

AJ Connector를 적용한 모듈러 건축 시스템의 외부접합부 내진성능에 대한 실험적 평가

정담이¹ · 조봉호^{2*} · 이재섭³ · 이두용⁴ · 이근우⁵

¹박사과정, 아주대학교, 건축공학과, ²교수, 아주대학교, 건축공학과, ³공학박사, 과장, 한스타일엔지니어링,

⁴공학박사, 아주대학교, 건축공학과, ⁵박사과정, 시드니대학교, 토목공학과

Experimental Evaluation on Seismic Performance of Exterior Connection in Modular Building System with AJ Connector

Jung, Dam-I¹, Cho, Bong Ho^{2*}, Lee, Jae Sub³, Lee, Doo Yong⁴, Lee, Keun Woo⁵

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., Department Manager, HanStyle Engineering, Seoul, 06747, Korea

⁴Ph.D., Dept. of Architectural Engineering, Ajou University, Suwon, 16499, Korea

⁵Ph.D. Candidate, School of Civil Engineering, The University of Sydney, Sydney, 2006, Australia

Abstract - AJ connection system was proposed to connect between modular structure at the top of the unit in consideration of interference with finishing work and workability. Tension is applied to steel rod bar as AJ connector and the rod bar inserted into the columns are fastened. As a result, the upper and lower modular units are connected while compression acts on the columns. In order to evaluate the connection performance and seismic performance of the proposed system, cyclic loading test were performed on two T-shaped partial specimens as a variable for the magnitude of the post-tension. As a result of tests, both specimens maintained the performance of about 1.5 times or more compared to 80 % of the plastic moment at the drift ratio of 2 %, and the experiment was finished due to buckling in the beams. The beams are reinforced with plates, 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. The specimens showed stable behavior as plastic hinges occurred in the ceiling beam and the floor beam, and plastic deformation in the beam accounted for more than 80 % of the total plastic rotational capacity. The initial stiffness of the two specimens was similar to rigid connections. Since the flexural strength of the column may be degraded due to the compressive force and the bending moment, the magnitude of the pre-stress should be determined in consideration of the reduced bending strength of the column. Modular beam-column joint with AJ connector satisfied moment capacity for intermediate moment frames(IMF).

Keywords - Post-tension connection, Modular building system, Cyclic loading test, Seismic performance, Intermediate moment frames

1. 서론

모듈러 건축은 호텔, 다가구 주택, 학교, 병원, 사무실 및 군사시설과 같이 반복적인 평면을 갖는 건축물에 적용하기 이상적인 건설 시스템이다. 이는 대량생산을 통한 공사비 절

감, 품질향상, 공기 단축, 재사용 가능 등의 이점이 있으며^[1], 공장에서 모든 공정이 완료된 모듈러 유닛은 현장에서 쉽게 건립할 수 있어 지속적으로 수요가 확대되고 있다.

광범위한 적용 가능성 및 높아진 모듈러 건축 시스템에 대한 관심에도 불구하고 구조적 안정성과 요구되는 전단 저항능력을 확보하기 위해 필수적인 접합부의 내진성능에 대한 연구가 충분히 수행되지 않았으며^[2], 모듈러 시스템의 동적 거동을 다루는 연구는 비교적 최근에 수행되기 시작하였다^[3]. 이러한 이유로 국내에서도 학교, 군사시설 등 저층 건축물을 중심으로 적용되어왔으나, 최근 모듈러 건축 산업의 성장을 위해 중고층화 및 주거용 건축물로 적용 범위를 확대하고 있다^[4].

Note.-Discussion open until August 30, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 01, 2021; revised on January 11, 2022; approved on January 12, 2022.

Copyright © 2022 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

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

E-mail. bhcho@ajou.ac.kr

모듈러 시스템은 기본적으로 Fig. 1과 같이 내부에서의 접합, 외부에서의 접합, 모듈러 유닛 상단부에서의 접합 등 3가지 유형의 접합 방식 적용이 가능하다. Fig. 2와 같이 모듈러 시스템의 접합부는 크게 내부접합부와 외부접합부로 나눌 수 있다. 모듈러 유닛이 상·하로 2개 배치될 경우 Fig. 2(a)와 같이 외부접합부가 형성되고, Fig. 2(b)와 같이 상·하 및 좌·우로 4개 배치될 경우 내부접합부가 형성된다. 이는 외부에서 접합 작업이 가능한 개방형 내부접합부로 정의할 수 있다. 또한, Fig. 2(c)와 같이 모듈러 유닛이 8개 배치될 경우 외부 면이 없는 내부접합부가 형성되며, 외부에서의 작업공간이 없는 폐쇄형 내부접합부로 정의할 수 있다. 내부접합부는 작업공간이 협소하고 접합을 위한 개구부가 없으면 모듈러 간 접합수행에 어려움이 있어, 모듈러 건축의 장점을 극대화하기 위하여 시공성이 개선된 접합 시스템을 제안하고 모듈러 유닛 접합부의 내진성능을 확보하기 위한 연구가 주로 수행되고 있다.

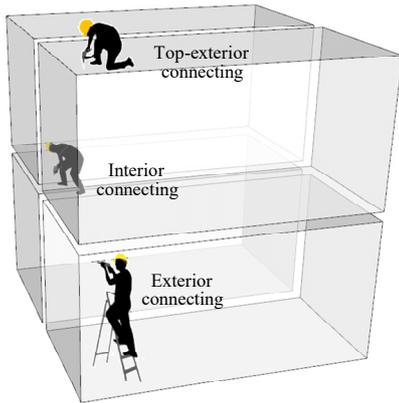


Fig. 1. Connecting methods according to work location

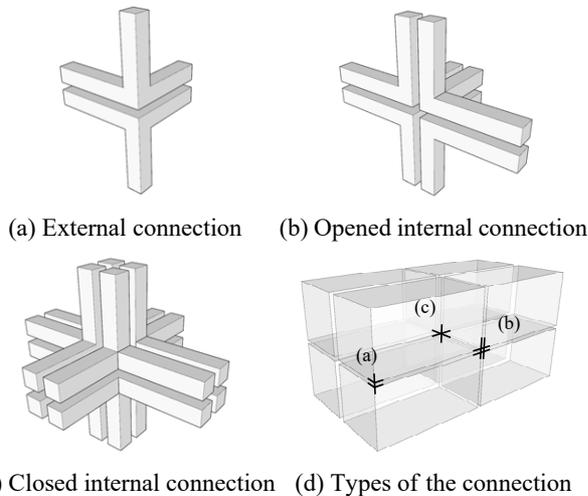


Fig. 2. Types of the connection between modules

Dai *et al.*^[5]은 새로운 형태의 삽입형 자동체결 접합 장치를 개발하였다. 하부 모듈의 기둥 상부에 나사산이 형성된 스테드가 설치되며, 상부 모듈의 기둥 하부에 스프링 등이 포함된 자가체결 접합 장치가 설치된다. 접합부의 내진성능을 파악하기 위해 횡 방향 보-기둥 접합부 실험을 수행하였으며, 보의 좌굴 또는 용접부의 파단으로 실험을 종료하였다. 제안한 접합부는 Eurocode 3에 따라 반강접 접합부(semi-rigid connection)에 해당하며 내진성능을 확보하였다.

Dhanapal *et al.*^[6]은 주장으로 제작된 보-기둥 접합부를 제안하였다. 주강 접합부는 작업공간 확보를 위해 개구부가 형성되어 있으며, 수직으로 관통하여 장볼트로 접합된다. 또한, 주강 접합부는 전단력에 저항하기 위해 별도의 전단 연결재가 삽입되어 있다. 요구되는 하중에 대해 강도를 확보하였으며, 접합부에 손상은 발생하지 않았다. 적용되는 볼트는 접합부의 강성과 하중전달 능력 향상을 위해 위치를 조절할 수 있도록 설계되어 있다.

