

리브로 보강된 기둥-보 접합부의 내진성능 평가

Seismic Performance of Rib Plate H Beam to Column Connections

김 성 용* / 신 창 훈**
Kim, Sung Yong / Shin, Chang Hoon

Abstract

The moment resisting frame has been well-known as it had very excellent seismic performance, and it has been widely used and constructed in the design of a lot of buildings. However, the moment resisting frame system did not exert the seismic performance during the earthquake in Northridge and Kobe sufficiently, and it produced the crack or brittle fracture on the joint. this study was to run tests with the full-scale test subject as parameters of existence of H-beam web high tensile bolt shearing joint and reinforcement of H-flange rib. This researcher was to anticipate the decrease of number of high tensile bolts and the improvement of workability through the double shear joint by the experiment, and improve the seismic performance through the reinforcement of rib plate. In addition, this study was to prevent the brittle fracture by the stress concentration through the non scallop.

key words : moment resisting frame, seismic performance, brittle fracture, stress concentration

요 지

모멘트 저항골조는 내진성능이 매우 우수한 것으로 알려져 왔으며 많은 건축물의 설계에 이용되며 시공되어지고 있으나 노스리지 지진과 고베 지진시 충분한 내진성능을 발휘하지 못하고 접합부에서 균열 또는 취성 파괴가 발생하였다. 양지진 이후 접합부의 내진성능을 향상시키고자 접합부 상세에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 우리나라에서도 지진에 대한 사회적 관심과 일본에서 발생한 지진이 한반도에 영향을 주는 상황에서, 이에 대한 사회전반의 관심과 우려가 제기되고 있다. 본 논문에서는 H형 보 웹의 고장력볼트 전단 접합과 H형 플랜지의 리브보강 유무를 변수로 한 실험대형 실험체를 가지고 실험을 실시하였다. 실험을 통해 보 웹의 2면 전단접합을 통해 고장력 볼트수 감소와 시공성 향상을 기대하며, 리브플레이트 보강을 통해 내진성능을 향상시키고자 한다. 또한 논 스킵을 통해 응력집중에 의한 취성파괴를 방지하고자 한다.

핵심용어 : 모멘트 저항골조, 내진성능, 취성파괴, 응력집중

1. 서 론

철골모멘트골조의 구성은 보(girder), 기둥(column), 보-기둥(beam-column) 및 접합부(panel zone)의 3가지로 구성되며 이러한 골조는 지진하중이나 풍하

중과 같은 수평력을 받는다. 이러한 수평력을 받을 시 철골모멘트골조는 기둥과 보에 붕괴가 일어나는데, 이중에 보다 더 큰 에너지 소산능력을 보일 수 있는 것은 보에서 일어나는 붕괴라 할 수 있다. 이론적으로 보에서 붕괴가 발생하는 바람직한 과정은 최초의 항복

* 정희원 · ES건축구조엔지니어링 · 공학박사 (e-mail : highbolt@dreamwiz.com)

** 서일대 건축과 교수 · 공학박사

은 가장 큰 하중을 받는 보-기둥 접합부에서 시작되지만 상대적으로 강하게 설계되는 보-기둥 접합부가 변형 경화되는 동안, 소성화는 보의 단부 쪽으로 이동하여, 보의 단부에서 충분한 에너지 소산을 발휘하여 보의 파괴를 유도하는 것이다. 이러한 이유로 철골모멘트골조는 지진 위험도가 높은 지역에서 사용되어 왔으나²⁾ 미국 노스리지(Northridge) 지진 및 일본 효고현 남부지진에 피해사례가 보고되었으며, 특히 철골모멘트저항골조로 불리는 강구조 보-기둥 접합부의 취성과파괴가 가장 많이 발생하였다. 이러한 이유로 국외에서는 여러 연구가 이루어지고 있으며 본 논문에서는 이러한 사항을 중심으로 미국과 일본의 접합부 타입을 참조하여 실험체를 계획하여 강구조 보-기둥접합부의 효율적인 내진설계를 위한 기초 자료를 제공하고자 한다.

본 연구는 기둥-보 접합부 개발에 관한 연구로서 그림 1은 기둥-보 접합부의 시공과정으로 일반적인 기둥-보 접합부에 비하여 시공시간을 획기적으로 단축할 수 있는 방법이다. 그림 1(a)는 지주를 입설한 그림이며, 그림 1(b)는 오른쪽 지주를 입설한 그림이다. 그러나 그림 1(c)와 (d)와 같이 지주를 입설하여 H형강보를 접합함에 있어서, 그림 2와 같이 지주와 H형강지주 외주면 필요지점에 지지판을 용접하고 지지판에는 각기 한쌍씩의 돌출판을 돌출하여 상단부에는 주입안내용 안내만곡편을 형성하고, 볼트 구멍을 다수 뚫은 하단부에는 고정핀 볼트를 끼운 다음 지지판 상단부에 로프안내링과 유도안내용 막대자석을 부착한다. H형강보에 용접한 횡보지지판에는 그림 2와 같이 하단부에 역 브이홈 또는 경사부 내지 반원형의 호형상의 홈과 로프구멍을 구성한 삼지판을 T자형으로 용접하여 로프구멍에 묶은 로프를 안내링에 통과시켜 한 쌍의 지지판 사이로 잡아당겨서 삼지판을 끼우며, 역 브이(V)홈 및 경사부, 호형상의 홈에 고정핀보울트에

걸쳐지게 안착하여 접합한다.

