

## 논문

## 제작성을 개선한 하이브리드 FRP-콘크리트 합성말뚝의 압축거동

이영근\*, 박준석\*, 김선희\*, 김홍락\*, 윤순종\*<sup>+</sup>

## Compression Behavior of Manufacturability Enhanced FRP-Concrete Hybrid Composite Pile

Young-Geun Lee\*, Joon-Seok Park\*, Sun-Hee Kim\*, Hong-Lak Kim\*, and Soon-Jong Yoon\*<sup>+</sup>

## ABSTRACT

As a fundamental structural element of construction, a pile is constructed to transfer loads from superstructure to foundation. In general, since the pile foundation is constructed in the ground or ground under water, it is difficult to protect from the damages due to moisture and/or salt which create corrosive environment and it is even more difficult to estimate its durability. In this study, in order to enhance the durability and constructibility of the pile foundation, FRP-concrete hybrid composite pile (HCFFT) is suggested. Moreover, equation for the prediction of load carrying capacity of HCFFT circular members under compression is suggested and discussed based on the results of analytical and experimental investigations. In addition, we also conducted the finite element simulation for the structural behavior of new HCFFT composite pile and the result is compared with those of experimental and analytical studies. In addition, the axial loading capacity of new HCFFT composite pile is compared with those of existing PHC pile and hollow circular steel pipe pile, and it was found that the new HCFFT composite pile has advantages over conventional PHC and steel pipe piles.

## 초 록

말뚝은 상부구조물에 작용하는 하중을 지반에 전달하는 구조요소로서, 일반적으로 말뚝기초는 지중 또는 수면 아래 지중에 건설된다. 이러한 환경은 부식 또는 염해를 유발하여 말뚝에 손상을 야기한다. 지중 및 수중 구조요소인 말뚝이 손상될 경우, 손상에 따른 내구성을 평가하기 어려우며 추가적인 보수보강 및 유지관리 또한 어렵다. 이 연구에서는 말뚝기초의 내구성과 제작성을 개선하기 위하여 하이브리드 FRP-Concrete 합성말뚝(HCFFT)을 제안하였다. 제안된 HCFFT에 대한 유한요소해석과 실험을 실시하여, 이를 바탕으로 HCFFT의 최대하중 추정식을 제안하였다. 또한, 제안된 HCFFT의 제작과정에서의 문제점을 개선한 새로운 형태의 HCFFT의 형태를 제안하고, 유한요소해석을 실시하여 동일한 직경의 PHC 말뚝과 강관말뚝의 축방향 압축력을 HCFFT 말뚝의 축방향 압축력과 비교하여 HCFFT 말뚝의 장점을 확인하였다.

**Key Words :** 하이브리드 CFFT 말뚝(hybrid CFFT pile), 필라멘트 와인딩 FRP(filament winding FRP), 펄트루전 FRP(pultruded FRP), 압축거동(compression behavior), PHC 말뚝(PHC pile), 강관말뚝(steel pipe pile)

접수: 2012년 12월 05일, 수정: 2012년 12월 27일, 게재승인: 2012년 12월 29일

\* 홍익대학교 토목공학과 구조공학전공

\*+ 홍익대학교 토목공학과, Corresponding author(E-mail:sjyoon@hongik.ac.kr)

## 1. 서론

FRP (Fiber reinforced polymeric plastic) 복합재(보강섬유: glass fiber, 수지: polyester)는 콘크리트 및 강재와 같은 기존의 구조용 재료에 비해 단위중량당 강도 및 강성이 크고, 부식에 대한 저항성 및 내화특성이 매우 우수하다는 장점을 지니고 있다. FRP 복합재의 물리적, 화학적으로 우수한 성질로 인하여 기존에 복합재가 주로 사용되던 항공우주, 조선, 자동차 및 레저 산업뿐만 아니라 최근 토목, 건축 분야에서도 복합재료의 사용이 증가하고 있다[1]. 최근에는 강재의 부식문제와 콘크리트의 중성화문제를 발생시키는 습윤 및 해양 환경 등 특수한 조건에서 그 적용사례가 점진적으로 증가하고 있으며, 펄트루전(Pultrusion) 공정이나 필라멘트 와인딩(Filament winding) 공정 등과 같은 연속적으로 부재를 대량생산할 수 있는 공정들이 급속히 개발되고 발전하면서 기존 건설재료들과 가격면에서도 경쟁을 하고 있다[2].

