



# RBS 약축 용접모멘트접합부의 내진성능 평가

이철호<sup>1\*</sup> · 정종현<sup>2</sup> · 김성용<sup>3</sup>

<sup>1</sup>교수, 서울대학교, 건축학과, <sup>2</sup>교수, 경남대학교, 건축학부, <sup>3</sup>박사과정, 서울대학교, 건축학과

## Cyclic Seismic Performance of RBS Weak-Axis Welded Moment Connections

Lee, Cheol Ho<sup>1\*</sup>, Jung, Jong Hyun<sup>2</sup>, Kim, Sung Yong<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Professor, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

<sup>2</sup>Professor, School of Architecture, Kyungnam University, Changwon, Gyeongnam, 631-701, Korea

<sup>3</sup>Graduate student, Dept. of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

**Abstract** - In steel moment frames constructed of H-shapes, strong-axis moment connections should be used for maximum structural efficiency if possible. And most of cyclic seismic testing, domestic and international, has been conducted for strong-axis moment connections and cyclic test data for weak-axis connections is quite limited. However, when perpendicular moment frames meet, weak-axis moment connections are also needed at the intersecting locations. Especially, both strong- and weak-axis moment connections have been frequently used in domestic practice. In this study, cyclic seismic performance of RBS (reduced beam section) weak-axis welded moment connections was experimentally investigated. Test specimens, designed according to the procedure proposed by Gilton and Uang (2002), performed well and developed an excellent plastic rotation capacity of 0.03 rad or higher, although a simplified sizing procedure for attaching the beam web to the shear plate in the form of C-shaped fillet weld was used. The test results of this study showed that the sharp corner of C-shaped fillet weld tends to be the origin of crack propagation due to stress concentration there and needs to be trimmed for the better weld shape. Different from strong-axis moment connections, due to the presence of weld access hole, a kind of CJP butt joint is formed between the beam flange and the horizontal continuity plate in weak-axis moment connections. When weld access hole is large, this butt joint can experience cyclic local buckling and subsequent low cycle fatigue fracture as observed in this testing program. Thus the size of web access hole at the butt joint should be minimized if possible. The recommended seismic detailing such as stickout, trimming, and thicker continuity plate for construction tolerance should be followed for design and fabrication of weak-axis welded moment connections.

**Keywords** - Steel moment frames, RBS connections, Seismic, Weak-axis, Fracture, Fatigue

### 1. 서론

1994년 미국 노스리지 및 1995년 일본 고베 지진 당시 철골 용접 모멘트접합부의 광범위한 취성파괴가 발생한 이래

Note.-Discussion open until June 30, 2016. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 16, 2015; revised November 19, 2015; approved on December 1, 2015.

Copyright © 2015 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-878-9061

E-mail. [ceholee@snu.ac.kr](mailto:ceholee@snu.ac.kr)

로 철골 용접 모멘트접합부의 내진성능을 평가하고 개선하기 위한 연구들이 다각적으로 수행되어 왔다. 이 중 보 플랜지에 RBS(reduced beam section, 보단면감소)를 도입하는 방안은 접합부 부근의 보를 일부 “약화”시켜 소성힌지의 발생위치를 취성파괴 가능성이 큰 기둥 외주면에서 보의 내부로 유도함으로써, 보 플랜지 맞댐용접부의 취성파괴 문제를 해결할 수 있는 매우 유용한 내진성능 개선 방안 중 하나이다.

한편, 국내 철골 모멘트골조의 경우 강축뿐 아니라 약축 방향에도 모멘트접합부를 적용하는 관행이 있다. 약축 모멘트접합부는 강축 모멘트접합부와 그 형상이 상이하기 때문에 응력 전달경로나 응력이 집중되는 위치 역시 큰 차이가 있

다. 따라서 철골 모멘트골조 전체의 내진성능을 합리적으로 확보하기 위해서는 약축 용접 모멘트접합부에 대해서도 강 축 용접 모멘트접합부와는 다른 역학적 특성을 반영한 내진 성능의 평가와 개선이 이루어져야 한다.

