

연결 강판 형상에 따른 모듈러 유닛 간 접합부의 거동 비교

이상섭^{1*} · 배규웅² · 박금성³

¹공학박사, 수석연구원, 한국건설기술연구원, ²공학박사, 선임연구원, 한국건설기술연구원, ³공학박사, 연구위원, 한국건설기술연구원

Comparison of Behavior of Connections between Modular Units according to Shape of Connector Plates

Lee, Sang Sup^{1*}, Bae, Kyu Woong², Park, Keum Sung³

¹Ph.D. Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

²Ph.D. Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

³Ph.D. Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang, 10223, Korea

Abstract - For the connections between modular units in modular buildings, the bolted joints with connector plates are used commonly. The strength of structure is determined by the weakest part of structure and the connections may be weaker than the members being joined. Therefore, to check the safety of modular building, the structural performance of connections between modular units as well as that of beam-to-column connections should be evaluated. In this study, the behavior of module to module connection with straight and cross shaped connector plates is investigated by lateral cyclic tests according to KBC2009 0722.2.4 which shall be conducted by controlling the story drift angle in the width and the longitudinal direction respectively. All of test results generally show the stable ductile behavior up to 0.04rad drift levels and the tests in longitudinal direction show a superior energy dissipation per cycle in each of the load steps. However, the straight shaped connector plates have the degradation of stiffness with cyclic loading and the larger drift angle of column than the cross shaped connector plates.

Keywords - Connection between modular units, Connector plate, Bolted connection, Straight-shaped plate, Cross-shaped plate

1. 서론

모듈러 건축물의 경우 모듈을 구성하는 주요 소재, 모듈의 형태, 하중을 전달하는 구조 방식 등에 따라 다양한 접합부가 발생한다. Lawson *et al.*^[1]의 저서를 살펴보면 모듈을 구성하는 소재로 강재가 주로 사용되고 있으며, 모듈의 형태는 기둥과 보가 있는 박스형 골조가 보편적임을 알 수 있다. Mills *et al.*^[2]은 건물 전체 구조 시스템으로 저층의 경우 모듈만 적층하는 공법이 이용되고, 중층의 경우 가새 등의 안

정화 시스템이 덧붙여지며, 고층의 경우 콘크리트 코어나 가새 보강 골조 등의 횡력저항시스템이 별도로 있어야 한다고 서술하였다. 따라서 골조식 강재 모듈의 경우 중력은 물론 횡력에도 저항해야 하며, 별도의 횡력저항시스템이 없는 경우 모듈의 적층 수가 제한될 것이다.

철골 건축물의 접합부 거동은 부재력의 분포와 변형 형상에 영향을 미칠 수 있기 때문에 해석과 설계에서 중요하게 고려되고 있다. 일반적으로 접합부의 거동은 강도, 강성 및 변형 능력에 대해 정의될 수 있으며, 접합부가 구조시스템의 내력을 결정하는 가장 약한 요소가 될 수 있기 때문에 중요 구성요소로 취급되고 있다^[3]. 모듈러 건축물은 유닛이 상호 연결되거나 별도의 횡력저항시스템에 연결되어 전체 구조 시스템을 이루게 된다. 따라서 유닛을 구성하는 보-기둥 접합부는 바닥에 상재되는 중력을 전달할 수 있어야 하며, 특히 유닛으로만 횡력에 저항하는 저층 건축물의 경우 부재의 내력이 발휘될 수 있도록 충분한 횡강성이 확보되어야 한다.

Note.-Discussion open until June 30, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 8, 2016; revised October 26, 2016; approved on November 6, 2016.

Copyright © 2016 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0768 Fax. +82-31-910-0392

E-mail. lss0371@kict.re.kr

한편 전체 골조를 구성하는 유닛 간 접합부는 건물 전체의 안정성을 보장하기 위해 횡력을 주변 모듈에 전달할 수 있는 충분한 내력과 강성이 확보되어야 한다.

국내의 경우 골조식 모듈러 유닛의 보 부재는 ㄷ형강이 주로 사용되고, 기둥은 각형강관 또는 ㄷ형강이 사용되는 것으로 조사되었다^[4]. 모듈 간 접합은 접합철물을 이용한 볼트 접합이 일반적이나 모듈 내·외장재의 마감 범위에 따라 접합 철물 등의 상세가 달라질 수 있다.

이에 이 연구에서는 모듈과 모듈을 연결하는 방식을 조사하여 구조적 특징과 제한사항 등을 우선 살펴보았다. 그리고 각형강관 기둥과 ㄷ형강 보로 구성된 모듈의 유닛 간 접합에 일자형 접합철물이 사용되었을 때 모듈의 단변방향(폭 방향)과 장변방향(길이 방향)에 대한 거동을 실험적으로 조사하였다. 또한 장변방향으로 부족할 수 있는 강성을 개선하기 위해 십자형 접합철물이 사용된 경우를 비교 대상으로 함께 실험을 실시하여 거동 차이를 비교하였다.

2. 모듈러 유닛 간 접합 방식

유닛 간 접합 방식은 모듈의 구성 상세와 건물 전체 구조 시스템에 따라 너무 다양하여 골조식의 유닛 간 접합으로 조사를 한정하였다. 골조식 모듈의 유닛 간 접합은 내·외장재의 마감 범위와 시공 오차 흡수 범위에 따라 접합 상세의 특징이 결정된다^[5]. 유닛 간 접합 상세는 모듈러 시스템의 중요 기술로서 공개된 자료가 부족하여 해당 모듈의 외형 특징을 통해 그 접합 방법을 살펴보았다.

2.1 연결 강판을 이용한 볼트 접합

상·하 및 좌·우의 유닛을 연결하기 위해 가장 많이 사용되는 방법으로 접합 강판을 모듈 사이에 삽입하고 볼트로 연결하는 방식이다.

