

# 탄소섬유쉬트로 보강된 원형CFT기둥의 압축거동과 ACI 440 code를 응용한 압축내력에측식 제안

## Axial Loading Behaviors and ACI 440 Code Applied Ultimate Axial Strength Formula of CFRP Strengthened Circular CFT Columns

박재우 Park, Jai-Woo\* · 홍영균 Hong, Young-Kyun\*\* · 최성모 Choi, Sung-Mo \*\*\*†

(Received January 2, 2011 ; Revised February 3, 2011 ; Accepted March 2, 2011)

### ABSTRACT

This study investigates the axial behavior of CFRP strengthened circular CFT columns and proposes the design formula of CFRP strengthened circular CFT columns. 10 specimens were prepared and axial loading test were conducted to investigate the retrofitting effects of CFRP composites on CFT columns. The main parameters are the number of FRP sheets and D/t ratio. Test results showed that the CFRP retrofitting enhanced the load bearing capacity of the circular CFT columns. Finally, A ACI 440 code applied ultimate axial strength formula is proposed to predict the ultimate strength of CFRP strengthened circular CFT columns. The proposed formula are good agreement with the test results.

### 요 지

본 연구에서는 CFRP쉬트로 보강된 원형 CFT기둥의 압축거동을 관찰하고 설계식을 제안하였다. 원형 CFT기둥의 CFRP쉬트의 보강효과를 관찰하기 위해 10개의 실험체를 제작하여 중심축하중 실험을 수행하였다. 실험변수로는 CFRP쉬트 보강접수와 직경-두께비(D/t)이다. 실험결과 원형CFT기둥에 CFRP쉬트 보강을 통해 압축내력을 증가시킨 것으로 나타났다. 끝으로 ACI 440code를 응용하여 CFRP 보강된 원형 CFT기둥의 압축내력을 예측하기 위한 설계식을 제안한다. 제안식을 분석한 결과 실험결과와 비교적 일치한 것으로 나타났다.

**Key Words:** concrete filled steel tube(콘크리트충전강관), CFT(CFT), FRP(FRP), strengthening(보강)

## 1. 서 론

섬유복합소재(FRP)는 높은 인장강도와 내구성을 지니고 있어 구조부재의 보수보강재료로 널리 사용되고 있다. 국내의 적으로 CFRP 보수보강재료는 철근콘크리트구조물의 보수보강재료에 초점을 맞추어 연구되어 왔고 현장에 적용하였지만, 강구조물의 CFRP쉬트에 대한 연구 및 적용사례는 드물다. 그러나 최근 해외에서는 강구조물의 CFRP쉬트에 대한 보강연구가 진행되고 있으며 다양하게 적용되고 있다.

Miller(2001) 등은 H형강 하부 플랜지에 CFRP쉬트로 보강한 연구를 통해 보강효과를 검증하고, Dalaware 소재 I-704 교량의 거더하부 플랜지부위에 CFRP쉬트 보강에 대한 현장적용사례를 소개하였다. Shaat(2009)는 장주형 박스 기둥에 발생할 수 있는 좌굴에 대해 보강을 하기 위해 고탄성 CFRP의 보강에 대한 연구를 수행하였다. Shaat는 장주형 기둥에서 취

약한 부재좌굴(Global buckling)에 대한 보완점으로 강관의 양면에 CFRP쉬트를 붙인 후 압축내력 시험을 수행하였다. 실험결과 단주형 기둥보다는 장주형 기둥에서 CFRP쉬트의 보강효과를 검증할 수 있었으며, CFRP쉬트 보강을 통해 기둥에 발생하는 부재좌굴을 지연시키고 기둥의 내력이 최대 71%까지 상승함을 관찰하였다. A. Fam(2006)은 고속도로에 설치된 사인물 트러스 조인트 부위에 CFRP쉬트로 보강한 연구결과와 적용사례를 소개하였다. 손상된 트러스 조인트 부위에 CFRP 쉬트의 보강방안과 보강효과를 실험과 실제 적용사례를 연구논문에서 소개하였다.

이와는 별도로 합성기둥인 CFT기둥의 CFRP쉬트에 대한 보강효과에 대한 연구가 Xiao(2005), Tao(2006, 2007), 박재우(2010)등에 의해 진행되어 왔으며, 보강방법에 대한 개념은 Fig 1와 같다.