이러한 건설분야에서 FRP 활용의 중심에는 부유식 구조물과 같은 해양구조물과 말뚝과 같은 지중구조물이 있다. FRP를 이용한 말뚝의 경우, 내부 콘크리트의 표면을 FFRP (Filament winding FRP)로 보강한 CFFT (Concrete filled FRP tube)가 대표적인 예로서, 이는 외부의 FRP를 이용하여 콘크리트의 염해 및 중성화에 의한 손상을 방지하는 효과를 가지며, 이와 동시에 심부의 콘크리트가 압축력을 받을 경우에 횡방향으로 팽창되는데 이를 효과적으로 구속하여 하중저항능을 증가시킨다. 그러나 건설분야에 적용되고 있는 대부분의 압축재는 압축과 휨을 받는 보-기둥(Beam-column)으로 보강섬유가 원주방향으로 배치된 필라멘트 와인딩을 사용하는 CFFT를 건설현장에 사용하기 위해서는 휨에 대한 보강이 추가적으로 필요하다[3]. 이러한 요구에 따라 보강섬유가 축방향으로 배치되어 효과적으로 휨에 대해 저항할 수 있는 PFRP (Pultruded FRP)를 이용한 HCFFT (Hybrid CFFT)를 제안하고 연구를 진행하였으며, 우선적으로 압축성능을 평가하였다. 이러한 연구의 결과, 초기에 제안된 HCFFT의 압축 및 휨성능은 상당히 뛰어나지만 PFRP의 폐합된 단면으로 인하여 콘크리트를 타설하는 과정에서 어려움이 발생하였다.

이 연구에서는, 앞에서 설명한 바와 같이, HCFFT 말뚝이 압축뿐만 아니라 휨에도 적절히 저항하도록 제안하였지만, 우선적으로 기존의 HCFFT의 압축성능을 평가하기 위해 실험을 하였으며, 실험을 통하여 제시한 최대하중 추정식에 의한 결과와 유한요소해석을 통하여 구한 결과를 비교 분석하였다. 또한 기존 HCFFT의 문제점인 제작성을 개선한 새로운 형태의 HCFFT를 제안하고, 이에 대한 유한요소해석을 통하여 압축거동(하중저항성능)을 예측하고 기존의 콘크리트 및 강관 말뚝의 하중저항성능과 비교 분석하였다.

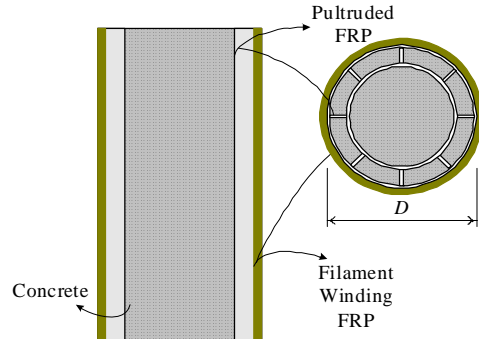


Fig. 1 Section of HCFFT member[4].

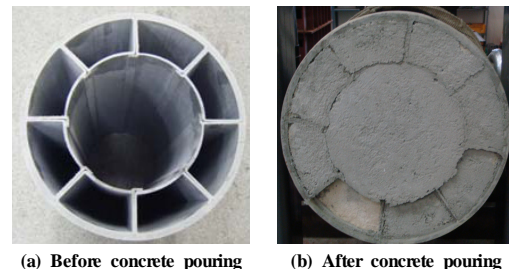


Fig. 2 Fabrication of HCFFT member[4][5].

## 2. 기존 HCFFT의 압축거동

### 2.1 기존 HCFFT의 개요

기존에 제안된 HCFFT는 길이에 제한이 없이 연속생산이 가능하며 축방향으로 보강섬유가 배치된 펄트루전 FRP로 원통관을 형성할 수 있는 단면을 제작한 후, 그 단면을 결합하여 원통관을 제작하고, 외부에 필라멘트 와인딩 FRP로 보강한다. 이후 일정강도의 콘크리트를 타설하고 양생하여 완성한다[4][5]. 즉, 휨 및 전단에 대해서는 내부의 펄트루전 FRP가 저항하고 외부의 필라멘트 와인딩 FRP는 내부에 배치된 펄트루전 FRP를 고정시켜 주고 압축력을 받고 있는 콘크리트의 횡방향 팽창을 구속하여 축방향 성능을 향상시킬 수 있도록 한 것이다. 기존에 제안된 HCFFT의 단면구성을 Fig. 1에 나타내었다, 또한 제작된 HCFFT 말뚝부재 중 복합재의 구성단면을 Fig. 2(a)에 나타내었고, 콘크리트가 타설된 말뚝의 단면을 Fig. 2(b)에 나타내었다[4][5].