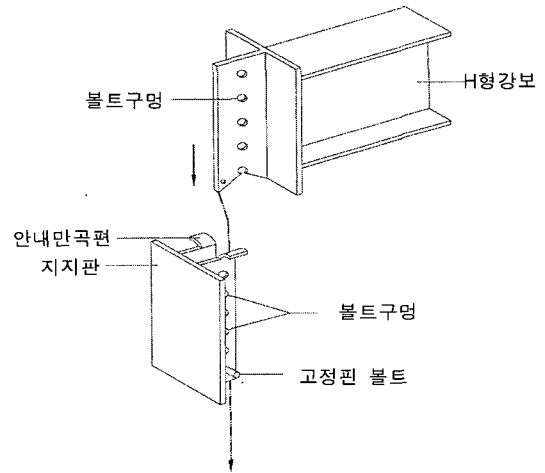


그림 2. 철골접합부의 A부분 시공과정 상세도

2. 실험 개요

2.1 실험체 계획

강구조 보-기둥 접합부의 내진성능 평가를 위한 보 웹 전단면수 및 리브플레이트(rib plate)보강 신형상접합부의 실험체는 표 1과 같다. 본 논문의 실험계획은 기존접합의 문제점을 보완하여 보 웹을 1면 및 2면 전단접합으로 설계하고, 보 플랜지를 리브 플레이트로 보강하여 공기단축, 비용절감 및 내진성능 향상에 효과가 있는 보-기둥 접합부의 상세를 개발하고자 한다. 보-기둥 접합부의 보 단면은 H-400X200X8X13의 SS400 일반구조용 압연H형강이며, 기둥단면은 H-300X300X10X15의 SM490의 고강도형강을 사용한다. 보 단부의 용접은 보 플랜지는 완전용입(CJP, complete joint penetration) 맞댐용접(butt welding)을 하고, 기둥과 보플랜지 및 전단탭

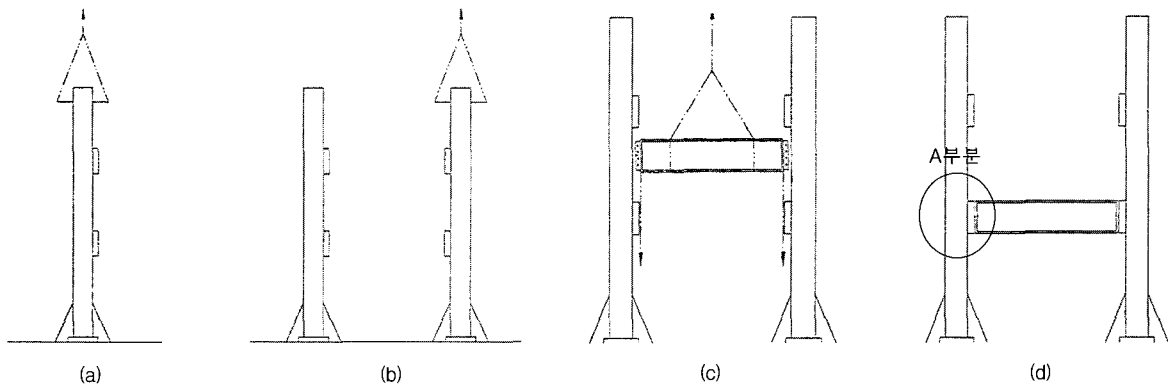


그림 1. 기둥-보 철골접합부의 시공과정

(shear tap)의 용접은 모살용접(fillet welding)을 한다. 기둥 안쪽면에서 보단부 바깥쪽 끝까지 길이는 2425mm이며 보-기둥 접합부 시험체 상세는 그림 3~그림 6과 같다. 보 웨브는 기둥플랜지에 양면 모살용접으로 접합한 전단탭에 F10T-M16 고력볼트 4개 및 2개로 마찰접합 한다.