\* 정희원· 서울시립대학교 건축학부 박사후과정연구원  
\*\* 정희원· 홍익대학교 건축대학 교수  
\*\*\*† 정희원· 서울시립대학교 건축학부 부교수, 교신저자(smca@uos.ac.kr)

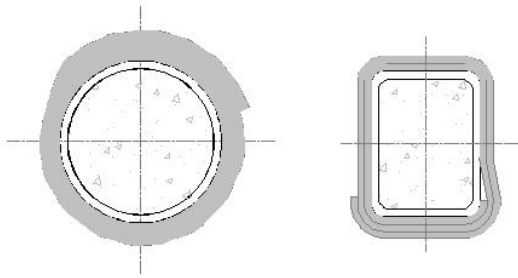


Fig. 1 FRP쉬트가 보강된 CFT기둥의 개념

Fig 1과 같이 CFT기둥의 강관표면에 CFRP쉬트를 후프방향(Hoop-direction)으로 부착하여 보강을 한다.

Xiao(2005)는 원형 CFT기둥에 CFRP쉬트 보강을 한 후 압축 및 휨실험을 수행하였다. Xiao는 강관에 발생하는 국부좌굴구간을 CFRP 쉬트로 추가적으로 보강하였으며 CFRP쉬트보강을 통해 국부좌굴발생을 지연시킬 수 있었다. Tao(2006)은 화재로 손상된 CFT기둥의 CFRP쉬트 보강에 대한 연구를 수행하였다. 화재로 인해 내력이 저하된 각형 및 원형 CFT 기둥에 CFRP쉬트 보강을 통해 손상된 기둥부재의 내력복원효과를 검증 할 수 있었다. 박재우(2010)은 CFRP쉬트로 보강된 각형 CFT기둥의 압축 및 휨실험을 수행하였다. 실험결과 압축실험에서는 각형 CFT기둥의 특성상 FRP쉬트의 추가구속으로 인한 내력상승효과는 관찰할 수 없었지만 국부좌굴의 파괴 지연으로 기둥의 연성능력은 개선시킬 수 있었다. 휨 실험의 경우 기둥의 단부 예상국부좌굴 구간에 FRP쉬트의 보강을 통해 국부좌굴을 지연시키고, 이로 인해 연성능력을 개선시킬 수 있었다. CFRP쉬트의 보강을 통해 실험체의 연성능력을 개선시켜 높은 에너지소산능력을 확보할 수 있어 내진성능을 개선효과를 실험을 통해 검증하였다. 지금까지의 연구내용을 토대로 CFRP는 강구조 및 합성구조물의 보수보강재료로 널리 쓰일 것으로 사료되지만 실제 건설현장에 적용하기 위해서는 실험적 검증과 더불어 설계식에 대한 검증 및 제안이 필수적이다. 이와 같은 연구배경을 바탕으로 본 연구에서는 CFRP쉬트를 부착한 원형 CFT기둥의 압축거동실험을 통해 CFRP쉬트에 대한 보강효과를 검증하였다. 또한 향후 실제 건설현장의 적용을 위하여 CFRP쉬트로 보강된 원형 CFT기둥의 설계식을 보수보강 설계를 다루고 있는 ACI 440code를 응용해 제안하였으며, 제안식의 검증을 위해 본 연구 및 기존 타 연구자의(Xiao 2005, Gu 2004, Tao 2007)의 실험결과와 비교분석 하여 제안식의 타당성을 검증하였다.

## 2. 실험계획 및 결과

### 2.1 실험체 계획

원형 CFT기둥에 CFRP쉬트를 보강한 단주실험체를

사용하였으며, 총 10개의 실험체를 제작하였다. 실험체의 개요도는 Fig 2에 나타나 있으며, 강관의 직경은  $\Phi 139.8$ , 두께는 3.2mm, 4.5mm, 6.0mm이며, 기둥부재 길이는 620mm로 폭길이비(L/D)는 4.4인 단주 CFT기둥을 제작하였다. 실험변수는 직경-두께비(D/t), CFRP쉬트 보강접수를 채택하여 CFRP쉬트의 보강에 대한 보강효과를 관찰하였다. CFRP 0,1,3겹으로 보강하였으며, 두께 4.5mm인 C4실험체는 1겹과 3겹 사이의 거동을 관찰하기 위해 CFRP쉬트 2겹 보강한 실험체를 1개 추가하였다.

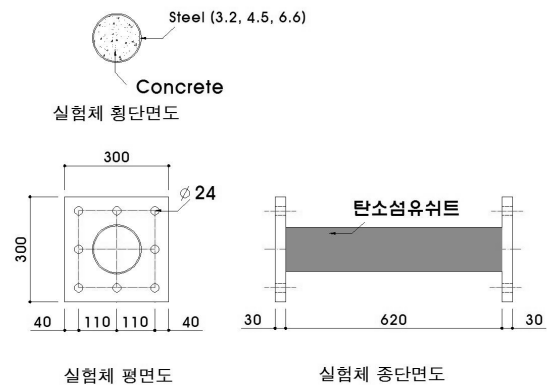


Fig. 2 실험체 제작도

Table 1 실험체별 변수일람표

계열	실험체명	강관 두께 (mm)	D/t	콘크리트 압축강도 (MPa)	CFS 보강접수
C3	C3N	3.2	44	37.5	-
	C3F-1				1
	C3F-3				3
C4	C4N	4.5	31	37.5	-
	C4F-1				1
	C4F-2				2
	C4F-3				3
C6	C6N	6.6	21	37.5	-
	C6F-1				1
	C6F-3				3

### 2.2 재료실험

실험체로 사용된 강관의 인장시험은 KS B 0802 금속재료인장시험편 규정에 의해 수행하였으며 결과는 Table 2에 정리하였다.

