

신형상 U형 하이브리드 합성보와 기둥 접합부의 내진성능에 관한 연구

김 성 배¹⁾ · 김 상 섭^{2)*} · 유 덕 수³⁾

¹⁾ 소장, (주)더나은구조엔지니어링 ²⁾ 교수, 한국기술교육대학교, 건축공학부 ³⁾ 대리, (주)더나은구조엔지니어링

Study on the Cyclic Seismic Testing of U-shape Hybrid Composite Beam-to-Composite Column Connections

Kim, Sung Bae¹⁾ Kim, Sang Seup^{2)*} Ryu, Deog Su³⁾

¹⁾ Division Manager, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 150-105, Korea

²⁾ Professor, School of Architecture Engineering, The Korea University of Technology & Education, 330-708, Cheonan, Korea

³⁾ Assistant Manager, The Naeun Structural Engineering, Seoul, 150-105, Korea

ABSTRACT : This study that is a successive secondary study right after the primary bending strength test of a new form of U-shape hybrid composite beam is a cyclic seismic test of U-shape hybrid composite beam and column connection. Three specimens are built for the variables which are kinds of columns, depth of beam, continuity or discontinuity of upper plate of beam, and a number of steel bars of end-beam. Kinds of columns are a reinforcement concrete column and a ACT column of CFT shape, and beam depth are 300, and 500 mm. Detail of connection is bolt connection with using a short bracket that is commonly use. As the result, deformability of 2~4% is ensured the floor displacement angle. If it is the negative moment, the maximum moment shows that its capacity is above the nominal moment.

KEYWORDS : composite beam, hybrid forming beam, seismic performance test, SRC column, concrete filled tube column

1. 서 론

최근 각종 소재가격의 급등은 건축구조분야에도 많은 변화를 불러왔다. 예전에는 시공성 향상을 위해 일부 재료가 더 들어가는 것을 묵과하고 인건비 절감을 지향하였으나, 최근에는 소재가격의 급등으로 강재량을 저감시키기 위해 조립부재 및 합성부재 등을 적용하는 것을 당연히 여기고 있다. 이러한 사회적 요구로 다양한 종류의 합성부재가 기둥과 보, 슬래브 등 각 요소에 걸쳐 연구개발 되어 적용되고 있다^{(1),(2),(3)}.

합성부재 연구개발은 건축구조기준을 만족하는 범위에서 재료의 고강도화, 제작 및 시공성 향상, 컴팩트한 단면활용 등의 방법으로 개발되고 있다. 이에 본 연구에서는 신형상 U형 합성보를 개발하여 합성보 휨실험을 실시하였으며, 그 후속으로 기둥 보 접합부에 대한 내진성능실험을 수행하였다.

신형상 U형 합성보는 상부슬래브와 하부 강판을 스티드커넥터를 이용하여 일체화시키는 시어커넥터를 갖는 노출형 합성보이다⁽⁴⁾. 형상은 Fig. 1과 같이 2개의 대칭되는 Z형의 측판과 π 자 형상의 하부강판, 내부 철근으로 구성되며, 2개의 측판과 하부강판은 고력볼트로 접합한다. 고력볼트 접합기준은 측판과 하부강판의 전단흐름으로 평가하는 방법과 측판과 하부강판의 합성에 의한 수평전단력으로 평가하는 방법으로 구분할 수 있다. 전단흐름(f)으로 검토하는 경우, 측판의 상부는 슬래브와 보의 합성작용으로 스티드커넥터로 연결되어 있으므로, U형 강판보의 중립축을 중심으로 내력을 평가하면 일반적으로 상부 보다 하부에서 계산된 단면1차모멘트가 크다. 합성거동에 의한 수평전단력(V_s)으로 검토하는 경

Note.-Discussion open until August 31, 2013. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on October 15, 2012; revised January 4, 2013; approved on January 25, 2013.
© KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-41-560-1330 Fax. +82-41-560-1244
E-mail: kimss@kut.ac.kr

우, 하부강판과 철근을 포함한 내력이 측판 보다 크므로 하부 강판과 철근의 내력 합으로 볼트간격을 산정할 수 있다. 1차 보 휨 실험결과 수평전단력으로 평가한 볼트간격은 보 길이가 길어지면 볼트 간격이 증가하게 되어 실 건물에서는 전단 흐름에 의한 볼트간격으로 결정된다⁽⁵⁾.

2개의 측판과 하부강판은 모두 포밍에 의한 냉간가공으로 제작하며, 측판과 하부강판은 필요에 따라 두께 및 강도를 상이하게 적용한다. 또한 하부에 설치하는 철근은 고강도철근(SD500)으로 단순보와 같이 하부 플레이트의 내력확보가 필요한 경우 굵은 직경의 철근을 적용한다. 보 내부에는 비구조체인 상부앵글과 하부앵글을 이용하여 1차 제작과정에서 발생할 수 있는 변형을 제어한다. 상부앵글은 작업 중 발판으로 사용하고, 하부앵글은 형태유지와 고력볼트 체결 시 전단면을 1면에서 2면 전단으로 증가시켜 볼트내력을 증가시킨다. 이러한 합성보는 하나의 보에 강도가 상이한 부분이 조합되어 하이브리드보 개념에 포밍으로 냉간가공 하는 특징을 갖는 Hybrid Forming Beam (이하 HyFo Beam)이다.

합성보는 지금까지 정횡모멘트를 받는 단순지지보에 많이 적용되었다. 단순지지보는 슬래브가 큰 압축력을 형성하고, 슬래브 하부의 강재 보가 인장력을 부담한다. 또한 중립축은

로부터 멀리 떨어진 최외단의 단면적이 클수록 단면효율이 증가하게 된다. 이러한 힘의 흐름을 최대한 활용한 형상이 비대칭 H형강과 비대칭 합성보 등이 된다. 최근에는 연속보 또는 기둥 보 접합부에 합성보 적용이 증가하고 있으며, 이때 연속되는 단부는 주로 철근을 이용하여 단부의 부힘모멘트 내력을 분담한다. 그러므로 합성보를 이용한 내진접합부는 일반적인 H형강(또는 각형강관) 기둥 보 접합부와 달리 슬래브를 갖는 접합부로 실험, 연구된다^{(6),(7),(8),(9)}.

건축구조기준 및 해설⁽⁴⁾과 AISC 설계기준^{(10),(11),(12),(13)}에서는 기둥 보 접합부의 층간변위각에 대해 강구조와 합성구조의 내진설계로 구분하고, 중간모멘트골조와 특수모멘트골조의 경우 특별한 내진상세와 강재, 용접조건 등으로 세부적인 상세가 적용된다. 또한 합성구조 내진설계의 경우, 강구조 내진설계와 다소 상이하게 합성중간모멘트골조에 대하여 0.03rad 합성특수모멘트골조에 대하여 0.04rad를 요구하고 있다. 이때, 최대변형에서 보의 공칭소성모멘트능력의 80%가 유지되어야 한다⁽⁴⁾. 반면 보통모멘트골조는 특별한 내진상세가 적용되지 않으며, 철근콘크리트 보의 경우 하부 단부는 압축을 받으므로 철근의 1/3만 150mm 기둥에 정착시키도록 하고 있다. 이러한 이유는 보통모멘트골조의 경우 지진력 등 횡력에 의해 모멘트가 역전되지 않는 등 횡력이 크게 좌우되지 않는 저층의 바닥면적이 넓은 경우에 주로 적용되기 때문으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 신형상 U형 합성보의 기둥 보 접합부의 내진성능실험을 수행하였다. 실험 변수는 기둥의 종류와 보 춤, 보 상부 플레이트 연속유무, 보 단부 철근 수 등을 변수로 3개의 실험체를 제작하여 내진성능을 확인하였다. 기둥 보 접합부의 접합상세는 짧은 브라켓을 이용한 볼트접합이며, 추가적인 단부 보강 없이 접합부 성능을 검토하였으며, 실제 적용하고 있는 상세로 실험체를 제작하여 기초연구를 수행하였다.

2. 실험 개요

2.1 실험 계획

본 연구에서는 보와 기둥 접합부의 실험크기에 대한 내진성능평가를 하였으며, 실험체는 강기둥-약보 설계 개념을 토대로 설계되었다. Table 1은 본 연구에서 변수에 따른 실험체의 구성요소이다. 실험체 형상은 신형상 U형 합성보(HyFo 합성보)와 SRC기둥(또는 CFT기둥)으로 구성되며, 3개의 실험체를 제작하였다. Fig. 2는 접합부 실험체의 상세 예이다.