Chen *et al.*^[7]은 외부에서 작업하는 회전식 접합 시스템을 제안하였다. 회전식 접합 장치를 기둥 상부에 설치하며, 모듈러를 적층한 뒤 코너부에 형성된 개구부에 체결 도구를 넣어 접합 장치를 회전시켜 상·하부 유닛을 연결한다. 상부 모듈의 기둥과 하부 모듈의 기둥을 연결하여 휨 실험을 수행하였으며, 유한요소해석을 통해 접합부의 회전 강성을 예측 식을 제안하였다.

Sanches *et al.*^[3]이 제안한 접합부는 전단력에 저항하기 위해 각형강관 기둥 내부에 박스형의 철물이 삽입되며, 기둥과 전단 저항 철물을 관통하여 강봉이 설치된다. 강봉에 포스트텐션을 적용하여 모듈러 상·하부 유닛을 접합하며, 긴장력의 크기를 변수로 횡하중 작용에 따른 접합부의 성능을 평가하였다.

Jung *et al.*^[8]이 제안한 모듈러 접합 시스템은 PC 건축물에 사용되는 강연선을 적용하여 상·하 유닛간 접합을 수행한다. 조합기둥 적용 유무 및 보의 플랜지에 보강판 유무를 변수로 실험을 수행하였다. 상부 및 하부 기둥 사이가 벌어지는 갭 오픈이 발생하였으며, 접합부 거동에 대해 상세하게 분석하였다. 실험 결과, 강연선을 적용한 모듈러 접합 시스템은 중간모멘트 골조 이상의 성능을 확보하였다.

해외의 최근 모듈러 시스템 관련 연구는 주로 접합부 성능 및 내진성능 확보와 관련된 분야로 분석되었다. 마감 작업과의 간섭과 시공성을 고려하여 주로 상부에서의 외부접합 시스템이나 접합부의 개구부 형성을 통한 접합 시스템들이 다수 제안되었다. 그러나 접합 철물 또는 장치 자체에서의

전단 저항성능을 기대하기 어려우며, 별도의 전단 저항 부재를 삽입해야 한다. 또한, 일부 접합 시스템은 접합 장치의 구동을 위해 코너부에 개구부가 형성되어 단면손실이 있다.

본 연구에서는 공장제조를 향상을 위해 강봉을 이용한 모듈러 유닛 간 상부에서의 외부 접합 시스템을 제안하였다. 이는 접합 작업 시 마감재에 영향을 미치지 않으므로 마감을 제거할 필요 없이 공장에서 모든 공정을 완료할 수 있다. 건물의 재사용을 위해 해체 및 재조립이 가능하며, 모듈러 유닛의 손상을 최소화할 수 있다.

제안한 접합 시스템은 모듈러 상·하 유닛을 접합하기 위해 Fig. 3과 같이 기둥의 양단에 AJ 커넥터를 체결하여 모듈러 상하 유닛을 접합한다. AJ 커넥터와 강봉을 체결하면서 긴장력을 도입할 수 있도록 내부에 나사산이 형성되어 있으며, 강봉의 양단에는 커넥터와 체결할 수 있는 나사산이 형성되어 있다. AJ 커넥터와 강봉을 체결할수록 강봉에 인장력이 작용하며, 커넥터의 중앙에 형성된 와셔부를 통해 기둥에 압축력이 작용한다. 이후 상부 모듈러 유닛을 접합하면 상부 유닛과 하부 유닛이 기둥의 압축력에 의해 고정되며, 강봉에 작용하는 총 긴장력과 동일한 크기의 압축력이 기둥에 작용한다.

PC 구조의 시공 등에 적용되는 포스트텐션 공법과 달리 유압기 등 특수장치의 활용 없이 일반적으로 현장에서 활용되는 전동 렌치 등을 활용할 수 있도록 AJ 커넥터의 상단은 육각너트의 형태로 구성된다. 또한, 상부 기둥과 하부 기둥을 관통하기 때문에 AJ 커넥터의 중앙과 하부는 원통형으로 구성하여 전단력에 저항할 수 있도록 계획하였다. 좌·우 유닛은 연결 플레이트를 통해 접합되며, AJ 커넥터의 와셔부로 인해 발생하는 단차를 없애기 위해 커버플레이트가 설치된다. 본 연구에서는 긴장력의 크기를 변수로 AJ 커넥터를 적용한 모듈러 외부접합부의 횡력 저항성능을 평가하였다.

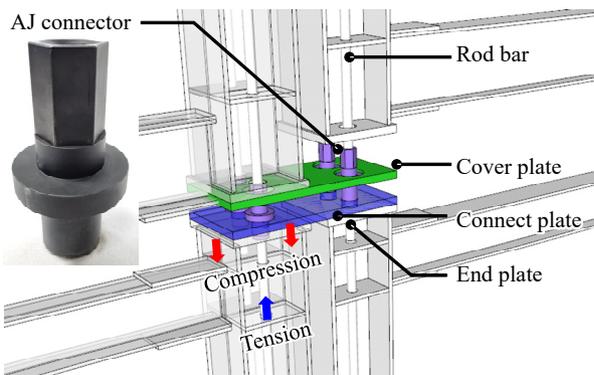


Fig. 3. Concepts of the proposed connection

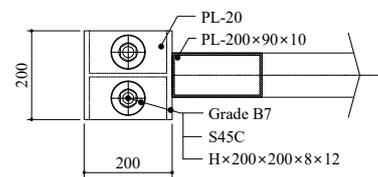
2. 실험계획

2.1 실험체 설계 및 제작

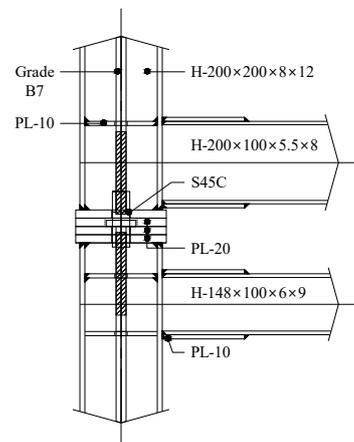
제안된 접합 방식을 적용한 모듈러 시스템의 성능 비교를 위하여 동일한 규격의 실험체에 두 가지의 긴장력(post-tension)을 적용하여 실험을 수행하였다. 실험체에 적용한 주요 부재는 8층 규모의 모듈러 건축물을 대상으로 KDS 41 31 00 강구조설계기준^[13]에 따라 설계하였으며, 규격은 Table 1과 같다. 실험체는 Fig. 4와 같이 H-200×200×8×12의 H형강 기둥을 적용하였으며, 바닥보와 천장보는 각각 H-200×100×5.5×8과 H-148×100×6×9 부재를 적용하였다. 두 실험체는 보-기둥 용접부에서의 취성파괴를 방지하고

Table 1. Member specifications of specimens

Specimen	Member	Steel grade	Standard
EX-S-175PT & EX-S-260PT	Ceiling beam	SS275	H-148×100×6×9
	Floor beam		H-200×100×5.5×8
	Column	SHN275	H-200×200×8×12
	Rod bar	Grade B7 ^[10]	D25.4
	AJ connector	S45C	-
	Reinforced plate	SS275	PL-10



(a) Cross section



(b) Elevation

Fig. 4. Connection details of the specimen

보의 소성힌지 발생을 유도하기 위해 보 플랜지에 200 mm 길이의 보강판을 적용하였다. 바닥보 및 천장보와 기둥이 용접되는 부분에서 국부좌굴을 방지하기 위해 보의 플랜지와 이어지도록 기둥에 스티프너를 추가하였다. 스티프너에는 강봉이 관통되도록 30 mm 직경의 홀이 천공되어 있다. 기둥의 엔드 플레이트 중앙에 AJ 커넥터가 관통되며, AJ 커넥터는 전단력에 저항하도록 설계되었다. 커넥터 관통 홀은 3 mm의 공차를 가진다.

