



시공성을 향상시킨 용접조립 각형 CFT 편심 장주의 P-M 관계

이성희¹ · 최성모² · 김영호³

특허청 특허심사1국 사무기기심사과 공학박사¹, 서울시립대학교 건축학부 교수²,
 ㈜지승건설턴트 기술연구소 공학박사³

P-M Relations of Slender Welded Built-up Square CFT Column under Eccentric Loads

Lee, Seong-Hui¹ · Choi, Sung-Mo² · Kim, Young-Ho³

¹PhD, Office Equipment Examination Division, Korean Intellectual Property Office, Daejeon, Korea

²Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, Korea

³PhD, Jiseung Consultant Co., Ltd., Seoul, Korea

Abstract: CFST columns are structurally superior because the concrete inside the steel tubes prevents local buckling at the tubes and the tubes confine the concrete. And, the thickness of steel tube in CFST column has been thinner with development of high-strength steel. The thinner the steel tube of a square CFST column is, the more local buckling is likely to occur. For this reason, we developed welded built-up square steel tube with stiffeners which are placed at the center of the tube width acts as an anchor. In this study, we conduct experimental test for three specimens of the 4m long span welded built-up square CFT column with parameters of L/D and D/t. And, the test results were compared with the analysis results by M- ϕ -P Program.

Key Words: Concrete Filled Steel Tubular Column, Slender Column, Cold-Form, Anchor, Width to Thickness Ratio, Eccentricity Ratio

1. 서론

최근 지어지고 있는 고층 건물은 기존의 구조적 제약 조건을 극복하고 다양한 기능을 만족시키기 위해 장스팬 및 공간의 효율적 이용을 가능하게 하는 구조 형식을 필요로 한다. 특히 각형강관 기둥은 철골 건물에서 많이 사용되고 있는 H형강 기둥이 갖는 단면의 방향성에 따른 내력감소를 줄일 수 있어 고층건물 부재로 유리하고, 더욱이 이러한 강관기둥을 콘크리트로 충전할 경우 강관은 콘크리트에 대하여 압축변형을 구속하여 콘크리트의 압축강도를 증가시키며, 콘크리트는 강관에 대하여 압축좌굴, 국부좌굴 및 비틀림에 의한 내력의 감소를 방지하도록 구조적으로 상호 보완하므로 강관과 콘크리트가 독자적으로 이용된 경우

보다 부재의 내력과 변형능력이 크게 향상되어 구조적 성능이 개선된다. 최근 강재 가격의 상승과 고강도 콘크리트의 개발로 CFT 구조에서는 각형강관의 내부의 강관 폭 중앙에 기둥의 길이방향으로 스티프너를 설치하는 연구가 수행되어 왔다(Ge and Usami 1992; Mursi and Uy 2003; Zhong Tao 2005; Ellobody 2007). 또한 Seong-Hui Lee(2012)는 스티프너가 강관의 내부에 설치된 용접조립 각형강관에 관한 연구를 수행한 바 있으며, 강관 내부에 스티프너가 설치된 장주 CFT 기둥의 구조거동에 대한 연구는 Hsuan-Teh Hu(2005), Vipulkumar Ishvarbhai Patel(2012)에 의해 수행되었으나 실험의 연구는 거의 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 Fortran 95 프로그램을 이용하여 M- ϕ -P 산출 프로그램을 완성하고, 강관의 길이대 폭비(L/D) 및 폭두께비(D/t)를 변수로

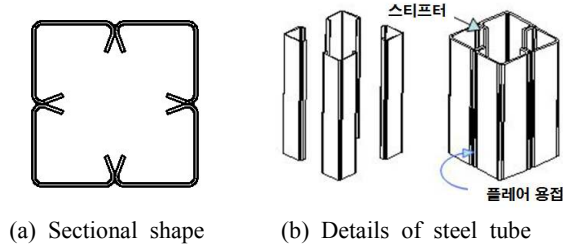
주요어: 콘크리트 충전강관, 장주, 냉간성형, 앵커, 폭두께비, 편심비

Corresponding author: Kim, Young-Ho

Institute of R&D Jiseung Consultant Co., Ltd., Lime Bldg 2nd F1, 3, Hoenam-ro 26-gil, Yongsan-gu, Seoul, 140-857 Korea
 Tel: +82-2-792-9087, Fax: +82-2-792-9086, E-mail: steelkyh@hanmail.net

Received April 8, 2015 / Revised May 19, 2015 / Accepted June 11, 2015

실대형 장주 용접조립 각형 CFT기둥 3개를 제작하여 편심($e=0.1D$)가력으로 구조해석을 수행하였으며, 실험 결과를 $M-\phi-P$ 산출 프로그램을 이용한 이론해석결과와 비교함으로써 용접조립 각형 CFT기둥의 거동 및 내력을 평가하였다.



(a) Sectional shape (b) Details of steel tube
Fig. 1 Welded built-up square CFT column

2. 이론해석

1. $M-\phi-P$ 산출 프로그램

기둥의 구조성능을 평가하는 방법으로 $M-\phi-P$ 관계를 이용할 수 있으며 지금까지 제안된 각국의 설계기준과 Hajjar(1996), Lin-Hai Han(2001) 등이 제안한 $M-\phi-P$ 관계식은 일반 각형CFT 기둥에 관한 것으로 용접조립 각형 CFT 기둥의 $M-\phi-P$ 관계를 파악할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 용접조립 각형 CFT 기둥의 $M-\phi-P$ 관계를 산출하기 위하여 EXCEL 및 FORTRAN 95 프로그램을 이용하여 Fig. 2과 같이 $M-\phi-P$ 관계 산출 프로그램을 개발하였다.

