

# 주강접합 보강철물이 삽입된 모듈러 유닛 골조의 십자형 접합부에 관한 구조성능 평가

신상민<sup>1</sup> · 오근영<sup>1</sup> · 박금성<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>수석연구원, 한국건설기술연구원, 건축연구본부, <sup>2</sup>선임연구위원, 한국건설기술연구원, 건축연구본부

## Evaluation on the Structure Performance of Cross Shaped Joints between Modular Units with Cast Steel Connections

Shin, Sangmin<sup>1</sup>, Oh, Keunyeong<sup>1</sup>, Park, Keumsung<sup>2\*</sup>

<sup>1</sup>Senior Researcher, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-Si, 10223, Korea

<sup>2</sup>Senior Researcher Fellow, Dept. of Building Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-Si, 10223, Korea

**Abstract** - This paper is a aim to develop a connection structure system that can be adapted using steel-frame middle & high-rise of the modular units. Conventional connecting method between the modular unit which is a high-rise or technical constraints problems. Lateral load resistance and increase strength of the details of the connection between the units are needed. Lateral load resistance of the connection between the proposed unit for the bending performance evaluated experimentally. Main variables in accordance with a total of seven specimens were fabricated and experiments were carried out. Experimental results for the connection between the units, All connections except the bending-type columns corresponding to the special moment frames to ensure that the performance was investigated.

**Keywords** - Unit modular, Connection between unit, Connection steel plate, Flexural performance

### 1. 서론

2000년 초 국내에 모듈러 시스템이 도입된 이후로, 현재 모듈러 공법은 시공성이 우수하고, 공기 단축, 시공 오차를 흡수하여 정확한 시공을 할 수 있는 공법으로 평가 받고 있다. 특히 많은 인구가 수도권 내 밀집해 있는 국내 특성과 함께 1인 가족이 폭발적으로 늘어나고 있는 현 시점에서는 신속한 주택 공급을 위한 대안이 되고 있다. 모듈러 건축물은 2000년 초반 6층 규모의 건축물에서 현재 13층 규모의 공동주택(용인 영덕 경기행복주택) 으로 발전하였다. 최근 모듈러 공법을 중고층 건축물에 적용하는 추세<sup>[1],[2]</sup>이며, 이를 실현하

기 위하여 주요 요소 기술 중 하나가 모듈과 모듈 간의 접합부 상세 개발이다. 모듈 접합부의 접합성능과 일체성이 확보되지 않을 경우, 횡력에 대하여 하나의 구조물로서 전체 거동하지 않아 효과적인 저항을 할 수 없으며, 구조부재의 국부좌굴 등으로 인해 내력이 저하될 가능성이 있다. 따라서, 접합성능과 일체성을 확보하기 위한 기술개발과 이에 대한 성능평가 중점으로 진행되어지고 있다<sup>[3]-[9]</sup>.

국내 연구 개발 사례를 살펴보면, 폐쇄형 부재 단면을 활용하여 부재간의 접합 및 모듈 간의 접합성능을 확보하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있다. 이를 살펴보면, C형강 보와 각형강관 기둥으로 구성하고, 기둥 하부에 Access Hole을 내어 모듈 간 체결하는 상세<sup>[3]</sup>, 각형강관 보와 기둥으로 구성하고 특수 제작 블록을 활용한 체결 상세<sup>[4]</sup>, 연결 플레이트를 활용하여 각형강관 보와 기둥을 볼팅 체결하는 상세<sup>[5],[6]</sup>, 강-PC 합성 보와 기둥 구성된 접합부 상세<sup>[7]</sup>, 유닛블록을 활용한 보-기둥 접합부 상세<sup>[8]</sup> 등이 있다.

기존 연구에서 제안한 모듈러 접합부 관련 연구를 살

Note.-Discussion open until June 30, 2025. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on August 29, 2024; revised November 18, 2024; approved on November 25, 2024. Copyright © 2024 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0370 Fax. +82-31-910-0392

E-mail. kspark1@kict.re.kr

펴보면 주로 저층 건축물을 대상으로 제안되었으며<sup>[9]</sup>, 중고층 이상 건축물 적용하기 위한 상세와 성능평가는 미비한 상황이다.

따라서, 본 연구에서는 중고층형 모듈러 적층 공법을 보다 구체화하기 위해서는 단위 모듈의 수평 및 수직 접합성능을 확보하고, 횡력에 저항하기 위하여 횡강성이 크게 증대되며 단부 모멘트 성능 증대가 가능하게 하고자 하였다. 이에 제작 정밀도 및 제작성 확보뿐만 아니라 단위 모듈 구조체간의 일체성 거동 확보가 가능한 접합부 상세를 개발하고자 하였다.

제시된 단위 모듈 간의 접합 상세와 형상에 대하여 여러 가지 변수에 따른 실험적 성능 평가를 통해 최적의 접합 상세를 찾기 위한 구조 안전성을 면밀히 검토한다. 또한, 이러한 실험적 거동 평가 결과를 바탕으로 중고층형 모듈러 유닛 조합골조의 내진성능 검증의 신뢰성을 확보하기 위한 기본 데이터로 활용하고자한다.

