FRP 콘크리트 합성말뚝의 압축강도에 대한 실험적 연구

An Experimental Study for the Compression Strength of Hybrid CFFT Pile

최진우 Choi, Jin-Woo* · 박준석 Park, Joon-Seok* · 남정훈 Nam, Jung-Hoon** · 안동준 An, Dong-Jun*** · 강인규 Kang, In-Kyu**** · 윤순종 Yoon, Soon-Jong*****

(Received February 4, 2011; Revised February 10, 2011 ; Accepted March 21, 2011)

ABSTRACT

In this paper, we present the results of on experimental investigations pertaining to the structural behavior of new type of concrete filled fiber reinforced plastic circular tubes (i.e., hybrid CFFT, HCFFT) which are suggested in order to mitigate the problems associated with the concrete filled steel-concrete composite tube (CFT) and the concrete filled fiber reinforced plastic tube (CFFT). It is found that when the HCFFT is used in the construction of pile foundation the HCFFT pile can transfer axial as well as flexural loads from the superstructure to the underground effectively in comparison with CFT and CFFT piles.

요 지

이 논문에서는, CFT 강재-콘크리트 합성말뚝과 FRP를 원주방향으로 보강한 FRP-콘크리트 합성말뚝 (CFFT)과 관련하여 발생하는 문제점들을 완하시키기 위해 새롭게 제안된 콘크리트 채움 원형 FRP 말뚝 (HCFFT)의 구조적 거동에 대한 실험적 연구결과를 발표하였다. 연구를 통해 기존의 CFT와 CFFT 말뚝과 비교하여 새로 제안한 HCFFT 말뚝이 말뚝 기초의 시공에서 축하중과 휨모멘트를 포함하는 상부하중을 지반에 효과적으로 전달할 수 있음을 알 수 있었다.

Key Words: hybrid CFFT pile(FRP-콘크리트 합성말뚝), pultruded FRP(펄트루전 FRP), filament winding FRP(필라멘트 와인딩 FRP), tensile test(인장시험)

1. 서 론

FRP-콘크리트 합성말뚝(concrete filled FRP tube pile, CFFT pile)은 외부에 FRP를 사용하여 제작하고 그 내부를 콘크리트로 충전한 합성부재이다. CFFT는 강재-콘크리트 합성말뚝(concrete filled steel tube pile, CFT pile)에 비하여 부식에 대한 저항성이 높기 때문에 연약지반에 시공되는 구조물이나 해양 또는 수중구조물에 대한 적용성이 높아 그에 대한 관심이 증가하고 있다.

그러나 CFFT 말뚝은 보강섬유가 원주방향으로 배치된 필라멘트와인딩 FRP를 사용하기 때문에 구속효과에 의한 압축강도의 향상을 기대할 수 있으나 휨모멘트 및 전단력에 대하여 취약하다. 따라서 단부에 작용하는 횡하중 및 압축하중의 편심작용으로 인한 휨모멘트 저항하기 위하여 철근 등 별도의 휨보강재를 필요로 한다.

이 연구에서는 축방향 및 원주방향으로 보강섬유가 배치될 수 있도록 모듈화된 펄트루전 FRP(pultruded FRP, PFRP)를 제작하고 그 부재의 외부에 필라멘트 와인딩 FRP(filament winding FRP, FFRP)로 보강하는 복합재 이중구조로서 압축, 휨, 전단에 대하여 뛰어난 성능을 확보한 새로운 형식의 FRP-콘크리트 합성말뚝 (Hybrid CFFT, HCFFT)을 제안하였다. 즉, HCFFT는 심부콘크리트와 콘크리트에 작용하는 압축력에 의한 구속압력으로 압축강도를 증가시켜주는 역할을 하는 FFRP와 편심하중이 재하되었을 때 휨 및 전단 거동에 저항하는 PFRP로 구성된다. 또한, HCFFT의 압축강도를 평가하기 위해 CFFT와 HCFFT에 대한 실험을 실시하여 그 결과를 비교분석하였다. HCFFT는 말뚝뿐만 아니라 교각 등의 휨과 압축력을 동시에 받는 부재에 다양하게 적용할 수 있을 것으로 생각된다. Fig. 1은 이 연구에서 제안한 HCFFT를 제작하기 위한 FFRP-PFRP 합성부재를 나타낸 것이다.