### 2.2 기존 HCFFT 실험체 제작

기존 HCFFT 실험체는  $\phi 300 \times 600$ 으로 제작되었고, 실험체의 변수는 3가지로 설정되었다. 첫 번째 변수는 FFRP의 두께로서 필라멘트 와인딩 공정의 특성상 감는 횟수에 따른 두께를 설정하여 2.8, 4.2, 5.6mm(2, 3, 4ply)로 결정하였다. 두 번째

Table 1 Mechanical properties of FRP[3]

Classification	Thickness (mm)	Ultimate strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
Filament winding FRP	2.8	269.18	22.44
	4.2	306.63	22.56
	5.6	302.48	21.75
Pultruded FRP	3.9	260.1	22.4

Table 2 Result of the uni-axial compression test

Compressive strength of concrete	Thickness of FFRP (mm)	Maximum load (kN)		Average maximum strength (MPa)		
		HCFFT	CFFT	HCFFT ①	CFFT ②	①÷②
30 MPa	2.8	3,633	2,494	51.40	35.29	1.46
	4.2	4,895	3,331	69.25	47.12	1.47
	5.6	4,797	4,317	67.86	61.07	1.11

변수는 콘크리트의 강도로서 다짐 및 양생조건이 까다로운 고강도 콘크리트가 아닌 일반적으로 많이 사용되는 30MPa의 설계기준압축강도를 가지는 콘크리트로 설정하였고, 실험체에 콘크리트를 타설한 후 28일 경과한 표준압축강도시험 결과 압축강도는 34.53MPa로 측정되었다. 세 번째는 PFRP 부재의 유무이다. PFRP가 있는 시편은 HCFFT 부재가 되지만 PFRP가 없는 경우 일반적인 CFFT 부재가 되므로, 이 변수를 통하여 PFRP가 CFFT부재의 압축강도에 미치는 영향을 알 수 있다.

우선 Glass fiber 및 Polyester resin(상온경화형)으로 제작된 FRP 재료의 역학적 성질을 조사하기 위하여 FFRP의 경우, Split Disk 시험을 통해 구하였고, PFRP의 경우, 인장시험을 실시하여 탄성계수와 최대강도를 측정하였다. 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

### 2.3 기존 HCFFT의 압축강도실험

HCFFT의 압축강도실험은 30,000kN 용량의 UTM을 이용하여 하중제어방식으로 300kN/min의 속도로 하중을 재하하였다. LVDT와 변형률게이지를 설치하여 실험체의 변위와 변형률을 측정하였다. 실험체의 구성은 위에서 설명한 3가지 변수를 조합한 HCFFT 부재 3종류와 HCFFT에서 PFRP를 제외하고 콘크리트를 타설한 CFFT 1종류로 각 변수별로 5개의 실험체를 제작하여 총 30개의 실험체에 대한 실험을 상온(약 20℃)에서 수행하였다.

압축강도실험 결과 실험체는 하중이 재하됨에 따라 심부의 콘크리트에서 파괴가 일어난 후, 필라멘트 와인딩 FRP의 구속에 의해 추가적인 강도 증가를 보인 후, 필라멘트 와인딩 FRP의 섬유배치방향(시편의 횡방향)으로 파괴가 진행되었다. 그러나 외부가 FRP로 보강된 시편의 특성상 내부의 콘크리트의 파괴순간을 알아내는 것은 거의 불가능하므로 최종 파괴강도에 대한 비교만을 실시하였다. HCFFT의 압축강도는 CFFT에 비하여 11~47% 향상되는 것으로 나타났다. 실험결과를 정리하여 각 변수별로 최종파괴하중과 최대파괴강도를 Table 2에 나타내었다.

