

비대칭 하이브리드 합성보-기둥 접합부 개발 및 내진성능평가

한규홍¹ · 김진원² · 전수찬³ · 이철호^{4*}

^{1, 2}책임연구원, POSCO, 철강솔루션연구소, ³박사과정, 서울대학교, 건축학과, ⁴교수, 서울대학교, 건축학과

Development and Seismic Performance Testing of Asymmetric Hybrid Composite Beam-to-Column Connections

Han, Kyu Hong¹, Kim, Jin Won², Jun, Su Chan³, Lee, Cheol Ho^{4*}

^{1, 2}Sr. Researcher, POSCO Steel Solution Marketing Department, Incheon, 21985, Korea

³Graduate student, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea ⁴Professor, Dept. of Architecture & Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 08826, Korea

Abstract - Asymmetric hybrid composite beams, utilizing both ordinary- and high-strength steels in one beam section, have been recently proposed by the authors. As a continuing work, asymmetric hybrid composite beam-to-column connections were developed and their full-scale seismic testing was conducted in this study. In order to maximize the cross-section efficiency along the beam span, the connections were developed in two types (for exterior and interior spans) by considering typical bending moment distribution of the continuous beams under gravity loading. In order to obtain stable cyclic response, inducing the plastic hinging at the different locations for the positive and negative moments was among the most significant design considerations. All the four specimens tested in this study developed the plastic hinging at the intended locations (i.e., at the column face for the sagging moment and at the bracket region for the hogging moment), and satisfied the requirements of special moment frame connections. However, the bracket web below the bolted splice experienced rather earlier local buckling (at 3% story drift level)and subsequent strength degradation under the hogging (negative) moment, thus indicating the need to stiffen the bracket web.

Keywords - Asymmetric hybrid composite beam, Asymmetric hybrid composite beam-to-column connection, High-strength steel, Plastic hinge, Special moment frame, Continuous beam design.

1. 서 론

합성보는 콘크리트와 강재의 합성효과로 강재량 절감과 층고 절감의 이점이 있으며, 최근 국내에서는 다양한 형태와 이종강종 을 적용한 합성보가 개발 및 상용화 되고 있다. 최근 개발된 합성보 로는 U형 냉간성형강에 콘크리트를 채운 TSC보^{[1],[2]}, 일반강을 사 용한 Z형 측판과 고강도강의 평판 또는 ㄷ형 하부강판을 볼트 접

Copyright \bigcirc 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-878-9061 E-mail. ceholee@snu.ac.kr 합한 HyFo합성보^[3], U형 합성보 단부에 H형강을 연결한 베스토 빔(BESTOBEAM)^[4], TU형상으로 성형절곡된 강판에 콘크리트 를채우는 TU 합성보^[5]가 대표적이다. 이러한 합성보는 주로 정모 멘트를 받는 단순보에 가장 효율적인 거동을 보이며, 최근에는 내 진성능이 요구되는 보-기둥 접합부에 합성보를 적용하기 위한 다 양한 연구^{[6],[7]}가 진행되고 있다. Jun et al.^[8]은 고강도강재와 일반 강재를 단면 내에 혼합배치하고 비대칭 형상으로 H형 단면을 구성 하여 구조적, 경제적 효과를 극대화한 비대칭 하이브리드 합성보 를 제안하고, 제안단면에 대해 실물대 실험을 수행하였다. 본 연구 에서는 고강도강재를 적용한 비대칭 하이브리드 합성보^[8]의 휨성 능을 발휘하면서 높은 경제성과 시공성, 우수한 내진성능을 기대 할 수 있는 보 -기둥 접합부를 개발하고 실물대 실험을 통해 해당 접합부의 내진성능을 평가하였다.

Note.-Discussion open until August 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 12, 2017; revised January 15, 2019; approved on January 24, 2019.

2. 비대칭 하이브리드 합성보-기둥 설계

2.1 비대칭 하이브리드 합성보

합성보는 전단연결재에 의해 콘크리트와 강재가 일체화되어, 단면의 휨강도와 강성이 증가하는 효율적이며 경제적 단면이다. 본연구에서 사용한 비대칭 하이브리드 합성보는 Fig. 1.과 같이 큰 인장력을 받는 하부플랜지에 고강도강재를 적용하고 단면을 키운 비대칭 H형 단면을 사용하여 기존 합성보 및 압연 H형강보 보다 구조적 효율성 및 경제적 이점을 더욱 극대화한 단면이다. 완전합 성으로 설계된 비대칭 하이브리드 합성보의 휨강도는 강재단면이 인장항복하고 콘크리트 슬래브가 인장력과 같은 크기의 압축력을 분담하는 소성응력분포법으로 산정한다.