유닛의 평면 배치에 따라 상·하 및 좌·우의 모듈 4개 또는 8개의 모듈이 한 절점에 모이는 경우가 발생한다. Fig.1은 토요타 홈(Toyota Home)의 사례로 8개 모듈을 접합하기 위해 정(井)자형 연결 강판이 사용된 경우이다. 상부 모듈과의 정합을 위해 가이드 핀이 돌출되어 있는 것을 볼 수 있다. 상부에 안착되는 4개의 모듈 가운데 적어도 1개에는 볼트 접합 작업을 위한 점점구와 같은 개구부가 있어야 할 것으로 추정된다. 따라서 개구부는 현장에서 마감될 수밖에 없어 모듈

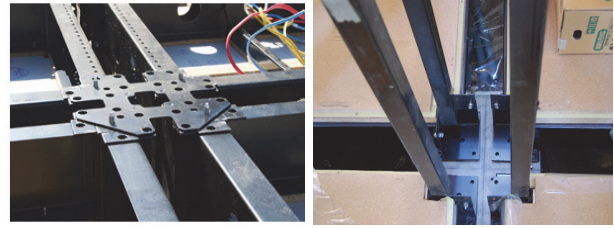


Fig. 1. Connection system of of Toyota Home system



Fig. 2. Connection system of Sekisui Heim

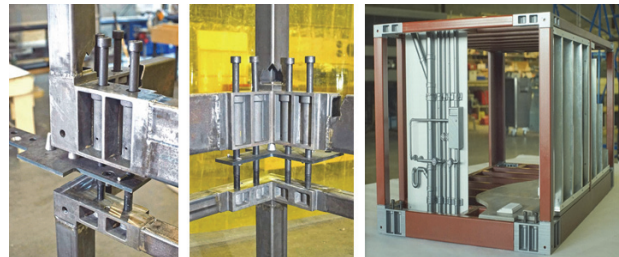


Fig. 3. Connection system of Vector Praxis

러 공법의 현장 마감 작업에 영향을 미치게 된다.

Fig. 2는 세끼스이 하임(Sekisui Heim)의 모듈 간 접합부로 상하의 모듈은 경계 지점에서 작은 강재 블록을 이용한 볼트 마찰 접합을 실시하고, 좌우의 모듈은 강판을 덧대어 볼트로 접합하는 방식이다. 마찬가지로 유닛 간 접합을 위해 하부 모듈의 천장 일부나 상부 모듈의 코너 바닥은 접합 후 현장에서 마감되어야 한다.

모듈러 건물은 고층화에 따라 접합의 정밀성이 더욱 높아져야 하며, 고소 접합 작업에 안전성이 확보되어야 한다^[6]. Fig. 3은 미국 벡터 프랙시스(Vector Praxis)에서 개발한 고층 모듈러 건축용 접합시스템인 벡터블록(VectorBloc)이다. 모듈의 바닥 보와 천장 보의 단부에 주물로 생산된 블록을 용접하고, 상·하 모듈 사이에 연결 강판을 삽입하여 상부 모듈의 바닥에서 볼트를 조여 접합하는 방식이다. 천장 보에 용접된 블록은 너트의 기능을 포함하고 있어, 체결 작업은 실내에서 위에서 아래로 이루어져 안전성과 시공성이 확보된다. 또한 모듈러 유닛과 접합 시스템이 정밀하게 제작되어

100m당 2mm 정도의 오차를 갖는 정밀성이 확보되었다.

연결 강판을 이용한 모듈 내부에서 유닛을 연결하는 방식은 접합부 접근 방법이 모듈의 공장 마감 범위를 결정하고, 접합 작업의 효율에도 큰 영향을 미친다. 특히 콘크리트 슬래브를 갖는 모듈에 있어 접합을 위해 비워 두는 공간이 있는 경우 모듈러 공법의 공장 제작물은 떨어지게 된다. 따라서 천장에 접합용 개구부를 두거나 모듈의 천장을 없애는 방안을 고려해 볼 필요가 있다. 또한 덕트나 샤프트 공간을 이용해 모듈 간 접합이 가능하도록 평면을 설계하는 경우 콘크리트 바닥에 따른 제약은 최소화될 수 있을 것이다.

2.2 맞물림(interlocking) 방식

모듈러 유닛을 적층할 때 상부 모듈의 기둥 하부에 돌출된 핀(pin)을 두어 상·하의 모듈이 정확한 위치에서 맞도록 유도하는 역할과 상호 맞물려 횡력에 저항할 수 있는 기능을 겸

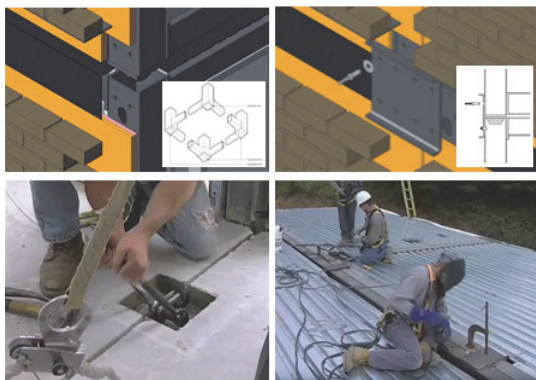


Fig. 4. Connection system of Kullman Building Corporation

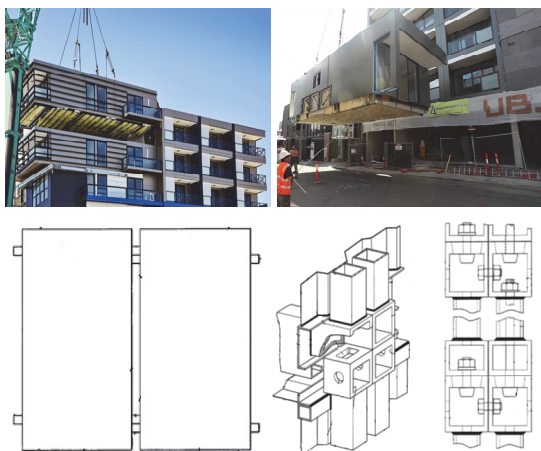


Fig. 5. Connection system of Unitised Building

하도록 하는 방식이다.