상부 및 하부 모듈러 유닛을 접합시킬 수 있도록 강봉이 커넥터와 체결되며, 체결량에 따라 긴장력을 도입할 수 있다. Fig. 4(a)와 같이 강봉과 AJ 커넥터는 기둥당 2개씩 설치되며, 2개의 강봉을 통해 기둥에 압축력이 작용한다.

실험체에 적용하는 긴장력은 스트레인 게이지를 부착하여 체결시 도입되는 기둥의 압축력을 모니터링하였다. EX-S-175PT 실험체는 기둥 소재의 공칭 항복강도에 단면적을 곱한 값의 10 %인 175 kN 이상의 압축력을 기둥에 도입하고자 하였으며, 183.4 kN의 긴장력이 도입되었다. EX-S-260PT 실험체는 소재의 공칭 극한 강도에 단면적을 곱한 값의 10 %인 260 kN 이상의 압축력 도입을 목표로 하였으며 265.5 kN의 긴장력이 도입되었다.

2.2 실험장치 및 실험방법

단변 방향의 횡력 저항성능을 파악하기 위해 2개의 모듈이 적용된 모듈러 시스템으로 가정하였으며, Fig. 5는 본 실험에서 사용된 실험 조건을 보여준다. 기둥을 수평으로 놓여 한쪽은 핀 지점, 한쪽은 롤러 지점을 형성하여 반력 바닥에 부착하였다. 유압가력기는 수직으로 세워진 보의 측면에 연결하였으며, 횡지지대를 설치하였다. 또한, 천장보와 바닥보는 수평 변위만을 공유할 수 있도록 두 개 보 사이에 장슬롯을 형성하였다. 기둥의 중앙부터 가력 점까지의 거리는 1,540 mm이며, 기둥 면부터 가력 점까지의 거리는 1,440 mm이다. 유압가력기의 자중이 실험체에 미치는 영향을 최소화하기 위해 500 kN의 유압가력기를 사용하였다.

가력 프로토콜은 AISC 내진규정^[9]의 하중 재하 이력을 참고하였다. 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 증진해 2회씩 반복가력하였다. 층간변위비가 계산되는 기준은 기둥의 중심부터 가력 점까지 거리인 1,540 mm이다. Table 2는 층간변위비별 횡변위를 나타낸다.

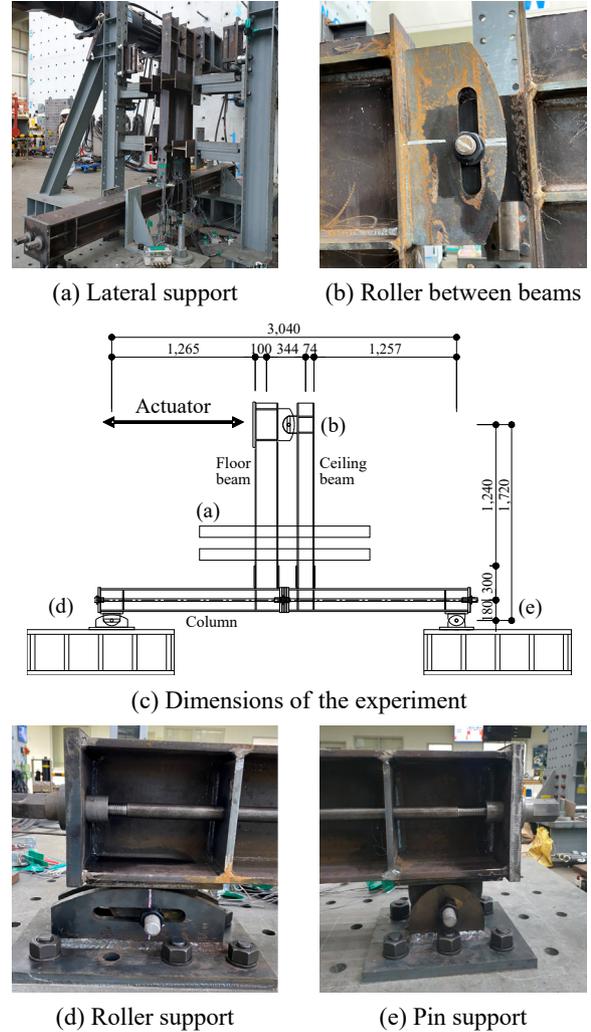


Fig. 5. Configuration of the test set-up

Table 2. Loading step

Step	Drift ratio (%)	Displacement (mm)	Cycles
1	0.375	5.78	6
2	0.50	7.70	6
3	0.75	11.55	6
4	1.0	15.40	4
5	1.5	23.10	2
6	2.0	30.80	2
7	3.0	46.20	2
8	4.0	61.60	2
9	5.0	77.00	2
10	6.0	92.40	2
11	7.0	107.80	2
12	8.0	123.20	2

2.3 재료 인장시험

보 및 기둥에 대한 시험은 KS B 0801 금속재료 인장시험편^[10]에 따라 1A호 시험편을 3개씩 제작하였다. 강봉은 10호 시험편으로 제작하였으며, 기타 플레이트 부재는 5호 시험편으로 제작하였다. H형강은 KS D 3866 건축 구조용 열간 압연 형강^[11]에 지정된 플랜지 위치에서 절취하였다.

모든 시험편은 KS B 0802 금속재료 인장시험 방법^[12]에 따라 인장시험을 수행하였다. Table 3는 부재별 및 강종별 인장시험 결과를 요약한 표이다. 모든 부재는 규정 강도를 만족하였다.

Table 3. Material properties of the members

Specimen	Member	Steel grade	F_y (MPa)	F_u (MPa)
EX-S-175PT & EX-S-260PT	Ceiling beam	SS275	325.1	468.5
	Floor beam		360.4	516.9
	Column	SHN275	306.0	463.8
	Rod bar	Grade B7	858.8	940.4
	AJ connector	S45C*	490	686
	Reinforced plate	SS275	397.8	453.7

*nominal strength

3. 실험결과 및 분석

3.1 주요 결과 및 파괴 모드

모듈러 시스템의 외부접합부 반복가력실험 결과, EX-S-175PT 실험체는 바닥보가 최초로 항복하였으며, 천장보의 항복 이후 천장보에서 먼저 소성변형이 관찰되었다. 최종적으로 바닥보에서 좌굴이 발생하면서 하중이 감소하여 실험

을 종료하였다. EX-S-260PT 실험체도 바닥보가 최초 항복하였으며, 바닥보, 천장보 순서로 소성 좌굴이 발생하면서 하중이 감소하여 실험을 종료하였다.

실험체는 보 플랜지에 200 mm 길이의 보강판이 적용되어 1,240 mm의 유효길이를 가지며, 실험체의 모멘트는 보의 유효길이에 가력 하중을 곱하여 산정하였다. 실험체의 공칭 휨모멘트는 천장보와 바닥보의 소성모멘트를 합산하여 산정하였으며, 각 보의 소성모멘트는 보 부재의 소성 단면계수 및 인장시험 결과에 따른 항복강도로부터 계산하였다. 계산된 실험체의 소성모멘트(M_p)는 126.7 kN·m이다.

AISC 내진규정은 보통모멘트 골조, 중간모멘트 골조, 특수모멘트 골조에 대하여 각각 0.02 rad, 0.03 rad, 0.04 rad의 접합부 회전각(θ)을 요구하고 있다. 중간모멘트 골조는 회전각 0.02 rad일 때의 접합부 모멘트 강도가 보 소성모멘트의 80% 이상으로 유지되어야 하며, 특수모멘트 골조의 경우 0.04 rad일 때의 접합부 강도가 $0.8M_p$ 이상이어야 한다.

