

강연선을 적용한 모듈러 건축 시스템의 외부접합부 내진성능 실험적 평가

정담이¹ · 조봉호^{2*} · 이두용³ · 이재섭³ · 정찬우⁴

¹박사과정, 아주대학교, 건축공학과, ²교수, 아주대학교, 건축공학과,
³공학박사, 아주대학교, 건축공학과, ⁴팀장, 포스코 A&C, 스마트하우징사업실

Experimental Evaluation on Seismic Performance of Exterior Connection in Modular Building System with Steel Strand

Jung, Dam-I¹, Cho, Bong Ho^{2*}, Lee, Doo Yong³, Lee, Jae Sub³, Jung, Chan Woo⁴

¹Graduate Student (Ph.D. Course), Dept. of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

²Professor, Dept. of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

³Ph.D., Dept. of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

⁴Team Leader, Dept. of Smart Housing, POSCO A&C, Incheon, 21998, Korea

Abstract - A new connection system between modular units was proposed to improve the constructability and reusability of modular buildings, with the advantage of being able to simultaneously connect several units at the top of the module using steel strands. Cyclic tests on beam to column connection of modular building units composed of shear connector, wide flange beams and rectangular or bundled columns, were performed to evaluate the seismic performance such as lateral force resisting capacities, stiffness, ductility, energy dissipation and effectiveness of the proposed connection system. As a result of experiment, the RCHB, BCHB1, and BCHB2 maintained performance of about 1.02 times, 1.03 times, and 1.06 times or more, respectively, compared to 80 % of the plastic moment at the drift ratio of 2 %. Therefore, all specimens satisfied moment capacity for intermediate moment frames(IMF). Especially, one of the specimens, had beam and column reinforced with plate, induced the plastic hinge to the inside of the beams, which had the effect of preventing brittle failure of the welding part between beam to column. All experiments confirmed that the gap opening occurred between the columns as the lateral force increased, but the gap opening was also restored when the load decreased. The structural behavior of connection with steel strand was stable under cyclic loading.

Keywords - Post-tensioned connections, Modular building system, Cyclic loading test, Seismic performance, Intermediate moment frames

1. 서론

모듈러 건축은 대량생산을 통한 공사비 절감, 품질향상, 공기 단축, 재사용 가능 등의 이점이 있다^[1]. 국내에서도 모듈러 건축의 수요가 증가하고 있으나 기숙사 및 학교, 군 막사 등 주로 저층 건축물에 적용되어 왔다^[2]. 최근 국내에서는 모듈러 건축 산업의 활성화를 위해 모듈러 구조의 중·고

층화를 모색하고 있으며, 건축물의 용도를 주거용으로 확대하고 있다^[3]. 모듈러 건축은 공장에서 제작한 뒤 현장으로 운반되며, 현장에서 모듈러 유닛의 기둥 또는 보에서 접합이 이루어지는 것이 대부분이다. 그러나 현장에서의 모듈러 유닛 간 접합을 위해 일부 마감을 완료하지 않고 운송된다. 상하 및 좌우의 모듈러 유닛이 만나는 부위에서 접합을 수행해야 하므로 현장 작업량이 증가한다. 또한, 고장력 볼트 접합 해체 시 모듈러 유닛의 손상 가능성으로 인해 재사용에 어려움이 있는 실정이다. 이에 최근 모듈러 유닛의 공장 제작을 향상 및 현장 작업량 감소, 재사용 활성화를 위해 새로운 접합 시스템이 제안되고 있다. 일반적으로 모듈러 시스템은 횡하중에 대한 저항성능을 확보하기 위해 개새 또는 전단벽을 적용하거나 별도의 횡력 저항 시스템을 도입한다^[4]. 그러나 모듈러 유닛의 단방향에는 주로 개구부

Note.-Discussion open until April 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 25, 2021; revised on September 24, 2021; approved on September 28, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-219-3572 Fax. +82-31-219-2945

E-mail. bhcho@ajou.ac.kr

가 형성되므로 가새 또는 전단벽을 적용하기 적합하지 않다. 따라서 별도의 횡력 저항 시스템 없이 모듈러 유닛의 횡력 저항성능을 확보하기 위해 모듈러 유닛 간 접합부의 내진성능을 확보할 필요가 있다.

Park *et al.*^[5]은 각형강관 기둥과 C형강 보로 구성된 모듈러 시스템에서 단면결손 없이 완전강접합을 구현할 수 있는 브래킷형 완전강접합 시스템을 제안하였다. 반복가력실험 및 유한요소 해석을 통하여 제안된 접합부 시스템은 완전강접합 철골구조로서의 구조성능을 확보하였다.

Chen *et al.*^[6]은 모듈러 유닛을 접합할 때 별도의 연결 플레이트 없이 스테이 볼트(stay bolt)와 삽입형 연결 부재로 구성된 새로운 접합시스템을 제안하였다. 실험을 통해 접합부의 거동을 분석하고 그 성능을 평가하였다. 모듈러 상하 유닛의 기둥 사이에서 갭오픈링(gap-opening)이 발생하였으며, 이는 접합부의 거동 및 휨모멘트 분포에 영향을 줄 수 있다.

Sanches *et al.*^[7]은 각형강관 기둥 내부에 설치된 강봉과 기둥 내부가 채워지는 접합 철물로 구성되는 새로운 수직 접합 시스템을 제안하였다. 긴장력의 크기를 주요 변수로 적용하여 횡하중 작용에 따른 접합부의 성능을 평가하였다. 용접 접합과 비교하여 제안된 접합 시스템은 유사한 횡 강성 및 변형률 분포를 보이며, 더 큰 에너지 소산능력을 가진다.

Dai *et al.*^[8]은 고장력 볼트 접합 방식의 시공성 저하 및 마감재 손상, 연결부 부식 등의 문제점을 파악하고 이를 개선하기 위해 기둥 내부에 PC강봉을 삽입하여 접합하는 시스템을 제안하였다. 전단력에 저항하기 위해 각형강관 기둥 내부에 작은 규격의 각형강관을 삽입하고 사이에 그라우트를 사출하여 시스템과 접합 부재의 일체화 거동을 유도하였다. 제안한 접합 시스템은 요구되는 휨모멘트 저항능력 및 연성도를 확보하였다.

국내의 경우 고장력 볼트를 통한 모듈러 유닛 간 접합에 관한 연구와 모듈러 시스템의 횡력 저항성능을 평가하는 연구가 주로 수행되었다. 해외에서는 고장력 볼트 또는 별도의 접합장치를 적용하여 모듈러 시스템을 수직으로 접합하는 방법이 다양하게 제안되었으며, 제안한 접합 시스템을 적용하여 모듈러 시스템의 횡력 저항성능을 확인하였다. 국내·외에서 모듈러 시스템의 새로운 접합 방법을 제안하고 횡력저항성능 및 접합부의 성능을 확보하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다. 그러나 제안된 시스템들은 접합을 위한 작업 공간 확보가 어렵거나 단면 손실이 발생할 수 있다. 이를 개선하기 위해 기둥을 관통하여 상부에서 접합 가능한 시스템들이 제안되었으나 대부분 PC강봉을 적용하여 시공

오차 조절이 어렵고 시공성이 하락할 수 있다.

이를 개선하고자 본 연구에서는 강연선을 적용하여 모듈러 유닛 간 접합 시스템을 제안하였다. Fig. 1과 같이 강연선을 기둥 내부로 관통시키고 최상층에서 긴장력을 적용하여 상·하 유닛이 접합된다. 여러 층의 유닛을 한 번에 접합할 수 있으며 모듈러 유닛의 상부에서 작업이 가능하여 마감을 공장에서 완료할 수 있다. 본 연구에서는 실험을 통해 강연선을 적용한 모듈러 시스템의 접합부 성능 및 횡력 저항성능을 평가하였다.