하지만, 약축 모멘트접합부에 대해서는 Rentschler *et al.* (1980)<sup>[1]</sup>, Driscoll and Beedle(1982)<sup>[2]</sup>, Popov and Tsai(1989)<sup>[3]</sup>, Gilton and Uang(2002)<sup>[4]</sup>, Park *et al.*(2007)<sup>[5]</sup>, Lee *et al.* (2008)<sup>[6]</sup>, Kim *et al.*(2014)<sup>[7]</sup>이 수행한 소수의 연구가 있었다. 그리고 이 중에서 Gilton과 Uang만이 RBS를 도입한 약축 용접 모멘트접합부를 대상으로 내진성능을 분석하고 기본적인 설계식을 제시한 연구를 수행하였다. 따라서 약축 용접 모멘트접합부는 내진성능에 대한 실험결과가 부족하여 AISC의 특별 및 중간 모멘트골조용 권장 접합부에서도 제외되어 있다(AISC, 2010)<sup>[8]</sup>.

이에 본 연구에서는 Gilton과 Uang의 연구를 바탕으로 RBS를 도입한 약축 용접 모멘트접합부의 내진성능에 대한 실험대 구조실험을 실시하여 실험결과를 축적하는 한편, 약축 모멘트접합부의 특성을 반영한 상세와 설계법 개선사항을 제시하였다.

## 2. RBS 약축 용접접합부 선행연구 고찰

우선 Rentschler *et al.* (1980)<sup>[1]</sup>은 약축 용접 모멘트접합부의 내진성능 평가를 목적으로 당시의 AISC Specification에 따라 설계된 네 가지 형태의 용접접합부에 대한 단조가력실험을 실시하였다. 이들의 연구결과에 따르면 기둥의 웹과 보 플랜지에 맞댐용접한 연속판(horizontal continuity plate, Fig. 1의 ①)을 기둥 플랜지 끝단 위치에서 보 플랜지와 용접한 경우, 맞댐용접부 양쪽 끝단에서 응력 집중(Fig. 1의 ②)에 의한 취성파괴가 발생하였다. 그리고 연속판과 보 플랜지 폭의 차이가 큰 경우에도 역시 취성파괴가 발생하였다. 이에 따라 Driscoll and Beedle(1982)<sup>[2]</sup>은 내진성능을 개선하기 위한 방안으로써 연속판의 두께 증가, 기둥 웹 반대쪽의 연속판 설치, 연속판을 기둥 플랜지 끝단에서 더 연장하는 방법(이하 스틱아웃, stickout, Fig. 1의 ③) 및 연속판의 폭을 보 플랜지의 폭과 같아지도록 점진적으로 잘라내는 방법(이하 트림, trim, Fig. 1의 ④) 등을 제안하였다.

한편 Gilton and Uang(2002)<sup>[4]</sup>은 실험 및 유한요소해석 등을 바탕으로 RBS 도입을 통한 약축 용접 모멘트접합부의 내진성능 향상 여부를 검토하였으며, 약축 용접 모멘트접합부

의 RBS 도입을 위한 설계식을 개발하였다. Fig. 1은 Gilton과 Uang 연구의 실험체 중 CW-2로 명명된 실험체의 상세를 편집하여 나타낸 것인데, 이를 포함한 실험체들은 다음과 같이 설계되었다. RBS를 도입한 보의 상부와 하부 플랜지는 76mm(약 3 inch) 스틱아웃한 위치에서 상부는 3.2m (1/8 inch), 하부는 6.4mm(1/4 inch) 두꺼운 연속판에 맞댐용접하였으며, 보의 플랜지 폭이 연속판의 폭 70% 이하인 경우 연속판을 트림하여 보 플랜지의 폭과 같게 하였다. 그리고 보 웹은 기둥의 웹과 연속판에 필릿용접한 전단이음판(shear plate, Fig. 1의 ⑤)에 C-형으로 필릿용접(Fig. 1의 ⑥)하였다.

