

해체·조립식 모듈러 철골조 기둥-보 접합부의 거동에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Behavior of Beam-to-Column Joints for Modular Steel Frame

정 성 립*
Zheng, Sheng-Lin

강 주 원**
Kang, Joo-Won

박 성 무***
Park, Sung-Moo

요 약

본 논문은 유닛 모듈러를 구성하는 주구조체인 각형강관 기둥과 냉간성형 LEB C-형강 보를 볼트 접합된 접합부의 거동을 실험적으로 평가하는 것이 연구의 목적이다. 접합부에서 기둥과 LEB C-형강 보를 접합하기 위한 브라켓의 두께변화, LEB C-형강 보와 브라켓 접합부 볼트 개수 등의 주요변수에 대한 실험을 통하여 기둥-보 접합부의 내력증대와 변형성상 및 파괴모드 변화 등을 고찰하였다. 실험결과, 접합부의 보강형상과 관계없이 또한 접합부의 파괴 없이 LEB C-형강 보의 국부좌굴강도가 지배하는 것으로 파악되었으며, 브라켓 두께 크기에 따라 내력과 강성이 조금 높게 나타남을 알 수 있었다. 또한 접합부에 사용된 볼트 수량에 관계없이 강성면에서 큰 차이를 나타내지 않았으며 LEB C-형강과 브라켓을 볼트접합으로 반강접합의 역학적 거동 가능성을 확인하였다.

Abstract

The object of this paper is to evaluate on behavior the experimentally of beam-to-column joints for modular steel frame with the hollow structural steel section to LEB C-shape. Beam-to-column joints carried out test on the joint shape bracket-type and welded-type to consideration which the joints for modular steel frame was capacity, deformation and failure mode. Test of results, the beam-to-column joints decided to the lateral buckling strength in LEB C-shape regardless of joint-shape and joint failure. The strength & stiffness for joints increase as the bracket-thickness. The results from theory of lateral buckling are compared to the experimental results. The ratio of experimental results to theory value is 0.83 ~ 0.95 in the case of bracket-type and welded-type of 0.87~0.9, indicating an accurate and safe estimation.

키워드 : 해체조립, 모듈러 시스템, 각형강관, LEB C형강, 접합부

Keywords : Modular System, Hollow Structural Section, LEB C Section, Connection

1. 서 론

유닛 모듈러 건축은 공장에서 제작된 단위 유닛 형상을 현장에서 조립하여 구조체를 완성해가는 공업화 건축을 의미하며, 일본, 유럽, 미국 및 캐나다 등에서는 다양한 용도의 건축물에 이미 널리 사용되는 조립식 공법이다. 최근 국내에서도 건설현장에

서의 인건비 상승, 공기단축 및 재사용이 용이한 건축물에 대한 요구, 친환경 건축물에 대한 요구 등으로 인하여 유닛 모듈러 건축물의 도입에 대한 요구가 증가하고 있는 상황이다.

본 연구의 모듈러 시스템은 해체·조립이 용이한 골조로 공장에서 골조 제작 후 현장에 반입하여 주골조 조립 및 외벽과 내장재의 마감, 천장 및 부품을 설치하여 단위 유닛을 형성하며 모듈러간 연결을 통해 조립 및 시공이 완료된다. 현재 대부분의 모듈러 공법은 주구조체 기둥과 보가 용접으로 접합되어 유닛 자체의 해체·조립은 어려운 상태이다.

* 영남대학교 건축학부 박사수료

** 정희원·영남대학교 건축학부 부교수, 공학박사

*** 교신저자, 정희원·영남대학교 건축학부 교수, 공학박사

Tel : 053-810-2428 Fax : 053-815-1566

E-mail : zsl1978@hanmail.net

따라서 도로나 운송조건이 제약을 받는 상황에서 단위 유닛을 해체·조립할 필요성이 발생한다. 이러한 모듈러공법을 시스템화하기 위해서는 기존의 기둥과 보의 용접방식이 아닌 볼트접합 형식이 필요하다. 골조의 경우 라멘조와 브레이스 구조를 사용할 수 있다. 라멘구조는 수평력을 부재의 휨 저항으로 부담시키는 구조 형식으로 기둥과 보의 강접합이다. 휨재의 접합이므로 변형하기 쉽고 층간 변형각은 커지지만 지진에너지 흡수능력은 크다. 한편 브레이스구조는 수평력의 전체 또는 일부를 브레이스에 부담시키는 구조형식으로 이 브레이스에는 인장력 또는 압축력의 축방향력이 작용하고 휨응력은 작용하지 않는다. 한편 부재 접합부는 핀 접합이므로 철골가공은 비교적 쉬우나 브레이스가 들어가므로 접합부 설계는 번거롭고 디자인이나 개구부가 제약을 받는다.

현재 대부분의 경량형강은 주부재가 아닌 2차부재(purlin, girt등)로 사용되고 있으며 접합 형식도 강접합이 아닌 핀접합(pin joint)으로 되어있다.

