

# SHN 형강 보-기둥 접합부의 내진성능 평가

## Seismic Performance Evaluation of Welded Beam-Column Connections Fabricated with SHN Steel Sections

김 태 진<sup>1)</sup> · 박 종 원<sup>2)</sup> · 조 정 혁<sup>3)</sup> · 김 희 동<sup>4)</sup>  
*Kim, Tae Jin Park, Jong Won Cho, Jeong Hyuk Kim, Hee Dong*

**요 약 :** 국내 현실에 적합한 내진 접합부 상세 개발과 평가를 위하여 국내 중저층 철골건물에 적용되는 단면을 갖는 보와 기둥으로 구성된 접합부 실험체를 선정하여 반복재하 실험을 수행하였다. 실험변수는 접합부 형식과 강종이며 새로 개발된 내진용 형강(SHN490)과 기존 형강(SM490)의 성능 차이를 비교하였다. 소재인장시험결과에 의하면 SHN490 형강의 항복강도와 인장강도의 분포는 SM490형강의 분포보다 균일한 것으로 평가되었다. 접합부 실험체의 용접부에서의 취성파괴는 관찰되지 않았고 소정의 소성변형 능력을 발휘한 후 보 플랜지의 열영향부나 용접접근공의 응력집중부위에서 파단이 발생하였다. 동일한 강종으로 구성된 실험체의 경우, 보의 웨브가 볼트에 의하여 기둥에 연결된 접합부(WUF-B)보다는 용접에 의하여 연결된 접합부(WUF-W)의 회전과 에너지 소산능력이 더 컸다. 또한 동일한 접합부 형식의 실험체에서는 SM490 형강으로 구성된 실험체보다는 SHN490 실험체의 회전과 에너지 소산능력이 더 컸다.

**ABSTRACT :** In this study, cyclic tests of beam-column connections composed with members applicable to the domestic low-middle rise steel buildings were conducted to develop seismic connection details and its evaluation. Connection types and material properties of the steel were testing variables and the difference between the newly developed seismic rolled section (SHN490) and existing rolled section (SM490) was also investigated. Distributions of the yield strength and the ultimate strength of the SHN490 rolled section were relatively uniform comparing to those of the SM490 rolled section. Brittle fracture in the weldments of the test specimens was not observed. Instead, fracture occurred at heat-affected zones or the stress-concentrated point near the weld access hole of the beam flanges. In the case of identical rolled-section specimens, the rotational capacity and dissipated energy of the WUF-W connection was larger than those of the WUF-B connection. In the case of identical connection types, the rotational capacity and dissipated energy of the SHN490 section connection was larger than those of the WUF-B section connection.

**핵심용어 :** 보-기둥 접합부, 내진성능, 반복재하실험, SHN 형강, 취성파단

**KEYWORD :** beam-to-column connection, seismic performance, cyclic test, SHN rolled section, brittle fracture

### 1. 서론

철골접합부의 내진성능을 향상시키기 위해서는 일차적으로 용접부에서의 취성파괴를 방지할 필요가 있다. 1994년 미국 노스리지 지진과 1995년 일본 고베지진을 통하여 철골접합부에 대한 다양한 연구가 수행되어 철골접합부의 취성파괴를 효율적으로 제어할 수 있는 기술이 개발되었다. 이러한 기술은 소성현지의 위치를 보와 기둥이 면하는 위험단면위치에서

상대적으로 안전한 보 내부로 이동시키는 시스템적인 접근방법과 강재나 용접금속 등의 재료적 취약성과 용접상세의 개선을 통한 재료적 접근 방법으로 크게 나누어 볼 수 있다. 시스템적인 접근방법은 보의 플랜지를 일부 절취(RBS)하거나 커버플레이트(WCPF)나 헌치(WTBH)를 사용하여 용접부와 같은 위험단면에서의 응력을 제한하여 취성파괴를 미연에 방지할 수 있으므로 미국과 같은 강진지역에 널리 사용되고 있다. FEMA 350(2000)에서는 WUF-B나 WUF-W와

1) 성균관대학교 건축공학과 조교수, 공학박사(taejin@skku.edu)

2) 교신저자, 홍익대학교 건축공학과 교수, 공학박사

(Tel. 041-860-2607, Fax. 041-862-9759, E-mail: jwp@hongik.ac.kr)

3) 성균관대학교 대학원 건설환경시스템공학과, 석사과정(letsgoii@lycos.co.kr)

4) (주)현대제철 기술영업팀 과장, 공학박사(drkimhd@hyundai-steel.com)

본 논문에 대한 토의를 2009년 6월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

같은 비보강 철골접합부 상세도 제시하고 있다. 특히, WUF-W와 같은 상세는 특수모멘트 골조에 적용될 수 있다.

국내와 같은 중약진지역에서는 지진하중보다는 중력하중이나 풍하중에 의하여 구조설계가 지배되어 구조물의 초과강도가 증가하게 되므로 중간모멘트 골조를 적용하는 것이 경제 적일 수 있다. AISC 내진규정(2005)에 의하면 특수모멘트 골조는 4%의 층간변위에, 중간모멘트 골조는 2%의 층간변위에 대하여 안정적으로 변형을 할 수 있어야 한다. 미국의 경우 인건비상승에 따른 건축구조물의 경제성 확보를 위하여 보-기둥 접합부를 모두 모멘트 접합으로 하지 않고 건물의 외곽부 골조만을 내진저항 골조로 사용하기 때문에 내진 접합부의 구성요소인 보와 기둥의 크기가 모든 접합부를 모멘트 접합부로 시공하는 국내의 관행에 의한 부재의 크기보다 더 크다. 따라서 미국에서 수행되었던 실험결과를 국내에 그대로 적용하기에는 불합리한 점이 존재한다. 또한 보 플랜지와 기둥의 용접에 있어서도 미국의 경우에는 현장용접을 선호하고 있지만 국내의 경우에는 공장에서 사전에 보의 일부와 기둥을 용접하는 방식이 적용되고 있기 때문에 이에 대한 고려도 필요하다.