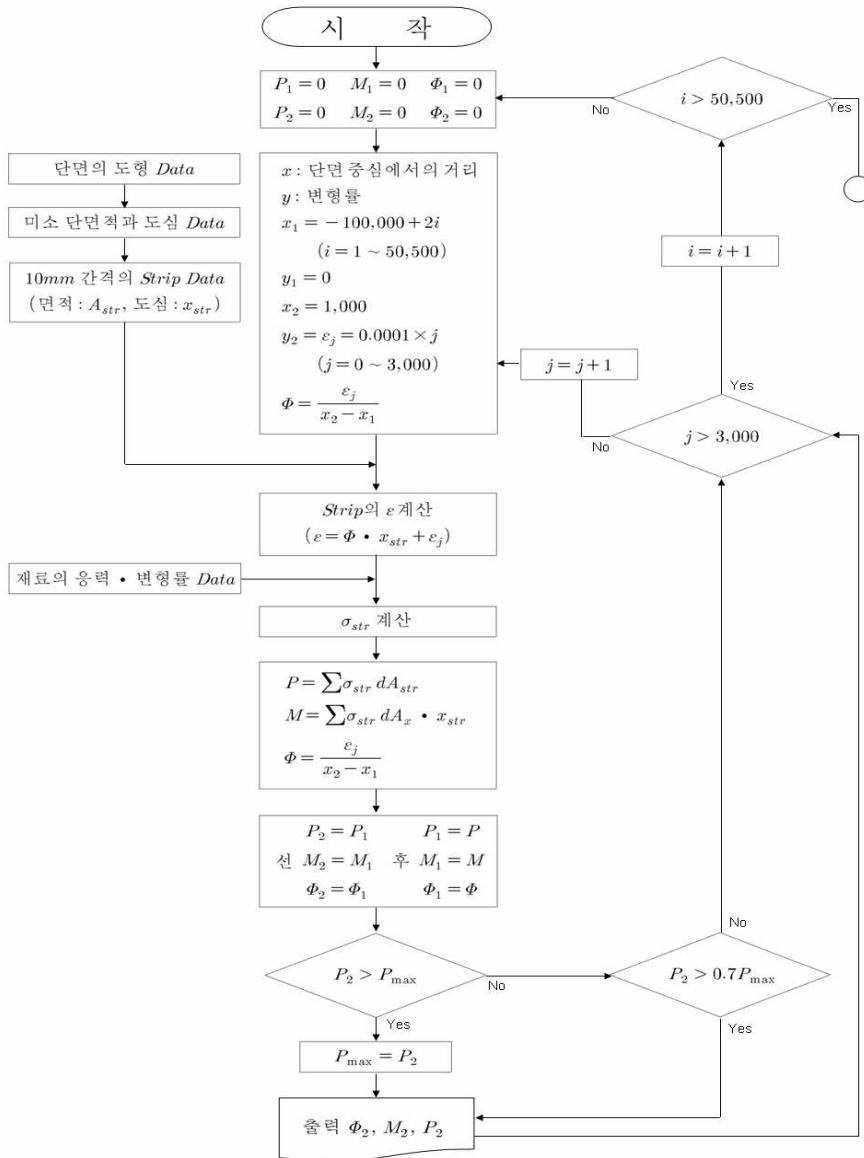


Fig. 2 Flow chart of $M-\phi-P$ calculation



Fig. 3 Analysis step and programs

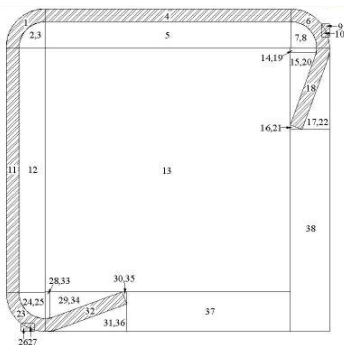
M-φ-P 관계 산출 과정은 Fig. 3과 같이 단면분할, 인풋(Input)문 작성, 단면분할 프로그램 실행, 미소단면적(1mm)의 도심 및 단면적 출력, 10mm 스트립(Strip) 도심 및 단면적 출력, M-φ-P 관계 생성 프로그램 실행, 하중에 대한 최대 모멘트 추출, M-φ-P 상관도 작성의 8단계로 구성되어 있다.

1) 도심 및 면적의 계산

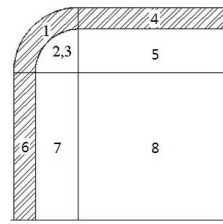
용접조립 각형 CFT기둥과 일반 각형 CFT기둥의 도심 및 면적 계산을 위해 Fig. 4와 같이 용접조립 각형 CFT기둥의 단면을 38개 부분, 일반 각형 CFT기둥의 단면을 8개 부분으로 나눈 후 식(1) 및 식(2)을 이용하여 단위면적(dA)에 대한 도심과 면적을 산출(김정미, 1991)하였으며, 각 단위면적(dA)은 형상에 따라 단면을 Fig. 5와 같이 삼각형을 기본형상으로 하고 사각형은 2개의 삼각형을 합산한 것으로 다각형은 삼각형과 사각형을 합산한 것으로 계산하였으며 곡선부분은 곡선의 양 끝점을 직선으로 연결한 다각형을 이용하여 계산하였다.