EX-S-175PT 실험체 및 EX-S-260PT 실험체는 층간변위비 2%에서 M_p 의 80% 이상의 내력을 유지하여 중간모멘트 골조 수준 이상의 성능을 발휘하며, 최대 휨모멘트가 소성모멘트를 상회하였다. Table 4는 주요 실험결과를 요약한 표이다.

Table 5는 EX-S-175PT의 실험결과를 나타내며, Fig. 6는 모멘트-변위 곡선을 나타낸다. 실험 결과, 횡변위 약 11.6 mm (0.75%), 하중 약 57.89 kN에서 바닥보가 최초로 항복하였으며, 횡변위 약 17.6 mm (1.14%)에서 천장보가 항복하였다. 또한, 가력 정방향의 횡변위 118.3 mm (7.7%) 및 가력 부방향의 횡변위 109.6 mm (7.1%)에서 각각 최대하중 170.1 kN, -187.2 kN에 도달하였다. 층간변위비 7%에서 천장보에 소성변형이 관찰되었으며, Fig. 7과 같이 층간변위비 8%에서 바닥보에 소성 좌굴이 발생하면서 하중이 감소하여 실험을 종료하였다.

Table 4. Summaries of the test results

Specimen		$\frac{M_{max}}{M_p}$	θ_{max}	$\frac{M_{2\%}}{0.8M_p}$	M_p	Failure mode
EX-S-175PT	+	1.67	0.077	1.54	126.7	Plastic buckling on the floor beam
	-	1.83	0.071	1.50		
EX-S-260PT	+	1.45	0.058	1.50	126.7	Plastic buckling on the beams
	-	1.49	0.048	1.49		

M_{max} : maximum moment (kN·m), θ_{max} : angle of rotation at the maximum moment (rad), $M_{2\%}$: moment at drift ratio 2% (kN·m), M_p : sum of the plastic moments of all beams (kN·m)

Table 5. Test results of EX-S-175PT

Specimen		V_y	δ_y (%)	V_{max}	δ_{max} (%)	μ
EX-S-175PT	+	130.0	23.9 (1.5)	170.1	118.3 (7.7)	4.95
	-	129.9	25.2 (1.6)	187.2	109.6 (7.1)	4.35

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), μ : displacement ductility factor

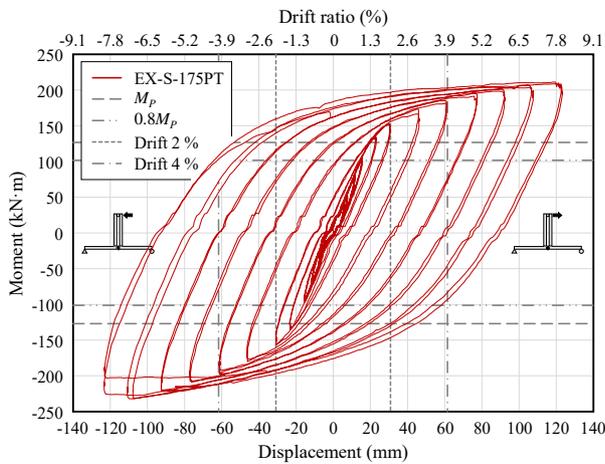


Fig. 6. Moment–displacement curve of EX-S-175PT



Fig. 7. Failure mode of EX-S-175PT at 8 %

EX-S-260PT 실험체는 횡변위 약 13.4 mm(0.87%), 횡하중 약 70.58 kN에서 바닥보가 최초로 항복하였으며, 횡변위 약 17.9 mm(1.16%)에서 천장보가 항복하였다. 가력 정방향의 횡변위 89.4mm(5.8%) 및 가력 부방향의 횡변위 73.4mm (4.8%)에서 각각 최대하중 148.1kN, -151.7kN에 도달하였다. 이후 층간변위비 약 5%에서 바닥보에 소성변형이 발생하기 시작하였으며, 층간변위비 6%에서 바닥보에 좌굴이 발생했다. 이후 층간변위비 8%에서 천장보에서 소성 좌굴이 발생하면서 하중이 감소하여 실험을 종료하였다. Table 6

는 EX-S-260PT의 실험결과를 나타내며, Fig. 8은 모멘트-변위 곡선을 나타낸다.

Table 6. Test results of EX-S-260PT

Specimen		V_y	δ_y (%)	V_{max}	δ_{max} (%)	μ
EX-S-260PT	+	123.9	23.0 (2.3)	148.1	89.4 (5.8)	3.34
	-	116.8	22.0 (2.0)	151.7	73.4 (4.8)	3.89

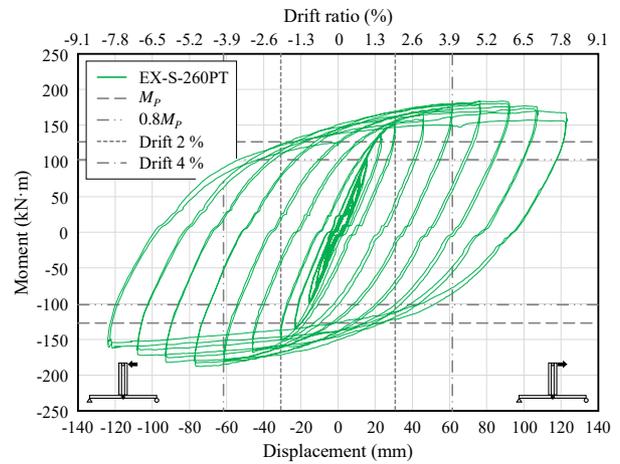


Fig. 8. Moment–displacement curve of EX-S-260PT



Fig. 9. Failure mode of EX-S-260PT at 7 %

EX-S-175PT 실험체는 EX-S-260PT 실험체 대비 약 1.14~1.24배의 내력을 확보하였으며, 1.12~1.48배의 연성도를 가진다. 압축력과 휨모멘트가 함께 작용하는 기둥은 휨강도 저하를 야기할 수 있으며, 이로 인해 긴장력을 적게 적용한 EX-S-175PT의 내력과 연성도가 더 크게 나타난 것으로 판단된다. 두 실험체는 모두 보의 내부에서 소성힌지가 발생하여 안정적인 소성 거동을 보였으며, 기둥과 강봉은 실험이 종료될 때까지 탄성 거동하였다.

3.2 실험체의 초기강성

실험체의 접합부를 완전강접합으로 가정하여 초기강성을 예측하였다. 실험체의 횡변위는 Fig. 10과 같이 기둥 회전에 의한 변위와 보의 변형에 의한 변위, 패널 존의 전단변형에 의한 횡변위로 가정하였다. 기둥과 기둥 사이의 슬립에 의해 횡변위가 발생할 수 있으나 완전강접합에서는 슬립이 발생하지 않으므로 초기강성 예측식에 포함하지 않았다. 이론에 의한 초기강성($K_{i,th}$)은 식(1)과 같이 계산할 수 있으며, 보의 변위 및 기둥의 변위, 패널 존의 전단변형에 의한 횡변위는 식 (2) - 식 (5)와 같이 계산할 수 있다.

