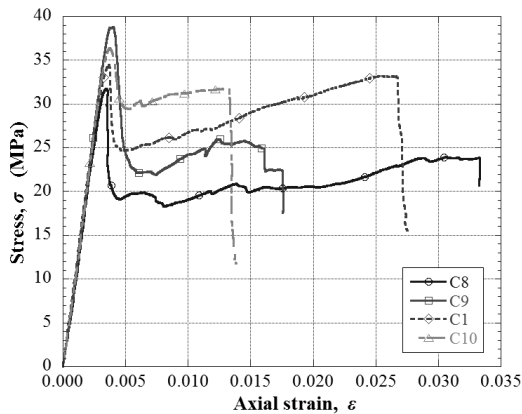


Fig. 9 Stress-strain curves for different chamfering length

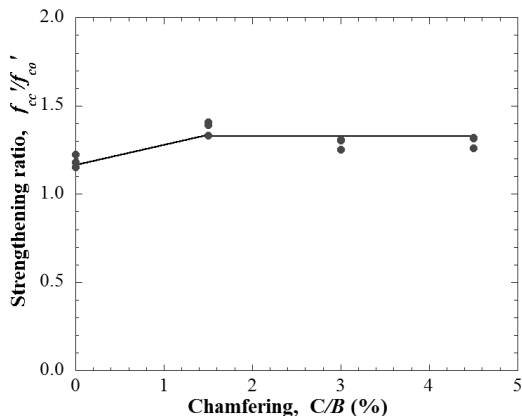


Fig. 10 Strengthening effect of the chamfering ratio

우 실험체 절반 이상이 파괴되었으나 C6, C7 실험체는 단부에서만 파괴된 것을 확인할 수 있다. Fig. 8은 형상비에 따른 보강비를 나타낸 것으로 형상비의 차이는 보강비에 큰 영향을 미치지 않는 것을 확인할 수 있다.

### 3.4 모따기의 영향

모따기가 보강효과에 미치는 영향을 확인하기 위하여 모따기 길이(C)를 0~4.5 mm 범위에서 1.5 mm 간격으로 변화시켜 결과를 비교하였다. Fig. 9는 변수별 응력-변형률 곡선을 나타낸 것으로 모따기를 하지 않은 C8 실험체의 최대 응력이 가장 낮은 값을 보이고 있으나 최대 변형률은 가장 큰 값을 보이고 있다. 최대 응력이 가장 낮고 변형률이 큰 것은 콘크리트를 슈트로 감쌀 때에 모따기가 되지 않은 모서리 부분에서 슈트가 콘크리트에 완전히 밀착되지 않고 공간이 발생하여 슈트의 구속효과가 충분히 나타나기 전에 콘크리트가 파괴되어 가장 낮은 응력값을 보이고 있으며, 콘크리트와 슈트 사이의 공간을 채우는 과정에서 축방향 변형이 더 크게 나타나는 것으로 판단된다. Fig. 10은 모따기의 크기에 따른 보강비를 나타낸 것으로 모따기가 된 C9, C1, C10 실험체의 보강비는 모따기가 없는 C8 실험체보다 약간 크게 나타나지만 본 실험 범위에서 모따기의 길이는 보강비에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다. Photo 5는 변수별 실험체의 파괴형상을 나타낸 것이며, 실험체의 모서리 부분에서 슈트의 파단으로 인해 파괴된 것을 확인할 수 있다.

### 3.5 형상 변경 효과

각주형 기둥을 원형 단면으로 변형한 후 보강효과를 확인하기 위하여 실험체를 Fig. 2와 같이 단면형상을 변형시켜 실험을 수행하였다. Fig. 11은 기준 실험체와 단면형상 변형 실험체의 응력-변형률 선도를 나타낸 것으로 단면을 변형한 경우, 무보강 실험체 대비 압축강도는 약 127%, 극한 변형률은 약 280% 증가하였다. Fig. 12는 사각형 단면에 CFRP 슈트로 보강한 경우(C1)와 원형으로 변형하여 보강한 경우(C11)의 보강효과를 비교한 것으로 원형으로 단면을 변형하였을 때 압축내력이 약 98% 더 향상됨을 확인할 수 있다.