$$\text{도심 } G_x = \left(\frac{x_1 + x_2 + x_3}{3}, \frac{y_1 + y_2 + y_3}{3} \right) \quad (1)$$

$$\text{면적 } S = \frac{1}{2} |(x_1y_1 + x_2y_3 + x_3y_1) - (x_2y_1 + x_3y_2 + x_1y_3)| \quad (2)$$



(a) Division section of welded built-up square CFT column



(b) Division section of general CFT column

Fig. 4 Division section of analysis models

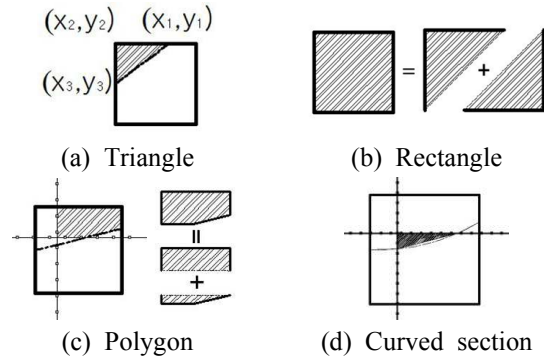


Fig. 5 Calculation of cross-sectional area and centroid

계산시간의 절약을 위해 단위면적(dA)의 도심 및 면적은 Fig. 6과 같이 10mm간격의 스트립(Strip)의 도심 및 면적을 계산정하여 계산에 이용하였다.

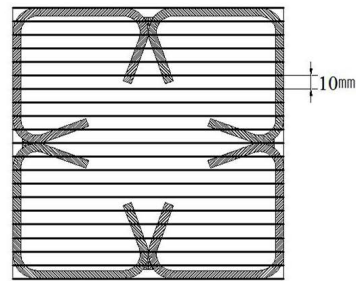


Fig. 6 Section of Strip

2) 콘크리트와 강재의 응력변형률 관계

콘크리트의 응력변형률 모델은 Fig. 7과 같이 Uy(1998)가 제안한 모델을 변형한 아래의 식(3)을 사용하였으며, 강재의 응력변형률 모델은 부재의 내력을 해석적으로 평가하는데 일반적으로 사용되는 이상적인 Bi-linear 완전 탄소성 관계를 사용하였다.

$$\sigma = \frac{\sigma_0 \epsilon (a - 206600 \epsilon)}{1 + b \epsilon} \quad (3)$$

$$\sigma_0 = 0.85 f_c \quad \therefore \text{본 연구에서는 } \sigma_0 = f_c$$

$$a = 39000 (\sigma_0 + 7.0)^{-0.953}$$

$$b = 65000 (\sigma_0 + 10.0)^{-1.085} - 850.0$$

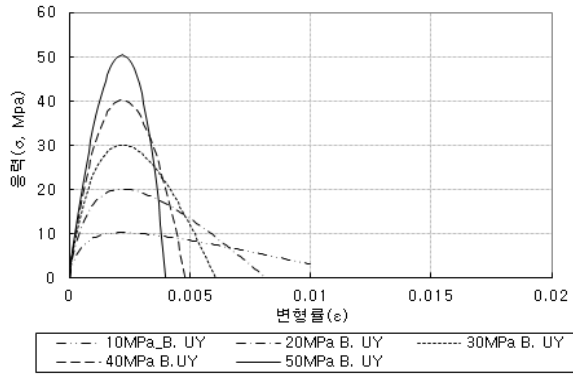


Fig. 7 Stress-strain models of Concrete(Uy, 1998)

3) P-M 관계

10mm 간격의 스트립(Strip)의 도심 및 단면적, 강재 및 콘크리트의 응력변형률 관계로부터 축력-모멘트(P-M) 관계를 산출하며, $F_{ck} = 40MPa$, $F_y = 323.4MPa$ 를 이용한 용접조립 각형 CFT기둥 400×6 의 축력-모멘트(P-M) 관계는 Fig. 8과 같다.

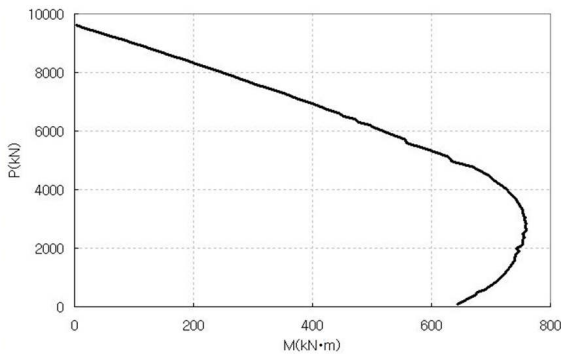


Fig. 8 P-M relation

4) 길이 효과

길이가 L인 기둥의 처짐 관계식은 식(4)로 가정할 수 있으며, 식(5) 및 식(6)을 이용하면 $F_{ck} = 40MPa$, $F_y = 323.4MPa$ 를 이용한 용접조립 각형 CFT기둥 400×6 에 대하여 길이/강관폭(L/D)비가 0,10,20,30,40 일때의 P-M_L관계는 Fig. 9와 같다.