Fig. 4는 과거 쿨맨 건축 회사(Kullman Building Corporation)가 이용한 맞물림 시스템으로 모듈 기둥 하부에 용접된 각각의 핀은 위치와 방향 조절 및 시공오차를 흡수하는 역할을 담당하였다. 상·하 모듈은 맞물림 장치를 이용해 맞춰졌고, 강판을 덧대고 블라인드(blind) 볼트로 체결하여 상·하 및 좌·우 모듈을 접합하였다. 또한 콘크리트 바닥의 하부 보 구간에서 양측 모듈의 볼트 접합과 천장 보 구간에서 강판을 이용해 좌·우 모듈의 용접이 이루어진다.

맞물림 방식의 또 하나의 예로 Fig. 5에 나타난 유니타이즈 건축(Unitised Building)의 접합 시스템이 있다. 이 시스템은 모듈 측면에 노출된 기둥과 기둥의 상·하부에 용접된 강재 블록을 이용하여 모듈이 수평적으로 맞물리도록 하여 볼트와 로드(rod)를 이용하여 상·하 및 좌·우 모듈을 접합한다. 기둥 상·하부에 용접된 강재 블록을 두꺼운 플레이트로 대체하는 변형된 방식도 있으며, 기둥이 측면에 노출되기 때문에 접합을 위해 좌·우 모듈 사이에는 일정 공간이 필요하다.

맞물림 장치 등을 이용해 모듈 외부에서 모듈을 접합하는 방식은 모듈의 내·외부 마감 완성도를 최대화할 수 있다는 장점이 있지만 Fig. 4와 같이 모듈의 전·후면에서 유닛 간 접합을 할 경우 공중 작업 공간이 필요하게 되고, Fig. 5와 같이 모듈 측면에서 유닛 간 접합을 할 경우 4번째 적층되는 모듈은 한 절점에서 접합이 될 수 없다는 단점이 있다.

2.3 강판 용접 접합

강판 용접은 Fig. 4와 같이 모듈이 서로 맞붙는 경우 바닥 보와 천장 보 구간에서 강판을 걸쳐 대고 용접하는 방식으로 주로 수평적인 모듈 간 접합에 사용되고 있다.

Fig. 6은 캡시스 회사(Capsys Corporation)가 채택한 강판 용접 접합으로 확장된 모듈의 코너 부분은 모듈이 만나 사각 공간이 형성되도록 콘크리트 슬래브를 타설하지 않는다. 이 공간에서 모이는 모듈의 보 상부 플랜지에 강판을 덧대어 용접하여 수평 접합을 하고, 바닥 보 하부 플랜지에서 볼트 접합으로 수직 접합을 실시한다.

유닛 간 접합을 위해 용접이 사용되는 경우 내·외장 마감의 손상이나 오염 가능성이 있어 현장 마감이 늘어나고, 용접 자세를 감안할 때 수평적 용접에 한정될 가능성이 높기 때문에 그 사례가 많지 않다.



Fig. 6. Connection system of Capsys Corporation

3. 모듈러 유닛 간 접합부 실험

3.1 실험체 계획

Fig.7(a)와 같이 기둥 부재로 125×125×9mm(PSR400)의 각형강관이 사용되고, 보 부재로 강판을 200×75×6mm(SS400)으로 절곡한 C형강이 사용된 3×6×3m의 모듈이 상하 및 좌우로 연결하기 위해 Fig. 7(b)에 나타난 일자형 및 십자형 연결 강판이 적용된 모듈러 유닛 간 접합부를 실험 대상으로 선정하였다. 정방형 각형강관이 기둥으로 사용되어 모듈러 유닛 간 접합부는 폭과 길이 방향에 대해 유사한 모멘트-회전각 관계를 갖지만 연결 강판의 배치 방향에 따라 모멘트-회전각 관계가 달라질 수 있다.

125×125×9mm인 정방형 각형강관의 판폭두께비는 12.8

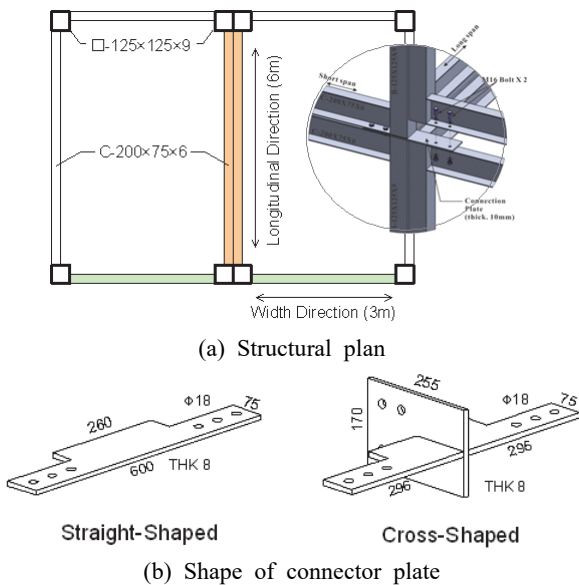
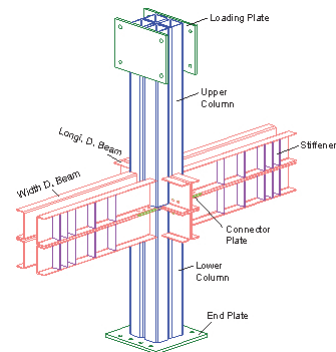


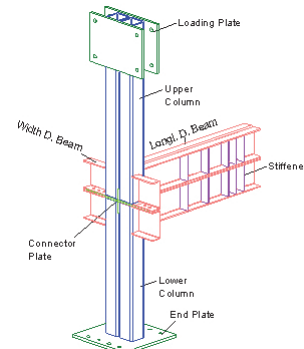
Fig. 7. Connection details of modular building system

로 KBC2009 0713.8.2.^[7]에 규정된 내진콤팩트 단면의 압축 요소에 대한 판폭두께비 제한값인 $18.9(=0.64\sqrt{E/F_y})$ 보다 작아 국부좌굴에 대한 저항 성능은 확보된 것으로 확인되었다. 200×75×6mm인 C형강 보는 KS D 3530 「일반 구조용 경량 형강」을 따라 강판을 절곡하여 제작하였다. 웹의 판폭두께비는 31.33로 내진콤팩트 단면의 한계세장비인 $72.34(2.45\sqrt{E/F_y})$ 보다 작았지만 플랜지 판폭두께비는 12.5로 내진콤팩트 단면의 한계세장비인 $8.86(0.30\sqrt{E/F_y})$ 과 콤팩트 단면의 한계세장비인 $11.22(0.38\sqrt{E/F_y})$ 보다 커 비콤팩트 단면으로 분류되었다. 이에 C형강 보의 국부좌굴 발생을 억제하기 위해 일정 간격으로 스티프너를 보강하는 것으로 결정하다. 그러나 실제 모듈에서는 C형강 보 상부 플랜지와 웹 일부가 콘크리트 슬래브에 매립되기 때문에 국부좌굴에 대한 저항 성능은 충분할 것이다.