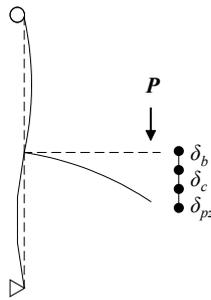


Fig. 10. Deformation of beam to column joint

$$K_{i,th} = \frac{P}{\delta} = \frac{P}{\delta_b + \delta_c + \delta_{pz}} \quad (1)$$

여기서, P : 최초 항복 시 횡하중(kN)

δ_b : 보의 변형에 의한 횡변위(mm)

δ_c : 기둥의 회전에 의한 횡변위(mm)

δ_{pz} : 패널 존 전단변형에 의한 횡변위(mm)

$$\delta_b = \frac{PL_{be}^3}{3E(I_{fb} + I_{cb})} \quad (2)$$

$$\delta_c = \frac{PL_b^2 L_c}{12EI_c} \quad (3)$$

$$\delta_{pz} = \gamma \left(L_b - \frac{D_c}{2} - \frac{h_{pz}}{L_c} L_b \right) \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{2\tau(1 + \nu)}{E} \quad (5)$$

여기서, E : 탄성계수(MPa)

L_{be} : 보의 유효길이(mm)

L_b : 기둥 중심부터 보 가력 점까지 거리(mm)

L_c : 기둥의 길이(mm)

I_{fb} : 바닥보의 단면2차모멘트(mm⁴)

I_{cb} : 천장보의 단면2차모멘트(mm⁴)

I_c : 기둥의 단면2차모멘트(mm⁴)

D_c : 기둥 단면의 깊이(mm)

h_{pz} : 패널 존의 층(mm)

γ : 전단변형(rad)

τ : 패널 존에 작용하는 전단응력(MPa)

ν : 소재의 푸아송비

Table 7은 이론에 의한 초기강성과 실험결과에 따른 초기강성을 나타낸다. 실험체의 초기강성은 정방향의 항복지점과 부방향의 항복지점을 연결하는 직선의 기울기로 정의하였다. 실험결과 이론에 의한 초기강성은 5.32 kN/mm이며, EX-S-175PT 실험체 및 EX-S-260PT의 초기강성은 각각 5.30 kN/mm 및 5.35 kN/mm이다. 두 실험체는 거의 동일한 초기강성을 가지며, 이론값과 유사한 강성을 가진다. 따라서 두 실험체 모두 완전강접합에 가까운 강성을 갖는 것으로 판단된다.

Table 7. Initial stiffness of the specimens

Specimen	$K_{i,ex}$	$K_{i,th}$	$K_{i,ex}/K_{i,th}$
EX-S-175PT	5.30	5.32	0.997
EX-S-260PT	5.35		1.006

$K_{i,ex}$: initial stiffness (experiment, kN/mm), $K_{i,th}$: initial stiffness (theory, kN/mm)

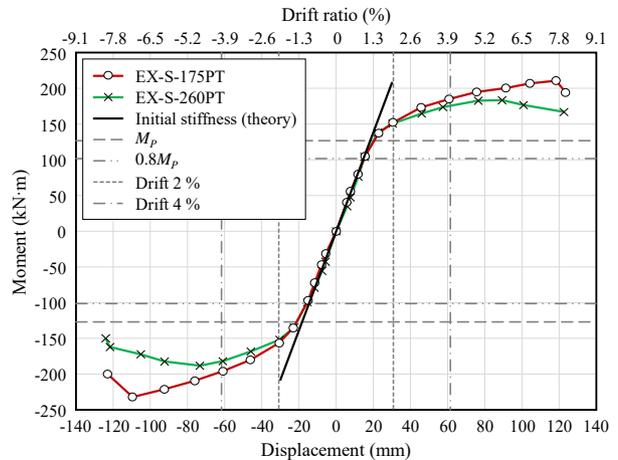


Fig. 11. Initial stiffness of the specimens

3.3 패널 존의 전단변형

모듈러 시스템의 구조적인 특성상 이중 보 및 이중 기둥이 형성되며, 본 연구에서는 Fig. 12와 같이 천장보 및 바닥

보와 기둥이 형성하는 구간을 모듈러 복합 패널 존으로 정의하였다. 모듈러 복합 패널 존의 전단변형(γ)은 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\sqrt{b^2 + h^2}}{2bh} (\Delta_1 + \Delta_2) \quad (6)$$

여기서, b : 패널 존의 너비(mm)

h : 패널 존의 춤(mm)

Δ_1, Δ_2 : 패널 존의 변형에 의해 변화된 대각 길이 (mm)

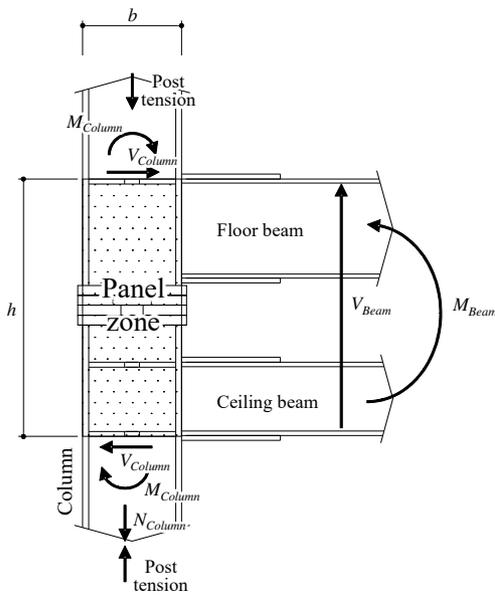


Fig. 12. Free body diagram on panel zone

패널 존에 작용하는 전단력(V_{pz})은 식 (7)과 같이 보의 모멘트에 의해 보 플랜지에 작용하는 축력과 기둥의 전단력의 차이로 산정된다. 또한, 패널 존의 전단 내력(R_v)은 KDS 41 31 00 강구조설계기준^[13]에 따라 식 (8)을 이용해 산정하면 $R_v = 293.8$ kN을 구할 수 있다.

$$V_{pz} = \frac{M_{Beam}}{h} - V_{Column} \quad (7)$$

여기서, M_{Beam} : 보에 작용하는 모멘트(kN.m)

h : 패널 존의 춤(mm)

V_{Column} : 기둥에 작용하는 전단력(kN)

$$R_v = 0.6F_{yw}d_c t_w \quad (8)$$

여기서, F_{yw} : 기둥 웨브의 항복강도(MPa)

d_c : 기둥 부재의 춤(mm)

t_w : 기둥 웨브의 두께(mm)

Fig. 13은 패널 존의 전단변형과 전단력의 관계를 나타낸다. EX-S-175PT 및 EX-S-260PT 실험체는 모두 층간변위비 2.0 %에서 전단 내력을 초과하며 항복한 것으로 판단되며, 항복 이전의 탄성 영역에서 패널 존의 전단변형은 두 실험체가 유사하다.

패널 존이 항복할 때 EX-S-175PT 실험체는 정방향 및 부방향에서 각각 152.5 kN·m 및 -156.3 kN·m의 휨모멘트가 발생하였다. EX-S-260PT 실험체의 휨모멘트는 정방향 및 부방향에서 각각 150.9 kN·m, -151.9 kN·m이 발생하였다.

두 실험체의 패널 존은 천장보 및 바닥보가 소성모멘트에 도달한 뒤 항복한 것을 확인하였다. 패널 존의 항복 이후 전단변형에 차이가 발생하였으며, 소성 영역에서 EX-S-175PT의 패널 존은 EX-S-260PT 패널 존 대비 약 1.86~2.63 배의 전단변형이 발생함을 알 수 있다.