## 4. 강도 추정 모델

황구속된 콘크리트의 압축강도를 예측하기 위한 모델은 많은 연구자들에 의해 연구되고 제안되어져 왔으며, Richart et al.(1928)가 제안한 형태(식 (4))의 모델로 많이 제안되어 왔다. 이는 콘크리트의 강도에 구속압에 의한 영향을 더하여 구

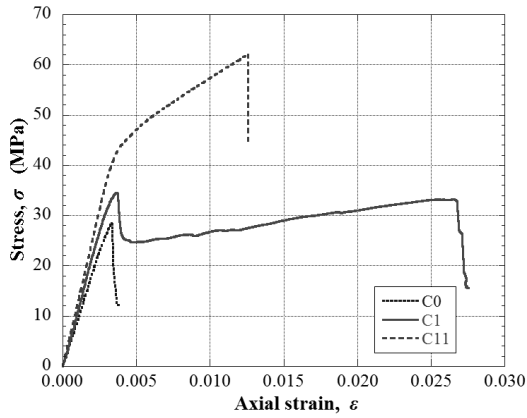


Fig. 11 Stress-strain curves for transformed circular shape

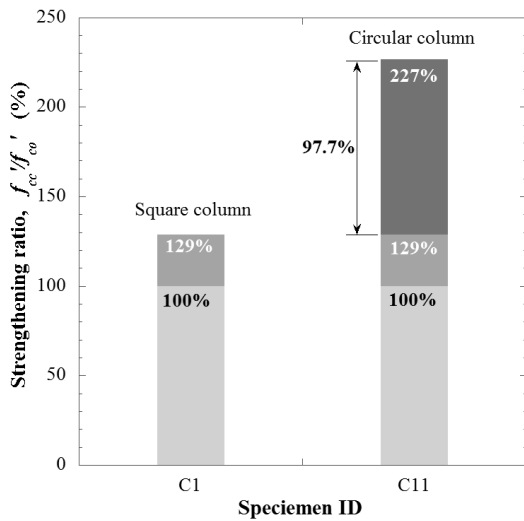


Fig. 12 Strengthening effect of transformed circular shape

속된 콘크리트의 강도를 추정하는 것으로 모델이 단순하여 널리 사용되어 왔다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \cdot \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (4)$$

여기서,  $f'_{cc}$ : 구속된 콘크리트 압축강도,  $f'_{co}$ : 무보강 콘크리트 압축강도,  $f_l$ : 횡구속압,  $k_1$ : 횡구속유효계수

위 모델은 Fig. 13에 나타난 것과 같이 FRP 인장강도에 의한 횡구속압( $f_l$ )은 구속된 콘크리트의 포아송효과에 의한 팽창응력과 같다는 가정 하에 제시되었으며, 횡구속압은 식 (5)와 같이 정리된다(Moon et al., 2015).

$$f_l = \frac{2f_{frp}t}{D} \quad (5)$$

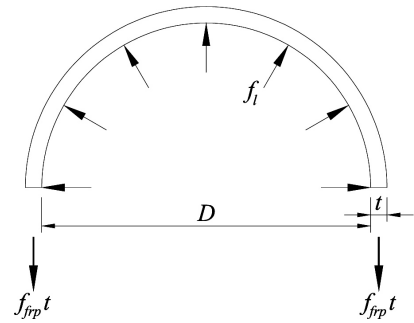


Fig. 13 Confining action of FRP composite(Moon et al., 2015)

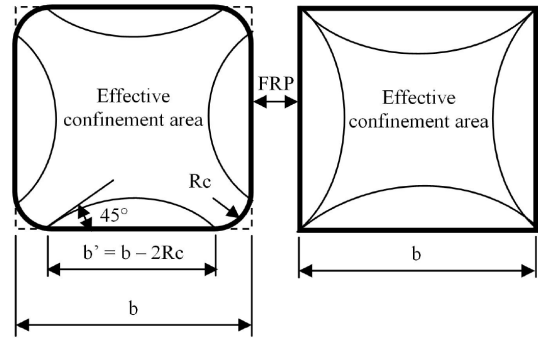


Fig. 14 Effectively confined core for square sections(Benzaid and Mesbah, 2013)

