

충전형 합성보와 포밍앵글 기둥 접합부의 내진성능에 대한 실험적 평가

Experimental Evaluation on Seismic Performance of Filled Composite Beam - to - Forming Angle Composite Column Connections

김형섭¹⁾ · 이경구^{2)*} · 구지모³⁾

Kim, Hyoung Seop¹⁾ · Lee, Kyungkoo^{2)*} · Koo, Jimo³⁾

¹⁾(주)씨지스 플랜, 대표이사 ²⁾단국대학교, 건축공학과, 교수 ³⁾단국대학교, 건축공학과, 석사과정

¹⁾CEO, CGS PLAN ²⁾Professor, Department of Architecture, Dankook University ³⁾Master's Course, Department of Architecture, Dankook University

/ A B S T R A C T /

In this study, the seismic performance of connections between filled composite beam (CG beams) and forming angle composite (FAC) column was experimentally evaluated. First, the bending tests were conducted on two CG beams and the axial tests were conducted on two FAC columns. Then, based on these preliminary test results, the cyclic loading test were performed on two interior connections between CG beam and FAC column. The main difference of two specimens is the plate shape of the CG beam. The test results showed that both specimens achieved the maximum story drift capacity over 0.04 radian which is required for special moment frame.

Key words: Filled composite beam, Forming angle composite column, Connection test, Seismic performance, special moment frame

1. 서론

현재 국내 건설시장에서는 경제성, 안전성 및 시공성 향상에 대한 관심이 증가되면서, 구조물 용도 및 구조시스템 형식에 따라 필요시 합성보나 합성기둥이 널리 적용되고 있다. 이에, 합성구조에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 특히 선조립기둥과 거푸집을 삭제한 충전형 합성보 개발이 활발하다. 또한, 내진설계를 위해 개발된 합성구조시스템의 내진접합부 연구도 지속적으로 진행되고 있다.

CG 합성보는 강재와 콘크리트의 장점들을 결합하여 개발된 거푸집을 제거한 충전형 합성보로, 볼트로 조립하여 다양한 단면을 만들 수 있다는 것이 특징이다. 이 합성보는 Fig. 1에서와 같이 단면 최외곽부에 강판을 배치하여 단면강성 증가를 통한 층고절감과 강재 물량 절감이 가능하다. 또한 강판이 모두 볼트로 결합되어 대량생산과 품질확보가 가능하다.

한편, 이 연구에서 CG 합성보와 접합되는 포밍앵글합성 (Forming Angle Composite, FAC)기둥은 절곡앵글과 띠철근을 용접하여 공장에서 선조립한 합성기둥이다. FAC 기둥은 공장조립을 통해 현장에서의 작업량

을 감소시키고 공사기간을 단축시킨다. 또한, 기둥 단면에 강재를 효율적으로 배치하여 공사비 절감 효과가 있으며, 동바리 및 비계 삭제를 통해 깨끗한 현장관리 및 품질 향상이 가능하다.

이 연구에서는 CG 합성보와 FAC 기둥의 성능을 기반으로, 조립형 합성보(CG 합성보)와 포밍앵글합성기둥(FAC 기둥) 접합부에 대한 내진성능을 실험적으로 평가하였다. 이를 통해 CG 합성보-FAC 기둥 골조의 지진력저항시스템 수준을 제시하였다.

2. 부재단위 사전 성능평가

2.1 합성보 성능평가

CG 합성보는 Fig. 1에서와 같이, 콘크리트 보 단면의 측면과 하단의 강판을 볼트로 접합한 조립형 합성보이다. 이 합성보에는 측면강판 상부를 보외부로 절곡하여 전단연결재를 설치한다. 또한 조립형 강판이 거푸집 역할을 하므로 콘크리트 타설 시 강판의 변형을 방지하기 위하여 일정간격마다 측면강판 상부 사이에 조립용 평철을 설치하였다.

Fig. 1의 단면을 가진 두 개의 CG 합성보 성능을 평가하였다. Case 1(CG - 400 × 300 × 6)의 경우, 보 깊이 400 mm, 보 너비 300 mm, 강판

*Corresponding author: Lee, Kyungkoo

E-mail: kkleee@dankook.ac.kr

(Received August 12, 2015; Revised December 2, 2015; Accepted December 2, 2015)

두께 6 mm인 합성보이고, Case 2(CG - 500 × 300 × 6)의 경우 보 깊이 500 mm, 보 너비 300 mm, 강판 두께 6 mm인 합성보이다. 보 상부의 슬래브 두께는 150 mm이다. 보의 강판은 모두 볼트로 결합되었고, 슬래브와 강판 사이의 전단연결재로 지름 16 mm, 높이 150 mm의 스티드를 사용하였다.

콘크리트의 기준설계압축강도는 24 MPa, 실험압축강도는 28.8 MPa이다. 모든 강재는 공칭항복강도가 235 MPa인 SS400을 사용하였고, 강판의 평균 실험항복강도는 308 MPa이다.