실험 및 유한요소해석 결과로부터 Gilton과 Uang이 내린 결론은 다음과 같다. 첫째, 약축 용접 모멘트접합부에 RBS를 도입한 경우, 연속판과 보 플랜지의 맞댐용접부 양쪽 끝의 응력도 집중이 완화되며 접합부 취성파괴 없이 0.03 radian의 소성 회전각에 도달하였다. 둘째, 유한요소 해석 결과 RBS를 도입할 경우, 보 인장 플랜지가 연결된 기둥 웹 반대쪽의 연속판은 보 인장 플랜지의 응력도 집중을 완화하는데 큰 영향을 끼치지 않는다. 따라서 기둥 웹 반대쪽의 연속판은 불필요하다. 셋째, 보 플랜지 이음판을 76mm(약 3 inch) 이상 스틱아웃할 경우 보 인장 플랜지의 응력도

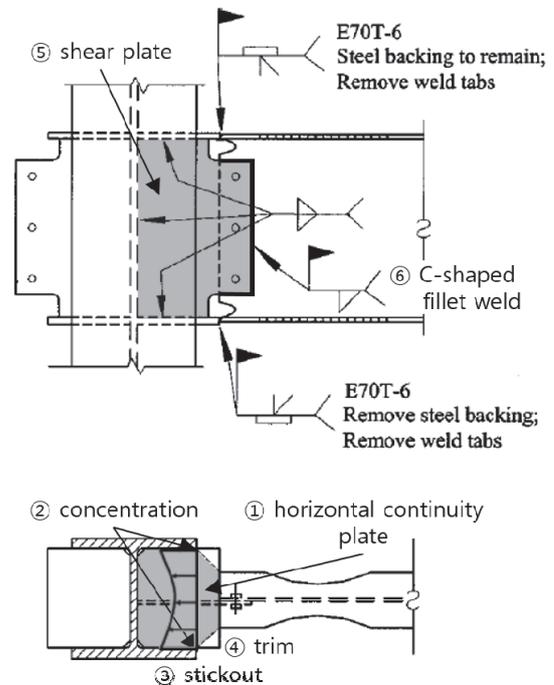


Fig. 1. Details of specimen CW-2 (excerpted from Gilton and Uang(2002)<sup>[4]</sup> and edited)

집중이 감소한다. 넷째, 보의 폭이 연속판 폭의 70%보다 작은 경우 연속판을 트림하면 보 인장 플랜지 맞댐용접부의 변형도 집중이 감소한다. 다섯째, 보 전단력은 95% 이상이 보 웨브에 의해 전달되며 초등 휨이론에 따른 일반적인 전단력 분포와는 달리 보의 플랜지 근처에서 값이 더 큰 역포물선 분포(Fig. 2 (a))를 갖는다.

또한 이러한 결과를 바탕으로 Gilton과 Uang은 약축 용접 모멘트접합부에서 패널존(panel zone) 검토, 연속판 설계, 전단이음판 설계시의 고려사항을 다음과 같이 제안하였다. 첫째 약축 용접 모멘트접합부에서 패널존의 전단강도(shear strength)  $V_{PZ}$ 는 식 (1)을 이용하여 계산한다. 둘째 연속판은 시공의 편의를 위해 상부와 하부 보 플랜지보다 각각 3.2mm(1/8 inch), 6.4mm(1/4 inch) 두꺼운 강판을 이용하여 적어도 76mm(약 3 inch) 스틱아웃해야 한다. 셋째 기둥 웨브 반대쪽의 연속판은 불필요하며 보의 폭이 연속판 폭의 70%보다 작은 경우 연속판을 트림하여 보의 폭과 같게 해야 한다. 넷째 전단이음판의 두께  $t_{pl}$ 은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 RBS 부분이 최대모멘트에 도달했을 때의 평형조건에 대응하는 웨브 전단력  $V_{pl}$ 과 수평력  $H_{pl}$ 을 기준으로 식 (2)로 계산한다. 다섯째 앞에서 기술한  $V_{pl}$ 과  $H_{pl}$ 이 편심을 갖고 작용하기 때문에(Fig. 2 (d)) 이를 고려하여, 즉 순간중심회전법(instantaneous center of rotation method, ICRM)을 적용하여 보 웨브와 전단이음판의 C-형 필릿용접의 크기를