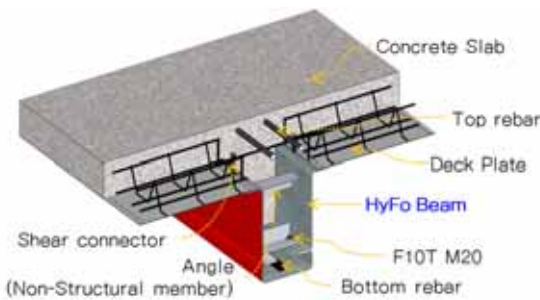


Fig.1 Shape of HyFo Beam

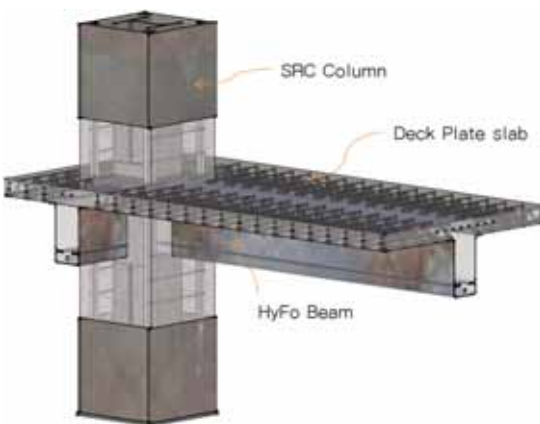


Fig. 2 Connection of HyFo Beam - SRC Column for Seismic Performance Test

Table 1. Specimens for Seismic Test

No.	Specimen	Beam			Column			Slab		Material Strength
		Beam(mm)	Top Rebar	stud(mm) (2-φ16)	Column (mm)	Wide Flange (mm)	Main Rebar	Width (mm)	Thickness (mm)	
01	HF3-S-6	HF-300×270 ×6×6/32	6-HD25	130	800×800	H-350×350×12 ×19	12-HD25	2,000	150	Steel : SM490 $F_y = 325$ MPa Rebar : $f_y = 400$ MPa Reinforced Concrete : $f_{ck} = 27$ MPa
02	HF5-S-8	HF-500×270 ×6×6/32	8-HD25	100	800×800	H-414×405×18 ×28	12-HD25			
03	HF5-A-8	HF-500×270 ×6×6/32	8-HD25	100	618×618	□-618×618× 10.5	-			

HF5 - S - 8

Number of Top Rebar : 6 → 6-HD25, 8 → 8-HD25

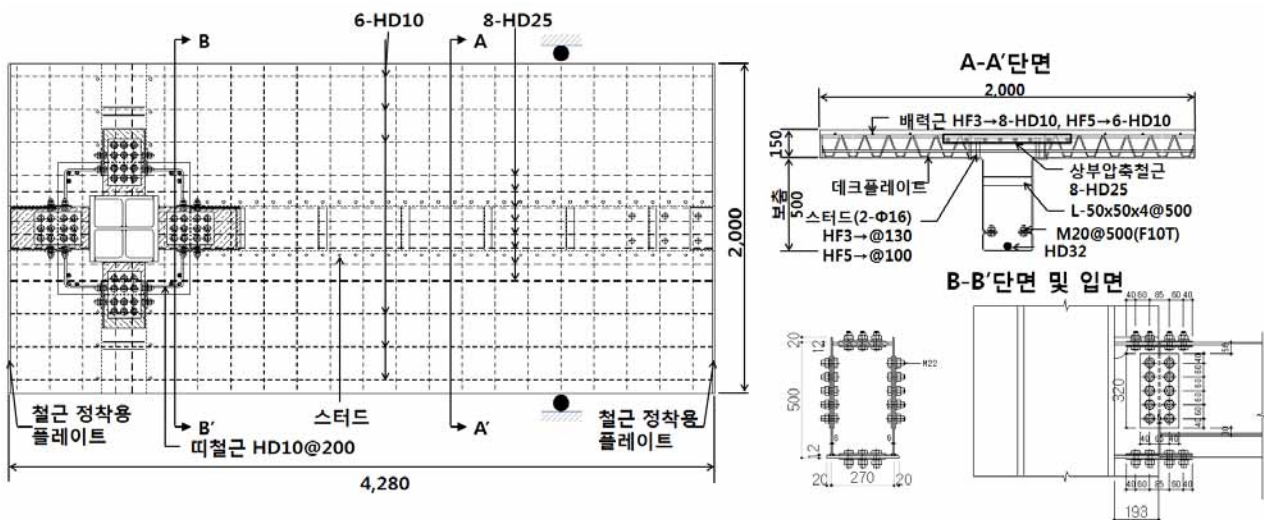
Species of Column : S → SRC Column, A → CFT Column(ACT Column)

Beam Depth : HF3 → 300mm, HF5 → 500mm

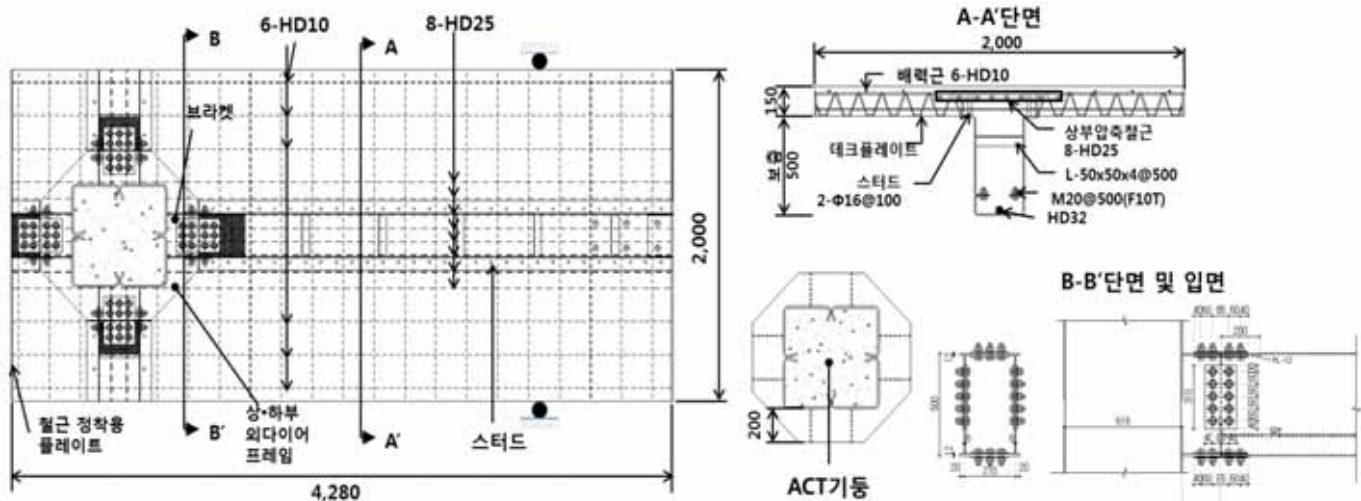
보는 신형상 U형 합성보가 사용되었으며, 기둥은 매입형 합성기둥(SRC기둥, HF3 : H-350×350×12×19, HF5 : H-414×405×18×28)과 충전형기둥(CFT기둥, □-618×618×10.5)이 사용되었다. 보의 순길이(L_b)는 2,880 mm이며, 액츄에이터의 가력점에서부터 기둥 중심까지의 길이(L)는 3,280mm, 기둥 상하부의 지점간 거리는 2,500mm이다. 슬래브 폭은 유효 폭을 포함하여 2,000mm 이고, 슬래브 두께는 150mm이다. 슬래브는 거푸집용 데크플레이트를 적용하였으며, 합성보와 콘크리트 슬래브 간에는 스티드커넥터를 설치하였다. 스티드커넥터는 합성보와 보 상부 철근 내력의 합이 되는 수평전단력에 저항하도록 완전합성으로 등간격 배치하였다. 또한 상부 콘크리트에 의한 압축력이 하부 강재에 의한 인장력 보다 커서, 하부 강재가 연성과괴 되도록 실험체를 설계하였다.

측판과 하부강판의 볼트간격은 F10T M20 500mm 간격으로 설치하였다. 볼트간격은 1차 수행된 보 휨 실험결과 600mm 간격도 최대내력에 미치는 영향은 없는 것으로 확인되었으나, 기둥 보 접합부 성능실험은 볼트간격이 실험에 영향을 미치지 않도록 500mm 간격으로 하였다^[5]. 합성보는 기둥 강축방향으로 설치하여 가력되도록 하였으며, 가력 반대방향과 약축을 포함한 가력 외 3개 방향에 대해 동일한 형상의 합성보를 설치하여 건축물 실 조건을 반영하였다.