Fig. 2와 같이 단순지지보에 U.T.M을 사용하여서 2점 단조 가력하였다 [1]. 2점 가력 부분과 실험체 중앙에 LVDT를 설치하였다.

모멘트는 2점 가력 하중(P/2)에 지점에서부터 하중작용점까지의 길이 (2600 mm)를 곱하여서 산정하였다. 2점 가력 점 사이의 균일 모멘트 구간의 곡률은 3개의 LDVT에서 측정된 변위를 사용하여 식(1)에 따라 산정하였다[2].

$$\phi = \left(\frac{2(Disp_C - Disp_L)}{l_e^2} + \frac{2(Disp_C - Disp_R)}{l_e^2} \right) / 2 \quad (1)$$

여기서, $l_e = 500$ mm 이다.

Fig. 3은 실험체 중앙부의 모멘트-곡률 관계를 나타낸 것이다. 합성보의 탄성 강성을 파악하기 위하여, 원점에서 최대모멘트의 75%에 해당하는 점까지의 직선 기울기를 $0.75K_e$ 로 정의하고[3], 원점에서 최대모멘트의 50%에 해당하는 점까지의 직선 기울기를 $0.50K_e$ 로 정의하였다. K_a 는 해석적 강성($M/\phi = EI$)으로서 CG 합성보의 합성단면 2차모멘트 ($I_{eq} = I_s + I_{con}$)를 사용하여 산정한 강성이다. 두 실험체 모두 K_a 값이 $0.50K_e$ 와 $0.75K_e$ 의 사이에 있는 것을 확인할 수 있다.

건축구조기준[4]에 따라, 충전형 합성보의 공칭휨강도는 강재단면에 작용하는 소성응력분포를 사용하여 구할 수 있다. Fig. 3에서 공칭항복강도 235MPa를 적용한 기준공칭휨강도를 M_n 으로 표현하였고, 평균실험항복강도 308MPa를 적용한 휨강도를 M_p 로 표현하였다. 두 실험체 모두 실험 최대모멘트(M_u)가 M_p 와 유사하고, M_n 을 크게 초과하였다. 이를 통해 CG 합성보가 기준의 공칭휨강도를 확보하고 있음을 알 수 있다.