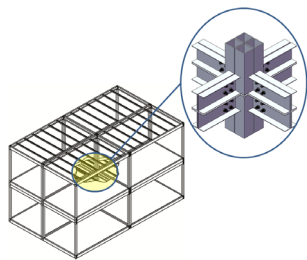


Fig. 1. Connection in modular steel frame for specimens

## 2. 유닛 간 접합부의 구조성능평가 실험

### 2.1 실험 개요

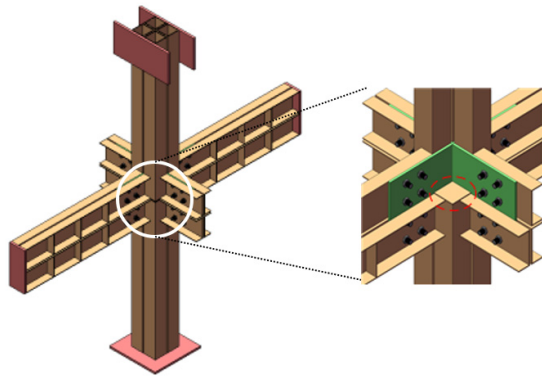
유닛 모듈러 골조는 기존 골조시스템보다 다양한 작업조건과 하중조건을 고려해야 되기 때문에 유닛 내 강도확보 뿐만 아니라 적층 및 조립 등의 시공성을 고려한 접합부 계획과 유닛 간 접합부의 강도와 강성 확보가 중요한 요소이다. 또한, 유닛 모듈러 건축물이 고층화 될수록, 횡력으로부터 부담되는 하중은 증가하게 됨에 따라 유닛 간 접합은 중고층형 모듈러 공법 구축의 중요 요소기술이며, 반드시 해결해야 될 숙제이다. 본 연구에서는 Table 1과 같은 접합부의 형상에 따른 내력 증대와 변형성상 및 파괴모드 등에 대한 접합부의 성능 평가를 위해 실험을 수행하였다.

Table 1. Detailed information of test specimens

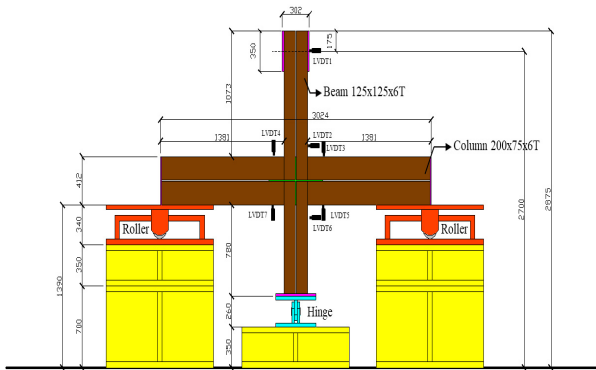
Specimens	Connection Type	Connection Steel Plate	Column Shape
MC-P12-N			
MC-P6-N			
MC-P12-C50 (Half size Cast node Type)			
MC-P12-C100 (Original size Cast node Type)			
MC-PH12-N (Steel plate Half size, Beam-Beam connection Type)			
MC-PV12-F (col.-col. connection Type)			
MC-P12-F			

### 2.2 실험체 계획

각형강관 기둥 및 모서리 절단형 각형기둥 (125×125×6 mm, SS275), 강판 절곡형 기둥과 경 C-형강 보(200×75×6 mm, SS275)로 구성되는 개별 모듈러 유닛의 유닛 간 접합부를 대상으로 양방향 반복가력 실험을 계획하였으며, 반복가력실험을 통해 접합부의 거동을 파악하고 주요 변수별로 구조성능에 관한 실험 결과를 실제 비선형 동적 내진해석에 반영하기 위한 자료로 활용하고자 하였다. 지진이나 풍 하중이 횡방향으로 작용할 때, 중고층 유닛 모듈러 건축물은 외측 테두리를 중심으로 약축 방향에 가장 큰 횡력이 집중하게 된다. 하지만, 본 연구에서는 유닛 4개가 결합되는 내측 접합부 대상으로 실험체를 계획하였으며(Fig. 2), 외부 접합부는 추후 연구에서 진행하기로 하였다. 실험체는 캐스트 노드를 포함한 십자(+) 형상의 연결 철물로 접합하는 방식으로, 총 7개의 실험체를 제작하였다. 기둥의 형상(폐쇄형 및 개방형)과 연결 철물의 두께 및 크기, 캐스트노드 유무와 크기, 모듈간 접합방식을 주요 변수로 고려하여 실험을 계획하였다. 폐쇄형 단면 기둥의 경우, 상하부 기둥 접합부 사이에 철물을 삽입하였



(a) Detailed connection of specimens



(b) Detailed specimen and measurement arrangement

Fig. 2. Test setup

으며, MC-P12-C50 및 C100 실험체는 캐스트 노드를 삽입하기 위하여 기둥 모서리 일부를 절단하였다. 개방형의 강판 절곡형 기둥형상의 경우, 보 춤 높이가 간격으로 스티프너를 삽입하여 국부좌굴을 방지하였다.

Table 1에는 주요변수를 고려한 실험체 일람을 정리하였으며, 실험체명은 MC-P00-00로 나타내었다. 여기서, MC는 Modular Connection를, P00에서 숫자는 연결 철물의 두께를 나타내며, H와 V는 각각 수평(보-보) 및 수직(기둥-기둥) 접합을 나타낸다. 또한 C는 크기별 캐스트 노드, N은 각형강관, F는 절곡 기둥을 의미한다.