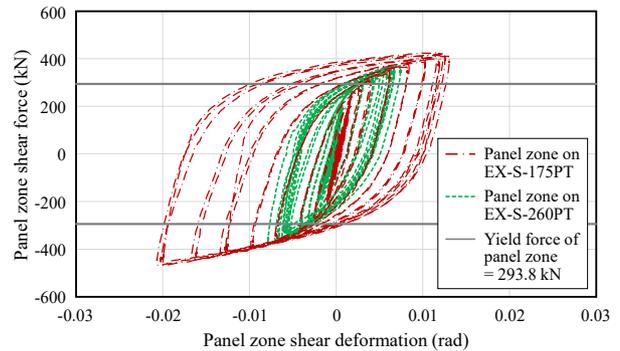


Fig. 13. Shear deformation – shear force curve

3.4 접합부 거동

기둥 사이의 슬립 및 갭 오프닝, 강봉의 응력분포는 AJ 접합 시스템의 접합성능평가를 위한 주요 지표이다. Fig. 14은 갭 오프닝을 측정한 결과이며, 두 실험체는 실험종료시까지 갭 오프닝이 1 mm 미만으로 측정되었다. 실험체의 초기강성이 완전강접합과 유사하며 보의 소성모멘트 강도를 발휘하였으므로, 구조성능에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

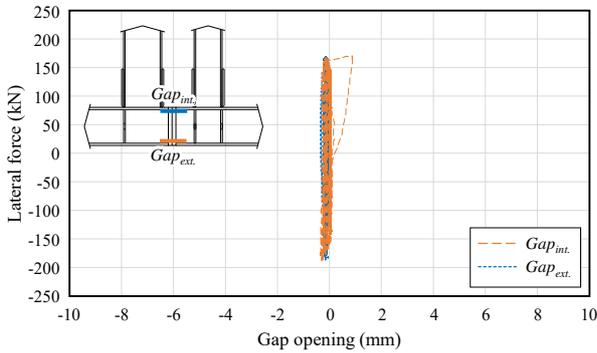
Fig. 15은 기둥 사이에서 슬립(slip)을 측정한 결과이다. AJ 커넥터가 관통되는 엔드 플레이트의 공차는 3mm로 기둥 사이에서 허용 가능한 슬립은 3 mm이며, 그 이상의 슬립은 접합 시스템이 전단에 저항하지 못함을 의미한다. 실험 결과, EX-S-175PT 실험체는 층간변위비 7 %부터 기둥 사이에서

갭 오픈이 발생하면서 슬립이 발생하였다. 총 슬립 양은 약 1 mm 미만으로 AJ 커넥터가 전단 저항능력을 확보함을 알 수 있다.

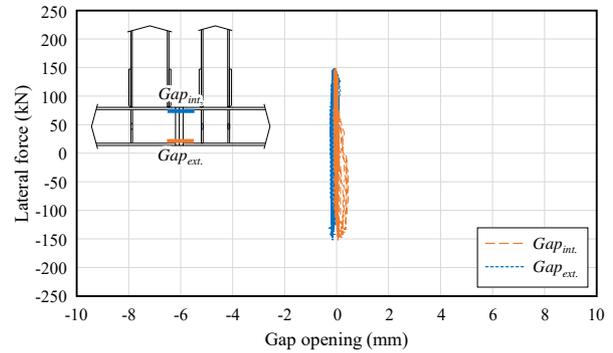
Fig. 16은 기둥 내부에 삽입된 4개 강봉의 응력을 나타내며, 두 실험체에 적용된 강봉은 모두 실험 최대하중까지 응력이 급격하게 증가하지 않고 탄성 단계를 유지하였다. 따라서 모듈러 상·하 유닛의 접합에 대해 충분한 접합 성능을 보유한 것으로 판단된다.

3.5 부재별 변형능력

보-기둥 접합부에서 전체 횡 변위는 Fig. 17과 같이 보의 변형과 기둥의 회전, 모듈러 복합 패널 존의 전단변형 및 접합부의 슬립에 의해 발생할 수 있다. 갭 오픈은 Fig. 17(e)와 같이 부재의 회전을 동반하여 발생하는 현상으로 갭 오픈 자체가 총 횡 변위에 미치는 영향은 없다. Fig. 18은 실험체의 총 변위 및 각 부재 변형에 의한 변위를 나타낸다.