이철호 등(1998)에 의하여 수행된 국내 관행에 따른 보-기둥 접합부에 대한 실험대 실험 결과에 의하면 용접부에서의 직접적인 취성파괴가 목격된 미국에서의 지진피해 사례나 실험결과와는 달리 응력집중에 의한 보 플랜지 열영향부에서의 파단이 발생한 것으로 보고되었다. 이러한 파단형태는 상대적으로 작은 단면의 보와 기둥을 사용한 김종락 등(1998)과 이승준 등(1999)의 실험연구에서도 관찰된 바 있다.

취성파괴의 한 요인으로 평가되고 있는 강제 항복강도의 증가를 제한하기 위하여 미국에서는 A992강재와 일본에서는 SN강재가 내진요소에 적용되고 있다. 이 강재들은 강제 항복강도의 하한치뿐만 아니라 상한치를 규정하여 용접부가 취성파괴에 이르기 전에 모재가 항복하도록 하는 것을 주 목적으로 하고 있다. 국내에서는 내진 목적으로 사용할 수 있는 건축구조용강재(SN490, SHN490)가 개발되어 양산체제에 있다. SHN강은 강재의 화학성분과 항복비, 탄소당량, 용접 균열 감수성 조성 등에 엄격한 제한값을 규정한 압연형강재이다. SHN강을 사용한 보-기둥 접합부에 대한 기존 실험은 보 축이 350mm인 비교적 작은 단면에 대한 단순재하실험이었고, 실제로 내진요소에 사용되는 단면크기에 대한 반복재하 실험을 수행되지 않았었다.

본 연구의 목적은 강구조 내진기준(안)(2007)에서 제시한 중간모멘트 골조에 대한 규정의 적절성 여부와 일반 형강(SM490)과 내진용 형강(SHN490)의 성능차이를 검증하는 것이다. 두 가지 접합상세, WUF-B(플랜지용접-웹볼팅)와

WUF-W(플랜지용접-웹용접), 각각에 대하여 SM490 형강과 SHN490 형강으로 이루어진 보-기둥 접합부 실험대 실험체를 제작하여 강구조 내진기준(안)에서 제시된 인증실험 절차에 따라 실험을 수행하여 내진용 강재 사용의 효율성을 검증하고자 하였다.

## 2. 실험계획

### 2.1 실험체의 설계 및 제작

기존 구조용 강재와의 성능비교를 위하여 SM490형강과 SHN490형강을 2가지 접합방법으로 분류하여 표 1과 같이 총 4개의 실험체를 선정하였다. 실험체 JR1과 JR2는 보의 웹과 기둥이 볼트에 의하여 접합된 WUF-B 형식 접합부이며 JR1의 보와 기둥은 SM490형강, JR2의 부재는 SHN490형강으로 구성되어 있다. 실험체 JR3와 JR4는 보의 웹과 기둥이 용접에 의하여 접합된 WUF-W 형식 접합부이며 JR3의 보와 기둥은 SM490형강, JR4의 부재는 SHN490형강으로 구성되어 있다. 중저층 철골건물에 주로 사용되는 보의 축인 600mm를 기준으로 하여 용접에 의한 변형구속의 효과가 최대가 될 수 있는 보 플랜지의 두께를 고려하여 보를 선정하였다. 그리고 기둥의 경우에는 강기둥-약보의 조건을 만족할 수 있는 단면을 선정하였다. 국내 관행상 보의 일부를 기둥에 미리 접합하는 컬럼-트리 형식이 사용되지만 대상 실험체에서는 보 볼트 이음부에서의 미끄러짐에 대한 영향을 배제하기 위하여 보 이음없이 단일 보 부재를 기둥에 공장용접하였다.

그림 1과 2는 실험체 JR1과 JR3의 접합상세를 각각 보여주고 있다. 두 실험체는 보 웹과 기둥 플랜지와 접합방식이 외에는 동일한 상세를 갖는다. 실험체 JR1과 JR2는 6개의 M20 고력볼트에 의하여 보의 웹과 기둥에 용접되어 있는 전단판에 연결되어 있는 반면에, JR3와 JR4는 가조립을 위하여 3개의 M20 고력볼트에 의하여 일차적으로 보와 기둥에 연결된 후 보의 웹단부와 기둥사이를 용접에 의하여 접합하였다. 네 실험체 모두 보의 플랜지는 기둥에 완전용입용접(CJP)에 의하여 접합하였다. 플랜지의 용접을 위하여 보 웹의 상하부에 형성된 용접접근공은 응력집중을 최소화할 수 있는 형상으로 가공되었다. 또한 뒷담재를 제거하지 않고 그대로 존치해 두었다.

표 1. 보-기둥 접합부 실험체 일람

Specimen	Connection Type	Steel	Section Size (mm)	
			Beam	Column
JR1	WUF-B	SM490	H-612×202×13×23	H-414×405×18×28
JR2		SHN490		
JR3	WUF-W	SM490		
JR4		SHN490		

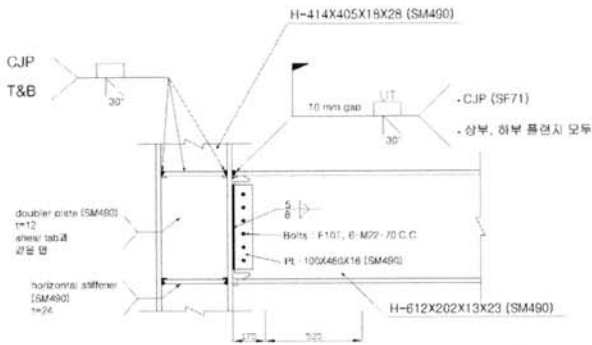


그림 1. 실험체 JR1의 상세

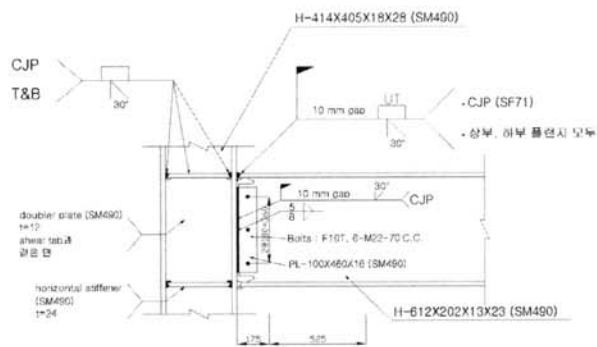


그림 2. 실험체 JR3의 상세

수평 스티프너는 보 플랜지의 두께와 동일하게 하여 기둥 플랜지의 국부적인 변형을 방지하였다. 패널존의 전단변형에 의한 영향을 최소화할 수 있도록 패널존 보강판을 추가로 설치하였다. 패널존 보강판의 경우 폭두께비를 검토하여 플러그 용접이 없이 패널존 보강판 주변만을 용접하여 기둥의 웨브에 부착하였다. AISC 내진규정(2005)에 의하면 기둥 웨브와 패널존 보강판이 다음의 (1)식을 만족하면 플러그 용접에 의해 두 개의 판을 서로 접합할 필요가 없다.