$S$ 를 결정해야 한다.

$$V_{PZ} = 0.6F_{yc}(2b_{cf}t_{cf}) \tag{1}$$

여기서,  $F_{yc}$  : 기둥의 공칭항복강도

$b_{cf}, t_{cf}$  : 기둥 플랜지의 폭과 두께

$$t_{pl} = \frac{A_{pl}}{d_{pl}} \tag{2}$$

여기서,  $A_{pl} = 2\sqrt{\frac{H_{pl}^2 + 3V_{pl}^2}{(\phi F_{ypl})^2}}$  : 전단이음판의 소요 단면적

$H_{pl} = 3M_{web}/2d$  : 전단이음판의 수평방향 우력

$V_{pl} = V_{rd}/2$  : 전단이음판 수직방향 전단력의 1/2

$F_{ypl}, d_{pl}$  : 전단이음판의 공칭항복강도와 춤(깊이)

### 3. 실험 개요

#### 3.1 실험체 개요

본 연구에서는 Table 1과 Fig. 3 (a), (b)에 나타난 바와 같이 2개의 실험체를 제작하였다. 두 개의 실험체 모두 보의 상부와 하부 플랜지에 RBS를 도입하였으며 기둥의 웨브 양쪽에 수평으로 맞댐용접한 연속판을 75mm 스틱아웃하고 그 위치에서 보 플랜지를 맞댐용접하였다(Fig. 3 (a), (b)). 하부 플랜지에서는 뒷댐재와 용접탭을 제거하고 필릿용접으로 보강하여 노치효과를 최소화하였다. 기둥의 웨브에 수직으로 양면 필릿용접한 전단이음판에는 보의 웨브를 C-형 1면 필릿용접하였다(Fig. 3 (c)). 실험체의 보-기둥 용접부는 임계용접부이므로 강구조내진기준에 따라 -30°C에서 28J 이상의 CVN인성값을 갖는 인장강도 490MPa급 용접재를

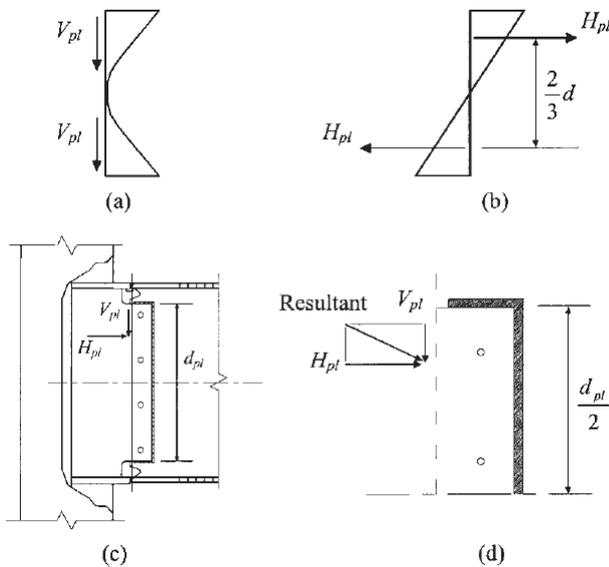


Fig. 2. Beam web design: (a) shear stress profile; (b) bending stress profile; (c) force demand on half of shear plate; (d) detailed for weld design (Gilton and Uang, 2002)<sup>[4]</sup>

Table 1. Test matrix

Specimens	Beam	Flange	Web	Panel zone
WEAK-DB700-SW	H-700, RBS	groove welding, minimized notch	C-shape fillet welding	strong
WEAK-DB600-SW	H-600, RBS	groove welding, minimized notch, trim	C-shape fillet welding	strong