표 1. 접합부 실험체 일람

실험체명	전단면수	리브보강	고력볼트(F10T)	단면형상
BS	1면	무	4-M16	기둥: SM490
S1RR	1면	유	4-M16	H-300X300X10X15 보: SS400
S2RN	2면	무	2-M16	H-400X200X8X130 리브플레이트:PL-15
S2RR	2면	유	2-M16	SM490

S1(2)RR(N)

S: Web shear, 1(2): 1 side shear, 2 side shear, RR(N): rib reinforced(None)

BS : Base Specimen

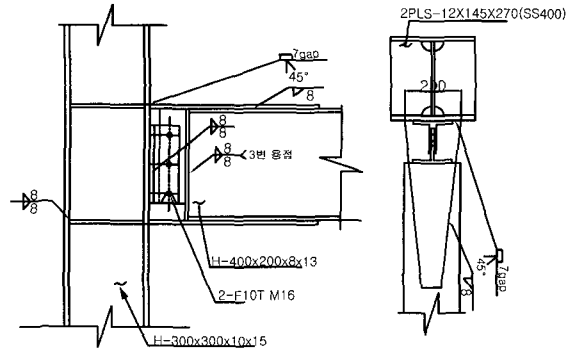


그림 5. S2RN 실험체 형상

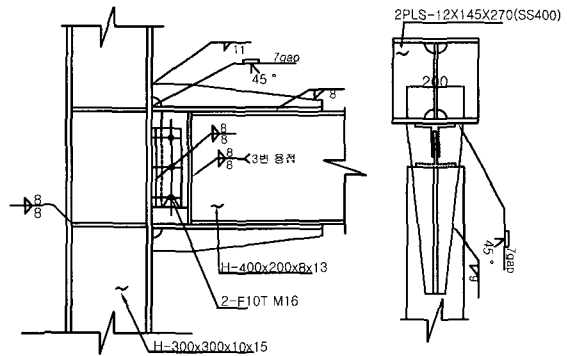


그림 6. S2RR 실험체 형상

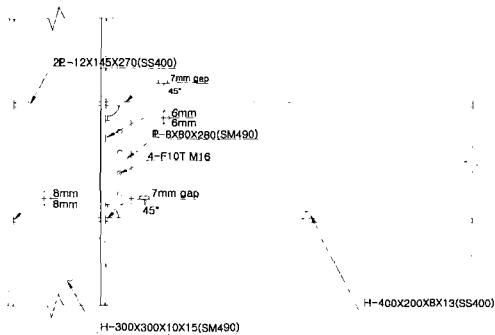


그림 3. BS 실험체 형상

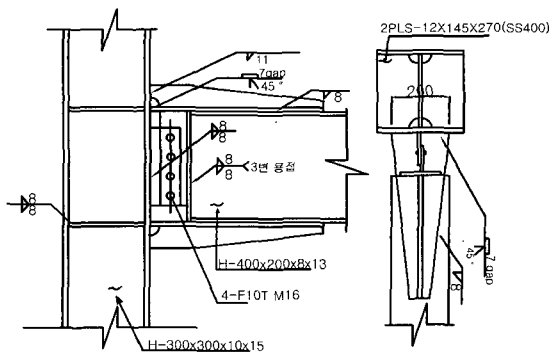


그림 4. S1RR 실험체 형상

2.2 실험체 실험방법

그림 7은 실험체의 치수 및 가력 상황을 나타낸 그림이다. 기둥부재의 양쪽 단부는 회전단(hinge)에 연결하였으며 축력은 가하지 않았다. 보 단부는 가격장치(oil jack)으로 연결한다. 실험중 시험체의 횡좌굴을 방지하기 위하여 가새(brace)를 설치한다.

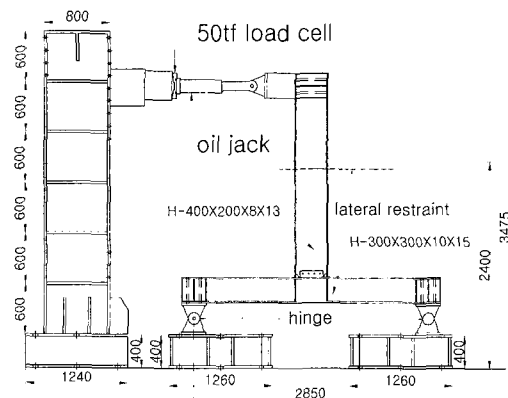


그림 7. 실험체 배치도

2.3 가력방법 및 측정방법

실험체의 가력은 그림 8과 같이 SAC project에 제시된 변위제어에 따라 하중을 조절하며 반복하중을 가하였다. 하중 가력 시 0.04(radian)이후 인장(-) 방향으로 오일잭의 스트로크 한계까지 가력 하였다.¹⁾ 보 끝단의 변위는 보 단부의 가력중심에서 기둥 중심까지의 거리를 이용하여 정하였다. 실험체의 변위 측정장치는 그림 9와 같이 설치하였다.

