



소규모 철골조 보-기둥 약축 모멘트 접합부의 내진성능

임우영^{1*} · 유영찬²

¹조교수, 원광대학교, 건축공학과, ²선임연구위원, 한국건설기술연구원, 건축도시연구소

Seismic Performance of Beam-to-column Weak-axis Moment Connection of Small-size Steel Structure

Lim, Woo-Young^{1*}, You, Young-Chan²

¹Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Wonkwang University, Iksan, Jeonbuk, 54538, Korea

²Senior Research Fellow, Building and Urban Research Institute, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Goyang-si, Gyeonggi-do, 10223, Korea

Abstract - Cyclic loading tests for beam-to-column weak-axis connections were performed to investigate the seismic performance. In this study, the connections were developed to improve the constructability on the basis of investigation for existing small-size steel structures. The primary test parameter is the number of high-tension bolts which are used to connect steel beam and column using exterior and interior flange plates. Test results showed that the number of bolts had a significant effect on the cyclic behavior of beam-column weak-axis connections. From the analysis of test results, it is concluded that more than four bolts in the connections can satisfy the requirements of semi-rigid connection presented in current design codes. All of specimens showed the bearing failure around bolt holes and fracture at the beam flange. However, when the web height and the flange width is relatively small, the number of the bolts used in the connections might be limited. Thus, the additional research in this area is needed.

Keywords - Small-size steel structure, Beam-to-column weak-axis connection, Cyclic loading tests, Seismic performance

1. 서론

현행 건축법령에서는 층수가 2층 이하이고 연면적 500m² 미만인 건축물을 소규모 건축물로 정의하고 있다^[1]. 이러한 소규모 건축물은 별도의 구조계산 없이도 건축물의 안전성을 확보할 수 있도록 건축물의 구조기준 등에 관한 규칙에서 구조형식별로 구조상세를 규정하고 있으나, 지진 등과 같은 횡하중에 대한 별도의 안전성은 평가되고 있지 않다. 따라서 국내 소규모 건축물의 적절한 내진 안전성을 확보하는 방안

을 마련하는 것이 필요하다. 이에 따라 국토교통부에서는 소규모 건축물의 내진 안전성을 확보하기 위한 방안의 일환으로 소규모 건축물 내진설계 개선방안 연구^[2]를 통하여 소규모 건축물 구조지침^[1]을 제정하여 공고하였다.

소규모 건축물 구조지침^[1]에서는 철골조 보-기둥 접합부에 대한 구조기준과 시공방법 등이 제시되어 있다. 이 중에서 약축방향 보-기둥 접합부는 공장에서 브래킷 형식으로 제작하여 현장에 반입한 후 고력볼트를 사용하여 브래킷 웹과 플랜지를 모두 접합하는 모멘트접합으로 규정하고 있어 실제 현장의 상황과는 많이 다른 것이 현실이다.

기존연구에 의하면, 브래킷 형식의 보-기둥 약축 접합부는 현행 구조기준에서 요구하는 특수모멘트골조 접합부의 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다^[3]. 하지만 이러한 방식의 접합부는 기둥과 브래킷 그리고 수평 스틱프너가 모두 용접접합되므로 용접불량 등에 의해 취성파괴가 발생할 가능성이 있다. 게다가 브래킷과 보를 연결하기 위해 연결부에

Note.-Discussion open until October 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 1, 2016; revised January 19, 2017; approved on February 14, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-63-850-6866 Fax. +82-63-843-0782

E-mail. wylim97@wku.ac.kr

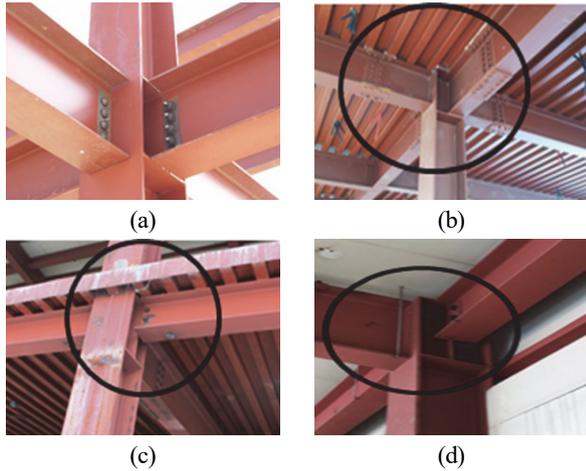


Fig. 1. Investigation of beam-column weak-axis connection

많은 양의 강재가 소요되므로 접합부 제작 및 설치에 많은 비용이 발생하게 된다.

한편, 국내 소규모 철골조 건축물의 보-기둥 약축접합부에 대한 현황조사 분석 결과에 의하면(Fig. 1 참조), 보-기둥 접합상세에 있어서 강축방향은 강접합이 적용된 반면 약축방향의 경우는 웹만 고력볼트로 연결된 핀접합이 사용되는 경우가 많았다. 또한, 장변 및 단변 방향으로 강접합이 사용된 건축물의 경우, 표준접합 상세에 따라 시공되었지만, 일부의 경우 테크플레이트의 시공을 위해 보 상부 플랜지 연결플레이트가 누락된 접합부도 있었으며, 장변 및 단변 방향 모두 핀접합으로 시공된 경우도 있었다. 그밖에 용접 불량 및 볼트 체결 불량 등을 확인하였다. 이는 도면상으로 약축방향 접합부까지 강접을 규정하여도 소규모 건축물의 현장 시공상의 제약성으로 인해 빚어진 한계라고 판단된다. 특히, 소규모 철골조 건축물의 경우, 앵커볼트가 철골 기둥 내에 위치한 주각부는 일반적으로 핀접합으로 가정하게 되는데, 이 경우, 보-기둥 접합부가 핀접합으로 시공되면 구조적으로 불안정한 구조물이 된다.

이러한 시공상의 문제점을 개선하기 위하여 최근 많은 연구자들에 의해 새로운 형식의 약축접합부 상세가 개발되었다^{[4],[5],[6],[7],[8],[9],[10],[11],[12],[13]}. 국내에서 주로 수행된 약축방향 보-기둥 접합부에 대한 연구는 용접량을 최소화하고 고력볼트 접합방법을 사용해 시공성을 향상시키는데 연구의 주안점을 두고 있다. Shim *et al.*^[10]은 H형 기둥에 수평스티프너 역할을 하는 용접플레이트를 설치하여 보를 연결하는 방식의 보-기둥 약축 접합부를 제안하였다. 이때 전단접합에 사용되는 전단탭(shear tab)은 사용되지 않았다. Kim

et al.^{[11],[12]}은 스플릿 티, 용접 스플릿 티, 약축접합부와 엔드플레이트 약축접합부 등을 제안하였다.

이러한 연구의 연장선에서 본 연구에서는 현재 국내 기존 건축물 중 소규모 철골조 건축물에서 실제 시공되고 있는 기존 약축접합부의 문제점을 파악하고, 소규모 철골조에 적용 가능한 새로운 형식의 약축접합부를 제안하고자 한다. 새로운 형식의 약축방향 접합상세는 보-기둥 접합이 고력볼트의 개수에 따라 어느 정도의 반강접을 발현하지로 설정하였으며, 반복가력 실험을 통해 제안된 접합부의 내진성능을 알아보고자 하였다.

2. 실험 프로그램

2.1 실험체 제원

보-기둥 약축 접합부의 내진성능을 알아보기 위해 총 3개의 실험크기의 실험체를 대상으로 반복가력 실험을 수행하였다. Fig. 2는 실험체 상세를 보여준다. H형 기둥과 보는 소규모건축물 구조지침^[1]에서 제시하고 있는 표준단면치수를 사용하였다. 주요 실험 변수는 보 플랜지 접합에 사용된 볼트 개수이다. H형 기둥과 보는 각각 H-300×300×10×15 (mm), H-400×200×8×13(mm)이 사용되었으며, 모든 부재는 공장제작을 위해 SS400 강종이 사용되었다. 기둥의 높이는 2,000mm이고, 보의 길이는 2,050mm, 그리고 기둥면에서부터 가력점까지의 거리는 1,850mm이다.