여기서,  $f_{frp}$ : FRP의 인장강도,  $t$ : FRP의 두께,  $D$ : FRP로 구속된 콘크리트의 직경 또는 폭

그러나 사각형 단면의 구속력은 원형 단면과 달리 Fig. 14에 나타난 것과 같이 모서리에 집중되며 그림과 같은 유효구속면적을 갖게 된다. 따라서 단면 전체에 고르게 구속효과가 나타나는 원형 단면 보다 낮은 구속효과를 나타내며, 구속압( $f_l$ )은 유효면적을 고려하기 위한 구속유효단면계수  $k_e$ 를 적용하여 유효구속압( $f'_l$ )을 계산한다. 따라서 사각형 단면에 대한 강도추정식은 다음 식 (6)과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + k_1 \cdot k_e \cdot \frac{f_l}{f'_{co}} \quad (6)$$

Table 6은 식 (6)을 기본 형태로 하여 연구자들에 의해 제안된 횡구속유효계수와 구속유효단면계수 값을 정리한 것이다. 본 연구를 통한 실험결과와 기존에 수행된 연구결과(Park, 2001; Shin et al., 1996; Yeh and Chang, 2004; Benzaid and

**Table 6** Strength models for FRP confined concrete

Model	$k_1$	$k_e$
Campione and Miraglia (2003)	2.0	0.33
Benzaid and Mesbah (2013)	1.6	0.36
Li et al. (2015)	4.6	$\left(\frac{b}{h}\right)^{1.7} \frac{1 - \frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r)^2}{3A_g}}{1 - \rho_s} - \rho_s$
GB50367 (2006)	4.0	$1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3A_g(1-\rho_s)}$
ACI 440 (2008)	3.135	$\left(\frac{b}{h}\right)^2 \frac{1 - \frac{\left(\frac{b}{h}\right)(h-2r)^2 + \left(\frac{h}{b}\right)(b-2r)^2}{3A_g}}{1 - \rho_s} - \rho_s$

where,  $b$  and  $h$  are width and length of the rectangular section

Mesbah, 2013; Modarelli et al., 2005; Campione and Miraglia, 2003; Demers and Neale, 1994; Rochette, 1996; Rochette and Labossiere, 2000; Harajli et al., 2006; Lam and Teng, 2003; Rousakis et al., 2007; Masia et al., 2004; Wang and Wu, 2008; Wu and Wei, 2010; Shehata et al., 2002; Ilki and Kumbasar, 2003; Al-salloum, 2007; Tao et al., 2008), 총 222개의 데이터를 기반으로 각주형기둥의 횡구속에 따른 강도추정모델을 제안하고, 기존 제안식의 정확성을 검증하였다.

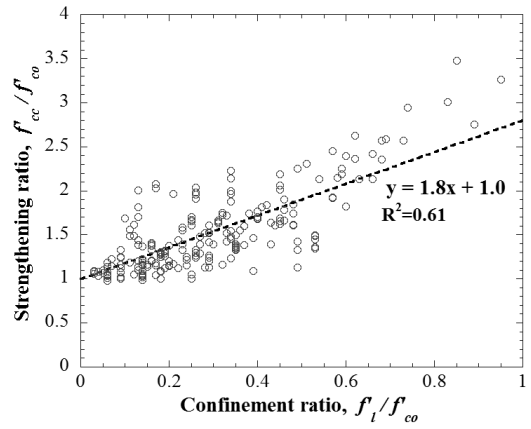
GB50367(2006), ACI 440(2008) 및 Li et al.(2015)이 제안한 구속유효단면계수는 정사각형 단면에 대해서 식 (7)과 같이 정리되며, 본 연구에서는 이 값을 사용하여 사각형 단면의 유효구속압( $f'_c$ )을 결정하여 강도추정에 사용하였다.