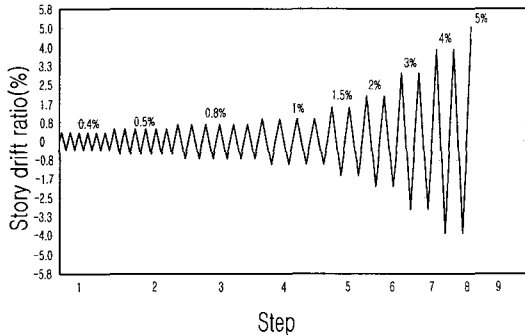


그림 8. 변위제어 곡선

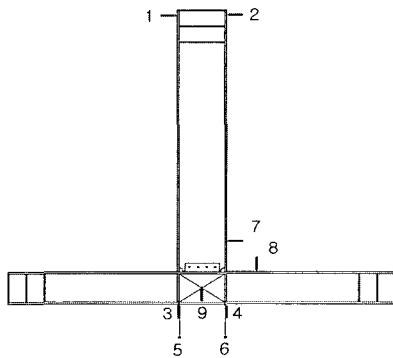


그림 9. 변위제어 곡선

3. 실험결과 및 분석

3.1 재료실험결과

본 실험에서 사용된 강재의 기계적 성질을 알아보기 위하여 KS B 0801에 따라 실험체에서 채취하여 두께별로 각각 3개씩 인장시험편을 제작하여 KS B 0802에서 규정하는 실험방법에 따라 인장강도 실험을 행하였다. 사용된 재료는 SM490의 10mm, 15mm, SS400 8mm, 13mm plate이다. 각 시험편의 결과를 표 2에 나타내었다. SS400강재의 항복강도는 기준 항복강도 235 MPa 보다 25%에서 68% 초과하는 것으로 나타났고 강재 SM490의 항복강도는 기준 항복강도 325 MPa보다 9%에서 22.4%를 초과하는 것으로 나타났다.

표 2. 강재의 기계적 성질

시험편		항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	항복비	연신률 (%)
기둥 (SM490)	웹	379	526	0.69	21.5
	플랜지	353	527	0.67	21.0
보 (SS400)	웹	374	510	0.73	21.0
	플랜지	359	525	0.69	21.6

3.2 층간변위능력 및 변형성상

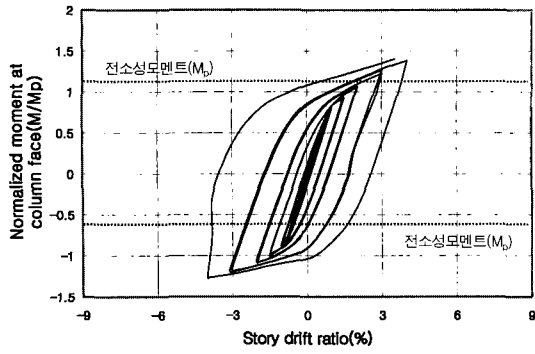
구조물의 변형은 변위와 처짐각으로 나누어진다. 변위는 외력에 의하여 구조물내의 어떤 부분이 같은 평면 내에서 위치가 이동하는 변화를 말하고, 처짐각은 외력에 의하여 구조물의 어떤 부분이 회전하는 각의 변화를 말한다. 처짐각을 측정하기 위해서는 많은 비용과 장비가 소요되므로 본 실험에서는 측정하지 않았다. 본 실험에서는 처짐각이 아주 적은 경우는 변위라고 하고, 변위와 변형을 혼용하여 사용한다. 층간변위능력은 보 단부의 변위를 기둥중심에서 가력중심까지의 거리로 나눈 값으로 나타낸다. 총 소성회전능력은 구조물의 소성 변형 능력을 평가할 수 있는 기본적인 물량이며 AISC(American Institute of Steel Construction) 내진 규정(1997)은 내진설계에 사용된 값을 기준으로, 특별 연성 모멘트 골조(SMF, Special Moment Frame), 중간 연성 모멘트 골조(IMF, Intermediate Moment Frame) 및 보통 연성 모멘트 골조(OMF, Ordinary Moment Frame)의 경우 각각 최소 0.03, 0.02, 0.01 radian의 접합부 소성회전각을 확보할 것을 요구하고 있다.³⁾

(1) BS 실험체

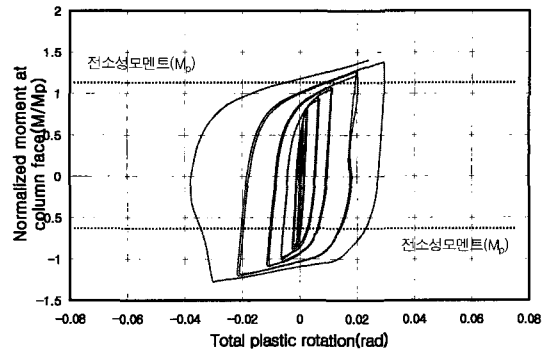
그림 10은 BS 실험체의 하중변형이력곡선에 대한 실험결과를 나타낸 곡선이다. 0.01rad.까지는 탄성적인 거동을 보이고 그 이후에는 비탄성 거동을 보였다. 0.015rad.에서는 항복에 의해 리브에서 스케일이 떨어지기 시작하였으며 리브에서의 변형률은 항복값을 초과하였다. 0.02rad.에서는 보 플랜지와 기둥 플랜지 사이 용접부에서 미세 균열이 나타나기 시작하여 0.03rad.에서도 균열이 계속 진행되었으며 이로 인하여 내력저하 현상을 보이기 시작하였으며 0.04rad.에서 실험이 종료됐다.

