

## FRP-콘크리트 합성말뚝 시편의 압축강도실험 Compression Strength Test of FRP Reinforced Concrete Composite Pile

이영근 Lee, Young-Geun\* · 최진우 Choi, Jin-Woo\* · 박준석 Park, Joon-Seok\* ·  
윤순중 Yoon, Soon-Jong\*\*†

(Received October 25, 2011 ; Revised November 15, 2011 ; Accepted November 28, 2011)

### ABSTRACT

In this paper, we present a part of results to develop new type hybrid FRP-concrete composite pile (i.e., concrete filled fiber reinforced plastic circular tubes, hybrid CFFT, HCFEFT). The purpose of this paper is to evaluate compressive loading capacity through compressive strength test. Before compressive strength test of HCFEFT, we investigated mechanical properties of pultruded fiber reinforced plastic (PFRP) and filament winding fiber reinforced plastic (FFRP). For estimating the compressive strength of HCFEFT, uni-axial compression strength tests of HCFEFT compression members were conducted. The test variables are compressive strengths of concrete and thickness of FFRP. In addition, uni-axial compression strength tests of concrete filled fiber reinforced plastic circular tube (CFFT) except PFRP members were conducted. The test variable in the test is thickness of FFRP. From the test result, the compressive strength of the HCFEFT is larger than compressive strength of CFFT as much as 47%. It can be observed that the uni-axial compressive strength of the HCFEFT increased if the concrete strength and the thickness of exterior filament winding FRP tube increased. In addition, the finite element analysis result is compared with the experimental result. The difference between the experimental and FEM results is in the range of 0.14% to 17.95%.

### 요 지

이 연구는 새로운 형태의 FRP-콘크리트 합성말뚝인 하이브리드 CFFT(HCFEFT)를 개발하는 과정의 일부이다. 이 논문에서는 CFFT와 HCFEFT의 압축강도실험을 통하여 구조적 거동을 분석하였다. 압축강도실험에 앞서 PFRP와 FFRP 재료의 역학적 성질을 조사하였다. HCFEFT 압축강도실험은 콘크리트 강도와 FFRP의 두께를 변수로 하여 실험을 수행하였다. 그리고, FFRP 두께를 변수로 PFRP를 제외한 CFFT 실험체를 제작하고 실험을 수행하여 HCFEFT와 비교 분석하였다. 실험 결과, HCFEFT의 압축강도는 CFFT에 비하여 11~47% 향상되는 것으로 나타났다. 실험구간내의 필라멘트 와인딩 FRP 보강두께의 증가에 따른 HCFEFT의 압축강도는 선형으로 증가시키는 것으로 나타났다. 또한 실험체와 동일한 조건의 유한요소해석을 수행하였다. 해석결과는 실험결과에 비하여 모든 시편에서 약간 작은 값을 보였으며, 0.14%에서 17.95%까지의 오차범위 내에 있음을 알 수 있었다.

**Key Words:** Hybrid concrete filled FRP tube(하이브리드 CFFT), Pultruded fiber reinforced polymeric plastic(필트루전 섬유강화플라스틱), Filament winding fiber reinforced polymeric plastic(필라멘트 와인딩 섬유강화플라스틱), Finite element analysis(유한요소해석)

### 1. 서 론

현재 사용되고 있는 대부분의 건설재료는 경제성과 내구성이 우수한 강재나 콘크리트이다. 그러나 콘크리트는 장기간의 공기 중의 이산화탄소 등에 노출되면 중성화 현상이 발생되며, 강재는 염화물의 침투와 수분의 영향으로 부식되어 구조물의 내구성을 저하시킨다(문병화, 2011). 이러한 문제점을 보완하기 위한 신소재로 FRP(Fiber Reinforced Plastic)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. FRP는 강재에 비해 비교적 낮은 강성으로 독립적인 구조부재로 사용하기 보다는 주로 보강재로 활용되고 있으며, 이 대표적인 예로써 콘크리트

표면을 FRP로 보강하여 구속압력을 주어 강도를 증진시키는 CFFT(Concrete Filled FRP Tube)가 있다. CFFT는 콘크리트 외곽에 FRP를 보강하여 외부 유해환경으로부터 심부콘크리트를 보호하며 상부하중에 의한 심부콘크리트의 팽창을 효과적으로 구속하여 하중저항성을 증가시킨다. 그러나 건설분야에 적용되고 있는 대부분의 압축재는 압축과 휨을 받는 Beam-column으로 보강섬유가 원주방향으로 배치된 필라멘트 와인딩을 사용하는 CFFT를 건설현장에 사용하기 위해서는 휨에 대한 보강이 필요하다.

이 연구에서는 CFFT의 휨에 대한 보강방안으로 필라멘트 와인딩 FRP(Filament winding fiber reinforced

\* 정회원-홍익대학교 토목공학과 박사과정

\*\* 정회원-홍익대학교 토목공학과 교수, 교신저자(sjyoon@hongik.ac.kr)

polymeric plastic, FFRP) 내부에 부재의 축방향으로 섬유가 배치되는 필트루전 FRP(Pultruded fiber reinforced polymeric plastic, PFRP)를 도입하여 힘에 대해서도 구조성능을 확보할 수 있는 새로운 형식의 FRP-콘크리트 합성부재인 HCFFT(Hybrid CFFT)를 제안하였다. 그리고 HCFFT의 압축성능을 평가하기 위해 CFFT와 HCFFT에 대한 실험을 실시하여 그 결과를 비교, 검토하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 압축강도를 추정하여 실험과 비교하였다.

