



모듈러 골조의 각형강관 기둥과 C형강 보 접합부의 거동 평가

이상섭^{1*} · 박금성² · 홍성엽³ · 배규웅⁴

¹수석연구원, 한국건설기술연구원, ²연구위원, 한국건설기술연구원, ³석사후연구원, 한국건설기술연구원,
⁴선임연구위원, 한국건설기술연구원

Behavior of C-Shaped Beam to Square Hollow Section Column Connection in Modular Frame

Lee, Sang Sup^{1*}, Park, Keum Sung², Hong, Sung Yub³, Bae, Kyu Woong⁴

¹Senior Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 10223, Korea

²Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 10223, Korea

³Researcher, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 10223, Korea

⁴Senior Research Fellow, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Ilsanseo-Gu, Goyang-Si, 10223, Korea

Abstract - Modular building is a prefabricated construction system for building where factory-produced pre-engineered modular units are delivered to site and assembled as substantial elements of a building. There are two basic kinds of modular structures. One is a load-bearing wall structure designed to transfer the load through longitudinal walls. The other is a frame structure composed of columns and beams. For frame structure, square hollow section is often used as a column member and channel as a beam member in modular unit. Lower and upper modules are fasten with bolts via a pre-installed access hole in the SHS column. However, the access holes can weaken the panel zone that would affect the behavior of beam to column connection. The 5 specimens of beam to column connections with parameters of access hole, column thickness and diaphragm were made and this paper describes the test results.

Keywords - Modular construction, Modules, Connections, Access hole, SHS column

1. 서론

모듈러 건축은 2002년 국내에 도입되어 학교, 병영생활관, 오피스 등을 중심으로 적용되어 왔다^[1]. 층수는 주로 3층 이하이었으며, 용도는 비주거용으로 구조 및 환경적으로 높은 성능이 요구되지 않았다. 최근 모듈러 건축 산업의 성장을 위해 국내외에서 중고층화를 하나의 해법으로 모색하고 있으며, 건축물의 용도를 주거용으로 확대하고 있다. 영국

에서도 다층 모듈러 건물의 건설을 통해 모듈러 공법 기술의 개발과 첨단화에 큰 진전을 이룩한 바 있다.

Lawson *et al.* (2008)^[2]는 모듈러 건축 공법의 주요 이점을 다음과 같이 3가지로 요약하였다. 첫째 공장 제작 건수가 늘어날수록 공장의 고정 비용이 낮아져 전체 건설비용은 감소될 수 있고, 현장 시공을 최소화하여 공기를 단축할 수 있으며, 셋째 엄격한 품질관리를 통한 공장 제작과 검사로 고품질의 건축이 가능하다는 점이다. 그러나 이러한 장점이 중고층 모듈러 건축에서도 유지되기 위해서는 구조 안전성이 우선 전제되어야 할 것이다. 층수가 증가함에 따라 시공과 구조설계는 더욱 복잡해지고 특히 지진 위험 지역에서 횡하중에 대해 반드시 고려되어야 한다.

모듈러 구조 시스템은 건축물의 구성 요소를 부품화하여 현장에서 조립하는 공법으로 관련 구법이 매우 다양하고 구체적인 정의는 내려져 있지 않다. Ramaji and Memari

Note.-Discussion open until April 30, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 30, 2015; revised July 1, 2015; approved on October 5, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-910-0768 Fax. +82-31-910-0361

E-mail. lss0371@kict.re.kr

(2013)^[3]는 모듈러 구조 시스템을 구조적 특성에 따라 2D, 3D, 오픈 빌딩 시스템, 하이브리드 코어-모듈러, 하이브리드 포디움(podium), 골조-유닛 시스템(infill 구조)의 6가지 그룹으로 구분하였다. 이 가운데 상자형 모듈을 기반으로 하는 방식이 3D 시스템으로 내력벽식 모듈과 코너 지지 모듈(이하 가구식 모듈)로 구분된다.

국내의 경우 3D 시스템의 내력벽식과 가구식 모듈이 모두 도입되었으나 가구식 모듈을 채택한 제조사가 많았다. 일반적으로 가구식 모듈에서 코너에 배치되는 기둥은 각형강관이 주로 사용되었으며 해외에서도 가장 흔하게 사용되고 있다. 각형강관은 단면 성능이 우수하여 모듈의 기둥으로 적합하나 폐쇄형 단면으로 상하 기둥의 이음 및 보-기둥 접합부 처리가 개방형 단면보다 좀 더 까다롭다.

각형강관 기둥이 사용된 가구식 모듈에서 상하 모듈의 볼트 접합을 위해 각형강관 기둥에 손이나 공구가 들어갈 수 있는 아치형의 액세스 홀을 가공하는 방법이 사용되고 있다. 이 액세스 홀은 기둥-보 접합부의 패널존 영역에 위치하여 단면 손실을 가져오기 때문에 기둥-보 접합부의 내력에 악영향을 미칠 가능성이 매우 높다. 또한 각형강관 기둥과 C형강 보의 접합부 상세에서 보의 휨모멘트를 기둥에 전달하기 위해 각형강관 내부에 보 플랜지의 연속 요소인 다이아프램 등이 사용되기도 한다. 국내에서 모듈 내부 기둥-보 접합부에 대한 연구는 근래 이루어지고 있으며, 주요 연구는 다음과 같다.

Shim *et al.* (2008)^[4]은 각형강관 기둥과 MCO 보로 구성된 장스팬 모듈러 시스템의 보-중간기둥 접합 상세를 제안하여 실험하였고, 유한요소해석을 통해 최대하중과 파괴모드를 예측할 수 있음을 보였다.

Zheng *et al.* (2008)^[5]은 각형강관(150×150×6) 기둥과 LEB C형강(220×65×18×12×3.0) 보로 구성된 접합부를 단조 가력하는 실험을 실시하였다. 이 실험은 기둥의 단부를 반력 프레임에 볼트로 고정하고, 보를 세워 수평 가력하는 방법으로 수행하였다. 비록 비틀림의 영향을 최소화한 길이의 단일 보로 실험체를 제작하였으나 C형강 보의 국부좌굴로 인한 비틀림 좌굴에 의해 내력이 결정되었다고 서술하였다.