Fig. 1. Asymmetric hybrid composite beam

2.2 단부보강을 통한 연속보 설계

연속보에서는 중력하중에 의해 중앙부에 정모멘트, 단부에 부 모멘트가 작용한다. 건축구조기준(2016 KBC)^[9]에서는 일반적인 구조형태, 경간 및 층고를 갖는 연속보에 대해서 근사해석을 허용 하고 있으며, 근사해석에 의한 보의 중앙부와 단부의 모멘트 및 전 단력 분포를 제시하고 있다. Fig. 2.는 분포하중 w_u, 순경간길이 *l*_n 인 3경간 이상 연속보에 대해 건축구조기준^[9]의 근사해석에 의한 중앙부와 단부의 모멘트 및 전단력 분포를 도시한 것이다.



Fig. 2. Approximate moments and shears distribution for continuous beams with more than two spans

54 한국강구조학회 논문집 제31권 제1호(통권 제158호) 2019년 2월

통상의 실무설계에서 연속보를 철골보로 설계하는 경우, Fig. 2. 의 모멘트 분포와 같이 휨모멘트의 절대값이 최대인 연속보 단부 의 부모멘트로 부재를 결정하여 전체 경간에 적용한다. 이렇게 설 계된 보는 단부를 제외한 나머지 부분에서는 설계강도와 요구강 도의 차이가 커서 단면 효율이 낮고 재료의 낭비가 크다.

합성보 설계에서 우선 중력모멘트에 대해 경제성을 확보하는 것은 매우 중요하다. 최근 개발된 많은 합성보가 전체 스팬에 걸쳐 서 일정한 단면을 사용하는데, 이 경우 단부 부모멘트에 대해 보단 면이 결정되므로 결과적으로 중앙부가 과다 설계되어 경제성에서 손해를 보는 경우가 많다.

본 연구에서는 연속보의 내부경간과 외부경간에 대해 보 중앙 부와 단부의 모멘트로 단면을 각각 달리 설계함으로써 경간 전체 의 단면 효율이 높은 합성보-기둥을 설계하였다. 합성보는 다음과 같이 설계하였다. 먼저 근사해석에 의한 보 중앙부 최대 정모멘트 에 대해 비대칭하이브리드 합성보 단면을 설계하였다. 보 단부(브 라켓)는 합성보 단면을 슬래브 철근 배근으로 부모멘트 성능을 보 강하여 단부의 소요모멘트를 만족시키도록 설계하였다. 연속보의 부모멘트 소성힌지가 기둥면에서 떨어진 브라켓에 발생하도록 브 라켓과 합성보의 슬래브에 철근 배근 위치를 조절하였다. 이와 같 이 작용하는 모멘트에 대해 중앙부와 단부를 각각 설계하여 보경 간 전체의 단면 활용도를 극대화한 합성보-기둥 접합부에 대해 내 진성능을 평가하였다.

3. 실험개요

3.1 실험체 개요

본 연구에서는 비대칭 하이브리드 합성보의 휨성능을 충분히 발휘할 수 있고, 보경간 전체의 단면 효율을 극대화하며, 시공성을 확보하면서도 우수한 접합부 회전능력을 발휘할 수 있는 합성보-기둥 접합부 개발을 목표로 하였다. 하이브리드 합성보를 공장 제 작된 기둥-브라켓에 현장에서 볼트 연결하는 것으로 가정하여 네 개의 하이브리드 합성보-기둥 접합부를 설계하였다.

3.1.1 재료 성능

Table 1은 실험체 제작에 사용한 강재와 철근의 인장실험결과 를 정리한 것이며, Fig. 3.은 강재의 응력-변형률 관계를 도시한 것 이다. Table 1의 항복강도는 0.2% 오프셋방법으로 산정하였다. 콘 크리트는 설계기준압축강도(f_d) 30MPa를 사용하였으며, 16개의 공시체를 제작하여 시험한 결과 평균 35.3MPa의 압축강도를 나타 내어 설계기준강도를 상회하는 것을 확인하였다.

Table	1.	Measured	material	properties
-------	----	----------	----------	------------

	Material	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)
Steel	HSA800-15t	803	882
	SM570-25t	520	654
	SM520-40t	419	563
plate	SM520-25t	387	556
	SM490-20t	334	528
	SM490-13t	345	505
Steel	SD400-D19	499	613
rebar	SD400-D25 488	629	



Fig. 3. Measured strain-stress relation of steel plates

Table 2. Test mat	trix
-------------------	------

3.1.2 실험체 단면

Table 2는 실험체별로 기둥과 브라켓, 하이브리드 합성보에 사용한 H형강의 단면 크기와 강재를 정리한 것이며, Fig. 4.는 SLE-1, SLI-1 실험체의 단면을 나타낸 것이다. SLE-2와 SLI-2 실험체는 Table 2와 같이 SLE-1, SLI-1 실험체에서 하이브리드 합성보의 하부플랜지에 사용한 SM570 강재를 HSA800 강재로 대체한 차이만 있으므로 도면은 생략하였다.

