

## 탄소섬유쉬트로 보강된 각형 CFT기둥의 실험 및 설계식

박재우<sup>1\*</sup>, 정성훈<sup>2</sup>

<sup>1</sup>서울시립대학교 건축공학과, <sup>2</sup>인덕대학 건축과

### The Experiment and Design Formula of Rectangular CFT Columns Reinforced by Carbon Fiber Sheets

Jai-Woo Park<sup>1\*</sup> and Sung-Hun Chung<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Department of Architectural Engineering, University of Seoul

<sup>2</sup>Department of Architecture, Induk University

**요약** 본 연구에서는 FRP 보강된 각형 CFT기둥의 중심축하중 실험과 이력거동실험을 수행하였다. 실험변수는 중심축하중 실험에서는 폭두께비, FRP보강겹수이며, 이력실험에서는 콘크리트 강도와 FRP 보강겹수이다. 실험체의 내력과 연성능력을 정리하였고, FRP로 보강된 각형 CFT기둥의 압축내력 설계식을 제안한다.

**Abstract** Axial load tests and cyclic load tests for FRP reinforced rectangular CFT columns were carried out. The main parameters were width-thickness ratio of a steel tube and FRP layer numbers for the axial load tests and were concrete strength and FRP layer numbers for cyclic load tests. The maximum strength and ductility capacity were compared between the current CFT columns and the FRP reinforced CFT columns. Finally, the axial design formulas were presented for the FRP reinforced CFT columns.

**Key Words** : Concrete filled steel tube, CFT, Composite column, FRP, Repair and reinforcement

### 1. 서론

1984년 Swiss Federal Laboratory for Material Testing and Research에서 콘크리트 구조물에 대한 FRP(Fiber Reinforced Polymer) 보강법이 처음으로 소개된 이후로 FRP는 콘크리트 구조물의 보수보강재로 널리 사용되고 있다. FRP는 철판보다 경량재이면서 인장강도가 철판보다 약 8-10배 정도 높기 구조성능에서 뛰어나며, 또한 현장에서는 에폭시수지에 함침 후 구조물에 부착하기만 해서 시공성 또한 우수하다. 또한 기본재질은 섬유플라스틱 재질이므로 강판의 단점인 부식에 대한 염려가 없다. FRP는 콘크리트구조물의 보수보강재로는 널리 쓰이고 있지만 강구조물에 보수보강재로 적용한 사례는 드물다. 일반적으로 강구조물에는 강판보강법이 주로 쓰이고 있으나, 강판보강법은 볼트구멍 생성시 모재를 손상시키고 보-기둥 연결부위 및 접합부 보강시 볼트 및 용접부 등의

요철로 시공이 까다롭다. 이러한 단점 때문에 최근 해외에서는 강구조물의 FRP 보강에 대한 연구가 진행되고 실제 시공된 사례도 있지만 국내에서는 이에 대한 연구는 초기단계 상태이다(박재우 2008). 해외연구 및 사례를 살펴보면 런던 Action Bridge의 보하부 부위에 그림 1과 같이 휨보강 및 전단보강을 위해 탄소섬유쉬트로 부착한 시공사례가 있다.



[그림 1] 런던 Action Bridge의 보강사진

\*교신저자 : 박재우(anm21c@hanmail.net)

접수일 10년 07월 15일

수정일 (1차 10년 09월 06일, 2차 10년 09월 27일)

게재확정일 10년 10월 15일

또한 Miller[1]는 미국 Delaware소재 I704 교량거더에 탄소섬유쉬트로 보강후 보강된 실 대규모 교량 거더 시험체에 대한 피로성능을 평가하였으며 연구결과 탄소섬유쉬트 플레이트는 강재 모재와 일체거동을 유지함으로써 피로성능이 우수함을 입증하였다. Tavakkolozadeh[2]은 콘크리트 슬라브를 지닌 SRC합성보의 H형강 하부플랜지에 탄소섬유쉬트로 보강하였으며, 보강겹수에 따라 내력상승효과를 확인하였다. Tao[3]는 화재를 입어 내력이 감소된 각형 CFT기둥 외부에 탄소섬유쉬트로 보강하여 내력과 연성증대효과를 확인하였다. 이와 같이 FRP는 보강재료의 선입견으로 인해 콘크리트구조물의 보수보강재로만 쓰여 왔지만, 향후 항구조물의 보수보강재 연구진행 및 적용을 통해 새로운 보수보강재로 자리 잡을 것으로 사료된다.