## 2. HCFFT의 구성 및 특징

### 2.1 CFFT의 개요

FRP-콘크리트 합성부재(CFFT, Concrete Filled FRP Tube)는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 외부 FFRP와 내부 콘크리트로 구성된다. 이러한 부재는 이미 설명한 바와 같이 FRP 원통관을 먼저 제작하고 콘크리트를 타설하여 완성한다.

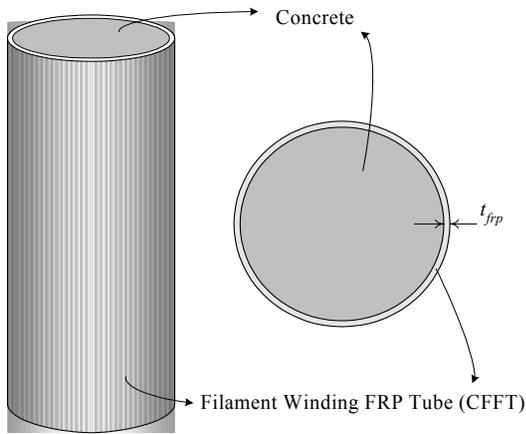


Fig. 1 FRP-콘크리트 합성 압축재의 구성

Fig. 1과 같이 FRP로 콘크리트를 보강할 경우, 압축하중이 작용하면 콘크리트는 원주방향의 직각방향(반지름방향)으로 팽창(포아송비 효과)이 발생한다. 이때 외부의 구속재료(FRP)에 의해 콘크리트가 구속되어 압력이 발생하며 이를 구속압력이라 한다. 구속에 대한 역학적 거동은 두 가지 요인에 영향을 받는 것으로 알려져 있다(최진우 등, 2011). 콘크리트 충전 FRP 합성부재를 예로 설명하면 첫 번째 요인은 콘크리트가 팽창하는 정도이고, 두 번째 요인은 그 팽창을 억제하는 구속부재의 강성이다. 따라서, Fig. 1의 CFFT 부재가 압축하중을 받을 경우 내부 콘크리트가 포아송비의 영향(poisson effect)으로 반지름 방향으로 팽창하게 되고, FRP는 이 팽창을 억제하여 결국 압축 성능을 향상시키므로 동일한 압축력이 작용할 경우 더 작은 단면을 갖는 압축재의 설계가 가능하다(박중화, 2010).

건설분야에서 콘크리트 압축재의 내부를 구속하는

가장 일반적인 방법으로는 띠철근이나 나선철근을 사용하는 방법이 적용되어 왔다. 특히, 나선철근의 경우 그 배치간격에 따라 내부 콘크리트를 효과적으로 구속하여 압축 성능 향상에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 그러나 외부 유해환경으로부터 철근을 보호하기 위한 콘크리트 피복은 결국 단면을 증가시키게 되며, 균열이나 파손 등에 의해 완전한 구속효과를 거두지 못하는 것으로 연구, 보고된 바 있다. 이에 반해 Fig. 1의 콘크리트 합성 압축재는 콘크리트의 외곽에 위치하여 외부 유해환경으로부터 내부 콘크리트를 보호하며, 특히, 수분의 침투를 막을 수 있어 내부에 배근된 철근을 보호할 수 있다. 또한, 뛰어난 연성과 원주방향의 높은 강도 및 강성은 내부 콘크리트의 팽창을 효과적으로 구속할 수 있다. 이러한 구속정도는 평형조건으로부터 쉽게 결정할 수 있다.

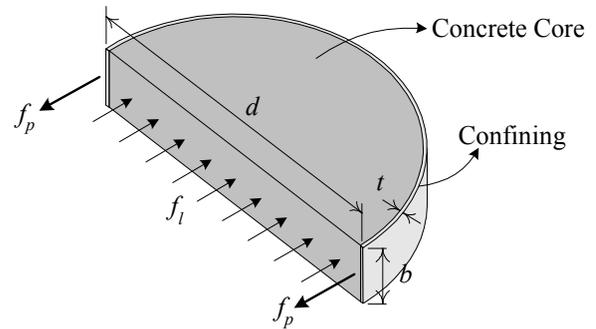


Fig. 2 외부보강재에 의한 구속효과

콘크리트 합성 압축재가 압축하중을 받을 경우 극한 상태에서 Fig. 2와 같이 반지름 방향으로 발행하는 응력과 보강재에 의한 구속응력은 평형을 이루게 되며 식 (1)의 관계가 성립한다.

$$f_l = \frac{2f_p \cdot t}{d} = \frac{\rho_p \cdot f_p}{2} \tag{1}$$

식 (1)에서  $f_l$ 은 구속압이고,  $f_p$ ,  $t$ 는 각각 외곽을 구성하고 있는 외부보강재의 원주방향 인장강도와 보강두께를 나타내며,  $\rho_p$ 는 내부콘크리트와 외부보강재의 체적비로서 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\rho_p = \frac{\pi dt}{\pi d^2} = 4 \frac{t}{d} \tag{2}$$

구속압은 식 (1)에 나타난 것과 같이 구속하는 재료의 강도 및 두께의 함수로 나타내며, 구속효과(Confining effect)는 구속하고 있는 재료의 역학적 성질에 따라 영향을 받는다. 구속효과에 의한 압축재의 성

능 및 역학적 거동은 Fig. 3에 나타내었다.