$$t > (d_z + w_z) / 90 \quad (1)$$

여기서  $t$  = 기둥 웨브 또는 패널존 보강판의 두께,  $d_z$  = 연속판 사이의 패널존의 춤,  $w_z$  = 기둥 플랜지 사이의 패널존 폭을 각각 나타낸다. 본 실험체의 경우 패널존 보강판의 두께가 12mm로 규정에서 요구하고 있는 10.2mm를 초과하므로 보강판 내부에 플러그 용접을 수행하지 않았다.

## 2.2 실험 장치, 가력 및 계측

그림 3은 본 실험에 사용된 실험 셋업을 보여주고 있다. 접합부 실험체를 수직방향으로 세워 기둥의 양단을 힌지로 반력벽에 부착하였고 유압가력기를 보 단부에 연결하였다. 기둥면에서 하중작용점까지의 보길이는 3.6m이고 기둥높이는 3.5m이었다. 또한 보의 횡좌굴을 방지하기 위하여 반력벽면에서부터 4.3m 떨어진 위치에 횡지대대를 설치하였다.

가력은 2000kN 용량의 Actuator를 사용하였고 가력프로그램은 AISC 내진규정(2005)에 제시된 재하이력을 이용하였다. 층간 변위비 0.375% (6cyc.)에서 시작하여 0.5% (6cyc.), 0.75% (6cyc.), 1.0% (4cyc.), 1.5% (2cyc.), 2.0% (2cyc.), 3.0% (2cyc.), 4.0% (2cyc.), 5.0% (2cyc.) 까지 반복가력을 하였다. 하중가력은 변위제어로 가력속도는 표 2와 같이 각 사이클별로 증가시키면서 보 플랜지에 파단이 발생할 때까지 가력하였다.

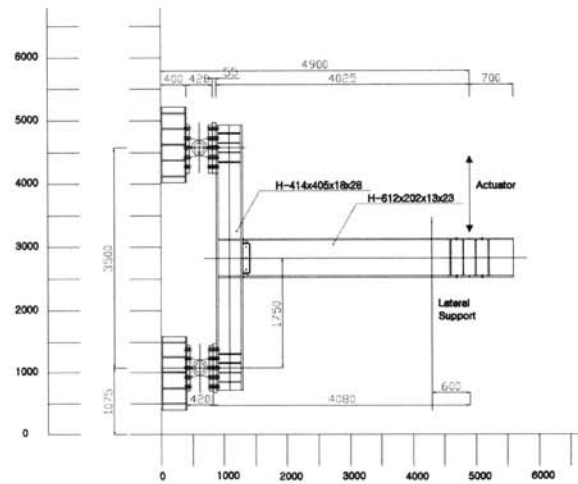


그림 3. 실험체 셋업

실험체의 거동을 평가하기 위하여 실험체에는 그림 4와 같이 5개의 변위계를 설치하였다. 보 단부의 변위를 측정하기 위하여 가력점 위치에 줄 변위계를 설치하였고, 패널존의 변형과 기둥의 변형을 계측하기 위하여 4개의 100mm 변위계를 기둥에 설치하였다.

표 2. 하중가력 일람

Step	No. of Cycles	Interstory Drift (%rad)	Loading Rate (mm/sec)
1	6	0.375	0.2
2	6	0.5	0.4
3	6	0.75	0.6
4	4	1.0	0.6
5	2	1.5	0.6
6	2	2.0	0.8
7	2	3.0	0.8
8	2	4.0	1.0
9	2	5.0	1.0

실험체의 국부적인 응력분포를 평가하기 위하여 그림 5와 같이 12개의 일축 변형률 게이지와 5개의 삼축 변형률 게이지를 실험체에 부착하였다. 예상 소성흔지 위치에서의 보 플랜지 변형률을 측정하기 위하여 상하부 보 플랜지 각각에 3개의 일축 게이지가 기둥면으로부터 35mm떨어진 위치에 부착되었고 추후 유한요소해석 수행결과를 검증하기 위하여 탄성적인 거동이 예상되는 보 플랜지 위치에 1개씩의 일축 게이지가 부착되었다. 또한 연속판의 변형률 검토를 위하여 연속판에도 2개씩의 일축 게이지가 부착되었다. 패널존의 전단 변형률을 측정하기 위하여 패널존 보강판이 부착되지 않은 기둥 웨브면에 1개의 삼축게이지가, 보 웨브의 전단변형률 분포를 파악하기 위하여 4개의 삼축 게이지가 보 웨브면에 부착되었다.