합성기둥 중 CFT기둥은 강관과 콘크리트의 장점을 이용하여 기존의 철골기둥보다 내력 및 연성적인 측면에서 우수하지만 강관의 항복이후 국부좌굴이 발생하면 내부 충전콘크리트의 구속효과가 급격히 떨어져 부재성능이 저하된다. 또한 최근 강화된 내진규준을 만족하기 위해서는 기존 CFT기둥으로 시공된 건물에 보수보강이 필요한데, FRP는 기존 CFT기둥의 보수보강재로 사용시 더욱 향상된 내진성능을 발휘할 것으로 사료된다. 이에 본 연구에서는 FRP로 보강된 각형 CFT기둥의 중심축하중 및 이력실험결과를 소개하고 향후 현장적용을 위한 FRP로 보강된 각형 CFT기둥의 설계식을 제안한다.

## 2. 실험수행

### 2.1 중심축하중 실험

#### 2.1.1 실험체 계획 및 셋팅

125mm×125mm, 두께 3.0mm, 4.5mm, 6.0mm, 길이 550mm 각형강관 9개에 설계강도 50MPa(28일 압축강도 49.9MPa) 콘크리트를 충전 후 28일간 양생하였으며 강관의 양쪽 개구부에는 엔드플레이트로 용접하였다. 강관 외부에 표 1의 변수계획에 따라 탄소섬유쉬트로 보강후 7일간 양생하였다. 여기서 탄소섬유쉬트의 두께는 0.111mm/ply이며, 인장강도는 3500MPa, 탄성계수는 233GPa이다. 사용된 강관 강종은 SM490이며, 항복강도는 표 1에 정리하였다.

3000kN급 만능시험기(UTM)에서 중심축하중 실험을 수행하였으며 실험체의 종방향 변위를 계측하기 위해 실험체의 엔드플레이트 모서리 부분에 4개의 LVDT를 설치하였다.

[표 1] 중심축하중 실험체 변수계획

연번	시험체명	시험체 size(mm)	FRP 겹수	$F_y$ (MPa)
1	R3N	125×125×3.0	-	304
2	R3F-1	125×125×3.0	1	304
3	R3F-3	125×125×3.0	3	304
4	R4N	125×125×4.5	-	300
5	R4F-1	125×125×4.5	1	300
6	R4F-3	125×125×4.5	3	300
7	R6N	125×125×6.0	-	324
8	R6F-1	125×125×6.0	1	324
9	R6F-3	125×125×6.0	3	324

#### 2.1.2 실험결과 및 분석

중심축하중 실험결과 그림 2와 같이 기존 CFT기둥은 기둥하부부위 15-25cm 떨어진 곳에서 국부좌굴이 발생하며 파괴되었으며, FRP 보강된 CFT기둥은 국부좌굴로 인해 강관이 횡변위가 발생으로 인해 FRP가 파단되며 최종적으로 파괴되었으며 두 종류의 CFT기둥의 최종파괴형상은 유사하다.

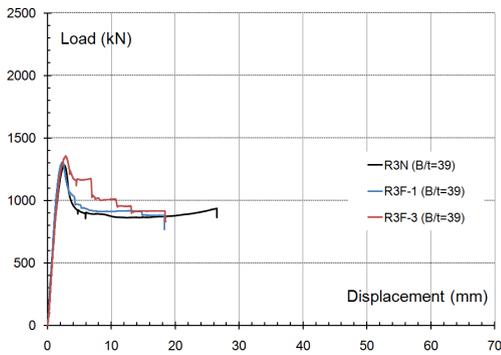
그림 3의 하중 축변위 관계 곡선에서 알 수 있듯이 기존의 무보강 CFT기둥의 경우 최대내력이후 내력이 급격한 내력저하를 보이고 있으나, FRP 3겹이 보강된 CFT기둥은 국부좌굴의 확장에 따라 FRP파단범위가 확대되며 FRP파단시 마다 내력이 저하되는 점진적인 내력저하를 보이고 있다(단 R6F-3실험체는 축변위 10mm에서 급격한 내력저하 현상이 나타남).