### 2.3 하중가력방법 및 세팅

실험체 접합부의 구조성능은 Seismic Provisions For Structural Steel Building (AISC 341-22, 2022)<sup>[10]</sup>에서 제시하는 Cyclic Loading Program에 준하여 변위 점증방식의 반복가력하는 실험방법을 채택하여 평가하였다.

Fig. 2에 나타난 바와 같이 아래층 모듈러 유닛 기둥

단부를 고정용 핀 플레이트의 상부 위에 올려놓고 접합된 경 ㄷ-형강 양단부의 보를 가력방향인 수평방향으로 이동하도록 롤러 지점을 구현하여 지점위에 올려놓고, 기둥 상부 단부에 제작된 가력판 중심부를 통해 횡방향 하중이 작용하도록 하였다.

양단 고정인 보는 접합부에 부모멘트가 발생하며, 이때 등분포 하중이 재하 될 경우, 보 스패인의 1/4지점에서 모멘트가 0이 된다. 이와 같이 보의 휨모멘트 효과를 최소화하고자 보 스패인의 1/4 지점인 1,500 mm를 보의 길이로 선정하였다.

기둥의 길이는 모듈러 유닛의 층고를 고려하고 하부층 기둥 단부의 힌지 높이를 고려하여 모듈러 유닛 접합부에 횡력이 작용하였을 때 상하 동일한 모멘트가 발생되도록 최적화하여 기둥의 제작 길이를 결정하였다.

유닛 간 접합부의 거동 및 변형성상을 파악하기 위하여 하중 가력점 위치, 보의 단부 횡방향 및 접합부 패널 존에 총 8개의 변위계를 설치하여 계측하였다.

## 3. 실험결과 분석 및 고찰

### 3.1 유닛 간 접합부의 거동

이 연구에서 개발된 접합부 구조성능평가를 수행한 실험체는 상하부 보 사이에 연결 철물이외에 접합을 하지 않았으므로, 보 소성휨모멘트( $M_p$ )의 4배 값과 실험 결과를 비교하였다. 200x75x6 mm 인 ㄷ형강 보의 재료 실험로부터 얻은 평균 항복강도값 368.1 MPa(SS275) 반영하여 보 소성 휨모멘트는 50.53 kNm으로 산정되었다.

#### 3.1.1 MC-P12-N 실험체(기본형)

모듈러 유닛간 접합부에 대한 파괴거동을 파악하기 위한 기본형 실험체로 접합 철물의 두께가 12 mm인 실험체이다. Fig. 3에서 보는 바와 같이, 0.01 rad에서 접합부의 일부 고력볼트가 미끄러지면서 밀리는 소리가 동반되었다. 이후, 0.02 rad 첫 번째 사이클에서 천정 유닛 보의 하부플랜지 부분에서 국부좌굴 변형이 일부 발생하였고, 이후 0.03 rad 첫 번째 사이클에서 액츄에이터가 설치된 방향의 보 지점부에서 일부 뒤틀림 현상이 발생하였다. 0.05 rad 첫 번째 사이클에서 보의 플랜지면 용접부에서 균열파괴가 나타났다.

Fig. 4와 같이 실험 후 실험체를 해체하여 확인한 결과, 접합 철물에는 어떠한 손상 흔적도 발견할 수 없었으며, 4 % 드리프트 변형에서 두번째 사이클 유지하는 동안 휨강도가 0.8 Mp 이상 유지되어 특수모멘트 골조에 준하는 층위변위각을 수용할 수 있는 것으로 평가되었다.

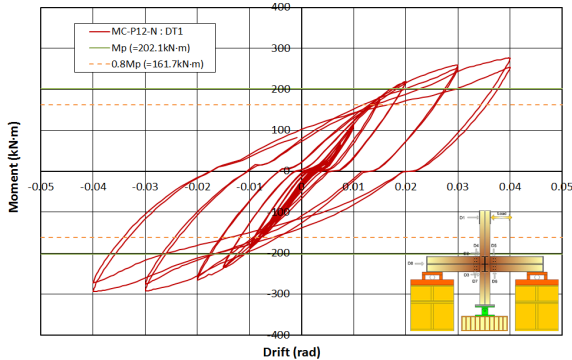


Fig. 3. Moment-drift relationship (MC-P12-N)



Fig. 4. Testing process and results for MC-P12-N

### 3.1.2 MC-P6-N 실험체

MC-P12-N 실험체 대비 접합 철물의 두께가 6 mm인 실험체로서, 실험체 제작시 용접열에 의한 잔류변형에 의한 지속적인 변형으로 지속적인 소리가 발생하였으며, 0.02 rad의 첫번째 사이클에서 항복현상과 동시에 두번째 사이클에서 일측면 보의 좌굴현상이 미소하게 나타나기 시작하였다. 0.03 rad 변형 이후 기둥-보 접합부에서 응력집중으로 용접부의 항복 및 파괴현상이 증가하였으며, 동일 0.03 rad 두번째 사이클에서는 하중저하로 인해 다소 강성변화가 나타났다. Fig. 5와 같이

0.04 rad에서는 보의 용접부 파괴, 강성 및 내력저하 현상이 나타났으나, 보의 0.8 Mp 이하로 내력저하가 나타나지는 않은 것으로 판단된다. 0.05 rad 첫번째 사이클에서 가력부측 보의 횡좌굴 변형이 크게 보임에 따라 실험을 종료하였다. 기본형에 비해 접합 철물의 두께가 50 %인 실험체로 Fig. 6와 같이 실험 종료 후 접합부를 해체하여 확인한 결과, 접합 철물에는 어떠한 손상 흔적도 발견할 수 없었다. 또한, 4 % 드리프트 변형에서 0.8 Mp 이상의 내력을 확보하여 특수모멘트 골조 시스템 성능을 발현하였다.