강재의 공칭강도를 사용한 보의 강축방향 소성모멘트($M_{pb} = Z_b F_{yb}$)는 312.6 kN·m이고, 기둥의 약축방향 소성모멘트($M_{pc} = Z_c F_{yc}$)는 160.7 kN·m이다. 여기서, Z_b 는 보의 강축방향 소성단면계수(= $1,330 \times 10^3 \text{mm}^3$), Z_c 는 기둥의 약축방향 소성단면계수(= $684 \times 10^3 \text{mm}^3$), 그리고 F_{yb} 와 F_{yc} 는 보와 기둥의 공칭 항복강도($F_{yb} = F_{yc} = F_y = 235 \text{MPa}$)이다. 따라서, 본 연구에서 사용된 실험체의 보 소성모멘트에 대한 기둥 소성모멘트의 비(M_{pc}/M_{pb})는 0.34이다. 이는 현행 강구조 구조기준에서 제시하고 있는 강기둥-약보(strong column-weak beam) 조건을 만족하지 않는다. 일반적으로 소규모 건축물은 지진에 의한 횡력의 영향이 상대적으로 크지 않으므로 대부분 중력하중에 대해서만 설계를 한다. 또한 소규모 건축물의 기둥에는 상대적으로 낮은 압축력만 작용하므로 기둥 단면의 깊이는 보의 단면깊이에 비해 작다^{[14],[15]}. 이러한 이유로 중력하중이 크지 않은 소규모 건축물은 지진하중

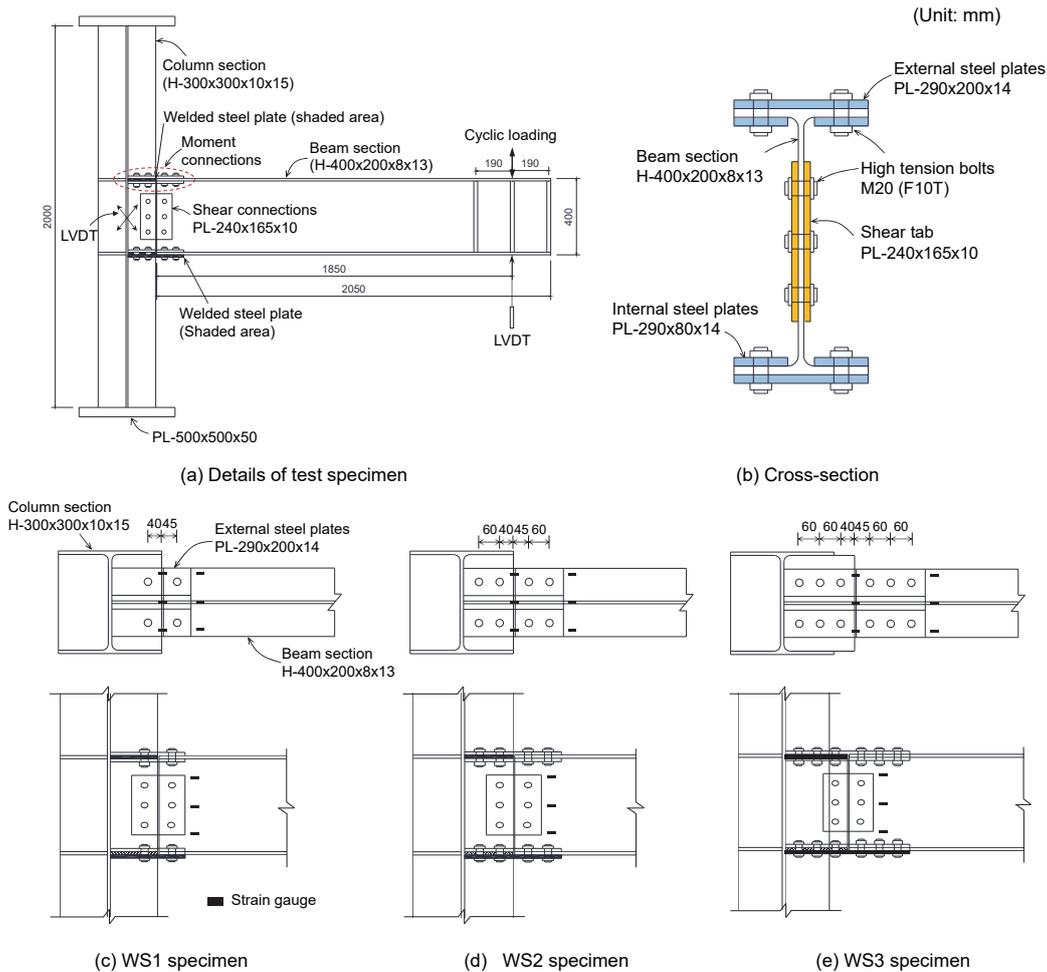


Fig. 2. Configuration of the test specimens

에 의하여 약기둥-강보(weak column-strong beam) 거동을 보인다. 이와 같이 소규모 철골조 건축물에는 현행 구조 기준에서 제시하고 있는 엄격한 내진규정을 강제하고 있지 않으므로 약축 보-기둥 접합부를 약기둥-강보로 설계해도 무방할 것으로 판단된다.

2.2 접합부 설계

이 연구에서 사용된 접합부 설계휨강도($\phi_b M_n$)와 설계전단강도($\phi_v V_n$)는 다음 식(1)에 의해 결정되었다^[16].

$$\phi_b M_n = \phi_b M_{pb} = 0.9 Z_f F_{yb} \quad (1)$$

$$\phi_v V_n = \phi_v (0.6 F_{yb}) A_w \quad (2)$$

여기서, ϕ_b 와 ϕ_v 는 각각 휨강도 저감계수(= 0.9)와 전단강도 저감계수(= 0.9)이고, A_w 는 보의 웹 면적이다. 식 (1)과 식 (2)에 의해 산정된 접합부의 설계휨강도는 218.3kN·m이고, 설계전단강도는 379.7kN이다.

접합부 설계를 위해 보 플랜지와 내·외부 플레이트는 오직 휨모멘트만 부담하고, 보 웹 전단접합부는 전단력만 부담하는 것으로 설계하였다. 플랜지 이음부 소요인장강도를 구하기 위해 소요휨강도(M_u)는 설계휨강도($\phi_b M_n$)과 동일하게 적용하였으며, 웹 전단접합부 소요전단강도 역시 식 (2)를 사용하여 구하였다. 고력볼트는 M20(F10T)를 사용한다. 그 결과, 보 플랜지에는 6개의 고력볼트가 필요하며, 웹 전단접합부에는 3개의 볼트로도 충분한 것으로 나타났다. 여기서, 보 웹 전단접합부의 볼트개수는 실제로 3.05개가 필요하나, 소요전단강도를 다소 크게 가정하였기에 3개의 고력볼트를 사용해도 무방할 것으로 판단된다. 내·외부 플레이트

트 두께를 산정하기 위해 외부 플레이트의 폭을 보 플랜지 폭과 동일하게 200mm로 가정하고 내부 플레이트의 폭을 80mm로 가정하였다. 그 결과, 요구되는 내·외부 플레이트의 두께는 각각 9.54mm와 8.91mm로 나타났으며, 이 연구에서는 접합부의 강도와 강성의 향상을 위해 두께 14mm의 플레이트를 사용하였다.