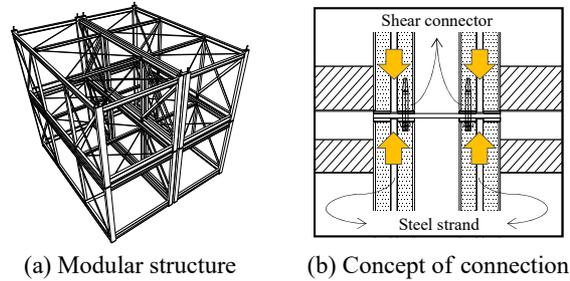


Fig. 1. Concept of post-tensioned connections

2. 실험계획

2.1 실험체 설계 및 제작

모듈러 시스템의 성능 비교를 위하여 보-기둥 접합부에 적용된 부재의 규격 및 보강 여부에 따라 Table 1과 같이 총 3개의 실험체를 선정하였다. RCHB 실험체는 Fig. 2(a) 및 Fig. 2(d)와 같이 RHS-200×100×9의 각형강관 기둥을 적용하였다. RCHB 실험체는 H-250×100×6×9의 바닥보와 H-150×100×6×9의 천장보를 적용하였다. 기둥의 엔드 플레이트 중앙에 강연선 관통을 위한 홀이 형성되어 있으며, 강연선 관통 홀 좌우로 전단 연결재(shear connector)를 삽입할 수 있는 홀이 형성되어 있다.

전단 연결재는 모듈러 유닛의 상하부를 관통하여 설치되며, 강연선을 대신하여 접합부에 작용하는 전단력에 저항하는 역할을 수행한다. 전단 연결재는 F10T 등급의 M27 고장력 볼트를 핀 형태로 가공하여 모듈러 건축 시공 시 가이드 핀으로도 활용할 수 있다. 전단 연결재는 기둥의 최(最)외곽부에 설치할 수 있도록 기둥 상부의 엔드 플레이트에 나사산을 포함한 홀이 형성되어 있다. 모든 실험체는 상하부 모듈러 유닛을 연결하기 위해 관통되어 있는 강연선에 10 tonf (98 kN)의 긴장력을 적용하였다. BCHB1 실험체의 경우 RHS-200×100×9 각형강관과 각형강관을 반으로 절단하여

Table 1. Member specification of specimens

Specimen	Member	Steel grade	Standard
RCHB	Ceiling beam	SM355	H-150×100×6×9
	Floor beam		H-250×100×6×9
	Column	SRT410	RHS-200×100×9
	PC strand	SWPC7B	D15.2
BCHB1	Ceiling beam	SM355	H-200×100×8×10
	Floor beam		H-250×100×8×10
	Column	SRT410	RHS-200×100×9 + RHS-100×100×9
	PC strand	SWPC7B	D15.2
BCHB2	Ceiling beam	SM355	H-200×100×8×10
	Floor beam		H-250×100×8×10
	Column	SRT410	RHS-200×100×9 + RHS-100×100×9
	Reinforced plate	SM355	PL-10
	PC strand	SWPC7B	D15.2

Fig. 2(b), Fig. 2(e)와 같이 ㄱ형의 조합기둥을 형성하였다. H-250×100×8×10으로 구성된 바닥보와 H-200×100×8×10으로 구성된 천장보를 적용하여 보-기둥 접합부로 계획하였다. BCHB2 실험체는 BCHB1와 같이 부재 단면은 동일하다. 보의 플랜지를 강판으로 보강하여 보의 소성변형능력을 향상시키고 용접부의 보강효과를 기대할 수 있다. 패널 존을 보강하기 위해 보가 접합된 부위를 제외한 나머지 기둥 부위를 10r의 강판으로 보강하였다. Fig. 2(c)는 BCHB2의 단면을 나타내며, Fig. 2(f)는 보-기둥 접합부 상세를 나타낸다. BCHB1과 BCHB2 실험체는 RCHB 실험체와 마찬가지로 엔드 플레이트에 전단 연결재 삽입을 위한 홈이 형성되어 있다. 요구되는 전단력에 대해 2개 이상을 삽입할 수 있으며, 기둥의 최외곽부 및 RHS-100×100×9 기둥의 중앙에 전단 연결재를 삽입하였다. 모든 실험체는 강연선 설치의 용이함을 위해 기둥 중앙에 강관이 삽입되어 있으며, 기둥 상부와 하부에 부분적으로 적용하여 실험결과에 영향을 미치지 않도록 설계하였다.

2.2 실험장치 및 실험방법

단면 방향의 횡력 저항성능을 파악하기 위해 4개의 모듈

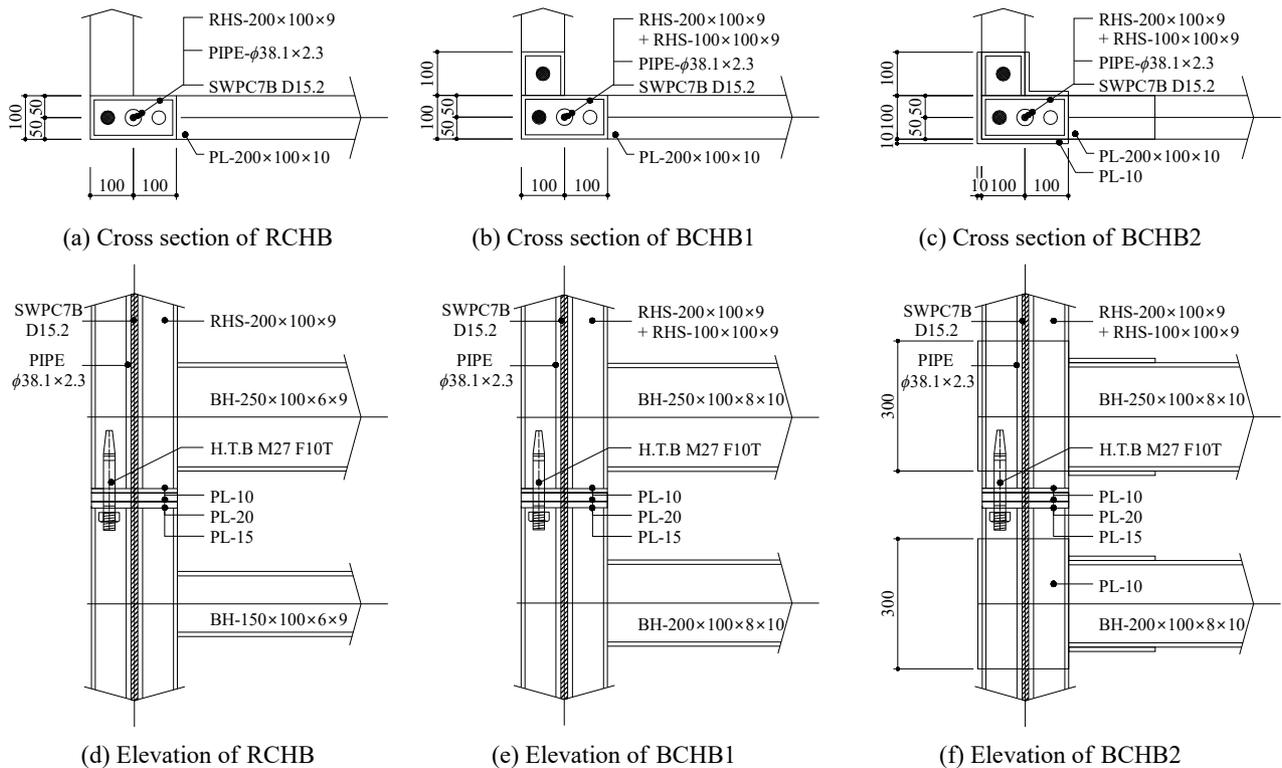
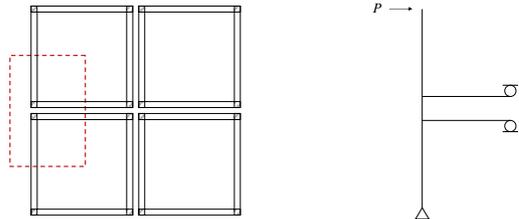