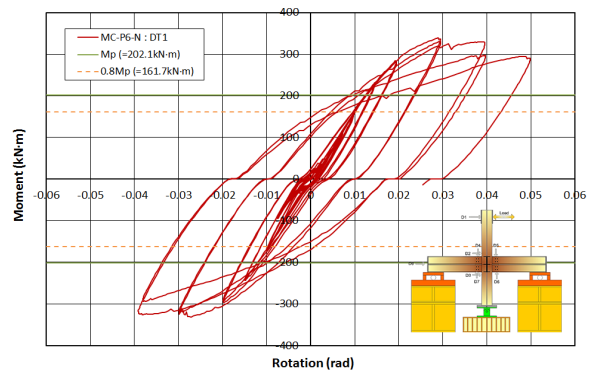


Fig. 5. Moment-drift relationship (MC-P6-N)



Fig. 6. Testing process and results for MC-P6-N

### 3.1.3 MC-P12-C50 실험체

각형강관 4개가 모인 기둥 단면 폭의 50 % 크기인 캐스트 노드를 갖는 실험체이다. 0.0075 rad 변형에서 초기변형이 발생하기 시작하였고, 이후 0.02 rad 변형의 첫 번째 사이클에서 용접부의 파단소리가 동반되었으나, 하중과 변형은 지속적으로 증가하였다. 0.03 rad 변

형의 첫 번째 사이클에서 보 용접부의 인장 파단으로 일시적 하중 저하가 보였으며, 기둥-보 접합면에서 양 방향으로 국부좌굴이 발생하였고, 사이클이 반복될수록 용접부 파단 영역이 확대됨을 관찰하였다. 0.04 rad 첫 번째 사이클에서 용접부의 추가적 파단으로 하중저하가 나타났고, 두번째 사이클에서는 하중저하가 다소 크게 나타났다(Fig. 7). Fig. 8과 같이 캐스트 노드형을 갖는 접합 철물을 이용한 접합부로 실험 종료 후 해체 해본 결과, 상.하 기둥의 일부 절단부에서 휨변형으로 인한 국부좌굴 변형을 보였으나, 캐스트 노드형의 접합 철물에는 어떠한 손상 흔적도 발견할 수 없었다. 특수모멘트 골조 시스템에 해당하는 4% 드리프트 변형에서 0.8 Mp 이상의 내력을 확보한 것으로 나타났다.

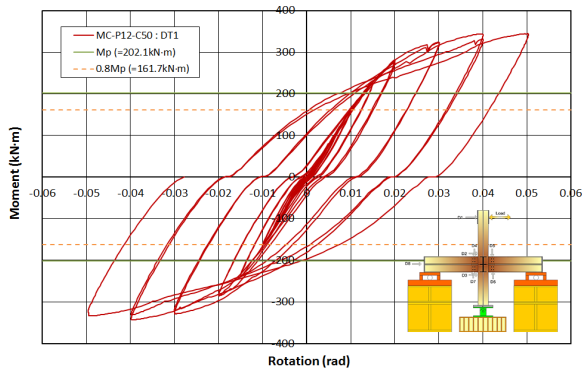


Fig. 7. Moment-drift relationship (MC-P12-C50)



Fig. 8. Testing process and results for MC-P12-C50

### 3.1.4 MC-P12-C100 실험체

MC-P12-C100 실험체는 기둥 단면 폭만큼 노드크기를 실험변수로 고려한 실험체이다. Fig. 9과 같이 초기

변형은 0.0075 rad에서 발생하였으며, 0.03 rad 첫번째 사이클에서 바닥 유닛의 기둥-보 접합 인장부에 용접균열이 관찰되었다. 또한, 두번째 사이클에서 하부 보 접합부의 인장부에서 용접부 균열과 함께 내력저하 현상이 일부 나타났다. 0.04 rad 두번째 사이클에서 하단부 천정 기둥-보 접합부에서 압축부위에 국부좌굴이 발생하였으며, 모듈러 유닛 결합부의 상.하부 플랜지면에서의 변형은 관측되지 않았다. 0.05 rad 첫번째 사이클에서 내력저하 및 변형이 확대되었으며, 사이클이 반복되면서 접합 철물과 볼트 사이의 미끄러짐으로 인한 변형 현상이 지속적으로 관찰되었다.

Fig. 10과 같이 실험 종료 후 해체 결과, 상.하 기둥의 절단부에서 휨변형으로 인한 국부좌굴 현상이 일부 나타났다, 캐스트 노드형의 접합 철물에는 손상이 발견되지 않았다. 또한, 특수모멘트 골조 시스템에 준하는 성능을 발현하였다.