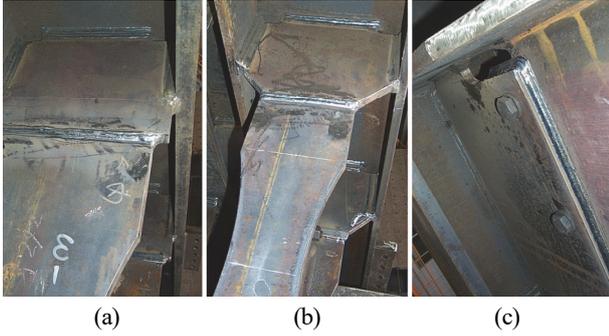


Fig. 3. Specimen WEAK-DB600-SW: (a) WEAK-DB700-SW; (b) WEAK-DB600-SW; (c) C-shaped fillet weld

사용하였다. 패널존은 소성변형을 최소화하기 위해서 강한 패널존으로 설계하였다. 실험체 WEAK-DB700-SW에서 기둥과 보는 각각 압연형강 H-428×407×20×35 (SM490)와 H-700×300×13×24 (SS400)를 사용하였으며 연속판의 폭을 트림하지 않았다(Fig. 3 (a)). 실험체 WEAK-DB600-SW에서 기둥과 보의 압연형강 H-400×400×13×21(SM490)과 H-600×200×11×17(SS400)을 사용하였으며 연속판의 폭이 보의 폭과 같아지도록 트림하였다(Fig. 3 (b)). Fig. 4는 실험체 WEAK-DB 600-SW의 상세를 나타낸 것이다.