Park *et al.* (2009)^[6]은 브라켓 및 다이아프램을 이용한 각형강관(100×100×6) 기둥과 경C형강(200×75×75×6) 보 접합부의 반복 가력 실험을 통해 다이아프램이 사용된 접합부의 거동이 우수함을 밝혔고, 제작 효율에서 브라켓 형식이 바람직하다는 의견을 피력하였다. 이 연구에서 실험은 Zheng

et al. (2008)^[5]과 유사한 방법이 사용되었으나 기둥을 볼트로 고정하지 않고 힌지 구조로 지지하여 접합부 회전에 대한 구속을 최소화하였다. 그러나 비대칭 단면의 보가 단일 부재로 사용되어 국부좌굴과 비틀림으로 내력이 결정되는 현상을 보였다.

Lee *et al.* (2013)^[7]은 각형강관(125×125×6, 4.5, 3.2) 기둥과 C형강(200×75×6) 보가 사용된 2가지 접합부 실험체를 대칭되게 쌍으로 제작하여 Park *et al.* (2009)^[6]에서 사용된 지점 조건으로 반복가력 실험을 실시하여 접합부의 내력을 평가하였다. 이 연구를 통해 접합부의 안전한 거동을 위해 패널존 보강과 각형강관 기둥 두께에 제한을 둘 것을 제안하였다.

본 연구에서는 각형강관과 C형강으로 구성된 가구식 모듈에서 각형강관 기둥에 가공된 액세스 홀, 각형강관 기둥의 두께, 그리고 각형강관 기둥 내부에 설치된 다이아프램이 기둥-보 접합부의 거동에 미치는 영향을 알아보기 위해 접합부 실험을 계획하였다. 선행 연구를 참고하여 비틀림의 영향을 최소화할 수 있도록 실험체를 설계하였고, 지점 조건이 접합부의 거동에 영향을 미치지 않도록 실험 방법을 강구하여 실험을 실시하였고 실험결과를 비교·분석하였다.

2. 가구식 모듈 시스템

2.1 가구식 모듈

가구식 모듈은 Fig. 1과 같이 코너에 기둥이 배치되고 테두리 보가 바닥과 천장에서 연결된 형태로 구성된다. 보의 스팬이 큰 경우 중간에 셋기둥을 설치하거나 가새를 설치하여 보강될 수 있다. 전형적인 모듈의 치수는 폭이 3.0~3.6m이고 길이가 6~9m이지만, 상차에 문제가 없다면 길이는 12m까지 확대될 수 있다. 모듈의 측면은 조립 시 공간 구성에 따라 벽체로 마감되거나 또는 개방될 수 있다.

기둥은 주로 각형강관이 사용되며, 크기는 100~150mm이고 두께는 5~10mm로 모듈 바닥면적과 층수에 따라 달라진다. 기둥은 횡력과 축력이 동시에 작용하는 경우를 상정해서 설계되어야 하며 이 때 이웃한 벽체의 횡력저항능력, 축하중의 편심, 상하 모듈의 연결방식 등이 고려되어야 한다. 바닥과 천장의 테두리 보는 C형강이나 H형강이 주로 사용되며 일반적으로 보 춤은 200~350mm에 해당한다. 유럽 등에서는 냉간 성형 C형강이 주로 사용되고 있으나 국내의 경



(a) With concrete slab (Kumkangkind co., Ltd)



(b) With light steel floor joist (Kingspan)

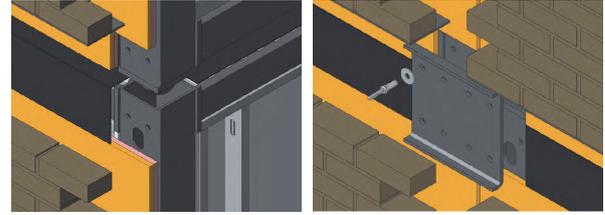
Fig. 1. Examples of corner-supported module

우 압연 성형 또는 롤 가공된 C형강이 많이 사용되고 있다. 바닥보와 천장보는 하중 전달 및 저항 방식에 따라 그 크기를 달리할 수 있다. 일반적으로 사용성 측면에서 보 부재 중앙부의 처짐은 5mm 이하로 제한되고 있다.

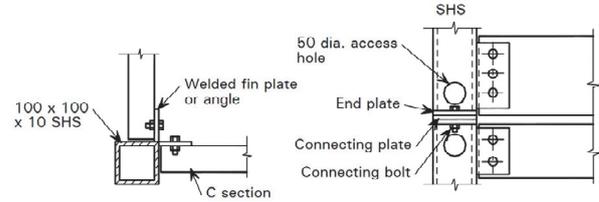
가구식 모듈의 경우 부족한 횡강성을 확보하기 위해 기둥-보 접합부가 휨모멘트에 저항할 수 있도록 Fig. 1(a)와 같이 보를 직접 기둥에 용접하여 강접 또는 반강접으로 취급하거나, Fig. 1(b)와 같이 제작을 용이하게 하기 위해 보의 웹만 볼트 접합하여 보 휨 내력의 20% 이하만 전달하는 편접합으로 취급한다. 유럽에서는 가구식 모듈의 바닥 시스템으로 건식 경량바닥을 주로 사용하고 있으며 수평 부재의 다이아프램 거동을 위해 단변 방향으로 박판 조이스트를 좁은 간격으로 배치하는 사례가 많다. 그러나 국내의 경우 바닥을 철근콘크리트 슬래브로 구성하기 때문에 보의 춤은 상대적으로 작으나 모듈은 무거워져 3×6m 모듈의 무게는 약 12tf에 이른다.

2.2 가구식 모듈-모듈의 접합

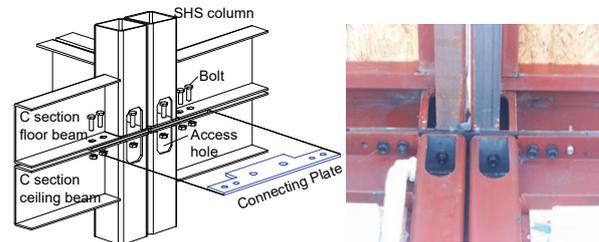
가구식 모듈과 모듈의 접합은 일체로 거동할 수 있도록 수직방향 및 수평방향으로 연결해야 한다. 기둥 부재로 사용된



(a) Connecting using blind rivets (Kullman Building Corp.)



(b) Connecting through access hole (SCI P302)



(c) Connecting through access hole (Kumkangkind co., Ltd)

Fig. 2. Connection details of corner-supported module

각형강관은 폐쇄형 단면으로 이음 방법이 쉽지 않다. 일반적으로 각형강관의 이음은 엔드 플레이트를 이용한 볼트 접합 방식이나 내부에서 일자 또는 십자형 철물을 이용해 볼트 접합하고 외부로 덮는 방식이 사용된다.