본 연구를 통하여 해체·조립형 모듈러를 구성하는 주구조체인 각형강관 기둥과 냉간성형 LEB C형강 보로 구성된 접합부를 강접합으로 라멘조를 형성하였을 경우 접합부의 내력변화와 변형성상 및 파괴모드 등의 거동을 평가하고자 실험연구를 수행하였다. 이를 통하여 향후 공장 대량 생산이 가능한 해체·조립 모듈러 골조의 기둥-보 접합부에 대한 효율적인 설계가 가능한 기초적인 자료로 활용하고자 한다.

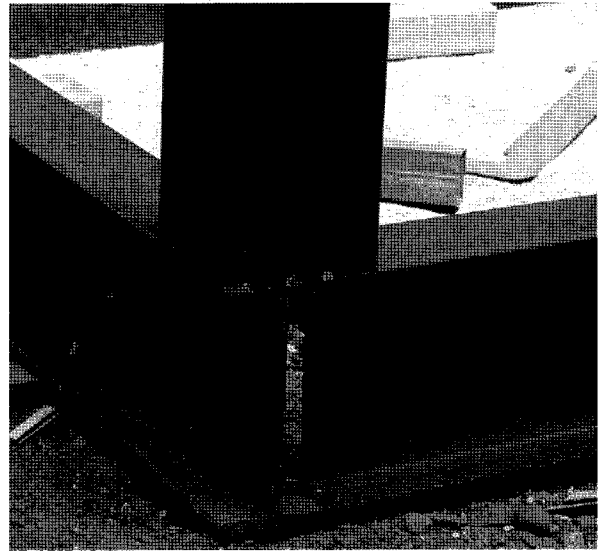
2. 실험

2.1 기존의 접합부 형식

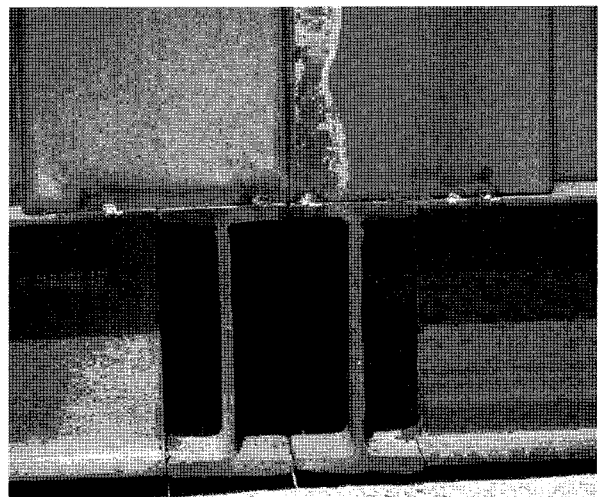
모듈러 건축에 관련하여 일본, 미국에서 연구가 활발히 진행된 상태이며 기둥과 보의 접합부 형식도 다양하다<그림 1, 2>.

골조시스템은 라멘조를 많이 사용하고 기둥부재는 H형강을 사용하고 있는 것도 있지만 대부분 각형강관을 사용하고 보부재는 H형강을 많이 사용하였으며 보 단부에 엔드 플레이트(end plate)를 용접한 것이 많다.

현재 각형강관과 냉간성형강을 주구조체로 용접



<그림 1> 기존 접합방식-1



<그림 2> 기존 접합방식-2

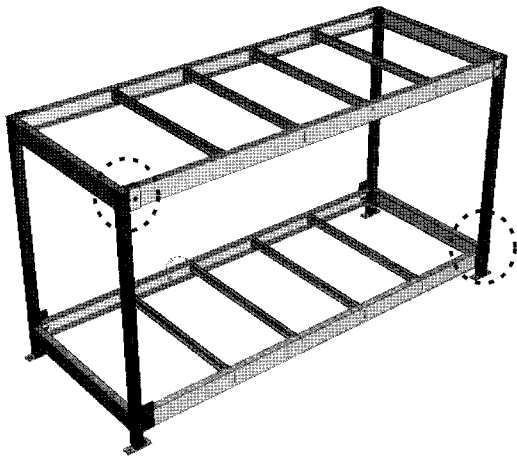
을 통한 실험은 있으나 볼트를 사용하여 주구조체를 접합부를 형성한 연구는 많지 않다. 따라서 본 연구에서는 각형강관 기둥과 냉간성형강 보의 볼트 접합부의 실험을 통하여 접합부의 강성 및 내력을 평가하고자한다.