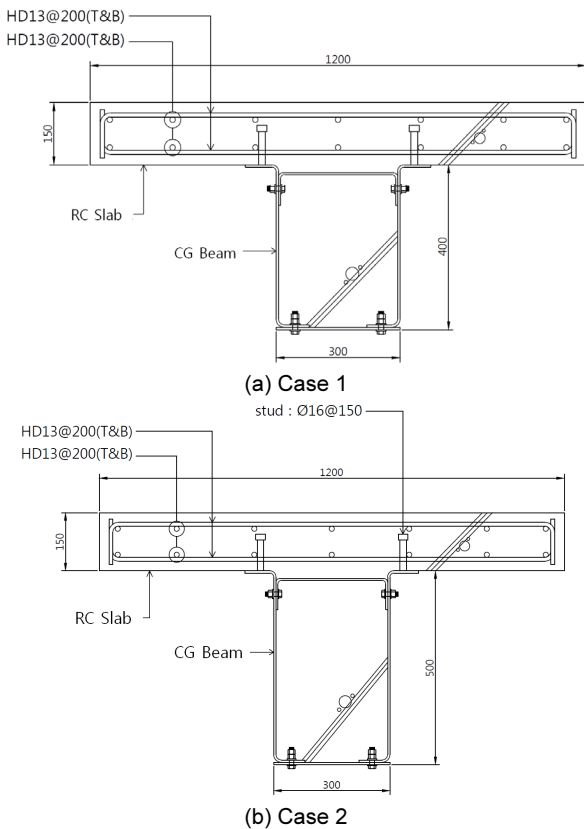


Fig. 1. The shape of specimen CG beam

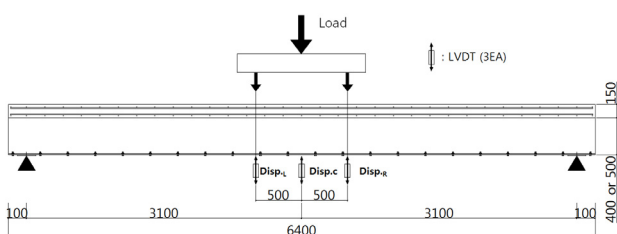
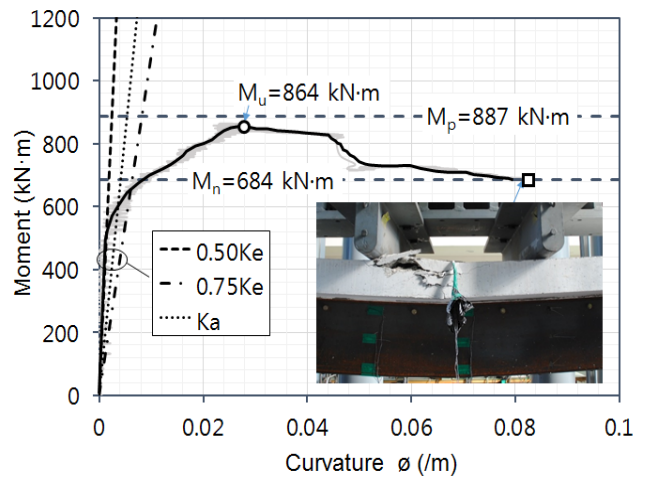
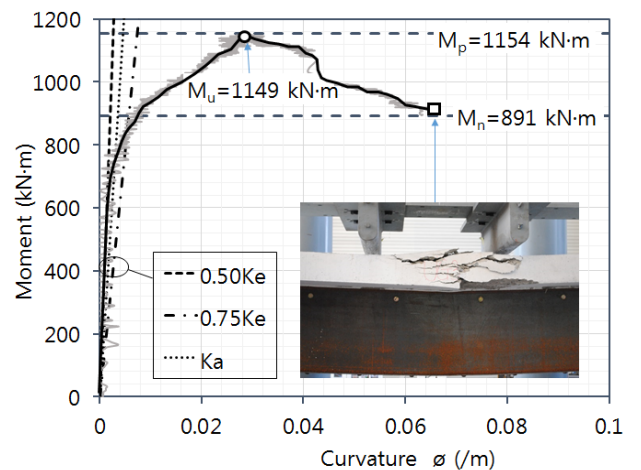


Fig. 2. Test setup



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 3. Moment-curvature relationship

2.2. FAC 기둥 성능평가

FAC 기둥 단면은 Fig. 4에서와 같이 400 mm × 400 mm 크기로 하고, 4개의 γ -70×70×6 절곡앵글과 HD10@200의 띠철근을 적용하였다. 동일 단면크기의 기둥에 대하여 Fig. 5와 같이 길이를 1500 mm와 6000 mm로 달리하여 실험을 수행하였다.

콘크리트의 기준설계압축강도는 24 MPa, 실험압축강도는 28.8 MPa이다. 절곡앵글의 강재는 공칭항복강도가 235 MPa인 SS400을 사용하였고, 평균 실험항복강도는 308 MPa이다. 띠철근의 강재는 SD400을 사용하였다.

실험체 형상 및 구성은 Fig. 5와 같다. 기둥 상·하부는 핀접합으로 지지되었고, 10,000 kN 용량의 U.T.M으로 가력 시 편심이 없도록 지그를 제작하였다. 두 실험체 순높이는 각각 1500 mm(단주)와 6000 mm(장주)이지만, 지그로 인하여 실제 가력점과 지지점 사이의 유효 높이는 상하로 150 mm씩 추가되어 1800 mm와 6300 mm이다. 기둥 상·하 강판의 모서리에 대각선으로 두 개의 LVDT 변위계를 사용하여 축방향 수직 변위를 계속하였다[3].

Fig. 6은 압축력과 변형률의 관계를 보여주는 그래프이다. 변형률은 측정된 두 개의 LDVT의 평균값에 기둥의 순높이로 나누어서 산정하였다.

공칭압축강도 P_n 은 건축구조기준[4]에서 제시한 식 (2)~(4)를 사용하여 산정하였다.