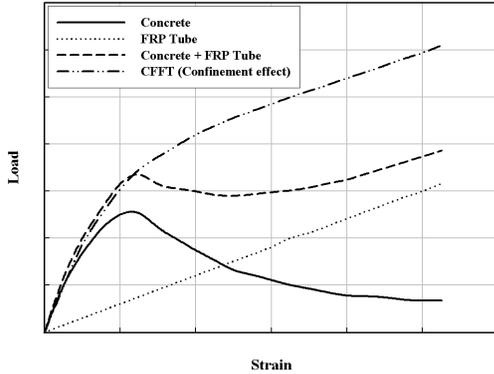


Fig. 3 FRP-콘크리트 합성부재의 압축거동

Fig. 3에서 실선은 구속되지 않은 무보강 콘크리트의 하중-변형률 관계이고, 짧은 점선(Short-dash)은 FRP 원통관의 축방향 압축하중에 대한 하중-변형률 곡선이며, 긴 점선(Long-dash)은 FRP 원통관과 무보강 콘크리트의 대수적인 합을 표현한 곡선이다. 그러나 FRP 원통관에 콘크리트를 충전한 CFFT는 두 재료의 대수적인 합과 더불어 구속효과로 인해 이점쇄선과 같은 압축거동을 나타낸다. 이 구속효과에 대해서는 현재까지도 많은 연구자들에 의해 다양하게 연구가 수행되고 있다.

### 2.2 HCFFT의 구성 및 특징

이 연구에서는 길이에 제한이 없이 연속생산이 가능하며 부재의 축방향으로 보강섬유가 배치되는 PFRP를 도입하여 CFFT에 대한 장점을 그대로 유지하는 반면 휨에 대해서도 충분한 구조성능을 확보할 수 있는 하이브리드 FRP-콘크리트 합성말뚝(HCFFT, Hybrid CFFT)을 제안하였다. 즉, PFRP 원통관을 제작하고 외부를 FFRP로 보강하게 되면 휨 및 전단에 대해서는 PFRP부재가 저항하고 FFRP는 콘크리트를 구속하여 축방향 성능을 향상시킬 수 있게 된다. 이 연구에서 제안한 HCFFT 말뚝의 단면형상을 Fig. 4에 나타내었다.

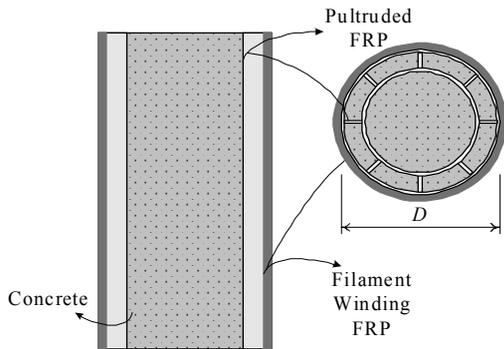


Fig. 4 하이브리드 FRP-콘크리트 합성말뚝의 단면형상

## 3. 재료의 역학적 성질

### 3.1 펄트루전 FRP

FRP-콘크리트 합성말뚝의 제작에 사용된 PFRP의 역학적 특성을 조사하기 위하여 KS M ISO 527-4(플라스틱-인장성의 측정-제4부: 등방성 및 직교 섬유강화플라스틱 복합 재료의 시험 조건)를 참고로 하여 인장실험을 수행하였다. PFRP 부재의 단면은 Fig. 5에 나타낸 바와 같이 단면을 구성하는 판요소의 두께와 보강섬유의 적층수가 서로 다르기 때문에 부재 단면의 내측(I), 외측(O), 격벽(S)으로 구분하여 각각 5개씩 채취하여 제작하였다.

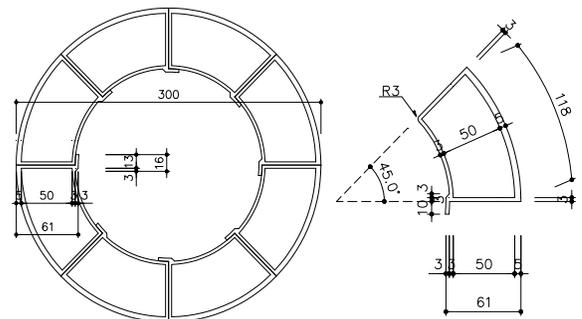


Fig. 5 하이브리드 FRP-콘크리트 합성말뚝의 PFRP 부재의 단면

PFRP 부재의 인장강도실험은 홍익대학교 토목구조재료실험실에서 수행하였다. 각 시편은 중앙부분에 길이방향과 길이직각방향의 변형률계기를 부착하였으며, UTM(Universal Testing Machine)을 이용하여 하중을 재하하였다. 하중은 변위제어방식으로 3mm/min의 속도로 재하하였으며, 변형률계기로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. 인장시편의 형태 및 실험방법은 Fig. 6에 나타내었다.



Fig. 6 PFRP 인장강도실험 시편 및 실험 형태

인장강도실험 결과 모든 시편은 섬유배치방향으로 파괴되었다. 채취한 시편의 두께와 폭, 실험결과를 Table 1에 정리하여 나타내었다.