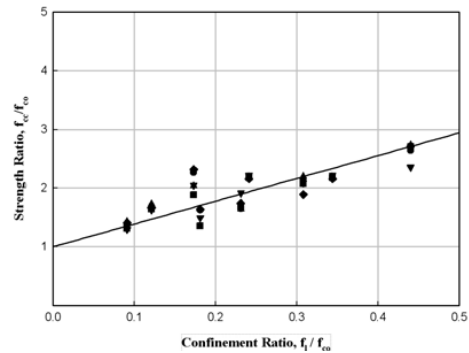


Fig. 3 Relationship between the confinement ratio and the strength ratio[6].

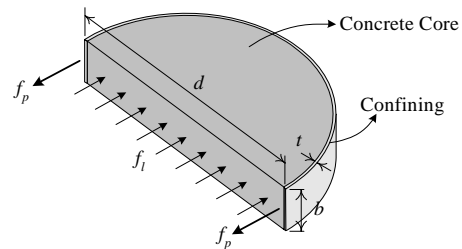


Fig. 4 Confinement pressure[4].

실험구간내에서 HCFFT와 CFFT의 강도의 차이가 가장 큰 것은 필라멘트 와인딩 보강두께가 4.2mm인 경우였고, 5.6mm의 경우 그 영향이 현저히 감소됨을 알 수 있었다. 일반적으로 보강두께가 증가하면 강도는 증가하며 강도의 증가폭은 점차 줄어드는 것으로 알려져 있으나, 5.6mm의 보강두께에서 최대하중과 용력이 감소하는 원인이 FFRP의 Split Disk 시험에서 4.2mm 두께의 시편의 강도가 가장 높았기 때문인지, 실험체 제작에서 발생한 것인지는 분명하지 않다. 또한 변수가 동일한 5개의 실험체 내에서의 강도 편차가 존재하며, 보강두께가 4.2mm인 실험체의 최대하중과 보강두께가 5.6mm인 실험체의 최대하중의 차이가 크지 않아 변수의 영향이 없이도 실험체 자체에서 발생하는 편차의 내에 있으므로, 이러한 현상은 강도의 차이가 거의 없는 것으로 판단하였다.

실험결과를 통하여 우선적으로 두께 4.2mm인 FFRP를 선정할 경우 효율적인 설계를 할 수 있을 것으로 생각된다. 이 실험결과와 기존 연구문헌[6]의 실험결과를 Fig. 3과 같이 HCFFT의 강도비와 구속비의 관계로 표현하여 선형회귀분석하면 식 (1)과 같은 관계식으로 정리할 수 있으며, 이를 통하여 기존 연구문헌[6]에서는 식 (2)와 같은 HCFFT의 최대압축하중 추정식을 제안하였다. 식 (2)의  $f_{cc}A_{co}$ 는 콘크리트의 압축강도와 FFRP의 구속효과를 포함한 부분이며,  $1.103f_pA_p$ 는 PFRP에 의한 압축강도 증가분을 표현한 것이다.

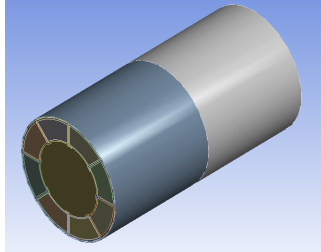


Fig. 5 Finite element model of HCFFT[4].

Table 3 Comparison of the results for HCFFT

Compressive strength of concrete	Thickness of FRP (mm)	Average strength (MPa)		
		Experiment	Eq. (2)	FEM
30 MPa	2.8	51.40	49.95	47.06
	4.2	69.25	58.56	62.64
	5.6	67.86	67.16	58.25

$$\frac{f_{cc}}{f_{co}} = 1.00 + 3.89 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (1)$$

