

플레이트를 통해 인장력이 축직각방향으로 작용하는 CFT기둥에 대한 실험적 연구

오재열¹ · 이세정² · 전진우³ · 최성모⁴ · 양일승^{5*}

¹소장, 세진알앤에스, ²대표, 세진알앤에스, ³과장, 세진알앤에스,
⁴교수, 서울시립대학교, 건축공학과, ⁵교수, 동신대학교, 건축공학과

An Experimental Study on the CFT Column in Which the Tensile Force Acts in the Axial Perpendicular Direction Through the Steel Plate

Oh, Jae Yuel¹, Lee, Se Jung², Jeon, Jin Woo³, Choi, Sung-Mo⁴, Yang, Il Seung^{5*}

¹Research Engineer, Sejin R&S, Seoul, 04788, Korea

²Chief Executive Officer, Sejin R&S, Seoul, 04788, Korea

³Manager, Sejin R&S, Seoul, 04788, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, Seoul, 02504, Korea

⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Dongshin University, Naju, 58245, Korea

Abstract - In order to overcome for the problem that the existing CFT column required complex beam-column joints, CFT column manufactured by combining triangular units and CFT column with a double web were developed. In the case of the CFT column manufactured as a triangular unit, the same effect as that of installing the stiffener can be expected since the corner of the triangular unit is located at the center of each face, and the CFT column with double web is expected to have excellent manufacturing and workability. In order to verify the resistance performance of the developed CFT column against the tensile force, a existing CFT and developed were manufactured and plates were installed on both sides to apply the tensile force. As a result of the experiment, the CFT column to which the triangular unit was combined showed a more uniform load distribution on the plate compared to the existing CFT column, but was brittle destroyed at both ends of the plate. Among them, the CFT column with the double web can secure both strength and ductility, indicating that it is structurally excellent.

Keywords - Square shape steel tube, Tensile force, Nonuniform load distribution, Yield strength, With-thickness ratio

1. 서론

최근 도시의 사무실 및 상업용 건물은 한정된 부지의 효율적인 이용을 위하여 고층화되고 있으며 이러한 건축물의 고층화로 기둥과 보와 같은 주요 부재와 접합부는 지진에 의한 반복하중에 견딜 수 있도록 높은 연성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 또한, 초고층 건축은 용도가 다양하고 복

잡하기 때문에, 종래의 구조적 제약 조건을 극복하고 장스팬 구조 및 공간의 효과적 이용을 가능하게 하는 구조형식이 요구되고 있다.

일반적으로 사용되는 콘크리트 충전 각형강관(concrete filled tube, CFT)은 인장강도가 높은 강관을 외부에 배치하여 모멘트에 효과적으로 저항하고, 압축력에 효과적으로 저항하는 콘크리트를 내부에 타설하는 합성기둥이다. 강관이 콘크리트를 구속하여 구속효과(confining effect)에 의한 압축력에 대한 저항성능의 향상을 기대할 수 있고 콘크리트에 의해 강관의 국부좌굴을 방지하기 때문에 높은 강도와 연성을 확보할 수 있는 우수한 합성구조시스템이다. 건축구조기준(KBC 2016)에서는 CFT기둥은 구조성능 및 연성확보를 위해 기둥의 단면의 폭(B)에 대한 강관의 두께(t)의 비율인 판폭두께비(B/t)를 제한하고 있다. 판폭두께비의

Note.-Discussion open until June 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 25, 2021; revised on November 30, 2021; approved on November 30, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-61-330-3129 Fax. +82-61-330-3103

E-mail. yang1698@dsu.ac.kr

제한으로 작은 모멘트와 큰 압축력이 작용하는 기둥에 필요 이상의 두꺼운 강판을 사용해야 하기 때문에 경제성을 확보하기 어렵다. 또한, 기둥과 보의 접합시 보에서 전달되는 하중을 기둥에 전달하기 위해서 다이아프램이 설치되기 때문에 CFT기둥의 제작성, 시공성 및 경제성을 저하시키는 원인이 된다^{[3],[6]}.

이러한 기존 CFT기둥의 문제점을 보완하기 위해서 4개의 삼각유닛을 결합하여 제작하는 삼각유닛 각형강관기둥(이하 EZ기둥, Fig. 1(a) 참조)과 두 개의 웨브를 갖는 각형강관기둥(이하 DW기둥, Fig. 1(b) 참조)을 제안하였다^[7].