Fig. 2. Connection details of the specimens

이 적층된 모듈러 시스템으로 가정하였으며, Fig. 3와 같이 보-기둥 접합부에 대한 형상을 이상화하여 실험체를 계획하였다. Fig. 4는 본 실험에서 사용된 실험 셋업을 보여준다. 실험체 셋업 구현의 한계로 인해 실험체를 90° 회전시키고 동일한 하중흐름을 갖도록 기둥을 수평으로 놓혀 한쪽은 핀 지지점, 한쪽은 롤러 지지점을 형성하였다. 유압가력기는 수직으로 세워진 보의 측면에 연결하였으며, 횡지지대를 설치하



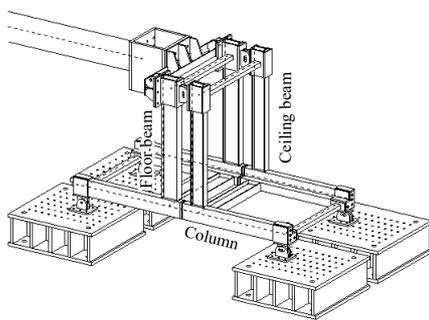
(a) Elevation of modular buildings (b) Specimen selection

Fig. 3. Idealized structure

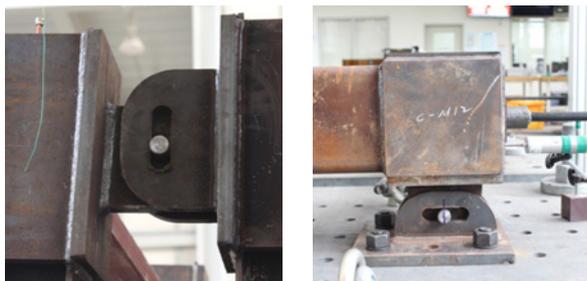


(a) Side of the specimen

(b) Pin support



(c) View of experiment



(d) Roller between beams

(e) Roller support

Fig. 4. Configuration of the test set-up

지 않고 실험체를 입방체로 설계하였다. 천장보와 바닥보는 수평 변위만을 공유할 수 있도록 장 슬롯을 형성하였다. 기둥의 중앙부터 가력점까지의 거리는 1,450 mm이며, 기둥면부터 가력점까지의 거리는 1,350 mm이다. 실험체의 주요 치수는 Fig. 5에 나타냈다.

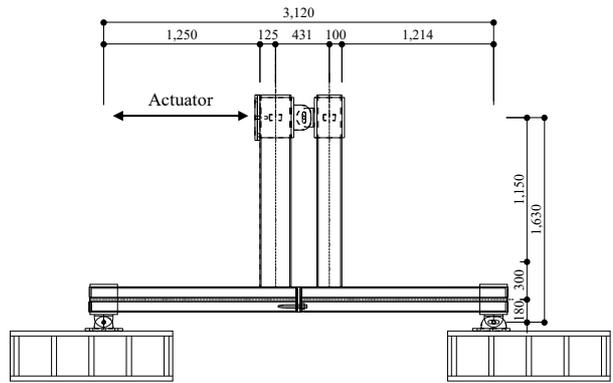


Fig. 5. Test set-up

강연선을 통해 접합되므로 유압가력기의 자중이 실험체에 미치는 영향을 최소화하기 위해 500 kN의 유압가력기를 사용하였고, 가력 프로토콜은 AISC 내진규정^[9]의 하중 재하 이력을 사용하였다. 층간변위비 0.375%(6 cycles)부터 0.5%(6 cycles), 0.75%(6 cycles), 1.0%(4 cycles), 1.5%(2 cycles)로 점진적으로 증가시켜 가력하였으며, 2.0%부터는 1.0%씩 증진하여 2회씩 반복 가력하였다. 변위 기반으로 제어하였으며, 층간변위비가 계산되는 기준은 기둥의 중심부터 가력점까지 거리인 1,450 mm이다. Table 2는 층간변위비별 횡변위를 나타낸다.

Table 2. Loading step

Step	Drift ratio (%)	Displacement (mm)	Cycles
1	0.375	5.44	6
2	0.50	7.25	6
3	0.75	10.88	6
4	1.0	14.50	4
5	1.5	21.75	2
6	2.0	29.00	2
7	3.0	43.50	2
8	4.0	58.00	2
9	5.0	72.50	2
10	6.0	87.00	2

2.3 재료 인장시험

KS B 0801 금속재료 인장시험편^[10]에 따라 실험체 제작에 사용된 강재에서 1A호 시편을 절취하여 3개씩 제작하였다. 실험체에 적용된 H형강 보 부재는 빌트업 부재이므로 플랜지 및 웹에 대해 모두 시험을 수행하였다. 강연선은 KS B 0801에 따라 4호 시편으로 제작하였다.

모든 시험편은 KS B 0802 금속재료 인장시험 방법^[11]에 따라 인장시험을 수행하였다. Table 3는 부재별 및 강종별 인장시험결과를 요약한 표이다. 인장시험 결과 RCHB 실험체의 플랜지 및 보강판에 적용된 SM355 9t 소재는 규정치보다 다소 작게 측정되었으나, 이외 부재는 모두 규정 강도를 만족하였다.

Table 3. Material properties of the specimen's member

Specimen	Member		Steel grade	F_y (MPa)	F_u (MPa)
RCHB	Ceiling beam	Flange	SM355	290.9	430.2
		Web		471.6	541.7
	Floor beam	Flange		290.9	430.2
		Web		471.6	541.7
	Column		SRT410	558.5	621.9
	PC strand		SWPC7B	1,772	1,966
BCHB1 & BCHB2	Ceiling beam	Flange	SM355	395.4	536.4
		Web		394.6	537.9
	Floor beam	Flange		395.4	536.4
		Web		394.6	537.9
	Column		SRT410	558.5	621.9
	Reinforced plate		SM355	395.4	536.4
	PC strand		SWPC7B	1,772	1,966

3. 실험결과 및 분석

3.1 실험체 거동 특성 및 파괴모드

모듈러 시스템의 외부접합부 반복가력시험 결과 RCHB 및 BCHB1 실험체는 천장보가 항복하면서 최종적으로 보-기둥 접합부의 용접부 파단으로 실험이 종료되었다. 보 및 기

둥의 보강판을 적용하여 용접부를 보강한 BCHB2 실험체는 중간변위비 5.0%에서 천장보의 소성변형이 발생하였으며, 이후 유압가력기의 용량초과로 인해 실험을 종료하였다.