2.2 실험체 계획

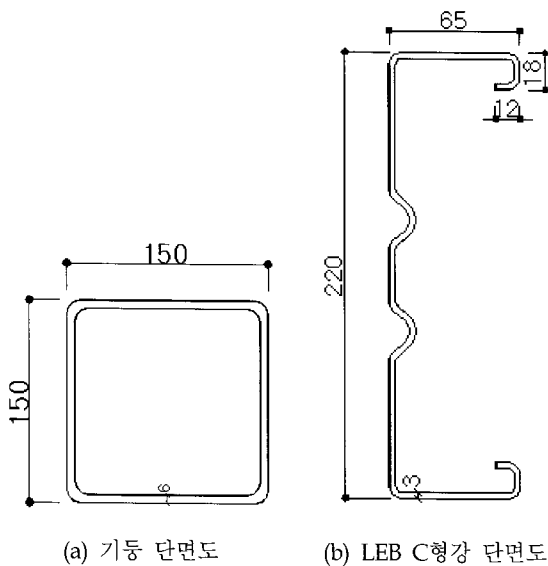
각형강관 기둥과 냉간성형 LEB C형강 보로 볼트 접합된 접합부에 대한 실험체는 단위유닛 골조 중에서 바닥 보와 기둥과의 접합부 및 천장 보와 기둥과의 접합부<그림 3>를 실험 대상으로 설정하였으며 사용된 부재 사이즈는 <표 1>과 같다.

<표 1> 주구조체 부재사이즈

구분	부재사이즈	재질
기둥	□-150x150x6.0	SPSR400
보	C-220x65x18x12x3.0	SGH400
고력볼트	M16	F10T



<그림 3> 본 연구 모듈 형상



<그림 4> 주구조체 단면형상

기둥-LEB C형강 보의 접합부에 대한 실험체 일람과 실험체 형상은 각각 <표 2>와 <그림 5-9>에 상세히 나타내었다. 접합부 시험체의 주요변수로는 브라켓 플랜지(Flange)와 LEB C형강 플랜지

(Flange) 접합부 볼트개수 및 브라켓에 사용된 플레이트 두께로 구분하여 2가지 TYPE으로 분류하고, 브라켓 두께와 플랜지 볼트 수량이 접합부거동에 미치는 영향을 확인하고자 LEB C형강의 단면크기를 일정하게 제작하였다. 실험체에서 기둥의 길이는 보에 압축력을 가력했을 때 기둥의 휨변형이 발생하지 않도록 하였으며, 길이는 구조실험동 모듈치수와 일치시켰다. 또한, LEB C형강 보의 길이는 실험체 설치와 유압식 오일잭의 길이에 영향을 받지 않도록 하였으며, 비대칭 단면 보의 국부좌굴과 비틀림을 최대한 방지하기 위한 길이를 설정하여 제작하였다.

<표 2> 시험체명

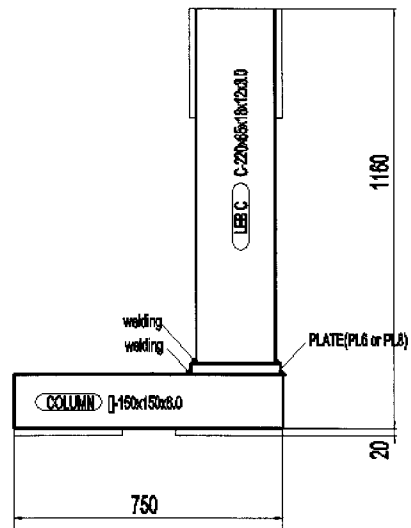
시험체명	브라켓 두께 (mm)	Flange		Web	
		고력볼트 개수 (EA)	지름 (mm)	고력볼트 개수 (EA)	지름 (mm)
CB1	6T	x	x	x	x
LCF2W2	6T	2	16	2	16
LCF3W2	6T	3	16	2	16
CB2	8T	x	x	x	x
LCF2W2A	8T	2	16	2	16
LCF3W2A	8T	3	16	2	16