일자형 연결 강판은 상부층 모듈과 하부층 모듈 사이의 10mm 갭 공간에 삽입되어 폭 방향 보의 플랜지를 관통시킨 F10T M16 볼트로 모듈과 모듈을 접합하는 방식에 사용된다. 이 접합 방법은 상부층 모듈의 바닥 보와 하부층 모듈의



(a) K-LS or K-LC



(b) K-SS or K-SC

Fig. 8. Configuration of test specimens

Table 1. Descriptions of test specimens

Specimen	Parameters	
	Connector's Shape	Loading Direction
K-LS	Straight	Long edge of plate
K-LC	Cross	Width (Long edge of plate)
K-SS	Straight	Longitudinal (Short edge of plate)
K-SC	Cross	Longitudinal (Short edge of plate)

천장 보가 만나는 층간대를 제외한 부분의 마감을 공장에서 처리할 수 있고, 보 플랜지가 외부로 노출되어 볼트 접합을 위한 작업 공간 확보가 용이하다는 장점이 있다.

반면 십자형 연결 강판은 일자형 연결 강판과 같이 폭 방향 보의 플랜지를 관통시킨 좌·우 각 3개의 볼트 접합과 길이 방향 보의 웹을 관통시킨 상·하 각 2개의 볼트 접합을 혼합한 방식에 사용된다. 십자형 연결 강판은 외부로 노출된 보 플랜지 접합은 비교적 쉽지만, 웹의 볼트 접합은 하부층 모듈 천장 또는 상부층 모듈 바닥에 개구부가 있거나 모듈 코너부에 샤프트가 있어야 가능하다.

보가 비대칭 단면이고 기둥에 편심을 두고 접합된 점을 고려하여 실험체는 대칭으로 제작되어 편심 가력에 따른 불안정성을 최소화하였으며, Table 1에 정리한 것과 같이 폭 방향으로 십자 형태의 실험체를 제작하고, 길이 방향으로 외팔보 형태의 실험체로 Fig. 8과 같이 총 4개를 제작하였다.

3.2 재료 시험

각형강관 기둥, C형강 보 및 연결 강판의 재료 특성을 알아보기로 각 2개의 인장 시험편(14B호)을 제작하였다. 시험에 앞서 시험편의 단면적(A)을 측정하여 시험 장치에 입력하였고, 연신율(elongation) 측정용 기준점도 표시하여 KS B 0802를 따라 강재의 인장강도시험을 실시하였다.

Table 2. Material test results

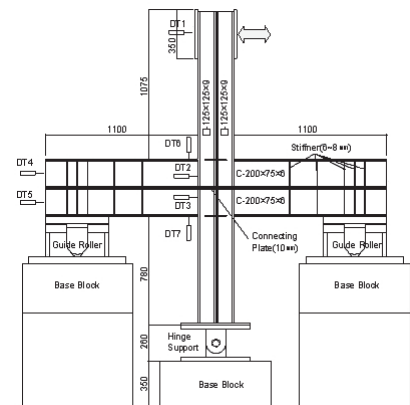
Coupon ID		A (mm ²)	F _y (N/mm ²)	F _u (N/mm ²)	Elongation (%)
□-125×125×9 (SPSR 400)	①	224.28	416	506	17
	②	223.33	425	509	18
C-200×75×6 (SS400)	①	142.50	264	407	31
	②	146.08	262	404	29
PL 8 (SS400)	①	201.66	270	405	32
	②	211.82	269	408	31

시험 장치를 통해 항복강도(F_y)와 인장강도(F_u)는 자동으로 계산되었지만 항복강도가 불분명하였던 각형강관과 같이 계산되지 못한 경우 2% 변형도를 기준으로 항복강도를 계산하여 Table 2에 정리하였다.

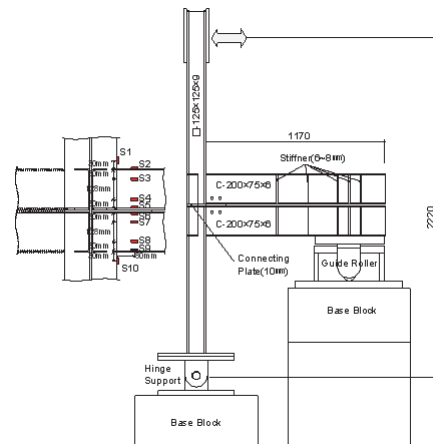
기둥에 사용된 각형강관의 항복강도가 냉간가공에 따른 잔류응력 등의 영향으로 항복강도가 인장강도에 가까운 값을 보이고 있는 반면 강판을 절곡하거나 그대로 사용한 경우 항복강도와 인장강도의 차이는 뚜렷함을 알 수 있다. 사용된 모든 강재의 항복강도와 인장강도는 건축구조기준에 제시된 값보다 큰 것으로 나타나 사용된 강재는 규격품임을 확인하였다.

3.3 가력 및 측정 방법

모듈러 골조가 횡력을 받는 상황을 상정하여 기둥 상부를 횡방향으로 변위 점증 방식의 반복가력하는 실험 방법을 채택하였다. 가력 스케줄은 KBC2009 0722.2.4. [7]을 따랐으



(a) K-LS or K-LC



(b) K-SS or K-SC

Fig. 9. Test set-up

며 변위각 0.04rad(회변위 88.8mm)까지 스케줄에 따라 반복가력한 후 약 110mm(0.05rad)까지 당겨 접합부의 변형을 관찰한 후 실험을 종료하였다. 가력 장치는 1000kN 용량의 액추에이터(actuator)를 이용하였고, 0.05mm/sec의 속도로 변위제어를 통해 가력이 이루어졌다.