Table 1 PFRP 인장실험 시편의 치수와 실험결과

시편번호	폭 (mm)	두께 (mm)	파괴응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포아송비	
내측 (I)	1	24.56	4.17	266.75	21.84	0.45
	2	25.63	3.71	232.95	22.57	0.45
	3	25.63	3.71	265.69	23.88	0.42
	4	25.50	3.74	276.96	22.99	0.35
	5	25.15	4.15	258.16	20.93	0.47
	평균	25.29	3.90	260.10	22.44	0.43
외측 (O)	1	28.31	3.59	234.48	28.69	0.29
	2	27.78	3.80	222.17	28.02	0.32
	3	28.04	3.56	232.38	28.61	0.28
	4	29.51	3.84	187.57	26.53	0.30
	5	28.66	3.86	194.55	27.78	0.34
	평균	28.46	3.73	214.23	27.93	0.31
격벽 (S)	1	22.94	3.05	343.73	29.99	0.29
	2	24.33	3.07	410.86	30.08	0.26
	3	26.41	3.20	394.29	30.57	0.30
	4	24.75	3.11	403.50	34.77	0.46
	5	24.91	3.16	384.74	31.74	0.45
	평균	24.67	3.12	387.42	31.43	0.35
평균			287.25	27.27	0.36	

### 3.2 필라멘트 와인딩 FRP

FRP-콘크리트 합성말뚝의 제작에 사용된 필라멘트 와인딩 FRP의 역학적 특성을 조사하기 위하여 부재 길이방향의 인장강도실험을 수행하였고, 원주방향에 대해서 Split Disk Test를 수행하였다.

인장강도실험은 PFRP와 동일한 형태로 수행하였으며, 사용한 시편은 4, 6, 8ply로 각각 적층한 3종류의 원통관에서 5개씩 채취하여 제작하였다. 인장강도실험 결과 모든 시편은 섬유배치방향으로 파괴되었다. 채취한 시편의 두께와 폭, 실험결과를 Table 2에 정리하여 나타내었다.

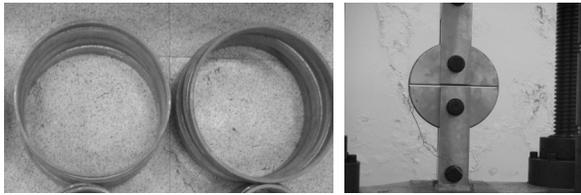
Split Disk Test는 홍익대학교 토목구조재료실험실에서 기존 연구를 참고로 하여 수행하였다(박준석, 2006). Split Disk Test에 인장실험과 같이 3종류의 원통관에서 5개씩 채취하여 제작하였다. 각 시편은 중앙부분에 원주방향과 원주직각방향으로 변형률게이지를 부착하였으며, UTM을 이용하여 하중을 재하하였다. 하중은 변위제어방식으로  $3\text{mm}/\text{min}$ 의 속도로 재하하였으며, 변형률게이지로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. Split Disk Test의 시편형태 및 실험방법은 Fig. 7에 나타내었으며, 실험결과를 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 2 FFRP 인장실험 시편의 치수와 실험결과

시편번호	폭 (mm)	두께 (mm)	파괴응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)	포아송비
300-28-1	25.52	3.13	62.71	9.46	0.34
300-28-2	26.35	2.50	73.42	-	-
300-28-3	26.07	3.29	62.71	11.37	0.36
300-28-4	26.07	3.53	60.14	10.23	0.36
300-28-5	24.42	3.52	57.16	8.45	0.32
평균	25.69	3.19	63.23	9.88	0.35
300-42-1	25.41	6.51	52.17	7.63	0.36
300-42-2	25.89	6.18	55.43	-	-
300-42-3	25.31	6.76	52.22	7.05	0.36
300-42-4	26.43	6.16	59.40	9.09	0.37
300-42-5	24.75	5.88	62.14	11.29	0.36
평균	25.56	6.30	56.27	8.77	0.36
300-56-1	26.07	8.71	50.31	9.54	0.38
300-56-2	25.52	8.19	52.57	9.87	0.41
300-56-3	26.78	8.56	50.62	10.53	0.42
300-56-4	25.00	8.84	48.18	8.23	0.41
300-56-5	27.70	8.82	49.27	7.16	0.33
평균	26.21	8.62	50.19	9.07	0.39
평균			56.56	8.20	0.33

Table 3 FFRP Split Disk Test 시편의 치수와 실험결과

시편번호	폭 (mm)	두께 (mm)	파괴응력 (MPa)	탄성계수 (GPa)
300-28-1	32.70	3.57	278.03	26.91
300-28-2	29.25	3.46	286.85	21.37
300-28-3	29.72	3.77	272.65	18.92
300-28-4	29.00	3.87	274.90	21.68
300-28-5	31.62	4.06	233.47	23.31
평균	30.46	3.75	269.18	22.44
300-42-1	30.50	6.10	292.50	18.31
300-42-2	30.34	6.00	339.08	27.10
300-42-3	30.25	5.89	294.17	26.77
300-42-4	29.74	6.30	293.63	19.86
300-42-5	31.20	6.05	313.75	20.77
평균	30.41	6.07	306.63	22.56
300-56-1	33.30	8.70	296.28	21.80
300-56-2	30.50	7.80	300.45	20.14
300-56-3	30.85	8.20	299.41	23.20
300-56-4	33.85	7.80	309.76	20.00
300-56-5	32.55	8.21	306.50	23.59
평균	32.21	8.14	302.48	21.75
평균			292.76	22.25



(a) Split Disk Test 시편 (b) Split Disk Test

Fig. 7 Split Disk Test 시편 및 실험방법

#### 4. HCFFT의 압축강도 실험

##### 4.1 HCFFT 압축강도실험 변수 설정

HCFFT 압축강도실험의 기존의 연구문헌을 참고하여 변수는 2가지로 설정하였다. 첫 번째 변수는 내부 채움에 사용되는 콘크리트의 강도로서, 21 MPa, 30 MPa, 40 MPa의 3가지 변수를 정하였다. 두 번째 변수는 필라멘트 와인딩의 두께로서, 필라멘트와인딩 작업 시 감을 수 있는 최소 두께인 2.8mm(4ply)로부터 2ply씩 증가시켜, 4.2mm(6ply), 5.6mm(8ply)로 결정하였다. 그리고 각 변수별 시편은 각각 5개씩 제작하여 총 45개의 HCFFT 압축강도실험 시편으로 계획하였다.