Fig. 2에서 보이는 바와 같이 WS1, WS2, 그리고 WS3 실험체의 보 플랜지에 각각 2개, 4개, 6개의 고력볼트가 사용되었다. 따라서 연결부 휨내력은 플랜지에 설치된 볼트의 개수에 따라 결정된다. 미끄럼 한계상태에 대한 마찰접합부의 설계강도는 다음 식 (3)으로부터 구할 수 있다.

$$R_n = n_f \mu h_f T_o N_s \quad (3)$$

여기서, n_f 는 플랜지에 설치된 고력볼트 개수, μ 는 미끄럼계수(= 0.5), h_f 는 필러계수로서 필러를 사용하지 않는 경우와 필러내 하중의 분산을 위하여 볼트를 추가한 경우 또는 필러내 하중의 분산을 위해 볼트를 추가하지 않은 경우로서 접합되는 재료 사이에 한 개의 필러가 있는 경우에는 1, 필러내 하중의 분산을 위해 볼트를 추가하지 않은 경우로서 접합되는 재료 사이에 2개 이상의 필러가 있는 경우에는 0.85를 적용한다. T_o 는 고장력볼트의 설계 볼트 장력(kN), 그리고 N_s 는 전단면의 수이다.

고력볼트가 2개(WS1), 4개(WS2), 6개(WS3)가 사용될 때, 식 (3)에 의해 구해진 미끄럼강도는 각각 324, 648, 972kN이며, 미끄럼 강도를 사용하여 구한 WS1, WS2, 그리고 WS3 실험체 접합부 강도는 각각 105.9, 211.9, 그리고 317.8kN·m로 나타났다. 따라서 보의 소성모멘트 강도 ($M_{pb}=312.6\text{kN}\cdot\text{m}$)에 대한 각 실험체의 접합부 강도의 비는 각각 0.34, 0.68, 그리고 1.02이다.

이러한 상세를 가진 접합부에 휨모멘트가 발생하면, 외부 플레이트의 항복이 선행될 것이며, 이후 보 플랜지의 항복과 보 웨브의 항복이 이어서 발생할 것으로 예측된다. 하지만, 접합부의 내력이 충분하지 않을 경우 보 웨브의 항복없이 외부 플레이트 또는 보 플랜지에서의 블록전단파괴가 발생할 수도 있다. 실험체 설계결과, 보 플랜지에 6개의 고력볼트가 필요하므로, 2개와 4개의 고력볼트가 사용된 WS1과 WS2 실험체는 보 웨브가 소성상태에 도달하기 전 외부 플레이트 또는 플랜지의 파괴가 발생할 것이며, 6개의 고력볼트가 사용된 WS3 실험체는 외부 플레이트가 항복한 이후 보 웨브의

휨파괴가 발생할 것으로 판단된다. 이 때, 선형으로 가정된 단면의 변형을 분포를 이용하여 구한 외부 플레이트가 항복강도($F_y=235\text{MPa}$)에 도달했을 때와 보 플랜지에서 블록전단파괴($F_u=400\text{MPa}$)가 발생했을 때의 휨강도는 각각 504.4, 531.5kN·m이다.

2.3 실험체 조립

Fig. 3은 실험체 조립순서를 나타낸다. 현장 시공성을 고려하여 패널존에 설치되는 수평 스티프너를 보 상·하부 플랜지에 설치한 뒤 보 하부 플랜지와 연결되는 외부 플랜지 연결 플레이트(external steel plate)를 공장에서 용접하였다(Fig. 3(a) 참조). WS1과 WS2 실험체의 수평스티프너는 웨브 두께를 제외한 플랜지 너비의 절반크기로 제작되었으며, WS3 실험체의 경우, 볼트 간격을 고려해 플랜지 너비의 절반보다 큰 연결 플레이트를 사용하였다. WS1, WS2, 그리고 WS3 실험체의 경우, 연결 플레이트의 내민길이는 각각 85, 145, 그리고 205mm이다. 수직 스티프너는 전단접합부를 연결하기 위해 상·하부 수평 스티프너 사이에 설치되었다. 외부 강재 플레이트의 두께는 14mm이고, 수직·수평 스티프너의 두께는 모두 13mm이다. 강재 보의 연결을 위해 외부 플랜지 연결 플레이트와 내부 플랜지 연결 플레이트를 보 플랜지와 상·하부 스티프너에 각각 설치한 후 M20(F10T) 고력볼트를 사용해 상호 연결한다(Figs. 3(b), (c) 참조). 동시에 패널존에 설치된 수직 스티프너와 보 웨브를 고력볼트를 사용해 연결하여 보-기둥 약축 접합부를 완성한다(Fig. 3(d) 참조).

보 플랜지 전단접합부는 PL-240×165×10 크기의 강재 덧판을 웨브 양쪽에 각각 하나씩 설치한 뒤, 총 6개의 고력볼트에 의해 연결되었다.

2.4 실험체 셋업

Fig. 4는 실험체 셋업과 하중 가력 이력곡선을 보여준다. 실험체는 2000kN 용량의 동적 액추에이터를 사용하여 보 단부에서 반복가력하였다(Fig. 4(a) 참조). Fig. 4(b)는 하중 가력 이력곡선을 보여준다. 첫 번째 스텝(6cycles)은 회전각(θ) 0.00375rad($\Delta=3.75\text{mm}$), 두 번째 스텝(6cycles)은 0.005rad(5mm), 세 번째 스텝(6cycles)은 0.0075rad(7.5mm), 네 번째 스텝(4cycles)은 0.01rad(10mm), 다섯 번째 스텝(2cycles)은 0.015rad(15mm), 여섯 번째 스텝

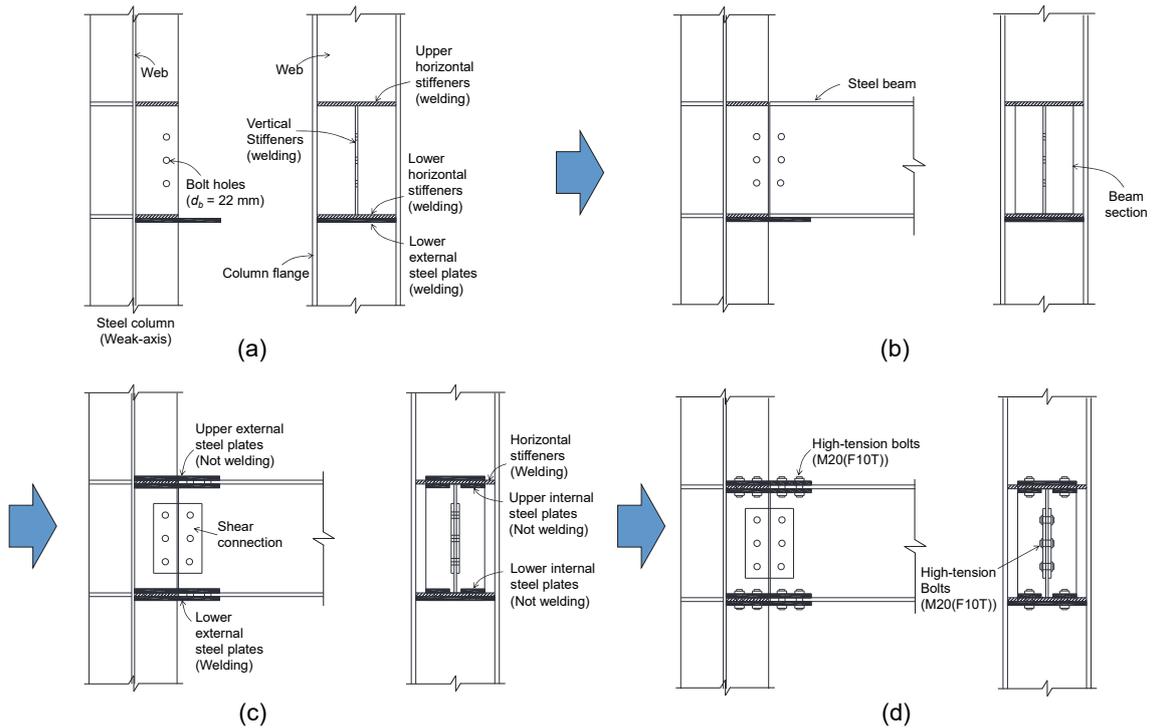
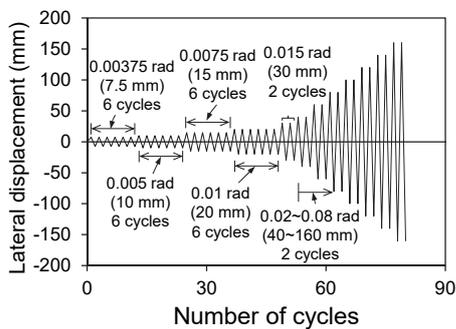