기둥과 보 접합부는 철골 철근콘크리트 기둥의 경우 철골 기둥에서 접합을 위한 최소 폭의 브라켓(HF3-S-6:225mm, HF5-S-8:193mm)을 철골 기둥면에 접합하였으며, 브라켓의 상하부 플랜지는 합성보 보다 판 두께를 증가시켰고, 웨브는 합성보와 동일한 두께를 이용하였다. CFT 기둥과 유사한 액트기둥의 경우 외부 다이아프램을 설치하였으며, 외부 다이



(a) HyFo Beam-SRC Column Connection (unit : mm)



(b) HyFo Beam-ACT Column Connection(unit : mm)

Fig. 3 Detail of test specimens

아프램의 돌출길이는 200mm이고, 판 두께는 보 플랜지의 2 배에 해당하는 12mm를 적용하였다. 액트기둥과 보 접합은 철골 철근콘크리트 기둥과 동일한 유형으로 상하부 다이아프 램에 수직 스티프너를 추가하여 합성보 플랜지와 웨브가 접 합되도록 하였다. 기둥 브라켓(또는 다이아프램)과 보 이음은 고장력볼트인 F10T M22로 볼트접합 하였다. 볼트접합부 설계는 미끄럼강도와 지압강도 중 작은 값을 적용하였으며, 지압강도는 마찰접합으로 설계하였다. 볼트 수는 Fig. 3의 접합상세와 같다. 브라켓은 상·하부 플랜지의 경우 기둥에 맞 댐용접하였고, 웨브는 모살용접하였다. 보 상부에는 25mm (SD400) 철근을 배근하였다.

2.2 실험체 셋팅 및 재하프로그램

변위계는 Fig. 4와 같이 총 8개의 변위계(LVDT)와 1개 의 줄변위계를 이용하여 패널존의 변형 및 기둥의 변형, 보 단부의 비탄성변형, 실험체의 중간변위를 계측하였다. 또한 Fig. 5와 같이 변형을 게이지를 통하여 HyFo보 강판의 변 형, 슬래브 철근의 변형, 브라켓의 변형 등을 계측하였다.

가력은 최대용량 2,000kN, 최대스트로크 ±250mm인 액 추에이터를 이용하여 반복가력 하였으며, 하중 계획은 Fig. 6과 같이 Seismic design manual S6.2^[13]의 Cyclic Loading Program에 의해 가력하였다. Table 2는 본 실험 에서의 각 가력단계별 가력변위를 나타낸 것이다. 보 단부에 설치된 줄변위계로부터 실험체 전체변위를 확인하였으며, 가 력하중의 크기는 액추에이터 내부의 로드 셀(Load Cell)에 의해 측정하였다.

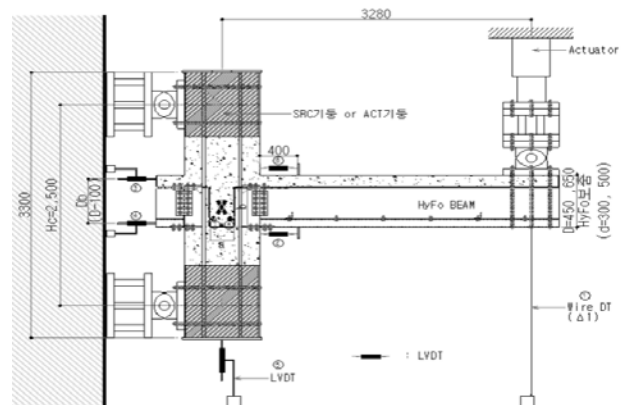


Fig. 4 Location of LVDT and Test Set-up

Table 2. Loading Program for Seismic Test

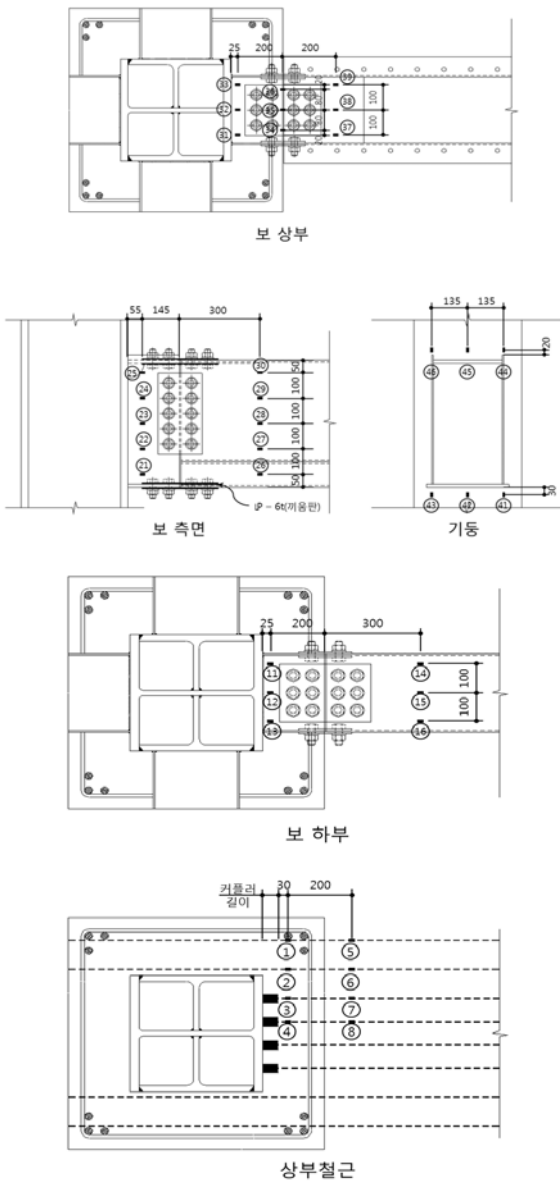
No.	Story drift ratio (%rad)	Cycle	Displacement (mm)
1	±0.375	6	±12.3
2	±0.5	6	±16.4
3	±0.75	6	±24.6
4	±1.0	4	±32.8
5	±1.5	2	±49.2
6	±2.0	2	±65.6
7	±3.0	2	±98.4
8	±4.0	2	±131.2
9	±5.0	2	±164.0
10	±6.0	2	±196.8

3. 실험 결과

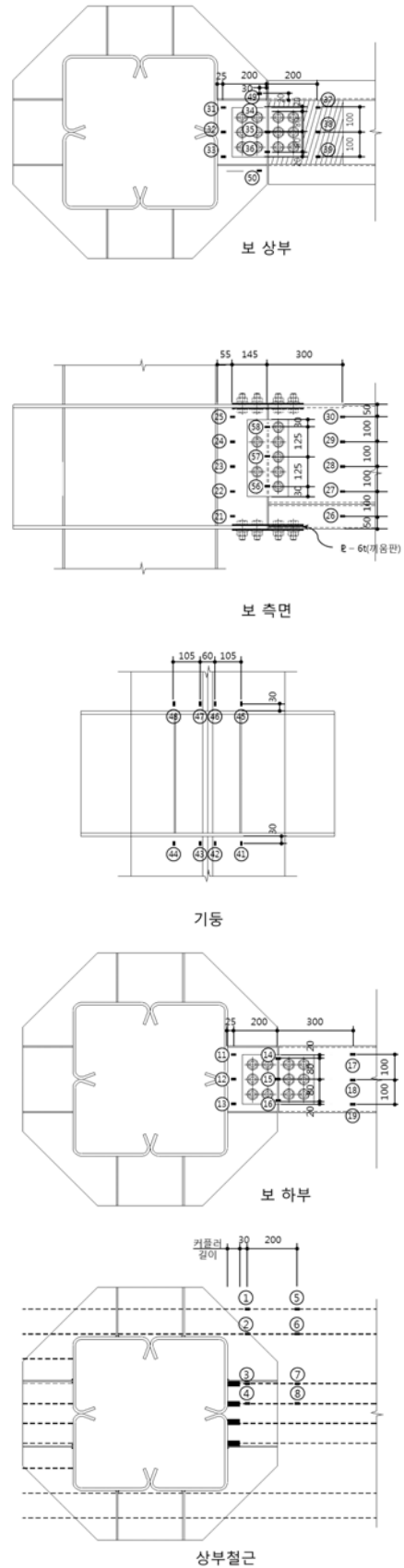
3.1 소재의 역학적 특성 및 하중

콘크리트 설계기준압축강도는 SRC기둥의 경우 27MPa, ACT기둥의 경우 40MPa를 사용하였으며, 콘크리트 슬래브는 모두 27MPa이다. Table 3은 각 콘크리트의 배합비이다.