그러나 모듈을 적층하여 각형강관 기둥을 기존 방식으로 접합하기 위해서는 하부 모듈의 천장보와 상부 모듈의 바닥보 사이의 갭(gap)이 충분히 확보되어야 한다. 갭 부분은 층간대로서 현장에서 모듈과 모듈의 접합이 완료된 후 마감될 수 있다. 접합 작업을 위해 갭의 높이는 100mm 이상이 확보되어야 하기 때문에 높이 제한이 있는 건축물에는 불리하게 작용할 수 있다. 때문에 모듈은 적층과 조립에 필요한 최소한의 갭을 유지한 상태에서 접합이 이루어지도록 접합 상세가 개발되고 있다. 세계적으로 많은 모듈 제작사가 있지만 모듈 사이의 접합 방식을 공개한 자료는 많지 않아 Fig. 2에 대표적인 접합 사례를 조사하여 나타내었다.

Fig. 2(a)는 가구식 모듈의 접합을 위해 각형강관 측면에 미리 구멍을 뚫고 수직 플레이트를 덧대어 블라인드(blind) 리벳(혹은 원 사이드 리벳)으로 고정하는 방식으로 Kullman Building Corporation의 접합 시스템이다.

Fig. 2(b)는 SCI(The Steel Construction Institute)에서 발간한 자료에 소개된 가구식 모듈의 접합 방법이다. 상하 각형강관 기둥 마구리에 용접한 엔드 플레이트 사이에 접합 철물을 삽입하고 볼트로 접합하기 위해 각형강관 측면에 뚫은 직경 50mm의 원형 액세스 홀을 이용하는 방식이다.

Fig. 2(c)는 본 연구의 대상인 모듈에 사용된 접합 방법으로 접합 철물을 삽입하여 각형강관 기둥 및 보 플랜지를 볼트로 접합하기 위해 각형강관 측면에 75×137.5mm인 아치형 액세스 홀을 이용하는 방식이다. 여기서 아치형 액세스 홀은 체결 공구가 삽입될 수 있는 최소 크기로 뚫린 것이다. 3층 이하의 저층 건물에서 이 아치형 액세스 홀의 기둥-보 접합부의 거동에 미치는 영향은 작을 수 있지만 층수가 증가할수록 그 영향은 클 것으로 적절한 개선 또는 보강 방안을 마련하기 위해 실험을 통해 그 거동을 파악하고자 한다.

3. 가구식 모듈 기둥-보 접합부 실험

3.1 실험체 계획

적층된 가구식 모듈에서 하부 층의 천장보와 상부 층의 바닥보가 강하게 연결되지 않았다면 연직하중의 대부분은 상층 모듈의 바닥보에 작용하기 때문에 바닥보의 거동이 천장보보다 중요하다.

실험 대상인 모듈의 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 모듈은 각형강관 측면에 Fig. 2(c)와 같은 액세스 홀이 가공되어 있으며 천장보와 바닥보는 각형강관의 외면에 접하도록 용접되어 있다. 바닥에는 보 웹의 중간 높이에서 두께 150mm의 콘크리트 슬래브가 타설되어 C형강 보를 구속하게 된다.

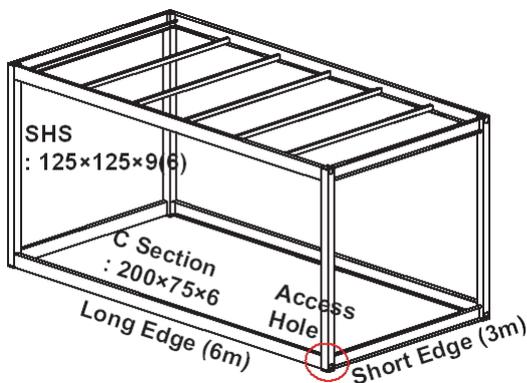


Fig. 3. Configuration of module to test

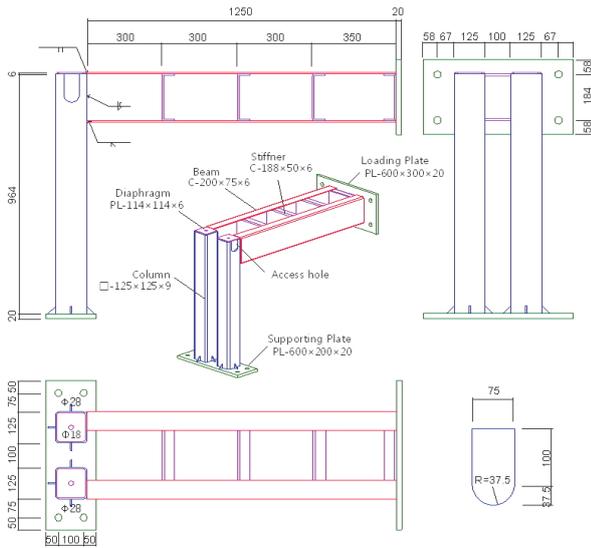
본 연구에서는 각형강관 기둥으로 125×125×9mm 또는 125×125×6mm이 사용되었고, C형강 보로 200×75×6mm가 사용된 모듈의 장변방향과 단변방향 기둥-보 접합부를 대상으로 하였다. 두께 6mm인 각형강관의 판폭두께비는 16.33으로 내진콤팩트 단면의 한계세장비인 18.9(=0.64√E/F_y)보다 작은 것으로 계산되었다. C형강 보는 KS D 3530 「일반 구조용 경량 형강」을 따라 판재를 절곡하여 제작되었으며, 웹의 판폭두께비는 31.33로 내진콤팩트 단면의 한계세장비인 72.34(=2.45√E/F_y)보다 작았지만 플랜지의 판폭두께비는 12.5로 내진콤팩트 단면의 한계세장비인 8.86(=0.30√E/F_y)과 콤팩트 단면의 한계세장비인 11.22(=0.38√E/F_y)보다 커 비콤팩트 단면으로 분류된다. 그러나 C형강 보의 경우 Fig. 1(a)과 같이 상부 플랜지는 콘크리트 슬래브 속에 묻히고 웹의 일부도 콘크리트로 구속되기 때문에 기준에 제시된 판폭두께비는 다소 보수적인 평가일 가능성이 높다.