* 학생회원· 홍익대학교 토목공학과 박사과정
** 학생회원· 홍익대학교 토목공학과 공학박사
*** 정회원· 우주엔지니어링 대표이사, 공학석사
**** 정회원· 브니엘컨설턴트 대표이사, 공학박사
*****† 정회원· 홍익대학교 토목공학과 교수, 교신저자(sjyoon@hongik.ac.kr)

Fig. 1 FFRP-PFRP 합성부재

2. HCFFT의 구성 및 특징

이 연구에서는 길이에 제한이 없이 연속생산이 가능하며 부재의 축방향으로 보강섬유가 배치되는 PFRP를 도입하여 CFFT의 장점을 그대로 유지하는 반면 휨 및 전단에 대해서도 충분한 구조성능을 확보할 수 있는 HCFFT를 제안하였다. 즉, 여러 개의 PFRP 단면을 결합했을 때 원통형태의 단면을 구성할 수 있도록 제작하고 외부를 FFRP로 보강하게 되면 휨 및 전단에 대해서는 PFRP부재가 저항하고 FFRP는 콘크리트를 구속하여 축방향 성능을 향상시킬 수 있게 된다. HCFFT의 제작 순서는 펄트루전공정에 의해 FRP 단면(모듈)을 생산한 후 각 모듈을 접합하고 원주방향으로 필라멘트와인딩 FRP로 보강하여 FRP 부재를 공장제작하고 현장에서 운반하여 콘크리트를 타설 및 양생하는 순서로 이루어진다. 이 연구에서 제안한 HCFFT의 단면형상과 FRP 부재의 제작공정은 Fig. 2~3에 각각 나타내었다.

Fig. 2 HCFFT의 단면형상

(a) 펄트루전공정 (b) 필라멘트와인딩공정

Fig. 3 FRP 부재의 제작공정

HCFFT의 단면은 소구경과 대구경으로 구분되는데 소구경일 경우 PFRP를 일체로 제작하게 되며, 대구경일 경우는 펄트루전 제조공정상 대형 단면의 제작이 어려워 단위모듈화시켜 PFRP를 제작한 후 서로 연결하여 원통형태로 제작한 후 FFRP로 외부를 보강한다. 또한, 다른 건설재료와 마찬가지로 PFRP는 단면이 커질수록 역학적 성질이 감소되는 경향이 있기 때문에 일정한 품질을 확보하기 위해 소규모 단면을 접합시켜 부재를 구성하는 방법을 채택하였다.

이 연구에서 제안한 HCFFT의 부재 길이방향 연결 방법의 개요는 Fig. 4에 나타낸 것과 같다. Fig. 4에 나타낸 방법은 PFRP를 연결재로 직접 이용하는 방법과 PFRP의 중공단면을 이용하는 방법으로 분류되며, 부착과 연결재에 의한 기계적 접합으로 구조적 신뢰성을 확보할 수 있다.

Fig. 4 HCFFT의 연결방법

FRP의 역학적 성질은 보강섬유의 종류, 보강량, 보강방향에 따라 큰 차이를 나타내기 때문에 Fig. 4에 나타낸 HCFFT는 동일 단면 크기에 대하여 지중매설깊이 등의 외부 조건에 대한 하중 조건의 변화에 맞는 부재 설계가 가능하다.

3. HCFFT의 제작 방법

이 연구에서 개발하고자 하는 HCFFT 제작에 사용하는 FRP는 FFRP와 PFRP이며, 제작된 PFRP 모듈을 접합맨드렐을 완성한 후 그 위에 필라멘트와인딩 공정을 진행하게 된다. 각 FRP의 시편제작과정을 Fig. 5~6에 나타내었다.