Fig. 2.의 연속보 외측경간처럼 정모멘트와 부모멘트의 절대값 차이가 적은 경우는 Fig. 4.(a) 같이 브라켓과 하이브리드 합성보의 춤을 같게 하였으며(SLE 실험체), 내측경간처럼 정모멘트와 부모 멘트의 절대값 차이가 상대적으로 큰 경우는 Fig. 4.(b) 같이 브라 켓과 하이브리드 합성보의 춤을 다르게(단차가 있게) 설계하였다 (SLI 실험체).

3.1.3 소성힌지 위치를 고려한 철근 배근

중력하중에 의한 모멘트 분포에 따라 설계된 연속보(보단부 휨 모멘트로 브라켓 설계, 중앙부의 휨모멘트로 하이브리드 합성보 설계)에 지진하중이 작용하여 보에 부모멘트가 선형 분포될 때 부 모멘트 휨강도 차이가 있는 브라켓 합성보 연결부에서 소성힌지 가 발생할 가능성이 크다.

본 연구에서는 시공성을 고려하여 합성보와 브라켓을 볼트로 접합하였는데, 볼트접합부는 항복시 슬립과 강도저하가 나타나기 쉽다. 따라서 반복가력시 볼트접합부가 탄성 거동하도록 Fig. 5.와 같이 브라켓 합성보 연결부 상부 슬래브에 철근을 배근하여 해당 부위의 부모멘트 성능을 강화하였다. 그리고, 철근배근을 통해 구

	Column		Bracket		Asymmetric hybrid composite beam			
Specimen	Sectional	Material	Steel sectio)n Longitudinal		Steel section		Longitudinal
	dimension		Dimension	Material	reinforcement	Dimension $(h \times h_{2} \times h_{3} \times t \times t_{4} \times t_{4})$	Material	reinforcement
			(is of twill)			(It's control for two offer typ)		
SLE-1	H-500×500×25×40 	×25×40 SM520	H-500×300×13×20	SM490	D25 6EA, D19 4EA	AH-500×200×220×13×13×25	Top flange/web : SM490 Bottom flange : SM570	D10 (EA
SLE-2						AH-500×200×220×13×13×15	Top flange/web : SM490 Bottom flange : HSA800	DIYOEA
SLI-1			H-588×300×13×20 SN	SM490	D25 6EA, D19 12EA	AH-420×200×220×13×20×25	Top flange/web : SM490 Bottom flange : SM570	D19 12EA
SLI-2						AH-420×200×13×20×15	Top flange/web : SM490 Bottom flange : HSA800	

Note: h_s = height of steel section; b_{fi} = width of top flange; b_{fb} = width of bottom flange; t_w = thickness of web; t_{fi} = thickness of top flange; t_{fb} = thickness of bottom flange.







간별 부모멘트 강도를 조정하여 높은 변형능력을 기대할 수 있는 브라켓 내부(기둥면에서 400~750mm 이격된 지점)로 부모멘트시 소성힌지 위치를 조정하였다. 부모멘트에 대한 소성힌지 유도 위 치는 용접이나 볼트접합이 없는 부위로 소성거동 시 순철골보와 동일한 높은 변형능력을 기대할 수 있다. 소성힌지의 위치를 조절 하는 것은 철골조 건물의 용접접합부 취성파괴를 피하기 위해 보 플랜지 일부분을 절취하여 소성힌지의 위치를 보 내부로 유도하 는 RBS(Reduced Beam Section, dogbone)접합부¹¹⁰¹와 유사한 개 념이다. 다만 RBS 접합부는 소성힌지 유도위치를 의도적으로 약 화시킨 방법이며, 본 연구에서 사용한 방법은 소성힌지를 제외한 다른 부분의 모멘트강도를 강화한 차이가 있다. Fig. 6.은 브라켓-

56 한국강구조학회 논문집 제31권 제1호(통권 제158호) 2019년 2월

합성보 연결부 철근 배근을 통해 SLI-1실험체의 소성힌지 위치를 조절한 것을 나타낸 것이다. 단 Fig. 6.은 소성힌지 위치 조정의 개 략적인 방법을 나타낸 것으로 철근은 정착길이와 무관하게 전강 도를 발현하는 것으로 가정하였다.