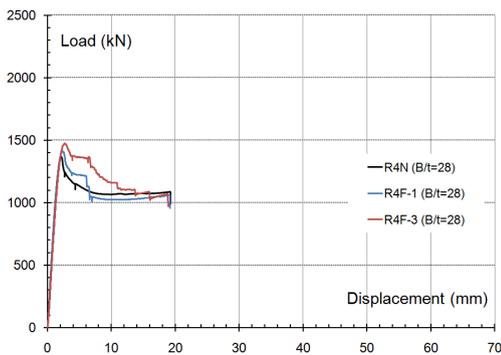
(a) R3N 파괴모습

(a) R3F-3 파괴모습

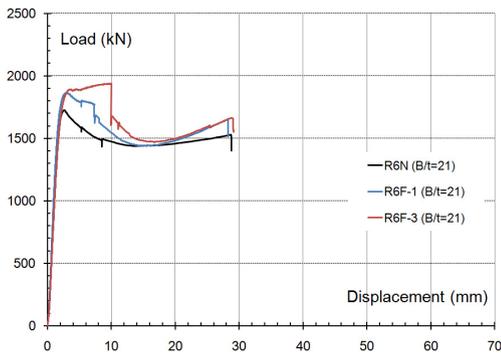
[그림 2] 실험체 최종파괴전경



(a) R3계열 (B/t=41)



(b) R4계열 (B/t=28)



(c) R6계열 (B/t=21)

[그림 3] 실험체 하중-변위곡선

그러나 내력측면에서 살펴보면 보강계수가 증가하여도 실험체의 최대내력은 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다. 이는 일반적으로 원형형상기둥은 내부충전콘크리트의 횡방향 팽창으로 인한 구속력이 균등하게 분포하나, 각형기둥은 내부충전콘크리트의 횡방향 팽창으로 인한 구속력이 네 모서리로 몰리기 때문에 구속에 대한 효

율성이 떨어지기 때문이다. 다만 연성측면에서는 기존의 CFT 기둥보다 FRP 보강된 CFT기둥의 연성이 개선되었는데 이는 FRP의 구속으로 국부좌굴을 지연시키며 이로 인해 실험체의 파괴시점을 지연시켰기 때문이다. 변위연성능력은 식 (1)과 같이 파괴점(실험체 최대내력 이후 10% 저감된 시점)과 항복점(1/3 접선법)의 비로 정의한다.

$$DI = \frac{\delta_u}{\delta_y} \quad (1)$$

[표 2] 압축실험체 내력 및 변위연성능력

실험체	내력 (kN)	내력 상승율	연성 (DI)	연성 상승율
R3N	1285.5	1.00	1.88	1.00
R3F-1	1308.8	1.02	1.89	1.01
R3F-3	1357.0	1.06	2.09	1.11
R4N	1372.2	1.00	1.94	1.00
R4F-1	1409.3	1.03	2.15	1.11
R4F-3	1473.5	1.07	4.03	2.08
R6N	1727.3	1.00	3.80	1.00
R6F-1	1866.4	1.08	4.31	1.05
R6F-3	1936.3	1.12	5.26	1.38

## 2.2 이력거동 실험

### 2.2.1 실험체 계획

지진하중과 같은 반복하중에 대해 FRP 보강된 각형 CFT기둥의 이력거동을 파악하기 위해 표 3의 실험체 제작계획에 의거하여 실험체를 제작하였다. 실험변수는 콘크리트강도와 FRP 보강계수이다.