기둥-보 접합부의 거동에 영향을 미치는 인자를 액세스 홀의 유무와 위치, 기둥의 두께, 보 플랜지 높이에서 기둥 내부의 다이아프램의 유무로 선정하여 Table 1에 정리한 것과 같이 5개의 접합부 실험체를 계획하였다.

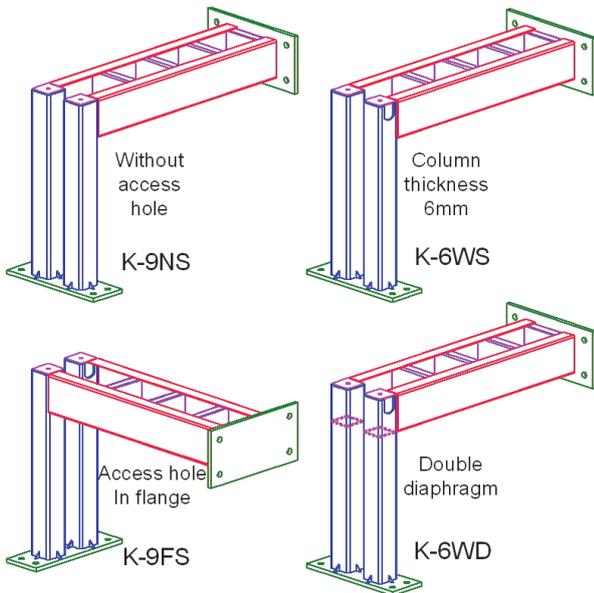
각형강관 기둥의 외면에 맞춰 C형강 단일 보를 용접하여 접합한 실험체의 경우 C형강 보의 비틀림 좌굴로 내력이 결정될 가능성이 높다. 이런 문제는 선행 연구에서도 언급된 바 있으며 이 연구에서는 실험체를 대칭으로 제작하여 비틀림에 의한 보의 선행 파괴를 예방하고자 하였다. 또한 선행 연구에서 채택한 실험 방법은 패널존이 지지되도록 기둥 단부를 반력 프레임에 볼트로 고정하거나 힌지 지점으로 지지하여 접합부의 회전 강성을 증가시킬 수 있다는 우려가 있었다. 이와 같은 문제를 해결하기 위해 세워진 기둥 상부에 보를 접합하고 보를 수평가력할 수 있는 실험방법을 계획하였

Table 1. Descriptions of test specimens

Specimen	Parameters			Remarks
	Column thickness	Access hole	Diaphragm	
K-9NS	9mm	nothing	single	Welding: groove weld (flange)
K-9WS	9mm	web	single	
K-9FS	9mm	flange	single	
K-6WS	6mm	web	single	flare/fillet weld (web)
K-6WD	6mm	web	double	



(a) Dimensions of K-9WS specimen



(b) 3D shapes of other specimens

Fig. 4. Configuration of test specimens

다. 즉 바닥보를 중심으로 생각하면 L자형 접합부 실험체가 되어야 하지만 가력의 편리를 위해 이를 상하로 뒤집어 7자형의 접합부 실험체로 상세 치수와 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 보의 소성모멘트(M_p)가 발휘될 수 있도록 용접 내력의 검토를 통해 보 플랜지는 그루브(groove)용접을 하고, 보 웹은 플레어(flare) 또는 모살 용접으로 기둥에 용접하였다.

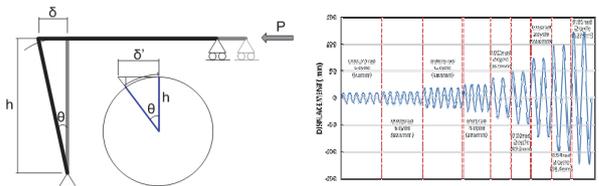
3.2 재료 시험

실험체 제작에 사용된 각형강관과 C형강의 재료 특성을 알아보고자 Fig. 5와 같이 각각 2개의 인장 시험편(14B호)을 제작하여 KS B 0802^[8]를 따라 강재의 인장강도시험을 실시하였고, 그 결과를 Table 2에 정리하였다.

기둥으로 사용된 각형강관의 강종은 SPSR400이었고, 보로 사용된 C형강은 강종 SS400 강관을 절곡하여 제작한 것으로 항복강도는 235N/mm², 인장강도는 400N/mm²으로 건축구조기준에 명시되어 있다. 시험 결과 각 강종의 강도 기준이 만족되고 있지만 항복비가 높은 것으로 나타났다. 두께 6mm 각형강관의 경우 강종이 SPSR490으로 추정될 정도의 항복강도와 인장강도를 보였다.

3.3 가력 및 측정 방법

기둥-보 접합부의 성능은 건축구조기준(KBC2009)^[9]에서 층간변위각과 휨내력으로 규정하고 있으며 층간변위각(θ)은 「층간변위(δ)를 층고(H)로 나눈 값」으로 정의되어 있다. AISC Seismic Provisions for Structural Steel Buildings(2010)^[10]의 Commentary K2. 2에 실험체의 형상은 십자형이나 외팔보 형태로 제작할 수 있으며, 가력도 보 단부 혹은 기둥 단부에 변위를 가하는 방법을 채택할 수 있다고 설명되어 있다. 이 실험에서 사용한 가력방법은 Fig.



(a) Definition of story drift angle

(b) Loading schedule

Fig. 5. Loading protocols

Table 2. Material test results

Coupon ID	Steel Grade	F_y (N/mm ²)	F_u (N/mm ²)	E (N/mm ²)	Elo. (%)
C-200x75x6	① SS400	307	470	12668	32
	② SS400	332	490	15587	28
□-125x125x6	① SS400	462	490	71111	20
	② SS400	443	480	9879	20
□-125x125x9	① SS400	398	444	8035	16
	② SS400	376	418	6228	23