(a) 보강섬유 보급

(b) 성형, 경화 공정

(c) 보강섬유 함침

(d) 절단, 이송

(e) 완성제품

Fig. 5 PFRP 시편제작

(a) 몰드(mold) 준비

(b) 몰드 표면 이형제코팅

(c) 와인딩기에 몰드 장착

(d) 수지층 형성 작업

(e) 왕복 와인딩 작업

(f) 수지 탈수 작업

(g) 표면 고르기 작업

(h) 건조 후 탈형된 모습

Fig. 6 FFRP 시편제작

4. HCFFT의 역학적 성질

HCFFT의 압축강도실험을 실시하기 전에 압축강도를 추정하기 위해 필요한 재료의 역학적 성질을 조사하기 위한 실험을 부재를 구성하는 FFRP와 PFRP에 대하여 수행하였다.

4.1 FFRP 인장강도실험

FFRP 인장강도실험에 사용한 시편은 각각 직경이 150mm, 300mm이고 FFRP 층을 4, 6, 8 겹(ply)으로 적층한 6종류의 원통관에서 5개씩 시편을 채취하여 제작하였다.

각 시편의 중앙부분에 길이방향과 길이 직각방향으로 변형률게이지를 부착하였으며, UTM (Universal Testing Machine)을 이용하여 하중을 재하하였다. 하중은 변위제어방식으로 3mm/min의 속도로 재하하였으며, 변형률게이지로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. 인장시편의 형태 및 실험방법은 Fig. 7에 나타낸 것과 같다.

인장강도실험결과 모든 시편은 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 섬유배치방향으로 취성파괴되었다. 실험결과 평균은 Table 1에 정리하였다. Table 1에서 2.8, 4.2, 5.6은 시편의 두께를 의미한다, 또한, 직경 150mm, 300mm에서 채취한 시편 중 대표적인 응력-변형률 관계 그래프를 Fig. 9에 나타내었다. FFRP의 길이방향 탄성계수는 ASTM D 3039/D 3039M-08에서 제안하고 있는 방법을 적용하여 변형률 1,000 $\mu\epsilon$ ~3,000 $\mu\epsilon$ 구간을 채택하여 그 부분 곡선의 기울기를 구해 결정하였다. 또한, 포아송 비는 변형률 3,000 $\mu\epsilon$ 에서의 길이방향과 길이직각방향의 변형률로 결정하였다.

(a) 인장시편

(b) 인장강도실험

Fig. 7 FFRP 인장시편과 실험과정

Fig. 8 FFRP 인장시편의 파괴형태

Table 1 인장강도실험결과

시편종류	인장강도 (f_{Lmax}, MPa)	인장 탄성계수 (E_x, GPa)	포아송 비 (ν_{xy})
150-2.8	67.53	11.48	0.36
150-4.2	63.11	11.16	0.36
150-5.6	55.60	9.47	0.35
300-2.8	63.23	9.88	0.35
300-4.2	56.27	8.77	0.36
300-5.6	50.19	9.07	0.39
평균	59.32	9.97	0.36

(a) 직경 150mm (150-4.2)

(b) 직경 300mm (300-4.2)

Fig. 9 응력-변형률 관계

4.2 FFRP의 Split Disk 시험

원주방향의 강도와 탄성계수를 구하기 위해 Split Disk 시험을 수행하였다. Split Disk 시험은 기존의 연구(박, 2006)를 참고로 하여 수행하였으며 시편은 각각 직경이 150mm, 300mm이고 FFRP 층을 4, 6, 8겹(ply)으로 적층한 6종류의 원통관에서 5개씩 시편을 채취하여 제작하였다.

각 시편은 원환의 대각선부분에 원주방향과 원주 직각방향으로 변형률게이지를 부착하였고, UTM을 사용하여 하중을 재하하였다. 또한 원형시편에 하중을 재

하하기 위해 필요한 강재지그를 Fig. 10과 같이 시편의 직경에 따라 2가지로 제작하였다. 강재지그는 인장력을 충분하게 발휘할 수 있도록 시편의 곡률과 같도록 제작하였다.

(a) 직경 150mm용

(b) 직경 300mm 용

Fig. 10 Split Disk 시험용 강재지그

하중은 변위제어방식으로 3mm/min의 속도로 재하하였으며, 변형률게이지로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. Split Disk 시험의 시편형태 및 실험방법은 Fig. 11에 나타내었다.