콘크리트 압축강도 시험을 위해 KS F 2403에 의거하여 공시체를 제작하였으며, KS F 2405에 준하여 콘크리트 압축강도시험을 하였다. 압축강도 시험결과 콘크리트의 압축강도는 각각 22.1MPa, 37.6MPa로 측정되었다.



(a) HyFo Beam-SRC Column



(b) HyFo Beam-ACT Column

Fig. 5 Location of Strain Gauge

Table 3. Concrete Proportion

Design Criterion Strength	W/C ratio (%)	Maximum size of coarse aggregate (mm)	Slump (mm)	Air content (%)	Salt content (kg/m ²)	Compressive Strength (MPa)
27MPa	43.4	25mm	150	4.5±1.5	0.30이하	22.1
40MPa	37.5	25mm	120	4.5±1.5	0.30이하	37.6

Table 4. Tensile Test Results of Reformed Bar

Specimen	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation percentage (%)	Application site
HD10	468.2	553.5	16.5	Slab
HD25	462.1	592.9	27.9	Beam and Column
HD32	506.7	630.5	20.2	Beam

Table 5. Tensile Test Results of Plate

Specimen	Yield Strength (MPa)	Tensile Strength (MPa)	Elongation percentage (%)	Application site
PL-6	355.0	529.1	23.4	HyFo Beam
PL-10.5	420.9	527.2	20.8	ACT Column
PL-12	518.6	570.0	16.8	Bracket Top Shear Plate
PL-19	340.0	491.2	27.8	SRC Column Flange
PL-28	339.4	556.5	23.9	SRC Column Flange

Table 6. Nominal Strength of Beam and Column

Specimen		HF3-S-6	HF5-S-8	HF5-A-8	
B e a m	Composite Section	Plastic Positive Moment M_p^+ (kN·m)	700.8	1048.8	1048.8
		Plastic Negative Moment M_p^- (kN·m)	634.5	1331.3	1331.3
	HyFo Beam Section	Plastic Positive Moment M_p^+ (kN·m)	301.3	796.6	796.6
		Plastic Negative Moment M_p^- (kN·m)	380.5	922.7	922.7
C o l u m n	Compressive Strength of Concrete (f_{ck} , MPa)		22.1		36.7
	Tensile Strength of Rebar (f_y , MPa)		462.1		-
	Tensile Strength of Plate (F_y , MPa)		340.0	339.4	420.9
	Moment Performance (kN·m)		2137.9	2981.4	2813.0
Beam-Column Moment Performance ratio		3.05	2.24	2.11	

Table 7. Strength of Specimen

Specimen	M_{test} (MPa)				M_{theory} (MPa)	
	M_y^+	M_y^-	M_u^+	M_u^-	M_p^+	M_p^-
HF3-S-6	535.6	542.8	794.4	806.2	700.8	634.5
HF5-S-8	759.0	1,133.2	1,071.2	1,831.2	1,048.8	1,331.3
HF5-A-8	667.8	916.1	908.2	1,464.5	1,048.8	1,331.3

M_y^+, M_y^- : Yield Moment of Specimen
 M_u^+, M_u^- : Maximum Moment of Specimen
 M_p^+, M_p^- : Plastic Moment of HyFo Beam

본 실험에서 사용된 보 플랜지 및 웨브, H형강 기둥 및 CFT기둥, 이음판에 대하여 KS B 0801의 금속재료 인장시험 규정편에 따라 인장시험편을 각각 3개씩 제작하였고, KS B 0802의 금속재료 인장시험 방법에 따라 인장시험을 실시하였다. 시험결과는 Table 4, Table 5와 같다.

Table 6은 각 실험체의 보와 기둥의 모멘트성능이다. 모멘트성능은 설계기준강도를 기초로 초기 계획 후, 소재시험결과와 볼트접합부의 내력을 반영하여 재산정하였다. 기둥과 보의 모멘트 성능비는 기둥내력이 보의 1.2배 이상이 되는 조건에서 실제 적용되는 부재 크기를 기준으로 하였다^[4].

3.2 각 실험체의 모멘트-회전각 관계 및 파괴양상

KBC 2009 내진규정은 내진설계에 사용되는 반응수정계수(R)를 기준으로 모멘트골조시스템을 구분하고, 강구조와 합성구조로 구분된다. 합성구조의 경우 각 골조시스템의 반응수정계수는 특별모멘트골조(SMF, special moment frame, R=8), 중간모멘트골조(IMF, intermediate moment frame, R=5), 보통모멘트골조(OMF, ordinary moment frame, R=3)의 경우 각각 최소 0.04, 0.03, 0.01rad의 접합부 소성회전각을 확보해야 한다.

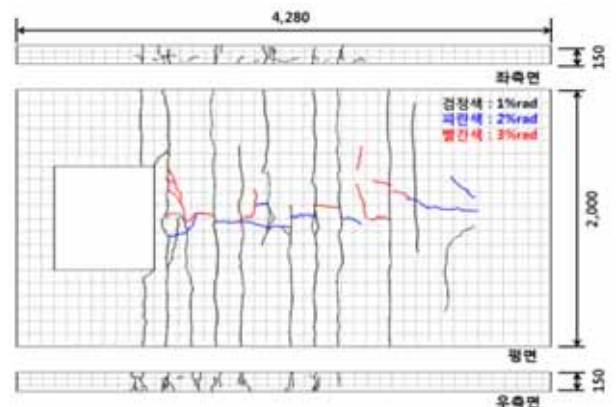


Fig. 6 Concrete Slab Crack of HF3-S-6 Specimen

Table 7과 Table 8은 각 실험체의 실험결과에 따른 휨모멘트와 층간변위각이다. 휨모멘트와 층간변위각에 대한 상세한 내용은 각 실험체별로 정리하였다.

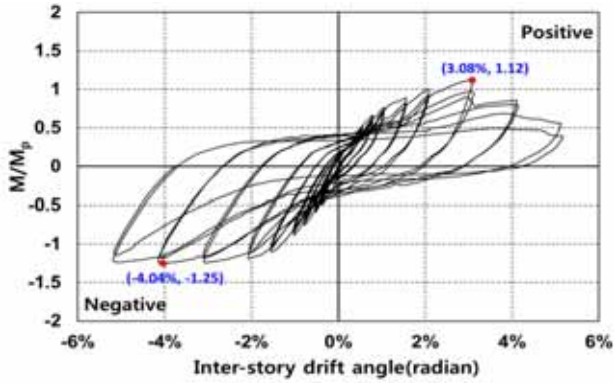


Fig. 7 M-θ Curve of HF3-S-6 specimen



Fig. 8 Failure Shape of HF3-S-6 specimen



Fig. 9 Failure Shape of HF3-S-6 specimen : Local Buckling

Table 8. Inter-story Drift angle of Specimen

Specimen	Inter-story drift angle (radian)			
	θ_y^+	θ_y^-	θ_u^+	θ_u^-
HF3-S-6	0.010	0.009	0.030	0.039
HF5-S-8	0.009	0.009	0.021	0.048
HF5-A-8	0.010	0.007	0.030	0.050

θ_y^+ , θ_y^- : Inter-story Drift angle of Yield Moment
 θ_u^+ , θ_u^- : Inter-story Drift angle of Maximum Moment

3.2.1 HF3-S-6 실험체

HF3-S-6 실험체의 경우, 기둥 크기는 800×800(mm), 내부철골 H-350×350×12×19, 주근 12-HD25이며, 보는 U형 합성보 HF-300×270×6×6 이다. 기둥과 보 접합은 브라켓을 제작하여 기둥에 접합 후 보를 브라켓에 볼트접합하였다. 브라켓 길이는 기둥 외곽 사이즈에 브라켓이 포함되도록 193mm로 제작하였고, 브라켓 상부와 하부 플레이트는 보 플랜지의 2배 두께로 하였다. 기둥 플랜지면에는 4개의 커플러를 용접으로 고정하여 보 상부 철근을 기둥에 연결하였으며, 세 개 실험체 모두 동일조건이다.