[표 3] 이력거동 실험체 변수계획

연번	시험체명	시험체 size(mm)	FRP 계수	$f'_{ck}$ (MPa)
1	R2N	125×125×4.5	-	24.3
2	R2F-1	125×125×4.5	1	24.3
3	R4N	125×125×4.5	-	39.0
4	R4F-1	125×125×4.5	1	39.0
5	R5N	125×125×4.5	-	53.0
6	R5F-1	125×125×4.5	1	53.0
7	R5F-2	125×125×4.5	2	53.0
8	R5F-3	125×125×4.5	3	53.0

실험체는 125mm×125mm, 두께 4.5mm, 길이 550mm 각형강관 안에 설계강도 24MPa, 40MPa, 50MPa 콘크리트를 충전한 후 28일간 양생하였다. 탄소섬유쉬트 보강 범위는 국부좌굴이 예상되는 지점에 탄소섬유쉬트로 강관폭만큼 표 3의 계획과 같이 보강하였다 (지구현 2000). 강관의 항복강도  $F_y = 327\text{MPa}$ 이며, Cyclic load를 가하기 위한 횡변위는 그림 4와 같이 ANSI-AISC 341-02(2002)에 의해 실험체 길이대비 횡변위를 0.375%- 6.0%(0.00375 rad-0.06 rad) 까지 점진적으로 가하였으며, 축력비는 squash load 에 0.3배를 가하였다.

그림 4는 실험체 최종파괴전경을 나타낸 것인데 실험체는 기둥단부부위에서 국부좌굴이 발생하며 파괴되었

다. 그림 5는  $f'_{ck} = 50\text{MPa}$  실험체에 대한 이력곡선을 나타낸 것인데, 실험체의 휨내력은 FRP 보강접수에 크게 영향을 받지 않는 않지만 탄소섬유쉬트 보강접수가 증가함에 따라 국부좌굴시점을 지연시켜 실험체의 파괴점을 지연시켰으며 이로 인해 연성능력이 개선되어 내진성능이 향상됨을 관찰하였다.

표 4는 실험체의 내력, 변위연성능력을 나타낸 것으로 변위 연성능력은 파괴점(최대내력의 10% 저감시점)과 항복점(1/3 점선법 산정)의 비율로 정의한다.



(a) R5N 최종파괴모습

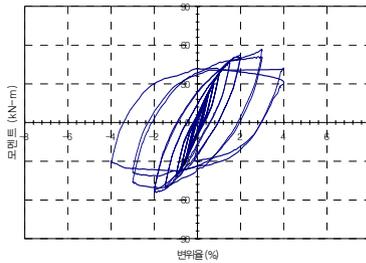


(b) R5F-1최종파괴모습

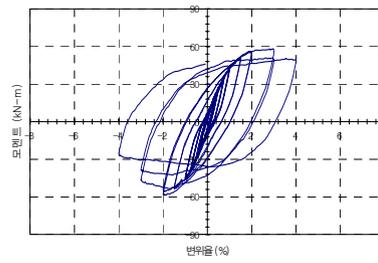


(c) R5F-3 최종파괴모습

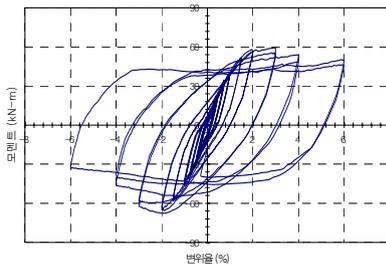
[그림 4] 실험체 최종파괴전경



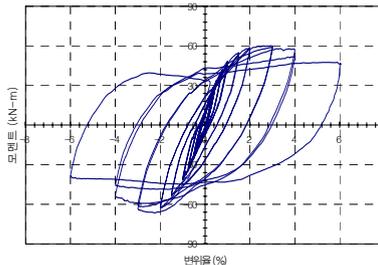
(a) R5N



(b) R5F-1



(c) R5F-2



(a) R5F-3

[그림 5] 실험체 이력곡선 ( $f'_{ck} = 50\text{MPa}$ )

[표 4] 이력거동실험체 내력 및 변위연성상승률

실험체	내력 (kN-m)	내력 상승률	변위 연성	변위연성 상승률
R2N	44.1	1.00	3.18	1.00
R2F-1	47.0	1.07	3.41	1.07
R4N	48.8	1.00	3.70	1.00
R4F-1	52.0	1.07	3.96	1.07
R5N	50.8	1.00	3.95	1.00
R5F-1	51.5	1.02	4.00	1.01
R5F-2	59.4	1.17	4.34	1.10
R5F-3	63.5	1.25	4.76	1.21