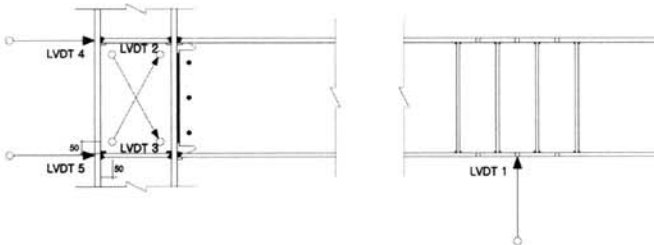
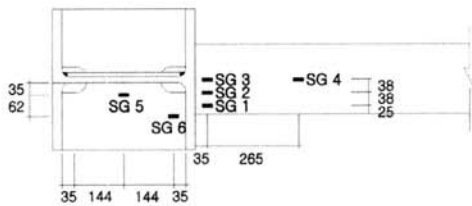
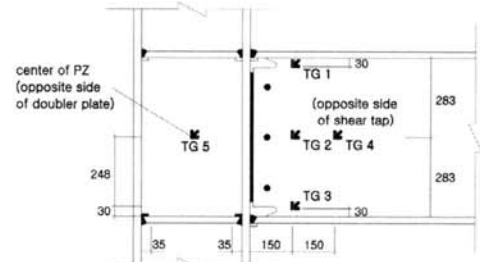


그림 4. 변위계 설치 계획



(a) 일축 변형률 게이지 (상하부 동일)



(b) 삼축 변형률 게이지

그림 5. 변형률 게이지 설치 계획

### 3. 소재인장시험

시험체 제작에 사용된 형강의 잔여부분에서 KS D0801 금속재료 인장시험편에 따라 압연방향으로 1A호 인장시험편을 절취하여 제작하였고 100톤 만능시험기를 이용하여 인장시험을 수행하였다. 표 3에서는 강종별, 두께별로 인장시험결과가 정리되어 있다. 인장시험결과 시험체의 항복강도와 인장강도는 규정치 ( $F_y = 325 \text{ MPa}$ ,  $F_u = 490 \text{ MPa}$ )를 대부분 만족하고 있는 것으로 나타났다. 두께가 상대적으로 큰 SM490 기둥 플랜지의 경우 항복강도와 SHN490 기둥 웨브의 인장강도가 규정치보다 다소 작게 측정되었지만 보의 경우에는 모두 규정치를 만족하였다. 항복비의 경우 두 강종 모두 0.85이하로 SHN강에 대한 규정치를 만족하고 있다. 그림 6에서 보는 바와 같이 상대적으로 균일한 물성을 나타내는 SHN490과는 달리 SM490의 경우에는 성능의 편차가 상대적으로 컸다.

표 3. 소재인장시험 결과

시험편명	강종	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복비	연신율 (%)
SM490B13T	SM490	411.2	555.8	0.739	22.2
SM490C18T		321.9	514.4	0.625	25.8
SM490B23T		374.0	537.6	0.695	25.7
SM490C28T		306.7	509.6	0.602	27.3
SHN490B13T	SHN490	389.6	494.5	0.788	24.8
SHN490C18T		369.2	477.4	0.773	24.1
SHN490B23T		381.1	501.8	0.759	27.2
SHN490C28T		366.1	498.0	0.735	28.1

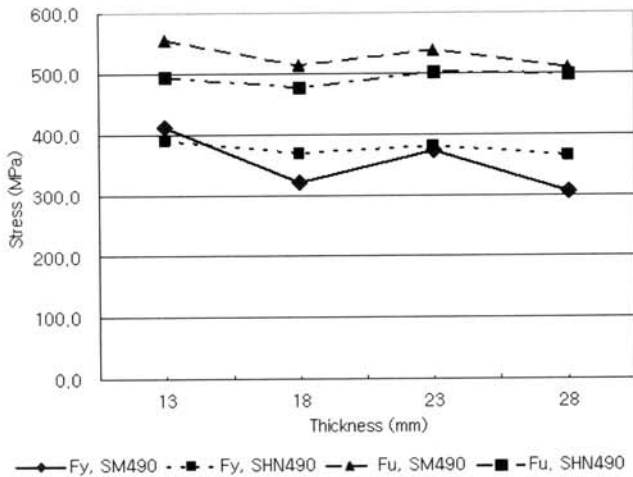


그림 6. 시편두께별 항복강도(F<sub>y</sub>)와 인장강도(F<sub>u</sub>)의 분포

#### 4. 접합부 실험결과

##### 4.1 실험결과 요약

접합부 실험체에 대한 반복재하실험결과 보 플랜지의 CJP용접에서의 취성파단은 발생하지 않았고 소정의 소성변형능력을 발휘하였다. 접합부 실험체에 대한 반복재하실험 결과가 표 4에 정리되어 있다. 기둥면으로부터 하중가력점까지의 거리에 작용하중을 곱하여 기둥면에서의 보의 휨모멘트(M)를 산정하였고, 보단부의 변위를 변위측정위치에서 기둥의 중심선까지의 거리로 나누어 층간변위각(θ)을 계산하였다. 보의 실제 소성모멘트는(M<sub>pa</sub>)는 보의 소성단면계수와 인장시편시험에 의한 보 플랜지의 실제 항복강도를 곱하여 산정하였다. 접합부의 패널존과 기둥의 강성이 보에 비하여 상대적으로 컸기 때문에 대부분의 변형은 보에서 발생하였다.

보의 최대 휨모멘트는 모두 실제 보 소성모멘트를 상회하였고 실험체 JR1의 경우가 가장 작았고 실험체 JR2와 JR3의 최대 휨모멘트는 소성모멘트보다 20%이상 컸다. 접합부의 최대 층간변위각은 실험체 JR1의 경우가 제일 작았고 실험체 JR4가 가장 컸다. 보 플랜지의 파단은 최대 변위에서 발생하지 않았고 최대 변위를 도달한 후 다음 사이클에서 발생하였다.

그림 7, 8, 9, 10에서는 각 실험체별 최종 파단형상을 보여주고 있다. 실험체 JR1을 제외한 나머지 실험체에서는 모두 보 상부 플랜지의 열영향부에서 파단이 발생하였다. 실험체 JR1의 경우에는 용접접근공의 모서리에서 발생한 균열이 보 하부 플랜지로 급속하게 전파되면서 파단이 발생하였다.