Split Disk 시험 결과 모든 시편은 Fig. 12와 같이 취성과파괴되었으며, 실험결과와 평균을 Table 2에 정리하였다. 또한 직경 150mm, 300mm에서 채취한 시편 중 대표적인 응력-변형률 관계 그래프를 Fig. 13에 나타내었다. FFRP의 길이직각방향 탄성계수는 ASTM D 3039/D 3039M-08에서 제안하고 있는 방법을 적용하여 변형률 1,000 $\mu\epsilon$ ~3,000 $\mu\epsilon$ 구간을 채택하여 그 부분 곡선의 기울기를 구해 결정하였다.

(a) Split Disk 시험 시편

(b) Split Disk 시험

Fig. 11 Split Disk 시험의 시편과 실험과정

Fig. 12 Split Disk 시험 시편의 파괴형태

Table 2 Split Disk 시험 결과의 평균

시편종류	원주방향 최대강도 (f_{Tmax} , MPa)	원주방향 탄성계수 (E_T , GPa)
150-2.8	320.01	21.87
150-4.2	347.13	24.00
150-5.6	335.09	23.46
300-2.8	269.18	22.44
300-4.2	306.63	22.56
300-5.6	302.48	21.75
평균	313.42	22.68

(a) 직경 150mm (150-4.2)

(b) 직경 300mm (300-4.2)

Fig. 13 Split Disk 시험의 응력-변형률 관계

4.3 FRP 원통관 압축실험

FRP 원통관 압축실험은 Fig. 14에 나타난 바와 같이 직경 150mm 길이 300mm, 직경 300mm 길이 600mm인 두 종류의 원통관에 대하여 실시하였다. 시편은 직경별로 4, 6, 8 겹(ply)로 적층하였으며, 총 6종류의 시편을 3개씩 준비하여 실험을 실시하였다.

(a) 직경 150mm 시편 (b) 직경 300mm 시편

Fig. 14 FRP 원통관 압축실험 시편

각 시편은 중앙부분에 길이방향과 길이 직각방향으로 변형률게이지를 부착하고 50mm의 용량을 가지고 있는 변위계(LVDT, Linear Variable Differential Transformer)를 설치하여 길이방향 압축변위를 측정하였으며, 변형률게이지와 LVDT로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. FRP 원통관 압축실험과정은 Fig. 15에 나타내었다.

실험결과 모든 시편은 Fig. 16에 나타난 바와 같이 섬유배치방향으로 취성파괴되었다. 실험결과는 Table 3에 정리하였으며, 시편 중 대표적인 하중-변위, 하중-변형률 관계를 Fig. 17~18에 나타내었다.

(a) 직경 150mm 시편 (b) 직경 300mm 시편

Fig. 15 FRP 원통관 압축실험과정

Fig. 16 FRP 원통관 시편의 파괴형태

Table 3 FRP 원통관 실험결과와 평균

시편종류	최대하중 (P_{fmax} , kN)	최대변위 (δ_{fLmax} , mm)
150-2.8	154.11	6.14
150-4.2	302.43	8.21
150-5.6	419.71	9.83
300-2.8	252.92	6.27
300-4.2	507.36	6.18
300-5.6	647.11	8.95

(a) 직경 150mm 시편 (150-2.8)

(b) 직경 300mm 시편 (300-4.2)

Fig. 17 FFRP 원통관의 하중-변위 관계

(a) 직경 150mm 시편 (150-4.2)

(b) 직경 300mm 시편 (300-4.2)

Fig. 18 FFRP 원통관의 하중-변형률 관계

4.4 PFRP 인장강도실험

PFRP 부재의 단면은 Fig. 2에 나타난 것과 같이 단면을 구성하는 판요소들의 두께가 다르기 때문에, PFRP 인장실험의 시편은 PFRP 부재 단면의 내측(I), 외측(O), 격벽(S)로 구분하여 각각 5개씩 채취하여 제작하였다.

각 시편의 중앙부분에 길이방향과 길이 직각방향으로 변형률게이지를 부착하였으며, UTM (Universal Testing Machine)을 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. 인장실험방법은 Fig. 19에 나타난 것과 같다.