Fig. 3. Assemblage of beam-column weak-axis connections



(a) Test setup



(b) Loading history

Fig. 4. Test setup and loading history

(2cycles)은 0.02rad(20mm), 그리고 일곱 번째 스텝(2cycles) 부터는 0.01rad씩 증가시키며 반복가력하였다^[17]. 여기서, θ 는 회전각을 나타내며, Δ 는 가력지점의 LVDT에 의해 측정 된 횡변위(mm)이다.

2.5 계측계획

보 웹브, 보 플랜지, 플랜지 연결 플레이트의 변형률을 측정하기 위해 스트레인게이지를 부착하였다. 스트레인 게이지의 부착위치와 변위계(LVDT)의 설치위치는 Fig. 2에 나타나있다. 보 웹브의 변형을 측정하기 하기 위해 웹브 연결 플레이트에서 100mm 떨어진 곳에 3개의 스트레인 게이지가 설치되었다. 보 플랜지의 휨변형 측정을 위해 플랜지 연결플레이트 연단으로부터 100mm 떨어진 플랜지 상·하부에 3개씩 총 6개의 스트레인 게이지가 부착되었다. 플랜지 연결플레이트 상·하부에는 3개씩 총 6개의 스트레인 게이지가 부착되었다. 보의 횡변위는 가력지점에 설치한 와이어 게이지를 통해 측정되었으며, 기둥 패널존의 전단변형은 Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 2개의 LVDT에 의해 측정되었다.

2.6 재료실험

Table 1. Material properties

Members		Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Modulus of elasticity (GPa)
Steel beam (SS400)	Web (8mm)	377.3	443.0	200.0
	Flange (13mm)	289.0	444.5	197.2
Steel column (SS400)	Web (10mm)	351.9	498.2	206.2
	Flange (15mm)	329.0	476.4	203.8
Shear tab (SS400) (10mm)		324.0	490.7	204.4
Flange plate (SS400) (14mm)		297.8	468.3	194.6

실험체에 사용된 재료의 물성치를 파악하기 위해 주요 부재를 대상으로 KS B 0801(1A호 시험편)^[18]에 따라 3개씩 시편을 제작하여 재료실험을 수행하였다. Table 1은 재료실험 결과를 보여준다. 실험체에 사용된 강재는 모두 SS400 강종이며, 재료 실험을 통해 항복강도, 인장강도, 탄성계수 등이 측정되었다.

3. 실험결과

3.1 파괴모드

Fig. 5는 실험종료 시 각 실험체별 파괴모드를 보여준다. WS1 실험체의 경우, Fig. 5(a)에서 보이는 바와 같이 보 플랜지 연결 플레이트가 항복한 이후 보의 플랜지가 항복하였다. 회전각 0.02rad에서 보 하부 연결플레이트가 가장 먼저 항복하였고, 이후 0.0268rad에서 보 상부 연결플레이트가 항복하였다. 보 상부 플랜지는 층간변위 -0.0043rad에서 항복하였다. 이때, 보 웹브와 보 하부 플랜지는 실험종료 시

까지 항복하지 않았다. 회전각 0.06rad일 때 접합부 하부 플랜지 지압파괴가 발생하였고, 접합부 보 상하부 플랜지 변형이 발생하였다.

WS2와 WS3 실험체의 경우, 연결 플레이트가 항복한 이후 보 플랜지가 항복했으며, 최종적으로는 보 웹브도 항복하였다. WS2 실험체의 경우, 보 상·하부 연결 플레이트는 층간변위 2% 내외에서 항복하였다. 이후 보 하부 플랜지와 상부 플랜지가 각각 층간변위 -0.032rad과 -0.034rad에서 항복하는 것으로 나타났다. 보 하부 플랜지가 항복한 이후 층간변위 -0.045rad에서 보 웹브가 항복하였다. 이 실험체는 Fig. 5(b)에서 보이는 바와 같이, 회전각 0.06rad일 때 접합부 보 하부 플랜지에 파단이 발생하였다. WS3 실험체의 경우, 보 플랜지 상·하부 연결판이 회전각 약 0.015rad과 0.02rad에서 각각 항복한 이후 -0.024rad과 -0.025rad에서 보 상·하부 플랜지가 각각 항복하였다 (Fig. 5(c) 참조). 이후 보 웹브는 0.036 rad에서 항복하는 것으로 나타났다. 실험결과, 접합부 설계 시 예상한 파괴모드와 실제 파괴모드는 거의 일치하는 것으로 나타났다.

모든 실험체는 플랜지 연결 플레이트의 연단쪽 보 플랜지 볼트 구멍 주위에서 지압파괴와 파단 등이 발생하였다. 이러한 결과가 나타난 이유는 외부 플레이트의 볼트 구멍 주위에 지압파괴가 발생하여 볼트와 볼트 구멍 사이의 이격거리가 증가함에 따라 플랜지와 외부 플레이트 사이의 틈이 벌어져 특정 볼트 구멍 주위에 응력이 집중되어 플랜지에서 블록전단파단이 발생한 것으로 판단된다.

3.2 모멘트-회전각 관계

Fig. 6은 실험체별 모멘트-회전각 관계를 보여준다. 여기서, M_{plb} 는 재료실험에서 구한 플랜지 항복강도(F_{ybt})를 적용한 보의 소성모멘트($=Z_p F_{ybt} = 384.4 \text{ kN}\cdot\text{m}$)를 의미한다. 각 실험