표 4. 실험결과 요약

Specimen	Failure Mode	$\frac{M_{max}}{M_{pa}}$	$\theta_{max}$ (% rad)	$\frac{M_{fr}}{M_{pa}}$	$\theta_{fr}$ (% rad)
JR1	용접접근공 부근 보 하부 플랜지의 파단	1.05	2.0	0.93	1.3
JR2	보 상부 플랜지 열영향부의 파단	1.23	4.0	1.06	3.5
JR3	보 상부 플랜지 열영향부의 파단	1.22	4.0	1.02	0.63
JR4	보 상부 플랜지 열영향부의 파단	1.17	5.0	0.81	0.94

M<sub>max</sub> = 기둥면에서 보의 최대 휨모멘트

M<sub>fr</sub> = 보 플랜지가 파단될 때 기둥면에서 보의 최대 휨모멘트

M<sub>pa</sub> = 보의 실제 소성모멘트, F<sub>ya</sub> × Z<sub>b</sub>

F<sub>ya</sub> = 인장시험에 의한 보 플랜지의 실제 항복응력

Z<sub>b</sub> = 보의 소성단면계수, 3890×10<sup>3</sup> mm<sup>3</sup>

θ<sub>max</sub> = 접합부의 최대 층간변위각

θ<sub>fr</sub> = 보플랜지가 파단될 때 접합부의 층간변위각



그림 7. 실험체 JR1의 파단형상



그림 8. 실험체 JR2의 파단형상

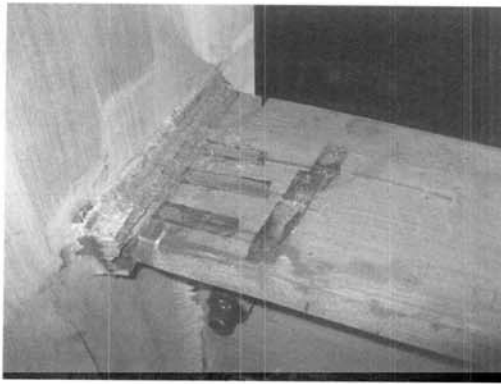


그림 9. 실험체 JR3의 파단형상



그림 10. 실험체 JR4의 파단형상

#### 4.2 실험체 JR1

실험체 JR1은 2% 목표 층간변위까지 보 플랜지의 국부좌굴은 발생하지 않았고, 목표 층간변위 3%의 첫번째 사이클에서 용접접근공 모서리 하부의 보 플랜지에 그림 7과 같이 파단이 발생하였다. 플랜지 파단 이후 보 웨브의 볼트나 전단연결판의 파괴는 관측되지 않았다. 파단발생시 가력하중은 374 kN이었고 층간변위는 1.3%이었다. 또한 실험체 JR1의 최대 층간변위는 2%이었고 최대내력은 420 kN이었다.

그림 11(a)와 (b)는 각각 실험체 JR1의 모멘트-층간변위각과 모멘트-패널존 회전각 이력곡선이다. 강재와 보 웨브 접합 방식에 따른 보-기둥 접합부의 성능차이를 파악하기 위한 것이 이 실험의 주요 목적이므로, 실험체는 모두 강 패널존과 강기둥-약보로 설계되어 있다. 따라서 전체회전각에 패널존의 변형이나 기둥의 변형에 따른 영향은 거의 없었고 보 플랜지의 항복에 의하여 대부분의 에너지가 소산되었음을 알 수 있다. 총 소산 에너지는 121,000 kN-mm 이다.

#### 4.3 실험체 JR2

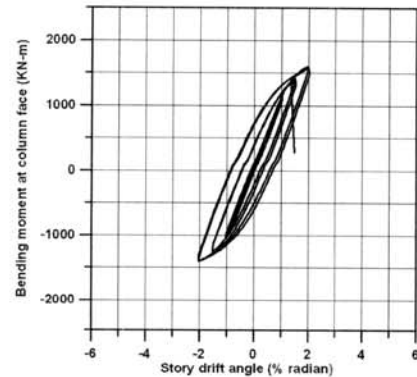
실험체 JR2는 3% 목표 층간변위에서 보 플랜지의 국부좌굴

이 개시되었고, 목표 층간변위 4%의 첫번째 사이클에서 보 상부의 열영향부에서 그림 8과 같이 파단이 발생하였다. 플랜지 파단 이후 보 웨브의 볼트나 전단연결판의 파괴가 관측되었다. 파단발생시 가력하중은 430.7 kN이었고 층간변위는 3.54%이었다. 또한 실험체 JR2의 최대 층간변위는 4%이었고 최대내력은 501.8 kN이었다.

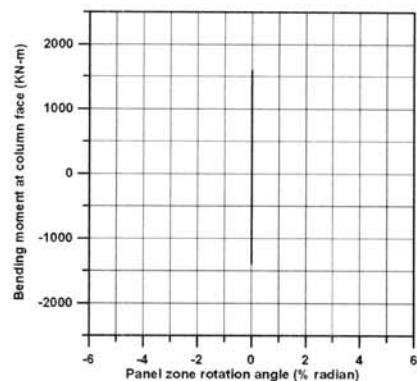
그림 12(a)와 (b)는 각각 JR2의 모멘트-층간변위각과 모멘트-패널존 회전각 이력곡선이다. 전체회전각에 패널존의 변형이나 기둥의 변형에 따른 영향은 거의 없었고 보 플랜지의 항복에 의하여 대부분의 에너지가 소산되었음을 알 수 있다. 총 소산 에너지는 443,000 kN-mm 이다.

#### 4.4 실험체 JR3

실험체 JR3은 목표 층간변위 4%의 첫번째 사이클에서 보 플랜지의 국부좌굴이 발생하였고, 목표 층간변위 4%의 두번째 사이클에서 보 상부 플랜지 열영향부에서 그림 9와 같이 파단이 발생하였다. 플랜지 파단 이후 보 웨브의 볼트나 전단연결판의 파괴는 관측되지 않았다. 파단발생시 가력하중은 412.4 kN이었고 층간변위는 0.63%이었다. 또한 실험체 JR3의 최대 층간변위는 4%이었고 최대내력은 495.9 kN이었다.