또한, 휨보강제인 PFRP가 포함되지 않은 CFFT를 제작하여 HCFFT와 CFFT의 비교하였다. CFFT의 변수는 콘크리트 강도는 30 MPa로 고정하였으며, 필라멘트와인딩 두께는 HCFFT와 동일하게 2.8mm(4ply), 4.2mm(6ply), 5.6mm(8ply)로 결정하였다. 그리고 각 변수별 시편은 각각 3개씩 제작하여 총 9개의 시편으로 계획하였다. 각 시편의 크기와 변수, 수량, 펄트루전 FRP단면의 상세 치수를 Table 4에 나타내었다.

Table 4 HCFFT와 CFFT 압축강도실험 시편 계획

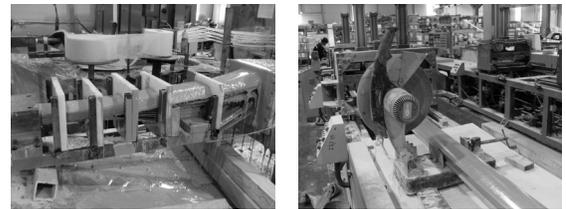
구분	직경 (D, mm)	높이 (L, mm)	콘크리트 강도 ( $f_{ck}$ , MPa)	FRP 두께 ( $t_f$ , mm)	수량 (EA)
HCFFT	300	600	21	2.8	5
				4.2	5
				5.6	5
			30	2.8	5
				4.2	5
				5.6	5
			40	2.8	5
				4.2	5
				5.6	5
CFFT	300	600	30	2.8	3
				4.2	3
				5.6	3

##### 4.2 HCFFT와 CFFT 실험체 제작

HCFFT 실험체는 펄트루전 FRP 단면을 생산한 후 각 모듈을 원통 형태로 접합하여, 접합된 부재를 맨드릴에 고정하여 원주방향으로 필라멘트 와인딩 FRP로 보강하는 순서로  $\phi 300 \times 600$ 의 FRP부재를 제작하고 현장에서 운반하여 콘크리트를 타설하여 완성하였다. CFFT 실험체는 HCFFT의 제작과정 중 펄트루전 FRP 공정을 제외하고, 그 이후 과정은 동일하게 진행되었다. Fig. 8에 HCFFT 압축강도실험 시편의 제작과정을 나타내었다.



(a) 보강섬유 보급(펄트루전) (b) 성형, 경화(펄트루전)



(c) 섬유 함침(펄트루전) (d) 절단 이송(펄트루전)



(e) 펄트루전 부재 완성 (f) PFRP 접합



(g) 이형제 제거 (h) PFRP 맨드릴 고정



(i) 반복와인딩 작업 (j) 콘크리트 배합, 타설



(k) 진동다짐 및 양생 (l) 표면작업

Fig. 8 HCFFT 실험체의 제작과정

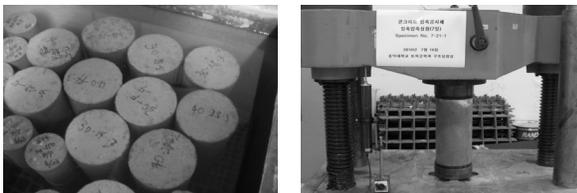
4.3 콘크리트 압축강도시험

실험체 제작에 사용된 콘크리트는 별도의 공시체를 제작하여 압축강도시험을 실시하였다. 콘크리트는 Table 5와 같은 배합비로 설계기준강도가 21MPa, 30MPa, 40MPa이 되도록 제작하여 실험체를 총 9종류로 제작하였다. Table 5에서 W/B는 사용된 혼화재 당 단위수량, S/a는 잔골재율, W는 단위수량, B는 혼화재량, C는 단위시멘트량, F/A는 사용된 골재 당 혼화재량, S는 잔골재량, G는 굵은골재량, A.D는 고성능감수제의 단위중량을 각각 나타낸 것이다. 또한, HCFFT와 동일한 FRP 두께와 콘크리트의 설계기준강도를 변수로 설정한 CFFT를 제작하였다. 공시체는 설계기준강도에 따라  $\phi 150 \times 300mm$ 의 크기로 15개씩 제작하여 수중양생을 하였으며, 타설일로부터 각각 7일, 14일, 28일 경과 후 압축강도시험을 실시하였다.

Table 5 콘크리트 시방배합표

$f_{ck}$ (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	배합재료의 단위중량 ( $kg/m^3$ )							
			W	B	C	F/A	S	G	A.D	
21	52.0	51.0	165	317	286	31	928	909	2.22	0.70%
30	40.0	48.0	168	420	378	42	827	913	3.15	0.75%
40	34.0	46.0	170	500	450	50	759	908	4.25	0.85%

콘크리트 공시체의 압축강도시험은 홍익대학교 토목구조재료실험실에서 수행하였다. 각 공시체는 100mm의 용량을 갖는 LVDT를 설치하여 길이방향 압축변위를 측정하도록 하였으며, UTM을 이용하여 하중을 재하하였다. 하중은 변위제어방식으로 1mm/min의 속도로 재하하였다. Fig. 9에 제작한 콘크리트 공시체와 압축강도시험 전경을 나타내었다.