보의 유효길이에 가력 하중을 곱하여 보의 휨모멘트를 산정하고 횡 변위를 기둥 중심에서 가력 지점까지의 거리를 나누어 실험체의 중간변위비를 산정하였다. RCHB 및 BCHB1 실험체의 유효길이는 보의 총 길이인 1,350mm이며, BCHB2 실험체는 보 플랜지에 200 mm 길이의 보강판이 적용되어 1,150mm의 유효길이를 가진다. 실험체의 공칭 휨모멘트는 천장보 및 바닥보가 모두 소성 모멘트에 도달하는 모멘트로 가정하여 천장보와 바닥보의 소성 모멘트를 합산하였다. 여기서 각 보의 소성 모멘트는 보 부재의 소성 단면계수 및 인장시험결과에 따른 항복강도로부터 계산되며, 플랜지와 웹의 항복강도를 모두 고려하였다. 실험체는 입방형으로 설계되어 보-기둥 접합부가 두 세트르 형성되므로 하중은 2로 나누어 기재하였다. RCHB 실험체의 소성 모멘트(M_p)는 148.3 kN·m이며, BCHB1 및 BCHB2 실험체의 소성 모멘트는 232.2 kN·m이다. 모든 실험체의 결과를 동일한 기준으로 나타내기 위해 휨모멘트는 보의 길이에 횡하중을 곱하여 표현하였다. BCHB2 실험체는 RCHB 및 BCHB1과 유효길이가 다르기 때문에 공칭 휨모멘트를 환산하였다. BCHB2 실험체는 소성 모멘트에 보의 유효길이를 나누고 보의 길이를 곱하여 식 (1)과 같이 산정하였다. BCHB2 실험체의 환산된 소성 모멘트($M_{P,e}$)는 272.6 kN·m이다.

$$M_{P,e} = \frac{M_P}{L_e} \times L \quad (1)$$

여기서, $M_{P,e}$: 환산된 소성 모멘트(kN·mm)

M_P : 소성 모멘트(kN·mm)

L_e : 보의 유효길이(mm)

L : 보의 길이(mm).

AISC 내진규정에 따르면 중간변위비 2%에서 소성 모멘트의 80% 이상의 성능을 보유하면 중간모멘트 골조에 해당한다. BCHB1 및 BCHB2 실험체는 최대 휨모멘트가 소성 모멘트를 상회하며, RCHB 실험체는 가력 정방향에서 최대 휨모멘트가 소성 모멘트와 유사한 값을 가진다. 모든 실험체는 중간변위비 2%에서 M_p 의 80% 이상의 내력을 유지하여 중간모멘트 골조 수준의 성능을 확보한 것으로 판단된다. Table 4는 주요 실험결과를 요약한 표이다.

Table 4. Summaries of test results

Specimen		$\frac{M_{max}}{M_P}$	θ_{max}	$\frac{M_{at2\%}}{0.8M_P}$	M_P	Failure mode
RCHB	+	0.99	0.049	1.02	148.3	Crack of the welded ceiling beam to column
	-	1.22	0.040	1.15		
BCHB1	+	1.03	0.042	1.03	232.2	
	-	1.18	0.035	1.18		
BCHB2	+	1.16	0.057	1.06	272.6**	Plastic deformation of the ceiling beam
	-	1.18	0.027*	1.19		

M_{max} : maximum moment(kN·m), θ_{max} : angle of rotation at maximum moment(rad), $M_{at2\%}$: moment at drift ratio 2%(kN·m), M_P : sum of plastic moments of ceiling beam and floor beam(kN·m)

*0.004 rad not reached due to overcapacity of actuator

**converted plastic moment, $M_{P,e}$ (kN·m)

Table 5는 RCHB 실험결과를 나타내며, Fig. 6는 모멘트-변위 곡선을 나타낸다. 실험 결과 천장보에서 최초 항복이 발생하였으며, 이후 Fig.7과 같이 천장보의 용접부가 파단하여 실험을 종료하였다. 가력 정방향의 횡 변위 32.2 mm(2.22%) 및 가력 부방향의 횡 변위 28.0 mm(1.93%)에서 천장보 플랜지가 항복하였다. 또한, 가력 정방향의 횡 변위 70.6 mm(4.90%) 및 가력 부방향의 횡 변위 57.4 mm(4.00%)에서 각각 최대강도 108.4 kN, -134.1 kN에 도달하였다. 층간변위비 4.0%에서 천장보의 용접부에서 균열이 발생하였으며, 층

Table 5. Test results of RCHB

Specimen		V_y	δ_y (%)	V_{max}	δ_{max} (%)	$K_{i,l}$	μ
RCHB	+	91.0	28.3(2.0)	108.4	70.6(4.9)	3.2	2.49
	-	107.2	30.3(2.1)	134.1	57.4(4.0)	3.5	1.89

V_y : yield load of the specimen(kN), δ_y : displacement at yield load(mm), V_{max} : maximum load of the specimen(kN), δ_{max} : displacement at maximum load(mm), $K_{i,l}$: initial lateral stiffness(kN/mm), μ : ductility

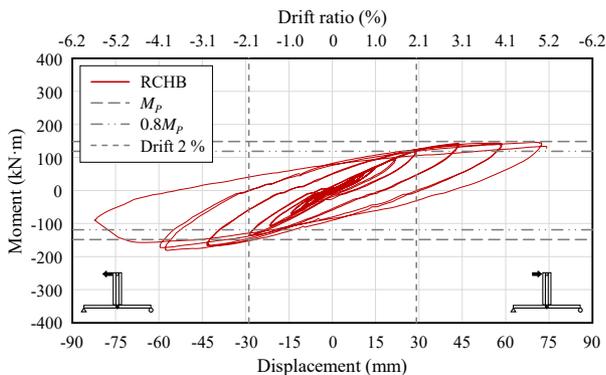


Fig. 6. Moment–displacement curve of RCHB

간변위비 5.0%에서 천장보의 용접부가 파단하여 실험을 종료하였다.

BCHB1 실험체는 층간변위비 2.0%까지 탄성 거동을 보이며, 층간변위비 0.75%에서 갭오프닝이 관찰되었다. 가력 정방향의 횡 변위 27.7 mm(1.91%) 및 가력 부방향의 횡 변위 20.4 mm(1.41%)에서 천장보의 플랜지가 항복하였다. 또한, 가력 정방향의 횡 변위 60.6 mm(4.2%) 및 가력 부방향의 횡 변위 50.8 mm(3.5%)에서 각각 최대강도 178.0 kN, -202.8 kN에 도달하였다. 층간변위비 약 4%에서 천장보와 기둥의 용접부에 균열이 발생하였다. 이후 용접부의 취성 파괴로 실험을 종료하였다. Table 6는 BCHB1의 주요 실험결과를, Fig. 9는 BCHB1 실험체의 파괴모드를 나타낸다.

BCHB2 실험 결과 천장보에서 최초 항복이 발생하였으며, 가력 정방향의 층간변위비 82.7 mm(5.7%) 및 가력 부방향의 층간변위비 39.3 mm(2.7%)에서 최대하중에 도달하였다. 최대하중은 각각 234.4 kN, 237.9 kN으로 나타났다. 또한, 층간변위비 0.75%(10.9 mm)에서 갭오프닝이 관찰되었으며, 가력 정방향의 횡 변위 21.8 mm(1.5%)에서 1층 천장보 플랜지가 최초 항복하였다. BCHB2 실험체는 층간변위비 2.0%까지 탄성 단계에 있으며, 실험 종료 시까지 안정적인 거동을 보인다. 가력 정방향의 층간변위비 3.0%에서 천장보의 변형이 확인되었으며, Fig. 11은 BCHB2의 파괴모드를 나타낸다. BCHB2 실험체는 유압가력기의 보유 용량에 도달



Fig. 7. Failure mode of RCHB

하여 실험을 종료하였으나, BCHB1 실험체 대비 1.4배 이상의 내력 및 1.1배 이상의 연성도를 기대할 수 있다. BCHB2 실험체는 보에서 소성힌지 유도를 위해 플랜지에 보강판을 적용하였고, 보에서의 소성변형능력이 향상되었음을 확인

하였다. 또한, 플랜지 보강판에 의해 보와 기둥 용접부가 보강되는 효과를 얻어 용접부 균열이 발생하지 않았다. 유압 가력기의 용량 도달 후 실험을 종료하여 최대하중 및 연성도는 계측결과보다 큰 것으로 판단된다.