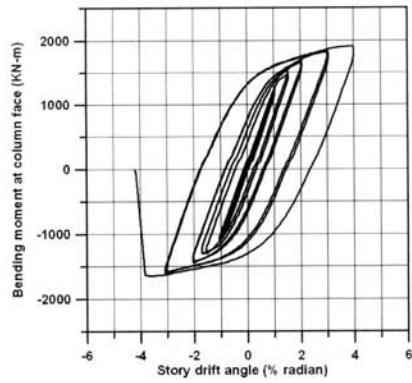


(a) 휨모멘트-층간변위각 곡선

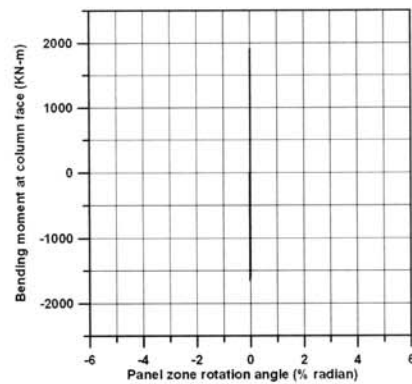


(b) 휨모멘트-패널존 회전각 곡선

그림 11. 실험체 JR1의 전반적 거동



(a) 휨모멘트-층간변위각 곡선



(b) 휨모멘트-패널존 회전각 곡선

그림 12. 실험체 JR2의 전반적 거동

그림 13(a)와 (b)는 각각 JR3의 모멘트-층간변위각과 모멘트-패널존 회전각 이력곡선이다. 전체회전각에 패널존의 변형이나 기둥의 변형에 따른 영향은 거의 없었고 보 플랜지의 항복에 의하여 대부분의 에너지가 소산되었음을 알 수 있다. 총 소산 에너지는 475,000 kN-mm 이다.

#### 4.5 실험체 JR4

실험체 JR4는 목표 층간변위 4%의 첫번째 사이클에서 보 플랜지의 국부좌굴이 발생하기 시작하였다. 목표 층간변위 5%의 첫번째 사이클에서 보 상부 플랜지 열영향부에서 그림 10과 같이 파단이 발생하였다. 플랜지 파단 이후 보 웨브의 볼트나 전단연결판의 파괴는 관측되지 않았다. 파단발생시 가력하중은 334.6 kN이었고 층간변위는 0.94%이었다. 또한 실험체 JR4의 최대 층간변위는 5%이었고 최대내력은 465.5 kN이었다.

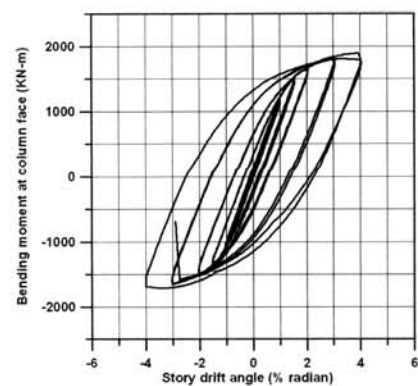
그림 14(a)와 (b)는 각각 JR4의 모멘트-층간변위각과 모멘트-패널존 회전각 이력곡선이다. 전체회전각에 패널존의 변형이나 기둥의 변형에 따른 영향은 거의 없었고 보 플랜지의 항복에 의하여 대부분의 에너지가 소산되었음을 알 수 있다. 총 소산 에너지는 681,000 kN-mm 이다.

## 5. 분석 및 고찰

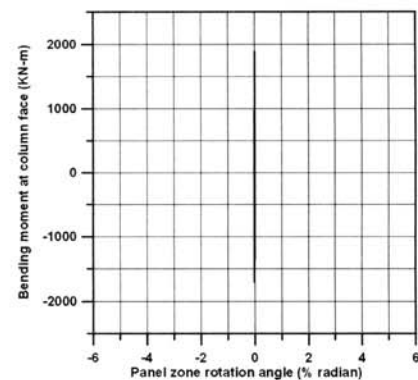
### 5.1 변형률 분포

기둥면으로부터 35mm 이격하여 보 플랜지에 부착된 일축 변형률 게이지에서 측정된 축방향 변형률 이력곡선을 그림 15에 나타내었다. 파단이 발생한 플랜지를 기준으로 하여 실험체 JR1은 보 하부 플랜지에 부착된 게이지 SG3(그림 5 참조)로부터 나머지 실험체는 보 상부 플랜지에 부착된 게이지 SG9(SG3와 동일한 위치)로부터 계측된 데이터를 이용하였다.

변형률 이력곡선으로부터 1% 층간변위 사이클까지는 모든 실험체에서 항복이 발생하지 않았으나 1.5% 층간변위 사이클부터는 항복이 발생하였다는 것을 알 수 있다. 동일한 형식의 접합부에 대해서 SM490형강을 사용한 실험체에서 측정된 최대 변형률값보다 SHN490형강 실험체에서의 최대값이 더 컸다. 또한 동일한 강재로 구성된 실험체의 경우, 웨브용접 접합부(WUF-W)보다 웨브볼팅 접합부(WUF-B)의 최대 변형률이 작았다. 이는 웨브볼팅 접합부에서는 전달되는 휨모멘트를 보의 웨브에서 분담하기보다는 보의 플랜지가 거의 전담하였기 때문인 것으로 판단된다.

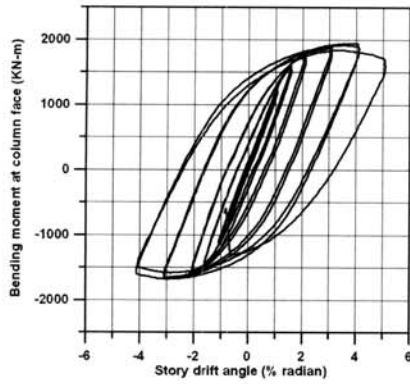


(a) 휨모멘트-층간변위각 곡선

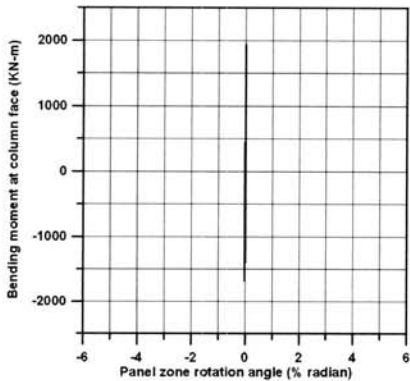


(b) 휨모멘트-패널존 회전각 곡선

그림 13. 실험체 JR3의 전반적 거동



(a) 휨모멘트-층간변위각 곡선



(b) 휨모멘트-패널존 회전각 곡선

그림 14. 실험체 JR4의 전반적 거동

패널존에 부착된 삼축게이지(그림 5의 TG5)에서 측정된 전단 변형률 측정결과를 그림16에 정리하였다. 측정결과에 의하면 전단변형률의 크기는 실험체 JR4를 제외한 실험체에서는 항복전단변형률을 초과하지 않았다.