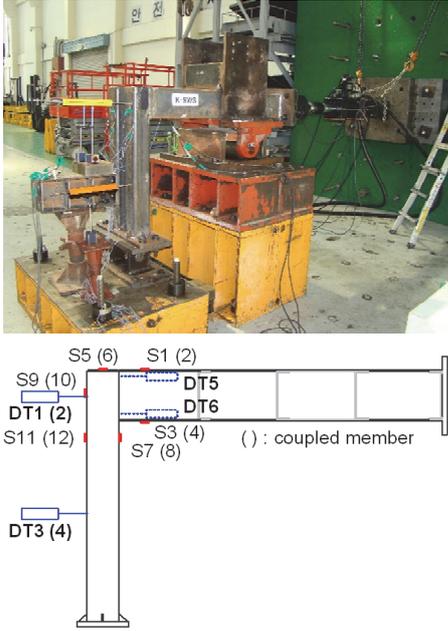


Fig. 6. Test set-up and measurement

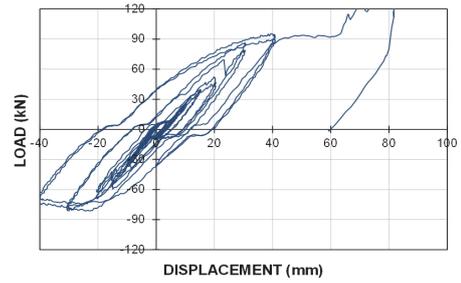
5에 나타난 것과 같이 KBC2009 0722.2.4^[9]에 규정된 층간 변위각을 0.2mm/sec 속도로 제어하는 반복가력이었다. 보에 가해진 수평변위(δ)를 실험체의 높이(h)로 나눠 계산하기 때문에 층간변위각이 커질수록 초과된 수평변위(δ')가 보에 가해지게 되지만 보수적 평가가 되도록 이를 수용하였다.

Fig. 6에서 확인할 수 있듯이 기둥을 힌지 구조로 지지하고 보 단부를 이동단으로 지지하여 수평가력 하였으며, 주요 지점에서 변위와 변형도를 측정하였다.

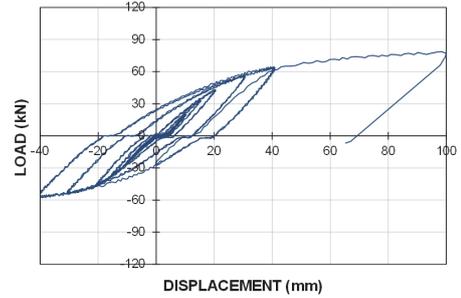
4. 실험 결과 비교 및 분석

4.1 실험결과

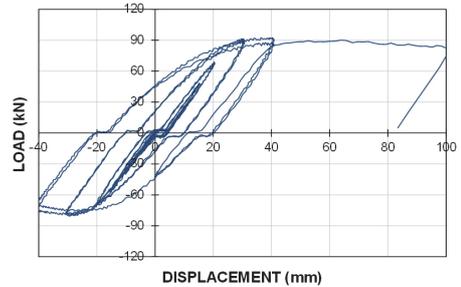
기둥 지지 힌지단의 크레비스와 핀 사이의 유격으로 가력 방향 변경 부근에서 변위가 튀는 현상 이외에 별다른 이상은 없었다. K-9NS와 K-9FS의 경우 기둥 면에서 약 50~80mm 떨어진 위치에서 상하 플랜지의 좌굴이 두드러졌고 최대하중에 도달한 후 하중이 떨어지는 특징을 보였다. 나머지 실험체의 경우 액세스 홀의 심한 전단 변형으로 보 단면 전체가 소성화되지 못하여 보 플랜지의 좌굴이 작고 하중의 저하 없이 변형이 증가하는 거동 특성을 보였다. 실험결과를 Table 3에 정리하였고, Fig. 7에 모멘트-회전각 관계를 나타내었다.



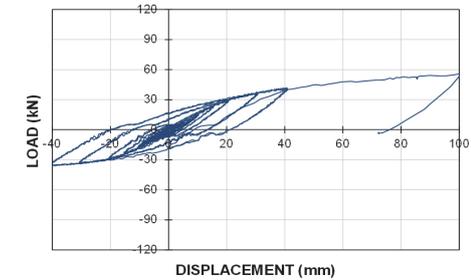
(a) K-9NS



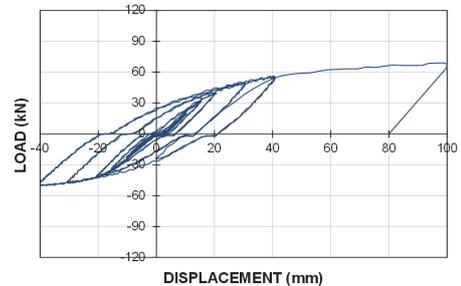
(b) K-9WS



(c) K-9FS



(d) K-6WS



(e) K-6WD

Fig. 7. Moment-rotation relationships of test specimens

Table 3. Descriptions of test specimens

Specimen	P_u (kN)	M_u (kN·m)	Failure characteristics	
K-9NS	95.4	97	plastic hinge at flange of beam	
K-9WS	78.7	80	shear deformation of access hole	
K-9FS	92.5	94	plastic hinge at flange of beam	
K-6WS	56.0	57	shear deformation of access hole	
K-6WD	69.0	70	shear deformation of access hole	

4.2 접합부 성능 평가

지진하중에 저항하는 기둥-보 접합부의 성능은 소성변형 능력과 휨강도를 기준으로 보통모멘트골조, 중간모멘트골조 및 특수모멘트골조로 구분하고 있다. 이 세 가지 철골모멘트골조는 서로 다른 수준의 비탄성회전능력이 요구되고 있어 보통모멘트골조는 0.01rad의 층간변형각을 수용할 수 있어야 하며, 중간모멘트골조와 특수모멘트골조의 경우 각각 0.02rad와 0.04rad를 수용할 수 있어야 한다. 중간모멘트골조와 특수모멘트골조의 성능은 해당 층간변형각에서 보 소성모멘트(M_p)의 80% 이상을 유지해야 한다는 강도 조건도 만족해야 한다. 이외에 판폭두께비와 초과강도를 고려한 소요전단강도에 대해 접합부의 전단내력을 검토해야 하는 조건도 있다.

여기서 접합부의 성능을 평가하기 위해 먼저 액세스 홀을 고려한 각형강관 기둥과 C형강 보의 전소성모멘트를 계산하였다. Fig. 8과 같이 액세스 홀의 유무와 위치에 따라 단면결손을 고려하고, 기둥의 두께와 소재 시험결과를 적용하여 계산한 각 실험체 기둥과 보의 소성모멘트를 Table 4에 정리하였다.