EZ기둥의 경우 삼각형 형태의 유닛을 4개 결합하여 제작하여 삼각형의 모서리가 맞대어 용접된 곳이 기둥면의 중앙에 위치하기 때문에 기둥면 중앙에 스티프너를 설치한 것과 같이 기둥면의 국부좌굴을 방지하는 역할을 한다. 따라서, EZ기둥을 설계시 판폭(B)의 길이를 원래 기둥의 폭의 절반으로 사용할 수 있기 때문에 제작에 사용되는 강판의 두께를 줄여 경제적인 설계가 가능하다. 또한, 보에서 전달되는 하중을 저항하기 위한 다이아프램의 설치가 필요 없기 때문에 제작성 및 시공성이 우수할 것으로 판단된다. 이 연구에서는 개발된 EZ기둥의 축직각 방향으로 작용하는 인장력에 대한 저항성능을 검증하기 위해서 개발 기둥에 플레이트를 설치하여 인장력을 가력하는 실험을 수행하였다. DW기둥의 경우 수평 다이아프램의 설치가 용이하기 때문에 보에서 전달되는 하중에 저항성능을 극대화할 수 있고 제작성과 시공성이 우수할 것으로 판단된다.

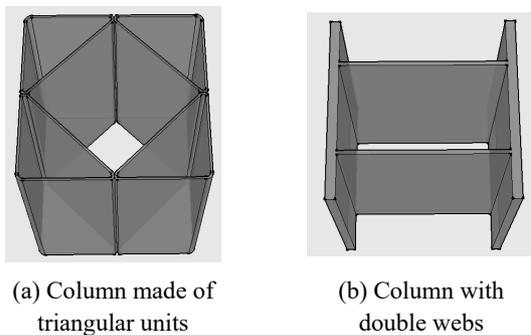


Fig. 1. Concept of steel column

2. 실험계획

2.1 실험체

삼각유닛으로 구성된 강관기둥에 인장력이 집중하중의

형태로 작용할 경우 기둥에 대한 저항성능을 확인하기 위해서 기둥의 종류, 강판의 두께를 변수로 총 4개의 기둥을 제작하였다. 실험체의 이름과 변수를 정리하여 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Detail of specimens

Specimens	B (mm)	t (mm)	B_p (mm)	t_p (mm)	f_{ck} (MPa)
EZ-4C	400	4	175	12	24
EZ-12C	400	12	200	16	24
DW-9C	400	9	200	16	24
HSS-7C	400	7	175	12	24

삼각형 유닛으로 제작된 EZ계열의 실험체는 Fig. 2(a)와 같이 각각 4 mm와 12 mm 두께의 강판을 사용하여 제작하였으며, DW기둥은 9 mm 두께의 강판을 사용하여 제작하였다. 일반 각형강관인 HSS계열의 실험체의 경우 7 mm 두께의 강판을 사용하여 제작하였다. Fig. 2(b)에 나타낸 것과 같이 콘크리트를 타설하였고, 완성된 실험체는 Fig. 2(c)에 나타낸 것과 같이 UT검사를 통해서 플레이트와 기둥의 용접부의 결함이 없음을 확인하였다.

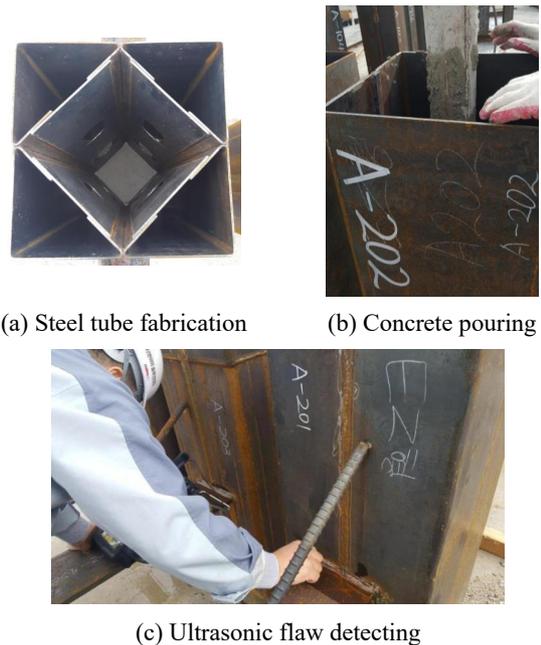
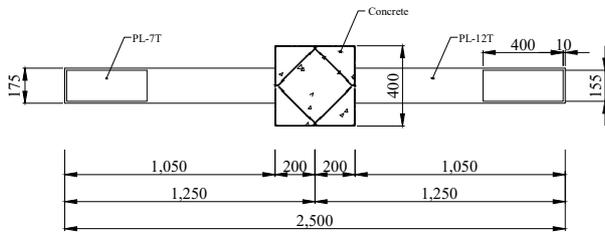