내부충전 콘크리트의 설계강도는 36MPa이며, 28일 압축강도 시험결과 콘크리트의 압축강도는 37.5MPa이다.

탄소섬유쉬트는 제조사인 S사의 물성치를 인용하였으며, 섬유질량 200g/m<sup>2</sup>의 인장강도는 3500MPa, 파단

시 신율은 1.5%이며, 1 ply당 두께는 0.111mm이다.

Table 2 강재의 인장시험결과

강관두께 (mm)	$F_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_u$ (N/mm <sup>2</sup> )	$F_y/F_u$ (%)	연신율 (%)
3.2	357	443	81	29
4.5	327	366	89	31
6.6	295	352	82	36

### 2.3 실험체 설치 및 계측계획

압축실험을 위해 3000kN급 U.T.M.을 사용하였으며, 축방향에 대한 변위를 알기위해 실험체의 엔드캡플레이트 네 모서리에 LVDT 총 4개를 설치하였다. 하중-축변위 곡선상에서의 축변위량은 4개의 LVDT의 평균값을 사용하였다. 또한 실험체 중앙부위에 강관의 횡방향에 대한 계측을 위해 LVDT 4개를 기둥중앙부위에 설치한다.

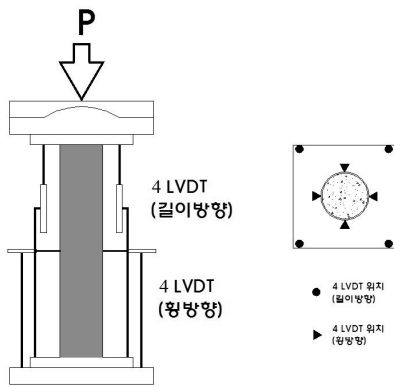


Fig. 3 실험체 LVDT설치도

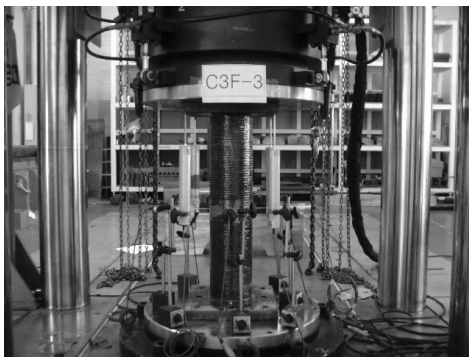
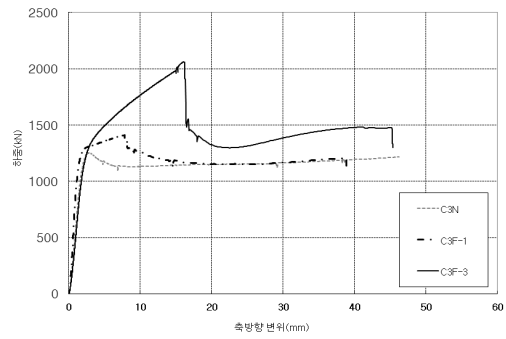