Fig. 6.(a)는 Fig. 2.의 내측경간의 단부와 중앙부 모멘트 절대값 의 비율(wuln²/11 : wuln²/16)에 맞게 브라켓과 하이브리드 합성보 를 설계한 보-기둥에 횡력이 작용하였을 때 소성힌지가 발생하는 위치를 도시한 것이다. Fig. 6.(a)과 같이 보에 정모멘트가 작용하 는 경우는 기둥면에 접하는 부분에 소성힌지가 발생하며, 부모멘 트가 작용하는 경우는 단면 크기의 변화로 부모멘트 강도가 급격 히 변하는 브라켓-합성보 연결부(기둥면에서 1,250mm 이격된



(a) SLE specimens



(b) SLI specimens

Fig. 5. Details of longitudinal reinforcement

지점)에서 소성힌지가 발생하게 된다. 소성힌지 위치를 브라켓 내 부로 옮기기 위해서 Fig. 4.~5.와 같이 브라켓-합성보 연결부에 철 근을 배근하여 해당부위의 부모멘트 강도를 강화하였다. 배근을 통해 구간별로 부모멘트 강도를 달리하면 Fig. 6.(b)와 같이 배근 을 하지 않아 상대적으로 부모멘트강도가 약한 구간(기둥면으로 부터 400~750mm 이격된 지점)에 소성힌지가 유도된다.

3.2 실험체 설계

실험체는 강기둥-약보 조건(2016 KBC⁹¹0713.9.6.)과 강한 패 널존(2016 KBC⁹¹0713.9.3.)으로 설계하여 모든 비탄성 소성변형 이 브라켓에 발생하도록 설계하였다.



(a) Plastic hinge location without bracket-hybrid beam joint reinforcement



(b) Plastic hinge location with bracket-hybrid beam joint reinforcement

Fig. 6. Plastic hinge location control of SLI-1 specimen through the reinforcement

기둥은 H-500×500×25×40(SM520) 부재로 제작하였으며, 패널 존 양쪽에 5mm(SM400)의 보강판을 사면 모살용접하여 보강하 였다. 모든 실험체의 슬래브는 폭 2,000mm, 두께 180mm 로 타설 하였으며 Fig. 5.와 같이 브라켓 단부의 슬래브에 종방향 철근을 배근하여 보춤을 크게 하지 않고도 중력하중에 의한 단부의 소요 부모멘트를 만족시키도록 설계하였다. 이때 보단부에서부터 철 근이 항복강도를 발휘할 수 있도록 기둥면에 접하는 철근(D25)을 기둥플랜지에 용접하였다. 기둥면에서 400~750mm 이격된 구간

58 한국강구조학회 논문집 제31권 제1호(통권 제158호) 2019년 2월

은 슬래브에 종방향 철근이 없도록 하였다. 종방향 철근 보강이 되 지 않은 구간의 부모멘트 강도는 강재보에 의한 휨강도만으로 결 정된다. 이와 같이 철근배근을 달리하여 브라켓 내부 구간에 부모 멘트 성능의 차이를 두어서 특정구간(기둥면에서 400~750mm 이 격된 구간)에 소성힌지가 발생하도록 하였다. 브라켓 합성보 연결 부(볼트 접합)는 항복하지 않도록 연결부 상부에 종방향 철근을 배근하였다. 보경간의 직각방향으로는 슬래브 상단에 D10 철근 한개, 하단에 D7 철근 2개를 200mm 간격으로 수축 온도철근을 배근하였다.

브라켓-합성보 연결부는 F10T의 M24 TS볼트를 사용하여 마 찰접합으로 설계하였으며, 이때 미끄럽계수는 무도장 흑피면 (unpainted clean mill scale steel surfaces)에 해당하는 0.3을 적용 하였다. 브라켓-합성보 연결부 웨브는 연결판재의 볼트 미끄럼강 도(2016 KBC⁽⁹⁾ 0710.3.6.),전단강도(2016 KBC⁽⁹⁾ 0710.4.2.), 블 록전단강도(2016 KBC⁽⁹⁾ 0710.4.3.)가 웨브에 작용하는 최대전단 력을 상회하도록 웨브 접합부의 볼트 개수 및 연결판재의 두께를 결정하였다. 그리고, 브라켓-합성보 연결부의 상하부 플랜지 접합 부의 인장강도가 철골보의 상하부 플랜지 인장항복강도를 초과 하도록 연결판재의 두께 및 볼트개수를 결정하였다.

하이브리드 합성보는 2016 KBC⁽⁹⁾ 0709.3.2.4 조항에 따라 콘 크리트 슬래브와 강재가 완전합성거동을 하도록 브라켓과 합성 보상부플랜지에 D22 스터드를 130mm 간격으로 2열 배치하였으 며, 작은보 상부플랜에 D22 스터드를 150mm간격으로 1열 배치 하였다.

3.2.1 SLE-1 & SLE-2 실험체

SLE 실험체는 연속보 외측경간에 대한 설계로써 Fig. 2.와 같이 보단부와 중앙부의 모멘트 절대값이 각각 wuln²/16, wuln²/14으로 차이가 크지 않으므로 브라켓과 하이브리드 합성보의 춤이 같도 록 설계하였다. SLE-1 실험체는 비대칭 하이브리드 합성보 하부 플랜지에 SM570 강재를 사용하였으며, SLE-2 실험체는 하부플 랜지에 HSA800 강재를 사용하였다. 브라켓 상부에는 종방향으 로 기둥플랜지면에 D25 철근 6개를 용접하였으며, D19 철근 4개 를 슬래브에 배근하였다. 브라켓-합성보 연결부와 합성보의 슬래 브에는 D19 철근 6개를 Fig. 5.(a)와 같이 250mm 간격으로 배근하 였다.