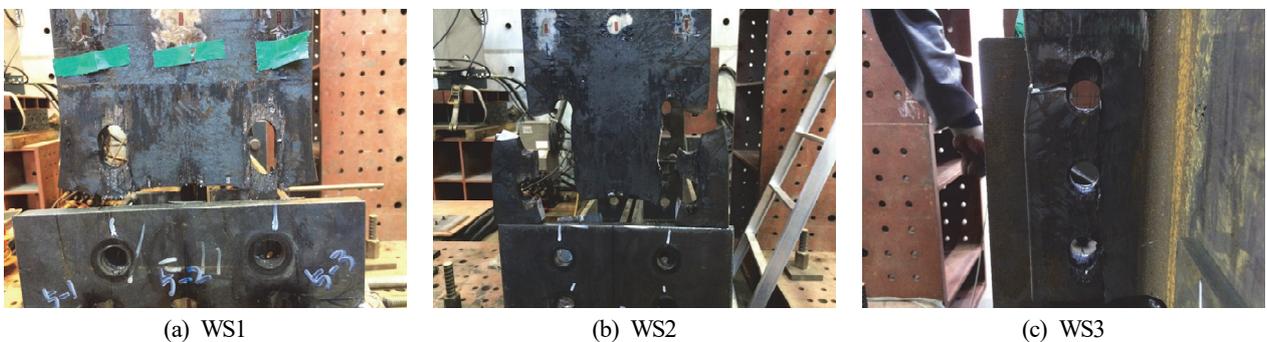


Fig. 5. Damage and failure mode at the end of the tests

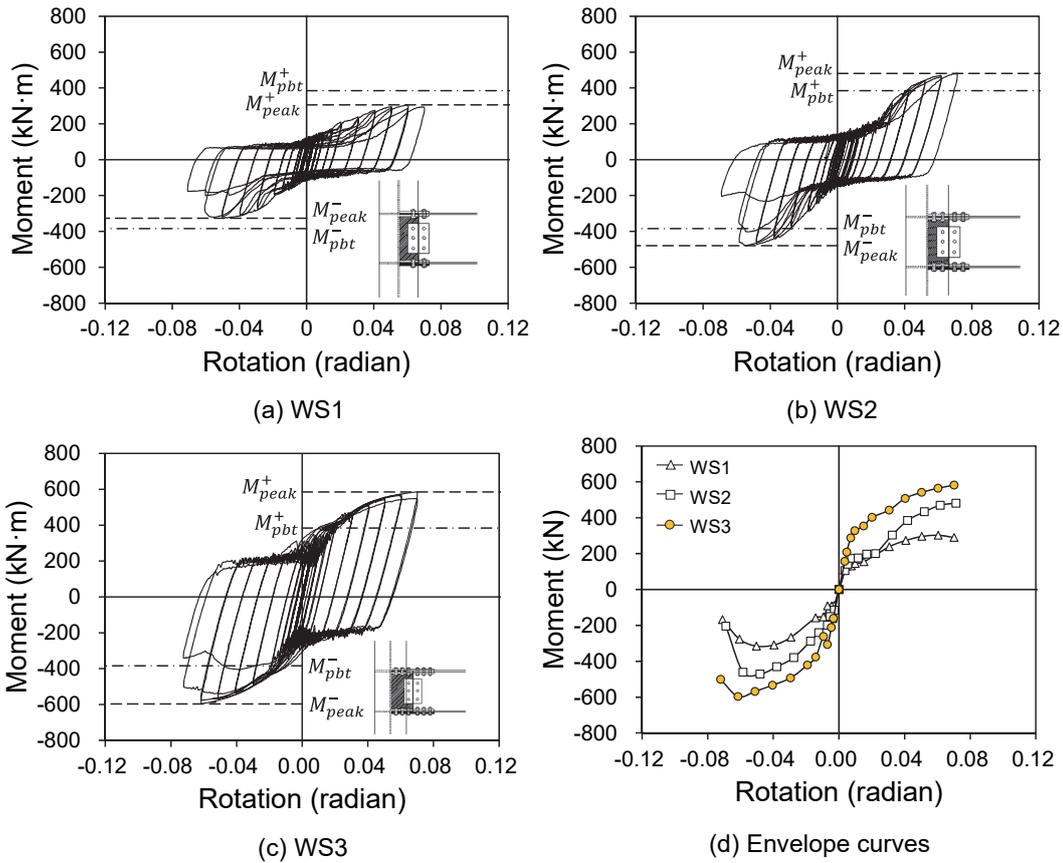


Fig. 6. Moment-rotation relationship and envelope curves

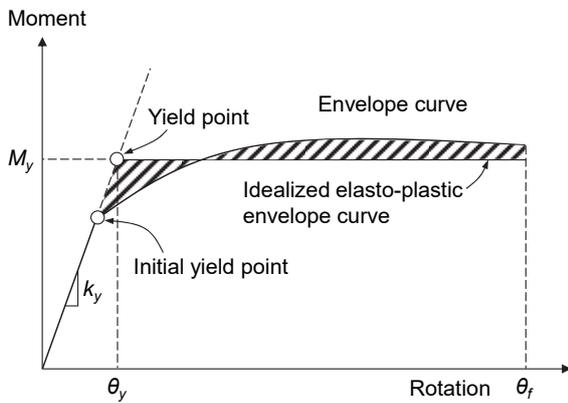


Fig. 7. Definition of initial yield point

체별 항복점, 최대강도, 파괴 시 강도 등은 Table 2에 요약되어 있다. 항복점은 등가 에너지 방법으로 정의되었으며, Fig. 7에 나타난 바와 같이, 실험체의 포락곡선과 이상화된 탄소성 곡선으로 둘러싸인 부분의 면적이 같을 때의 모멘트를 항복모멘트(M_y)로, 항복모멘트에 대응되는 회전각을 항복 시 회전각

(θ_y)으로 정의하였다. 초기강성(k)은 포락곡선에서 탄성구간을 지나 소성구간이 시작되는 점으로 정의하였다. 연성도(μ)는 항복 시 변위(Δ_y)에 대한 최종파괴 시 변위(Δ_f)에 대한 비($=\Delta_f/\Delta_y$)로 나타내었다. Fig. 6(d)는 목표 변위별 첫 번째 싸이클을 사용하여 구한 모멘트-회전각 관계를 보여준다.

실험결과, WS1 실험체의 경우(Fig. 6(a) 참조), 강재 보는 소성모멘트에 도달하지 않았으며, WS2와 WS3 실험체는 모두 소성모멘트에 도달한 것으로 나타났다(Figs. 6(b), (c) 참조) 보의 휨저항능력이 소성모멘트에 도달했을 때의 횡하중에 대한 최대 횡하중 값의 비(M_{peak}/M_p)는 WS1 실험체의 경우, 정가력일 때 0.79, 부가력일 때 0.85이었고, WS2 실험체는 정부가력일 때 모두 1.25, 그리고 WS3 실험체의 경우, 정가력일 때 1.52, 부가력일 때 1.55를 나타냈다. 이러한 결과는 보 상·하부 플랜지를 연결하는 연결 플레이트의 내민 길이가 증가할수록 웹를 연결하는 연결플레이트에서 발생하는 볼트 구멍에서의 지압파괴를 최대한 지연시킴과 동시에 보 플랜지의 항복은 물론 보 웹도 항복에 이르렀기 때문

Table 2. Summary of test results

Specimens	At peak						At failure					
	Positive (+)			Negative (-)			Positive (+)			Negative (-)		
	$\Delta_{@Vpeak}^+$ (mm)	$\theta_{@Mpeak}^+$ (rad)	M_{peak}^+ (kN)	$\Delta_{@Vpeak}^-$ (mm)	$\theta_{@Mpeak}^-$ (rad)	M_{peak}^- (kN)	Δ_f^+ (mm)	θ_f^+ (rad)	M_f^+ (kN)	Δ_f^- (mm)	θ_f^- (rad)	M_f^- (kN)
WS1	120.2	0.06	305.0	-99.9	-0.05	-326.6	140.2	0.070	290.0	-141.9	-0.071	-176.6
WS2	142.5	0.071	481.2	-108.3	-0.054	-479.2	142.5	0.071	481.2	-137.9	-0.069	-203.8
WS3	138.8	0.069	585.0	-123.0	-0.062	-596.4	140.3	0.070	582.2	-144.3	-0.072	-500.8

Specimens	At yielding						K_{test} (kN·m)		M_{peak}/M_{pbt}		μ (Δ_f/Δ_y)	
	Positive (+)			Negative (-)			(+)	(-)	(+)	(-)	(+)	(-)
	Δ_y^+ (mm)	θ_y^+ (rad)	M_y^+ (kN)	Δ_y^- (mm)	θ_y^- (rad)	M_y^- (kN)						
WS1	19.7	0.001	145.2	-18.8	-0.009	-152.6	31,183	28,955	0.79	0.85	7.12	7.55
WS2	44.6	0.022	200.4	-18.8	-0.009	-261.6	28,800	39,745	1.25	1.25	3.20	7.34
WS3	21.0	0.011	353.8	-28.4	-0.014	-377.0	44,310	46,586	1.52	1.55	6.68	5.08

Note: The initial stiffness (K_{test}) was obtained at the first cycle of target rotation angle 0.00375 in the envelope curves.