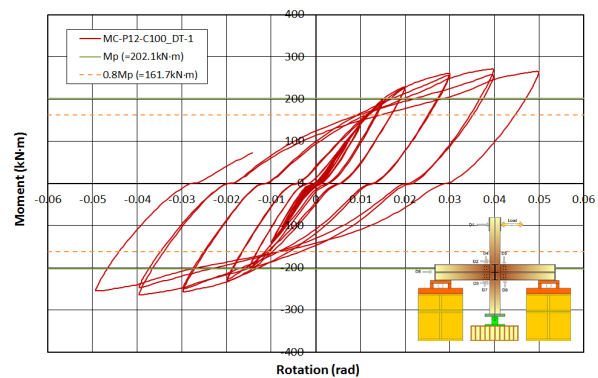


Fig. 9. Moment-drift relationship (MC-P12-C100)



Fig. 10. Testing process and results for MC-P12-C100

### 3.1.5 MC-PH12-N 실험체

연결철물의 크기를 수직방향으로 50 % 축소하여 제작한 MC-PH12-N 실험체로서, 0.01 rad 첫번째 사이클에서 접합 철물과 볼트 사이에서 변형으로 소리가 동반되었으며, 0.02 rad 변형에서 압축 및 인장부에서 항복 현상과 함께 보의 용접부에서 균열이 발생하였다. 0.03 rad 변형에서 강성저하 현상을 보였으며, 사이클이 반복될수록 보의 용접부에서 균열 개소 및 크기가 증가됨에 따라 내력저하 현상이 나타났다. 0.05 rad 첫번째 사이클 가력에서 하중저하 및 인장과 압축측 기둥 접합면의 국부변형, 상하좌우 대칭방향으로 변형, 층간대의 상·부 플랜지 면에서 용접부 균열현상으로 실험을 종료하였다.

기본형 대비 접합 철물을 수평방향으로 절반 크기로 실험한 접합부로서 실험 종료 후 해체해 본 결과, 상·하 기둥의 변형 현상은 없었으며 절반 크기형의 접합 철물에도 어떠한 손상 흔적은 발견할 수 없었다. 4 % 드리프트 변형에 대하여 특수모멘트 골조 시스템에 해당됨을 확인하였다.

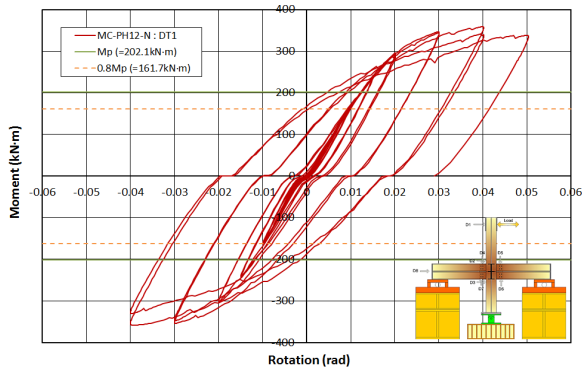


Fig. 11. Moment-drift relationship (MC-PH12-N)

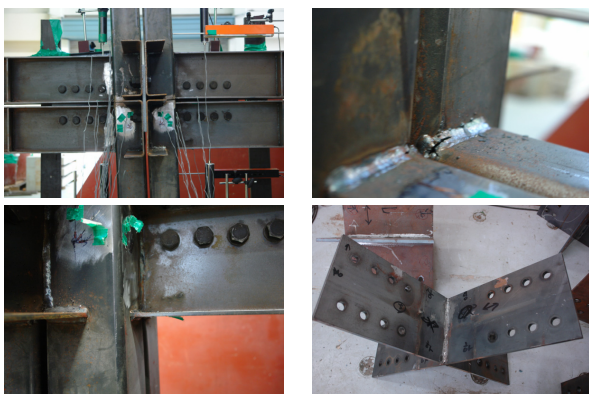


Fig. 12. Testing process and results for MC-PH12-N

### 3.1.6 MC-PV12-F 실험체

기본형 실험체와 달리 기둥을 강판으로 개방형 단면을 갖도록 절곡한 형상으로 접합부의 연결을 절곡형 기둥 내부에서만 결합되도록 구사한 실험체이다. 0.01 rad의 첫번째 사이클에서 초기변형이 시작되었다. 0.02 rad의 첫번째 사이클에서 일부 인장부에서 항복하는 현상이 나타났으며, 두번째 사이클 인장과 압축측으로 항복영역이 확대되었다. 0.03 rad 두번째 사이클에서 보의 용접 인장부위에서 용접부의 균열로 인한 접합부의 찢어짐 현상, 절곡기둥 내부에 설치된 스티프너의 부위에서 국부좌굴 발생하였으며, 하중저하 현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 0.04 rad의 첫번째 사이클에서 기둥 압축측 국부좌굴로 내력이 크게 저하하였으며, 절곡기둥의 인장측 보에 접합된 스티프너 위치에서 심한 국부좌굴 변형이 발생하여 실험을 종료하였다.

개방형 단면을 갖는 절곡형 기둥과 접합 철물을 절반 크기로 하여 실험한 접합부로 실험 종료 후 해체해 본 결과, 절곡형 기둥의 보강 스티프너의 위치가 일치하지 않은 부분에서 심한 국부변형 현상이 나타났으며, 절반 크기형의 접합 철물에는 어떠한 손상 흔적도 발견할 수 없었다.