계산된 소성모멘트는 실험결과와 비교하기 위해 Table 4

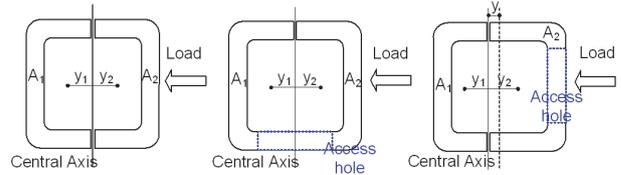


Fig. 8. Cross-section of SHS with access hole

Table 4. Plastic moment of members

Specimen	Column □-125×125×9(6)		Beam C-200×75×6		Controlled M_p (kN·m)
	f_y (N/mm ²)	M_p (kN·m)	f_y (N/mm ²)	M_p (kN·m)	
K-9NS	387	67.2×2	320	43.9×2	43.9×2
K-9WS	387	63.2×2			43.9×2
K-9FS	387	51.8×2			43.9×2
K-6WS	453	51.6×2	320	43.9×2	43.9×2
K-6WD	453	51.6×2			43.9×2

에 ×2로 표기하였다. 각 실험체에서 지배하는 소성모멘트는 액세스 홀에 의한 단면 결손을 고려하더라도 C형강 보의 소성휨모멘트로 결정되었다. 따라서 액세스 홀의 영향이 없거나 미미한 경우 실험을 통해 얻은 최대모멘트는 보의 소성모멘트보다 커야 할 것이다.

Fig. 9에 나타난 것과 같이 실험체의 경계조건을 단순지기로 가정할 수 있어 정정구조물인 실험체의 반력과 휨모멘트 분포를 쉽게 구할 수 있다. 따라서 접합부에 작용하는 휨모멘트는 하중(P)에 기둥 높이(h)를 곱해 계산되고, 층간변위각은 수평변위(δ)를 기둥 높이(h)로 나눠 계산될 수 있다.

$$M = P \cdot h \tag{1}$$

$$\theta = \delta / h \tag{2}$$

식 (1)과 식 (2)을 이용하여 계산한 휨모멘트-층간변형각

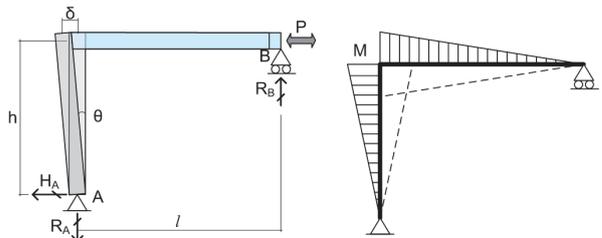
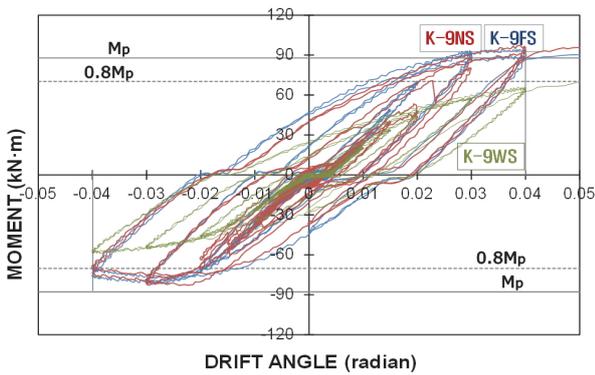


Fig. 9. Reactions and bending moment diagram

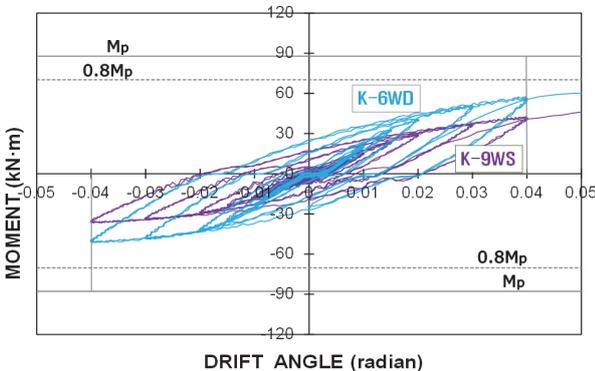
관계를 기둥의 두께별로 비교될 수 있도록 Fig. 10에 동시에 나타내었다.

기둥 두께가 9mm이고 액세스 홀이 없었던 K-9NS와 액세스 홀이 기둥 플랜지에 가공된 K-9FS 두 실험체만이 특수모멘트골조에 해당하는 성능을 보이고 있고, 액세스 홀이 기둥 웹에 가공된 K-9WS는 중간모멘트골조 성능에 조금 못 미치는 성능을 보이고 있다. 이 비교로부터 기둥에 가공된 액세스 홀이 하중의 작용 방향과 나란히 기둥 표면에 가공될 경우 기둥-보 접합부의 성능은 크게 떨어짐을 알 수 있다.

공통적으로 기둥 두께가 6mm이고 액세스 홀이 있으며, 보 상부 플랜지 높이에서만 다이아프램이 설치된 K-6WS와 보 상하부 플랜지 높이에서 다이아프램이 설치된 K-6WD 접합부는 보통모멘트골조에 해당하는 성능을 보였다. 이 결과로부터 보 플랜지의 연속을 위해 다이아프램이 이중으로 설치되었더라도 액세스 홀이 접합부 성능에 더 큰 영향을 미침을 알 수 있다. 물론 이중 다이아프램의 설치로 K-6WD의 접합부 성능은 K-9WS와 유사한 내력을 가져 액세스 홀의 크기가 작은 경우 좋은 보강법이 될 수 있음을 유추할 수도 있다.



(a) Column thickness 9mm



(b) Column thickness 6mm

Fig. 10. Comparison of test results

이 연구에 사용된 액세스 홀이 항상 보호영역으로 취급되는 영역에서 제외될 수 있는 패널존에 가공되었지만, 큰 비탄성변형의 원인으로 작용하기 때문에 주의를 기울일 필요가 있음을 알 수 있다. 결과적으로 이 연구에서 사용된 크기의 액세스 홀이 횡력 방향에 교차되어 기둥 표면에 가공될 경우 그 영향은 미미해 지지만, 건축물에 횡력은 x 및 y방향으로 모두 작용함을 감안하여 이 크기의 액세스 홀은 가공하지 않거나 보강되는 것이 바람직할 것이다.