여기서,  $f_{cc}$  = 구속된 콘크리트의 압축강도

$f_{co}$  = 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도

$f_l$  = 구속압 ( $f_l = \frac{2f_p \cdot t}{d}$ , Fig. 4 참조)

$$P_{HCFFT} = f_{cc} A_{co} + 1.103 f_p A_p \quad (2)$$

여기서,  $P_{HCFFT}$  = HCFFT의 최대압축하중

$A_{co}$  = 구속된 콘크리트의 단면적

$f_p$  = PFRP의 파괴응력

$A_p$  = PFRP의 단면적

## 2.4 유한요소해석

이 연구에서는 HCFFT의 압축실험결과를 유한요소법에 의해 추정할 수 있는지 조사하기 위하여 범용 유한요소해석 프로그램인 ANSYS WORKBENCH Ver. 11.0[7]을 사용하여 구조해석을 하였다. 유한요소해석은 실험과 동일한 부재 치수와 콘크리트 압축강도, FFRP의 두께를 사용하였고, 재료의 역학적 성질은 시험을 통해 얻은 결과를 적용하였다. 경계조건은 해석모델의 하부의 면을 모두 고정단으로 하였으며, 하중은 실험에서 나타난 최대하중을 해석모델의 상부에 가력판을 생성하여 가력판 상부면에 재하하였다. Fig. 5에 HCFFT의 해석모델을 나타내었다.

해석결과로써 경계조건과 하중재하에 의한 양측부의 응력집중의 영향을 벗어난 중앙부에서 응력을 구하였다. 실험의 압축강도와 최대하중 추정식을 이용하여 얻은 압축강도 및 해석을 통하여 구해진 중앙부의 응력의 평균을 비교하여 Table 3에 나타내었다.

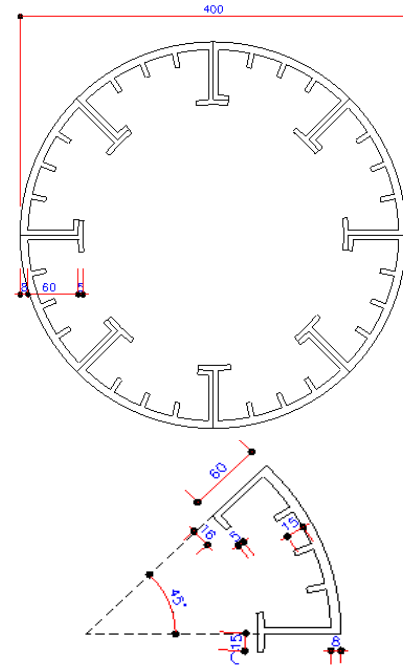


Fig. 6 Cross-section of new HCFFT.

유한요소해석 결과는 실험과 유사한 값을 보였으며, 콘크리트 설계기준압축강도가 작을수록, FFRP의 두께가 작을수록 오차가 작게 나타났다. 이것은 해석에서는 콘크리트와 PFRP, 필라멘트와인딩 FRP(FFRP)와 PFRP의 접합이 완벽하다고 가정되어 일체거동을 하지만 실제로는 콘크리트 파괴 이후 완벽하지 못한 접합을 가지게 되는 부분의 영향이 있을 수 있다고 판단된다. 최대하중 추정식으로 구해진 하중을 단면적으로 나누어준 결과(Eq. (2))는 유한요소해석의 결과 및 실험결과와는 다르게 FFRP의 두께에 따른 압축강도가 선형거동을 보이고 있었다. 이것은 설계식으로 사용하기 위하여 간단한 수식으로 회귀분석을 하였기 때문인 것으로 생각된다. 그러나 설계식과 유한요소해석 모두 설계에 적용할 수 있는 수준의 오차를 보이고 있으며, 실험값에 비하여 안전측으로 확인되었다. 이 결과로 보아 추정식과 유한요소해석을 이용할 경우, 예비적인 설계(Preliminary design)가 가능할 것으로 판단된다.

## 3. 제작성을 개선한 HCFFT의 압축거동

### 3.1 제작성을 개선한 HCFFT의 개요

HCFFT에서 PFRP를 도입한 목적은 CFFT의 휨에 대한 보강이었으나, 콘크리트에 비하여 상대적으로 높은 강도와 강성을 지닌 PFRP로 인하여 압축강도가 증가함을 실험을 통하여 확인하였다.

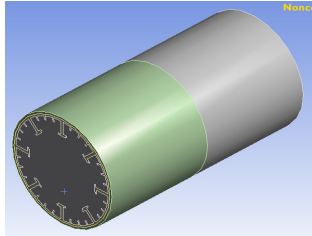


Fig. 7 Finite element model of new HCFFT.