### 3. 설계식 제안

#### 3.1 기본이론

강관 혹은 FRP로 구속되어 있는 원형 콘크리트 공시체가 압축을 받게 되면 콘크리트의 횡방향 팽창으로 인해 강관 혹은 FRP는 횡방향으로 인장력이 발생하며 내부 충전콘크리트가 팽창하는 것을 억제하는 압력(구속압)이 발생한다. 여기서, 강관과 FRP로 구속된 콘크리트의 구속재료의 횡방향 구속압은 각각 식 (2a)와 식 (2b)와 같이 정의한다.

$$f_{l,s} = \frac{2f_s t_s}{d} = \frac{\rho_s f_s}{2} \quad (2a)$$

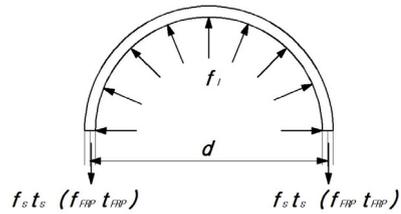
$$f_{l,FRP} = \frac{2f_{FRP} t_{FRP}}{d} = \frac{\rho_{FRP} f_{FRP}}{2} \quad (2b)$$

여기서,  $f_{l,FRP}$ 은 횡방향 구속력(구속압),  $f_{FRP}$ 는 FRP의 인장강도 및  $t_{FRP}$ 는 FRP두께,  $\rho_{FRP}$ 는 기둥을 완전히 감싼 경우의 기둥의 대한 FRP의 체적비,  $d$ 는 구속된 콘크리트 기둥의 직경이다.

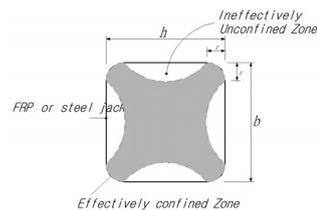
식 (2)에 대한 자유물체도는 그림 6에 나타내었다.

위의 구속효과로 인한 콘크리트의 응력-변형률 모델을 원형형상에 대해 기초를 두고 있으므로 각형형상에 직접적으로 적용할 수 없다. 그 이유는 각형형상의 기둥은 그림 6과 같이 균일하게 구속되지 않기 때문에 구속효과는 많이 감소하게 되며 이러한 구속효과의 불균일성은 단면의 형상에 따라 변화하게 된다. 각형기둥은 원형기둥과는 달리 구속압이 균등하게 분포하지 않고 네 모서리로 구속압이 집중하기 때문에 그림 7과 같이 사각형 기둥에 대해 4개의 2차 포물선에 의한 부분만 구속이 되고 그 외부의 구속효과는 무시하게 된다. 이로 인해 원형기둥과는

달리 각형기둥은 구속효과로 인한 내부충전콘크리트의 압축강도 상승률은 현저히 떨어지게 된다.



[그림 6] 구속효과의 자유물체 개념도



[그림 7] 사각형 기둥안의 유효 구속된 콘크리트의 개념도 (Lam 2002)

각형기둥의 유효구속압을 계산하기 위해서는 형상계수의 개념을 도입하였는데 본 연구에서 적용한 ACI 440[4]에서의 사각형 기둥의 형상계수는 식 (3)와 같다.

$$k_s = 1 - \frac{(b-2r)^2 + (h-2r)^2}{3bh(1-\rho_g)} \quad (3)$$

여기서,  $\rho_g$ 는 기둥의 단면에서 주근의 단면적 즉, 주근의 철근비  $r$ 은 강관의 모서리반경이다.