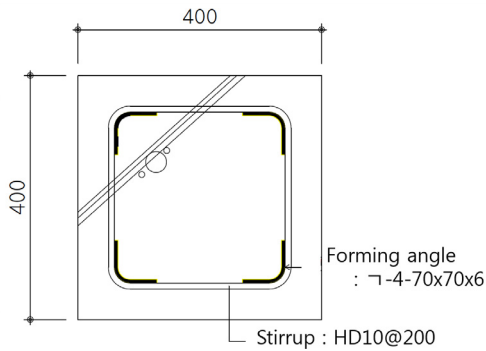


Fig. 4. FAC column section

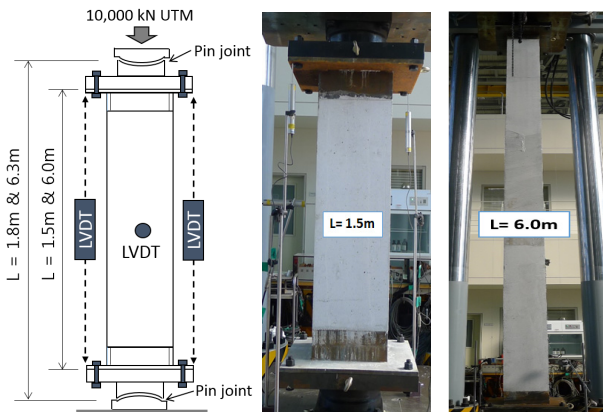


Fig. 5. FAC column test setup

$$P_n = P_0 \cdot 0.658^{(P_0/P_c)} \tag{2}$$

$$P_o = A_s F_y + A_{sr} F_{yr} + 0.85 f_{ck} (A_g - A_s - A_r) \tag{3}$$

$$P_c = \pi^2 (EI_{eff}) / (KL)^2 \tag{4}$$

여기서, P_o = KBC2009에 의한 합성기둥 단면의 최대압축강도

F_y = 단면에 배치된 강재의 항복응력

A_s = 강재의 단면적

F_{yr} = 단면의 종방향 강재 항복응력

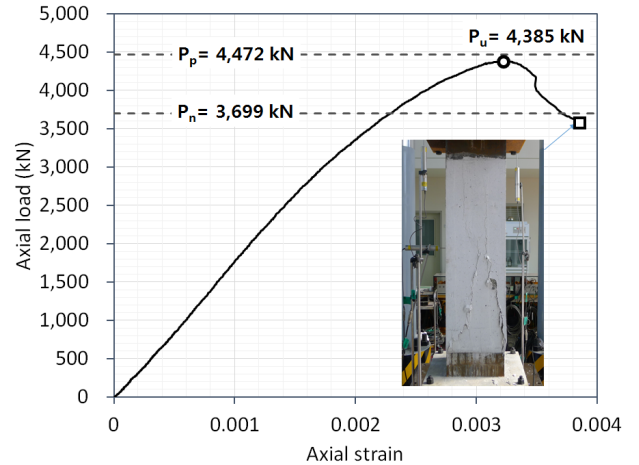
A_r = 종방향 강재의 단면적

P_c = 중심축 압축력에 의한 철근콘크리트기둥의 탄성좌굴하중

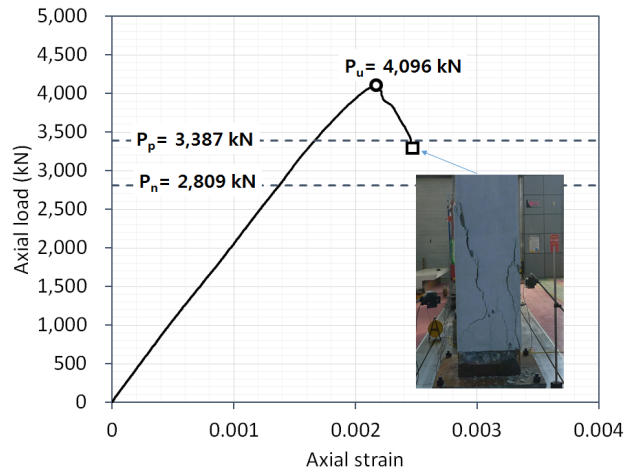
EI_{eff} = 합성기둥의 유효 휨강성

공칭압축강도(P_n) 산정을 위해서는 콘크리트의 압축강도 24 MPa와 강재의 항복강도 235 MPa를 적용하였다. 한편, 실험압축강도(P_p)는 콘크리트 압축강도 28.8 MPa와 강재 항복강도 308 MPa를 사용하여 산정한 값으로 정의하였다. 두 실험체의 최대압축강도, 변형률, 공칭압축강도, 실험압축강도 결과값을 Table 1에 정리하였다.

Fig. 6(a) 단주의 경우, 최대실험하중(P_u)이 4,385 kN이고, 이때의 변형



(a) Short column



(b) Long column

Fig. 6. Load-strain relationship

Table 1. Test result

	Specimens	
	FAC short column	FAC long column
P_u (kN)	4,385	4,096
ϵ_0	0.00323	0.00217
P_n (kN)	3,699	2,809
P_p (kN)	4,472	3,387
P_u/P_p	0.98	1.21

률(ϵ_0)은 0.00323이었다. 최대실험하중은 공칭압축강도(P_n) 3,699 kN를 크게 상회하였고, 실험압축강도(P_p) 4,472 kN의 98%였다. Fig. 6(b) 장주의 경우, 최대실험하중(P_u)이 4,096 kN이고, 이때의 변형률(ϵ_0)은 0.00217이었다. 최대실험하중은 공칭압축강도(P_n) 2,809 kN를 크게 상회하였고, 실험압축강도(P_p) 3,387 kN을 21% 상회하였다. 두 실험체 결과를 통해 FAC기둥이 기준의 압축강도를 확보하고 있음을 알 수 있다.

3. 접합부 내진성능 평가

3.1 접합부 실험계획

CG 합성보와FAC 합성기둥의 접합부에 대하여 실험을 수행하였다. 사용된 CG 합성보와FAC 기둥의 단면은 Fig. 7과 같다. CG 합성보는 앞에서 사전성능 평가한CG 합성보 Case1과 동일한 300 mm × 400 mm 크기이다. FAC 기둥은 800 mm × 800 mm 단면크기를 가졌다. 강기둥-약보 개념을 적용하여 사전평가에서 수행한 기둥보다 큰 단면을 적용하였다.

건물 내부 십자형태의 기둥-보 접합부 상세는 Fig. 8과 같다. CG 합성보와FAC 기둥의 접합부는 기둥 네 모서리 절곡앵글 사이로CG 합성보 강판을 관통시킨다. 기둥과 보가 교차하는 조인트에서는 CG 합성보 하부강판은 관통하지 않고, 측면 강판만을 관통시켜 콘크리트 일체 타설이 가능하도록 하였다.