$$u = u_0 \sin\left(\frac{x\pi}{L}\right) \text{ 여기서, } u_0 : \frac{L}{2} \text{ 위치의 처짐} \quad (4)$$

$$\phi = u_0 \left(\frac{\pi^2}{L^2}\right) \quad (5)$$

$$M_L = P \cdot u_0 \quad (6)$$

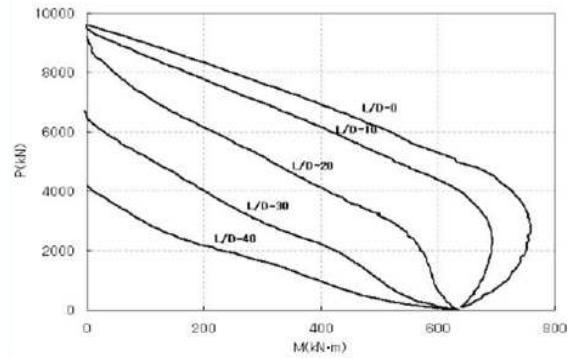


Fig. 9 P-M relations for L/D

5) 편심 효과

편심 e인 기둥의 P-M 관계는 식(7)로부터 도출할 수 있으며, $F_{ck} = 40MPa$, $F_y = 323.4MPa$ 를 이용한 용접조립 각형 CFT기둥 400×6 에 대하여 편심/강관폭(e/D)가 0,10,20,30,40일때의 P-M_L관계는 Fig. 10과 같다.

$$M_e = P \cdot (u_0 + e) \quad (7)$$

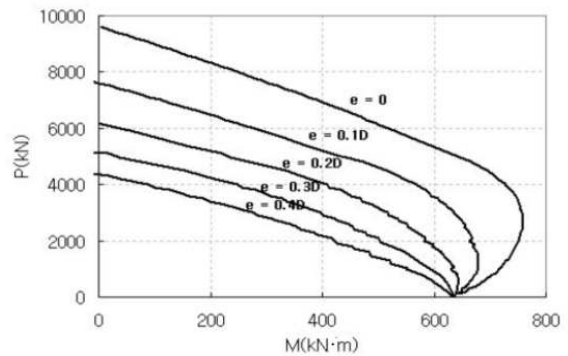


Fig. 10 P-M relations for eccentricity

2. 용접조립 각형 CFT기둥과 일반 각형 CFT기둥의 구조내력 비교

용접조립 각형CFT 기둥과 일반 각형 CFT기둥의 구조내력을 비교하기 위해 Table 1 및 Fig. 11과 같이 용접조립 각형 CFT기둥 3개(H-1,2,3)와 일반 각형 CFT기둥 3개(H-4,5,6)를 해석대상으로 하여 이론 해석을 수행하였다.

Table 1. Analysis Specimens

실험체	형상	폭 두께		강관		콘크리트	
		D (mm)	t (mm)	A_s (mm ²)	F_y (MPa)	A_c (mm ²)	F_{ck} (MPa)
H-1	용접조립	300	6	9,168	323.4	80,119	40
H-2	립각형	350	6	10,368	323.4	111,419	40
H-3	강관	400	6	11,568	323.4	147,719	40
H-4	일반	300	6	6,901	323.4	82,820	40
H-5	각형	350	6	8,101	323.4	114,120	40
H-6	강관	400	6	9,301	323.4	150,420	40

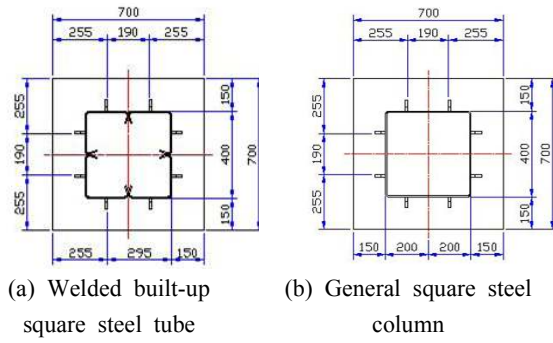
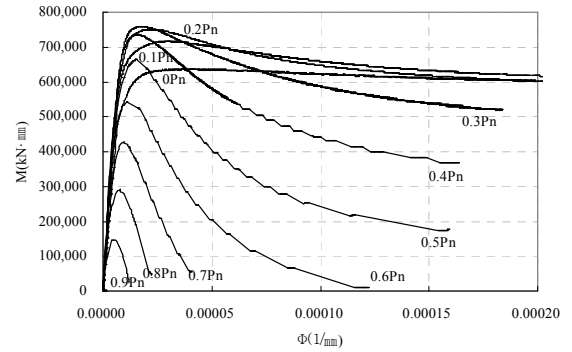
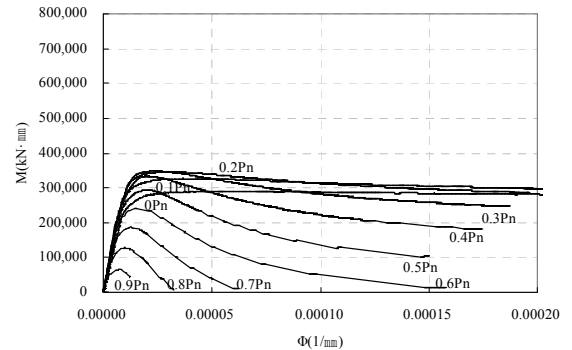