4.3 접합부의 강성 평가

모듈러 건축물의 해석은 모듈의 기둥-보 접합뿐 아니라 모듈과 모듈 사이의 접합도 다양하여 모델링에 유의해야 한다. 상용 프로그램을 이용한 모듈러 건축물의 설계 과정에서 해석 모델링에 합리적인 단순화 가정은 허용될 것이다. 그러나 앞선 분석에서 보였듯이 가구식 모듈의 기둥-보 접합부에 액세스 홀이 가공되어 있을 경우를 강접으로 모델링하여 해석하는 것은 잘못된 결과를 얻을 가능성이 높다.

기둥-보 접합부에 대한 모델링은 전체 건물의 해석법에 따라 달라지지만 실무에서 많이 사용하고 있는 탄성 설계에서는 강접합 또는 핀접합으로 가정되는 경우가 많다.

해석을 위한 접합부의 분류는 Eurocode 3 : Design of steel structure - Part 1-8 : Design of joints^[11] 5장에 자세히 소개되어 있다. 해석법에 따른 접합부의 분류는 강성(stiffness)과 강도(strength)를 기준으로 하고 있으며, 탄성 설계의 경우 강접합(rigid), 반강접합(semi-rigid), 핀접합(nominally pinned)으로 분류하고 있다.

AISC^[10]에서도 접합부를 완전구속(fully restrained), 부분구속(partially restrained), 단순접합(simple)으로 Beam Line 분석을 통해 강도와 강성을 기준으로 분류하고 있다. 그러나 부분구속 접합부를 적용할 경우 반복되는 설계과정

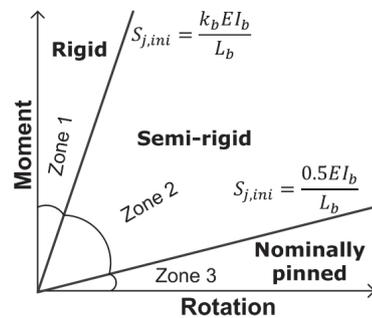


Fig. 11. Classification of connections (Eurocode 3)

이 포함되어 있어 실무 설계에서 활용 빈도는 높지 않은 것으로 알려져 있다.

이 두 접합부 분류 방법 가운데 더 엄격한 것은 Eurocode 3^[11]로 그 분류 체계를 Fig. 11에 나타내었고, 경계가 되는 초기강성($S_{j,ei}$)에 사용된 기호에 대한 설명은 생략한다.

접합부의 분류를 위해서 먼저 접합부의 모멘트-회전 관계를 알아야 한다. 여기서 접합부의 회전각은 보와 기둥의 상대적인 회전각의 차이이기 때문에 층간변위각과 다를 수 있음에 유의해야 한다. 이 연구에서는 접합부의 상대 회전각을 변위계를 이용해 측정한 기둥면의 수평변위(δ_5 , δ_6)를 두 변위계의 거리(d)로 나눠 계산하였다. 회전이 커짐에 따라 이 계산에 오류가 포함될 우려가 있지만 초기강성을 평가할 작은 회전각 범위에서는 무방할 것이다.

한편 분류의 경계가 되는 강성의 수식에는 보의 스패(L_b)이 변수로 포함되어 있다. 이것은 보의 경간을 의미하는 것으로 실험의 대상이 된 골조에서 추출한 실험체의 보 길이(l)와 구분되어 평가되어야 한다. 다시 말해 실험체의 보 길이를 기준으로 접합부를 분류하게 되면 실제 보 스패를 실험체 보 길이로 나눈 값만큼 과대평가하게 되어 반강접 접합부로 평가될 가능성이 높다.

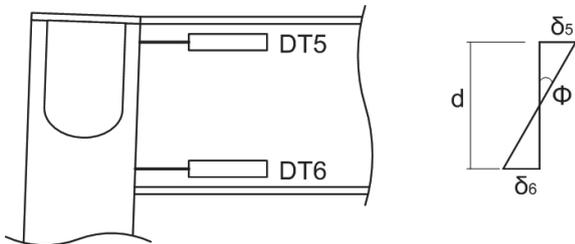


Fig. 12. Relative rotation of connections

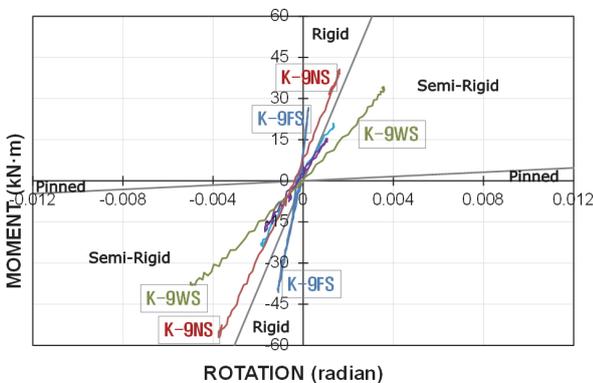


Fig. 13. Initial stiffness of test connections

이 연구에서 실험 대상이 된 접합부는 Fig. 3에 나타난 장변이 6m이고 단변이 3m인 모듈에 사용된 것으로 이 가운데 보 스패가 짧은 단변을 기준으로 Eurocode 3^[11]의 분류 경계가 되는 초기강성을 계산하고, Fig. 12에 나타난 방법으로 구한 모멘트-회전각 관계의 초기 직선 구간을 Fig. 13에 비교하여 나타내었다.

기둥을 지지한 힌지 구좌의 유격에 따른 문제로 K-9NS의 모멘트-회전각 관계가 좌측으로 이동되어 나타나고 있지만 초기강성은 강접합(rigid)에 가까운 기울기를 보이고 있다. 또한 K-9NS와 유사한 거동을 보였던 K-9FS의 초기 모멘트-회전각 관계는 완전히 강접합 영역에 포함되는 것으로 나타났다. 반면 K-9WS, K-6WS, K-6WD는 모두 반강접 영역에 해당되는 것으로 나타났다.

따라서 이 연구에 사용된 크기의 액세스 홀이 기둥 웹에 있는 경우 모듈의 기둥-보 접합부는 반강접합으로 모델링되어야 하며, 실무 해석에서 모듈의 기둥-보 접합부를 강접합으로 가정하여 모델링하기 위해서는 각형강관 기둥에 액세스 홀을 가공하지 않거나 강판을 용접하여 보강하는 것이 실제 거동을 반영한 안전한 설계로 이어질 수 있을 것이다.