강종에 따른 전단변형률의 분포는 큰 차이가 발생하지 않았으나 접합부 형식에 따른 차이는 다소 존재하였다. 동일한 재하사이클에서 웨브볼팅 접합부(WUF-B)보다 웨브용접 접합부(WUF-B)의 최대 변형률이 다소 큰 것을 알 수 있다. 이는 접합부 형식에 따라 패널존에 작용하는 전단응력분포가 다르기 때문에 발생한 것으로 판단된다.

변형률 게이지로부터 측정된 데이터에 의하면 실험체에서 파단은 변형률이 최대가 되었을 때 발생하지 않았고 변형률이 항복변형률보다 작을 때 발생한 경우도 있었다. 이는 실험체에서 발생한 파단이 선형 탄성 파괴역학(LEFM, Linear Elastic Fracture Mechanics)이론에 의한 취성파괴가 아니라 연성적인 파괴였음을 의미한다. 소성변형에 따른 손상이 보 플랜지에 축적되고 용접접근공에 의한 응력집중이 증대되면서 플랜지가 파단된 것으로 사료된다.

## 5.2 소산에너지

소산 에너지는 모멘트-층간변위각 곡선으로부터 사이클별 면적을 누적시켜 산정할 수 있다. 각 접합부 실험체에서 측정된 소산에너지를 비교하여 그림 17에 나타내었다. 대부분의 에너지가 보에서 소산되었으며 기둥이나 패널존에서는 소성변형이 거의 발생하지 않아 구성 요소별 소산에너지는 표시하지 않고 전체 소산에너지만을 표시하였다. 실험체 JR4의 소산에너지의 크기는 681,000 kN-mm로 가장 크게 나타났다. 실험체 JR1의 경우에는 121,000 kN-mm로 가장 작았고, 실험체 JR2와 JR3는 각각 443,000 kN-mm와 475,000 kN-mm로 유사한 값을 가졌다.

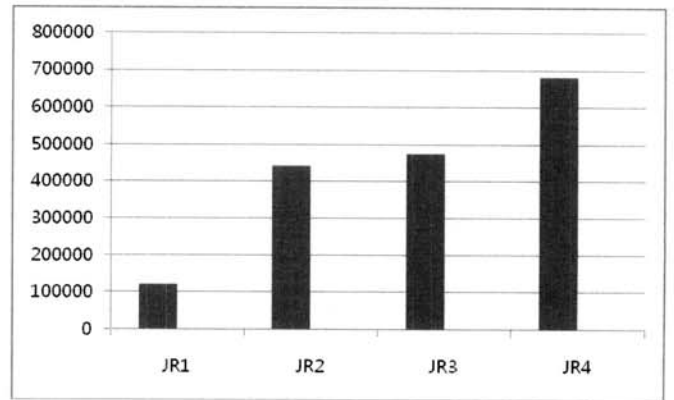
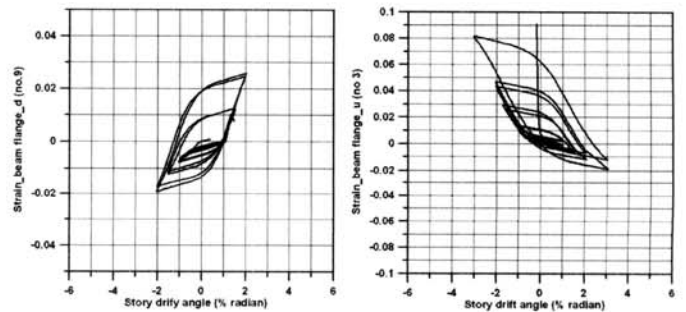
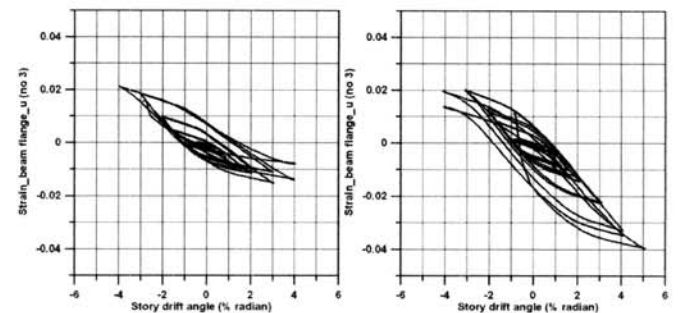


그림 17. 실험체별 소산 에너지의 비교 (kN-mm)