Fig. 11 Analysis specimens

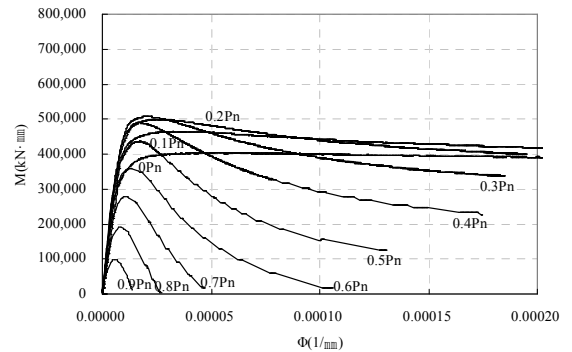
각 해석대상에 대하여 최대축력(P_n)을 산출하고 P_n 대비 $0P_n, 0.1P_n, 0.2P_n, \dots, 0.9P_n$ 까지 $0.1P_n$ 간격으로 $M-\phi$ 관계를 산출하여 Fig. 12에 나타내었으며, 산출된 $M-\phi$ 관계를 이용하여 산출된 각 해석대상의 P-M관계를 Fig. 13에 나타내었다. 해석결과 모든 실험체에서 최대모멘트(M_{max})는 $0.3P_n$ 에서 나타났으며, 이는 축력(P)에 의해 발생된 강관 및 콘크리트의 압축응력 중 휨인장측의 압축응력은 모멘트(M) 작용시 휨인장측의 인장응력을 증가시키기 때문에 나타난 현상이며, 용접조립 각형 CFT기둥에서는 강관의 내부에 설치된 스티프너가 강관의 국부좌굴을 지연시켜 강관의 압축응력이 증가하게 되므로 동일한 폭의 용접조립 각형 CFT 기둥의 축력 및 모멘트 내력이 대응되는 일반 각형 CFT기둥에 비해 우수한 것으로 판단된다.



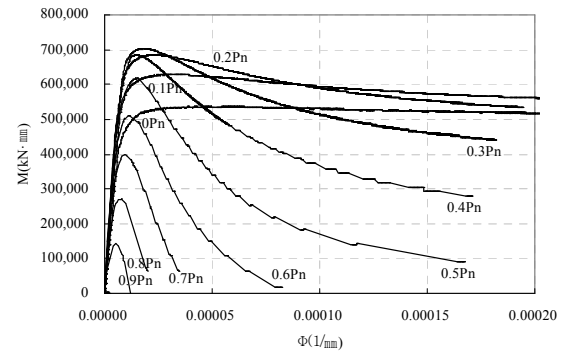
(c) H-3



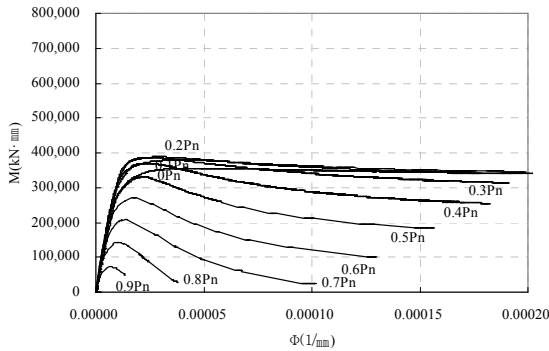
(d) H-4



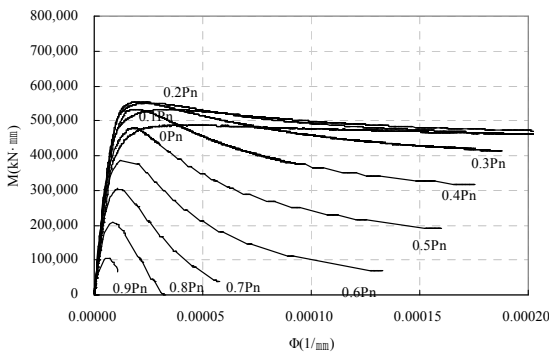
(e) H-5



(f) H-6



(a) H-1



(b) H-2

Fig. 12 M- ϕ relations

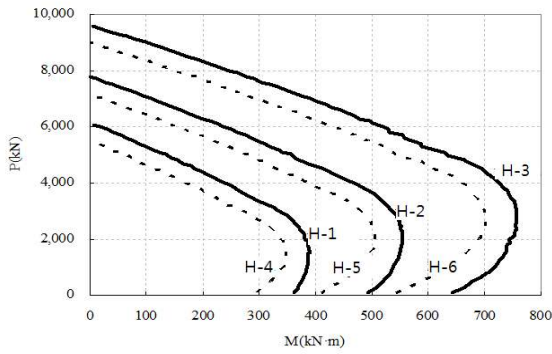


Fig. 13 P-M relations

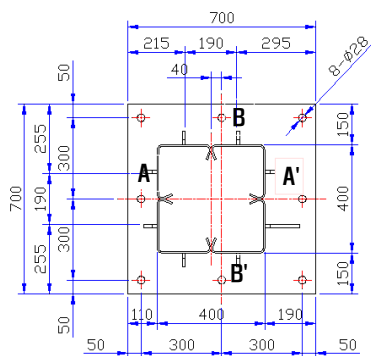
3. 구조실험

1. 실험체 계획

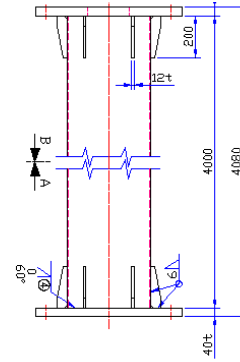
실험체는 Table 2 및 Fig. 14와 같이 강종: SM490 두께(t): 6mm의 강관을 이용하여 강관 폭이 300mm, 350mm, 400mm인 용접조립 각형 CFT기둥 3개를 제작하였으며, 기둥의 길이는 4m로 하였다. 또한, 편심하중을 재하를 위해 기둥의 중심은 가력중심과 0.1×D만큼 떨어진 위치로 하였으며, 강관과 단부 엔드플레이트가 만나는 위치의 국부좌굴방지를 위해 길이 20cm의 스티프너를 설치하였다.