으로 판단된다.

3.3 에너지 소산능력

Fig. 8은 목표변위별 누적 에너지 소산능력을 나타낸다. 에너지 소산능력은 ACI T1.1-01^[19]에 의해 하중-충간변위 곡선에서 목표 변위별 마지막 사이클의 내부 면적으로 구했다. 누적 에너지 소산능력은 목표변위별 에너지 소산량을 모두 더한 값을 의미한다.

각 실험체별 누적 에너지 소산능력을 비교한 결과, 용접

플레이트의 길이를 기둥 플랜지 폭보다 조금 더 내밀어 보 플랜지와 연결한 WS3 실험체의 에너지 소산능력이 플레이트 길이와 기둥 플랜지 폭이 같은 WS1과 WS2 실험체보다 큰 것으로 나타났다. 회전각 0.04rad일 때 WS3 실험체의 누적 에너지 소산능력은 WS1과 WS2 실험체에 비해 약 2.38배, 1.69배 정도 향상되는 것으로 나타났으며, 0.06rad일 때는 약 1.94배, 1.59배 정도 향상되는 것으로 나타났다.

4. 접합부 내진성능 평가

4.1 현행 기준에 의한 접합부 구분

4.1.1 ANSI/AISC 360-10^[20]에 의한 접합부 구분

현행 강구조 구조기준에서는 보-기둥 접합부를 강성과 휨강도에 따라 완전 강접합, 부분 강접합, 그리고 단순접합으로 구분하고 있다. ANSI/AISC 360-10^[20]에서는 Fig. 9와 같이 보-기둥 접합부를 완전강접합(fully restrained), 부분강접합(partially restrained)과 단순접합(simple connection)으로 분류하고 있다. 실험을 통해 구한 강성이 $20EI_b/L_b$ 이상일 경우 완전강접합으로, $2EI_b/L_b$ 이하일 경우 단순접합으로 정의하고 있다. 그리고 강성이 $2EI_b/L_b$ 을 초과하고

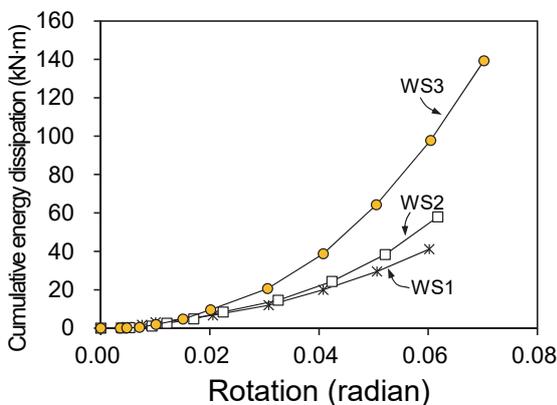


Fig. 8. Cumulative energy dissipation

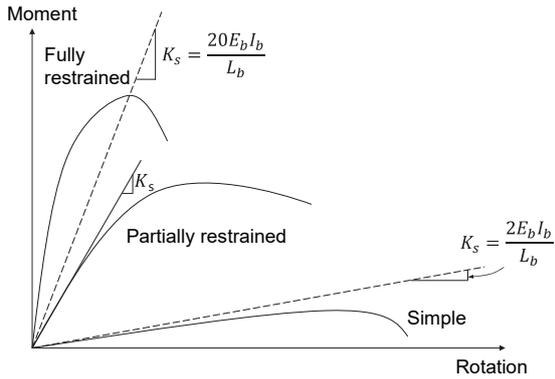


Fig. 9. Classification of fully restrained (FR), partially restrained (PR) and simple connections in accordance with AISC (2010)

$20E_bI_b/L_b$ 미만일 경우 부분강접합으로 정의된다. 여기서, E 는 탄성계수 ($= 205,000\text{MPa}$), I_b 는 보의 강축방향 단면2차 계수 ($= 23,700 \times 10^4 \text{mm}^4$), 그리고 L_b 는 기둥 중심간 길이이다. EC3에 의하면, 접합부 강성이 $25E_bI_b/L_b$ 이상일 경우 강접합으로, $0.5E_bI_b/L_b < K < 25E_bI_b/L_b$ 일 때 부분강접합으로 규정하고 있다. 강성이 $0.5E_bI_b/L_b$ 이하일 때는 단순접합으로 정의하고 있다.

강도 측면에서 고려했을 때, ANSI/AISC 360-10^[20]에 따르면, 완전 강접합일 때 접합부의 모멘트 강도(M_j)는 보의 소성모멘트 강도(M_{pb}) 이상이어야 하고, 강도가 보 소성모멘트의 20% 이상이고 100% 미만일 때는 부분 강접합으로 구분하고 있다. 접합부의 강도가 보 소성 모멘트의 20% 이하일 때 단순접합부로 규정하고 있다. 이때, 단순접합과 부분강접합을 판단하기 위해서는 회전각 0.02 rad일 때의 모멘트 강도를 사용한다.

4.1.2 EC3 (Part 1-8)^[21]에 의한 접합부 구분

EC3(Part 1-8)^[21]은 접합부 강도에 따라 보-기둥 접합부를 단순접합부(normally pinned joint), 전강도 접합부(full-strength joint), 그리고 부분강도 접합부(partial strength joint)로 구분하고 있다. 접합부의 강도(M_j)가 보 소성모멘트의 20% 이하일 때($M_j \geq 0.2M_{pb}$) 단순접합부로 구분되며, 접합부 강도가 보 소성모멘트 이상일 경우($M_j \geq M_{pb}$) 또는 기둥 소성모멘트의 2배값 이상일 경우($M_j \geq 2M_{pc}$)에는 전강도 접합부로 구분된다. 부분강도 접합부의 경우, 접합부의 강도가 $0.2M_{pb}$ 를 초과하고 M_{pb} 또는 $2M_{pc}$ 미만일 경

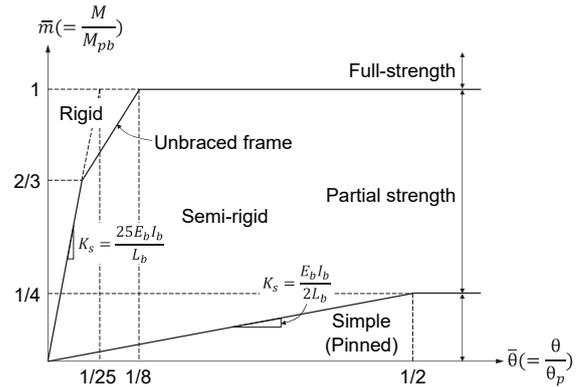


Fig. 10. Classification of joints in accordance with EC3

우에는 부분강도 접합부로 구분한다.

Fig. 10은 EC3에서 제시하고 있는 접합부 구분 방법을 나타낸다. 특히, 비가새 골조에 대해 부분강접 접합부는 다음 조건을 만족시켜야 한다.

$$\text{When } \bar{m} < 2/3 \rightarrow \bar{m} < 25\bar{\theta} \tag{4}$$

$$\text{When } 2/3 < \bar{m} < 1.0 \rightarrow \bar{m} < \frac{25\bar{\theta} + 4}{7} \tag{5}$$

여기서, $\bar{m} = M/M_{pb}$, $\bar{\theta} = \theta/\theta_p$ 이고, $\theta_p = M_{pb}L_b/EI_b$, E 는 탄성계수, I_b 는 보의 단면2차 모멘트, L_b 는 보의 길이이다. 식(4)와 (5)는 비가새 골조에 대해 다음 조건에만 적용할 수 있다.

$$\frac{I_b/L_b}{I_c/L_c} \leq 1.0 \tag{6}$$

여기서, I_c 와 L_c 는 각각 기둥의 단면2차모멘트와 길이를 나타낸다.