CB1, CB2 : 용접접합형 시험체

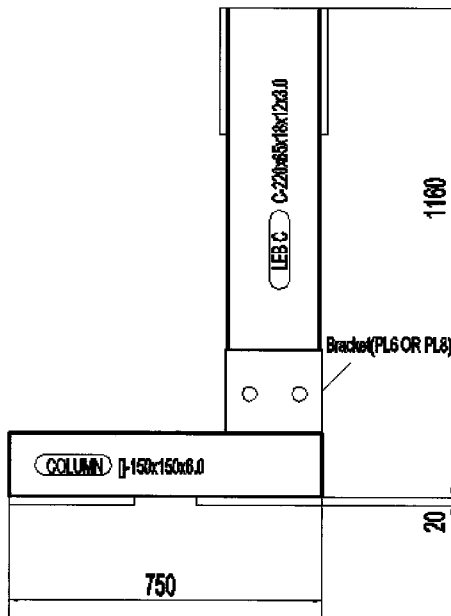
LC: LEB C형강

F2, W2: F는 플랜지, W는 웨브; 수치는 고력볼트 개수 표시

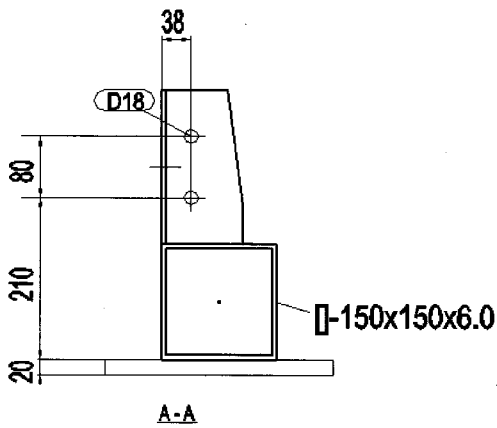
A: 브라켓 플레이트 두께가 8T인 시험체



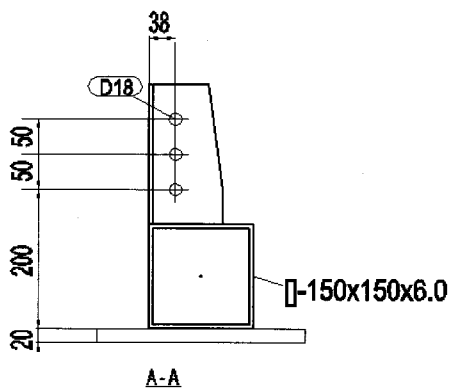
<그림 5> CB계열 시험체



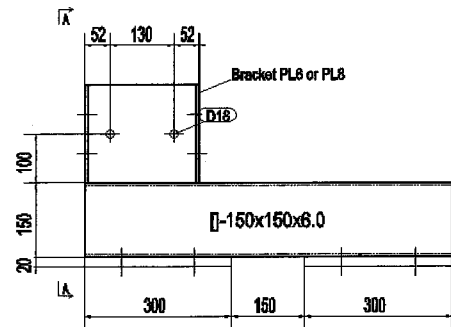
〈그림 6〉 LCF2W2계열 시험체-1



〈그림 7〉 LCF2W2계열 시험체-2



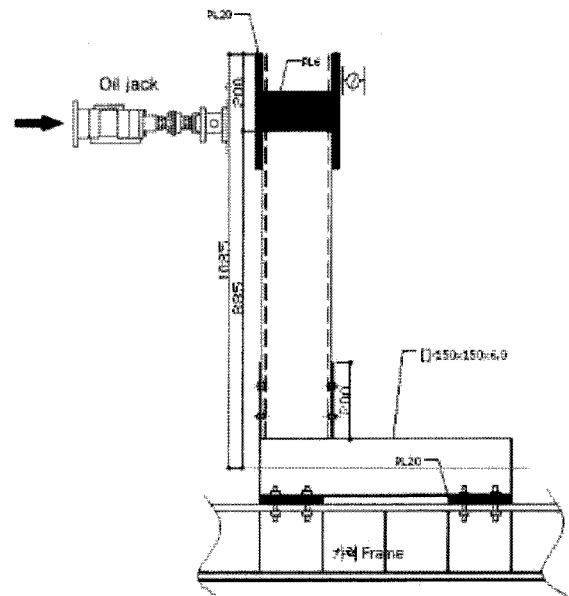
〈그림 8〉 LCF3W2계열시험체-1



〈그림 9〉 LCF3W2계열시험체-2

2.3 가력 및 측정방법

접합부의 하중 가력방법은 <그림 10>과 같이 기둥 양 단부를 고정용 핀 플레이트의 상부 위에 올려 놓고 접합된 기둥-보에서 LEB C형강 보에 제작된 가력판 중심부에 20ton 오일잭으로 압축력을 가하는 단조 재하 방법을 이용한다. 가력위치 LEB C형강이 집중하중을 받아 먼저 파괴되는 것을 방지하기 위하여 플레이트로 보강하였다. 하중 가력은 기둥-LEB C형강 보의 접합부에 항복현상이 나타나거나 기둥과 보 부재의 파괴 이후 하중이 계속적으로 증가하여 실험체가 심한 국부변형으로 더 이상 가력하기에 불안정한 상태가 되었을 때 종료하였다.



〈그림 10〉 시험체 가력 및 계측상황

접합부의 하중 및 변형도 측정은 <그림 10>에 나타난 바와 같이 가력위치에 로드셀을 설치하여 측정하였고, 보의 처짐을 측정하기 위하여 50mm 변위계(LVDTs)를 가력 보의 상단부에 부착하여 측정하였다.