Fig. 2. Process of fabricating the specimens

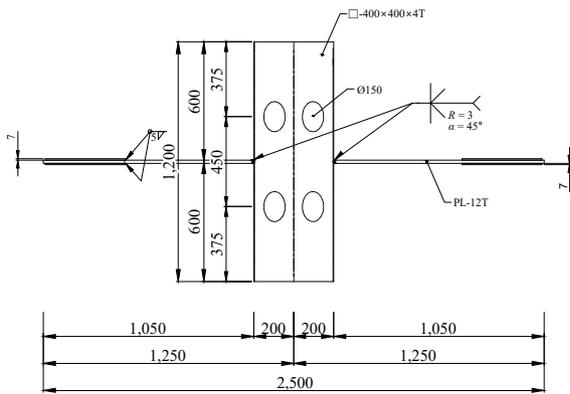
모든 실험체 기둥 단면은 Figs. 3-6에 나타낸 것과 같이 400 mm × 400 mm이며, 기둥의 높이는 1,200 mm이다. 기둥

의 양쪽에는 인장력의 도입을 위해서 길이 1,035 mm의 플레이트를 용접하였다. EZ-4C 실험체와 HSS-7C 실험체에 사용된 플레이트의 폭과 두께는 각각 175 mm와 12 mm이며, EZ-12C와 DW9C 실험체에는 높은 인장력을 도입하기

위해서 폭과 두께가 각각 200 mm와 16 mm의 강판을 사용하였다. 플레이트의 양끝단의 단부에서 400 mm 떨어진 구간까지 고정용 지그에 의한 파괴를 방지하기 위해서 7 mm의 강판을 상부와 하부로 용접하여 보강하였다.