Fig. 4 실험체 설치전경

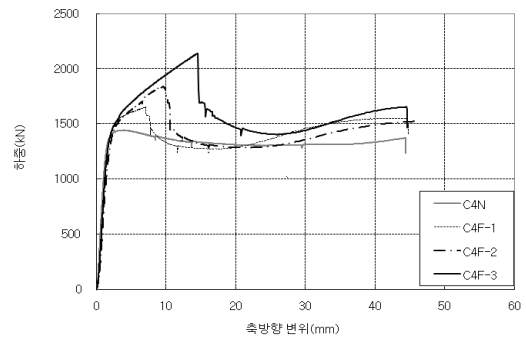
### 2.4 하중-축변위 관계 및 실험체 파괴

Fig 5는 실험체의 하중- 축변위 곡선이며, Fig 6는 각 실험체의 최종파괴전경에 관한 그림이다. 보강이

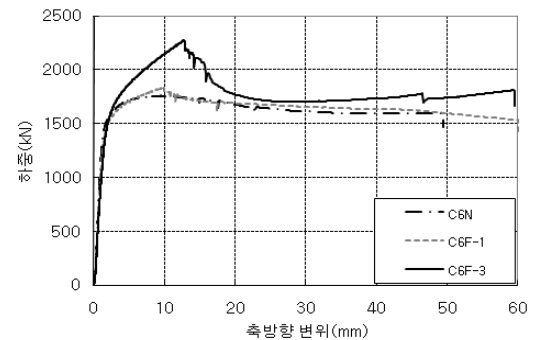
되지 않은 일반 CFT실험체는 압축력이 가해짐에 따라 강관이 횡방향으로 팽창하였고, 기둥에 국부좌굴이 발생하며 최종적으로 파괴되었다. CFRP쉬트로 보강한 CFT실험체는 하중의 증가에 따라 팽창하는 강관을 CFRP쉬트가 구속하고 있었으며, 이후 최대내력점에서 CFRP쉬트가 파단되었고, 최종적으로 일반 CFT기둥과 같이 강관표면에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다.



(a) 하중-축변위 곡선(D/t=44)



(b) 하중-축변위 곡선(D/t=31)



(c) 하중-축변위 곡선(D/t=21)