Fig. 13에서 보는 바와 같이 4 % 드리프트 변형에서 절곡 기둥의 국부 변형으로 인해 실험체가 파괴되었다. 그러나 2 % 드리프트 변형에서 두번째 사이클이 유지 동안 0.8 Mp 이상의 내력이 확보되어 중간모멘트 골조 이상에 해당됨을 확인하였다. 실험 결과를 보면 개방형 기둥 형상을 갖는 접합부는 중층 규모 대상 모듈러 구조물에 적합할 것으로 판단 되어진다. 절곡형 기둥 내부 보강 스티프너의 용접 건전성을 확보한다면 접합부는 특수모멘트 골조 시스템 이상의 성능도 충분히 확보할 수 있을 것으로 판단된다.

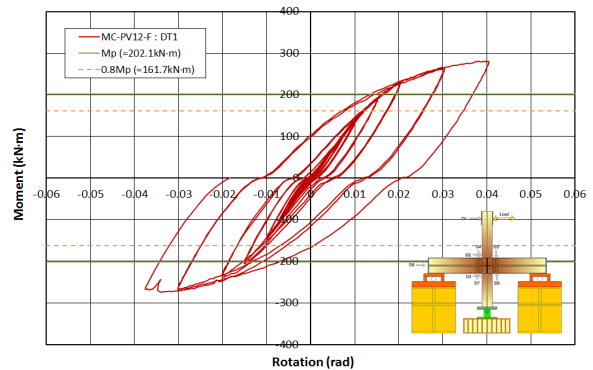


Fig. 13. Moment-drift relationship (MC-PV12-F)



Fig. 14. Testing process and results for MC-PV12-F

### 3.1.7 MC-P12-F 실험체

접합 철물의 형태와 두께, 크기는 실험체 MC-P12-N과 동일하지만, 강판 절곡형 기둥을 사용하여 폐쇄된 기둥 단면에 보가 접합되도록 제작한 실험체이다.

0.02 rad 변형의 첫번째 사이클에서 다소 불안정한 현상과 지속적으로 소리가 동반되는 것을 관찰할 수 있었다. 0.03 rad 변형의 첫번째 사이클에서 인장측 보의 용접부가 파단되었으며, 하단부 접합면의 하부 보 플랜지 면에서 좌굴현상이 발생하여 일시 하중저하 하는 현상이 미소하게 나타났다. 사이클이 반복될수록 용접부에서 파괴와 변형이 다수 발생하였으며, 용접부 파괴로 일시 하중저하 하는 현상과 접합된 상·하 최연단 보 플랜지 면이 모두 국부좌굴하는 현상을 보였다. 두번째 사이클에서 하중저하현상과 동일 사이클 내에서 하중저하가 비교적 크게 나타남을 확인할 수 있었다. 0.04 rad 변형의 첫번째 사이클에서 가력 중 실험체가 불안정한 거동을 보이며 실험이 종료되었다. 개방형 단면을 갖는 절곡형 기둥과 접합 철물을 기본 크기로 하여 실험한 접합부로 실험 종료 후 해체해본 결과, 절곡형 기둥의 스티프너 불일치 부분에서 심한 국부변형 현상이 나타났으며, 접합 철물에는 어떠한 손상 흔적도 발견할 수 없었다.

MC-PV12-F 실험체와 같이 4 % 드리프트에서 절곡 기둥의 심한 국부변형으로 해당 층간변위각에 대해서 강성을 확보는 못하였으나, 2 % 드리프트 변형에서 두번째 사이클이 유지 동안 0.8 Mp 이상의 내력이 확보되어 중간모멘트 골조 이상에 해당됨을 확인하였다. 이러한 절곡 기둥의 형상은 중층 규모 대상구조물에 적합한 접합 시스템으로 판단된다.

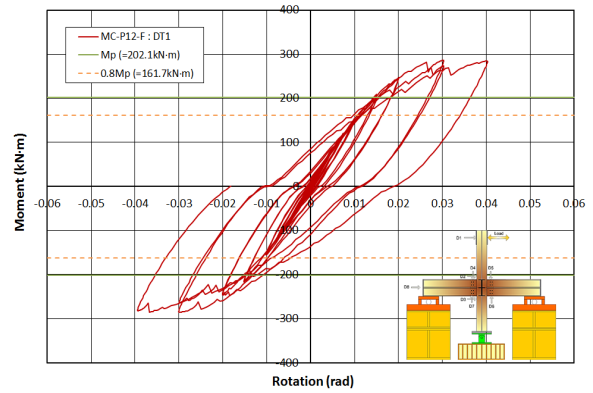


Fig. 15. Moment-drift relationship (MC-P12-F)

### 3.2 주요변수별 단조화 및 에너지 흡수능력 비교

#### 3.2.1 단조화 곡선 비교

유닛 간 접합부에서 접합철물의 크기와 두께, 캐스트 노드 크기, 접합철물과 기둥 단면의 형상에 따른 초기 강성 및 내력에는 다소 차이가 나타나고 있으나, 모든 접합부의 강도는 보의 소성휨모멘트 값을 상회하는 것으로 나타났다.



Fig. 16. Testing process and results for MC-P12-F

기둥이 각형강관 형태이며, 접합 철물의 두께와 관계 없이 기본 형상과 노드의 크기가 50 %인 주물형태의 접합철물을 이용한 접합부에서 강성 및 강도가 비교적 높게 나타남을 알 수 있다. 반면에, 노드 100 %형과 기둥을 개방 단면 형태로 절곡한 접합부에서 강성과 내력은 다소 저하하는 것으로 나타났다.