인장강도실험결과 모든 시편은 Fig. 20에 나타난 바와 같이 섬유배치방향으로 취성파괴되었다. 실험결과와 평균은 Table 4에 정리하였으며, 부재 단면의 내측, 외측, 격벽에서 채취한 시편 중 대표적인 응력-변형률 관계 그래프를 Fig. 21에 나타내었다. PFRP의 길이방향 탄성계수는 ASTM D 3039/D 3039M-08에서 제안하고 있는 방법을 적용하여 변형률 $1,000\mu\epsilon \sim 3,000\mu\epsilon$ 구간에서의 기울기를 채택하여 결정하였다. 또한, 포아송 비는 변형률 $3,000\mu\epsilon$ 에서의 길이방향과 길이직각방향의 변형률로 결정하였다.

Fig. 19 PFRP 인장실험과정

Fig. 20 PFRP 인장시편의 파괴형태

Table 4 인장강도실험결과의 평균

시편 종류	인장강도 ($f_{\max}$, MPa)	인장 탄성계수 (E_{11} , GPa)	포아송 비 (ν_{12})
I	260.10	22.44	0.45
O	214.23	27.93	0.31
S	387.42	31.43	0.35
평균	287.25	27.27	0.37

(a) 내측(I-1)

(b) 외측(O-3)

(c) 각벽(S-3)

Fig. 21 응력-변형률 곡선

4.5 콘크리트 압축강도시험

HCFFT 압축강도시험은 설계기준강도가 30MPa인 콘크리트를 사용하였기 때문에 시편제작에 사용된 콘크리트는 공시체를 제작하여 압축강도시험을 실시하였다. 압축강도시험은 KS F 2405(콘크리트 압축 강도 시험방법)을 참고로 하여 수행하였으며 압축강도 공시체는 $\phi 150 \times 300 \text{ mm}$ 의 크기로 제작하였고 7일, 14일, 28일 강도에 대하여 5개씩 실시하였다.

각 공시체는 100mm의 용량을 가지고 있는 LVDT를 설치하여 길이방향 압축변위를 측정하였으며, LVDT로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통

하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. 콘크리트 압축강도시험과정은 Fig. 22(a)에 나타내었다.

실험결과 모든 공시체는 Fig. 22(b)에 나타난 것과 같이 취성과괴되었으며 실험결과는 최대값과 최소값을 제외한 결과를 분석하여 Table 5에 정리하였다. 또한, 실험결과에 대한 하중-변위 관계를 Fig. 23에 나타내었다.

(a) 실험과정

(b) 파괴형태

Fig. 22 콘크리트 압축강도시험

Table 5 콘크리트 압축강도시험결과

양생일수 (day)	시편번호	$P_{\max}$ (kN)	$P_{\max,ave}$ (kN)
7	7-1	516.02	521.85 (29.53 MPa)
	7-1	503.13	
	7-3	454.26	
	7-4	555.01	
	7-5	546.39	
14	14-1	569.33	567.69 (32.12 MPa)
	14-2	581.63	
	14-3	587.12	
	14-4	337.74	
	14-5	552.12	
28	28-1	635.04	610.21 (34.53 MPa)
	28-2	652.10	
	28-3	523.94	
	28-4	614.38	
	28-5	581.21

(a) 7일 강도

(b) 14일 강도

(c) 28일 강도

Fig. 23 하중-변위 곡선

5. HCFFT 압축강도실험

이 연구에서는 HCFFT의 압축강도를 기존의 CFFT와 비교하기 위하여 압축강도실험을 실시하였다. HCFFT 압축강도실험 시편은 $\phi 300 \times 600$ 의 크기로 제작되었으며 사용된 콘크리트의 설계기준 압축강도는 30MPa 이고 두께가 2.8, 4.2, 5.6mm(4, 6, 8ply)인 FFRP를 사용한 CFFT와 HCFFT를 각각 3개, 5개씩 제작하였다.

HCFFT 압축강도실험은 $30,000\text{kN}$ 용량의 UTM을 이용하여 하중을 재하하였으며, 하중은 하중제어방식으로 300kN/min 의 속도로 재하하였다. 또한, LVDT와 변형률게이지를 설치하여 변위와 변형률을 측정하였고, LVDT와 변형률게이지로부터 측정되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)를 통하여 컴퓨터에 자동으로 전달, 기록, 저장되도록 하였다. 압축강도실험에 사용된 UTM과 실험과정은 Fig. 24에 나타난 것과 같다.