Table 6. Test results of BCHB1

Specimen		V_y	δ_y (%)	V_{max}	δ_{max} (%)	$K_{i,t}$	μ
BCHB1	+	144.8	32.8(2.3)	178.0	60.6(4.2)	4.4	1.8
	-	150.8	28.6(2.0)	202.8	50.8(3.5)	5.3	1.8

V_y : yield load of the specimen(kN), δ_y : displacement at yield load(mm), V_{max} : maximum load of the specimen(kN), δ_{max} : displacement at maximum load(mm), $K_{i,t}$: initial lateral stiffness(kN/mm), μ : ductility

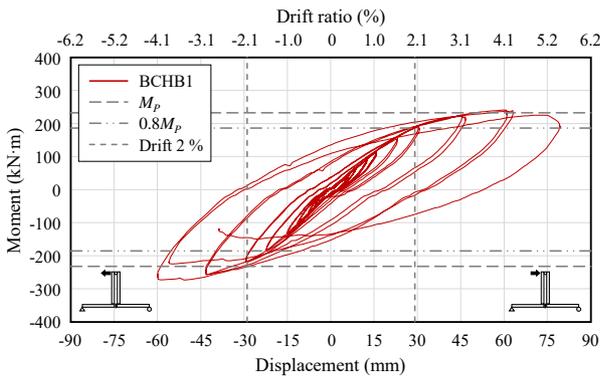


Fig. 8. Moment–displacement curve of BCHB1



Fig. 9. Failure mode of BCHB1

Table 7. Test results of BCHB2

Specimen		V_y	δ_y (%)	V_{max}	δ_{max} (%)	$K_{i,t}$	μ
BCHB2	+	204.8	40.6(2.8)	234.4	82.7(5.7)	5.0	2.0
	-*	190.2	32.4(2.2)	237.9	39.3(2.7)	5.9	1.7

V_y : yield load of the specimen(kN), δ_y : displacement at yield load(mm), V_{max} : maximum load of the specimen(kN), δ_{max} : displacement at maximum load(mm), $K_{i,t}$: initial lateral stiffness(kN/mm), μ : ductility

*The displacement at the maximum load was measured to be smaller than the planned displacement, because 0.004 rad could not be reached due to overcapacity of actuator.

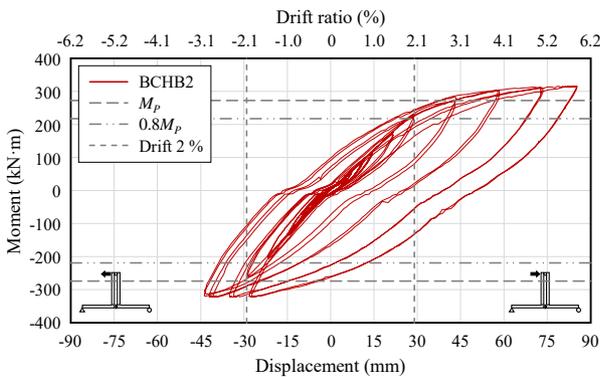


Fig. 10. Moment–displacement curve of BCHB2



Fig. 11. Failure mode of BCHB2 at 4%

3.2 접합부 거동 분석

강연선의 부재 특성상 늘어났다가 복원되는 성질을 가지며, 기동에 인장력이 작용하면 기동 사이가 벌어지는 겹오프닝 현상이 발생한다. 또한, 보 및 기동의 회전에 의해 겹오프닝이 발생할 수 있다. 보-기동 접합부의 횡강성에 따라 겹오프닝 형상이 달라진다.

RCHB 실험체는 7.6kN에서 겹오프닝이 최초로 발생하였으며, Fig. 12는 겹오프닝 계측결과를 나타낸다. 가력 정방향에서는 Fig. 13과 같이 접합부 외부 면에서 겹오프닝이 발생하며, 층간변위비 2.0%에서 약 5.44mm의 겹오프닝이 발생하였다. 가력 부방향에선 Fig. 14과 같이 접합부의 내부 면에

서 겹오프닝이 발생하며, 층간변위비 2.0%에서 약 2.49mm의 겹오프닝이 발생하였다. 겹오프닝은 가력 양방향에 대해 대칭 형태로 발생하며, 가력 방향에 따라 기동의 외부면 또는 내부 면으로 겹오프닝의 발생 위치가 달라진다. 강연선은 실험이 종료되는 층간변위비 5.0%까지 복원력을 유지하므로 강연선이 탄성 거동함을 확인하였다.

BCHB1 실험체는 횡하중 35.3 kN에서 겹오프닝이 최초로 발생하였으며, Fig. 15은 겹오프닝 계측결과를 나타낸다. 가력 정방향에서는 Fig. 16과 같이 기동의 내부·외부 면에서도 겹오프닝이 발생하며, 층간변위비 2.0%에서 약 6.63 mm의 겹오프닝이 발생하였다. 가력 부방향에서는 Fig. 17과 같이 접합부의 내부 면에서만 겹오프닝이 발생하며, 층간변위