Table 4 Comparison of strength

	New HCFFT ( $\phi 400$ )	PHC pile ( $\phi 400$ , 65t)	Steel pipe pile ( $\phi 400$ , 9t)
Axial load (kN)	9,141	1,120	1,100
Average strength (MPa)	67.18	16.38	99.55

그러나 기존 HCFFT를 구성하는 재료 중에서 폐합된 PFRP 단면의 형태로 인하여 콘크리트 타설에 어려움이 있었다. 이와 함께 폐합된 PFRP 단면은 건조수축에 의하여 콘크리트가 수축이 발생할 경우 각각의 콘크리트 단면이 개별로 거동하게 되어 문제가 될 수 있다. 또한, 전체단면에 비하여 폐합된 단면의 크기가 상대적으로 작아 콘크리트를 구성하는 재료 중 굵은골재의 최대치수를 제한하게 된다. 일반적으로 굵은골재의 최대치수가 클수록 소요의 품질의 콘크리트를 얻기 위한 단위수량 및 단위시멘트량이 감소하게 되며, 단위수량의 감소는 건조수축의 감소로 이어지고, 이는 단위시멘트량을 감소시켜 품질향상과 경제성 확보에 도움이 된다. 따라서 새로운 HCFFT의 단면을 제안하였다. 새로 제안된 단면은 기존 HCFFT에서 PFRP의 단면만을 변화시켰으며, 기존의 PFRP 단면의 장점인 단위모듈 형태를 유지하면서도 개단면이 되도록 계획하였다. 이때 폐단면일 경우와 동일한 구속압을 가질 수 있도록 PFRP의 형태를 결정하였다. 이 결과 결정된 PFRP 단면형상을 Fig. 6에 나타내었다.

이렇게 결정된 제작성을 개선한 HCFFT는 기존의 HCFFT와 동일한 조건에서 비교하였을 경우에 큰 압축성능을 가지지는 않지만, 위에서 설명한 제작성의 개선을 통하여 HCFFT 압축부재의 기본적인 압축강도를 부담하는 콘크리트의 품질관리에 도움을 줄 수 있어 품질의 균일성을 향상시킬 수 있다.

### 3.2 제작성을 개선한 HCFFT의 압축강도

기존 HCFFT의 실험과 유한요소해석이 대체로 일치하는 거동을 보임에 따라 제작성을 개선한 HCFFT의 압축강도를 추정하기 위하여 유한요소해석을 수행하였으며, 기존 HCFFT와 동일하게 ANSYS WORKBENCH Ver.11.0[7]을 사용하였다. 실험체의 치수는  $\phi 400 \times 800$ 으로 모델링하였고 FFRP의 두께는 4.2mm, 콘크리트의 설계기준압축강도는 30MPa를 사용하였다. 재료의 역학적 성질은 실험을 통해 얻은 결과를 동일하게 적용하였다. 경계조건은 해석모델 하부의 면을 모두 고정지점

으로 하였으며, 하중은 식 (2)의 추정식을 통하여 얻은 하중인 9,144kN을 사용하였다. 제작성을 개선한 HCFFT 해석모델을 Fig. 7에 나타내었고, 해석결과를 일반적으로 가장 많이 사용되는  $\phi 400$  직경을 가지는 PHC 말뚝(Pretensioned spun high strength concrete pile)과  $\phi 400$  직경을 가지는 강관말뚝(Steel pipe pile)의 표준 압축성능[8]과 비교하여 Table 4에 나타내었다. 비교한 결과 HCFFT 말뚝의 성능은 기존에 사용되는 말뚝에 비하여 매우 높은 것을 알 수 있었다. 건설현장에서 특히 경쟁력이 있는 PHC 말뚝에 비해 월등한 압축강도를 가지고 있으므로 새롭게 제안한 HCFFT 말뚝이 비교우위에 있게 되고, 따라서 현장적용에 있어서 장점이 될 것으로 생각된다.