5. 결론

이 연구에서는 각형강관 기둥과 C형강 보를 이용하여 제작한 가구식 모듈의 기둥-보 접합부를 대상으로 모듈간 접합을 위해 가공된 액세스 홀, 기둥의 두께, 다이아프램이 접합부 거동에 미치는 영향을 실험적으로 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 가구식 모듈의 모듈간 접합을 위해 각형강관(□-125×125×9) 기둥에 가공된 액세스 홀(아치형 75×137.5mm)은 모듈의 기둥-보 접합부의 강도와 강성을 저하시킬 가능성이 높아 가공을 하지 않거나 보강하는 것이 바람직하다.
- (2) 횡력이 작용하는 조건에서 액세스 홀이 각형강관 기둥의 플랜지 면에 가공될 경우 액세스 홀이 접합부의 강도와 강성에 미치는 영향은 최소화될 수 있다.
- (3) 액세스 홀이 기둥 플랜지에 가공되거나 혹은 가공되지 않은 각형강관 기둥-C형강 보 접합부는 C형강 보가 내진콤팩트 단면의 한계세장비를 만족시킬 수 있다면 중간모멘트골조 이상의 성능을 발휘할 수 있다.

- (4) 액세스 홀이 기둥 웨브에 가공된 각형강관 기둥-C형강 보 접합부는 비록 기둥 내부에 다이어프램이 보강되어도 보통모멘트골조의 성능을 갖는 것으로 나타났다.
- (5) C형강 보 플랜지 높이에서 각형강관(□-125×125×6) 내부에 용접된 다이어프램은 상당한 보강 효과가 있지만 액세스 홀이 접합부의 거동에 더 큰 영향을 미친다.
- (6) 액세스 홀이 가공되지 않은 각형강관 기둥-C형강 보 접합부가 3×6m의 바닥면적을 갖는 모듈에 적용될 경우 모든 접합부는 강접합으로 모델링되어 설계될 수 있다.

감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(탈현장 초고속 주택 구조안전성 기술 개발)과 국토교통과학기술진흥원의 도시건축연구사업(13AUDP-C068788-01)의 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌(References)

[1] 조봉호, 김홍진, 고광호(2007) 모듈러 건축 시스템의 기술 개발 동향 및 적용 사례, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제19권, 제1호, pp.112-119.
 Cho, B.-H., Kim, H.-J., and Ko, G.-H. (2007) The State of Art in the Modular Construction in Korea, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.1, pp.112-119 (in Korean).

[2] 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 Institution of Civil Engineers - Structures and Buildings*, ICE Publishing, Vol.161, No.1, pp.3-16.

[3] 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.

[4] 심성철, 이상현, 조봉호, 우성식, 최문식(2008) 12m × 3m 스틸 모듈러 시스템의 보-중간기둥 접합부 구조성능, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제6호, pp.

793-805.
 Shim, S.C., Lee, S.H., Jo, B.H., Woo, S.S., and Choi, M.S. (2008) Structural Performance of Beam-Middle Column Connection of 12m × 3m Steel Modular System, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.6, pp.793-805 (in Korean).

[5] 정성림, 강주원, 박성무(2008) 해체-조립식 모듈러 철골 조 기둥-보 접합부의 거동에 관한 실험적 연구, 한국공간구조학회지, 한국공간구조학회, 제8권, 제1호, pp.89-97.
 Zheng, S.-L., Kang, J.-W., and Park, S.-M. (2008) An Experimental Study on the Behavior of Beam-to-Column Joints for Modular Steel Frame, *Journal of the Korean Association for Spatial Structures*, KASSS, Vol.8, No.1, pp.89-97 (in Korean).

[6] 박금성, 이상섭, 임석호, 배규웅(2009) 접합부 형상변화에 따른 경C-형강 보의 거동에 관한 연구, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제25권, 제1호, pp.89-96.
 Park, K.-S., Lee, S.-S., Lim, S.-H., and Bae, K.-W. (2009) The Behavior on the Beam of Light Steel Section with Shapes Changed of Connections, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.25, No.1, pp.89-96 (in Korean).

[7] 이상섭, 배규웅, 박금성, 홍성엽(2013) 유닛 모듈러 기둥-보 조인트의 구조 성능에 대한 실험적 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.255-265.
 Lee, S.S., Bea, 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).

[8] 국가기술표준원(2013) 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2013).
 Korean Agency for Technology and Standards (2013) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2013), Korea (in Korean).

[9] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 및 해설, 기문당.
 Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code and Commentary*, Kimoon dang, Korea (in Korean).

[10] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.

[11] European Committee for Standardization (2005) *Eurocode 3: Design of Steel Structures, Part 1.8: Design of Joints* (EN 1993-1-8: 2005), Belgium.

요 약 : 모듈러 건축은 사전에 설계 검토된 건물 요소를 공장에서 모듈로 제작하여 현장으로 운송 조립하는 프리패브 건축 시스템이다. 모듈러 건축물의 구조 형식은 공법, 재료, 부재 구성 등에 따라 다양하게 구분될 수 있지만 사용되는 모듈의 구조 형식은 크게 벽식과 가구식으로 나눌 수 있다. 벽식 모듈은 모듈의 입면을 패널을 이용하여 구성하여 수직하중과 수평하중을 전달시키는 방식이다. 가구식 모듈은 기둥과 보를 이용하여 모듈을 구성하고, 용도에 맞춰 입면을 마감하거나 개방시켜 놓는 방식이다. 이 두 가지 모듈 방식은 국내에도 사용된 바 있으나 최근 가구식 모듈이 보편화되고 있다. 가구식 모듈의 기둥 부재로 각형강관이 일반적으로 사용되고 있으며, 보 부재로 C형강 또는 H형강이 사용되고 있다. 각형강관이 기둥 부재로 사용된 가구식 모듈간 접합을 위해 각형강관 기둥 단부에 고력볼트를 채우기 위해 액세스 홀을 가공하는 경우가 있다. 액세스 홀은 볼트 체결을 위해 사람의 손이나 공구가 폐쇄형 단면인 각형강관 내부에 접근하기 위한 개구부로 액세스 홀은 기둥-보 접합부의 거동에 영향을 미치는 패널존을 약화시킬 가능성이 높다. 이 연구에서는 가구식 모듈의 기둥-보 접합부 거동에 영향을 미치는 액세스 홀, 기둥 두께, 다이아프램을 변수로 5개의 실험체를 제작하여 실험을 실시하였고 그 결과를 분석하여 제시하였다.

핵심용어 : 모듈러 공법, 모듈, 접합부, 액세스 홀, 각형강관 기둥