Fig. 5 실험체의 하중-축변위 곡선

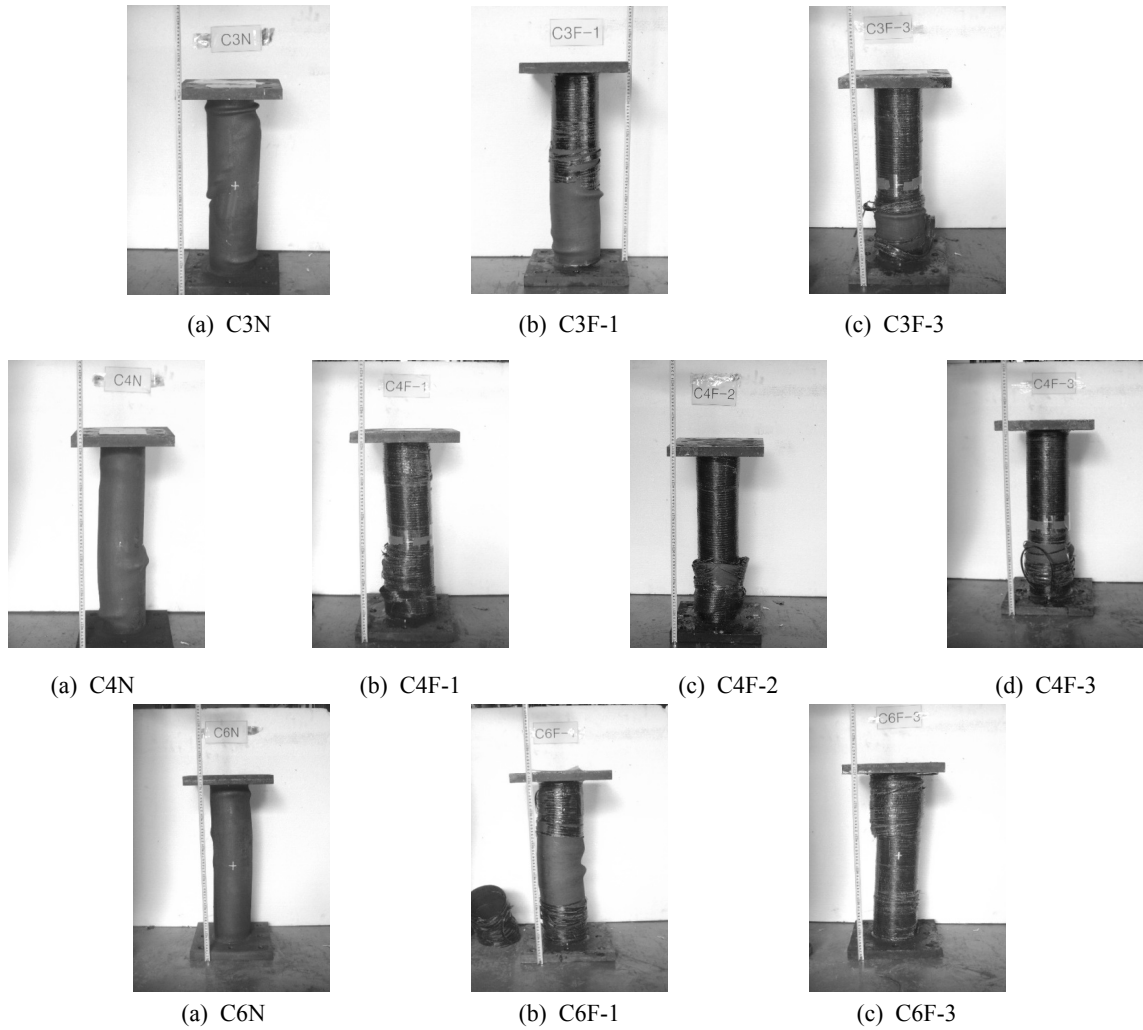


Fig. 6 실험체 최종파괴전경

Fig 5의 하중- 축변위 곡선을 살펴보면, 일반 CFT 실험체(C3N, C4N, C6N)는 하중초기 단계에서는 하중 재하가 증가함에 따라 항복점까지 내력이 선형적으로 증가하였으며, 최대내력점 이후 내력저하가 거의 발생하지 않으며 축변위가 증가함에도 불구하고 일정한 내력을 보였다. CFRP가 보강된 CFT기둥은 항복점 이후 계속적으로 내력이 증가하였으며 하중-축변위 곡선상에서는 이중선형(Bi-linear)곡선을 보였다. 최대내력점 이후 CFRP쉬트가 파단되면서 급격한 내력저하를 보였으며, 이후 구간부터는 일반 CFT기둥과 비슷한 거동을 보였다.

#### 2.4 실험결과 분석

##### 1) 보강접수에 따른 내력상승효과

CFRP쉬트의 보강접수에 따른 내력상승효과를 관찰하기 위해 식 (1)의 Strength enhancement index(SEI)의 개념을 이용하여 각 실험체의 내력상승효과를 관찰하였다.

$$SEI = \frac{P_{FRP,max} - P_{CFT,max}}{P_{CFT,max}} \quad (1)$$

여기서,

$P_{FRP,max}$  : CFRP쉬트가 보강된 실험체의 최대내력

$P_{CFT,max}$  : 일반 CFT 실험체의 최대내력

각 실험체의 최대내력값과 CFRP쉬트 보강접수에 따른 내력상승효과에 대한 결과는 Table 3에 정리하였다. 실험결과 CFRP쉬트의 보강접수가 증가함에 따라 내력이 증가하였으며, 직경-두께비가 큰 실험체(C3 계열)일수록 내력상승효과가 큰 것으로 나타났다(C3F-3 64%의 보강효과). 따라서 CFRP쉬트로 인한 내력상승은 직경-두께비가 큰 실험체에서 효과적으로 나타날 것이다. Table 3 실험체의 최대내력 및 SEI평가

계열	실험 체명	D/t	CFRP 보강겹수	최대내력 (kN)	SEI (%)
C3	C3N	44	-	1252.4	-
	C3F-1		1	1409.2	12.5
	C3F-3		3	2062.9	64.6
C4	C4N	31	-	1444.5	-
	C4F-1		1	1653.3	14.5
	C4F-2		2	1839.6	27.4
	C4F-3		3	2139.3	48.1
C6	C6N	21	-	1757.1	0
	C6F-1		1	1833.6	4.33
	C6F-3		3	2274.6	29.4

Fig 7은 직경-두께비에 따른 각 실험체의 내력증가율을 나타낸 것이다.

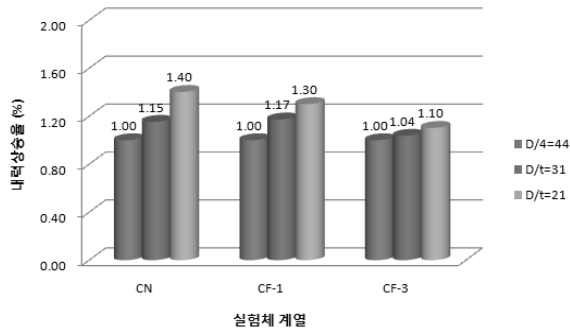


Fig. 7 직경-두께비 영향에 따른 내력영향평가

Fig 7에서 알 수 있듯이, 직경-두께비가 작아질수록 최대내력은 증가하는 것으로 나타났다. 이는 강관두께의 증가로 인한 강관의 압축내력의 증가로 인해 최대내력이 상승한 것으로 사료된다. 기존 CFT 계열인 CN 계열의 경우 직경-두께비가 작아질수록 최대 40% 정도까지 최대내력이 상승하였다. 탄소섬유쉬트 1겹으로 보강한 CF-1 계열 실험체는 직경-두께비 감소에 따라 17%, 30% 최대내력이 상승하였고, 탄소섬유쉬트 3겹으로 보강한 C3F-3 실험체는 직경-두께비가 감소함에 따라 10% 정도 최대내력이 상승하였다. 실험결과로부터 알 수 있듯이 탄소섬유쉬트 보강겹수가 증가함에 따라 직경-두께비에 따른 최대 내력증가율은 둔화되는 것으로 나타났다.