(2) S1RR 실험체

그림 11(a)는 S1RR시험체 접합부의 층간 변위능력에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. S1RR은 층간 변위비 0.75%에서 리브플레이트에서 항복징후가 나

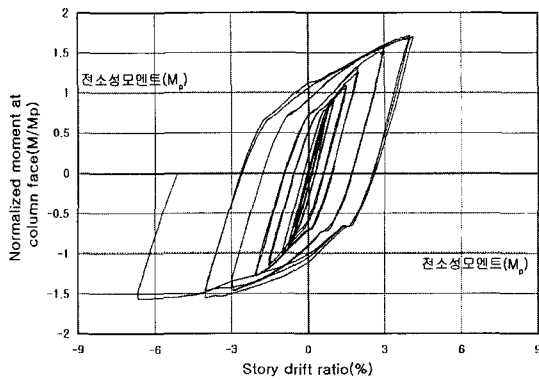


(a) 층간변위능력

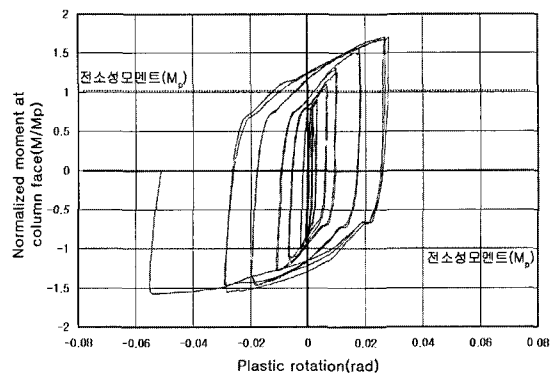


(b) 총소성회전 능력

그림 10. BS 실험체의 실험결과 곡선



(a) 층간변위능력



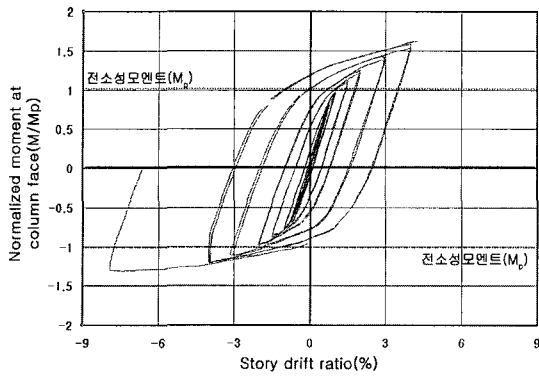
(b) 총소성회전 능력

그림 11. S1RR 실험체의 실험결과 곡선

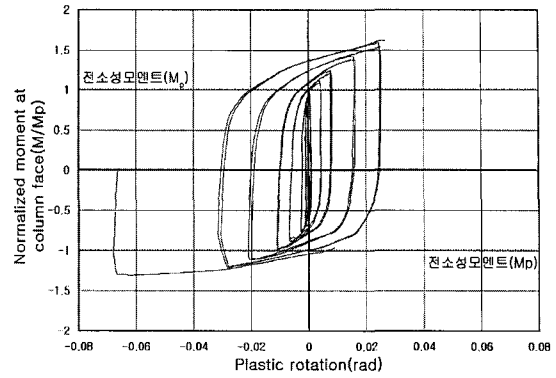
타났으며, 보플랜지는 1.5%에서 기둥플랜지 용접부근에서 항복징후가 보였다. 층간 변위비 2%에서 리브플레이트와 기둥 플랜지 용접부에서 균열이 발생하기 시작하였으며, 3%에서 리브 플레이트(rib plate) 용접부 부근에서 파단이 일어났다. 층간 변위비 4% 이후 내력저하를 보였으나 보플랜지 용접부 부근에서 파괴는 발생하지 않았다. 기둥은 층간변위 4%까지 탄성거동을 보였으며, 패널존(panel zone)은 층간변위 1.5%에서 소성거동을 시작하여 실험 종료 시까지 비교적 양호한 소성거동을 보였다. S1RR의 최대내력은 보의 전소성모멘트를 약 50% 이상 상회하는 470kNm으로 나타났다. 그림 11(b)는 접합부 S1RR의 총 소성회전능력 관계곡선이며, 총 소성회전능력은 0.028 rad. 이상을 만족하고 있다. 총 소성회전 값 중 패널존이 차지하는 비율이 68%로, 약한 패널존을 나타내고 있으나 논 스칼럽(scallop)으로 인한 응력부담이 줄었으며, 플랜지 용접부 주위의 취성 파괴는 발생하지 않았다. 리브 스칼럽 부분은 응력집중으로 인한 취성파괴가 발생하였으나 안정적인 거동을 보여주고 있다.