3.2.2 SLI-1 & SLI-2 실험체

SLI 실험체는 연속보 내부경간에 대한 설계로써 Fig. 2.와 같이 보단부와 중앙부의 모멘트 절대값이 각각 wuln²/16, wuln²/11으로

차이가 크기 때문에 Fig. 4.와 같이 브라켓과 하이브리드 합성보의 춤을 다르게 하여 설계하였다. 브라켓과 하이브리드의 합성보의 춤이 다르기 때문에 Fig. 4.와 같이 합성보의 하부플랜지가 브라켓 의 웨브에 연결되며, 이때 하부플랜지에 작용하는 인장 및 압축력 에 의해 브라켓 웨브에 응력이 집중된다. 응력집중에 의한 브라켓 웨브의 좌굴 및 찢어짐을 방지하기 위해 합성보 하부플랜지와 같 은 높이의 웨브에 600mm 길이의 플레이트를 용접하여 응력전달 경로를 확보하였다.

SLI-1 실험체는 비대칭 하이브리드 합성보 하부플랜지에 SM570 강재를 사용하였으며, SLI-2 실험체는 HSA800 강재를 사용하였다. 브라켓 상부에는 종방향으로 기둥플랜지면에 D25 철 근 6개를 용접하였으며, D19 철근 6개를 슬래브에 배근하였다. 브라켓-합성보 연결부와 합성보의 슬래브에는 Fig. 5.(b)와 같이 D19 철근 12개를 배근하였다.

3.3 실험체 셋업, 가력 및 계측

Fig. 7.은 실험체의 셋업을 나타낸 것이다. 기둥 상하부는 힌지 로 반력벽에 연결하였으며, 기둥 중심으로부터 3,500mm 떨어진 지점에 집중하중을 반복 가력하였다. 기둥 플랜지면으로부터 2,575mm 위치에 하이브리드 합성보 양쪽으로 작은보가 연결되 어 있으며, 작은보의 횡변위를 구속하여 실험체를 횡지지하였다. 하중은 2016 KBC⁽⁹⁾ 0722.2.4.2의 보-기둥모멘트접합부 반복재하 인증실험의 가력프로토콜에 따라 층간변위 0.00375rad, 0.005rad, 0.0075rad은 6 주기, 0.01rad은 4주기, 0.015rad, 0.02rad, 0.03rad, 0.04rad, 0.05rad은 2 주기씩 변위제어로 반복가력하였다.

LVDT를 가력부, 패널존, 하이브리드 합성보 연결부에 설치하 여 접합부 전체 회전각 성분을 패널존, 기둥, 브라켓, 하이브리드 합성보 성분으로 분리할 수 있도록 하였다. 기둥면에서 150mm, 400mm, 550mm, 1,250mm 떨어진 위치의 상하부 플랜지와 웨브, 철근에 Fig. 7.과 같이 변형률게이지를 설치하여 주요 변형률을 측 정하였다. 브라켓의 회전각 성분(θ_{br})은 Lee and Park^[11]의 연구 에서 철골모멘트접합부의 회전성분 유도식에 따라 식 (1)과 같이 정리하였으며, 유도식에 사용된 기호는 Fig. 8.에 도시하였다.

$$\theta_{br} = \frac{L_{13}}{l_b} - \gamma_{AVG} + \frac{d_b \gamma_{AVG}}{H} (1 + \frac{d_c}{2l_b}) - \theta_c (1 + \frac{d_c}{2l_b})$$
(1)

여기서,
$$\gamma_{AVG} = \frac{\sqrt{a^2 + b^2}}{2ab} (L_9 - L_{10})$$
, 패널존 평균전단변형
 $\theta_c = \frac{(L_{12} - L_{11})}{d_b} - \gamma_{AVG} (1 - \frac{d_b}{H})$, 기둥 회전성분

- L13 : 브라켓 단부 수직 변형량
- H : 기둥상하지점 사이의 거리 (3,500mm)
- a : L₉, L₁₀ 계측기준점의 수평거리
- *b* : *L*₉, *L*₁₀ 계측기준점의 수직거리
- *d_c* : 기둥춤
- *d*_b : *L*₁₁과 *L*₁₂사이의 수직거리





Fig. 7. Test set-up



Fig. 8. Location of LVDTs for bracket rotation





4. 실험결과 및 분석

4.1 실험결과

4.1.1 SLE 실험체

Fig. 9.(a)~(d)는 실험체의 층간변위각과 기둥외주면에서 정규 화된 모멘트 관계를 나타낸 것이며, Fig. 10.(a), (b)는 SLE-1, SLE-2 실험체의 브라켓 회전성분을 정리한 것이다. Fig. 9.에서 모 멘트 M은 Fig. 7.의 외력에 의해 기둥외주면에 작용하는 모멘트이 며, 정모멘트에 대한 소성모멘트 M_p는 기둥외주면에 접한 브라켓 의 소성휨강도, 부모멘트에 대한 소성모멘트 M_p는 기둥외주면에 서 이격된 소성힌지 유도지점인 순철골단면이 소성강도에 도달 할 때 기둥외주면에 작용하는 모멘트이다.