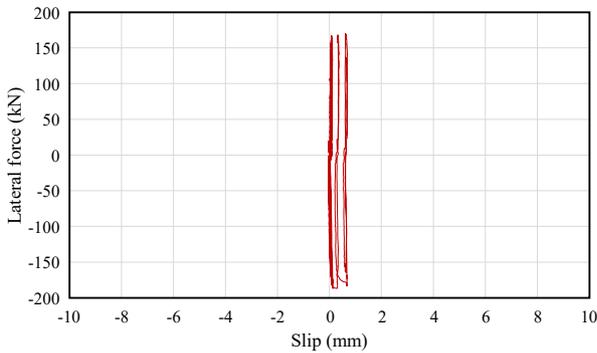


(a) EX-S-175PT

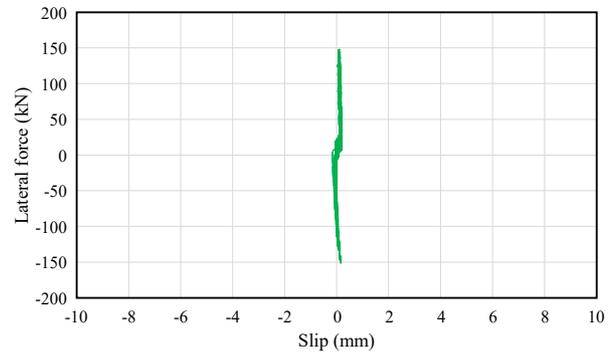


(b) EX-S-260PT

Fig. 14. Gap opening

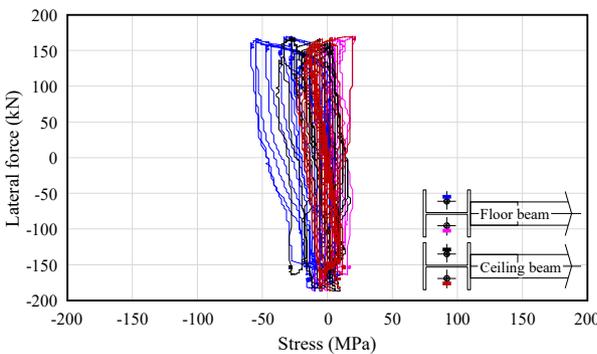


(a) EX-S-175PT

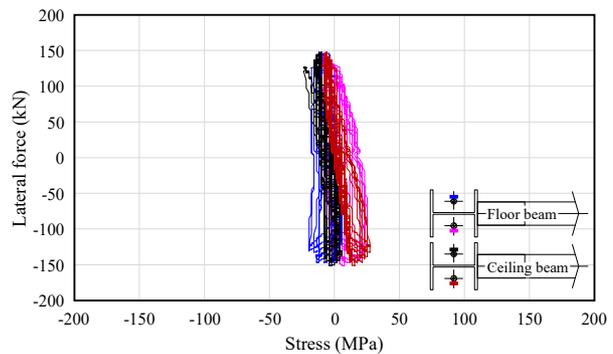


(b) EX-S-260PT

Fig. 15. Slip between columns



(a) EX-S-175PT



(b) EX-S-260PT

Fig. 16. Stress of the rod bar

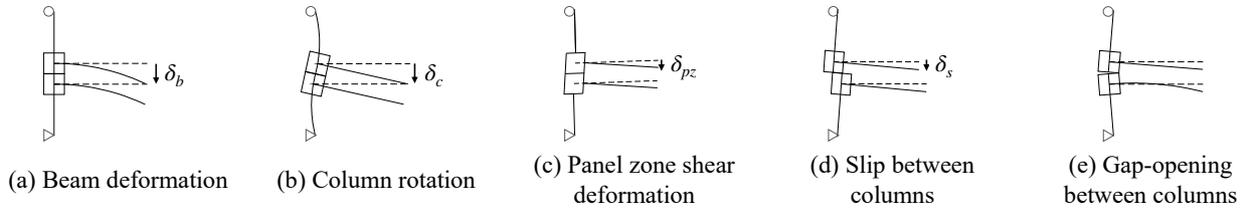


Fig. 17. Displacements by the deformation of members

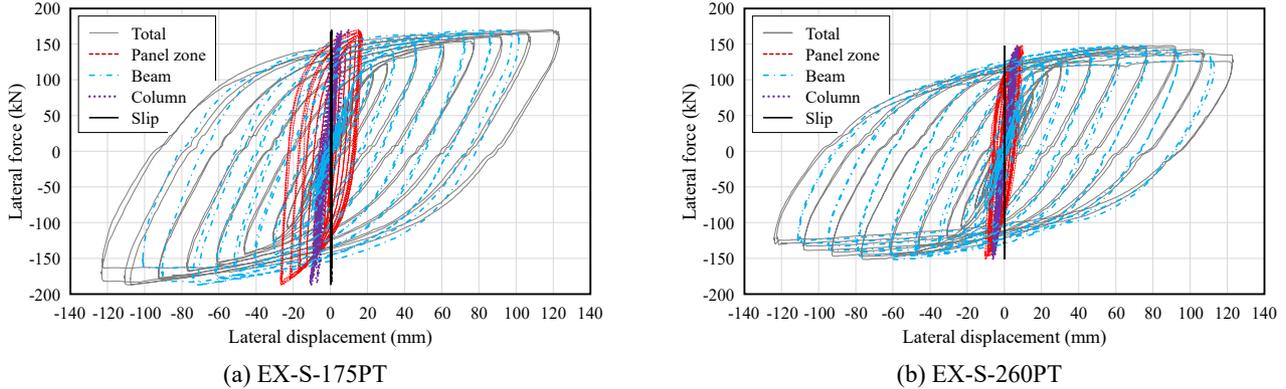


Fig. 18. Contribution of the members on displacement

총 횡변위 증 보와 패널 존에 의한 변위가 차지하는 비중은 탄성단계를 기준으로 분석하였다. EX-S-175PT 실험체는 최대 횡변위를 기준으로, 총 횡변위 증 정방향에서 보와 패널 존에 의한 변위가 차지하는 비중은 각각 72.5%, 13.0%이다. 부방향에서 총 횡변위 증 보와 패널 존에 의한 변위가 차지하는 비중은 각각 63.0%, 8.6%이다. EX-S-260PT 실험체는 전체 횡변위 대비 보와 패널 존에 의한 변위의 비율은 정방향에서 각각 67%, 17.4%로 나타났으며, 부방향에서는 각각 63.0%, 5.8%이다. 실험 결과, 전체 횡변위 증 보의 변형에 의한 변위는 두 실험체 모두 60% 이상으로, 보의 변형에 의한 변위가 가장 큰 것으로 나타났다. 3.3절에서 패널 존의 항복 이후 EX-S-175PT 실험체의 패널 존 전단변형이 EX-S-260PT 실험체의 패널 존보다 큰 것으로 나타났으나, 두 실험체는 전체 횡 변위에서 패널 존의 전단변형이 미치는 영향이 적고 대부분 보의 변형에 의해 횡 변위가 발생하였다.

3.6 소성회전능력

구조시스템은 횡력이 작용하는 동안 취성파괴 없이 에너지 소산능력을 확보할 수 있도록 소성회전능력이 요구된다. 소성회전능력은 회전각에서 탄성에 의한 회전각 성분을 제거하여 산정할 수 있다. Fig. 19은 두 실험체의 모멘트-소성회전각 관계 곡선으로 보-기둥 접합부의 소성회전능력을 나타내며, 소성회전각(θ_p)은 식 (9)에 따라 산정하였다.

$$\theta_p = \frac{\delta - P/K_{i,ex}}{L_b} \quad (9)$$

여기서, θ_p : 소성회전각(rad)

δ : 전체 횡변위(mm)

P : 횡하중(kN)

$K_{i,ex}$: 초기 횡강성(kN/mm)

실험 결과, EX-S-175PT 실험체는 정방향 및 부방향에서 각각 0.0626 rad 및 0.0643 rad의 소성회전능력을 보유하였다. EX-S-260PT 실험체의 경우 정방향 및 부방향에서 각각 0.0665 rad, 0.0679 rad의 소성회전능력을 발휘하였다.

Fig. 20는 부재별 소성회전능력을 나타낸다. 총 소성회전각 증 보의 소성회전이 차지하는 비중은 층간변위비 8%를 기준으로 확인하였다. EX-S-175PT 실험체는 총 소성회전각 증 보의 소성회전각이 정방향·부방향에서 각각 약 86.7%, 86.4%의 비중을 차지한다. EX-S-260PT 실험체는 전체 소성회전 대비 보의 소성회전이 정방향 및 부방향에서 각각 97.7%, 94.5%의 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 실험 결과, 전체 소성변형 증 보의 소성변형 비중이 대략 80% 이상으로 두 실험체 모두 대부분 소성변형이 보에서 발생하였다. 보강판의 적용으로 소성힌지가 보 내부에서 발생하여 접합부는 횡력에 대해 안정적으로 거동함을 확인하였다.

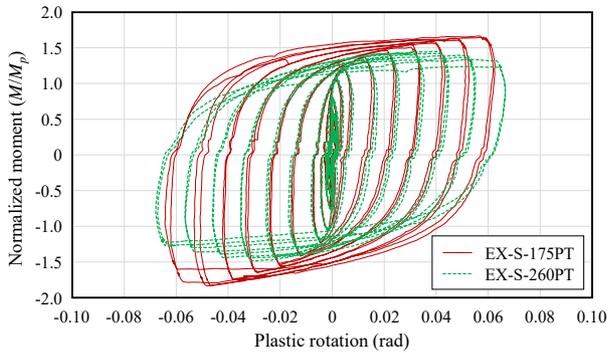
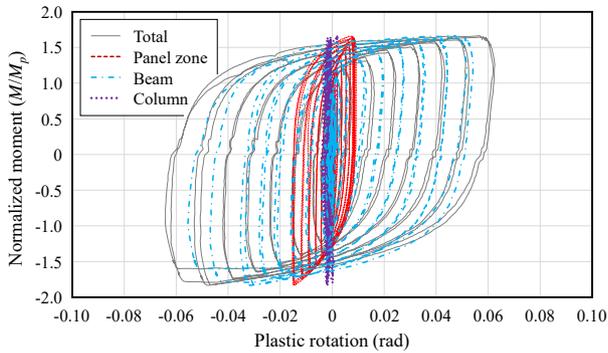
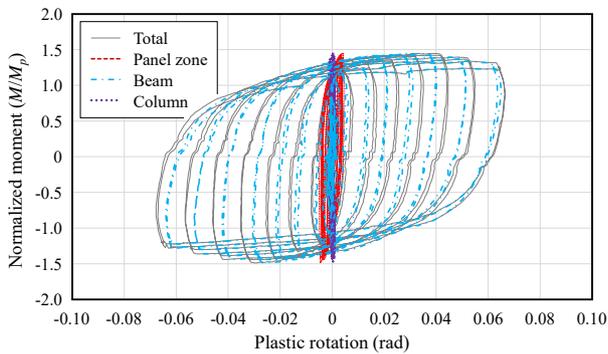


Fig. 19. Total plastic rotation capacity of specimens



(a) EX-S-175PT



(b) EX-S-260PT

Fig. 20. Contribution of the members on plastic deformations

4. 결론

본 연구에서는 공장제작물 향상을 위해 강봉을 이용한 모듈러 유닛 간 AJ 접합 시스템을 제안하였으며, 긴장력의 크기를 주요 변수로 횡하중 작용에 따른 접합부의 성능을 평가하였다. 본 연구의 주요결과는 다음과 같다.