압축강도실험 결과 시편의 파괴는 심부의 콘크리트가 파괴된 후 구속압에 의한 추가적인 강도 증가를 보

인 후 FFRP가 섬유배치방향으로 파괴되는 순으로 진행되었다. 또한, HCFFT는 CFFT에 비하여 약 11~47%의 압축강도 증가를 보이는 것으로 나타났다. CFFT와 HCFFT의 파괴형태는 Fig. 25에 나타내었으며, 시편의 파괴강도는 Table 6에 정리하였다. Table 6에 나타낸 HCFFT의 평균은 최대값과 최소값을 제외한 결과를 대상으로 얻은 결과이다. 또한, 실험결과에 대한 하중-변위, 응력-변형률 관계 중 대표적인 그래프를 Fig. 26~27에 나타내었다.

(a) UTM

(b) 실험과정

Fig. 24 HCFFT 압축강도실험

Fig. 25 압축강도실험 시편의 파괴형상

Table 6 CFFT 및 HCFFT 압축강도실험 결과

FRP 두께 (mm)	시편번호	CFFT 강도 (MPa)	HCFFT 강도 (MPa)
2.8	1	34.90	51.14
	2	31.89	51.14
	3	39.08	53.83
	4	-	50.58
	5	-	51.92
	평균	39.08	51.40
4.2	1	52.99	69.67
	2	38.08	69.04
	3	50.28	69.04
	4	-	70.31
	5	-	68.47
	평균	47.12	69.25
5.6	1	61.95	69.11
	2	62.66	67.06
	3	58.59	70.95
	4	-	67.41
	5	-	60.97
	평균	61.07	67.86

Fig. 26 하중-변위 관계

Fig. 27 응력-변형률 관계

6. 결 론

이 연구에서는 기존의 CFFT 말뚝의 휨 및 전단 거동에 대한 취약점을 보완하기 위한 새로운 형식의 HCFFT 말뚝을 제안하였고, HCFFT 말뚝에 사용될 FRP와 PFRP에 대한 다양한 실험을 실시하여 재료의 역학적 성질을 조사하였으며, HCFFT와 기존의 CFFT의 압축강도를 비교하였다.

HCFFT 압축강도실험 결과는 HCFFT는 기존의 CFFT보다 약 11~47%의 압축강도 증가를 보였으며, 이는 말뚝 표면의 FRP에 추가적으로 내부에 PFRP를 보강하였기 때문에 추가적인 압축강도 증가가 있는 것으로 생각된다.

현재 휨강도실험을 실시하여 HCFFT의 구조적 거동 특성을 파악할 수 있도록 연구를 진행하고 있으며, 이 논문에서 제시한 실험결과와 휨강도 실험결과를 함께 분석하여 종합적인 하중재하성능을 조사할 예정이다.

감사의 글

이 연구는 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 박종화 (2010) PSC 박스거더교 적용을 위한 FRP 스트럿의 압축거동 평가, 박사학위논문, 한양대학교.
- 박준석 (2006) 콘크리트 충전 FRP Tube 합성부재의 압축강도 추정에 관한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교.
- 신광열 (2010) 하이브리드 FRP-콘크리트 합성말뚝의 하중재하능력 평가, 박사학위논문, 홍익대학교.
- 최진우, 주형중, 남정훈, 윤순중 (2010) FRP-콘크리트 합성말뚝의 개발, 한국복합신소재구조학회 논문집

- 집, Vol. 1, No. 2, pp.20-28.
5. ASTM D 3039/D 3039M-08 (2008) Standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials, *American Society for Testing and Materials*.
 6. KS F 2405 (2010) 콘크리트 압축강도시험방법.
 7. Park, J. S., Joo, H. J., Park, J. H., Choi, E. S., and Yoon, S. J. (2010) Flexural Behavior of FRP-Reinforced Concrete Composite Member, *The First International Conference on Advances in Interaction and Multiscale Mechanics (AIMM'10)*, Jeju, Korea.