4.2 접합부 성능

4.2.1 강성 평가

제안된 보-기둥 약축접합부의 강성을 현행 기준과 비교하기 위해 본 연구에서는 목표 회전각 0.00375 rad에서 첫 번째 사이클의 강성값을 사용하였다. 각 실험체의 강성과 ANSI/AISC 360-10^[20]과 EC3에 제시하고 있는 강성과의 비교는 Table 3에 요약되어 있다. ANSI/AISC 360-10^[20]에 의해 강성을 비교한 결과, WS3 실험체만이 부분강접합으로 고려될 수 있는 것으로 나타났다. 반면에, EC3에 의한 강성

Table 3. Comparison of flexural moment with plastic moment of the beam at 0.02rad and 0.04rad

Specimens		At 0.02rad		At 0.04rad	
		M_j (kN·m)	$\frac{M_j}{M_{pbt}}$	M_j (kN·m)	$\frac{M_j}{M_{pbt}}$
WS1	(+)	197.3	0.51	273.0	0.71
	(-)	-195.6	0.51	-309.1	0.80
WS2	(+)	200.5	0.52	385.2	1.00
	(-)	-287.8	0.75	-430.4	1.12
WS3	(+)	402.1	1.05	507.8	1.32
	(-)	-421.2	1.10	-533.2	1.39

평가는 모든 실험체의 강성값이 기준에서 제시하고 있는 부분강접합일 때의 강성값을 초과하는 것으로 나타났다. 각 실험체는 ANSI/AISC 360-10^[20]과 EC3에서 제시하고 있는 완전강접합일 때의 강성값에 비해 약 5~11% 수준으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 수행된 실험체 중 WS1과 WS2 실험체는 단순접합 (또는 핀접합)으로, WS3 실험체는 부분 강접합으로 고려될 수 있다.

4.2.2 강도 평가

ANSI/AISC 360-10^[20]는 접합부가 부분 강접합이 되기 위해서는 회전각이 0.02rad일 때 접합부의 모멘트 강도가 보 소성모멘트의 20%이상 100%미만이 되어야 한다고 규정하고 있다. 각 실험체의 보 소성모멘트 강도에 대한 회전각 0.02rad일 때의 모멘트 강도 비는 WS1 실험체는 정·부가력일 때 모두 0.51, WS2 실험체는 정가력일 때 0.52, 부가력일 때 0.75, 그리고 WS3 실험체는 정가력일 때 1.05, 부가력일 때 1.10으로 나타났다.

접합부 강도를 비교한 결과, 4개의 볼트를 사용한 WS1과 8개의 볼트를 사용한 WS2 실험체는 부분 강접합 접합부로, 12개의 볼트가 사용된 WS3 실험체는 완전 강접합 접합부의 요구조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 EC3에 의해 평가한 결과와 동일하다.

4.3 접합부 내진성능 평가

AISC 내진규정(ANSI/AISC 341-10^[17])은 보통모멘트 골조, 중간모멘트 골조, 그리고 특수모멘트 골조에 대하여 각각 0.02, 0.03, 그리고 0.04 rad의 접합부 회전각(θ)을 요구하고 있으며, 아울러 접합부 소성회전각(θ_p)은 각 골조형식

Table 4. Comparison of initial stiffness with current design codes

Specimens	AISC (K_{test}/K_{AISC})		EC3 (K_{test}/K_{EC3})	
	(+)	(-)	(+)	(-)
	Pinned (Fixed)	Pinned (Fixed)	Pinned (Fixed)	Pinned (Fixed)
WS1	0.74 (0.07)	0.69 (0.07)	2.95 (0.06)	2.74 (0.05)
	0.68 (0.07)	0.94 (0.09)	2.73 (0.05)	3.76 (0.08)
WS2	1.05 (0.10)	1.10 (0.11)	4.20 (0.08)	4.41 (0.09)

에 따라 각각 0.01, 0.02, 그리고 0.03 rad를 만족하도록 요구하고 있다.

모든 실험체는 Fig. 6(d)에서 보이는 바와 같이 접합부 회전각이 0.04rad를 초과하더라도 강도저하 현상은 발생하지 않았으며, 오히려 실험체가 최종파괴 시까지 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 실험결과, 모든 실험체는 특수모멘트 골조에 필요한 변위 요구조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 아울러 중간모멘트 골조는 회전각 0.02rad일 때의 접합부 모멘트 강도가 보 소성모멘트의 80%이상 유지되어야 하며, 특수모멘트 골조의 경우, 0.04rad일 때의 접합부 강도가 $0.8M_{pb}$ 이상이어야 한다.

아래 Table 4는 보 소성모멘트에 대한 회전각 0.02rad과 0.04rad일 때의 접합부 모멘트 강도의 비를 나타낸다. 비교결과, WS3 실험체는 ANSI/AISC 341-10^[17]에서 제시하고 있는 특수모멘트 골조의 요구조건을 만족하는 것으로 나타났다. 반면에, WS1과 WS2 실험체는 중간모멘트 골조와 특수모멘트 골조의 요구조건을 모두 만족하지 않는 것으로 나타났다.

5. 결론

본 연구에서는 국내 소규모 철골조 건축물에서 실제 시공된 보-기둥 약축 접합부에 대한 현황조사를 바탕으로 시공성을 향상시킨 약축접합부 상세를 제안하였으며, 제안된 약축접합부에 대한 반복가력 실험을 통해 접합부 내진성능을 평가하였다. 실험연구를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 보-기둥 접합부에 고력볼트가 8개와 12개가 사용된 WS2와 WS3 실험체의 휨모멘트 강도는 소성모멘트 강도를 초과하는 것으로 나타났다. 반면에, 4개의 볼트가 사용된 WS1 실험체의 강도는 소성모멘트 강도의 약 80% 수준으

로 나타났다. 이러한 결과는 플랜지 연결 플레이트의 길이가 상대적으로 짧아 휨모멘트 강도의 대부분이 보 플랜지의 볼트구멍 주위에 집중되어 발생한 것으로 판단된다.

- (2) 모든 실험체는 플랜지 연결플레이트의 연단쪽 보 플랜지 볼트 구멍 주위에서 국부적인 지압파괴와 파단 등이 발생하였다. 이때 플랜지 연결 플레이트는 주목할만한 파괴양상이 발생하지 않았다. 그리고 WS2와 WS3 실험체의 경우, 보 플랜지 연결 플레이트 연단방향 마지막 볼트 구멍 주위에서 최종파괴가 발생하였다. 이러한 결과는 보의 휨저동에 따른 연결부 변위가 패널존 내부의 볼트보다 연결 플레이트 연단쪽 볼트쪽이 더 크기 때문이다.
- (3) 현행 구조기준인 ANSI/AISC 360-10과 EC3에서 제시하고 있는 강성과 실험을 통해 구한 강성값을 상호 비교한 결과, 두 기준에 의한 강성 평가 결과는 다소 차이가 있는 것으로 나타났다. ANSI/AISC 360-10을 사용해 강성값을 비교한 결과, WS1과 WS2 실험체는 단순접합(또는 핀접합)으로, WS3 실험체는 부분 강접합으로 나타났다. 특히, EC3에서 제시하고 있는 단순접합부에 대한 강성값이 ANSI/AISC 360-10에서 제시하고 있는 값의 1/4에 해당하는 값으로서 모든 실험체 대해 부분 강접합 조건을 만족하는 것으로 나타났다. 오직 WS3 실험체만이 두 기준의 부분 강접합 요구조건을 모두 만족하는 것으로 나타났다.
- (4) 접합부 강도를 비교한 결과, 4개의 볼트를 사용한 WS1과 8개의 볼트를 사용한 WS2 실험체는 부분 강접합 접합부로, 12개의 볼트가 사용된 WS3 실험체는 완전 강접합 접합부의 요구조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 아울러, WS3 실험체는 AISC에서 제시하고 있는 특수모멘트 골조의 요구조건을 만족하는 것으로 나타났다.
- (5) 본 연구에서 제안하고 있는 보-기둥 약축 접합부의 거동은 수평 스티프너에 연결되는 고력볼트의 개수의 의해 결정되는 것으로 나타났다. 하지만, 웹 높리와 플랜지 폭이 작은 기둥을 사용할 경우, 접합부에 사용되는 고력볼트의 개수는 제한적으로 사용되어야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원에서 지원하는 도시건축연구사업 (16AUDP-B066083-04)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌(References)