Fig. 9와 같이 기둥의 하단 지점은 힌지와 볼트로 연결하였고, 보의 양단(또는 일단)은 이동단으로 지지된 조건을 유지하였으며, 상부층 모듈의 바닥 보와 하부층 모듈의 천방 보가 이동단에 동시에 지지되도록 강재로 제작된 캡이 사용되었다. 변위계(displacement transducer)를 이용하여 주요 위치에서 변위를 측정하였으며, 게이지를 이용하여 접합부 주변의 변형도를 측정하였다.

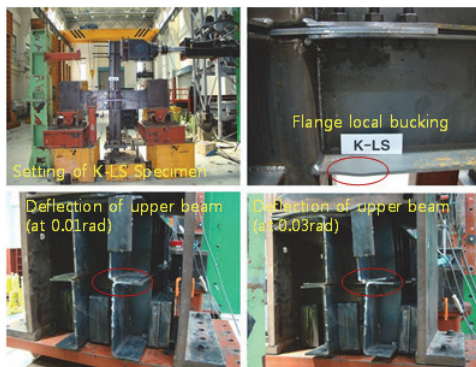
4. 실험결과 비교 및 분석

4.1 실험결과

K-LS와 K-LC의 경우 비록 대칭으로 제작되었지만 좌·우 보 사이 공간이 있어 변위각이 증가할수록 보 단부에서 비틀림도 커졌으나 K-SS와 K-SC의 경우 공간이 작아 비틀림 발생은 억제되었다. 모든 실험체의 최대하중은 보 플랜지에

Table 3. Observed strengths and failure mode of specimens

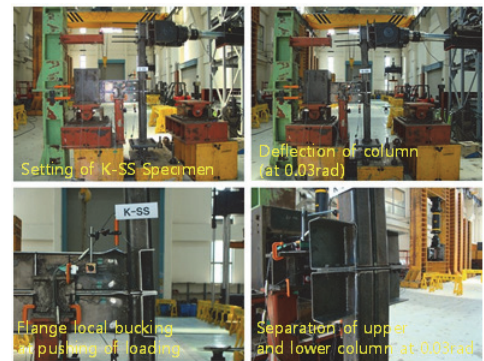
Specimen	Connector plate	$P_{\max}^+$ (kN)	$P_{\max}^-$ (kN)	Failure mode
K-LS	Straight	170.3	84.9	· Buckling of flange in beam
K-LC	Cross	158.4	106.2	
K-SS	Straight	79.9	84.1	· Lateral-torsional buckling of beam
K-SC	Cross	81.6	84.2	



(a) K-LS



(b) K-LC



(c) K-SS



(d) K-SC

Fig. 10. Experimental photos of specimens

소성현상이 발생하여 결정되는 것으로 관찰되었다. Table 3에 실험결과를 정리하였고 Fig. 10에 주요 상황을 나타내었다. Fig. 10 (a)와 같이 K-LS의 경우 이동단 구간의 상·하 보 사이에 길판을 설치하지 않아 과도한 비틀림이 발생하여 안전상 0.03rad까지 가력 스케줄을 따랐다. 나머지 실험체는 길판이 설치된 후 가력 스케줄에 맞춰 실험이 진행되었다.

4.2 접합부 휨모멘트 내력 비교

접합부는 기둥과 보가 용접된 부분으로 이 위치에서 작용

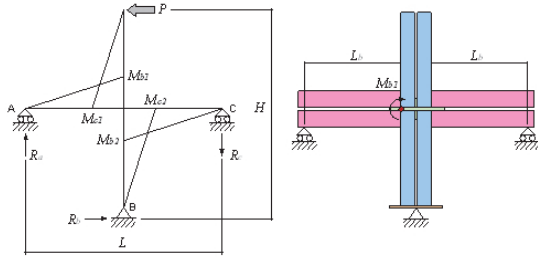


Fig. 11. Reaction forces and bending moment diagram

하는 휨모멘트를 우선 평가해야 한다. Fig. 11에 나타낸 것과 같이 십자형 실험체를 대상으로 부재를 선 요소로 가정하여 힘의 평형조건을 이용하여 식 (1)의 반력(R_a)을 우선 계산하고, 보의 이동단 지점과 접합부 사이의 거리(L_b)를 반영하여 식 (2)를 통해 접합부에 작용하는 휨모멘트(M_{b1})를 계산한다. 외팔보형 실험체의 경우도 동일한 방법으로 계산할 수 있다.

$$R_a = P \cdot H / L \quad (1)$$

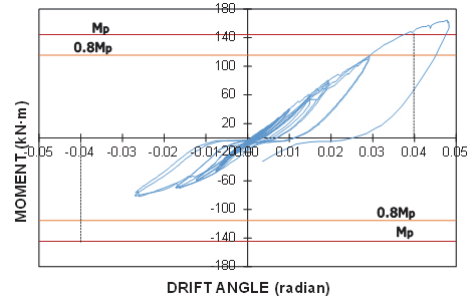
$$M_{b1} = R_a \cdot L_b = P \cdot H / L \cdot L_b \quad (2)$$

이와 같이 계산된 값은 상·하 보에 동시에 작용하는 휨모멘트로 상·하 보의 합성 효과에 따라 보 단면의 소성휨모멘트(M_p)의 단순 누가한 값보다 상회할 가능성도 있다. 그러나 이 연구에서 이용된 실험체는 상·하 보 사이에 연결 강판 이외에 어떠한 접합하지 않았기 때문에 보 소성휨모멘트의 4배와 비교하는 것이 타당할 것이다. 200×75×6mm인 ㄷ형 강 보의 재료시험을 통해 얻은 평균 항복강도 263N/mm²를 적용한 소성휨모멘트는 36.1kN·m로 계산되었다.