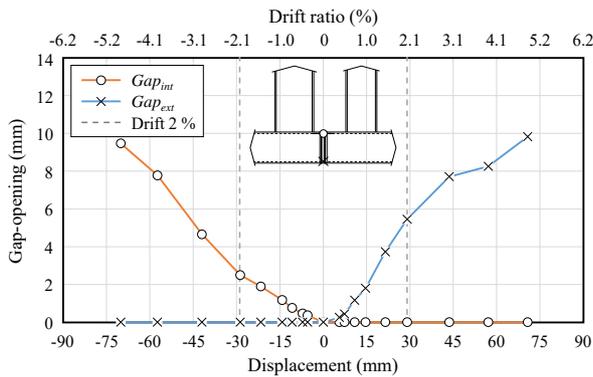


Fig. 12. Gap-displacement relationship of RCHB

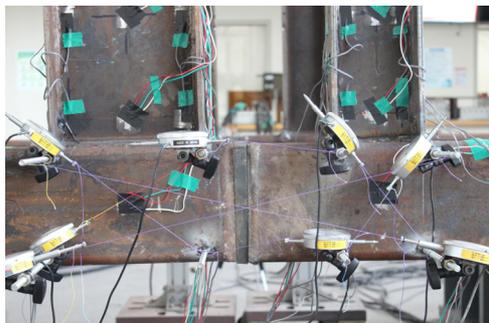


Fig. 13. Gap deformation of RCHB at -2%

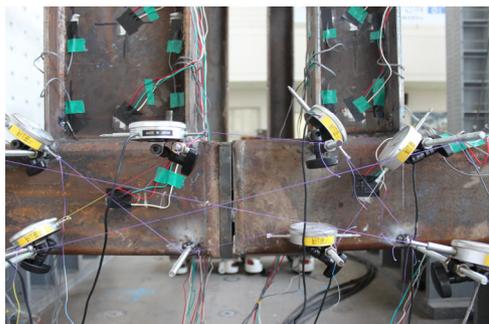


Fig. 14. Gap deformation of RCHB at 2%

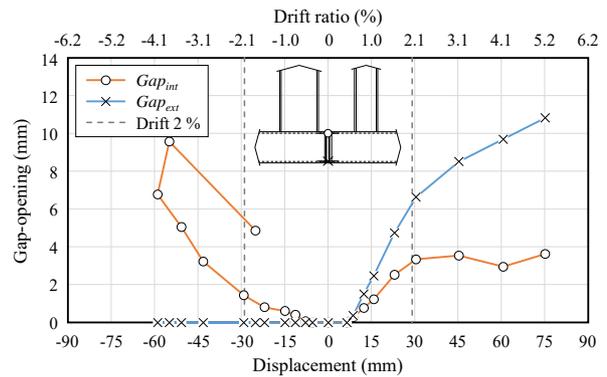


Fig. 15. Gap-displacement relationship of BCHB1

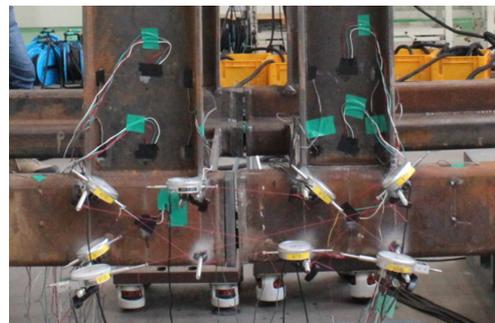


Fig. 16. Gap deformation of BCHB1 at 2%

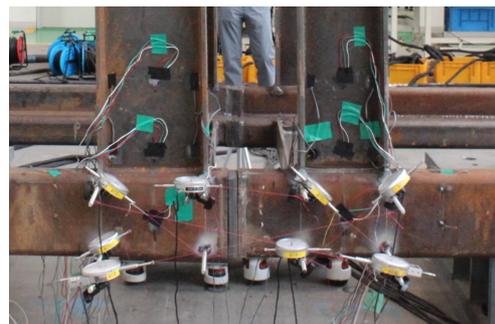


Fig. 17. Gap deformation of BCHB1 at -2%

비 2.0%에서 약 1.4mm의 겹오프닝이 발생하였다. 겹오프닝은 가력 정방향 및 부방향에 대해 비대칭 형태로 발생함을 알 수 있으며, 가력 방향에 따라 기둥의 외부면 또는 내부면으로 겹오프닝의 발생 위치가 달라짐을 확인하였다. 실험이 종료되는 층간변위비 5.0%까지 겹오프닝은 복원력을 유지하므로 강연선은 탄성단계를 유지하였다.

BCHB2는 횡하중 39.4kN에서 겹오프닝이 최초로 발생하였으며, Fig. 18은 겹오프닝 계측결과를 나타낸다. 가력 정방향에서는 Fig. 19과 같이 기둥의 내부 및 외부 면에서 거의 동일한 수준으로 겹오프닝이 발생하며, 가력 부방향에서는 Fig. 20와 같이 겹오프닝이 발생하지 않는 것으로 나타났다. 층간변위비 2.0%에서 약 6.7mm의 겹오프닝이 발생하였으

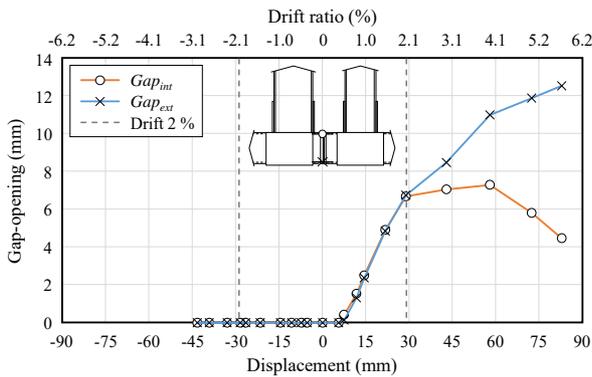


Fig. 18. Gap-displacement relationship of BCHB2

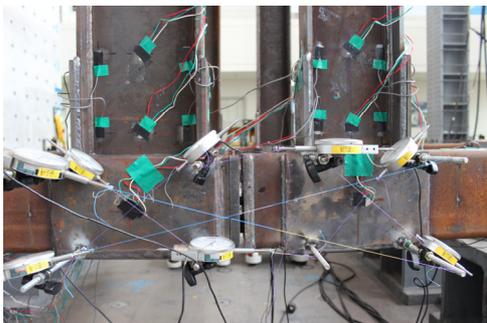


Fig. 19. Gap deformation of BCHB2 at 2%

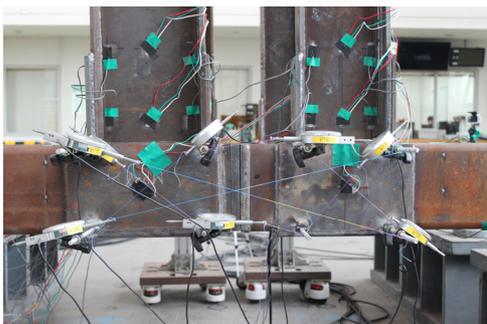


Fig. 20. Gap deformation of BCHB2 at -2%

며, 겹오프닝의 형상은 가력 정방향 및 부방향에 대해 비대칭 형태로 발생하였다. BCHB2 실험체가 항복하는 40.6mm (층간변위비 2.8%)에서 겹오프닝의 증가 폭이 달라지며, 내부면의 겹오프닝은 점차 감소하는 현상이 나타났다. 실험이 종료되는 층간변위비 5.0%까지 강연선은 복원력을 유지하므로 강연선은 탄성 거동함을 확인하였다.

Fig. 21은 3개 실험체의 겹오프닝 비교를 위해 각 실험체의 기둥 중앙에서 계측된 겹오프닝을 나타낸 그래프이다. 기둥의 외부면 및 내부면에서 계측한 겹오프닝의 평균값으로 기둥의 중앙에서 발생하는 겹오프닝과 같다. RCHB 실험체에서 겹오프닝은 BCHB1 및 BCHB2 실험체 대비 20% 작은 하중에서 발생하였다. 또한, 가력 부방향에서 횡강성이 가장 작은 RCHB 실험체의 겹오프닝 증가 폭이 가장 컸으며, BCHB2 실험체는 겹오프닝이 발생하지 않았다. 그러나 가력 정방향에서 모든 실험체는 유사한 증가 폭을 가지며 겹오프닝이 증가함을 확인하였다. Table 8은 실험체별 발생한 겹오프닝 계측결과를 나타내며, 기둥의 중앙에서 발생한 겹오프닝을 기준으로 나타냈다.

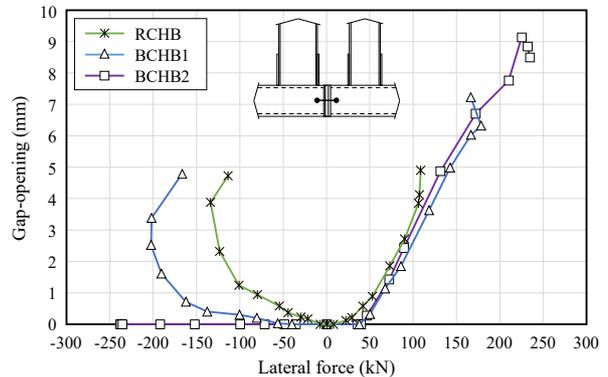


Fig. 21. Gap-lateral force relationship of BCHB2

Table 8. Gap-opening of specimens

Specimen		$V_{in,gap}$	δ_{gap,M_p}	$\delta_{gap,0.8M_p}$	$\delta_{gap,2\%}$
RCHB	+	7.8	4.9	2.6	2.7
	-	7.6	1.7	1.1	1.2
BCHB1	+	35.3	6.2	4.7	5.0
	-	40.2	1.0	0.4	0.72
BCHB2	+	39.4	7.5	6.2	6.7
	-	-	0	0	0

$V_{in,gap}$: lateral load at initial gap-opening(kN), δ_{gap,M_p} : gap-opening at plastic moment(mm), $\delta_{gap,0.8M_p}$: gap-opening at 80% of plastic moment(mm), $\delta_{gap,2\%}$: gap-opening at drift ratio 2%(mm)

갭오프닝은 가력 정방향에서 롤러 지점을 갖는 하부 모듈의 변위가 구속되지 않기 때문에 기둥에 발생하는 인장력에 의해 3개 실험체 모두 유사한 갭오프닝 거동을 보이는 것으로 판단된다. 또한, 가력 부방향에서는 기둥에 압축력이 작용하게 되므로 부재의 회전에 의해 기둥의 내부 면에서만 갭오프닝이 발생한다.