Fig. 8 (a) Case 1은 상부플랜지가 내부로 접힌 형태로, Fig. 7 (a)의 상부 플랜지가 바깥쪽으로 접혀 있는 경우와 달리, 접합부 Case1의 실험체의 경우 상부플랜지가 안쪽으로 접혀져있는 단면을 사용하여 전단면이 기둥 내부로 관통하도록 하였다(Table 2 단면 참조). Fig. 8 (b) Case 2는CG 합성보의 상부플랜지가 바깥쪽으로 접혀 있는Fig. 7 (a)의 형태이다. 이 경우, 기둥-보 접합부의 안쪽으로 보강판을 설치하여 힘의 흐름에 단절이 없도록 하였다.

각 실험체 제원 및 변수를 Table 2에 정리하였다.

십자형 내부접합부 반복가력실험을 위한 실험체의 크기와 구성은Fig. 9와 같다. 건축구조기준[4]의 7장 강구조내진기준에서 제시하는 반복가력 방법에 따라 2,000 kN 액츄에이터를 사용하여 기둥 상부에 가력 하였다. 즉, 0.00375rad, 0.005rad, 0.0075rad 층간변위각을 6회씩 반복가력하고 이후 0.015rad, 0.02rad, 0.03rad, 0.04rad, 0.05rad, 0.06rad, 0.07rad 층간변위각을 2회씩 반복 가력하였다.

실험체의 보 양단지점 사이의 길이는 6,760 mm이고, 기둥 높이는 3,060

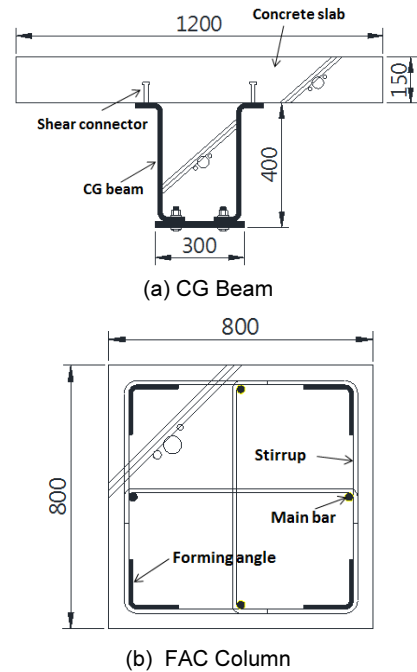


Fig. 7. Beam and column section

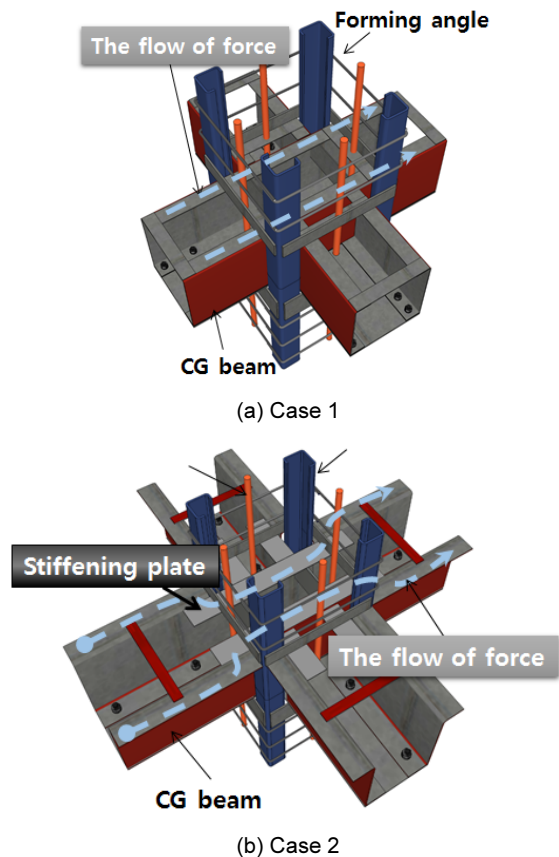


Fig. 8. Connection details

mm이다. 하중이 가력되는 기둥 상부를 제외한 실험체 단부 지지조건은 기둥 하부는 회전단, 보 양단은 이동단이다. 보 양단의 지점에 로드셀을 설치하여 반력을 계측하였다. 슬래브는 면의방향으로 횡지지되었다[2, 5].