Table 2. Specimens

실험체	편심			강관		콘크리트	
	D (mm)	t (mm)	e (mm)	A_s (mm ²)	F_y (MPa)	A_c (mm ²)	F_{ck} (MPa)
HE-1	300	6	30	9,168	323.4	80,119	10.55
HE-2	350	6	35	10,368	323.4	111,419	10.55
HE-3	400	6	40	11,568	323.4	147,719	10.55



(a) Cross-sectional diagram



(b) Elevation

Fig. 14 Specimens

2. 실험체 세팅 및 가력방법

편심하중의한 강관의 변위와 변형률 측정을 위하여 Fig. 15와 같이 변위계 6개와 변형률 게이지 8개를 실험체에 부착하여 실험하였다.

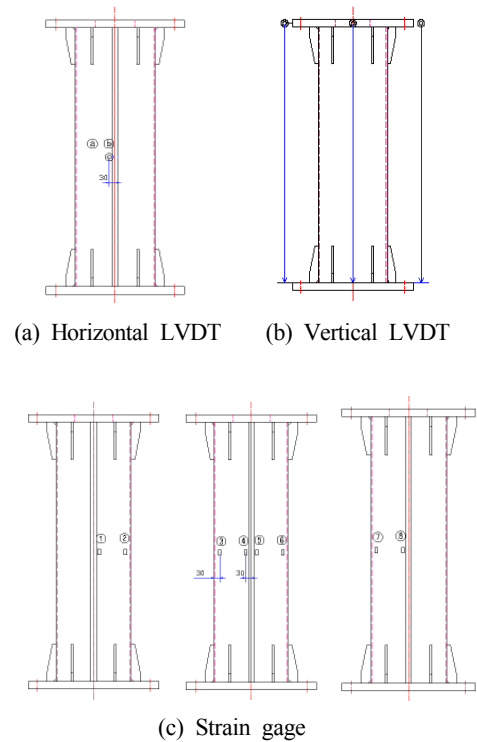


Fig. 15 Location of LVDT and strain gage

하중가력은 10,000kN급 만능시험기(U.T.M)을 사용하여 기둥의 중심에서 0.1×D의 편심 축하중을 0.05(mm/s)의 가력속도로 가력하였으며, 최대내력 이후 최대내력의 90%까지 내력이 떨어지는 경우 실험을 종료하였다.

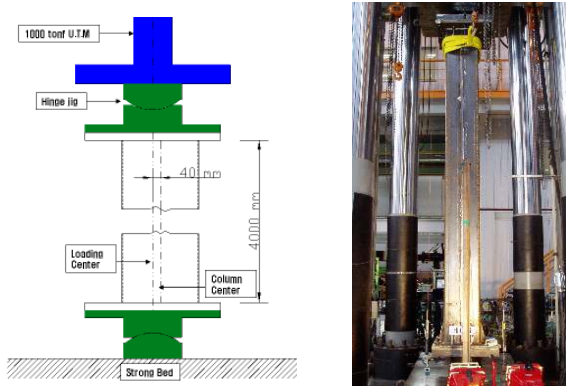


Fig. 16 Setting of specimens

3. 실험결과

1) 재료시험 결과

실험체 제작에 사용된 SM490 강재는 Table 3에 나타낸 바와 같이 항복강도와 인장강도가 각각 414MPa와 521MPa로 나타났으며, 콘크리트강도는 30MPa로 계획하였으나 동해를 입어 10.55MPa의 압축강도를 나타내었다.

Table 3. Material properties

재료	치수(mm)	항복강도(MPa)	인장강도(MPa)
SM490A	6	414	521
콘크리트 (30MPa계획)	φ100×200	10.55	-

2) 구조실험 결과

각 실험체의 하중-변위 관계를 파악하기 위해 Fig. 17과 같이 초기강성 기울기를 갖는 직선과 초기강성 기울기의 1/3인 직선을 평행이동 시켜 두 직선의 교점을 항복내력 P_y 로 정하였다. 용접조립 각형 CFT기둥 실험체인 HE-1,2,3의 최대내력은 각각 4,666kN, 5,258kN, 6,059kN를 나타냈으며, 각 실험체의 하중변위 관계를 Fig. 18에 나타냈다.