$$k_e = 1 - \frac{2}{3} \frac{(b-2r)^2}{A_g(1-\rho_s)} \quad (7)$$

Fig. 15는 본 실험결과를 비롯한 기존 연구결과의 구속압비에 대한 강도비를 도식한 것으로 구속압비가 증가함에 따라 강도비도 증가함을 확인할 수 있다. y축 절편을 1로 하는 선형 관계에 대하여 회귀분석한 결과는 식 (8)과 같으며, 결정계수 ( $R^2$ )가 0.61로 나타났다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1.80 \frac{f'_l}{f'_{co}} \quad R^2 = 0.61 \quad (8)$$

Fig. 16은 기존 모델과 제안된 모델을 이용하여 이론적 값



**Fig. 15** Strengthening ratio vs. confinement ratio

**Table 7** Statistical performance of strength models for FRP-confined concrete as assessed by data set

Model	Predicted $f'_{cc}$ to test ratio		
	Average	Standard deviation	Coefficient of variation (%)
Campione and Miraglia(2003)	0.910	0.188	20.7
Benzaid and Mesbah(2013)	0.884	0.184	20.8
Li et al.(2015)	1.561	0.360	23.0
GB50367 (2006)	1.450	0.315	21.7
ACI 440 (2008)	1.289	0.255	19.7
Proposed model	1.042	0.181	17.4

Number of datapoints = 222

을 추정된 결과를 실험결과와 함께 도식한 것이다. 그림에 나타난 것과 같이 Campione and Miraglia(2003)과 Benzaid and Mesbah(2013)의 모델은 강도값을 과소추정하고 있으며, Li et al.(2015)은 과대추정하고 있음을 확인할 수 있다. 설계기준으로 사용 중인 GB50367(2006)은 Li et al.(2015)와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, ACI440(2008)은 실험값과 비교적 유사하게 추정하고 있으나 실험보다 강도를 크게 추정하고 있으므로 설계시 안전율을 고려하는데 유의해야 할 것으로 사료된다. 반면 본 연구를 통해 제안한 모델은 상대적으로 강도를 정확하게 추정하고 있으며, 강도비가 2.0 이상의 경우에는 실험값의 하한치로 추정하고 있어 안전측의 값을 계산할 수 있다.

Table 7은 실험값에 대한 각 모델별 추정값의 비에 대해 통계분석한 결과를 나타낸 것이다. Campione and Miraglia(2003)과 Benzaid and Mesbah(2013)은 강도비 평균이 각각 0.91, 0.88로 강도를 과소추정하고 있고, Li et al.(2015), GB50367(2006)와 ACI440(2008)은 각각 1.56, 1.45, 1.29로 강도를 과대추정하고 있다. ACI440(2008)이 다른 모델에 비해 비교적 실험치