브라켓과 합성보의 단차가 없는 SLE-1, SLE-2 두 실험체 모두 Fig. 9.와 같이 0.04rad의 층간변위각까지 강도저하 없이 뛰어난 연성능력을 발휘하여 특수모멘트골조에 해당하는 성능을 발휘하 였다. 이후 0.05rad 층간변위각에서 보에 부모멘트가 작용할 때 Fig. 11.(a)와 같이 하부플랜지에 좌굴이 발생하여 강도가 저하되 었으며, 이후 정모멘트가 작용할 때 Fig. 11.(b)와 같이 기둥면과 용접된 보 하부플랜지 용접 열영향부에 인장파단이 발생하여 실 험이 종료되었다.





(b) Bracket bottom flange

(a) Bracket bottom flange local buckling at 5% story drift

Fracture after test

Fig. 11. Photos of SLE-1 specimen

실험체의 최대휨강도는 SLE-1실험체는 정모멘트 1.81M_p, 부 모멘트 1.16M_p 이며, SLE-2 실험체는 정모멘트 1.83M_p, 부모멘트 1.19M_p를 기록하였다. 모든 실험체에서 실험이 종료될 때까지 볼 트 접합부의 볼트 파단, 볼트 미끌림, 연결재의 소성변형 등이 발 생하지 않았다.

Fig. 12.는 SLE-1 실험체의 슬래브 중심선에 배근된 철근의 변 형률을 나타낸 것으로 소성힌지 유도지점에 인접한 위치(기둥면 으로부터 450mm 이격지점)에서는 철근이 항복하였으며, 브라켓 과 보가 만나는 지점(기둥면으로부터 1250mm 이격지점)에서는 철근이 탄성상태 있음을 보여준다. 또한 부모멘트 시 소성힌지 유 도지점의 슬래브에 큰 인장변형이 발생하였음을 Fig. 11.(a)의 슬



Fig. 12. Rebar strain of SLE-1 specimen

래브 균열을 통해 확인할 수 있다.

Fig. 9.(a)와Fig. 10.(a) 또는 Fig. 9.(b)와 Fig. 10.(b)를 비교해 보 면 층간변위의 대부분이 브라켓의 변형에 의해 발생하여 설계의 도대로 소성힌지가 브라켓에 유도되었음을 알 수 있다. 그리고, SLE-1, SLE-2 실험체는 Table 2와 같이 소성힌지를 유도한 브라 켓이 동일한 단면을 갖도록 설계 되었고 합성보의 하부플랜지 강 재만 다르기 때문에 거동이 유사할 것으로 예상되었으며 실험결 과에서도 약간의 강도 차이만 있을 뿐 매우 유사한 거동을 나타내 었다.

4.1.2 SLI 실험체

브라켓과 합성보의 단차가 있는 SLI-1, SLI-2 두 실험체 모두 Fig. 9.(c)~(d)과 같이 0.04rad의 층간변위각까지 0.8M, 이상의 휨 성능을 유지하여 특수모멘트골조에 해당하는 성능을 발휘하였 다. Fig. 13.(a)와 같이 0.03rad 층간변위각에서 보에 부모멘트가 작용할 때 합성보 하부플랜지 아랫쪽의 브라켓 웨브가 좌굴하여 브라켓 하부플랜지와 합성보 하부플랜지에 횡변형이 발생하였 다. 0.04rad 층간변위각에서 Fig. 13.(b)와 같이 브라켓 하부플랜지 의 좌굴이 발생하였고 최대 부모멘트강도가 층간변위각 0.03rad 일 때보다 저하되었다. 그리고 웨브좌굴에 의한 과도한 변형으로 Fig. 14.와 같이 합성보의 하부플랜지와 용접된 브라켓의 웨브가





(a) Bracket web local buckling at 3% story drift

(b) Bracket bottom flange local buckling at 5% story drift

Fig. 13. Photos of SLI-1 specimen



(a) SLI-1 at 6% story drift(b) SLI-2 at 5% story driftFig. 14. Bracket bottom flange fracture of SLI specimens

찢어져실험이종료되었다.실험체의최대휨강도는 SLI-1실험체 는정모멘트 1.62*M_p*, 부모멘트 0.94*M_p* 이며, SLI-2실험체는정모 멘트 1.55*M_p*, 부모멘트 0.98*M_p를* 기록하였다.