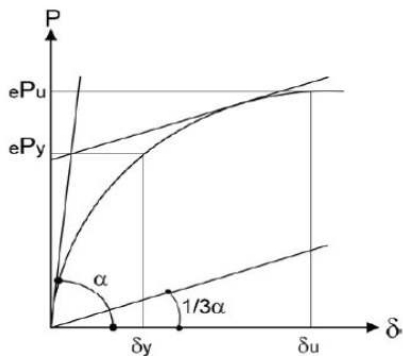


Fig. 17 Yield strength calculation of specimens

Table 4. Strength of specimens

실험체	항복내력 P_y (kN)	최대내력 P_u (kN)
HE-1	4,174	4,666
HE-2	4,993	5,258
HE-3	5,482	6,059

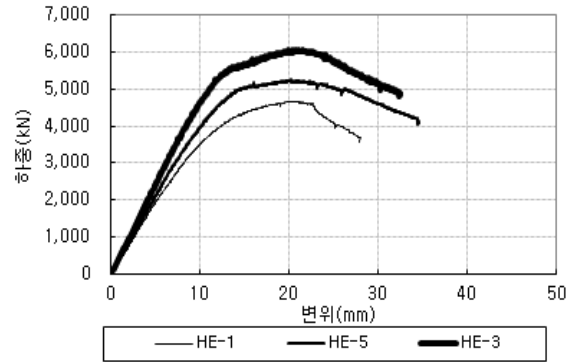


Fig. 18 Load-displacement relation of specimens

3) 실험체 파괴형상

HE-1은 기둥의 전체좌굴에 의해 파괴되었으며 HE-2,3은 기둥 단부의 엔드플레이트 고정용 리브 앞부분에서 강관에 국부좌굴이 발생하면서 파괴되었다. 각 실험체의 파괴형상은 Fig. 19와 같다.



Fig. 19 Failure behavior of specimens

4. 분석 및 고찰

강관 내에 스티프너가 설치된 용접조립 각형 CFT 기둥의 P-M 관계를 분석하면 다음과 같다.

1. 이론해석에 의한 실험체의 M-φ 관계

M-φ-P 산출 프로그램을 이용하여 용접조립 각형 CFT기둥의 M-φ-P 관계와 휨강성 산출하고 건축구조기준(2011)의 유효휨강성(EI_{eff})과 비교하여 Fig. 20 및 Table 5에 나타냈다. 이론해석으로부터 산출된 휨강성($EI_{이론해석}$)과 건축구조기준(2011)의 유효휨강성(EI_{eff}) 거의 일치하는 것으로 나타났다.

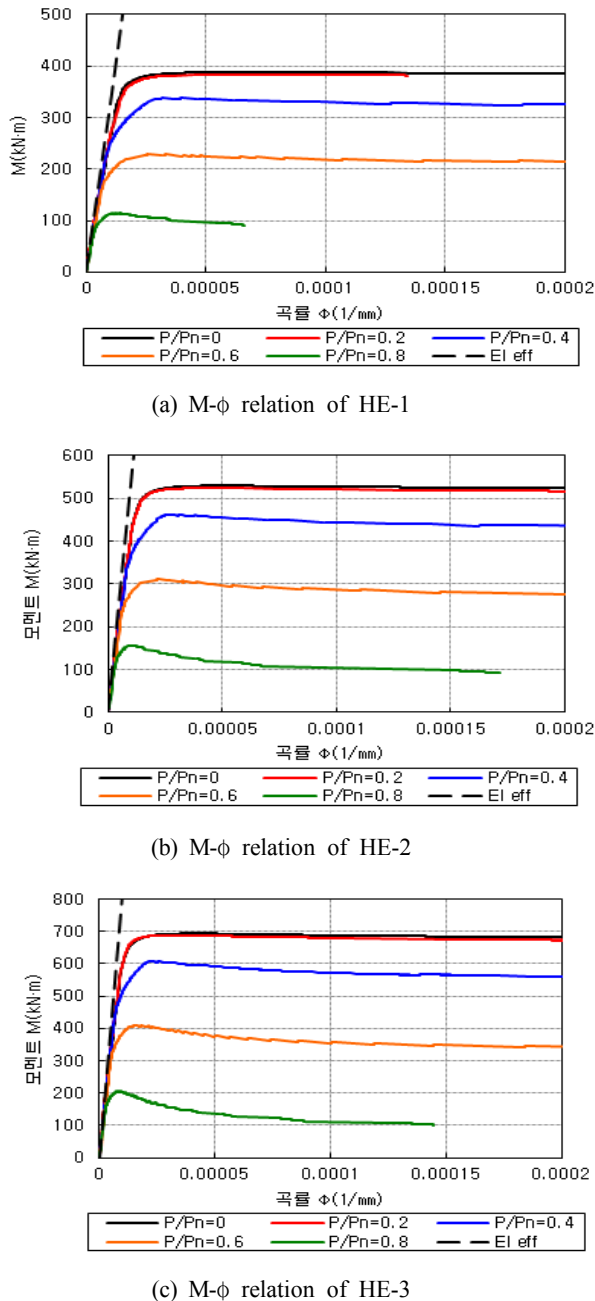


Fig. 20 M-φ relations of specimens using Analysis program

Table 5. Flexural rigidity

	EI_{eff} ($N \cdot mm^2$)	$EI_{이론해석}$ ($N \cdot mm^2$)
HE-1	3.3×10^{13}	3.0×10^{13}
HE-2	5.3×10^{13}	5.1×10^{13}
HE-3	8.2×10^{13}	8.0×10^{13}

2. 실험체의 M-P 관계

M-φ-P 산출 프로그램을 이용하여 산출된 각 실험체의 P-M 관계를 Fig. 21에 나타내었다. 또한 P-M관계를 $P/P_n - M/M_p$ 로 무차원화하여 Fig.22에 나타내었으며, 용접조립 각형 CFT기둥의 실험결과가 이론해석의 축력 및 모멘트 보다 높게 나타났다.