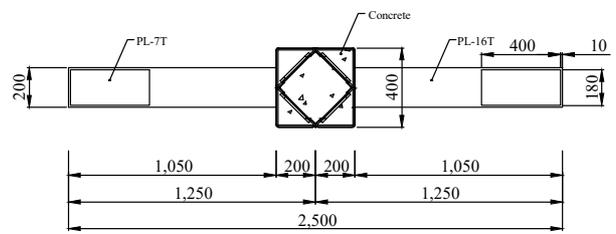


(a) Sectional drawing

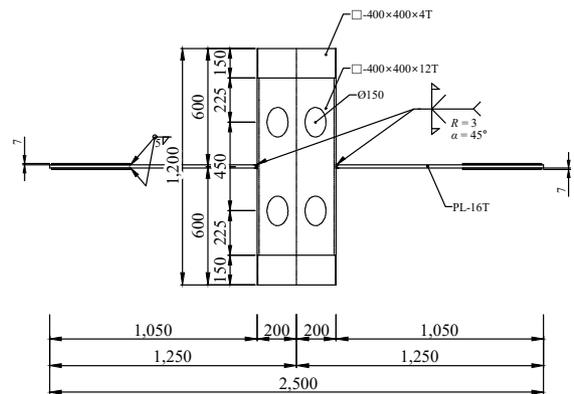


(b) Elevation drawing

Fig. 3. Specimen EZ-4C

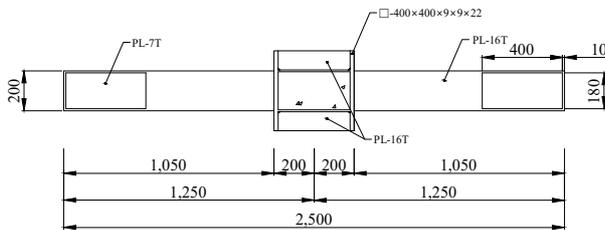


(a) Sectional drawing

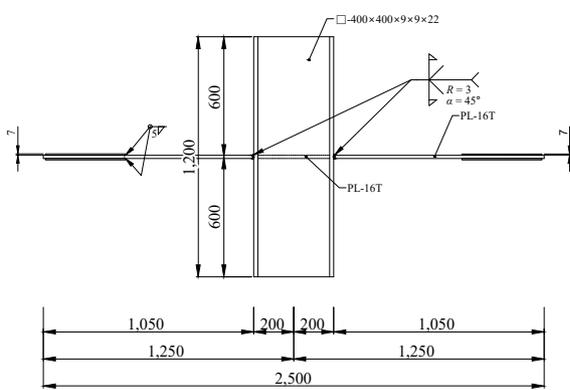


(b) Elevation drawing

Fig. 4. Specimen EZ-12C

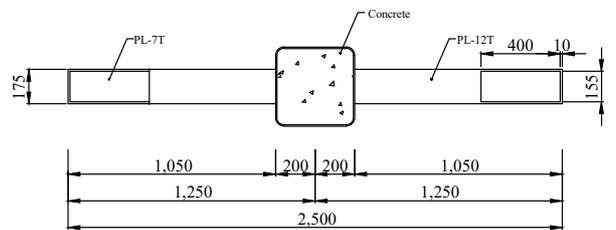


(a) Sectional drawing

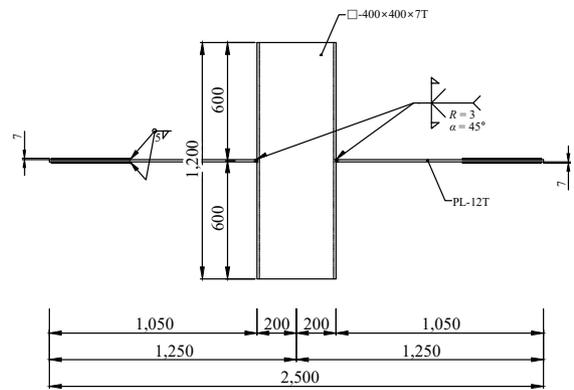


(b) Elevation drawing

Fig. 5. Specimen DW-9C



(a) Sectional drawing



(b) Elevation drawing

Fig. 6. Specimen HSS-7C

2.2 재료시험

모든 실험체는 SM355 강재를 사용하여 제작하였으며, 강재의 두께에 따라서 3번의 재료시험을 수행하여 평균값을 Table 2에 나타내었으며, 항복강도는 355.0 MPa - 446.1 MPa 이다. 실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 설계압축강도는 24 MPa, 재료시험결과 28일 압축강도는 31.4 MPa이다.

Table 2. Material property

No.	Thickness (mm)	F_y (MPa)	F_u (MPa)	Used part
1	4	355.0	516.0	EZ-column
2	7	446.1	545.3	HSS-column
3	9	373.8	524.2	DW-column
4	12	349.5	527.1	EZ-column and plate
5	16	361.1	545.6	Plate

2.3 계측 및 가력계획

실험체의 플레이트에는 Fig. 7에 나타낸 것과 같이 기둥의 표면에서 100 mm와 200 mm 떨어진 부분에 각각 3개씩의 변형률게이지를 설치하여 플레이트에서 발생하는 변형률을 측정하였다. EZ기둥의 실험체의 경우 플레이트와 접합된 부분에서 100 mm 떨어진 곳에 기둥의 중앙부와 끝단에서 20 mm씩 떨어진 곳과 1/4지점에 3개의 변형률게이지를 설치하여 기둥에서 발생하는 변형을 측정하였다.

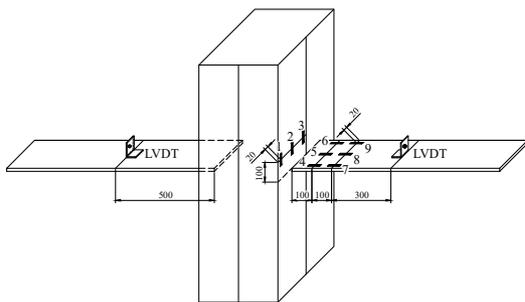


Fig. 7. Measuring plan

실험은 Fig. 8에 나타낸 것과 같이 10 MN 용량의 UTM (universal testing machine)을 사용하여 기둥의 양측에 용접된 플레이트에 인장력을 도입하여 수행하였다. 기둥의 면에서 500 mm 떨어진 곳에 철물을 용접하고 LVDT를 설치하여 인장력을 도입시 UTM의 고정 그립(grip)과 플레이트 사이에서 발생하는 미끄럼(slip)을 측정하였다^[8].