(a) 공시체 시편 (b) 표준공시체 압축강도시험

Fig. 9 콘크리트 압축강도시험

시험결과 모든 공시체의 파괴는 표면에 균열이 발생하며 파괴되었으며 모든 공시체는 양생 28일 후 설계기준강도보다 비슷하거나 큰 압축강도를 나타내었다.

4.4 HCFFT 압축강도실험

HCFFT의 압축강도실험은 30MN(3,000tonf) 용량의 UTM을 이용하여 하중제어방식으로 300kN/min의 속도로 하중을 재하하여 일축압축실험을 수행하였다. LVDT와 변형률게이지를 설치하여 실험체의 변위와 변형률을 측정하였다. Fig. 10에 HCFFT 압축강도실험 전경을 나타내었다.

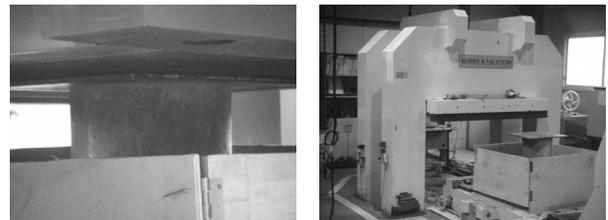


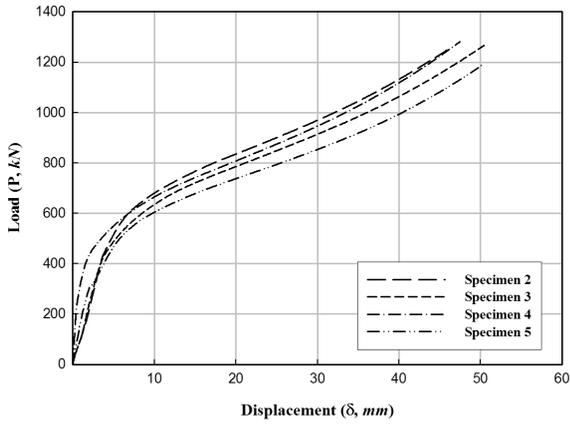
Fig. 10 HCFFT 압축강도실험 전경

압축강도실험 결과 실험체는 하중이 재하됨에 따라 심부의 콘크리트의 파괴가 일어난 후, FRP의 구속에 의해 추가적인 강도 증가를 보인 후, FRP의 섬유배치 방향으로 파괴가 진행되었다. Table 6에 변수별 최대하중과 각 최대하중을 시편의 단면적으로 나누어 구한 응력을 정리하여 나타내었고, Fig. 11에 CFFT와 HCFFT의 대표적인 하중-변위 관계를 나타내었다. Fig. 12에 시편의 파괴형태를 나타내었다.

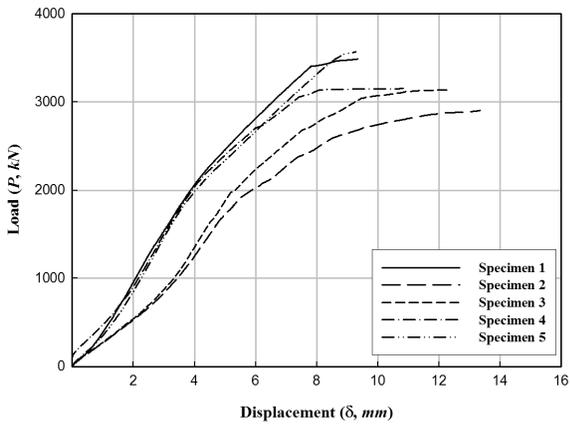
Table 6 HCFFT 압축강도실험 결과

시편	평균최대하중 (kN)	평균 최대응력 (MPa)
CFFT-2.8-34.5	2494.44	35.29
CFFT-4.2-34.5	3330.56	47.12
CFFT-5.6-34.5	4316.67	61.07
HCFFT-2.8-19.2	3261.00	46.13
HCFFT-2.8-34.5	3633.00	51.40
HCFFT-2.8-44.0	4012.00	56.75
HCFFT-4.2-19.2	4077.00	57.67
HCFFT-4.2-34.5	4895.00	69.25
HCFFT-4.2-44.0	4738.33	67.03
HCFFT-5.6-19.2	4293.33	60.74
HCFFT-5.6-34.5	4796.67	67.86
HCFFT-5.6-44.0	5156.67	72.95

시편의 종류(HCFFT, CFFT) - FRP 보강두께(2.8, 4.2, 5.6mm) - 콘크리트의 강도(19.2, 34.5, 44.0MPa)



(a) CFFT (300-21-2.8)



(b) HCFFT (300-21-2.8)