실험시작 후 층간변위각 0.005rad 1cycle 에서 Fig. 6과 같이 슬래브(상·하부피복부위)에 균열이 관찰되었으며, 콘크리트 슬래브의 균열은 데크플레이트 상부철선의 위치와 나란히 발생하였다. 최대내력은 Fig. 7과 같이 0.03rad에서 정휨모멘트(M_p^+)의 112%가 발휘되었으며, 0.04rad에서 정휨모멘트(M_p^+)의 88%가 발휘되었다. 또한 0.04rad에서 부휨모멘트에 대하여 소성모멘트(M_p)의 125%가 발휘되었으며, 0.05rad에서 135%의 모멘트가 발휘되었다. 이는 합성중간모멘트골조의 요구치인 M/M_p 의 값이 0.8 이상을 만족하였다. 최종적으로 HyFo보 접합 부분에서 지압으로 인한 파괴가 발생하여 실험을 0.05rad에서 실험을 종료하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 실험 종료 후 접합부의 파괴양상이다.

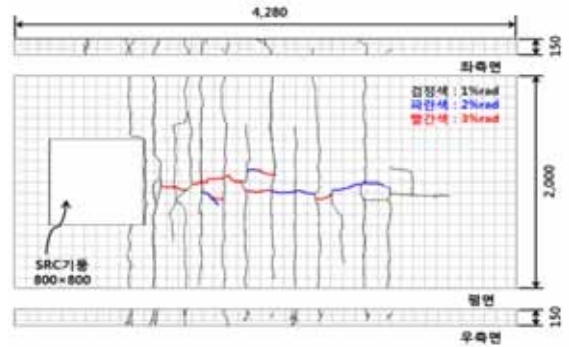


Fig. 10 Concrete Slab Crack of HF5-S-8 Specimen

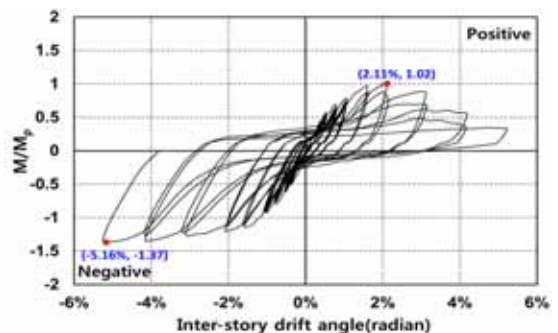


Fig. 11 M-θ Curve of HF5-S-8 specimen

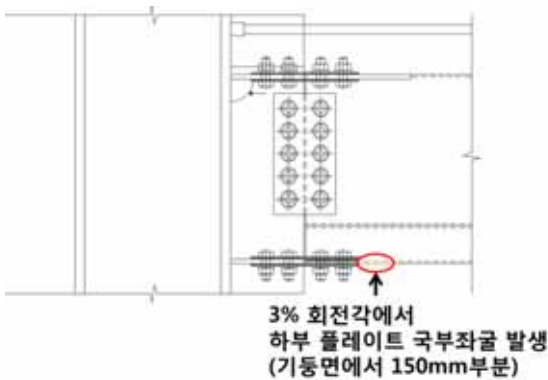


Fig. 12 Failure Shape of HF5-S-8 specimen



Fig. 13 Failure Shape of HF5-S-8 specimen
: Local Buckling and Bearing Failure

3.2.2 HF5-S-8 실험체

실험은 HF3-S-6 실험체와 동일하게 액추에이터를 당기는 것(정휨모멘트)으로 시작하였다. 실험시작 후 증간변위각 0.00375rad 2cycle에서 슬래브의 균열이 관찰되기 시작하였다.

Fig. 10과 같이 슬래브의 균열은 HF3-S-6 실험체와 마찬가지로 데크플레이트 상부철선의 위치와 나란히 발생하였다. 최대내력은 Fig. 11과 같이 0.02rad에서 정휨모멘트에 대하여 소성모멘트(M_p)의 102%가 발휘되었으며, 0.03rad에서 소성모멘트(M_p)의 88.7%가 발휘되었다. 또한 0.05rad까지 부휨모멘트에 대하여 하중감소는 나타나지 않았으며, M_p 의 137%가 발휘되었고, 내력비(M/M_p)도 0.8이상을 만족하였다. 최종적으로 HyFo보 접합 부분에서 지압으로 인한 파괴가 발생하여 실험을 0.05rad에서 실험을 종료하였다. Fig. 12, Fig. 13은 실험 종료 후 접합부의 파괴양상이다.

3.2.3 HF5-A-8 실험체

실험시작 후 증간변위각 0.00375rad 2cycle에서 슬래브의 균열이 관찰되기 시작하였다. 슬래브의 균열은 Fig. 14와 같이 콘크리트 슬래브 상부에 가로균열이 나타났다. 최대내력은 Fig. 15와 같이 0.03rad에서 정휨모멘트(M_p)에 대하여 0.87(M_p)가 발휘되었으며, 0.04rad에서 하부플레이트의

지압파괴로 내력이 감소하였다. 최대내력이 정휨모멘트에 도달하지 못한 이유는 Fig. 17과 같이 하부플랜지 이음판의 과도한 미끄러짐에 의한 지압파괴와 C형강판 하단부가 볼트로 고정되지 않아 휨모멘트에 충분히 저항하지 못했기 때문으로 판단된다. 또한 SRC기둥을 적용한 실험체에 비해 이음판과 고력볼트가 노출되어 콘크리트 구속에 의한 내력증가효과가 감소되었기 때문으로 판단된다. 부휨모멘트는 0.05rad까지 하중감소가 나타나지 않았으며, 소성모멘트(M_p)의 110%가 발휘되었고, 0.04rad에서 약 20mm의 하부 미끄러움이 발생하였다.

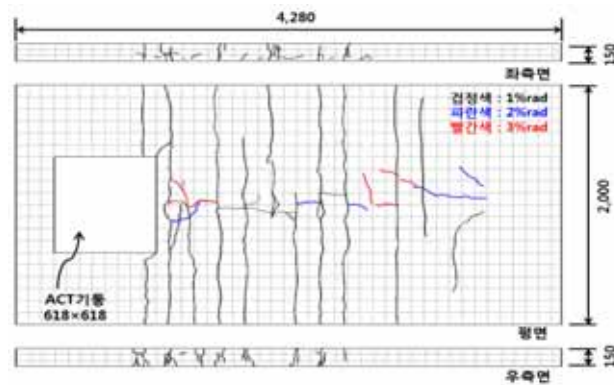


Fig. 14 Concrete Slab Crack of HF5-A-8 Specimen

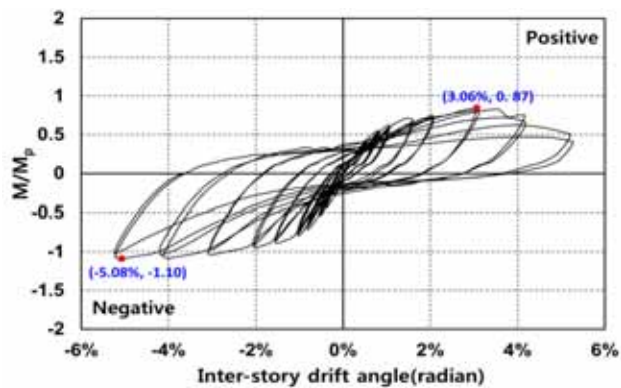


Fig. 15 M-θ Curve of HF5-A-8 specimen



Fig. 16 Failure Shape of HF5-A-8 specimen



Fig. 17 Failure Shape of HF5-A-8 specimen
: Slip and Bearing Failure

정휨모멘트와 부휨모멘트의 내력차이가 크게 발생한 이유는 정휨모멘트의 경우 C형강관 하부에 작용하는 전단과 휨모멘트에 대해 볼트가 삭제되어 저항하지 못했기 때문이다. 반면, 부휨모멘트 내력은 C형 상부 볼트가 구속되어 충분히 저항하였기 때문으로 판단된다. Fig. 16, Fig. 17은 실험종료 후 접합부 파괴양상이다.

4. 결과 분석

4.1 하중-변위관계

Table 9는 각 실험체의 실험결과 분석이다. 표에는 초기강성과 항복강도, 항복변위, 변형능력 등을 정리하였다. 실험에 의한 항복하중은 소재의 경우, 0.2%영구변형도 또는 0.5% 총변형도로 항복강도를 적용한다^[4].