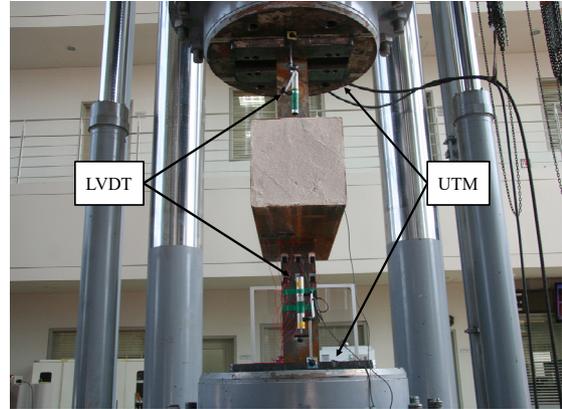


Fig. 8. Specimen setup

3. 실험결과

3.1 하중-변형 및 변형률 곡선

실험체들의 하중-변위 곡선을 Fig. 9에 정리하여 나타내었다. 삼각유닛을 결합하여 제작한 EZ-4C 실험체의 경우 하중 52 kN까지 선형적으로 증가하였으며 이후 강성이 서서히 감소하다가 최대하중 271.2 kN에 도달한 이후 하중이 감소하여 최종적으로 5.5 mm까지 변형이 발생하였다. Fig. 10(a)에 나타낸 것과 같이 최대하중에서 플레이트의 평균변형률은 항복변형률보다 작은 987 μ 로 측정되었다. 기둥 내부에 타설된 콘크리트의 영향으로 기둥에서는 거의 변형이 발생되지 않았다. 기둥과 플레이트의 접합부의 양단에서 Fig. 11(a)에 나타낸 것과 같이 파괴되었다.

12mm 두께의 강판을 사용하여 제작한 EZ-12C 실험체의 경우 높은 강성을 가지고 1,044.6 kN까지 선형적으로 하중이 증가하였으며 강성이 점차 감소하다가 하중 1,305.9 kN에서 플레이트에서 항복이 발생하였으며, 하중의 증가 없이 변형만 40 mm까지 증가하였다. 이후 하중이 점차 증가하다가 최대하중 1,437.6 kN에서 Fig. 11(b)에 나타낸 것과 같이 기둥과 플레이트의 접합부 양끝단이 파괴되었다. Fig. 10(b)에 나타낸 것과 같이 최대하중에서 플레이트의 변형률은 항복변형률보다 큰 것을 확인할 수 있다.

두 개의 웨브를 가진 DW-9C 실험체의 경우 가장 높은 강성을 가지고 819.9 kN까지 선형적으로 하중이 증가하였으며 최대하중 1,110.9 kN까지 강성이 점차 감소하며 하중이 증가하였다. 최대하중에 도달한 이후 Fig. 11(c)에 나타낸 것과 같이 기둥과 플레이트의 접합부 양끝단에서 파괴가 발생하며 실험이 종료되었다.