구속된 코어콘크리트의 구속의 정도에 따른 압축강도를 정량화하기 위하여 (Richart, Lam [5])등은 구속유효계수에 대한 연구를 진행해 왔는데, Richart는 강재로 구속된 원형콘크리트 공시체의 압축실험을 통해 구속된 콘크리트의 압축강도( $f'_{cc}$ )와 구속되지 않은 콘크리트의 압축강도( $f'_c$ ) 비율을 ‘구속의 효율성’으로 정의하였으며, 압축강도비( $\frac{f'_{cc}}{f'_c}$ )와 비구속된 콘크리트의 압축강도( $f'_c$ )와

횡방향 구속압( $f_l$ )의 비율인 구속비( $\frac{f'_c}{f_l}$ )의 관계는 선형적이라는 관계를 통해 구속된 콘크리트의 압축강도를 예측하는 식 (2)를 제안하였다. 각형형상의 경우 식(2)에 형상계수( $k_s$ ) 개념을 도입하여 식 (4)와 같이 나타낸다.

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

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

여기서  $k_1$ (식 (2))이 구속유효계수에 해당된다.

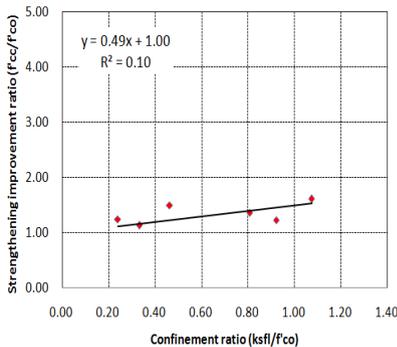
### 3.2 압축내력식 제안

현재까지 연구논문을 검색한 결과 FRP로 구속된 각형 CFT기둥에 대한 실험결과는 Park[6]의 연구논문만 진행 되었으므로, 실험체의 제원은 계제된 FRP로 보강된 각형 CFT기둥 실험체 6개를 사용하였다. 이를 바탕으로 FRP로 구속된 각형 CFT기둥의 구속유효계수를 산정한다. 실험결과에서 최대내력값( $P_{max}$ )중 강관의 부담율( $A_s F_y$ )을 제외한 나머지가 콘크리트의 부담율( $A_c f'_{cc}$ )이 되므로 구속된 콘크리트의 압축강도 ( $f'_{cc}$ )는 식 (5)을 이용하여 산정한다.

$$f'_{cc} = \frac{P_{max} - A_s f_y}{A_c} \quad (5)$$

실험데이터 6개를 바탕으로 구속된 압축강도 콘크리트의 강도상승율( $f'_{cc}/f'_{co}$ )과 형상계수( $k_1$ )를 적용한 구속비( $k_1 f_l / f'_{co}$ )에 대하여 선형회귀분석한 결과가 그림 8에 있으며 회귀분석 결과 FRP로 구속된 각형 CFT기둥의 압축강도 예측식은 식 (6)와 같다.

$$\frac{f'_{cc}}{f'_{co}} = 1 + 0.49 \frac{f_l}{f_{co}} \quad (6)$$



[그림 8] FRP로 보강된 각형 CFT기둥의 충전콘크리트 압축강도 상승률 예측

이를 바탕으로 FRP보강된 각형 CFT기둥의 압축내력 설계식은 식 (7)과 같다.

$$P_0 = A_c f'_{cc} + A_s F_y \quad (7)$$

식 (6), (7)의 제안식과 기존 CFT기둥의 설계식 (ACI, AISC-LRFD, EU4)을 표 2의 실험값과 비교한 결과를 [표 5]에 정리하였다. FRP의 추가구속효과를 고려하여 제안식은 기존 설계식보다 정확하고 향상된 예측결과를 보이고 있다. 그러나 구속효과를 고려한 식(5)의 콘크리트압축강도 상승률은 각형형상의 구속효과 특성상 그다지 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.

[표 5] 제안식과 실험결과와의 압축내력 비교

실험체	식(5) $f'_{cc}$ (MPa)	식(6) 제안식 (kN)	비율 (제안식/ 실험값)	설계식 (kN)	비율 (설계식/ 실험값)
R3F-1	55.1	1224	0.94	1045	0.80
R3F-3	58.1	1268	0.93	1045	0.77
R4F-1	56.6	1411	1.00	1221	0.87
R4F-3	59.5	1451	0.99	1221	0.83
R6F-1	58.5	1672	0.90	1466	0.79
R6F-3	61.4	1708	0.88	1466	0.76
평균			0.94		0.80