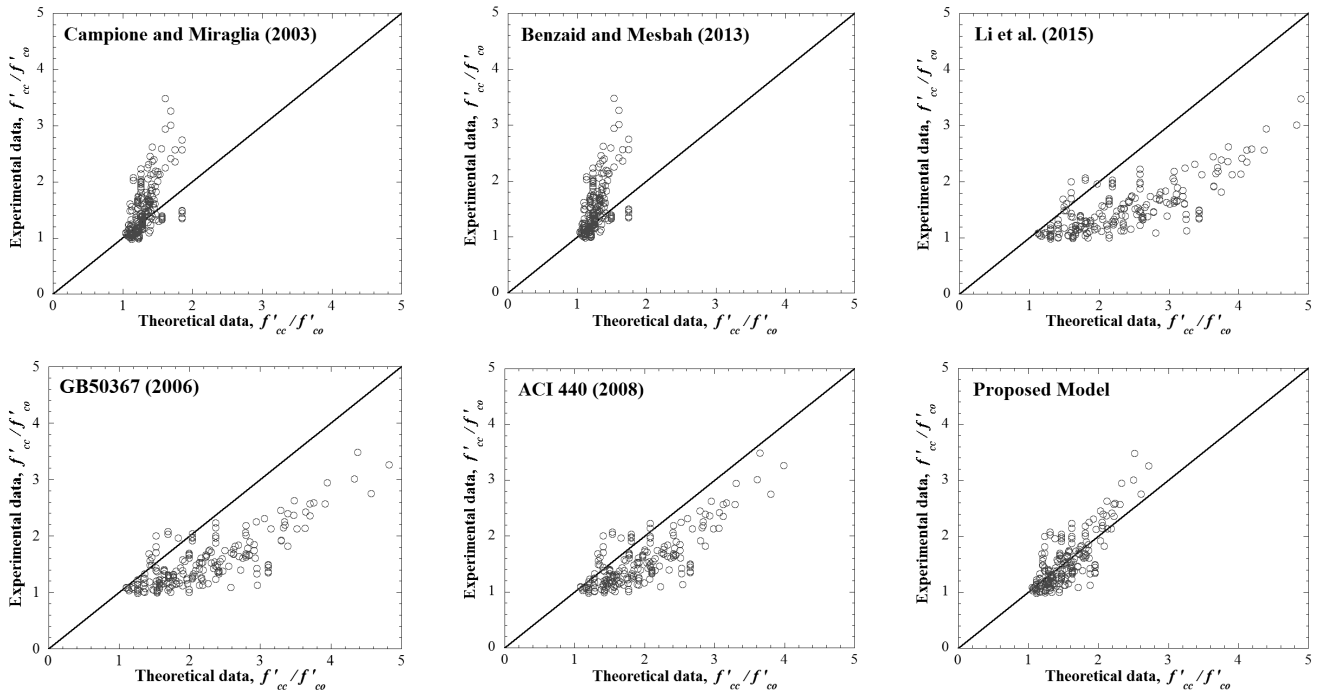


Fig. 16 Performance of each model

와 유사하게 추정하고 있으나 값을 과대추정하고 있어 설계 시 사용하기에는 다소 부적합하다고 판단된다. 본 연구에서 제안한 모델의 강도비 평균은 1.04이며, 변동계수도 17.4%로 비교한 모델들 중에 실험값과 가장 유사하게 추정하고 있다. 따라서 CFRP 슈트로 횡구속된 정사각형 콘크리트 기둥의 강도 추정에 있어서는 본고에서 제안한 강도추정모델을 사용하는 것이 가장 적합하다.

## 5. 결론

본 연구에서는 CFRP 슈트로 횡구속된 사각형 콘크리트 압축 실험체에 대하여 보강 겹수, 실험체의 크기, 형상비, 모따기를 변화시켜 실험한 결과를 분석하고, 실험결과와 기존 연구결과를 기반으로 강도추정모델을 비교 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) CFRP 슈트로 횡구속된 콘크리트의 압축성능은 슈트의 구속효과에 의해 개선되었으며, 보강겹수에 따라 압축 내력 향상효과가 크게 나타났으나, 실험체의 크기가 커짐에 따라 구속효과는 감소되어 보강효과가 감소되었다.
- 2) 보강된 사각형 실험체는 CFRP 슈트의 구속효과에 의하여 모서리 부분의 콘크리트 균열 이후 큰 내부 변형을 일으켜 실험체의 연성이 크게 향상되었다.
- 3) 실험체의 형상비(H/B)는 보강효과에 큰 영향을 미치지 못하였으나, 형상비의 증가에 따라 단부에 응력이 집중되고

변형구간의 감소로 인하여 연성구간이 감소되었으며, 모따기로 인해 보강효과가 나타났으나, 본 실험에서 모따기의 길이 변화는 보강효과에 큰 영향을 보이지 않았다.

- 4) 사각형단면을 원형으로 변환하여 CFRP 슈트로 횡구속시킨 결과, 강도와 연성 모두 크게 향상되었으며, 본 연구에서 강도는 약 130%, 연성은 약 280% 증가되었다.
- 5) 본 연구 결과와 기존 연구결과를 활용하여 CFRP 슈트로 구속된 정사각형 단면의 콘크리트 기둥의 강도추정식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 1.8 \frac{f'_t}{f'_{co}}$$

- 6) 기존 강도추정모델을 비교한 결과, Campione and Miraglia(2003)과 Benzaid and Mesbah(2013)은 강도값을 과소추정하고 있고, Li et al.(2015), GB50367(2006)와 ACI440(2008)은 과대추정하고 있으며, 제안모델이 가장 유사하게 강도를 추정하므로 강도 추정시 제안모델을 사용하는 것이 타당하다.