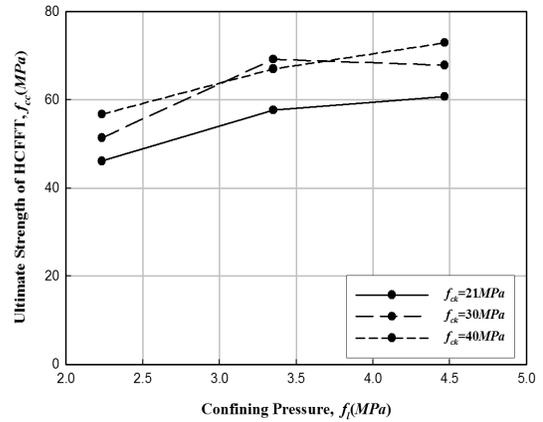
Fig. 11 CFFT와 HCFFT의 하중-변위 관계



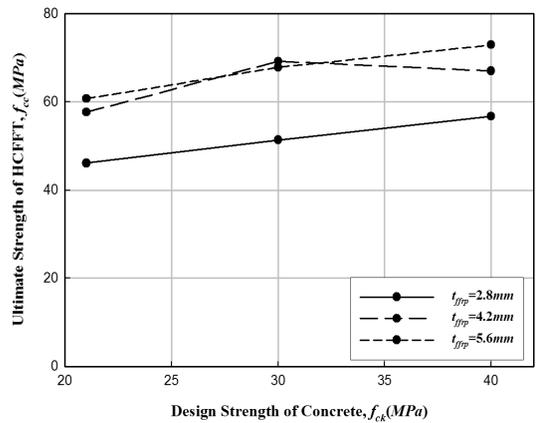
Fig. 12 HCFFT 압축강도실험 시편 파괴형태

실험 결과, HCFFT의 압축강도는 CFFT에 비하여 11~47% 향상되는 것으로 나타났다. HCFFT의 실험 구간 내에서 FFRP의 두께는 식 (1)에서 표시한 구속압을 증가시켜준다. 구속압과 콘크리트의 설계기준강도의 증가에 따라 압축강도가 증가하였으며, 구속압 3.5 MPa, 콘크리트 설계기준강도 30 MPa 이상에서는 강도증가폭이 감소하였다. 또한, 콘크리트의 강도를 증가시켰을 때보다 구속압을 증가시켰을 때 더 큰 강도증가를 나타냈다. 이러한 현상은 HCFFT, CFFT는 콘크리트가 파괴된 이후 구속압에 의한 연성증가로 강도가 증가되는 현상을 보이는 부재이므로 콘크리트 강도 보다는 FFRP의 보강 두께의 영향이 크다는 것을 나타낸

다. 또한 실험 결과로 미루어 보아 FFRP의 두께는 일정 치수 이상에서는 감소하는 영향을 보임에 따라 보강 두께의 제한사항을 마련할 필요가 있다. HCFFT와 구속비 및 콘크리트 강도에 따른 영향을 Fig. 13에 나타내었다.



(a) 구속비 증가에 따른 HCFFT 실험체의 평균압축강도



(b) 콘크리트 설계기준강도 증가에 따른 HCFFT 실험체의 평균압축강도

Fig. 13 FFRP 보강두께에 따른 압축강도의 변화

## 5. 유한요소해석

이 연구에서는 HCFFT의 압축실험결과와 비교하기 위하여 범용유한요소해석 프로그램인 ANSYS Ver. 11 (SAS IP, Inc., 2007)을 사용하여 구조해석을 수행하였다. 유한요소해석은 실험을 수행하였던 부재 치수와 콘크리트의 설계기준강도, FFRP의 두께를 그대로 반영하여 수행하였고, 재료의 역학적 성질은 3장에서 실험을 통해 얻은 결과를 적용하였다. 경계조건은 해석 모델의 하부의 면을 모두 고정단으로 하였으며, 하중은 실험조건과 동일하게 해석모델의 상부에 가력판을 생성하여 가력판 상부면에 실험으로 구해진 최대하중을 재하하였다. Fig. 14에 CFFT와 HCFFT의 해석모델을 나타내었다.

해석결과는 경계조건과 하중재하점에서 가장 거리가 먼 중앙부의 절단면에 대하여 검토하였다. CFFT와 HCFFT의 유한요소해석 상의 응력분포를 Fig. 15, Fig. 16에 각각 나타내었으며, 해석을 통하여 구해진 중앙부의 응력을 실험과 비교하여 Table 7에 나타낸다.

해석결과는 실험결과에 비하여 모든 시편에서 약간 작은 값을 보였으며, 0.14%에서 17.95%까지의 오차범위 내에 있음을 알 수 있었다. 콘크리트 설계기준강도가 작을수록, FRP의 두께가 작을수록 오차가 작게 나타났다. 이는 해석상에서는 콘크리트와 PFRP, FRP의 접합이 완벽하다고 가정되고 있는 조건에 따라 일체거동을 하지만 실제로 콘크리트 파괴 이후 완벽하지 못한 접합을 가지게 되는 부분의 영향으로 판단된다.

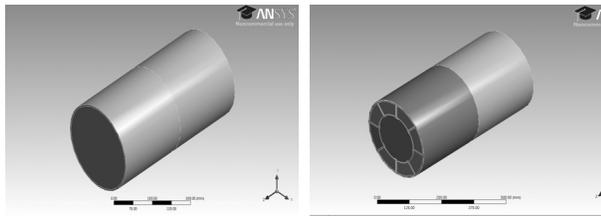
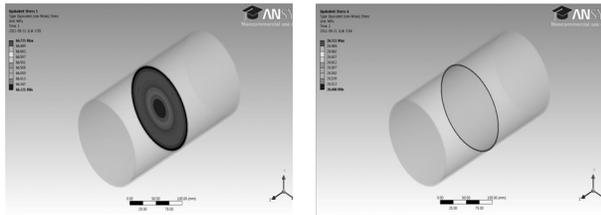
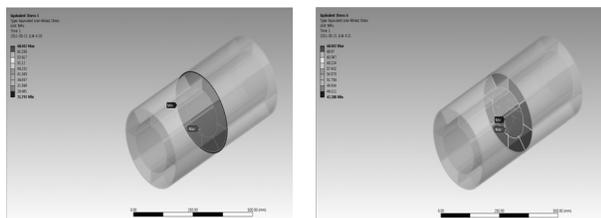