Table 2. Material properties for connection specimens

	Case 1	Case 2
CG Composite beam	400 x 300 x 6 x 6(SS400) - Main bar 4-HD25	
FAC Composite column	800 x 800 - Steel angle : \angle -150 x 150 x 12(SM490) - Main bar : 4-HD25(SD400)	
Concrete	fck = 30 MPa Compressive strength(test) = 38 MPa	
re-bar	SD400 Yield strength = 235 MPa Tensile strength = 318 MPa	
Other Steel	SS400	
Stud	ϕ 16@150(L=80~100 mm)	

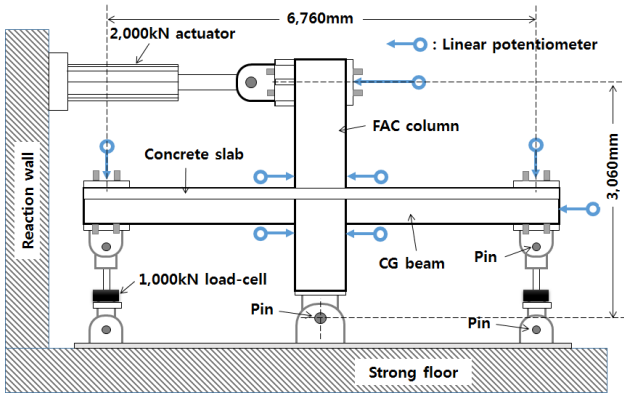
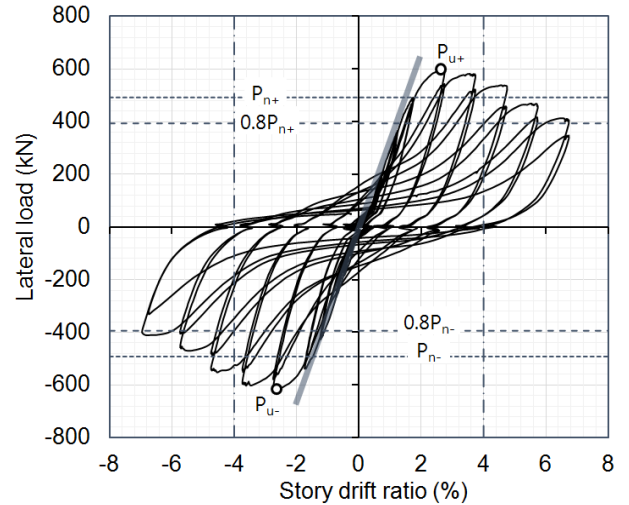


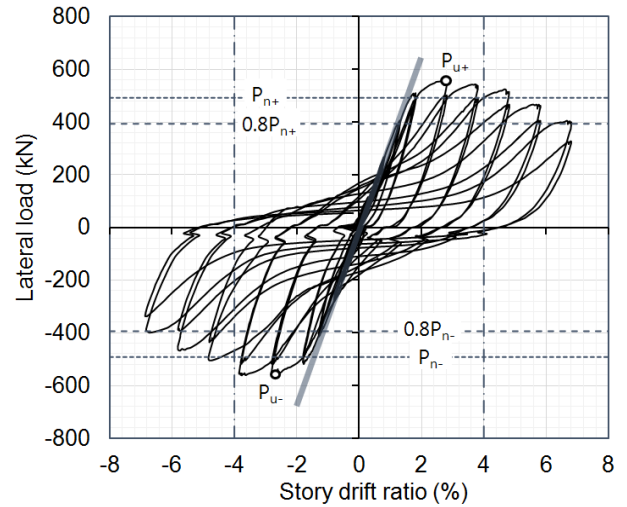
Fig. 9. Connection test setup

3.2 실험결과

십자형 기둥 · 보 접합부의 횡하중과 층간변위비 관계 곡선을 Fig. 10에 나타내었다. 가로축은 층간변위비이고, 세로축은 가력하중이다. CG 합성보의 공칭휨강도에 상응하는 가력 하중을 P_n 으로 정의하였고, 산정된 P_n 은 492 kN이다. Fig. 10 (a) Case 1의 경우, 층간변위비 2.73%일 때 P_n 보다 약 20% 큰 값인 598 kN에서 최대강도(P_u)에 도달하여 충분한 최대내력을 발휘하였고, 그 이후 강도 감소가 진행되어 0.06 radian 층간변위각까지 P_n 의 80% 이상을 유지하였다. Fig. 10 (b) Case 2의 경우, 층간변위비 2.68% 일 때 P_n 보다 약 13% 큰 값인 556 kN에서 최대강도(P_u)에 도달하여 충분한 최대내력을 발휘하였고, 그 이후 강도 감소가 진행되어 0.06 radian 층간변위각까지 P_n 의 80% 이상을 유지하였다[6]. 따라서 접합부의 성능이 건축구조기준에서 요구하는 특수모멘트골조 0.04 radian 층간변위각 값을 만족한다. 한편, Case 2에서 Case 1보다 최대하중이 약 10% 정도 크게 나온 이유는 Fig. 8(b)에서와 같이 상부플랜지의 불연속성을 해소하기 위해 설치한 보강판으로 인해 계산상 반영되지 않는 상부플랜지와



(a) Case 1



(b) Case 2

Fig. 10. Load-story drift ratio relationship

보강판의 중복때문으로 판단된다. 이에 따라 Case 2의 보 소성현지가 Case 1에 비해 기동면에서 보다 떨어져 발생함을 확인하였다.