3. 실험결과 분석 및 고찰

3.1 하중-변위 곡선 및 파괴형태

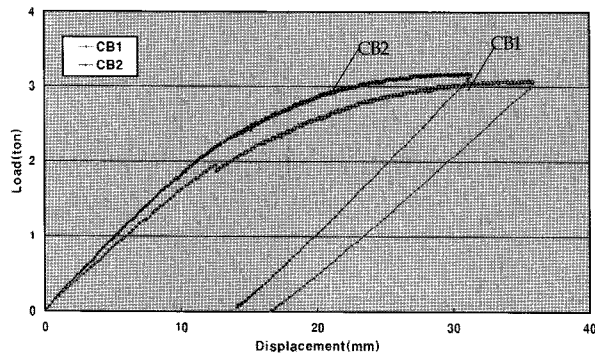
각 시험체의 하중-변위결과를 표3과 같이 정리하였다. 항복하중은 실험과정에서 비틀림이 발생하는 시점에서 하중을 기록하여 정리하였다.

<표 3> 접합부 시험체 하중-변위 관계

시험체명	브라켓두께 (mm)	항복하중 (ton)	최대하중 (ton)	최대변위 (mm)
CB1	X	2.169	3.015	29.2
LCF2W2	6	2.323	3.168	34.6
LCF3W2	6	2.071	3.615	34.2
CB2	X	2.242	3.188	31.0
LCF2W2A	8	2.502	3.421	34.7
LCF3W2A	8	2.117	3.081	30.3

3.1.1 용접형(CB계열) 시험체

CB계열의 시험체는 LEB C형강을 기둥에 용접한 TYPE으로 브라켓 두께가 큰 CB2시험체에서 하중이 크게 나왔으며 그 차이는 크지 않게 나타났다. 파괴모드는 LEB C형강의 좌굴파괴로 나타났다.

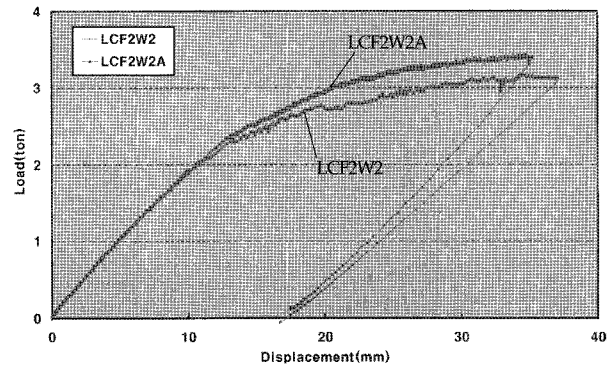


<그림 11> CB계열 시험체 하중-변위곡선

3.1.2 LCF2W2계열 시험체

LCF2W2계열의 시험체는 LEB C형강을 기둥에 볼트 접합한 TYPE으로 브라켓과 LEB C형강 플랜지(Flange)

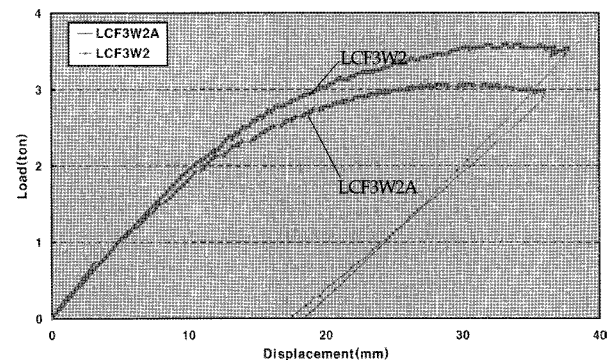
에 M-16고력볼트 2개를 사용하여 체결하였고 웹(Web)에는 M-16고력볼트를 2개 사용하여 체결하였다. 실험결과 LCF2W2A시험체 항복하중은 2.502ton으로 LCF2W2 시험체의 항복하중 2.323ton보다 크게 나타났다. 파괴모드는 LEB C형강의 좌굴파괴로 나타났다.



<그림 12> LCF2W2계열 시험체 하중-변위곡선

3.1.3 LCF3W2계열 시험체

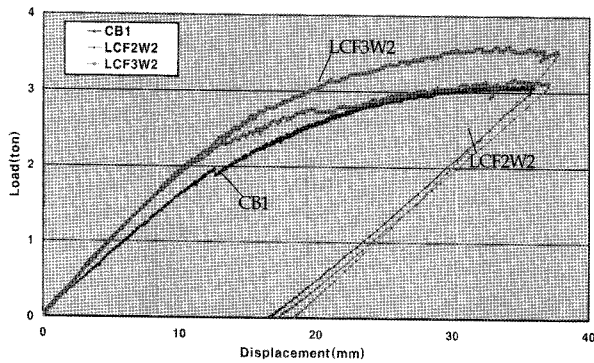
LCF3W2계열의 시험체는 브라켓과 LEB C형강 플랜지(Flange)에 M-16고력볼트 3개를 사용하여 체결하였고 웹(Web)에는 M-16고력볼트 2개를 사용하였다. 실험결과 LCF2W2계열과 동일하게 브라켓 두께가 큰 LCF3W2A시험체에서 항복하중이 크게 나타났다. 파괴모드는 LEB C형강의 좌굴파괴와 접합부 근처에서 국부좌굴 파괴<그림 16>로 나타났다.