Fig. 14 CFFT와 HCFFT 유한요소해석 모델

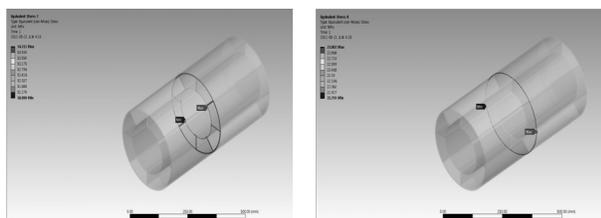


(b) 콘크리트 (c) FRP

Fig. 15 CFFT 부재 중앙부에 대한 유한요소해석



(a) 전체 (b) 콘크리트



(c) PFRP (d) FRP

Fig. 16 HCFFT 부재 중앙부에 대한 유한요소해석

Table 7 HCFFT 압축강도실험과 유한요소해석결과 비교

구분	콘크리트 설계기준강도 ( $f_{ck}$ , MPa)	FRP두께 ( $t_f$ , mm)	파괴강도(MPa)		
			실험 ( $f_c$ )	유한요소해석 ( $f_f$ )	오차 (%)
CFFT	30	2.8	35.20	34.42	-2.22
		4.2	47.12	45.36	-3.74
		5.6	61.07	58.05	-4.95
HCFFT	21	2.8	46.13	46.07	-0.14
		4.2	57.67	56.88	-1.37
		5.6	60.74	56.48	-7.01
	30	2.8	51.40	47.06	-8.44
		4.2	69.25	62.64	-9.55
		5.6	67.86	58.25	-14.16
40	2.8	56.57	49.47	-12.55	
	4.2	67.03	57.74	-13.87	
	5.6	72.95	59.85	-17.95	

#### 4. 결론

HCFFT는 기존의 CFFT에 대해 휨에 대한 구조적 성능을 향상시키기 위해 펠트루전 FRP를 도입한 FRP-콘크리트 합성부재로서, HCFFT의 압축강도실험을 통해 압축거동을 조사하였다.

1. 펠트루전 FRP와 필라멘트 와인딩 FRP의 각각의 장점을 살린 HCFFT의 단면을 설계하였다. 또한, 펠트루전 공정상 단면의 크기에 대한 제약이 있으므로 Segment형태의 조립형 펠트루전 단면을 설계하였다.

2. HCFFT 압축강도실험을 수행하기 앞서 PFRP와 FRP 재료의 역학적 성질을 인장실험, Split Disk Test를 통하여 조사하였다. 또한 내부 채움에 사용되는 콘크리트에 대하여 표준공시체 시험을 실시하여 설계한 콘크리트 강도가 발현됨을 확인하였다.

3. HCFFT와 CFFT의 압축강도실험 결과, HCFFT의 압축강도가 CFFT에 비하여 11~47% 향상되는 것으로 나타났다. 이는 FRP의 총단면적의 증가에 따른 구속압의 증가가 원인인 것으로 생각된다.

4. HCFFT의 실험 구간 내에서 FRP의 두께의 증가에 따라 구속압이 증가되며, 구속압과 콘크리트의 설계기준강도의 증가에 따라 압축강도가 증가하였으며, 구속압 3.5 MPa, 콘크리트 설계기준강도 30 MPa 이상에서는 강도증가폭이 감소하였다. 또한, 콘크리트의 강도를 증가시켰을 때보다 구속압을 증가시켰을 때 더 큰 강도증가를 나타냈다. 또한 실험 결과로 미루어 보아 FRP의 두께는 일정 치수 이상에서는 감소하는 영

향을 보임에 따라 보강 두께의 제한사항을 마련할 필요성이 있다.

5. 유한요소해석을 통하여 파괴 강도를 예측한 결과, 실험결과에 비하여 약간 작은 값을 보였으며, 0.14%에서 17.95%까지의 오차범위 내에 있음을 알 수 있었다.

향후, HCFE의 유한요소해석에 있어서 오차를 줄이는 연구를 진행해야 할 것이며, 현재 휨강도실험을 실시하여, 이 연구에서 제시한 압축강도실험결과와 함께 분석하여 HCFE의 구조적 거동특성을 파악할 수 있도록 연구를 진행하고 있다.

### 감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설기술 혁신사업(10CCTI-C053530-02-000000)의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

### 참고 문헌

1. 문병화, 최진우, 박준석, 윤순중 (2011), 하이브리드 FRP-콘크리트 합성부재의 압축거동, 2011년 춘계 학술발표대회 논문집, 한국복합재료학회.
2. 박중화 (2010), PSC 박스거더교를 적용을 위한 FRP 스트럿의 압축거동 평가, 박사학위논문, 한양대학교.
3. 박준석 (2006), 콘크리트 충전 FRP Tube 합성부재의 압축강도 추정에 관한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.
4. 박준석, 주형중, 남정훈, 윤순중 (2011), FRP로 휨보강된 FRP-콘크리트 합성압축재의 구조적 거동, 한국복합신소재구조학회논문집, 제1권, 제3호, pp.10-16.
5. 최진우, 박준석, 남정훈, 안동준, 강인규, 윤순중 (2011), FRP 콘크리트 합성말뚝 압축강도에 대한 실험적 연구, 한국복합신소재구조학회논문집, 제2권, 제1호, pp.30-39.
6. KS M ISO 527-4 (2002), *Plastic-Determination of Tensile Properties-Part 4: Test Conditions for Isotropic and Orthotropic Fiber-Reinforced Plastic Composites*, Korean Agency for Technology and Standards.
7. SAS IP, Inc. (2007), *Release 11.0 Documentation for ANSYS Workbench*, SAS IP, Inc, Pennsylvania.