그러나 부재의 경우 항복하중 산정은 실험결과에 대한 상대비교이므로 하중산정이 용이한 방법을 적용하였다. 본 연구에서는 Fig. 18과 같이 초기강성과 최대하중 시 변위를 연결하여 만나는 변위를 항복변위로 하였고, 이때의 내력을 실험에 의한 항복하중으로 정의하였다^[14]. 각 실험체의 내력과 강성을 평가하기 위해 단조화곡선(Skeleton Curve)으로 치환하였다. Fig. 19는 각 실험체를 단조곡선($P-\delta$)으로 치환

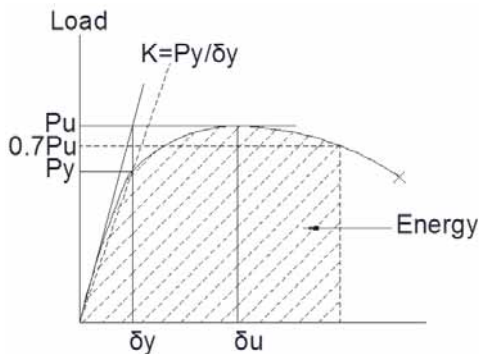


Fig. 18 Estimation of Yield Load

한 것이고, Fig. 20은 내력비와 회전각 곡선을 비교한 것이다. 정휨모멘트(하부인장) 작용 시 각 실험체의 최대내력은 각각 244.8kN(802.9kN·m), 329.2kN(1,079.8kN·m), 277.7kN(910.9kN·m)이다. 부휨모멘트(상부인장) 작용 시 각 실험체의 최대내력은 각각 248.0kN(813.4kN·m), 569.3kN(1,867.3kN·m), 452.3kN(1,483.5kN·m)이다. 보 소성모멘트를 기준으로 한 내력비(M_u/M_p)는 SRC기둥-보 접합

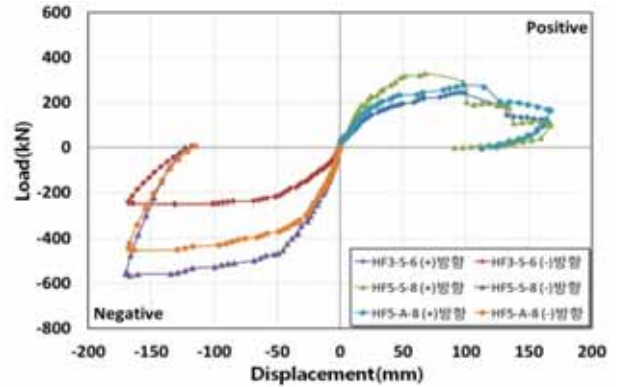


Fig. 19 Skeleton P-δ Curve of Each Specimen

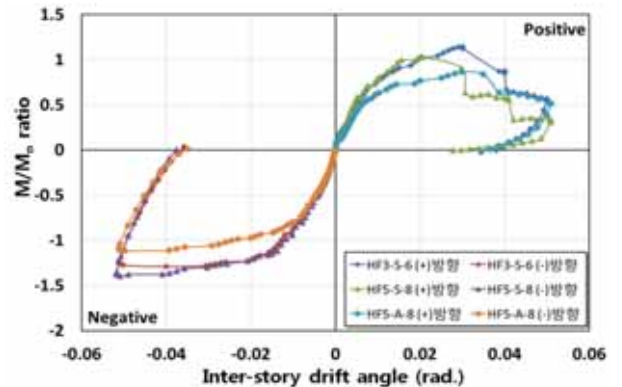


Fig. 20 Skeleton Curve for $M/M_p - \theta$ of Each Specimen

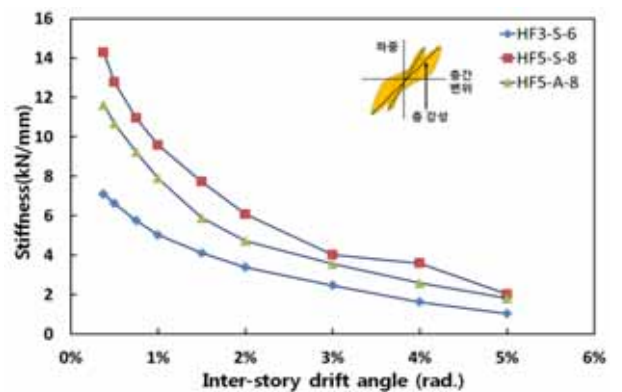


Fig. 21 A change of Specimen Stiffness for Inter-story drift angle

부 실험체에서는 102~137%를 확보하는 것으로 나타났으며, CFT기둥-보 접합부 실험체에서는 87~110%로 다소 낮은 값을 보이고 있다.

Fig. 21은 각 층간변위각에서 첫 번째 사이클에서 평균 강성의 변화이다. 평균 강성은 Fig. 19의 각 층간변위 첫 번째 하중 사이클에서 정방향과 부방향 최대값의 차를 그에 대응하는 변위 차로 나누어 구하였다. 일반적으로 층간변위가 증가할수록 강성이 감소되는 경향을 보여주었으며, 보춤 500 mm, SRC기둥-HyFo보 접합부 실험체인 HF5-S-8의 강성이 가장 크게 나타났다. 대체적으로 모든 실험체에서 0.04 rad의 층간변위각의 강성은 초기강성의 약 28%로 나타났다.

4.2 에너지 소산능력

Fig. 22는 실험체의 각 층간변위각에서 첫 번째 사이클에 대한 에너지 소산능력을 정리한 것이다. 소성변형이 발생하기 시작한 0.02rad 변위각 이후 에너지 소산이 급격히 증가하는 경향이 나타났다. HF5-S-8 실험체는 0.03rad 이후 에너지 소산능력이 점차 감소하는 경향을 보였고, 변위각 0.04rad 이후 에너지소산이 감소하였다.

HF3-S-6과 HF5-A-8 실험체는 변위각 0.05rad까지 에너지소산이 증가하였으며, 이는 HF5-S-8실험체를 제외한 두 실험체에서 급격한 하중 감소 없이 연성능력을 발휘하였기 때문으로 판단된다.

또한 Fig. 23은 Fig. 19의 단조곡선을 이용한 각 실험체의 정회모멘트(하부인장)와 부회모멘트(상부인장)에 대한 전체 에너지 소산능력을 비교한 것이다. HF3-S-6실험체의 경우 정회모멘트와 부회모멘트의 소산능력은 유사하게 나타났으나, HF5-S-8실험체와 HF5-A-8실험체는 부회모멘트의

경우 정회모멘트보다 약 1.5배 이상 높게 나타났다. 두 실험체(HF5-S-8, HF5-A-8)의 부회모멘트가 HF3-S-6실험체보다 크게 상승한 이유는 보 춤 증가로 중립축 위치가 보 웨브 하단으로 이동하여 단부철근과 보 내부 콘크리트의 영향이 상대적으로 크게 작용하였기 때문이다. 또한 HF5-S-8실험체가 HF5-A-8실험체 보다 부회모멘트가 큰 이유는 HF5-S-8실험체는 SRC기둥이므로 브라켓과 상부철근이 콘크리트로 강하게 구속되어 부회모멘트가 증가되었기 때문으로 판단된다.

HyFo보는 부회모멘트 작용 시 보 내부에 콘크리트가 충전되어 압축력에 저항하므로 추가적인 내력증가가 발생한다. 반면 정회모멘트 작용 시 상대적으로 에너지 소산능력이 저하되었으나, 이는 하부 ㄷ형강판의 웨브가 볼트접합으로 구속되지 않았기 때문이며, HF3-S-6실험체와 마찬가지로 하부 ㄷ형강판을 볼트접합으로 구속시키면 정회모멘트의 에너지 소산능력은 증가할 것으로 판단된다.

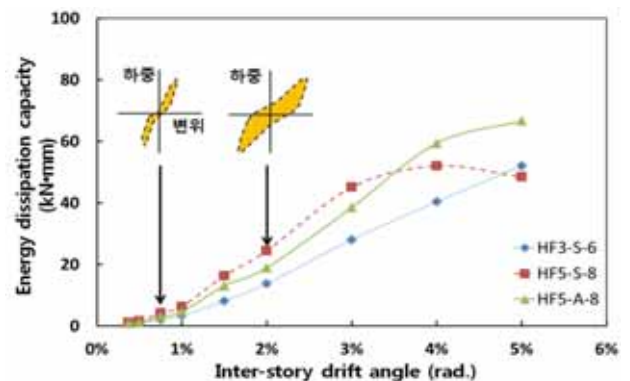


Fig. 22 Energy Dissipation Capacity for Each Cyclic Load

Table 9. Result of Seismic Test

Specimen	HF3-S-6		HF5-S-8		HF5-A-8	
	Positive	Negative	Positive	Negative	Positive	Negative
Nominal Strength M_p , kN·m	700.8	634.5	1048.8	1331.3	1048.8	1331.3
Yield Strength M_y , kN·m	535.6	542.8	759.0	1133.2	667.8	916.1
Maximum Strength M_u , kN·m	794.4	806.2	1071.2	1831.2	908.2	1464.5
M_u/M_p ratio	1.12	1.25	1.02	1.37	0.87	1.10
M_u/M_y ratio	1.48	1.49	1.41	1.62	1.36	1.60
Yield Displacement δ_y , mm(%rad)	32.8(1.00)	30.5(0.93)	29.6(0.90)	29.1(0.89)	33.8(1.03)	23.9(0.73)
Maximum Displacement δ_u , mm(%)	98.7(3.01)	129.2(3.94)	67.6(2.06)	158.9(4.84)	98.0(2.99)	162.5(4.95)
Ductility δ_u/δ_y ratio	3.59	5.35	3.26	5.46	3.94	6.70
Stiffness K , kN/mm	4.98	5.43	7.82	11.87	6.02	11.69

4.3 변형능력

변형능력은 각 실험체의 항복하중시의 변위(δ_y)에 대한 최대하중시의 변위(δ_u)의 비(δ_u/δ_y)로 정의하였다.