모듈러 시스템의 구조적인 특성상 이중 보 및 이중 기둥이 형성되며, 이로 인해 패널 존도 두 개로 나눌 수 있다. 강연선을 적용한 모듈러 시스템은 가력 방향에 따라 접합부의 거동이 달라지므로, 천장보-기둥 패널 존과 바닥보-기둥 패널 존으로 구분하여 분석하였다. 패널 존의 전단변형(γ)은 식 (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\sqrt{b^2 + h^2}}{2bh} (\Delta_1 + \Delta_2) \quad (2)$$

여기서, b : 패널 존의 폭(mm)

h : 패널 존의 너비(mm)

Δ_1, Δ_2 : 패널 존의 대각 길이(mm).

Figs. 22-24는 RCHB, BCHB1 및 BCHB2 실험체의 패널 존 거동을 나타낸다. 실험체별 패널 존의 전단변형을 비교하기 위해 휨모멘트는 정규화하여 표현하였다.

모든 실험체는 바닥보 사이즈가 동일하여 바닥보-기둥의 패널 존에서의 전단변형은 적고 상대적으로 천장보-기둥의 패널 존 전단변형이 큰 것으로 나타났다.

RCHB 실험체는 천장보 규격이 H-150×100×6×9로 천장보-기둥의 패널 존의 전단변형이 실험체 중 가장 크게 나타났다. BCHB1 실험체는 천장보 H-200×100×8×10 및 바닥보 H-250×100×8×10이 적용되어 RCHB 실험체 대비 바닥보-기둥 패널 존과 천장보-기둥 패널 존의 차이가 적다.

BCHB2 실험체는 기둥의 외주 면과 보의 플랜지를 10t의 강판으로 보강한 실험체로 강기둥-약보로 실험체를 설계하였으며, 패널 존에서의 전단변형이 적은 것으로 나타났다. 따라서 전체 횡 변위에서 패널 존의 전단변형이나 기둥의 변형에 따른 영향은 거의 없고 보 플랜지의 항복에 의해 대부분의 에너지가 소산되었음을 알 수 있다.

패널 존의 전단변형이 가장 크게 발생한 RCHB 실험체의 경우 가력 부방향에서 갭오프닝이 가장 먼저 발생하였으며, BCHB1 및 BCHB2 실험체 대비 동일한 횡하중에서 더 큰 갭오프닝이 발생하였다.

BCHB2 실험체는 조합기둥 적용 및 패널 존의 강판 보강

으로 패널 존에서의 전단변형이 가장 작게 나타났으며, 가력 부방향에서 갭오프닝이 발생하지 않았다.

접합부의 거동 분석 결과, 강연선을 적용한 모듈러 접합 시스템은 천장보 및 바닥보의 단면 차이가 클수록 갭오프닝이 더 작은 하중에서 최초 발생하며, 부재의 강성이 클수록 회전에 의한 갭오프닝 발생량이 적은 것을 확인하였다.

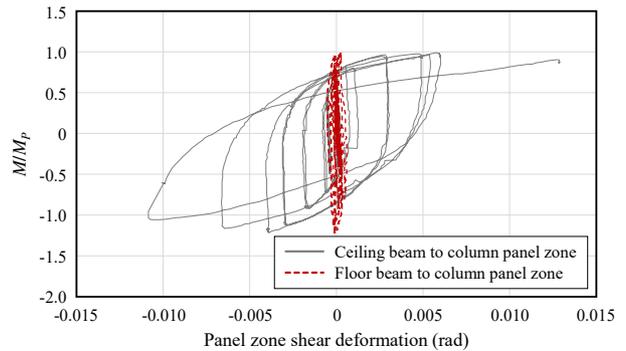


Fig. 22. Panel zone shear deformation of RCHB

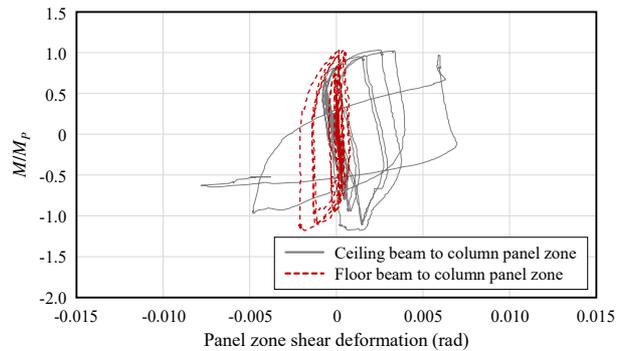


Fig. 23. Panel zone shear deformation of BCHB1

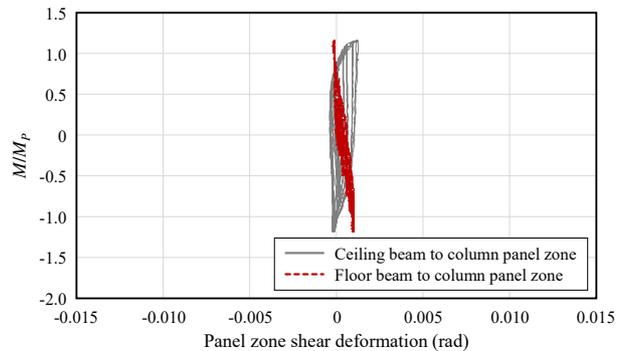


Fig. 24. Panel zone shear deformation of BCHB2

3.3 에너지 소산 능력

에너지 소산 능력은 구조물에 작용하는 지진에너지를 구조체에서 흡수할 수 있는 능력으로 건축물의 내진성능을 평

가하는 지표 중 하나이다. 본 연구에서 에너지 소산 능력을 평가하기 위해 층간변위비 별 첫 번째 주기의 하중-변위 곡선의 면적으로 에너지 소산 양을 계산하였다.

Fig. 25는 실험체별 누적 에너지 소산 양을 나타낸 그래프이다. RCHB, BCHB1, BCHB2 실험체는 각각 59.5 kN·m, 62.1 kN·m, 80.5 kN·m의 에너지가 소산된 것으로 나타났다. RCHB 실험체 대비 BCHB1 실험체는 1.04배, BCHB2 실험체는 1.35배 더 큰 에너지 소산 능력을 보였다.