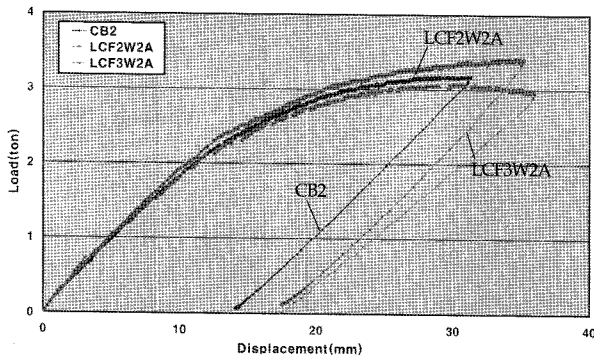
<그림 13> LCF3W2계열 시험체 하중-변위곡선

3.1.4 브라켓 두께별 시험체 비교

<그림 11~13>의 하중-변위 관계에서 보는바와 같이 접합부 브라켓의 두께가 증가할수록 접합부의 내력이 증가하는 것으로 나타났다. 브라켓 두께가 6T일 경우 플랜지쪽 볼트수량에 따라 최대내력이 증가하나 8T일 경우 오히려 작게 나왔다.<그림 14~15>.



<그림 14> 브라켓 두께 6T계열 시험체



<그림 15> 브라켓 두께 8T계열 시험체

<표 4> 허용처짐 발생 시 작용하중 · 항복하중 비교

시험체명	브라켓두께 (mm)	작용하중 (ton)	항복하중 (ton)	A/B (%)
		A	B	
CB1	X	0.692	2.169	32
LCF2W2	6	0.864	2.323	41
LCF3W2	6	0.842	2.071	41
CB2	X	0.817	2.242	36
LCF2W2A	8	0.833	2.502	33
LCF3W2A	8	0.813	2.117	38

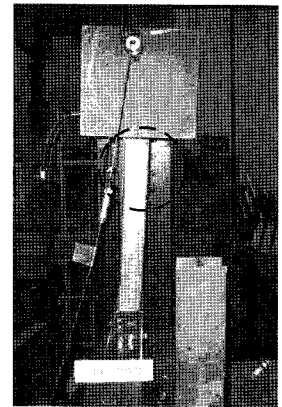
시험체의 허용처짐 발생 시 작용하중은 항복하중의 30%~40%정도에 불과하여 항복할 때까지의 여력이 상당히 남아 있는 것으로 나타났다<표 4>.

실험체의 하중-변위 관계 곡선에서 보는바와 같이 접합부에서 초기변형이 발생한 이후 기둥-보 접합부의 파괴 없이 LEB C-형강 보의 국부좌굴로 인하여 내력이 결정되었다. 실험과 같이 LEB C-형강 보의 비틀림좌굴에 의해 강도가 지배되는 것으로

파악되었으며, 브라켓 두께 8T에 플랜지 부분에 볼트 2개를 사용하는 것이 내력이나 강성면에서 접합부 사용에 적절할 것으로 판단된다. <그림 16~17>에는 실험 중에 관찰된 기둥-보 접합부의 주요 파괴 형태인 비틀림좌굴 변형 형상을 나타내었다.



<그림 16> 국부좌굴



<그림 17> 좌굴파괴

3.2 접합부 휨강성 및 보의 허용 휨모멘트

접합부의 회전각은 보부재에 부착된 변위측정기 D1의 변위값을 기둥부재중심과 가력지점과의 거리로 나누어 계산하였다.

$$M = P \times l$$

$$\theta = \delta / l$$

여기서,

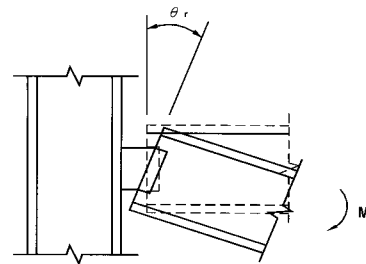
P : 가력하중

l : 기둥부재의 중심과 가력지점과의 거리

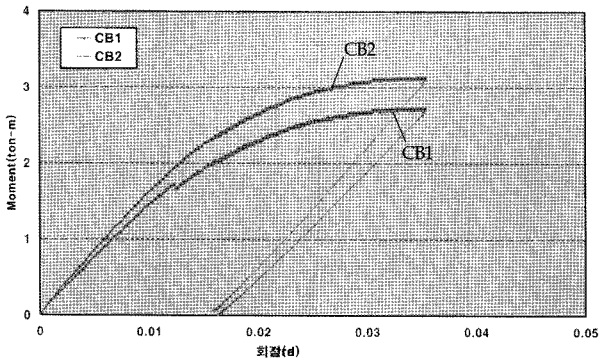
θ : 접합부 회전각

δ : 변위측정기(D1)의 변위

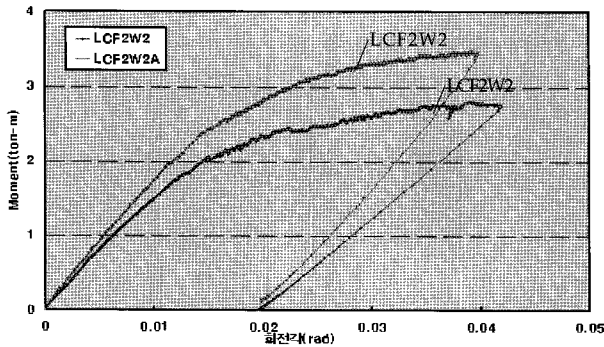
모멘트-회전각 관계를 <그림 18>에 나타내고 있다.