Fig. 17에서 보는바와 같이 4 % 드리프트 변형에서 절곡형 기둥을 갖는 접합부만이 기둥 내부 스티프너의

위치가 상이하게 배치되어 국부변형으로 강성 확보는 되지 못했으나 2 % 드리프트 변형에서 두번째 사이클이 유지 동안 0.8 Mp 이상의 내력이 확보되어 중간모멘트 골조 이상에 해당됨을 확인하였다. 실험결과로부터 이러한 기둥 단면은 중층 규모 구조물에 아주 적절한 것으로 생각되며, 절곡형 기둥 단면 형상을 갖는 접합부를 제외하고 모두 특수모멘트 골조 이상의 성능을 확보하고 있음을 알 수 있었다. 하지만, 절곡형 기둥의 적용시 보강 스티프너의 위치와 용접 처리를 보다 면밀히 제작한다면 특수모멘트 골조에 해당하는 접합부의 성능 구현도 가능할 것으로 생각된다.

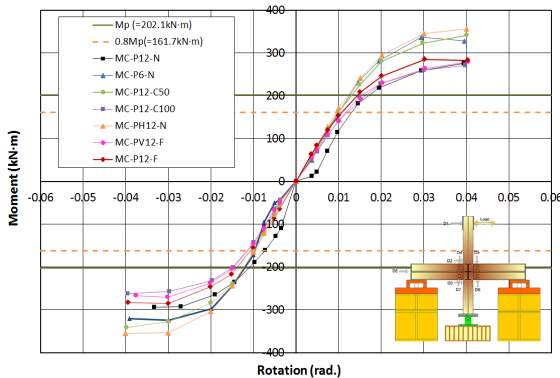


Fig. 17. Comparison on simple curve by joint type

### 3.2.2 에너지 흡수능력의 비교

MC-P12-N 기본 실험체를 대상으로 4 % 드리프트 변형 시(특수모멘트 골조 시스템) 누가에너지 소산량 비교 결과, 절곡형 기둥 단면을 제외한 접합부는 4 %~20 % 이상 상회하는 결과를 보였다.

절곡형 기둥의 경우, 3 % 변형까지 가력한 것으로 연성과 변형능력 및 접합부 거동의 안전성 측면에서 고층화하는 데에는 다소 무리가 있을 것으로 판단되나, 절곡형 기둥 내부의 보강 스티프너의 설계를 보다 면밀히 하고 용접부를 주의하여 제작한다면 충분히 특수모멘트 골조 이상의 성능확보가 가능할 것으로 판단된다.

MC-P12-N 기본 실험체를 대상으로 2 % 변형 시(중간모멘트 골조해당) 누가에너지 소산량 비교결과, 기둥 단면형상 및 접합철물과 노드 크기 등에 관계없이 비교적 좋은 대응을 나타냈으며, 0.85~0.99의 범위를 보였다.

Table 2. Comparison on cumulative energy area

Specimen	4 % Deformation		2 % Deformation	
	Cumulative area (kN.mm)	Ratio	Cumulative area (kN.mm)	Ratio
MC-P12-N (Reference)	55,017.5	1.00	6,230.8	1.00
MC-P6-N	63,270.7	1.15	5,275.3	0.85
MC-P12-C50	66,022.1	1.20	5,803.7	0.93
MC-P12-C100	57,236.0	1.04	6,194.3	0.99
MC-PH12-N	65,491.2	1.19	5,410.5	0.87
MC-PV12-F	29,513.3	0.54	6,075.7	0.98
MC-P12-F	28,119.0	0.51	5,630.2	0.90

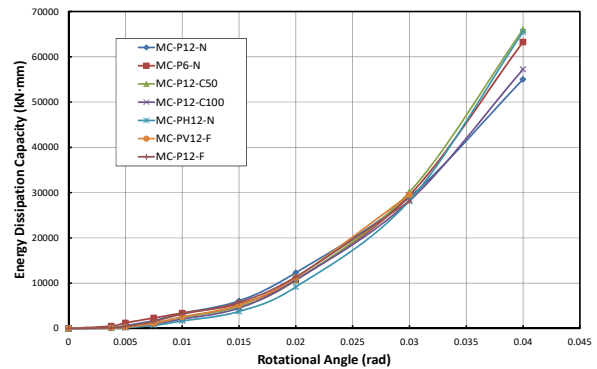


Fig. 18. Comparison on energy dissipation capacity curve

## 4. 결론

- 1) 유닛 간 접합부에서 접합철물의 크기와 두께, 캐스트 노드형 접합철물과 기둥 단면의 형상에 따른 초기강성 및 내력에는 다소 차이를 나타내고 있으나, 모든 접합부의 강도는 보의 소성휨모멘트 값을 상회하는 것으로 나타났다.
- 2) 기둥이 각형강관 형태이며, 접합 철물의 두께와 관계없이 기본 형상과 노드의 크기가 50 %인 주물형태의 접합철물을 이용한 접합부에서 강성 및 강도가 비교적 높게 나타남을 알 수 있다. 반면에, 노드 100 %형과 기둥을 개방 단면 형태로 절곡한 접합부에서의 강성과 내력은 다소 저하하는 것으로 나타났다.
- 3) 접합 철물을 이용한 모든 유닛 간 접합부에서 실험 종료 후 해체해본 결과, 접합하는 철물에는 어



떠한 손상의 흔적도 발견할 수 없었다. 그러나 캐스트 노드 형태를 갖는 접합부의 절단 기둥면에서 국부좌굴 변형을 확인할 수 있었으며, 이를 방지하기 위해서는 절단된 면을 강판으로 보강해야 할 것으로 생각된다. 또한, 절곡형 기둥 단면을 갖는 접합부에서 보강 스티프너가 일치하지 않는 부분에서 심한 국부변형 현상이 나타나 제작시 주의가 필요할 것으로 판단된다.