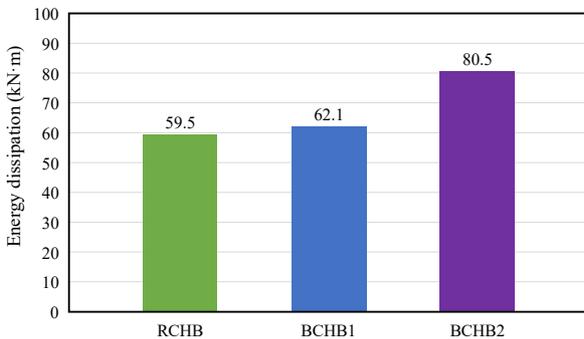


Fig. 25. Total energy dissipation

4. 결론

본 연구에서는 강연선을 적용한 모듈러 건축 접합 시스템의 내진성을 평가하고자 3가지 유형의 모듈러 구조시스템에 대해 실험을 수행하였다. 또한, 제안된 강연선 접합 시스템은 실제 시공을 목표로 개발되어 2018년 평창 미디어 레지던스 호텔을 시작으로 현재까지 여러 현장에 적용되고 있다. RCHB 실험체는 고층부에 적용을 목표로 각형강관 기둥 및 150 mm의 깊이를 갖는 천장보를 적용하였으며, BCHB1 실험체는 저층부에 적용하기 위해 조합형 기둥 및 200 mm의 깊이를 갖는 천장보를 적용하였다. BCHB2 실험체의 경우 BCHB1 실험체와 동일한 부재를 적용하고 패널 존 및 보의 단부 보강을 위해 기둥의 외주 면과 보의 플랜지에 10t 강판을 적용하였다. 강연선을 적용한 모듈러 건축 접합 시스템의 내진성은 평가결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 실험은 AISC 내진규정^[9]에 제시된 모멘트 저항 골조 가력 프로그램을 이용하여 계획하였다. RCHB, BCHB1, BCHB2 실험체는 층간변위비 2%에서 소성 모멘트의 80% 대비 각각 약 1.02배, 1.03배, 1.06배 이상의 내력을 유지하였다. 따라서 모든 실험체는 중간 모멘트 골조 수준의 성능을 보유하였다.

- (2) RCHB 실험체와 BCHB1 실험체는 천장보 항복 이후 용접부가 균열되는 파괴 양상을 보였다. BCHB2 실험체는 천장보에 소성변형이 발생하면서 안정적인 거동을 보였다.
- (3) 모든 실험체는 소성 모멘트(M_p)에 도달하였으며, 요구되는 내력을 확보하였음을 확인하였다. RCHB 실험체 대비 BCHB1과 BCHB2는 각각 약 1.6배, 2.2배의 최대내력을 보유하였으며, 각각 1.4~1.5배, 1.5~1.7배의 초기 횡강성을 확보한 것으로 나타났다. 또한, 구조물의 중요한 내진 특성 중 하나인 에너지 소산 능력 평가에서 BCHB1 실험체는 RCHB 대비 1.04배, BCHB2 실험체는 1.35배 이상의 성능을 가진다.
- (4) 실험 도중 관찰된 기둥 사이의 갭오프닝 현상은 강연선의 탄성 성질에 의한 것이며, 강연선의 신장과 부재의 회전에 의해 갭오프닝이 발생한다. 기둥이 인장력을 받을 때 모든 실험체는 유사한 갭오프닝 거동을 보였으며, 압축력이 작용할 때 갭오프닝은 부재의 강성에 영향을 받는다.
- (5) 천장보와 바닥보의 단면 차이가 큰 RCHB 실험체는 가장 작은 하중 수준에서 갭오프닝이 발생하였다. BCHB2 실험체는 BCHB1과 동일한 보 및 기둥 부재를 적용하였으며, BCHB2 실험체는 기둥의 외주면 및 보의 플랜지에 강판으로 보강하였다. 보와 기둥의 보강 효과에 의해 패널 존의 전단변형이 가장 적게 발생하였으며, BCHB1 실험체와 달리 가력 부방향에서는 갭오프닝이 발생하지 않았다. 모든 실험체는 갭오프닝이 발생하였으나, 강연선의 복원력에 의해 하중이 줄어들면 갭오프닝도 복원됨을 확인하였다.
- (6) 실험체는 최대 하중 도달 시까지 접합부의 성능을 유지하였다. 강연선을 이용한 모듈러 접합 시스템은 모듈러의 상·하유닛을 연결하는 것에 있어 적합한 성능을 보유하였으며, 시공성 및 재사용성 향상 등이점이 있으므로 향후 모듈러 건축의 활성화에 적극 기여할 것으로 기대된다.

감사의 글

이 연구는 2019년 포스코 A&C와 2021년 한국연구재단 이공학개인기초연구(NRF-2016R1D1A1B01010615)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Lawson, P.M., Byfield, M.P., Popo-Ola, S.O., and Grubb, P.J. (2008) Robustness of Light Steel Frames and Modular Construction, *Proceedings of the ICE - Structures and Buildings*, Institution of Civil Engineers, Vol.161, No.1, pp.3-16.
- [2] Mun, Y.-A., Kim, M.-K., and Park, M.-J. (2013) Domestic and Foreign Case Studies for the Improvement of Unit Modular Housing, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Planning & Design*, AIK, Vol.29, No.10, pp.65-73 (in Korean).
- [3] Park, K.-S., Lee, S.-S., Bae, K.-W., and Moon, J.-H. (2019) Behavior Evaluation on the Non-Symmetric Composite Column for Unit Modular Frames, *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, KSMI, Vol.23, No.1, pp.36-44 (in Korean).
- [4] Lee, S.S., Bae, K.W., and Park, K.S. (2016) Comparison of Behavior of Connection Between Modular Units According to Shape of Connector Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.6, pp.467-476 (in Korean).
- [5] Park, J.-S., Kang, C.-H., Shon, S.-D., and Lee, S.-J. (2018) Cyclic Loading Test and an Analytical Evaluation of the Modular System with Bracket-Typed Fully Restrained Moment Connections, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.34, No.3, pp.19-28 (in Korean).
- [6] Chen, Z., Liu, J., and Yu, Y. (2017) Experimental Study on Interior Connections in Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.147, pp.625-638.
- [7] Sanches, R., Mercan, O., and Roberts, B. (2018) Experimental Investigations of Vertical Post-tensioned Connection for Modular Steel Structures, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.175, pp.776-789.
- [8] Dai, Z., Cheong, T.Y.C., Dai Pang, S., and Liew, J.Y.R. (2021) Experimental Study of Grouted Sleeve Connections Under Bending for Steel Modular Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.243, 112614.
- [9] American Institute of Steel Construction (2016) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-16), USA.
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [11] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).

요약: 본 연구에서는 모듈러 건축 시스템의 시공성 및 재사용성을 개선시키기 위해 강연선을 적용하여 모듈러 유닛 간 접합 시스템을 제안하였다. 강연선을 기둥 내부로 관통시켜 여러 층의 유닛을 한 번에 접합할 수 있으며, 모듈러 유닛의 상부에서 작업이 가능하여 마감을 현장에서 완료할 수 있다. 제안된 모듈러 접합 시스템은 전단 연결재, H형강 보, 각형강관 또는 조합 기둥으로 구성되며, 시스템의 횡력저항성능, 횡강성, 연성도, 에너지 소산 등 내진성능과 모듈러 유닛간 접합 성능을 평가하기 위해 주기실험을 수행하였다. 실험결과, RCHB, BCHB1, BCHB2 실험체는 층간변위비 2%에서 소성 모멘트의 80% 대비 각각 약 1.02배, 1.03배, 1.06배 이상의 내력을 유지하였으며, 플레이트로 보와 기둥을 보강한 BCHB2는 소성힌지를 보 내부로 유도하여 보와 기둥 용접부의 취성 파괴를 방지하였다. 모든 실험체는 횡하중이 증가하면서 기둥 사이에서 갭오프닝이 발생하였으나 하중이 감소하면 갭오프닝도 복원됨을 확인하였으며, 주기하중 내에서 안정적으로 거동하였다.

핵심용어: 포스트 텐션 접합, 모듈러 건축, 반복재하실험, 내진성능, 중간 모멘트 골조