### 3. 압축내력예측식 제안

#### 3.1 ACI 440 Code의 개념

ACI Committee 440에서는 FRP로 보수보강한 콘크리트구조물의 설계식에 대한 내용을 다루고 있다. 이 중 11장에서는 압축재에 대한 내용을 다루고 있는데

이는 FRP로 추가구속을 통해 구속효과를 증가시켜 콘크리트의 압축내력을 상승시키는 것을 목표로 하고 있다. ACI Committee 440에서 사용하는 FRP로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 곡선은 강재로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계를 예측하기 위해 Mander(1988)가 제안한 식 (2)를 바탕으로 응용하여 사용하고 있다.

$$\frac{f'_{\alpha}}{f'_{\omega}} = (-1.254 + 2.254 \sqrt{1 + \frac{7.94f_l}{f'_{\omega}} - \frac{2f_l}{f'_{\omega}}}) \quad (2)$$

여기서,  $f'_{\alpha}$ 는 구속된 콘크리트의 압축강도,  $f'_{\omega}$ 는 비구속된 콘크리트의 압축강도,  $f_l$ 은 횡방향구속력이다.

Mander(1988)의 FRP로 구속된 콘크리트의 응력-변형률 관계식을 바탕으로 FRP로 보강한 콘크리트기둥의 압축내력 설계식은 식 (3), (4)와 같다.

#### 1) 나선철근 기둥부재(원형기둥)

$$\phi P_n = 0.85\phi [0.85\psi_f f'_{\alpha} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (3)$$

#### 2) 띠철근 기둥부재(각형기둥)

$$\phi P_n = 0.80\phi [0.85\psi_f f'_{\alpha} (A_g - A_{st}) + f_y A_{st}] \quad (4)$$

여기서, 감소계수  $\phi$ 는 나선철근기둥의 경우 0.70, 띠철근기둥의 경우 0.65이며,  $\psi_f$ 는 0.95이다.  $f_y$ 는 주철근의 항복강도이며,  $A_g$ 는 기둥전체의 단면적,  $A_{st}$ 는 주철근의 총단면적이다.

#### 3.2 ACI 440 Code를 응용한 압축내력예측식

본 연구에서는 CFRP쉬트가 보강된 원형 CFT기둥의 최대내력 예측식을 제안하기 위하여 ACI 440code에서 사용하는 Mander의 구속된 콘크리트의 압축강도 예측식을 사용한다. ACI 440 code에서 사용하고 있는 Mander의 예측식은 FRP쉬트의 구속압축강도 뿐만 아니라 강관으로 구속된 콘크리트의 구속압축강도 예측에도 사용되고 있다.

본 연구에서는 사용된 실험체는 CFT기둥이 강관과 CFRP로 동시에 구속되어 있으므로 Mander의 제안식 식 (2) 중 횡방향구속력( $f_l$ )항인 식 (1)에 대해서 강관과 FRP의 항을 중첩하여 사용하였다. 따라서 횡방향구속력 ( $f_l$ )은 강관의 항과 FRP의 항으로 중첩하여 나타내지며 식 (5)과 같이 정의한다.

$$f_l = \frac{2f_{FRP}t_{FRP} + 2f_s t_s}{d} = \frac{\rho_{FRP}f_{FRP} + \rho_s f_s}{2} \quad (5)$$

여기서,  $f_{FRP}$ 와  $f_s$ 은 축하중으로 인한 횡방향 팽창으로 인해 발생하는 FRP와 강관의 인장강도이며,  $t_{FRP}$ 와