## 4. 결론

- FRP로 보강된 각형 CFT기둥의 중심축하중 실험과 이력거동실험을 수행하였다. 중심축하중 실험체의 경우 FRP 보강접수가 증가함에 따라 내력증가는 크게 발생하지 않았지만 국부좌굴의 지연으로 실험체가 점차적으로 파괴되어 연성능력은 개선되었다. 이력거동 실험체도 마찬가지로 FRP 보강접수가 증가함에 따라 내력증가는 크게 발생하지 않았지만 국부좌굴의 지연으로 연성능력이 개선되어 내진성능이 개선된 것으로 나타났다.
- FRP 보강된 각형 실험체의 압축내력식을 제안하기 위해 구속유효계수의 개념을 도입하여 구속된 콘크리트의 압축내력 예측식을 산정하였으며, 이를 바탕으로 압축내력식을 제안한다. 제안식은 기존 설계식보다 향상되고 정확한 결과를 예측하여 향후 FRP로 보강된 각형 CFT기둥의 보수보강설계식에 기초자료로 쓰일 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 지구현, 최성모, 김동규, “일정축력과 반복수평력을 받는 콘크리트충전 각형강관 기둥의 변형성능평가”, 한국강구조학회논문집 제 12권 6호, 2000.
- [2] T. C. Miller., M. J. Chajes., D. R. Mertz., J. N. Hastings., ”Strengthening of A Steel Brigge Girder Using CFRP Plates”, J of Bridge Engineering., ASCE, Vol 6., No 6, 2001.
- [3] M. Tavakkolozadeh., H. Saadatmanesh., “Repair of Damaged Steel-Concrete Composite Girders Using Carbon Fiber-Reinforced Polymer Sheets”, J of Composite for construction., ASCE, Vol 7., No 4, 2003.
- [4] Z. Tao., L. H. Han., L. L. Wang., " Compressive and flexural behavior of CFRP-repaired concrete-filled steel tubes after exposure to fire“, Constructional Steel Research, Vol 63., No8, 2007.
- [5] 박재우, 홍영균, 홍기섭, “ 탄소섬유슈트로 보강한 콘크리트 충전강관(CFT)기둥의 휨내력식”, 한국지진공학학회논문집 제 12권, 3호, 2008.
- [6] J. W. Park., Y. K. Hong., S. M. Choi., “Behavior of concrete silled square tubes confined by carbon fiber sheets(CFS) under compression and cyclic loads”Steel and Composite Structures, An Inter Journal., Vol 8., No 2, 2010.
- [7] ACI 440R-96, “Guide for the Design and Construction of Externally Bonded FRP Systems for Strengthening Concrete Structures”, ACI Committee 440, 2002.
- [8] J. G. Teng., J. F. Chen., S. T. Smith., L. Lam.,“ FRP-Strengthened RC Structures”, John Wiley & Sons., pp.153-168, 2002.
- [9] ANSI/AISC 341-02, "Seismic Provision for Structural Steel Buildings", 2002.

### 박재우(Jai-Woo Park)

[정회원]



- 1994년 3월 ~ 2000년 2월 : 광운대학교 건축공학과 (공학사)
- 2000년 9월 ~ 2002년 8월 : 홍익대학교 건축학과 (공학석사)
- 2003년 3월 ~ 2003년 8월 : 홍익대학교 건축학과 (공학박사)
- 2002년 7월 ~ 2007년 5월 : (주)케이씨씨건설 근무
- 2008년 9월 ~ 현재 : 서울시립대학교 박사후과정 연구원

<관심분야>  
건축구조

### 정성훈(Sung-Hun Chung)

[정회원]



- 1984년 10월 ~ 1987년 10월 : 독일슈투트가르트대학교(공학사)
- 1987년 10월 ~ 1990년12월 : 독일슈투트가르트대학교(석사)
- 1991년 3월 ~ 1993년 11월: AP-Plan, Stuttgart(독일)
- 1994년 5월 ~ 1997년 3월 : (주)현대산업개발 근무
- 1997년 3월 ~ 1998년 2월 : (주)서전종합건축사사무소 대표
- 1998년 3월 ~ 현재 : 인덕대학 건축과 교수

<관심분야>  
건축설계, 건축계획