Fig. 11과 Fig. 12는 보 단부지지점의 로드셀(Fig. 9 참조)에서 측정한 반력에 보 순경간 2,980 mm(즉, 보 지지점으로부터 조인트 경계까지의 길이)를 곱하여 산정한 휨모멘트와 층간변위비의 관계를 보여준다. 비교를 위하여, CG 합성보의 정방향 기준공칭휨강도 M_n^+ = 711 kN 및 부방향 기준공칭휨강도 M_n^- = 618 kN를 수평 점선으로 나타냈다. 한편, 재료 실험항복강도(σ_y)를 반영한 정방향 휨강도 M_p^+ = 957 kN와 부방향 휨강도 M_p^- = 723 kN를 나타내었다. 두 실험체 모두 최대휨강도(M_u^+ , M_u^-)가 CG 합성보의 정방향/부방향 기준공칭휨강도를 크게 초과하였다. 참고로, CG 합성보 단면의 부방향 기준공칭휨강도 산정에서 상부 플랜지의 인장저항을 무시하였다. 또한, 두 실험체 모두 최대휨강도(M_u^+ , M_u^-)가 재료 실험항복강도를 고려한 M_p^+ 와 M_p^- 와 비슷한 값을 보였다. 이 값들의 비교를 Table 4에 정리하였다. 강도 감소 이후 0.06 radian 층간변위각까지 기준공칭휨강도의 80% 이상을 유지함을 재확인할 수 있다[7].