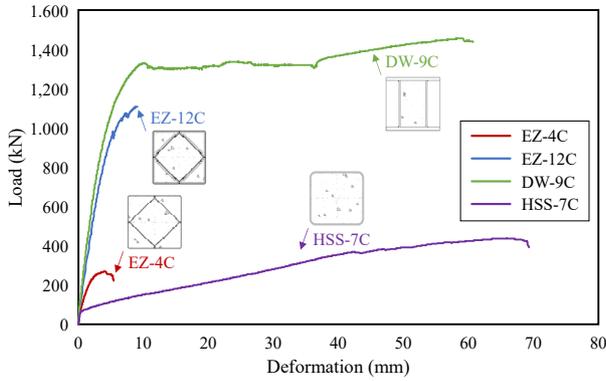
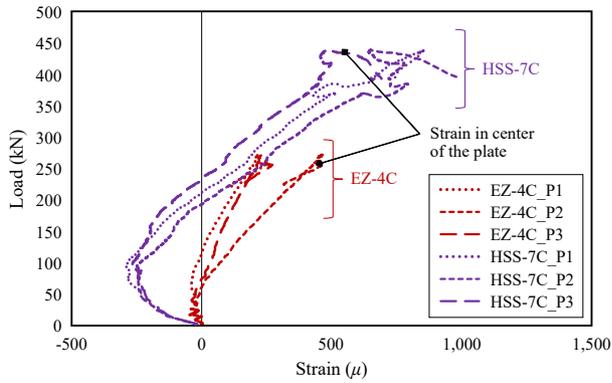
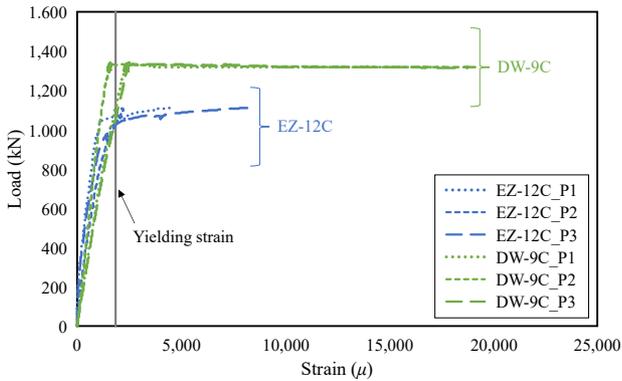


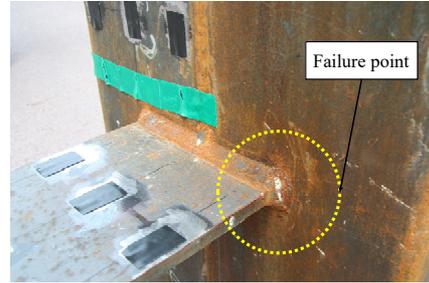
Fig. 9. Load-deformation relationship curve



(a) Strain in plate of specimen EZ-4C and HSS-7C



(b) Strain in plate of specimen EZ-12C and DW-9C



(a) Specimen EZ-4C



(b) Specimen EZ-12C



(c) Specimen DW-9C



(d) Specimen HSS-7C

Fig. 11. Final failure shape of specimens

7 mm 두께의 강판을 사용하여 2심(two seam) 용접으로 제작된 HSS-7C 실험체는 하중 55 kN까지 선형적으로 증가하였다. 이후 기둥 표면에서 변형이 발생하기 시작하여 감소된 강성을 가지고 하중이 선형적으로 증가하였으며, 최대 하중에 도달하기 전에 강성이 점차 감소하면서 최종적으로 Fig. 11(d)와 같이 플레이트의 양끝단과 용접된 기둥면에서 강판이 찢어지면서 파괴되었다. 모든 실험체의 최대강도는 Table 3에 정리하여 나타내었다.

Table 3. Strength of specimens

Specimens	B_{ep} (mm)	$P_{cal.}$ (kN)	P_{max} (kN)	$P_{max}/P_{cal.}$
EZ-4C	35.0	49.7	271.2	5.46
EZ-12C	120.0	503.3	1,110.9	2.21
DW-9C	200.0	1,196.0	1,437.6	1.20
HSS-7C	30.6	95.6	438.3	4.58

B_{ep} : effective width, $P_{cal.}$: expected strength, P_{max} : experimental strength

3.2 실험결과 분석

KBC 2016에서 강관의 축에 직각으로 집중하중이 작용하는 기둥의 강도는 비균일하중분포로 인한 국부항복, 전단항복(뿔림), 측벽강도 중에서 가장 작은 값을 사용하도록 제시하고 있다. 비균일하중분포로 인한 국부항복은 각관의 판폭두께비에 따라서 플레이트의 양단부에서 큰 변형이 발생하며 이후 단부에서부터 항복이 발생하며 파괴된다. 이러한 비균일하중분포로 인한 응력집중현상(stress concentration effect)이 고려된 국부항복강도는 식 (1)과 같이 산정할 수 있다^{[2],[5]}.

$$R_{n,1} = [10F_y t / (B/t)] B_p \quad (1)$$

여기서, B 와 B_p 는 각각 기둥과 플레이트의 폭이며, F_y 와 F_{yp} 는 각각 기둥과 플레이트의 항복강도, t 와 t_p 는 각각 기둥과 플레이트의 두께이다. 이 강도는 플레이트의 항복강도인 $F_{yp} t_p B_p$ 를 초과할 수 없으며, 판폭두께비(B/t)가 10 이상인 경우 플레이트의 항복강도에 의해서 강도가 결정된다.