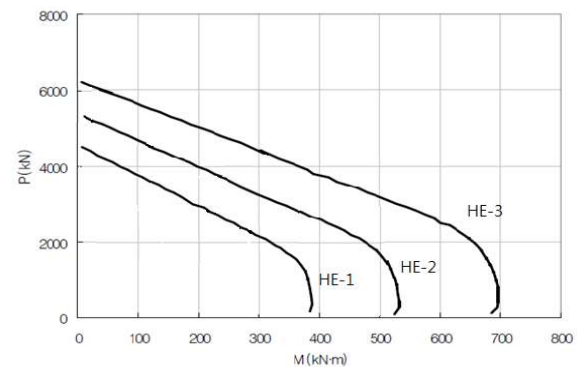


Fig. 21 P-M relations of specimens

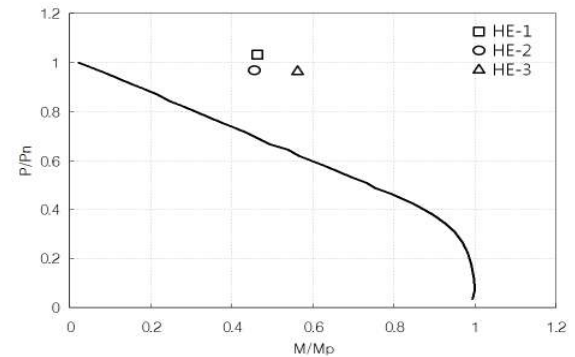


Fig. 22 Dimensionless P-M relations

5. 결론

본 연구에서는 콘크리트 충전강관기둥의 시공성을 향상시킨 용접조립 각형CFT 장주기둥의 구조성능을 평가하기 위해 Fortran 95 프로그램을 이용한 M-φ-P 산출 프로그램을 완성하였으며, 강관의 길이대 폭비(L/D) 및 폭두께비(D/t)를 변수로 제작된 실대형 장주 용접조립 각형 CFT기둥 3개를 제작하여 구조실험결과와 비교하여 아래의 결론을 얻었다.

1. 기존 연구에서 제시된 P-M관계 산출식은 용접

조립 각형 CFT기둥의 P-M관계를 산출하는데 사용할 수 없으며, 본 연구에서 개발된 M- ϕ -P 산출 프로그램은 용접조립 각형 CFT기둥의 P-M관계산출에 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 용접조립 각형 CFT기둥은 M- ϕ -P 산출 프로그램으로 산출된 P-M 관계를 $P/P_n - M/M_p$ 로 무차원화하여 실험결과와 비교한 결과, 용접조립 각형 CFT기둥의 축력 및 모멘트가 이론해석의 축력 및 모멘트 보다 높게 나타나 고층건물의 시공에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

References

- Kim, J. M(1991), High school math formula book, Jung-ang academic institute
- Park, J. W., Rhee, D. J., Chang, S. S. and Hu, J. W. (2012) Advanced Analysis of Connections to Concrete-Filled Steel Tube Columns using the 2005 AISC Specification, J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc., Vol.3, No.3, pp.9-21
- Seon, W. H. and Hu, J. W. (2011) Development of A Component and Advanced Model for The Smart PR-CFT Connection Structure, J. Korean Soc. Adv. Comp. Struc., Vol.2, No.4, pp.1-10.
- Ellobody, E. (2007) Nonlinear behavior of concrete-filled stainless steel stiffened slender tube columns, Thin-Walled Structures, 45, pp.259-273.
- Ge, H. and Usami, T. (1992) Strength of Concrete-Filled Thin-Walled Steel Box Columns: Experiment, Journal of Structural Engineering, 64(11), pp.3036-3054.
- Hua,, H. T., Huang, C. S. and Chen, Z.-L. (2005) Finite element analysis of CFT columns subjected to an axial compressive force and bending moment in combination, Journal of Constructional Steel Research, 61, pp.1692-1712.
- Hajjar, J. F. and Gourley, B. C. (1996) Representation of concrete-filled steel tube cross-section strength, Journal of Structural Engineering, 122(11), pp.1327-1336.
- Han, L. H., Zhao, Z.-L. and Tao, Z. (2001) Tests and mechanics model for concrete-filled SHS stub columns, columns and beam-columns, Steel & Composite Structures, 1(1), pp.51-74.
- Lee, S. H., Choi, Y. H., Kim, Y. H. and Choi, S. M. (2012) Structural performance of welded built-up square CFST stub columns, Thin-Walled Structures, 52, pp.12-20.
- Mursi, M. and Uy, B. (2003) Strength of Concrete Filled Steel Box Columns Incorporating Interaction Buckling, Journal of Structural Engineering, 129(5), pp.626-639.
- Patel V. I., Liang, Q. Q. and Hadi, M. N.S. (2012) High Strength thin-walled rectangular concrete-filled steel tubular slender beam-columns, Part I: Modeling, Journal of Constructional Steel Research, 70, pp.377-384.
- Tao, Z., Han L. H., Wang, Z. B. (2005), Experimental behavior of stiffened concrete-filled thin-walled hollow steel structural (HSS) stub column, Journal of Constructional Steel Research, 61, pp.962-983.
- Uy, B. (1998) DUCTILITY, STRENGTH AND STABILITY OF CONCRETE-FILLED FABRICATED STEEL BOX COLUMNS FOR TALL BUILDINGS, Vol.7, pp.113-133.