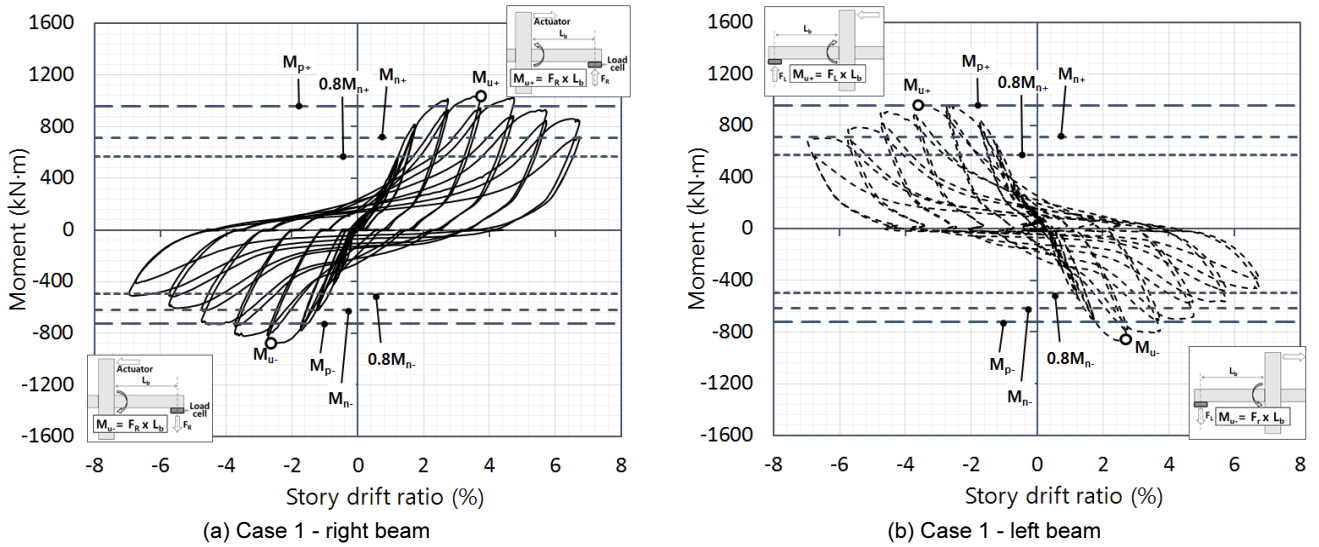


Fig. 11. Moment-story drift ratio relationship

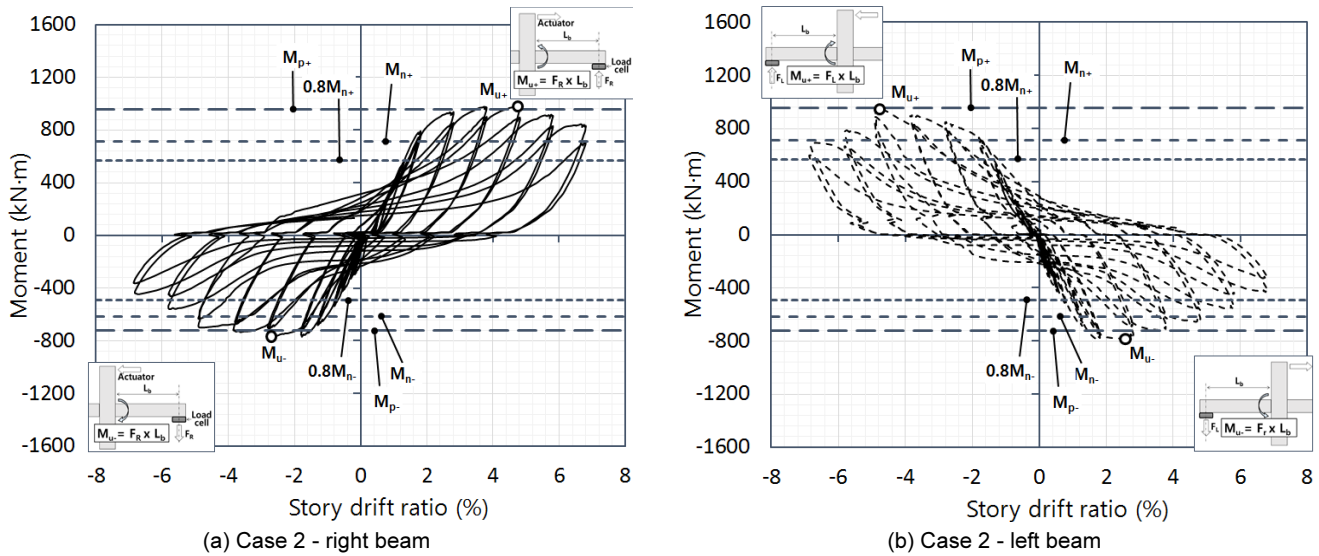


Fig. 12. Moment-story drift ratio relationship

Table 4. Test result

Specimen	M_u^+ (kN-m)	M_u^- (kN-m)	θ_u^{+*} (Radian)	θ_u^{-*} (Radian)	$\frac{M_u^+}{M_n^+}$	$\frac{M_u^-}{M_n^-}$	$\frac{M_p^+}{M_p^+}$	$\frac{M_p^-}{M_p^-}$
Case 1 - right beam	1040	877	3.7	2.7	1.46	1.41	1.08	1.21
Case 1 - left beam	970	867	3.6	2.7	1.36	1.40	1.01	1.20
Case 2 - right beam	983	769	4.7	2.7	1.38	1.24	1.03	1.06
Case 2 - left beam	949	785	4.6	2.5	1.33	1.27	0.99	1.08

* θ_u^+ , θ_u^- : rotation corresponding to the maximum positive · negative moment, respectively

5. 결론

이 연구에서는 충전형 합성보(CG 합성보)와 포밍앵글 합성기둥(FAC 기둥) 접합부의 내진성능을 실험적으로 평가하였다. 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- 1) CG 합성보의 휨성능과 FAC 기둥의 압축성능에 대한 부재단위 성능을 평가하였다. 보와 기둥의 강도가 건축구조기준에서 제시하는 강도를 발현함을 확인하였다.
- 2) CG 합성보와 FAC 기둥의 십자형 내부 접합부 2개 실험체에 대하여 반복하중실험을 수행한 결과, 실험체 모두 기준공칭강도 이상의 내력을 확보함을 확인하였다. 또한, 모멘트-회전각 관계는 급격한 하중 저감 없이 안정적인 거동을 하는 것으로 나타났다.

3) 접합부 실험체 모두 최대내력 도달 후 기준공칭강도의 80% 강도 감소 지점까지 약 0.06 radian의 층간변위각을 확보하는 것으로 나타났다. 따라서 이 시스템은 기준에서 요구하는 특수모멘트골조의 요구층간변위각인 0.04 radian을 만족한다. 이 실험에 적용된 CG 합성보와 FAC 기둥의 접합부는 특수모멘트골조에 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었습니다.

/ REFERENCES /

1. Kim SB, Lee CN, Kim SS. Experimental Study on the Flexural Performance of Bottle Neck TSC Beam, *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 2006 January;22(1):11-17.
2. Eom TS, Hwang HJ, Park HG, Lee CN, Kim HS. Flexural Test for

Prefabricated Composite Columns Using Steel Angle and Reinforcing Bar. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2012 October;24(5):535-547.

3. Hwang HJ, Eom TS, Park HG, Lee CN, Kim HS. Compression Test for Prefabricated Composite Columns Using High-Strength Steel Angles. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2012 August;24(4):361-369.
4. AIK, Korea building code and commentary – structural, Architectural Institute of Korea, c2009.
5. Hwang HJ, Eom TS, Park HG, Lee CN, Kim HS. Cyclic Loading Test for TSC Beam – PSRC Column Connections. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2013 Dec;25(6):601-612.
6. Hwang HJ, Park HG, LEE CH, Park CH, Lee CN, Kim HS, Kim SB. Seismic Resistance of Concrete-filled U-shaped Steel Beam-to-RC Column Connections. *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, 2011 February;23(1):83-97.
7. Kim SJ, Kim SB, Kim SS. Study on the Seismic Performance Evaluation of Beam to System Solumn Connection. *Journal of The Architectural Institute of Korea*, 2007 Mar;23(2):37-44.