## 4. 결 론

이 연구는 FFRP로 외부를 보강한 CFFT에 PFRP를 이용하여 휨보강을 실시한 HCFFT의 개발에 대한 연구의 일부로서, 많은 연구가 진행된 CFFT와 초기에 개발된 HCFFT의 압축성능에 대한 실험적 연구를 진행하였으며, HCFFT에 적용할 수 있는 압축하중 추정식을 제안하였다. 또한 이전의 HCFFT의 제작성을 개선한 HCFFT를 제안하고 압축성능을 평가하였다. 이러한 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) HCFFT와 CFFT 말뚝에 대해 압축강도실험을 실시하였으며, HCFFT는 동일한 두께의 FFRP를 이용한 CFFT에 비하여 11~47%의 압축강도 증가 효과를 확인하였고, HCFFT의 압축하중 추정식을 제안하였다.
- 2) 실험과 동일한 조건에서 HCFFT에 대한 유한요소해석을 실시하여 실험, 제안식, 해석 결과를 비교한 결과 비교적 잘 일치함을 확인하여 제안식의 타당성과 유한요소 해석을 통한 강도 추정이 가능함을 확인하였다.
- 3) PFRP 부재의 형태를 변경하여 제작성을 개선한 새로운 단면의 HCFFT를 제안하였으며, 실험을 통하여 제안된 압축하중 추정식을 사용하여 압축하중을 구하였으며, 유한요소해석을 실시하여 단면내의 평균응력을 구하였다. 그리고 그 결과를 동일한 직경을 가지는 PHC 말뚝 및 강관말뚝의 압축하중과 비교하여 압축성능이 우수함을 확인하였다.

이 연구에서 제안한 HCFFT 말뚝은 구속효과에 따른 뛰어난 강도를 가지며, 외부를 FRP로 감싸 기존의 강재 혹은 콘크리트 재료에 비하여 뛰어난 내구성을 가지는데 비하여 높은 재료비 때문에 경제성이 낮은 단점을 지니고 있다. 그러나 뛰어난 성능으로 인한 말뚝의 수량 감소와 공사기간의 단축 등의 공사비 절감요인이 있으며, 이러한 요인을 종합적으로 분석하여 적용 가능성을 판단해야한다. 또한 내화화성이 강한 FRP의 장점을 살려 해양구조물이나 염해환경에 적

용한다면 기존의 기성 말뚝과의 경쟁이 가능할 것으로 판단된다. 개선된 HCFFT의 압축과 휨에 대한 실험적 연구와 경제성에 대한 분석 등의 연구는 향후 추가적으로 진행될 예정이며, 이러한 연구결과를 통하여 복합재의 토목구조물에 대한 적용이 점차 증가할 수 있을 것으로 기대된다.

## 후 기

이 연구는 2010년도 홍익대학교 학술연구진흥비와 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업(10CCTI-C053 530-02-000000)의 연구비 일부의 지원에 의해 수행된 것으로, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) Lee, Y.G., Shin, K.Y., Joo, H.J., Nam, J.H., and Yoon, S.J., "Structural Behavior of Bolted Lap-Joint Connection in the Pultruded FRP Structural Members," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 23, No. 1, 2010, pp. 37-43.
- 2) Joo, H.J., Lee, S., Lee, J.S., and Yoon, S.J., "Design of Pultruded I-shape FRP Compression Member," *Journal of the Korean Society for Composite Materials*, Vol. 25, No. 2, 2012, pp. 46-53.
- 3) Mun, B.H., Choi, J.W., Park, J.S., and Yoon, S.J., "Compression Behavior of Hybrid FRP-Concrete Composite Members," *Proceedings of the Korean Society for Composite Materials*, Changwon, Korea, May, 2011, pp. 39-40.
- 4) Lee, Y.G., Choi, J.W., Park, J.S., and Yoon, S.J., "Compression Strength Test of FRP Reinforced Concrete Composite Pile," *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, Vol. 2, No. 4, 2011, pp. 19-27.
- 5) Park, J.S., Lee, S., Nam, J.H., Kang, I.K., An, D.J., and Yoon, S.J., "Load Carrying Capacity of Hybrid FRP-Concrete Composite Pile," *Advanced Material Research*, Vol. 250-253, No. 2, 2011, pp. 1165-1172.
- 6) Choi, J.W., Joo, H.J., Kang, I.K., and Yoon, S.J., "Design of Hybrid FRP-Concrete Circular Members under Compression and Flexure," *Proceeding of the 2nd International Conference on Advanced Polymer Matrix Composites (COMPO2012)*, Harbin, China, July, 2012.
- 7) SAS IP, Inc., Release 11.0 Documentation for ANSYS Workbench, SAS IP, Inc., Pennsylvania, USA, 2007.
- 8) Eo, Y.W., *The Behavior of Earth Retaining and Retention Wall Using PHC*, Master's Thesis, Chungang University, Korea, 2005.