이 2개의 실험체를 통하여 RBS, 스틱아웃, 트림의 도입에 따른 약축 모멘트 용접접합부의 소성변형능력, 응력도 집중

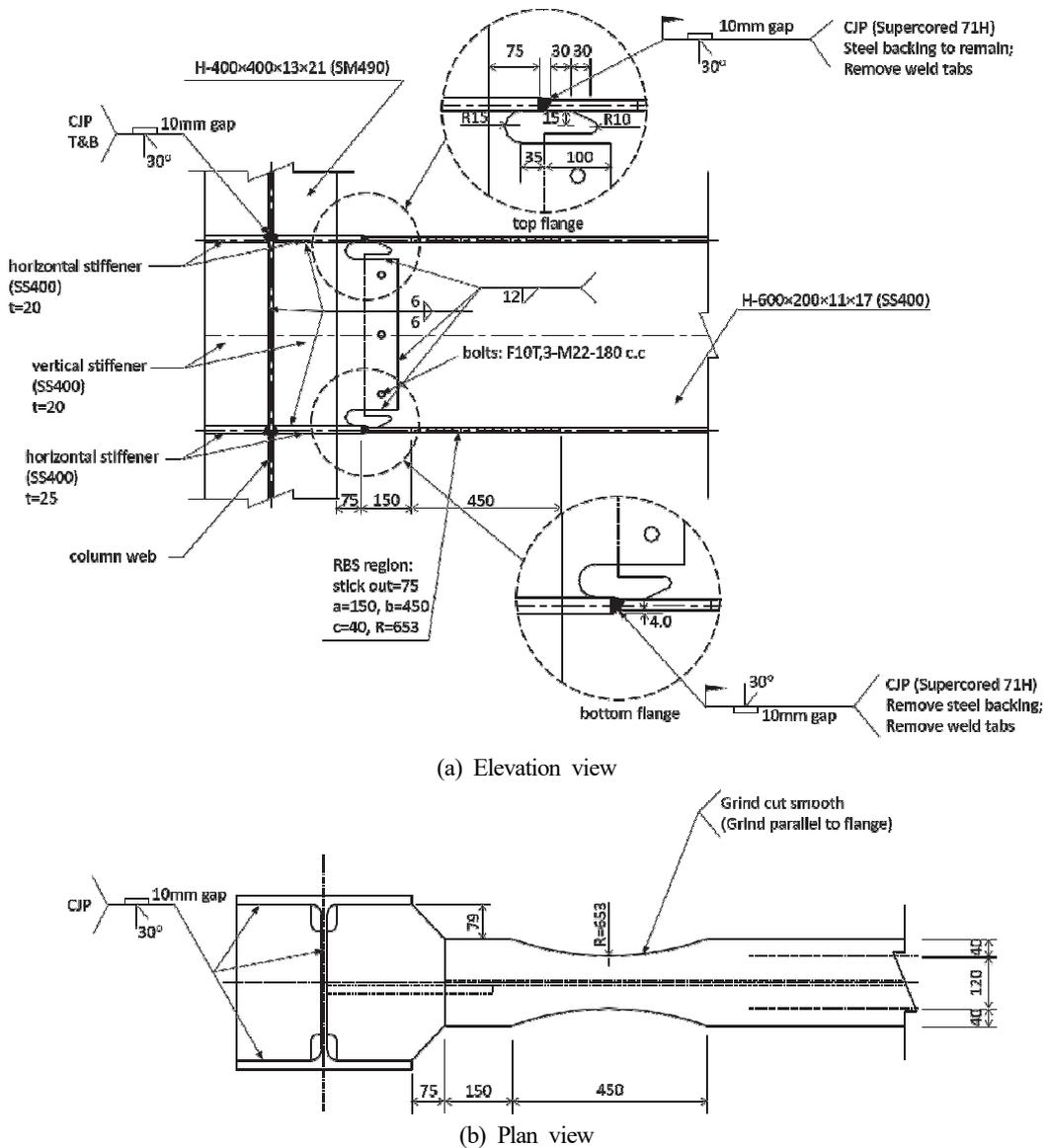


Fig. 4. Specimen WEAK-DB600-SW details

**Table 2.** Properties of material

Specimen			Yield stress $\sigma_y$ (MPa)	Tensile stress $\sigma_u$ (MPa)	Yield ratio $\sigma_y/\sigma_u$ (%)	Elongation (%)	Material
WEAK-DB700-SW	C	F	357	524	68.0	28.1	SM490
		W	358	520	68.8	24.1	SM490
	B	F	304	454	66.9	30.6	SS400
		W	363	481	75.6	27.4	SS400
WEAK-DB600-SW	C	F	358	525	68.2	26.7	SM490
		W	390	531	73.5	23.3	SM490
	B	F	326	467	69.8	30.3	SS400
		W	343	474	72.5	28.7	SS400

C: column, B: beam, F: flange, W: web

위치, 전단이음판과 보 웹의 C-형 필릿용접부의 거동 등을 검토하였다.

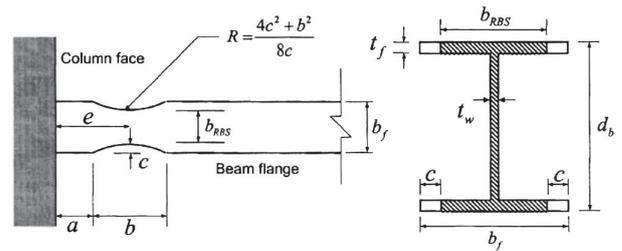
본 연구에서는 보에 SS400 강재를 사용하였다. SS강은 내진성이 뛰어난 SN 및 SHN강보다 화학적 성분 차이에 따라 용접성과 인성 등에서는 불리하다. 따라서, 항복비가 적절하고 강한 기동-약한 보 조건을 만족하는 조건에서, 보에 SS강을 사용한 약축 용접 모멘트접합부가 특수모멘트골조의 요구조건을 만족시킨다면 SN 및 SHN강을 사용한 경우에도 충분히 특수모멘트골조 요구조건을 만족시킬 것으로 생각된다. 본 연구의 실험에 사용한 강재의 인장시험결과는 Table 2와 같다. 모든 강재에서 항복강도와 인장강도가 기준값을 상회하였으며 항복비는 거의 모두 0.75 이하이다.