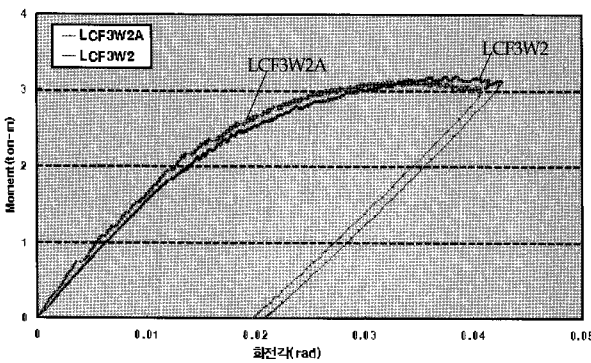
<그림 18> 모멘트-회전각 관계도



<그림 19> CB 계열 모멘트-회전각곡선



<그림 20> LCF2W2 계열 모멘트-회전각곡선



<그림 21> LCF3W2 계열 모멘트-회전각곡선

<표 5>에 나타난 바와 같이 볼트접합 형상을 갖는 시험체와 용접형 시험체는 비슷한 초기 휨강성을 가지며 브라켓 두께와 플랜지 볼트수량 증가에 따라 초기 강성과 내력에 차이가 있으나 그 차이가 크지 않는 것으로 나타났다. 이는 LEB C-형강 보의 비틀림좌굴로 인하여 파괴모드가 지배되었기 때문으로 판단된다. 따라서 볼트접합으로도 모듈러 빌딩에 사용에 가능할 것으로 판단된다.

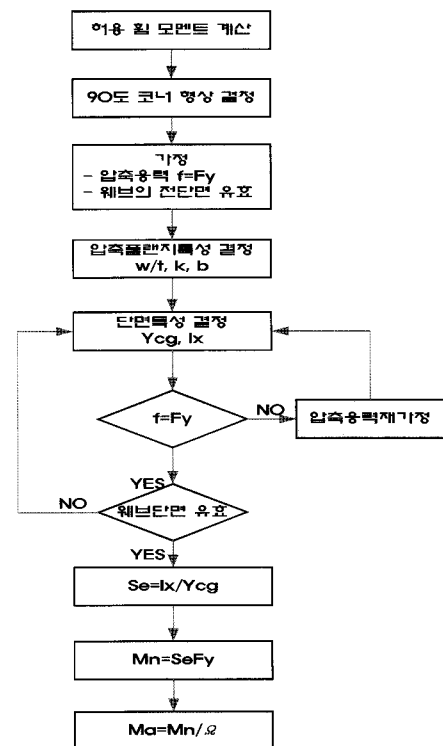
<표 5> 접합부 모멘트·회전각 관계

시험체명	M_y	M_u	M_u/M_y
	(ton·m)	(ton·m)	
CB1		1.854	
LCF2W2	2.056	2.804	1.364
LCF3W2	1.833	3.199	1.745
CB2	1.984	2.821	1.422
LCF2W2A	2.214	3.028	1.368
LCF3W2A	1.874	2.727	1.455
LCF3W2A	2.117	2.483	0.85

<표 6> AISI이론하중과 실험값 비교

시험체명	실험값	AISI Mn	A/B
	(ton)	(ton)	
CB1	2.169	2.483	0.87
LCF2W2	2.323	2.483	0.94
LCF3W2	2.071	2.483	0.83
CB2	2.242	2.483	0.90
LCF2W2A	2.370	2.483	0.95
LCF3W2A	2.117	2.483	0.85

<표 6>과 같이 실험에서 항복하중값이 AISI의 공칭값의 0.83%~0.95%정도 나타나고 있는데 이는 LEB C형강의 좌굴로 인해 하중이 다소 적게 나온 것으로



<그림 22> 휨모멘트 계산 절차

판단된다. 실험에서 접합부의 지배파괴모드가 LEB C-형강 보의 좌굴로 나타났기 때문에 Cold-Formed Steel Structures to the AISI Specification의 허용응력설계법에 의해 LEB C-형강 보의 횡좌굴 강도를 검토하였다. 계산 절차는 <그림 22>와 같다.