- 4) 4 % 드리프트 변형에서 절곡형 기둥을 갖는 접합부만이 국부변형으로 강성 확보는 되지 못했으나 2 % 드리프트 변형에서 두번째 사이클이 유지 동안 0.8 Mp 이상의 내력이 확보되어 중간모멘트 골조 이상에 해당 됨을 확인하였다. 이러한 기둥 단면은 중층 규모 구조물에 아주 적절한 것으로 생각되며, 절곡형 기둥 단면 형상을 갖는 접합부를 제외하고는 모두 특수모멘트 골조 이상의 성능을 확보하고 있음을 알 수 있었다.
- 5) MC-P12-N 기본 실험체를 대상으로 4 % 변형시 (특수모멘트 골조해당) 누가에너지 소산량 비교 결과, 절곡형 기둥 단면을 제외하고, 4 %~20 % 이상 상회하는 결과를 보임에 따라 절곡형 기둥을 제외한 모든 접합부를 특수모멘트 골조로 설계에 반영하여도 큰 무리는 없는 것으로 판단된다.
- 6) MC-P12-N 기본 실험체를 대상으로 2 % 변형시(중간모멘트 골조해당) 누가에너지 소산량 비교결과, 기둥 단면형상 및 연결철물, 노드 크기 등에 관계없이 비교적 좋은 대응을 나타내었고, 0.85~0.99의 범위를 보였다.
- 7) 절곡형 기둥의 경우, 3 % 변형까지 가려한 것으로 연성과 변형능력 및 접합부 거동의 안전성 측면에서 다소 불안전 거동을 보였으나, 절곡 기둥 내부에 보강한 스티프너의 제작·용접에 주의한다면 충분히 특수모멘트 골조 이상의 성능 확보도 가능할 것으로 생각된다.

## 감사의 글

본 논문의 연구는 과학기술정보통신부의 지원을 받아 한국건설기술연구원의 연구사업(과제번호 20240061-001)으로 수행되었습니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Annan, C.D., Youssef, M.A., and El Naggar, M.H. (2009) Experimental Evaluation of the Seismic Performance of Modular Steel-Braced Frames, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.31, No.7, pp.1435-1446.
- [2] Cho, B.H. (2024) Review of Technical Presentation of Steel Structures in 2023, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.1, pp.62-64 (in Korean).
- [3] Lee, S.S., Park, K.S., Hong, S.Y., and Bae, K.Y., (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).
- [4] Oh, K., Kim, S.-H., Shin, K.-J., Yoon, B.-I., and Lee, K. (2020) Structural Performance Evaluation of Modular Connection Using Specially Fabricated Blocks, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.32, No.4, pp.257-267 (in Korean).
- [5] Lee, S.-J., Kwak, E.-S., Park, J.-S., Kang, C.-H., and Shon, S.-D. (2017) Structural Performance of the Modular System with Fully Restrained Moment Connections Using Ceiling Bracket, *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Architectural Institute of Korea, Vol.33, No.12, pp.37-44 (in Korean).
- [6] Lee, J.S., Cho, B.H., Choi, J.Y., and Jung, D.I. (2023) Evaluation of Lateral Resistance Performance of Modular Unit Jointing System Using Self-Locking Connector, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.177-178 (in Korean).
- [7] Park, K.S., Min, G.Y., and Kwak, M.G. (2019) Analytical Evaluation of Joints Between Steel-PC Type Composite Modules, *Proceedings of Annual Conference of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, pp.171-172 (in Korean).
- [8] Heo, Y., Lim, H., Jeong, I.-S., Kim, K., and Lee, K., (2023) Structural Performance Evaluation of Rooftop Modular Structure Connected with Unit Blocks, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.35, No.2, pp.81-90 (in Korean).
- [9] Kim, B.-S., Lee, S.S., Oh, K., and Shin, D.-H. (2024) Seismic Fragility of Classified Inter-Module Connection Applicable to Steel Modular Structures, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.36, No.5, pp.289-300 (in Korean).

[10] AISC (2022) *Seismic Provisions for Structural Steel Construction*, USA.  
*Buildings*, AISC 341-22, American Institute of Steel

---

**요약**: 본 연구는 철골조 유닛 모듈러를 이용하여 중고층으로 적용할 수 있는 접합구조시스템을 개발하고자 하는 것이다. 기존 모듈러 유닛 간의 접합방법은 고층화하는데 기술적인 제약을 갖고 있어 횡력저항 내력을 증대시킬 수 있는 유닛 간 접합부의 상세가 필요하다. 제안된 유닛 간의 접합부의 횡력 저항에 대해 휨성능을 실험적으로 평가하고자한다. 주요변수에 따라 총 7개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였다. 유닛 간 접합부에 대한 실험결과, 절곡형 기둥을 제외한 모든 접합부는 특수모멘트 골조에 해당하는 성능을 확보하고 있는 것으로 파악되었다.

**핵심용어**: 유닛 모듈러, 유닛 간 접합, 접합철물, 구조성능

---