## 감사의 글

본 연구는 2012년도 산업통상자원부의재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP) 풍력특성화대학원 인력양성사업과

제번호:20094020200020)과 환경부 재원으로 제주녹색환경  
 지원센터 2016년도 연구개발사업 지원에 의해 수행되었으며,  
 이에 감사드립니다.

## References

Al-Salloum, Y. A. (2007). Influence of Edge Sharpness on the Strength of Square Concrete Columns Confined with FRP Composite Laminates, *Composites Part B: Engineering*, 38(5), 640-650.

American Concrete Institute(ACI) (2008). *Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures*, Reported by ACI Committee 440.

Benzaid, R., and Mesbah, H. (2013), Circular and Square Concrete Columns Externally Confined by CFRP Composite: Experimental Investigation and Effective Strength Models, *Fiber Reinforced Polymers-The Technology Applied for Concrete Repair*, InTech, 167-201.

Bulavs, F., Radinsh, I., and Tirans, N. (2005), Improvement of capacity in bending by the use of FRP layers on RC beams, *Journal of Civil Engineering and Management*, 11(3), 169-174.

Campione, G., and Miraglia, N. (2003), Strength and Strain Capacities of Concrete Compression Members Reinforced with FRP, *Cement & Concrete Composites*, 25(1), 31-41.

Demer, M., and Neale, K. W. (1994), Strengthening of Concrete Columns with Unidirectional Composite Sheets, *4th International Conference on Short and Medium Span Bridges*, Canadian Society for Civil Engineering, 895-905.

Fam, A. Z., and Rizkalla, S. H. (2001), Confinement Model for Axially Loaded Concrete Confined by Circular Fiber-reinforced Polymer Tubes, *ACI Structural Journal*, 98(4), 451-461.

Harajli, M. H., Hantouche E., and Soudki, K. (2006), Stress-Strain Model for Fiber-Reinforced Polymer Jacketed Concrete Columns, *Structural Journal*, 103(5), ACI, 672-682.

Ilki, A., and Kumbasar, N. (2003). Compressive Behaviour of Carbon Fibre Composite Jacketed Concrete with Circular and Non-circular Cross-sections, *Journal of earthquake Engineering*, 7(3), 381-406.

Kaminski, M., and Trapko, T. (2006), Experimental Behaviour of Reinforced Concrete Column Models Strengthened by CFRP Materials, *Journal of Civil Engineering and Management*, 12(2), 109-115.

Koh, K. M. (2006), Strengthening Effect and Failure Mode of Rectangular Concrete Column Confined with CFRP Sheet, Ph.M. Dissertation, Jeju National University, (In Korean).

Lam, L., and Teng, J.G. (2003). Design-oriented Stress-strain Model for FRP-confined Concrete in Rectangular Columns, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 22(13), 1149-1186.

Masia, M. J., Gale, T. N., and Shrive, N. G. (2004), Size Effects in Axially Loaded Squaresection Concrete Prisms Strengthened Using Carbon Fibre Reinforced Polymer Wrapping, *Canadian Journal of Civil Engineering*, 31(1), 1-13.

Mirmiran, A., Zagers, K., and Yuan, W. (2000), Nonlinear Finite Element Modeling of Concrete Confined by Fiber Composites,

*Finite Element in Analysis and Design*, 35(1), 79-96.

Modarelli, R., Micelli, F., and Monni, O. (2005), FRP-Confinement of Hollow Concrete Cylinders and Prisms, *7<sup>th</sup> International Symposium FRP Reinforcement for Concrete Structures*, American Concrete Institute, 2, 1029-1046.

Moon, K. T., Park, S. Y., and Kim, M. K. (2015), Strengthening Effect of Axial Circular Concrete Members Wrapped by CFRP sheet, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(5), 10-21.