(3) S2RN 시험체

그림 12(a)는 S2RN 시험체 접합부의 층간 변위능력에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. 층간 변위비 1%까지 탄성거동을 보였으며, 1.5%에서 보플랜지에서 항복징후가 나타났다. 가력이 계속되는 동안 층간 변위비 2%에서 플랜지에서 미세한 국부좌굴이 나타났으며, 4%까지 소성거동을 보이다가 접합부에 미세균열이 발생하였으며, 보플랜지 항복후 내력이 서서히 저하되었다. 기둥은 탄성거동을 보였으며, 패널존은 층간변위 1.5%에서 소성거동을 시작하여 실험 종료 시까지 충분한 소성거동을 보였다. S2RN 시험체는 2면 전단접합으로 BS 실험체와 비슷한 거동을 기대했으나, 2면 전단접합으로 인한 마찰력이 기대보다 작아 내력이 상대적으로 작게 나타났다. S2RN 시험체의 최대내력은 보의 전소성모멘트를 약 31% 이상 상회하는 412kNm 것으로 나타났다. 그림 12(b)는 접합부 S2RN 시험체의 총 소성회전능력 관계곡선이며, 총 소성회전능력 0.027 rad. 이상으로서 AISC(1997)의 중간연성모멘트골조의 소성회전능력 0.02 rad. 이상을 만

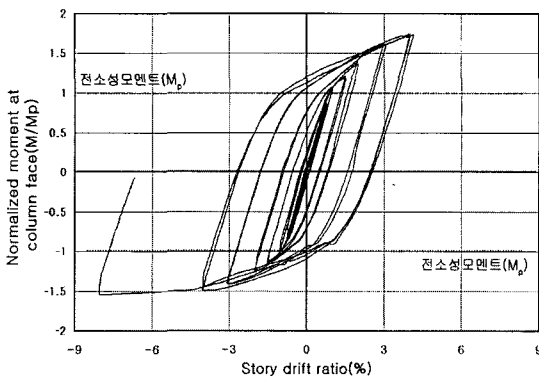


(a) 층간변위 능력

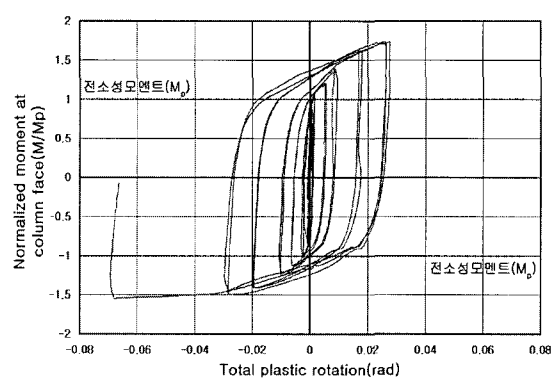


(b) 총소성회전 능력

그림 12. S2RN 실험체의 실험결과 곡선



(a) 층간변위능력



(b) 총소성회전 능력

그림 13. S2RR 실험체의 실험결과 곡선

족하고 있다. 총 소성회전 값 중 패널존이 차지하는 비율이 68%로, 약 패널존을 나타내고 있으나 논 스캘럽으로 인한 응력부담이 줄었으며, 플랜지 용접부 주위의 취성파괴는 발생하지 않았으며, 안정적인 거동을 보여주고 있다.

(4) S2RR시험체

그림 13(a)는 S2RR시험체 접합부의 층간 변위능력에 대한 실험결과를 나타낸 것이다. S2RR은 전단 탭(shear tap) 부분을 2면 전단으로 설계하고 접합부의 강성을 확보하기 위해 리브로 보강된 시험체이다. S2RR은 층간 변위비 1%까지 안정적인 탄성거동을 보였으며 그 이후 소성구간에 들어가서도 외관상으로 아무런 변화가 없다가 2%에 이르러서 리브의 항복징후가 발생하였고, 3%에서 리브와 기둥플랜지 사이의 용접부 주위에서 균열이 발생하였다. 층간 변위비 4%에서 리브와 기둥플랜지 사이의 용접부 주위가 늘어나면서 파괴가 발생함과 동시에 실험을 종료했다. S2RR의 최대내력은 보의 전소성모멘트를 약 47%이

상 상회하는 458kNm으로 나타났다. 기둥은 탄성거동을 보였으며, 패널존은 층간변위 1.5%에 소성거동을 시작하여 실험 종료 시까지 비교적 양호한 소성거동을 보였다. 그림 13(b)는 접합부 S2RR시험체의 총 소성회전능력 곡선이며, 총 소성회전능력 0.028rad. 이상으로 AISC(1997) 중급모멘트 연성골조의 소성회전능력 0.02rad.을 만족하고 있다. 총 소성회전 값 0.028rad. 중 패널존이 차지하는 비율은 71%인 0.019rad.으로, 약 패널존을 나타내고 있으나 논 스캘럽으로 인한 응력부담이 줄었으며, 리브 스캘럽 부분은 응력집중으로 인한 취성파괴가 발생하였으나 안정적인 거동을 보여주고 있다.