Table 4 실험체의 제원 및 제안식 결과

연번	연구자	시험체 Size(mm)	보강 겹수	$f'_{co}$ (MPa)	$t_y$ (mm)	$t_F$ (mm)	$f_y$ (MPa)	$f_F$ (MPa)	$f'_{cc}$ 식(2) (MPa)	실험 결과 (kN)	제안식 결과 식(6) (kN)	$\frac{P_{exp}}{P_{ana}}$
1	Gu(2004)	D127×1.5	1	36.9	1.5	0.167	350	1260	127.7	1085.8	1012.0	1.07
2	Gu(2004)	D129×2.5	1	36.9	2.5	0.167	350	1260	127.7	1293.6	1267.7	1.02
3	Gu(2004)	D131×3.5	1	36.9	3.5	0.167	310	1260	151.7	1347.5	1411.6	0.95
4	Gu(2004)	D133×4.5	1	36.9	4.5	0.167	310	1260	151.7	1689.3	1634.4	1.03
5	Gu(2004)	D127×1.5	2	36.9	1.5	0.334	350	1260	92.5	1282.8	1086.1	1.18
6	Gu(2004)	D129×2.5	3	36.9	2.5	0.334	350	1260	114.4	1506.3	1329.3	1.13
7	Gu(2004)	D131×3.5	2	36.9	3.5	0.334	310	1260	98.2	1592.5	1467.3	1.09
8	Gu(2004)	D133×4.5	2	36.9	4.5	0.334	310	1260	109.2	1846.3	1683.1	1.10
9	Tao(2007)	D156×3.0	1	47.8	3.0	0.17	230	4212	118.0	1890.0	1961.2	0.96
10	Tao(2007)	D156×3.0	2	47.8	3.0	0.34	230	4212	105.3	2270.0	2225.9	1.02
11	Tao(2007)	D250×3.0	1	47.8	3.0	0.17	230	4212	122.6	3940.0	4211.6	0.94
12	Tao(2007)	D250×4.5	2	47.8	.0	0.34	230	4212	66.7	4780.0	4755.6	1.01
13	Xiao(2007)	D152×2.95	2	46.6	2.95	2.8	356	897	76.2	2233.0	2356.5	0.85
14	Xiao(2007)	D152×2.95	2	46.6	2.95	2.8	356	897	80.9	2266.0	2356.5	0.86
15	Xiao(2007)	D152×2.95	4	46.6	2.95	5.6	356	897	87.2	3439.0	3057.2	1.13
16	Xiao(2007)	D152×2.95	4	46.6	2.95	5.6	356	897	72.8	3438.0	3057.2	1.13
17	본연구	D139.8×3.2	1	37.5	3.2	0.111	365	3500	81.3	1409.2	1563.7	0.79
18	본연구	D139.8×3.2	3	37.5	3.2	0.333	365	3500	85.5	2062.9	2000.4	0.99
19	본연구	D139.8×4.5	1	37.5	4.5	0.111	334	3500	91.2	1653.3	1748.7	0.85
20	본연구	D139.8×4.5	2	37.5	4.5	0.222	334	3500	92.2	1839.6	1959.0	0.88
21	본연구	D139.8×4.5	3	37.5	4.5	0.333	334	3500	107.2	2139.3	2168.0	0.97
22	본연구	D139.8×6.6	1	37.5	6.6	0.111	301	3500	78.6	1833.6	1986.1	0.86
23	본연구	D139.8×6.6	3	37.5	6.6	0.333	301	3500	90.3	2274.6	2378.1	0.96
평균												<b>0.99</b>

$t_s$ 는 FRP와 강관의 두께이며,  $\rho_{FRP}$ 와  $\rho_s$ 는 기둥을 완전히 감싼 경우의 FRP와 강관의 체적비,  $d$ 는 내부충전콘크리트의 직경이다. 본 연구에서 제안하는 CFRP쉬트로 보강된 원형 CFT기둥의 최대 압축내력 예측식은 식 (6)과 같다.

$$P_o = A_s f_y + A_o f'_{cc} \quad (6)$$

Table 4에서는 각 연구자(Gu 2004, Tao 2007, Xiao 2007, 박재우)의 실험체 제원을 이용하여 Mander의 식 (2)를 바탕으로 FRP로 구속된 CFT기둥에서의 압축강도를 산정하였다. 기존 문헌 검색결과 본 연구와 유사한 실험체인 FRP쉬트로 보강된 원형 CFT기둥 실험체 총 23개를 이용하였다. 최대압축내력산정을 위한 기본 가정사항은 구속된 콘크리트의 최대압축강도는 FRP가 파단 되는 FRP의 최대인장강도 값을 사용하였으며, 강관은 항복 이후 응력이 일정한 Elasto-Plastic 모델을 사용하였다.

Table 4에서는 ACI 440code의 구속된 콘크리트의 압축강도식 식(2)와 횡방향 구속력 식(5)을 이용한

FRP보강된 원형 CFT기둥의 내부충전콘크리트 압축강도 값을 산정하였다. 구속된 콘크리트의 압축강도결과를 바탕으로 식(6)을 이용하여 기둥부재의 압축내력을 예측하여 Table 4에 정리하였다. 제안식의 결과를 실험값과 비교한 결과 상당히 근접한 압축내력값을 예측할 수 있었다. 기둥부재의 압축내력값은 오차율 평균은 1%로 나타나 ACI 440설계식을 응용한 제안식의 타당성을 검증할 수 있었다.

끝으로 FRP 보강방법은 강구조물(합성구조물 포함)의 보수보강효과를 검증할 수 있었으며, 본 연구에서도 출한 제안식은 원형 CFT기둥의 FRP보수보강을 통해 기둥부재의 압축내력값을 예측하는 데 유용이 사용될 것이며, 본 연구의 내용은 향후 원형 CFT기둥의 FRP 보수보강에 사용되는 설계식에 대한 기초자료를 제공할 것이다.