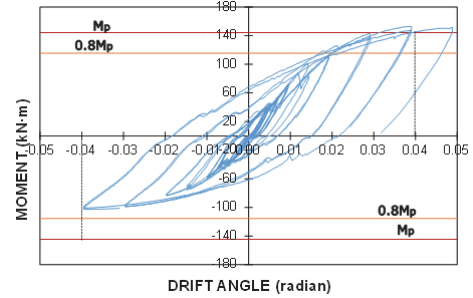
앞서 서술한 방법을 따라 치환한 휨모멘트와 층간변위각 관계에 보 소성휨모멘트의 4배를 표시하여 특수모멘트골조에서 요구되는 성능 기준을 따라 접합부의 성능을 비교할 수 있도록 Fig. 12에 나타내었다.

K-LS는 0.03rad까지만 반복 가력됨을 감안하여 K-LC의 거동과 비교해야 할 것이다. 이 두 실험체는 대칭 제작으로 생긴 좌우 보 사이 공간이 비틀림이 발생하지 않도록 보 강되지 않아 비틀림의 영향이 커져 밀어서 가력한 구간(3사분면)의 변위각 0.04rad에서 소성휨모멘트의 80%를 유지하지 못하는 것으로 추정된다.

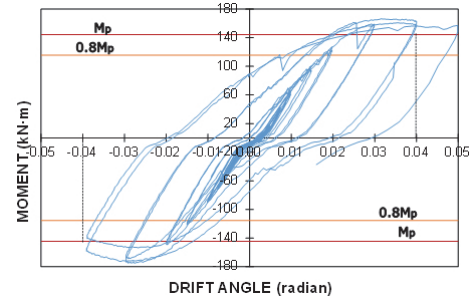
반면, 상대적으로 보 사이 공간이 작아 비틀림이 억제되었던 K-SS 및 K-SC의 경우 밀어서 가력한 구간 및 당겨서 가력한 구간(1사분면)의 변위가 0.04rad에서 소성휨모멘트



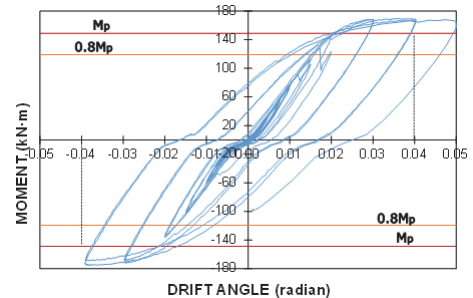
(a) K-L



(b) K-LC



(c) K-SS



(d) K-SC

Fig. 12. Moment-drift angle relationship of specimens

의 80%를 유지하고 있다.

K-LS와 K-LC는 연결 강판 형상뿐 아니라 상·하 보 사이에 설치된 낱판의 유무 차이가 있다. K-LC에 설치된 십자형 연결 강판은 수평판의 장변 방향으로 밀고 당기는 반복 가력을 받게 되어 휨 작용의 중심선에 놓인 수직판은 휨 저항에

기여하는 바가 작다. 따라서 0.03rad까지의 거동을 비교하였을 때 꺾판의 유무에 따른 차이라고 볼 수 있으며, 꺾판의 설치로 이력곡선의 면적인 에너지흡수능력을 높일 수 있음을 확인할 수 있다.

K-SS와 K-SC를 통해 연결 강판 형상에 따른 거동 차이를 살펴볼 때, 일자형 연결 강판이 사용된 K-SS의 경우 0.04rad의 첫 번째와 두 번째 가력 사이클에서 최대 내력의 큰 차이를 보이며, 0.03rad 부근에서 결정된 최대 내력 이후 강성의 저하 현상도 보이고 있다. 반면, 십자형 연결 강판이 사용된 K-SC의 경우 0.04rad에서 강성이 유지되거나 완만하게 상승하는 상태로 최대 내력도 사이클이 종료되는 시점에서 결정되는 특징을 보이고 있다. 연결 강판의 수평판의 단면 방향을 따라 가력되는 경우 수직판의 단면은 힘에 적극 저항할 수 있게 되어 이와 같은 거동 차이를 가져오는 것으로 판단된다.

4.3 변형도 분포 비교

천장 보와 바닥 보에 설치하였던 8개의 스트레인 게이지를 통해 측정되었던 변형도를 가력 스케줄의 주요 변위각(0.005, 0.01, 0.02, 0.03, 0.04rad)의 첫 번째 사이클에서 기록된 값을 Fig. 13에 실험체 별로 나타내었다.

4개 실험체는 모두 천장 보와 바닥 보는 앞서 서술한 것과 같이 합성 거동이 아닌 개별적인 거동에 가까운 변형도 분포를 보이며, 보 플랜지에 국부좌굴 또는 소성힌지의 형성에 따라 변형도의 분포가 역전되는 현상을 보이고 있다. 항복변형도를 재료시험을 통해 얻은 보의 평균 항복강도(263MPa)를 기준으로 계산하면 약 1300(=263/205000)으로 대부분의 실험체는 변위각 0.02rad 부근에서 천장 보와 바닥 보가 각각 항복이 시작되는 것으로 확인된다.

따라서 구조해석에 천장 보와 바닥 보는 독립된 부재로 모델링될 필요가 있으며, 만약 단일 부재로 모델링될 경우 단면 성능은 각 단면성능을 더한 값을 반영해야 할 것이다.

4.4 기둥의 변형각 비교

연결 강판의 형태에 따른 기둥의 횡변위 차이를 알아보기 위해 K-SS와 K-SC를 대상으로 실험체에 설치하였던 변위계의 측정값과 변위계 사이의 거리를 이용하여 상층 및 하층 기둥의 변위각(θ_{upper} , θ_{lower})을 Fig. 14와 같이 밀어서 가력하는 경우(-)와 당겨서 가력하는 경우(+)로 나눠 계산하였고, 그 결과를 Fig. 15에 나타내었다.