Fig. 24와 같이 각 실험체는 정횡모멘트가 작용하는 하부 인장 시 보다 부횡모멘트가 작용하는 상부 인장일 때 약 1.5 배 이상 높은 변형능력을 나타냈다. 이는 접합부가 하부 ㄷ형 강판 및 웨브의 지압과괴로 인하여 충분한 내력을 발휘하기 전에 항복상태에 도달하였기 때문으로 판단된다.

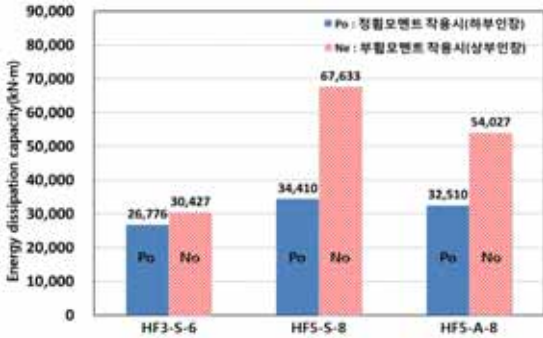


Fig. 23 Total Energy Dissipation Capacity

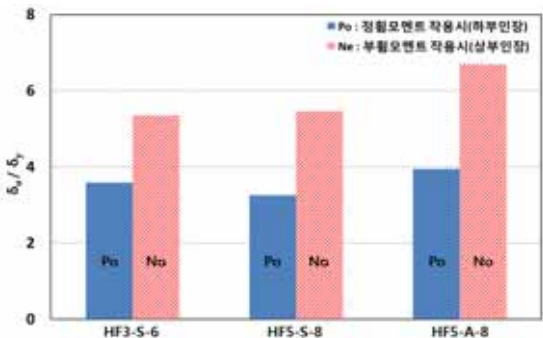
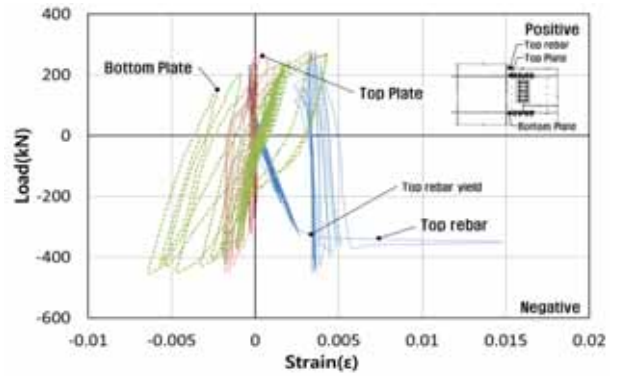
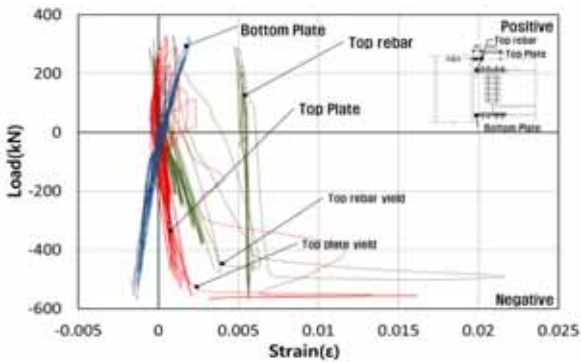


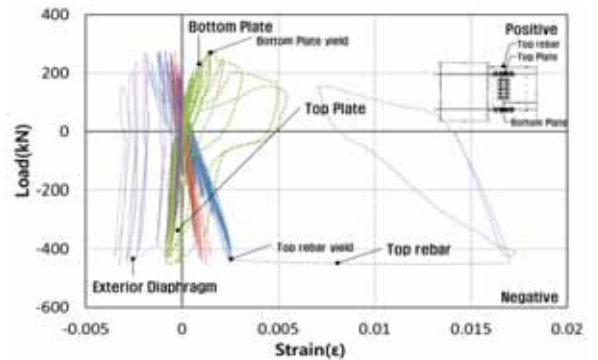
Fig. 24 Displacement Capacity : δ_u/δ_y ratio



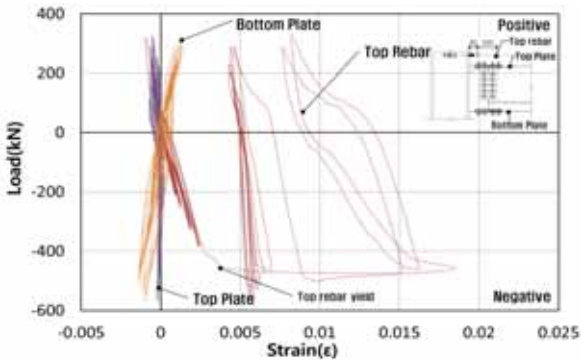
(a) Bracket Section



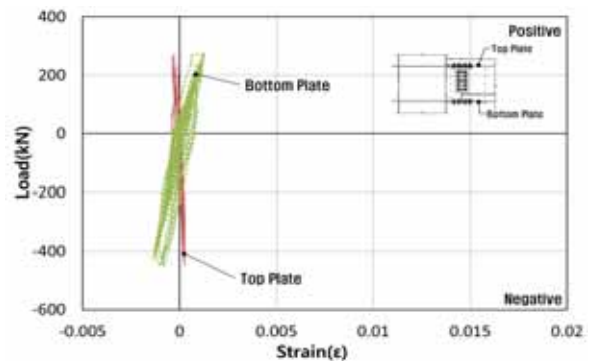
(a) Bracket Section



(b) Splice



(b) HyFo Beam Section



(c) HyFo Beam Section

Fig. 25 A change of Strain for SRC column-HyFo Beam Connection(HF5-S-8)

Fig. 26 A change of Strain for CFT column (ACT Column)-HyFo Beam Connection(HF5-A-8)

4.4 변형을 계측 결과

Fig. 25와 Fig. 26은 각 실험체에 부착된 스트레인게이지로 계측된 접합부분의 상부철근과 HyFo보의 상·하부 강관의 변형을 변화이다.

HF5-S-8실험체와 HF5-A-8실험체의 경우, 브라켓 부분(Fig. 25(a), Fig. 26(a))은 0.002의 변형도가 발생 되었을 때 상부 플레이트의 잔류변형이 크게 증가하여 항복상태에 도달하였으며, 상부철근은 0.003의 변형도 부분에서 잔류 변형이 증가하면서 항복상태에 도달한 것으로 확인되었다. 보 부재 부분(Fig. 25(b), Fig. 26(b), (c))은 0.003의 변형도가 발생하였을 때 상부플레이트가 항복상태에 도달하였고, 철근은 탄성영역에 머무는 것을 볼 수가 있다. 상부플레이트 항복 이후 상부철근은 항복상태에 도달하였다. 주기하중의 증가로 인하여 상부철근은 항복 이후 잔류변형이 발생하였다.

HyFo보 하부 C형강관의 경우 0.0015의 변형도에서 항복상태에 도달하였고 이후 소성변형을 보였다. C형강관의 경우 측면은 접합되지 않고 하부 플레이트만 볼트접합 되어 접합 부분이 1개소이므로, 주기하중 발생시 충분한 내력전달을 할 수 없기 때문에 변형도가 적은 것으로 판단된다. 이러한 영향으로 회전각 0.04rad까지 하부강관에 좌굴이 발생하지 않은 원인으로 설명될 수 있다.