전단항복의 한계상태도 비균일한 하중분포가 고려된 유효폭인 B_{ep} 를 도입하여 식 (2)와 같이 산정한다.

$$R_{n,2} = 0.6F_y t [2t_p + 2B_{ep}] \quad (2)$$

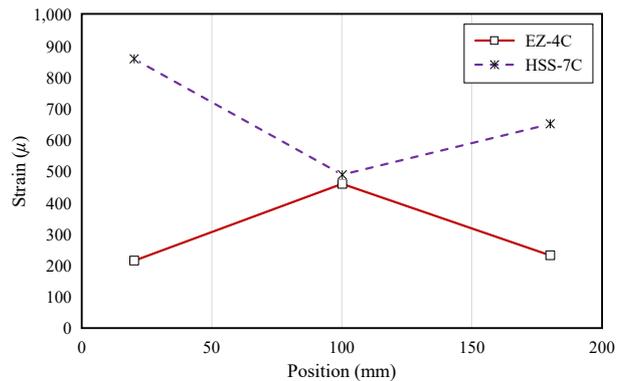
여기서, B_{ep} 는 $10B_p/(B/t)$ 으로 산정하고 B_p 이하로 산정할 수 있다.

기둥 측벽에서 발생하는 국부항복의 한계상태를 검토해야 하며, 측벽 국부항복강도는 식 (3)과 같이 산정이 가능하다.

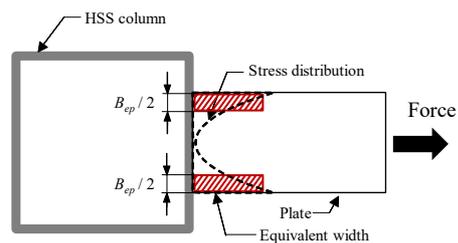
$$R_{n,3} = 2F_y t [5k + t_p] \quad (3)$$

실험체의 플레이트에 설치된 게이지를 통해서 최대하중시점에서 측정된 인장변형률을 Fig. 12(a)에 나타내었다. 플레이트의 일반적인 형태인 각형강관으로 제작된 HSS-7C 실험체에 설치된 플레이트 양단부에서는 비균일한 하중분포에 의해서 큰 변형률이 발생하고 중앙부에서는 상대적으로 작은 변형률이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 삼각형 유닛으로 제작한 EZ계열의 실험체에서는 Fig. 12(a)에 나타낸 것과 같이 플레이트 중앙부에 설치한 게이지에서 큰 변형이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 따라서, Fig. 12(c)에 나타낸 것과 같이 EZ계열의 실험체의 비균일하중분포

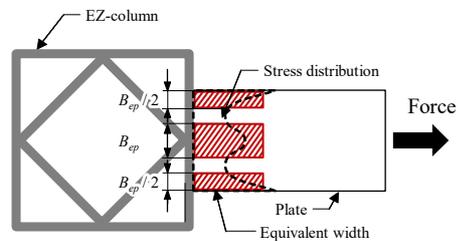
로 인한 국부항복강도와 전단항복강도를 산정할 때 사용되는 유효폭(B_{ep})을 2배로 증가시켜 계산하였다. 계산된 강도는 실험체의 강도와 비교하여 Table 3에 나타내었으며, 모든 실험체에서 실험체의 최대내력이 계산된 강도보다 크게 측정되어 유효폭을 증가시켜서 강도를 산정해도 충분한 안정성을 확보할 수 있음을 확인하였다.



(a) Strain in plate



(b) HSS column



(c) EZ column

Fig. 12. Comparison of equivalent widths of plate welded HSS column and EZ column

4. 결론

기존의 CFT기둥의 단점을 보완하기 위해서 삼각유닛으로 구성된 EZ기둥과 DW기둥을 개발하였고 개발된 기둥의 인장력에 대한 저항성능을 검증하기 위해서 인장력을 가력하는 실험을 수행하였다. 실험결과를 기반으로 아래와 같은 결론을 도출하였다.