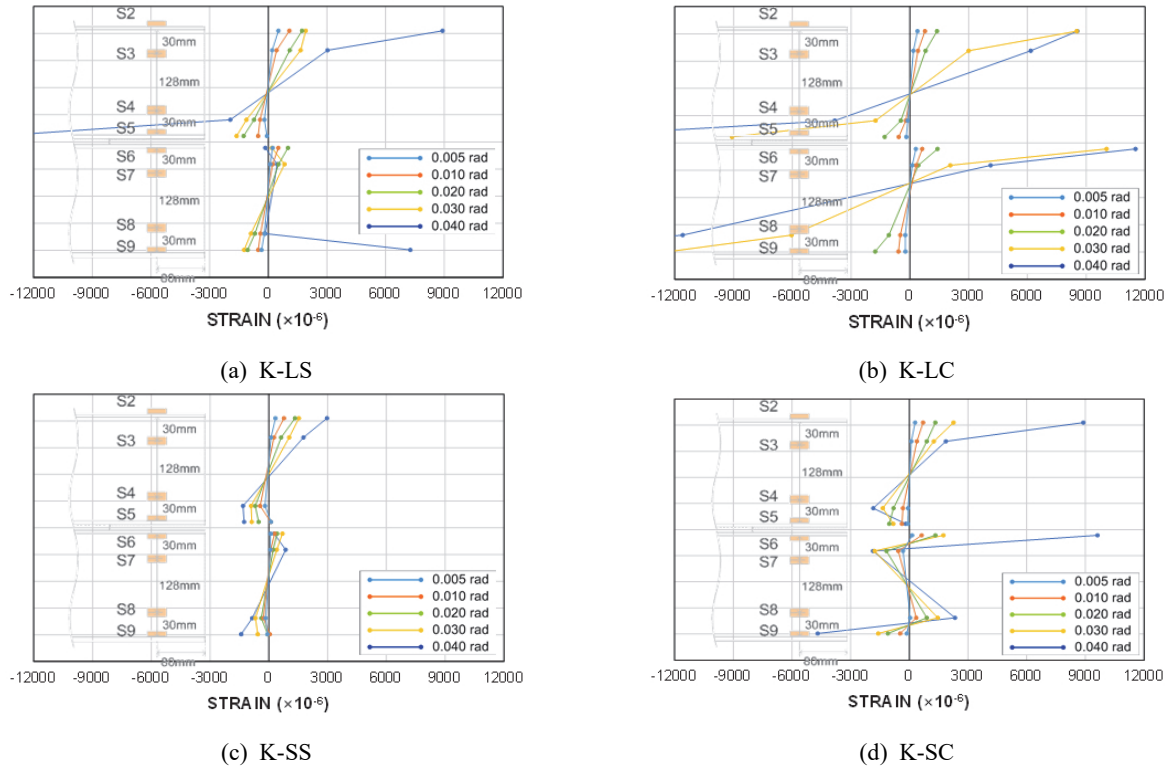


Fig. 13. Strain distribution of upper and lower beams

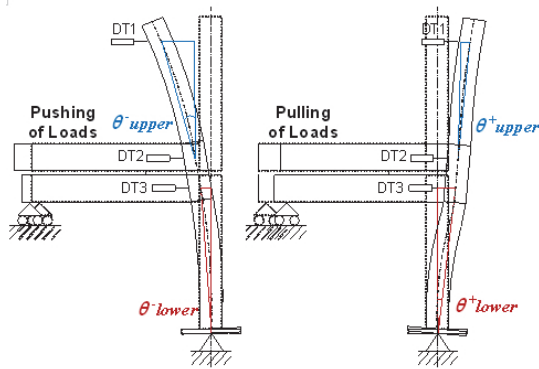


Fig. 14. Calculation of drift angles from columns displacement

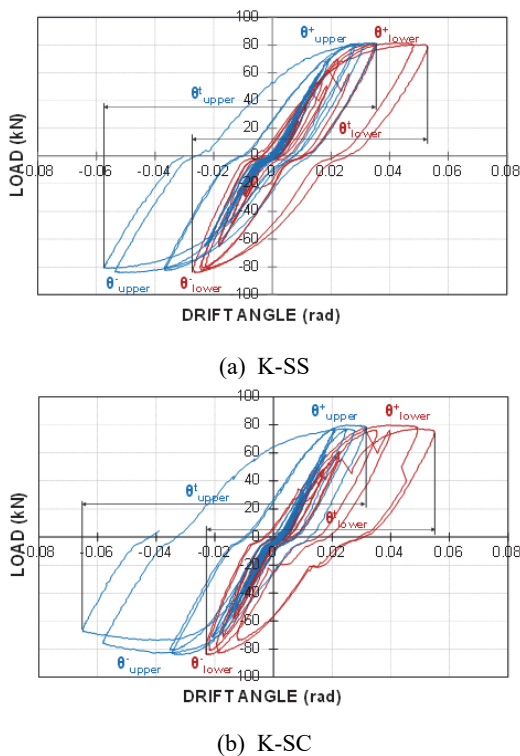


Fig. 15. Drift angle of upper and lower columns

밀어서 가력하는 경우 이동단에 상향 반력이 발생하여 상층 기둥의 변형이 상대적으로 커지며, 당겨서 가력하는 경우 반대 방향으로 반력이 발생하여 하층 기둥의 변형이 커지는 현상이 있음을 먼저 알 수 있다.

가력 스케줄의 0.04rad까지의 변위각이 발생하는 경우를 전제로 상층 기둥의 +가력과 -가력에 의한 변위각(θ_{upper}^+ , θ_{upper}^-)의 합(θ_{upper}^t)을 K-SS와 K-SC에 각각 계산하였고, 또한 하층 기둥에 대해서도 가력 방향에 따른 변위각(θ_{lower}^+ , θ_{lower}^-)의 합(θ_{lower}^t)도 계산하였다. 계산 결과 K-SS의 상층

기둥과 하층 기둥의 변위각의 합은 각각 0.0968rad와 0.078rad였고, K-SC의 상층 기둥과 하층 기둥의 변위각의 합은 각각 0.0934rad와 0.080rad이었다.