- (1) 두 실험체는 탄성 범위에서의 항복강도 및 항복변위가 각각 116.8 kN - 130.0 kN, 22.0 mm - 25.2 mm로 유사한 결과를 가지며, 보에서 소성 좌굴이 발생하였

다. EX-S-175PT 실험체는 EX-S-260PT 실험체 대비 약 1.14~1.24배의 내력을 확보하였으며, 1.12~1.48배의 연성도를 가진다. 두 실험체는 탄성 영역에서 거의 유사한 거동을 가지며, 항복 이후 소성 영역에서 거동의 차이를 보였다. 압축력과 휨모멘트가 함께 작용하는 기둥은 휨강도 저하를 야기할 수 있으며, 이로 인해 긴장력을 적게 적용한 EX-S-175PT의 내력과 연성도가 EX-S-260PT보다 크게 나타난 것으로 판단된다.

- (2) EX-S-175PT와 EX-S-260PT 실험체는 초기강성 이론값인 5.35 kN/mm 대비 실험에 의한 횡강성의 비가 각각 0.997 및 1.006으로 완전강접합에 가까운 거동을 보임을 확인하였다.
- (3) AISC 내진규정은 보통모멘트 골조, 중간모멘트 골조, 그리고 특수모멘트 골조에 대하여 각각 0.02 rad, 0.03 rad, 0.04 rad의 접합부 회전각(θ_p)을 요구하고 있다. 접합부의 소성회전각(θ_p)은 각각 0.01 rad, 0.02 rad 그리고 0.03 rad를 만족하여야 한다. 중간모멘트 골조는 회전각 0.02 rad일 때의 접합부 모멘트 강도가 보 소성 모멘트(M_p)의 80% 이상 유지되어야 하며, 특수모멘트 골조의 경우 0.04 rad일 때의 접합부 강도가 $0.8M_p$ 이상이어야 한다. 두 실험체는 접합부 회전각 0.07 rad 이상 총 소성 회전변형이 0.06 rad 이상으로 모두 변위 요구조건을 만족시킨다. 0.02 rad에서 M_p 의 80% 이상 강도를 확보하여 강도 조건을 만족시킨 것으로 판단되며, 중간모멘트 골조 수준 이상의 강도 및 변형능력을 확보하였다.
- (4) 두 실험체는 보-기둥 용접부에서의 파단을 방지하고 보의 내부로 소성힌지가 발생하도록 유도하기 위해 보 플랜지에 보강판을 용접하였다. 실험결과, 천장보 및 바닥보에서 소성힌지가 발생하여 실험체는 안정적인 거동을 보였으며, 전체 소성 회전능력 중보에서의 소성변형이 80% 이상을 차지하였다.
- (5) EX-S-175PT 실험체는 EX-S-260PT 대비 정방향에서 1.86배, 부방향에서 2.63배의 전단변형이 발생하였다. 또한, 두 실험체는 천장보 및 바닥보가 소성모멘트에 도달한 뒤에 패널 존이 항복한 것을 확인하였다. 패널 존의 전단변형에 의해 발생하는 횡 변위는 EX-S-175PT 및 EX-S-260PT에서 각각 최대 약 2 mm, 0.8 mm로, 패널 존의 전단변형이 전체 횡 변위에 미치는 영향이 매우 적다.
- (6) 두 실험체는 실험종료시까지 겹 오픈닝이 1 mm 미만

으로 예측되었다. 실험체의 초기강성이 완전강접합과 유사하며 보의 소성모멘트 강도를 발휘하였으므로, 구조성능에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 또한, 기둥 사이에서 슬립은 1 mm 미만으로 발생하여 AJ 커넥터의 전단 저항성능을 확인하였다.

- (7) 실험결과, 압축력과 휨모멘트로 인해 기둥의 휨강도가 저하될 수 있으므로 기둥의 감소된 휨강도를 고려하여 긴장력의 크기를 결정해야 한다. 또한, 포스트텐션을 적용한 모듈러 유닛의 접합 시스템은 갭 오픈과 패널 존의 전단변형, 기둥 및 강봉의 항복강도를 고려하여 도입 긴장력을 산정해야 한다.

감사의 글

이 연구는 2021년 한국연구재단 이공학개인지초연구(NRF-2016R1D1A1B01010615) 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Lawson, M., Ogden, R., and Goodier, C.I. (2014) *Design in Modular Construction*, CRC Press, USA.
- [2] Deng, E.-F., Zong, L., Ding, Y., Dai, X.-M., Lou, N., and Chen, Y. (2018) Monotonic and Cyclic Response of Bolted Connections with Welded Cover Plate for Modular Steel Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.167, pp.407-419.
- [3] 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.
- [4] Lee, S.S., Park, K.S., Hong, S.Y., and Bae, K.W. (2015) Behavior of C-Shaped Beam to Square Hollow Section Column Connection in Modular Frame, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.471-481 (in Korean).
- [5] Dai, X.-M., Zong, L., Ding, Y., and Li, Z.-X. (2019) Experimental Study on Seismic Behavior of a Novel Plug-in Self-lock Joint for Modular Steel Construction, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.181, pp.143-164.
- [6] Dhanapal, J., Ghaednia, H., Das, S., and Velocci, J. (2019) Structural Performance of State-of-the-Art VectorBloc Modular Connector Under Axial Loads, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.183, pp.496-509.
- [7] Chen, Z., Liu, Y., Zhong, X., and Liu, J. (2019) Rotational Stiffness of Inter-Module Connection in Mid-Rise Modular Steel Buildings, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.196, 109273.
- [8] Jung, D.-I., Cho, B.H., Lee, D.Y., Lee, J.S., and Jung, C.W. (2021) Experimental Evaluation on Seismic Performance of Exterior Connection in Modular Building System with Steel Strand, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.33, No.5, pp.315-326 (in Korean).
- [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 (2019) *Hot Rolled Steel Sections for Building Structure* (KS D 3866: 2019), Korea (in Korean).
- [12] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).
- [13] Ministry of Land, Infrastructure and Transport (2019) *Korean Building Code for Steel Structures* (KDS 41 30 00: 2019), Korea (in Korean).

요 약: 본 연구에서는 마감 작업과의 간섭과 시공성을 고려하여 모듈러 유닛 상부에서 접합을 수행하는 AJ 접합 시스템을 제안하였다. AJ 커넥터와 기둥 내부에 삽입된 강봉을 체결하면서 긴장력을 도입하고, 이를 통해 기둥에 압축력이 작용하면서 상·하 모듈러 유닛이 접합된다. 제안된 접합 시스템의 접합성능 및 내진성능을 평가하기 위해 긴장력의 크기를 변수로 2개의 T자형 부분 조립체에 대해 반복가력실험을 수행하였다. 실험결과 EX-S-175PT, EX-S-260PT 실험체는 중간변위비 2%에서 소성모멘트의 80% 대비 약 1.5배 이상의 성능을 확보하였으며, 보에서 좌굴이 발생하여 실험을 종료하였다. 소성힌지를 보 내부로 유도하기 위해 플레이트로 보와 기둥을 보강하였으며 보와 기둥 용접부의 취성파괴를 방지하였다. 실험결과 천장보 및 바닥보에서 소성힌지가 발생하여 실험체는 안정적인 거동을 보였으며, 전체 소성 회전능력 중 보에서의 소성변형이 80% 이상을 차지하였다. 두 실험체의 초기강성이 완전강접합과 유사하며, 압축력과 휨모멘트로 인해 기둥의 휨강도가 저하될 수 있으므로 기둥의 감소된 휨강도를 고려하여 긴장력의 크기를 결정해야 한다. AJ 접합 시스템을 적용한 모듈러 보-기둥 접합부는 중간모멘트 골조 이상의 성능을 확보하였다.

핵심용어: 포스트텐션 접합, 모듈러 건축, 반복재하실험, 내진성능, 중간모멘트 골조