SLI-1, SLI-2 실험체도 SLE 실험체와 같이 층간변위의 대부분 이 브라켓에 발생하였다. 하지만 Fig. 13.(b)와 Fig. 14.와 같이 브 라켓 하부플랜지에 발생한 횡변형과 브라켓 웨브의 찢어짐으로 브라켓의 수직처짐 측정값이 왜곡되어 Fig. 10.과 같은 부재별 이 력곡선은 생략하였다.

SLI-1, SLI-2 실험체도 SLE 실험체와 같이 소성한지가 발생하는 브라켓이 동일한 단면을 갖도록 설계하였고, 실험결과도 예상과 같 이 약간의 강도 차이만 있을 뿐 매우 유사한 거동을 나타내었다.

두실험체모두공통적으로 브라켓하부 웨브의 조기 좌굴 및 이 로 인한 강도 저하로 부모멘트의 소성모멘트에 도달하지 못하였 으나 웨브에 보강재를 용접하여 합성보 하부플랜지 아랫쪽의 웨 브국부좌굴을 방지하거나 지연시킨다면 충분히 소성모멘트에 도 달할 수 있을 것으로 판단된다.

5. 결론 및 요약

보경간 전체의 단면 활용도를 극대화하며, 시공성을 확보하면 서도 우수한 접합부 회전능력을 발휘할 수 있는 합성보-기둥 접합 부 개발을 목표로 한 본 연구를 요약하면 다음과 같다.

 최근 개발한 비대칭 하이브리드 합성보를 다양한 보경간의 모멘트 분포를 갖는 연속보에 적용할 수 있도록 보-기둥 내진접합 부를 개발하고 실물대 실험을 통해 해당 접합부의 내진성능을 평 가하였다.

2) 보경간 전체의 단면 활용도를 극대화하기 위해 중력하중을 받는 연속보의 모멘트 분포에 따라 보단부와 중앙부의 단면을 각 각 설계하였다.

3) 보단부와 중앙부의 모멘트 비율에 따라 내측경간과 외측경 간의 두가지 타입으로 실험체를 구분하였다.

4) 보-기둥접합부의 우수한 접합부 회전능력 확보를 위해 보가

정모멘트를 받을 때는 기둥면에 소성힌지가 발생하고 부모멘트 를 받을 때는 브라켓 내부에 소성힌지가 유도되도록 설계하였고 실험으로 이를 확인하였다.

5) 실험결과 단차의 유무와 관계없이 모든 실험체가 0.04rad의 층간변위까지 0.8M,를 유지하여, 특수모멘트골조에 해당하는 성 능을 발휘하였다.

6) 연속보의 내측경간에 적용할 수 있는 브라켓과 합성보의 단 차가 있는 SLI 실험체에서 공통적으로 브라켓 하부 웨브의 조기 좌굴(3% 층간변위레벨) 및 이로 인한 강도 저하로 부모멘트의 소 성모멘트에 도달하지 못하였으나, 브라켓 웨브를 보강하면 소성 모멘트에 도달할 수 있을 것으로 판단된다.

7) 본 실험에서는 브라켓과 하이브리드 합성보를 볼트연결하 였으나, BWWF(bolted web and welded flange) 이음으로 대체하 면 접합부 회전능력은 유지하면서 시공성을 더욱 높일 수 있을 것 으로 보인다.

감사의 글

본 연구는 2016년 포스코 연구비 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

참고문헌(References)

[1] 김성배, 김상섭, 이원록, 김정연, 이승배, 유덕수, 김대회(2012) 신형상 U형 하이브리드 합성보의 휨성능에 대한 연구, 한국 강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제5호, pp.521-534.

Kim, S.B., Kim, S.S., Lee, W.R., Kim, J.Y., Lee, S.B., Ryu, D.S., and Kim, D.H. (2012) Study on the Flexible Strength of U-Shape Hybrid Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.5, pp.521-534 (in Korean).

- [2] 이철호, 소현준, 박창희, 이창남, 이승환, 오하늘(2016) 570 MPa급 고강도강을 적용한 콘크리트 채움 U형 하이브리드 합성보의 휨거동 및 설계, 한국강구조학회논문집, 한국강구조 학회, 제28권, 제2호, pp.109-120.
 Lee, C.H., So, H.J., Park, C.H., Lee, C.N., Lee, S.H., and Oh, H.N. (2016) Flexural Behavior and Design of Concrete-Filled U-Shape Hybrid Composite Beams Fabricated from 570MPa High-Strength Steel, *Journal of Korean Society* of Steel Construction, KSSC, Vol.28, No.2, pp.109-120 (in Korean).
- [3] 김성배, 전용한, 조성현, 최영한, 김상섭(2017) 춤이 큰 하이

브리드 합성보와 SRC기둥 접합부의 내진성능에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제2호, pp. 135-145.