- (1) 실험결과를 기반으로 판단했을 때 KBC에서 제안하고 있는 비균일하중분포로 인한 국부항복강도는 실험체의 강도를 다소 과소평가하는 것을 확인하였다.
- (2) 제작된 모든 실험체는 비균일하중분포로 인한 국부항복, 전단항복(뿔림), 측벽강도 중에서 국부항복에 의해서 강도가 결정되었으며, 삼각형 유닛으로 제작한 실험체에서는 플레이트의 중앙부에서도 인장변형이 발생하여 유효폭을 향상시켜 강도를 증가시키는 것을 확인하였다.
- (3) DW 실험체는 높은 강도와 강성을 확보할 수 있으며 플레이트가 완전히 항복하고 파괴될 때까지 충분한 연성을 확보할 수 있기 때문에 구조적으로 우수한 것으로 판단된다.
- (4) 삼각형 유닛을 결합하여 제작한 EZ계열 실험체의 경우 사재의 기여분으로 내력은 증가하지만, 취성적인 파괴를 보이기 때문에 접합부로 사용하기 위해서는 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 20CTAP-C158218-01).

참고문헌(References)

- [1] Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code-Structural*, AIK, Korea (in Korean).
- [2] Chung, J., Seo, S., Matsui, C., and Choi, S. (2005) Hysteresis Behavior of Square Tube Columns to H-Beam Connections with Vertical Stiffeners, *Advances in Structural Engineering*, Sage, Vol.8, No.6, pp.561-572.
- [3] Choi, S., Lee, S., Hong, S., and Kim, J. (2009) Structural Capacities of Tension Side for CFT Square Column-to-Beam Connections with Combined-Cross Diaphragm, *Advances in Structural Engineering*, Sage, Vol.11, No.2, pp. 209-227.
- [4] Elremaily, A., and Aziznamini, A. (2001) Experimental Behavior of Steel Beam to CFT Column Connections, *Journal of Constructional Steel Research*, Elsevier, Vol.57, No.10, pp. 1099-1119.
- [5] Fukumoto, T., and Morita, K. (2005) Elastoplastic Behavior of Panel Zone in Steel Beam-to-Concrete Filled Steel Tube Column Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.131, No.12, pp.1841-1853.
- [6] Kim, K., Lee, H.-W., Kim, Y.-K., Kim, T., and Kim, J.-H. (2017) Structural Strength of Beam-to-CFT Connections with Vertical Diaphragm, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp.237-247 (in Korean).
- [7] Oh, J.Y., Lee, S.J., Choi, H., Choi, S.-M., and Yang, I.S. (2020) Behavior of Square Steel Pipe Joints Under Tensile Force, *Journal of the Korean Society for Advanced Composite Structures*, KOSACS, Vol.11, No.6, pp.78-85 (in Korean).
- [8] Choi, Y.H., Kim, S.B., Baek, K.Y., and Kim, S.S. (2020) Seismic Performance Evaluation of the Connection Between the CFT Column with Built-up Square Shape Steel Tube (D-Column) and the HyFo Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.1, pp.43-53 (in Korean).

요약: 기존 CFT기둥이 접합부가 복잡하다는 문제점을 보완하기 위해서 삼각유닛을 결합하여 제작하는 CFT기둥과 이중으로 웨브가 설치된 CFT기둥을 개발하였다. 삼각형 유닛으로 제작된 CFT기둥의 경우 각관이 중앙부에 삼각형 유닛의 모서리가 위치하기 때문에 스티프너를 설치한 것과 동일한 효과를 기대할 수 있으며, 이중 웨브 CFT기둥의 경우 스티프너 설치가 용이하여 제작성 및 시공성이 우수할 것으로 기대된다. 개발기둥의 인장력에 대한 저항성을 검증하기 위해서 일반 각형강관과 개발기둥을 제작하여 양측면에 플레이트를 설치하여 인장력을 도입하는 실험을 수행하였다. 실험결과 삼각유닛을 결합한 CFT기둥은 기존의 CFT기둥과 비교했을 때 플레이트에 보다 균일한 하중분포를 보였지만, 플레이트 양단에서 취성적으로 파괴되는 현상을 보였다. 이중으로 웨브를 설치한 CFT기둥은 강도 및 연성을 모두 확보할 수 있어 구조적으로 가장 우수한 것으로 나타났다.

핵심용어: 각형강관, 인장력, 비균일하중분포, 항복강도, 판폭두께비