5. 결 론

신형상 U형 단면을 갖는 HyFo보와 합성기둥 접합부의 내진성능을 연구하였다. 본 연구에서 제안하여 실험한 접합부상세는 HyFo합성보와 기둥에 대한 기본 접합상세이다. 이러한 기본 접합상세를 갖는 기둥 보 접합부를 대상으로 내진성능을 평가하였으며, 실험결과는 다음과 같다.

- (1) HF3-S-6 실험체는 기둥-보 접합부 회전각이 0.03rad 범위 내에서는 기둥 외주면의 접합부 정·부 모멘트 휨강도가 보의 공칭소성모멘트(M_p)의 80% 이상이 되어야 한다는 요구사항을 만족하므로 합성중간모멘트골조(IMF)에 적합한 내진성능을 갖는 것으로 판단된다.
- (2) HF5-S-8 실험체와 HF5-A-8 실험체의 경우, 부휨모멘트 작용시 층간변위각 0.04rad 이상의 연성능력을 나타냈으나, 정휨모멘트의 경우 0.02rad 으로 변형능력이 저하되었다. 이러한 원인은 웹 하부에 해당하는 C형강관을 볼트접합 하지 않아서 정휨모멘트 작용 시 휨모멘트 저항능력이 저하되었기 때문으로 판단되며, 향후 접합상세

적용 시 이를 반영하여야 할 것으로 사료된다.

- (3) 기둥 형상의 영향은 보 춤이 동일한 경우를 비교하면, SRC기둥의 경우 보 소성모멘트를 기준으로 한 내력비(M_u/M_p)는 102~137%로 나타났으나, CFT에 해당하는 액트기둥의 경우 내력비는 87~110%로 다소 저하되었다. 또한 강성의 경우, 부휨모멘트는 큰 차이가 없으나 정휨모멘트의 경우 7.82kN/mm에서 6.02kN/mm로 저하되었다. 반면 연성비의 경우 CFT기둥의 연성이 증가하는 것으로 확인되어 기둥종류에 따른 차이는 일관적이지 않은 것으로 나타났다.
- (4) HyFo 보 접합부 상세에서 웹 하단에 해당하는 C형강관의 볼트접합에 의한 구속 유무가 내력 및 변형능력, 에너지 소산능력에 큰 영향을 미치는 것으로 확인되었다. 이는 C형강관이 정휨모멘트 작용 시 모멘트 및 변형능력에 크게 영향을 미치기 때문으로 판단된다.
- (5) 기둥 보 접합부 실험결과를 반영하여 향후 접합부는 웹 하단의 C형강관에 볼트추가와 브라켓 길이 확장, 볼트 지압과피 방지를 위한 연단거리 증가 등의 개선방안이 필요하다. 이러한 접합부상세 개선이 기둥 보 접합부의 연성능력을 향상시킬 것으로 판단된다.

향후 결론 (5)에서 제시한 접합부상세를 반영한 경우의 정휨모멘트 개선효과와 보 춤이 700mm 이상으로 커지는 경우, 기둥 구조시스템의 종류 및 기둥 형상, 다이아프램의 영향 등에 대한 연구가 지속되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌(References)

- [1] 김인석, 김학수(2008) 철근콘크리트와 강을 합성한 복합 단면보의 구조거동평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제5호, pp.665-673.
Kim, I.S. and Kim, H.S. (2008) Structure Behavior Evaluation of Beams Compositied with Steel and Reinforced Concrete, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 20, No. 5, pp.665-673 (in Korean).
- [2] 김형근, 김명환, 조남규, 김상섭, 김상대(2009) yLRC 합성기둥의 압축강도에 관한 실험 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제21권, 제5호, pp.545-552.
Kim, H.G., Kim, M.H., Cho, N.G., Kim S.S., and Kim, S.D. (2009) Experimental Study on the Compressive Strength of yLRC Composite Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 21, No. 5, pp.545-552 (in Korean).
- [3] 김성배, 박동수, 김상섭(2011) 테크플레이트 직봉과 전단

- 연결재의 기능을 겸하는 신형상 전단연결재의 개발에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제27권, 제8호, pp.47-54.
- Kim, S.B., Park, D.S., and Kim, S.S. (2009) A Study on the Development of New-shaped Shear Connector with Vertical Bars of Deck Plate, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 27, No. 5, pp.47-54 (in Korean).
- [4] 대한건축학회(2009) 건축구조설계기준 및 해설(KBC 2009), 기문당.
AIK (2009) *Korea building code and commentary -structural*, Architectural Institute of Korea (in Korean).
- [5] 김성배, 이원록, 김정연, 이승배, 유덕수, 김대회, 김상섭(2012) 신형상 U형 하이브리드 합성보의 휨성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.521-534.
Kim, S.B., Lee, W.R., Kim, J.Y., Lee, S.B., Ryu, D.S., Kim, D.H., and Kim, S.S. (2012) Study on the Flexible Strength of U-shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 24, No. 5, pp.521-534 (in Korean).
- [6] 김성배, 함정대, 이창남, 김상섭(2006) SRC 기둥-TSC 보 접합부의 거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제22권, 제6호, pp.55-62.
Kim, S.B., Ham, J.T., Lee, C.N., and Kim, S.S. (2006) Study on the Structural Behavior of TSC Beam-to-SRC Column Connction, *Journal of Architectural Institute of Korea*, AIK, Vol. 22, No. 6, pp.55-62 (in Korean).
- [7] 황현중, 박홍근, 이철호, 박창희, 이창남, 김형섭, 김성배(2011) 콘크리트채움 U형 강재보-콘크리트 기둥 접합부의 내진성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.83-97.
Hwang, H.J., Park, H.G., Lee, C.H., Park, C.H., Lee, C.N., Kim, H.S., and Kim, S.B. (2011) Seismic Resistance of Concrete-filled U-shaped Steel Beam-to-RC Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 1, pp.83-97 (in Korean).
- [8] 박홍근, 이철호, 박창희, 황현중, 이창남, 김형섭, 김성배(2011) 콘크리트채움 U형 강재보-강재기둥 합성 내진접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제3호, pp.337-347.
Park, H.G., Lee, C.H., Park, C.H., Hwang, H.J., Lee, C.N., Kim, H.S., and Kim, S.B. (2011) Cyclic Seismic Testing of Concrete-filled U-shaped Steel Beam-to-Steel Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No. 1, pp.83-97 (in Korean).
- [9] 심현주, 장보라, 정진안, 이은택(2010) 원사이드 볼트를 이용한 내진 각형강관 기둥-H형강 보 접합부의 구조성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제4호, pp.355-363.
Shim, H.J., Jang, B.R., Chung, J.A., and Lee, E.T. (2010) Performance Evaluation of Connection of Seismic Rectangular Steel Tube Column-H Beam Using One-side Bolts, *Journal of Korea an Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 22, No. 4, pp. 355-363.
- [10] SEGUI, W.T. (2007) *Steel Design*, THOMSON, Fourth Edition, pp.552-562, USA.
- [11] Salmon, C.G., Johnson, J.E., and Malhas, F.A. (2009) *Steel Structures -Design and Behavior*, Pearson Education Inc., Fifth Edition, pp.804-828, USA.
- [12] AISC (2005) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [13] AISC (2006) *Seismic Design Manual*, American Institute of Steel Construction, USA.
- [14] 建設省建築研究所(1996) (社)鋼材俱樂部, “鋼構造物の耐震保有性能評價のための標準試験方法と評價基準の提案”
JISF (1996) *A Valuation Basis Proposal of Standard Test Method for a Seismic Capacity Evaluation Performance of Steel Structure*, The Japan Iron and Steel Federation, Japan (in Japanese).

요 약: 본 연구는 신형상 U형 합성보의 1차 휨실험에 연이은 2차 연구로 U형 합성보와 기둥 접합부의 내진성능시험이다. 실험 변수는 기둥의 종류와 보 춤, 보 상부 플레이트 연속유무, 보 단부 철근 수 등으로 3개의 실험체를 제작하였다. 기둥의 종류는 철골 철근콘크리트 기둥과 CFT 형상의 ACT기둥이며, 보 춤은 300, 500(mm)이다. 접합부상세는 일반적으로 많이 적용하고 있는 짧은 브라켓을 활용한 볼트 접합부이다. 실험결과 변형능력은 2~4(%)의 층간변위각을 확보하였으며, 최대모멘트는 부힘모멘트의 경우 공칭모멘트 이상의 내력이 나타났다.

핵심용어: 합성보, 하이브리드 성형 보(HyFo Beam), 내진성능시험, 철골 철근콘크리트 기둥, CFT기둥