표 3. 요소별 소성 회전능력 평균(단위 : rad.)

	BS	S1RR	S2RN	S2RR
기둥	0.0060	0.00018	0.00029	0.00016
보	0.0073	0.01000	0.00910	0.00820
패널존	0.0137	0.02000	0.02000	0.02100
전체	0.027	0.03018	0.02939	0.02936

3.3 내력상승률

항복응력 정의에 준하여 각 실험체별 내력상승률을 그림 14에 나타내었다. 내력상승률은 S2RR 실험체가 가장 낮은 값을 보였으며 S2RR시험체가 가장 크게 나타났다. 1면전단접합의 경우 리브보강에 상관없이 내력상승률이 비슷하게 나타났으나, 2면 전단의 경우 S2RR시험체가 S2RN시험체보다 약 12% 낮은 1.36으로 나타났다.

3.4 초기강성

그림 15는 단조화 된 응력-변위곡선으로부터 구한 각 시험체의 초기강성을 비교한 것이다. 각 실험체의 초기강성은 기준 실험체인 BS 실험체가 가장 낮은 값을 보였고 S1RR시험체가 가장 큰 7.03의 초기강성을 나타냈다. 2면 전단의 경우는 S2RR시험체가 S2RN시험체보다 11%의 큰 6.9의 초기강성을 보였으며, 리브플레이트로 보강한 경우와 보강하지 않은 경우 모두 비슷한 초기강성을 보였다.

3.5 변형능력

그림 16은 각 시험체별 변위 연성비($\mu = (\delta_u -$

$\delta_y)/\delta_y)$ 를 나타내었다. 변형능력의 경우, S2RN시험체가 4.8로 가장 크게 나타났다. 2면 전단의 경우 S2RR시험체가 S2RN보다 약 17% 작은 4.11를 보였다. 보-기둥 접합부 변형능력을 향상시키기 위해서는 1면전단의 경우 리브보강이 효과적으로 나타났으며 2면전단인 경우 리브보강은 비효과적이라 사료된다.

3.6 에너지 소산능력

에너지 소산능력은 구조물의 내진특성 중 가장 중요한 것 중 하나이며 하중-변위 곡선으로 둘러싸인 면적을 사이클별로 누적시켜 구할 수 있다.⁵⁾ 실험에서 층간 변위비 4%이상 까지 가능할 것으로 보이나 오일잭의 스트로크(stroke) 한계로 인해 4%까지 측정할 수 있는 값을 평가하였다. 그림 17은 각 사이클별 누적 에너지 그래프이며, 그림 18에 각 시험체의 층간 변위비 4%까지의 에너지소산능력의 총합을 나타냈으며, 구성 요소별로 에너지소산량을 나타냈다. 모든 시험체가 패널존에서 가장 큰 에너지소산능력을 보였으며 기둥에서 작은 에너지 소산능력을 보여주고 있다. S2RR시험체의 에너지소산능력이 1207kN·m으로 가장 크게 나타났다. 2면 전단인 경우 S2RR시험체가 S2RN시험체보다 약 11% 큰 1206kN·m의 에너지