- [1] 한국건축구조기술사회(2012) 소규모건축물 구조지침 및 해설, 기문당.
The Korean Structural Engineers Association (2012) *Structural Design Criteria and Commentary for One and Two Story Small Buildings*, Kimoonang, Korea (in Korean).
- [2] 한국건축구조기술사회, 대한건축학회(2010) 소규모 건축물 내진설계 개선방안 연구, 국토해양부.
The Korean Structural Engineers Association, and Architectural Institute of Korea (2010) *Study on Improvement of Seismic Design for Small-Size Buildings*, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea (in Korean).
- [3] 이강민, 정희택, 윤석용, 이은모, 오경환(2008) 브라켓 및 WUF-B 형식 철골모멘트골조 약축접합부 내진성능평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.483-491.
Lee, K., Jeong, H.T., Yoon, S.R., Lee, E.M., and Oh, K.H. (2008) Cyclic Testing of Bracket and WUF-B Type Weak-Axis Steel Moment Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.20, No.4, pp.483-491 (in Korean).
- [4] Rentschler, G.P., Driscoll, G.C., and Chen, W.-F. (1980) Tests of Beam-to-Column Web Moment Connections, *Journal of the Structural Division*, ASCE, Vol.106, No.5, pp.1005-1022.
- [5] Janss, J., Jaspert, J.-P., and Maquoi, R. (1987) Strength and Behavior of In-Plane Weak Axis Joints and of Three-Dimensional Joints and 3-D Joints, *Proceedings of State-of-the-Art Workshop on Connections and the Behaviour, Strength and Design of Steel Structures*, Elsevier Applied Science, France, pp.60-68.
- [6] Gilton, C.S., and Uang, C.-M. (2002) Cyclic Response and Design Recommendations of Weak-Axis Reduced Beam Section Moment Connections, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.128, No.4, pp.452-463.
- [7] Koetaka, Y., Chusilp, P., Zhang, Z., Ando, M., Suita, K., Inoue, K., and Uno, N. (2005) Mechanical Property of Beam-to-Column Moment Connection with Hysteretic Dampers for Column Weak Axis, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.27, No.1, pp.109-117.
- [8] Harada, Y., Ebato, K., and Morita, K. (2007) Structural Performance of Web Plate of H-Section Member-to-Split-Tee Tensile Connection with High-Strength Bolts, *Journal of Structural and Construction Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.72, No.614, pp.123-

- 130.
- [9] Kim, S.-D., Kim, S.-S., and Ju, Y.K. (2008) Strength Evaluation of Beam-Column Connection in the Weak Axis of H-Shaped Column, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol. 30, No.6, pp.1699-1710.
- [10] 심현주, 조한솔, 김대희, 김상섭(2013) 실물크기의 H형강 기둥-보 신형상 약축접합부에 대한 구조성능평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.233-242.
Shim, H.J., Cho, H.S., Kim, D.H., and Kim, S.S. (2013) Performance Evaluation of Full-Scale H-Shape Beam-to-Column New-Shape Weak Axis Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No. 3, pp.233-242 (in Korean).
- [11] 김상섭, 이도형, 함정태, 김규석(2004) H형강 기둥의 약축에 대한 기둥-보 접합상세 개발 및 내력평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제1호, pp.169-180.
Kim, S.S., Lee, D.H., Ham, J.T., and Kim, G.S. (2004) Development and Strength Evaluation of Beam-to-Column Connection Details in Weak Axis of H-Shape Column, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.1, pp.169-180 (in Korean).
- [12] 김상섭, 부윤섭(2011) 초간편 H형강 기둥-보 약축접합부의 구조성능 및 CO₂ 저감량 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제5호, pp.615-627.
Kim, S.-S., and Boo, Y.-S. (2011) Structural Performance and CO₂ Reduction Evaluation of the Ultra Simple Wide-Shaped Section Beam-to-Column Weak Axis Connection, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.23, No.5, pp.615-627 (in Korean).
- [13] 이철호, 정종현, 김성용(2015) RBS 약축 용접모멘트의 내진성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제27권, 제6호, pp.513-523.
Lee, C.H., Jung, J.H., and Kim, S.Y. (2015) Cyclic Seismic Performance of RBS Weak-Axis Welded Moment Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.6, pp.513-523 (in Korean).
- [14] 김철구, 엄태성, 박홍근, 김태완(2015) 소성힌지 구간에서 접침이음된 RC기둥의 내진성능, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제31권, 제12호, pp.23-33.
Kim, C.-G., Eom, T.-S., Park, H.-G., and Kim, T.-W. (2015) Seismic Performance of RC Columns with Lap Splice at Plastic Region, *Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.31, No.12, pp.23-33 (in Korean).
- [15] 김철구, 엄태성, 박홍근, 김태완(2016) 소규모 건축물을 위한 과소보강된 콘크리트 보-기둥 접합부의 내진성능, 대한건축학회논문집 - 구조계, 대한건축학회, 제32권, 제3호, pp.19-30.
Kim, C.-G., Eom, T.-S., Park, H.-G., and Kim, T.-W. (2016) Seismic Performance of Lightly Reinforced Concrete Beam-Column Connections for Low-Rise Buildings, *Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.32, No.3, pp.19-30 (in Korean).
- [16] 한국강구조학회(2011) 강구조설계, 구미서관.
KSSC (2011) *Design of Steel Structures*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).
- [17] American Institute of Steel Construction (2010) *Seismic Provisions for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 341-10), USA.
- [18] 국가기술표준원(2007) 금속재료 인장시험편(KS B 0801: 2007).
Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [19] American Concrete Institute (2001) *Acceptance Criteria for Moment Frames Based on Structural Testing* (ACI T1.1-01), USA.
- [20] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [21] 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 : 본 연구에서는 국내 소규모 철골조 건축물에서 실제 시공된 보-기둥 약축 접합부에 대한 현황조사를 바탕으로 시공성을 향상시킨 약축접합부 상세를 제안하였으며, 제안된 약축접합부에 대한 반복가력 실험을 통해 접합부 내진성능을 평가하였다. 실험변수는 보-기둥 접합부에 사용된 볼트의 개수이다. 실험결과, 본 연구에서 제안하고 있는 보-기둥 약축 접합부의 거동은 수평 스티프너에 연결되는 고력볼트의 개수의 의해 결정되는 것으로 나타났다. 접합부에 4개 이상의 볼트접합이 사용될 경우 현행 기준에서 요구하는 부분 강접합 요구조건을 만족시키는 것으로 나타났다. 모든 실험체는 플랜지 연결플레이트의 연단쪽 보 플랜지 볼트 구멍 주위에서 국부적인 지압파괴와 파단 등이 발생하였다. 하지만, 웹 높이와 플랜지 폭이 작은 기둥을 사용할 경우, 접합부에 사용되는 고력볼트의 개수가 제한적으로 사용되어야 할 것으로 판단되므로 향후 이 부분에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

핵심용어 : 소규모 철골조, 보-기둥 약축 접합부, 반복가력 실험, 내진성능