Kim, S.B., Jeon, Y.H., Cho, S.H., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2017) Seismic Performance of HyFo Beam with High Depth-to-SRC Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.2, pp. 135-145 (in Korean).

[4] 김영주, 배재훈, 안태상(2013) 시공개선형 합성보
 (BESTOBEAM) 시스템 소개, 한국강구조학회지, 한국강구
 조학회, 제25권, 제4호, pp.44-49.

Kim, Y.-J., Bae, J.-H., and Ahn, T.-S. (2013) Introduction of BESTOBEAM System with Construction Convenience, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.4, pp.44-49 (in Korean).

 [5] 이은진, 현창국, 박문신(2011) 층고절감형 TU합성바닥판 공 법, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.69-72.

Lee, E.-J., Hyoun, C.-K., and Park, M.-S. (2011) Story Height Reduction TU Composite Slab Process, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol. 23, No.5, pp.69-72 (in Korean).

[6] 이철호, 안재권, 김대경, 박지훈, 이승환(2017) 콘크리트 채움 U형 메가 합성보의 내진성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제2호, pp.111-122.

Lee, C.H., Ahn, J.K., Kim, D.K., Park, J.-H., and Lee, S.H. (2017) Seismic Performance Evaluation of Concrete-Filled U-Shaped Mega Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.2, pp. 111-122 (in Korean).

[7] 황현종, 엄태성, 박홍근, 이창남, 김형섭(2013) TSC 합성보-PSRC 합성기둥 접합부에 대한 주기하중 실험, 한국강구조 학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제6호, pp.601-612. Hwang, H.J., Eom, T.S., Park, H.G., Lee, C.N., and Kim, H.S. (2013) Cyclic Loading Test for TSC Beam – PSRC Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.6, pp.601-612 (in Korean).

- [8] 전수찬, 한규홍, 이철호, 김진원(2017) 고강도강재를 적용한 비대칭 하이브리드 합성보의 휨거동 실험, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제29권, 제3호, pp.217-228.
 Jun, S.C., Han, K.H., Lee, C.H., and Kim, J.W. (2017) Flexural Testing of Asymmetric Hybrid Composite Beams Fabricated from High-Strength Steels, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.29, No.3, pp. 217-228 (in Korean).
- [9] 대한건축학회(2016) 건축구조기준 및 해설, 기문당. Architectural Institute of Korea (2016) *Korean Building Code and Commentary*, Kimoondang, Korea (in Korean).
- [10] 이철호, 김재훈, 전상우, 김진호(2006) 보플랜지 절취형(RBS) 철골 모멘트 접합부의 균형패널존 강도, 한국강구조학회논문 집, 한국강구조학회, 제18권, 제1호, pp.59-69.
 Lee, C.H., Kim, J.H., Jeon, S.W., and Kim, J.H. (2006) A Balanced Panel Zone Strength Criterion for Reduced Beam Section Steel Moment Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.1, pp. 59-69 (in Korean).
- [11] 이철호, 박종원(1998) 철골모멘트접합부 기둥 패널존 전단 변 형의 계측위치에 관한 소고, 한국강구조학회지, 한국강구조학 회, 제10권, 제4호, pp.73-76.
 Lee, C.H., and Park, J.W. (1998) A Brief Review of Locating the Sheer Deformation Measurements on the Column

ing the Shear Deformation Measurements on the Column Panel Zone in Steel Moment Connections, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.10, No.4, pp.73-76 (in Korean).

요 약: 최근 저자는 일반강재와 고강도강재를 단면에 함께 사용하는 비대칭 하이브리드 합성보를 제안하였다. 본 연구에서는 후속 연구로서 비대칭 하이브리드 합성보-기둥 접합부를 개발하고 실물대 실험을 통해 해당 접합부의 내진성능을 평가하였다. 보경간 전체 의 단면 활용도를 극대화하기 위해 중력하중을 받는 보의 모멘트 분포에 따라 두가지 타입(내측경간과 외측경간)으로 실험체를 구분 하였다. 실험체 설계시 안정적인 반복거동을 기대할 수 있도록 정모멘트와 부모멘트의 소성힌지 위치를 다르게 유도하는 것에 가장 중 점을 두었다. 실험결과 모든 실험체가 특수모멘트골조에 해당하는 성능을 발휘하였으며 의도한 위치(정모멘트시 기둥면, 부모멘트시 브라켓 내부)에 소성힌지가 발생하였다. 하지만 내측경간 실험체에서 볼트연결부 아래의 브라켓 웨브에 조기(3% 층간변위레벨)에 국 부좌굴이 발생하였고, 이후 부모멘트강도가 저하되었기에 브라켓 웨브의 보강이 필요할 것으로 보인다.

핵심용어:비대칭 하이브리드 합성보, 비대칭 하이브리드 합성보-기둥 접합부, 고강도강재, 소성힌지, 특수모멘트골조, 연속보 설계