$$M_a = \frac{M_n}{\Omega_f} \quad (1)$$

$$M_n = M_y = S_e F_y \quad (2)$$

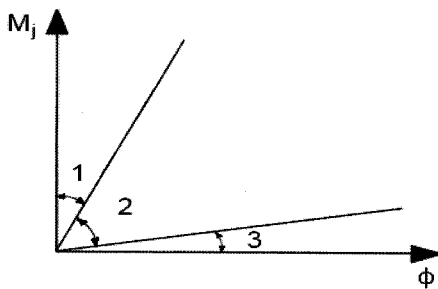
- k : 판재 좌굴 계수
- F_y : 설계항복강도
- S_e : 탄성단면 계수
- M_n : 공칭 휨 모멘트
- M_a : 허용 휨 모멘트
- Ω_f : 휨재의 안전율(1.67)

3.3 접합부 분류

Eurocode 3: Design of steel structures Part1.8: Design of Joints의 강성에 의한 접합부 분류 방법은 <표 7> 및 <그림 23>과 같다.

<표 7> 강성에 의한 접합부 분류

구분	Type
Rigid Joints	Zone 1
Nominally Pinned Joints	Zone 2
Semi-Rigid Joints	Zone 3



<그림 23> 강성에 의한 접합부 분류

- Zone 1: 강접합, $S_{j,ini} \geq k_b EI_b / L_b$; $k_b=8$ 브레이스 구조물

$k_b=25$ 기타 frame($K_b/K_c \geq 0.10$)

Zone 2: 반강접 ;

Zone 3: 편, $S_{j,ini} \leq 0.5 EI_b / L_b$

*) $K_b/K_c < 0.1$ 골조인 경우 접합부는 반강접으로 분류됨.

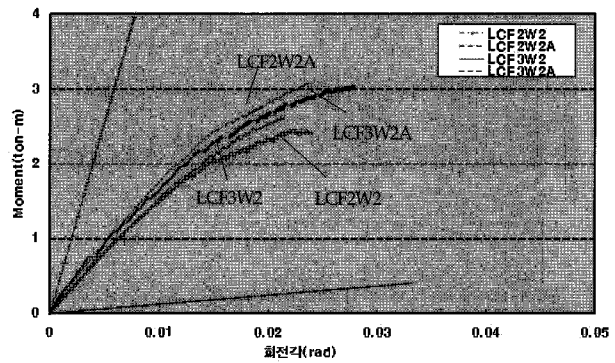
$$K_b = I_b / L_b ; K_c = I_c / L_c$$

I_b : 보의 단면2차모멘트

I_c : 기둥의 단면2차모멘트

L_b : 보의 길이(기둥 중심사이 거리)

L_c : 기둥 높이



<그림 24> 접합부 강성평가

<그림 24>와 같이 각 시험체의 초기 강성은 핀접합과 강접합 사이에 있는 70%정도의 강접성질을 가지는 것으로 나타났다. 따라서 기둥과 LEB C형강을 볼트접합으로 할 경우 반강접성질을 가지며 모듈러빌딩에 적용 시 이를 고려한 접합부 설계가 되어야 한다.

4. 결 론

- 1) 주요 접합형상인 브라켓형은 접합부의 파괴 없이 LEB C-형강보의 국부좌굴로 인한 비틀림좌굴에 의해 강도가 지배되는 것으로 파악되었다.
- 2) 접합부 형상에 따른 비교 결과, 용접형에 비해 볼트접합형이 내력측면이나 강성 측면에서 비슷하게 나타났으며 이는 용접형이 접합부에서 브라켓형보다 강성이 작아서 나타난 것으로 판단된다.
- 3) 실험값과 AISI에 의한 LEB C형강 보의 횡좌굴

- 강도 값의 비는 0.83~0.95로 실험값이 적게 나왔는데 이는 비틀림좌굴 때문에 발생한 것으로 판단되며 내력면에서 충분한 것으로 판단된다.
- 4) 실험결과 브라켓 두께 8T에 플랜지 볼트개수 2개를 사용하는 것이 내력이나 강성면에서 접합부 사용에 적절할 것으로 판단된다.
 - 5) Eurocode 3의 강성에 의한 접합부 분류 방법에 의하여 볼트접합으로 70% 정도의 강접 성질을 가지는 것을 알 수 있으며 모듈러 빌딩에 적용 시 이를 고려한 접합부 설계가 되어야 한다.

1999.

2. American Iron and Steel Institute., Specification for the Design of Cold-Formed Steel Structural Members. 1996 edition.
3. Eurocode 3: Designing of steel structures. 2002.
4. Hancock, G.J., Design of Cold-Formed Steel Structures 2nd edition Australian Institute of Steel Construction. 1998.
5. Yu, Wei-Wen., Cold-Formed Steel Design, 2nd edition, John Wiley & Sons, 1991.

참고문헌

1. 대한건축학회, 냉간성형강 구조설계기준 및 해설,