#### 4. 결론

(1) 기존 원형강관 CFT 실험체 모두 압축력이 가해짐에 따라 실험체는 강관이 전체적으로 횡방향으로 팽

창하였으며 최종적으로는 기둥부재에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다. CFRP쉬트로 동시에 구속된 CFT 실험체는 강관이 횡방향으로 팽창하였으나 CFRP쉬트의 추가 구속효과로 인해 강관의 좌굴현상이 지연됨을 관찰하였다. 이후 강관의 횡변형으로 인해 CFRP쉬트가 파단되며 최종적으로는 실험체에 국부좌굴이 발생하며 파괴되었다.

(2) 하중-측변위 관계곡선에서 기존 CFT 실험체의 거동은 최대내력점 이후 내력저하 현상을 보이고 있다. 이후 하중이 계속적으로 증가하여도 내력저하 현상은 거의 발생되지 않고 측변위만 증가하는 거동을 보이고 있다. 그러나 탄소섬유쉬트와 강관으로 동시에 구속된 CFT 실험체의 경우 항복점 이후로도 부재의 내력은 계속적으로 증가하여 기존의 CFT 실험체의 최대내력점을 초과하였으며, 최대내력점 이후 탄소섬유쉬트의 파단과 함께 내력은 급격히 저감하였다.

(3) 최대내력상승효과를 살펴보면 일반적으로 직경-두께비가 감소할수록, CFRP쉬트 보강계수가 증가할수록 실험체의 최대내력은 증가하는 것으로 나타났다. CFRP쉬트의 보강계수가 증가함에 따라 실험체의 최대내력은 C3 계열 실험체는 최대65%, C4 계열 실험체는 48%, C6계열 실험체는 29% 증가하였다. 내력상승원인은 CFRP쉬트의 추가 구속에 따라 충전콘크리트의 구속효과 또한 증가하게 되어 이로 인해 내부충진 콘크리트의 강도는 상승하게 되며, 이로 인해 기둥부재의 내력 또한 상승하게 된다.

(4) FRP가 강관외부에 보강된 원형 CFT 기둥의 내부충진콘크리트에 대한 압축강도를 예측하기 위하여 강관과 FRP가 동시에 구속되어 있는 보강된 CFT 기둥의 강관과 FRP에 대한 구속효과를 고려해서 두 재료의 항을 중첩하여 횡방향구속력( $f_l$ )을 산정하였다. 두 재료의 구속효과를 이용하여 ACI Committee 440에서 제시하는 Mander의 제안식에 적용하여 두 재료의 구속효과를 고려한 코어콘크리트의 압축강도 예측식을 도출하였다. 도출된 압축강도식을 바탕으로 FRP가 보강된 원형 CFT기둥의 압축내력설계식을 도출하였다. 실험결과와 비교한 결과 평균 오차율은 1%정도로 실험결과와 유사하게 나타났으며, FRP가 보강된 원형 CFT 기둥의 압축내력 설계식을 검증할 수 있었다.

## 감사의 글

이 연구는 2010년도 한국과학재단 연구비 지원에 의한 결과의 일부임. 과제번호: 2010-0018929

## 참고 문헌

1. ACI 440R-96, (2002), Guide for the Design and

Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures, *ACI Committee 440*, pp 27-28.2.

2. A. Fam., S. Witt., S. Rizkally., (2006), Repair of damaged aluminum truss joints of highway overhead sign structures using FRP, *Construction and Building Materials.*, Vol 20., pp 948-956.
3. A. Shaat., A. Fam., (2009), Slender steel columns strengthened using high-modulus CFRP plates for buckling control, *J of composites for construction.*, Vol 13., No 1., pp. 1-12.
4. Gu. W., Guan. C. W., Zhao, Y. H., Cao., H. (2004), Experimental study on concentrically-compressed circular concrete filled CFRP-steel composite tubular short columns, *Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering University*, Vol 20, No 2, pp. 118-120.
5. J. W. Park., Y. K. Hong., S. M. Choi., (2010), Behavior of concrete filled square tubes confined by carbon fiber sheets(CFS) under compression and cyclic loads, *Steel and Composite Structures, An Inter Journal.*, Vol 8, No 2.
6. T. C. Miller *et al.*, (2001), Strengthening of a steel bridge girder using CFRP plates, *Journal of Bridge Engineering, ASCE*, Vol.6, No.6, pp.514-522.
7. Y. Xiao., W. He., K. K. Choi.,(2007), Confined Concrete-Filled Tubular Columns, *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol 131, No 3.
8. Z. Tao., L. H. Han., L. L. Wang., (2006), Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire, *Journal of Constructional Steel Research.*, Vol 63, No 8.
9. Z. Tao., L. H. Han., L. L. Wang., (2007), Axial loading behavior of CFRP strengthened concrete-filled steel tubular stub columns, *JAdvances in structural engineering.*, Vol 10, No 1. pp. 37-46.