National standard of the People's Republic of China (2006). *Design Code for Strengthening Concrete Structure(GB50367-2006)*, China Architecture & Building press.

Park, Y. J. (2001), The Experimental Research on the Confinement Effect of Concrete Specimens with Carbon Fiber Sheet, Ph.M. Dissertation, Korea University, (In Korean).

Rochette, P. (1996), Confinement de Colonnes Courtes en Béton de Section Carrée ou Rectangulaire avec des Matériaux Composites, *Maîtrise Es-Sciences Appliquées*, Université de Sherbrooke, Canada, (In French).

Rochette, P., and Labossière, P. (2000), Axial Testing of Rectangular Column Models Confined with Composites, *Journal of Composites for Construction*, ASCE, 4(3), 129-136.

Rousakis, T. C., Karabinis, A. I., and Kiouisis, P. D. (2007), FRP-Confined Concrete Members: Axial Compression Experiments and Plasticity Modelling, *Engineering Structures*, 29(7), 1343-1353.

Sadeghian P., Rahai A. R., and Ehsani M. R. (2008), Numerical Modeling of Concrete Cylinders Confined with CFRP Composites, *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 27(12), 1309-1321.

Shegata, I. A. E. M., Carneiro, L. A. V., and Shegata, L. C. D. (2002), Strength of Short Concrete Columns Confined with CFRP sheets, *Materials and Structures*, 35(1), 50-58.

Shin, Y. S., Hong, Y. K., Hong, G. S., and Choi, O. C. (1996), Compressive Strength of Concrete Cube Confined with Carbon Fiber Sheets, *Journal of the Architectural Institute of Korea-Structure&Construction*, 12(12) AIK, 197-203.

Tao, Z., Yu, Q., and Zhong, Y.Z. (2008), Compressive Behaviour of CFRP-confined Rectangular Concrete Columns, *Magazine of Concrete Research*, 60(10), 735-745.

Wang, L. M., and Wu, Y. F. (2008), Effect of Corner Radius on the Performance of CFRP Confined Square Concrete Columns: Test, *Engineering Structures*, 30(2), 493-505.

Wu, Y. F. and Wei, Y. Y. (2010), Effect of Cross-sectional Aspect Ratio on the Strength of CFRP-confined Rectangular Concrete Columns, *Engineering Structures*, 32(1), 32-45.

Yeh, F., and Chang, K. (2004), Size and Shape Effect on FRP Confinements for Rectangular Concrete Columns, *13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B. C., Canada, paper no.657.

Received : 10/09/2016

Revised : 10/15/2016

Accepted : 10/17/2016

---

**요 지** : 본 연구는 사각형 콘크리트 압축부재를 CFRP 쉬트로 감쌌을 때의 보강효과와 거동 특성에 대한 연구로, CFRP 쉬트로 보강한 경우 쉬트의 구속효과에 의하여 압축내력이 향상되었으나 사각형 단면이므로 원형단면보다 구속효과는 작게 나타났다. 보강효과와 거동특성을 확인하기 위하여 CFRP 쉬트의 보강접수, 시험체의 크기, 형상비, 모따기, 및 단면 개량을 변수로 선정하여 실험을 계획하였다. 11개의 실험변수 별로 각각 5개씩, 총 55개의 실험체를 제작하여 실험하였다. 압축시험결과 CFRP 쉬트의 구속에 의해 보강효과가 나타났으나 실험체의 크기가 증가함에 따라 구속효과는 떨어졌다. 반면에 CFRP 쉬트의 구속효과에 의하여 사각형 콘크리트 기둥의 연성은 매우 크게 증가되었다. 단면형상을 사각형에서 원형으로 변형한 경우 압축강도와 연성 모두 증가되었다. 또한 실험결과와 기존연구결과를 사용하여 CFRP로 구속된 사각형 콘크리트 부재에 대한 기존 강도추정식의 정확성과 신뢰성을 검증하였다.

**핵심용어** : 탄소섬유쉬트, 구속, 강도추정식, 보강효과, 응력-변형률 곡선

---