일자형 연결 강판은 십자형 연결 강판에 비해 상층 기둥의 변위각이 0.0034rad만큼 크고, 하층 기둥의 변위각은 0.002rad만큼 작았다. 결과적으로 일자형 연결 강판이 사용된 경우 십자형 연결 강판이 사용된 경우 비해 층간변위각이 0.0014rad이 커지게 된다. 만약 층고가 3,000mm라면 층간 변위는 약 4mm가 증가하게 되어 10층 건축물에서 층간변위는 40mm로 누적되어 횡하중에 대한 사용성 기준 충족 여부를 결정짓는 인자로 작용할 수도 있을 것이다.

5. 결론

이 연구에서 모듈러 유닛 간 접합을 위해 사용되고 있는 접합 방식을 조사하였고, 모듈러 유닛 간 접합을 위해 일자형 연결 강판과 십자형 연결 강판이 사용된 접합부의 실험을 통해 구조 성능과 거동을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 모듈러 유닛 간 접합은 4~8개의 모듈러 유닛이 동시에 접합될 수 있는 경우를 고려해야 하고, 접합 방식으로 연결 강판, 맞물림 장치, 용접 등이 사용되고 있으며 모듈러 유닛의 내·외장 공장 마감률 높이기 위해 용접 방식은 지양되어야 한다.
- (2) 모듈러 건물이 고층화될수록 모듈러 유닛 간 접합 방식은 시공 안전성을 확보하기 위해 가급적 모듈 내부에서 시공할 수 있는 접합 방법이 적용되어야 하며, 높이 100m마다 2mm 이내의 오차만 허용되는 수준의 제작 및 접합 정밀성을 유지하는 것이 바람직하다.
- (3) 125×125×9mm의 각형강관 기둥과 200×75×6mm의 강판 절곡 ㄷ형강 보가 사용된 모듈러 유닛의 접합에 일자형 및 십자형 연결 강판이 사용된 접합부의 실험 결과 보에서 소성힌지가 형성되어 내력이 결정되었고, 0.04rad까지 층간변위각을 발휘할 수 있는 것으로 나타났다.
- (4) 길이 방향 접합부 실험에서 십자형 연결 강판은 일자형 연결 강판보다 강성이 우수하고, 0.04rad의 변위각의 가력을 기준으로 분석한 상·하 기둥의 실제 변위각은 십자형 연결 강판을 적용한 경우가 일자형 강판보다

0.0014rad정도 작은 것으로 나타났다.

- (5) 상·하 보의 웨브를 십자형 연결 강판을 이용해 볼트 접합하더라도 상·하 보의 합성 효과는 미소하기 때문에 구조해석에서 바닥 보와 천장 보를 별도로 모델링하여 설계하는 것이 바람직하다.
- (6) 모듈러 유닛 간 접합부에 적용되는 연결 강판 이외에 상·하 및 좌·우에서 보가 만나는 구간에 킷판 설치를 통해 비틀림의 영향을 최소화할 수 있다.

감사의 글

이 연구는 국토교통과학기술진흥원의 주거환경연구사업인 수요자 맞춤형 조립식 주택 기술개발 및 실증단지 구축(16AUDP-C068788-04)과 모듈러 건축 중고층화 및 생산성 향상 기술개발16RERP-B082884-03)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] Lawson, M., Ogden, R., and Goodier, C.I. (2014) *Design in Modular Construction*, CRC Press, UK.
- [2] Mills, S., Grove, D., and Egan, M. (2015) Breaking the Pre-Fabricated Ceiling: Challenging the Limits for Modular High-Rise, *Proceedings of CTBUH 2015 International Conference*, Council on Tall Buildings and Urban Habitat, USA, pp.416-425.
- [3] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.1: General Rules and Rules for Buildings* (EN 1993-1-1: 2005), Belgium.
- [4] 이상섭, 배규웅, 박금성, 홍성엽(2013) 유닛 모듈러 기둥-보 조인트의 구조 성능에 대한 실험적 평가, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.255-265. Lee, S.S., Bae, K.W., Park, K.S., and Hong, S.Y. (2013) An Experimental Evaluation of Structural Performance for the Beam to Column Joints in Unit Modular System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.255-265 (in Korean).
- [5] Ramaji, I.J., and Memari, A.M. (2013) Identification of Structural Issues in Design and Construction of Multi-Story Modular Buildings, *Proceedings of the 1st Residential Building Design & Construction Conference*, Pennsylvania Housing Research Center (Pennsylvania State University), USA, pp.294-303.
- [6] Lawson, R.M., Ogden, R.G., and Bergin, R. (2012) Application of Modular Construction in High-Rise Buildings, *Journal of Architectural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.18, No.2, pp.148-154.
- [7] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 및 해설, 기문당. Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code and Commentary*, Kimoonang, Korea (in Korean).

요 약 : 모듈러 건축물에서 모듈러 유닛 사이의 접합은 연결 강판을 이용하여 볼트 접합하는 것이 일반적이다. 건축물의 강도는 가장 약한 부분에 의해 결정되며, 접합부는 부재보다 약한 부분이 될 가능성이 있다. 따라서 모듈러 건축물의 안전성을 확인하기 위해 모듈 내부 기둥-보 접합부의 구조성능뿐 아니라 모듈러 유닛과 유닛 접합부의 구조성능도 평가되어야 한다. 이 연구에서는 각형강판 기둥과 ㄷ형강 보가 사용된 모듈이 일자형 접합철물과 십자형 접합철물로 연결된 접합부의 거동을 KBC2009 0722.2.4에 따라 모듈의 폭 방향과 길이 방향에 대해 층간 변위각으로 반복 가력을 제어하는 실험을 통해 조사하였다. 실험결과 모든 실험체는 0.04rad 변위각까지 비교적 안정적인 거동을 보였고, 길이 방향 실험체의 결과가 에너지 흡수능력 면에서 좋은 거동을 보였다. 그러나 일자형 연결 강판이 십자형 연결 강판에 비해 변위각이 커질수록 강성이 저하하고, 기둥의 실제 변위각이 늘어나는 결과를 보였다.

핵심용어 : 모듈러 유닛 간 접합, 연결 강판, 볼트 접합, 일자형 연결 강판, 십자형 연결 강판