(a) JR1의 보 하부 플랜지

(b) JR2의 보 상부 플랜지



(c) JR3의 보 상부 플랜지

(d) JR4의 보 상부 플랜지

그림 15. 보 플랜지 중앙부의 축방향 인장변형률-층간변위각 곡선



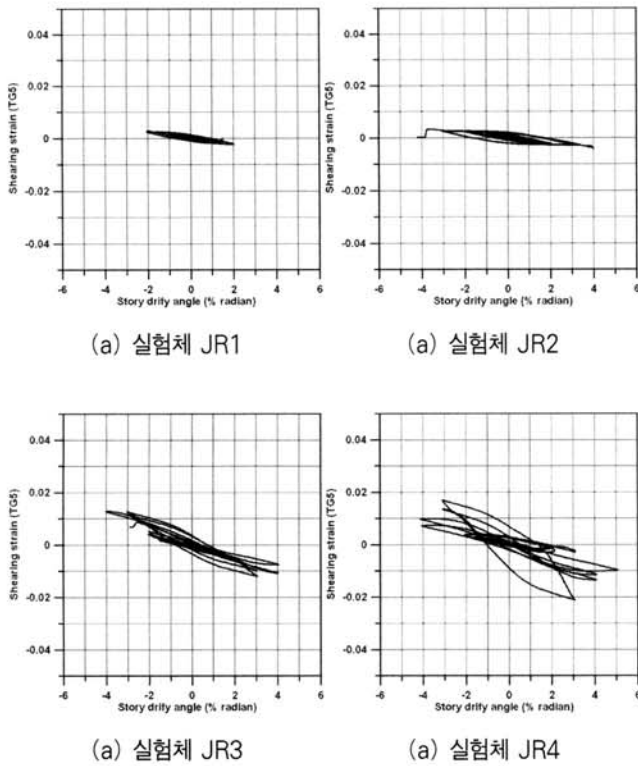


그림 16. 보 플랜지 중앙부의 축방향 인장변형률-층간변위각 곡선

### 5.3 내진성능 평가

FEMA 350(2000)에 의하면 WUF-B 접합부는 보통모멘트골조(OMF)로 분류되고 WUF-W 접합부는 특수모멘트골조(SMF)로 분류될 수 있다. 이는 미국에서 사용되는 보-기둥 접합부에 대한 실험결과에 근거한 것으로 미국 설계관행상 대형단면을 갖는 보와 기둥에 해당되는 사항으로 볼 수 있다. 본 실험에서 사용된 부재는 국내 중저층 건축물에 주로 사용되는 크기로서 내진접합부 인증기준에 따른 반복재하 실험을 통하여 그 내진성능을 평가하였다. 표 5에서는 접합부 실험체의 내진성능 평가결과를 정리하였다. AISC 내진규정(2005)에 의하면 중간모멘트골조(IMF)에서 요구되는 층간변위는 2%이고, 특수모멘트골조(OMF)에서 요구되는 층간변위는 4%이다. 또한 실험체는 최소한 1회의 완전 재하주기 동안 요구되는 층간변위각을 유지하여야 한다. 이러한 기준에 따르면 강중에 상관없이 WUF-B 접합부는 중간모멘트골조로 분류될 수 있고, WUF-W 접합부는 특수모멘트골조로 분류될 수 있다. 하지만 실험체 JR3의 경우에는 4% 층간변위의 2번째 사이클에서 파단이 발생하여 1회의 완전 재하주기 동안 요구되는 층간변위각을 유지하기는 하였지만 특수모멘트골조로 분류하기에는 다소 미흡한 것으로 판단된다.

표 5. 접합부 실험체의 내진성능 평가

Specimen	Connection Type	Steel	Interstory Drift	Frame Type
JR1	WUF-B	SM490	2 %	IMF
JR2		SHN490	3 %	IMF
JR3	WUF-W	SM490	4 %	SMF
JR4		SHN490	4 %	SMF

### 6. 결론

압연형강 보-기둥 접합부에 대한 실험연구의 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강도상의 규격요건을 모두 만족하고 균일한 물성을 보이는 SHN490 형강과 달리 SM490 형강은 그 성능의 편차가 상대적으로 컸고 일부 SM490 형강의 항복강도는 규격치에 다소 미달하는 경우도 있었다.
- (2) 4개의 보-기둥 접합부 실험체는 중간모멘트 골조에 대한 최소요구 층간변위 2%를 모두 확보하였다.
- (3) 보의 웨브를 기둥에 용접한 SHN490 형강 보-기둥 접합부의 경우에는 특수모멘트 골조에 대한 최소요구 층간변위 4%를 충족하였다.
- (4) 보의 웨브를 기둥에 용접한 접합부의 최대변위와 소산에너지의 크기가 보의 웨브를 볼트로 접합한 경우보다 더 컸다.
- (5) 동일한 접합부 형태에 대해서 SHN490 형강으로 조립된 보-기둥 접합부의 최대변위와 소산에너지의 크기가 SM490 형강 보-기둥 접합부의 경우보다 더 컸다.
- (6) 용접접근공 부근 보 하부 플랜지에서 취성파단이 발생한 실험체 JR1을 제외한 나머지 실험체는 모두 보 상부 플랜지의 열영향부에서 취성파단이 발생하였다.
- (7) 보 플랜지 완전용입용접부에서 뒷담재를 제거하지 않았지만 충분한 파괴인성을 보유한 용접금속이 사용되었기 때문에 용접자체의 파괴는 발생하지 않았다.
- (8) 플러그 용접이 아닌 가장자리만을 모살용접한 패널존 보 강판 부착방식도 충분한 패널존 보강효과를 제공할 수 있었다.

### 감사의 글

이 연구는 (주)현대제철과 POSCO의 지원에 의하여 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- 김종락, 김성배(1998), 고강도강 기둥(SM570) 보 용접접합부의 탄소성거동에 관한 실험적 연구-스캐럽상세와 패널강성을 중심으로, 한국강구조학회논문집, 제12권, 5호, pp. 487~494.
- 김태진(2001) 미국의 강구조접합부, 한국강구조학회지, 제14권, 4호, pp.34~41.
- 김태진, B. Stojadinovic, A.S. Whittaker(2006) 기존 용접형 철골 박스기둥 접합부의 내진성능, 한국지진공학회논문집, 제10권, 1호, pp.25~32.
- 이동근, 조소훈, 고현, 김태진(2006) 약진지역에서의 초과강도 및 반응수정계수, 한국지진공학회논문집, 제10권, 3호, pp.57~64.
- 이승준, 김상배(1999) 반복하중을 받는 철골보 접합부의 거동, 한국지진공학회논문집, 제3권, 4호, pp.23~31.
- 이철호, 박종원(1998), 반복재하 실물대 실험에 의한 컬럼-트리(Column-Tree) 형식 철골 모멘트 접합부의 내진거동 연구, 한국강구조학회논문집, 제10권, 4호, pp.629~639.
- 한국강구조학회(2004), 건축구조용 압연 H형강의 소재특성과 용접성능에 관한 연구.
- 한국강구조학회(2007), 강구조 내진설계지침 및 해설(안).
- AISC (2005), *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction.
- FEMA (2000), *Recommended Design Criteria for New Steel Moment Frame Buildings*, FEMA Report No. 350, Federal Emergency Management Agency.
- Stojadinovic, B., Goel, S. C., Lee, K.-H., Margarian, A. G. and Choi, J. H. (2000), "Parametric Tests on Unreinforced Steel Moment Connections", *Journal of Structural Engineering*, Vol. 126, No. 1, July, pp.40~49.
- (접수일자 : 2008. 9. 24 / 심사일 2008. 9. 26 / 심사완료일 2008. 11. 4)