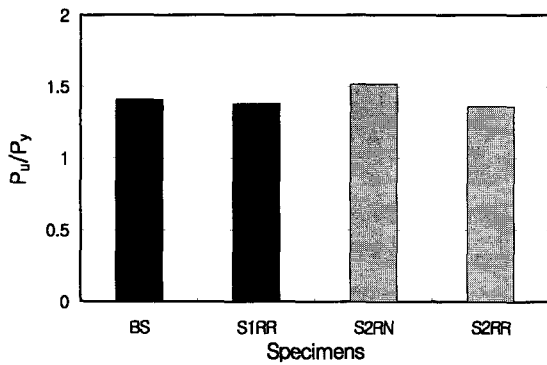


그림 14. 시험체별 내력상승률 비교

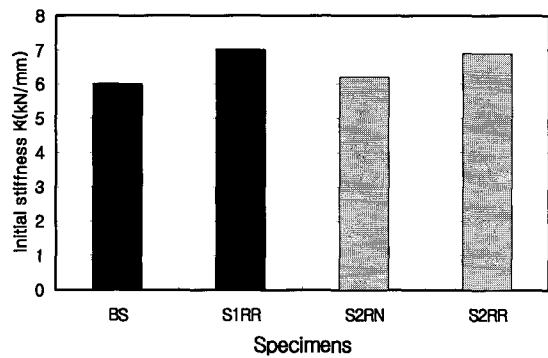


그림 15. 초기강성 비교

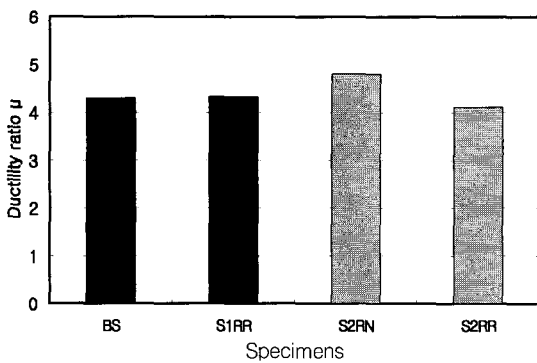


그림 16. 연성비 비교

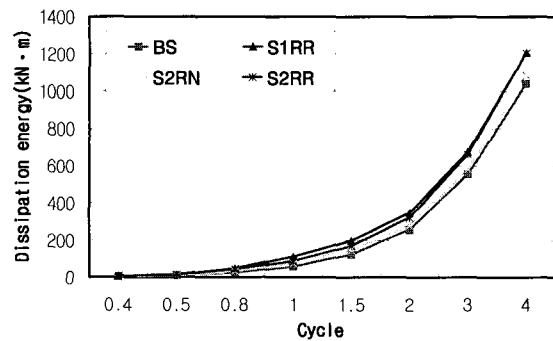


그림 17. 각 사이클별 누적 에너지

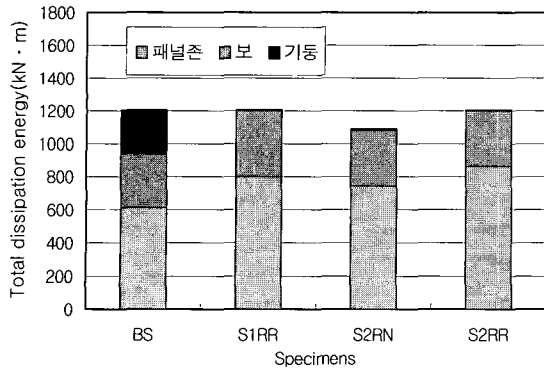


그림 18. 에너지 소산 능력 비교

소산능력을 보였다. 전단면수는 에너지 소산능력에 큰 영향을 주지 않는 것으로 판단되며, 리브 플레이트 보강의 경우는 에너지 소산능력 향상에 상당한 도움이 되는 것으로 사료된다.

4. 결론

- (1) 리브 플레이트 보강이 최대내력에 영향을 주는 것으로 판단되며, 전단면수 증가는 내력 증가에 도움을 주지 않는 것으로 사료된다. 리브 플레이트 보강이 내력상승률을 높이는 데는 영향을 주지 않는 것으로 추정된다.
- (2) 리브 플레이트 보강으로 초기강성 향상에 도움을 주는 것으로 판단되며, 전단면수 증가는 큰 영향을 주지 않는 것으로 추정된다.
- (3) 리브 플레이트 보강이 에너지 소산능력 향상에 도움을 주는 것으로 보였으며, 전단면수 증가는 큰 영향을 주지 않는 것으로 추정된다.
- (4) 모든 시험체가 중간변위비 4% 및 총소성회전 능력 약 0.029rad. 이상 그리고 접합부 최대내력이 원단면보 전소성모멘트의 약 130% 이상을 상회하여 중간연성모멘트골조 이상의 설계가 가능하리라 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2004년도 서일대학 학술연구비에 의해 연구되었음

참고 문헌

박순규, 김한수, 이상훈 (2002). CFT기둥-보 단부 평판 접합부의 내진성능. 대한건축학회 논문집(구조계), 대한건축학회, 제18권, 제3호, pp. 3~10.

이대용 (2004). WUF-W 모멘트 접합부에서의 패널 존 거동과 AISC 설계기준. 한국강구조학회지 학술기사, 한국강구조학회, 제16권, 제14호, pp. 64~77.

최성모, 윤여상, 김요숙, 김진호 (2003). 이형 하부 다이아프램으로 보강된 각형 CFT 기둥-보 접합부의 내진성능에 관한 연구. 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제15권, 제5호, pp. 579~589

한상환, 권건업 (2003). WUF-B 접합부의 내진성능 평가 (1) WUF-B 접합부의 반복 가력 시험. 대한건축학회 논문집(구조계), 제19권, 제11호, pp. 33~40.

AISC. (1997). Metric Load and Resistance Factor Design Specification for Structural steel Buildings, AISC Chicago Illinois

FEMA350 (2000). Recommended Seismic Design Criteria for New Steel Moment-Frame Buildings, FEMA.

SAC (1996). Experimental Investigations of Beam-Column Subassemblages, SAC.

- ◎ 논문접수일 : 2006년 02월 11일
- ◎ 심사의뢰일 : 2006년 02월 18일
- ◎ 심사완료일 : 2006년 03월 23일