### 3.2 실험체 설계 상세

본 연구에서는 Gilton과 Uang이 제시한 설계법에 준하여 다음과 같이 실험체를 설계하였다.

#### (1) RBS

본 연구에서는 Lee *et al.* (2002)<sup>[9]</sup>의 연구를 참조하여 강축과 동일하게 Fig. 5의 RBS 형상을 결정하였다. 실험체 WEAK-DB700-SW와 WEAK-DB600-SW 각각에 대해서 RBS가 시작되는 위치 *a*는 스틱아웃된 부분으로부터 보축의 25%인 175mm, 150mm, RBS 구간의 길이 *b*는 보축의 75%인 525mm, 450mm, RBS 최대절삭폭 *c*는 RBS의 최소폭 *b<sub>RBS</sub>*가 보폭 *b<sub>f</sub>*의 63.3%, 60.0%가 되도록 55mm, 40mm로 결정하였으며, RBS부 최소폭의 소성단면계수는 원래 단면



**Fig. 5.** Geometry of radius-cut RBS

의 소성단면계수의 72%, 73%이다.

#### (2) 강한 기동-약한 보 조건 검토

약축의 경우도 강축과 마찬가지로 강한 기동-약한 보 조건(KBC 2009 0713.9.3.)<sup>[10]</sup>을 만족시켜야 하며, 이를 검토하기 위해 약축에 대한 기동의 소성단면계수를 사용하였다. 검토 결과 본 연구의 실험체들은 모두 이러한 조건을 만족함을 확인하였다.

#### (3) 패널존

패널존은 소성변형을 최소화하기 위해서 강한 패널존으로 설계하였으며, 강축과는 달리 기동의 플랜지가 패널존의 역할을 하기 때문에 패널존의 전단강도는 식 (1)로 계산하였다.

#### (4) 연속판

연속판은 시공의 편의를 위해 상부와 하부 보 플랜지보다 각각 3mm, 8mm 두꺼운 강판을 사용하였으며 기동의 플랜지와 웹에 맞댐용접하였다. 그리고 75mm를 스틱아웃했으며, 실험체 WEAK-DB600-SW는 보의 폭이 연속판 폭의 70%보다 작기 때문에 Fig. 4 (b)에 나타난 바와 같이 트림하였다.

#### (5) 전단이음판의 두께

전단이음판은 RBS 부분이 최대모멘트에 도달했을 때의 평형조건에 대응하는 웹 전단력 *V<sub>pl</sub>*과 수평력 *H<sub>pl</sub>*을 모두 전달해야 하므로, Gilton과 Uang이 권장한대로 식 (2)를 이용하여 본 연구 실험체의 전단이음판 두께는 20mm로 결정하였다.

#### (6) 전단이음판의 C-형 필릿용접의 치수

Gilton과 Uang이 전단이음판에 편심을 갖고 작용하는

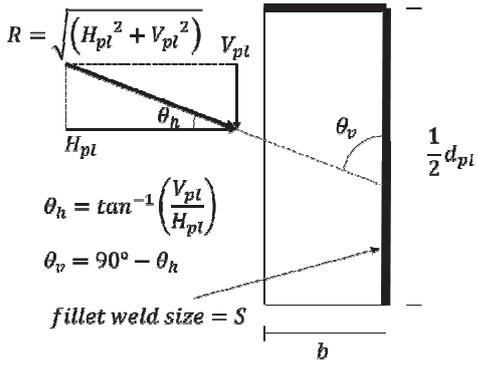


Fig. 6. Weld size of C-shaped fillet weld

$V_{pl}$ 과  $H_{pl}$ 을 고려하여 전단이음판의 C-형 필릿용접의 치수 결정에 적용하도록 권장한 순간중심회전법은 설계지침이 없을 경우 상당히 복잡하다. 따라서 본 연구에서는 편심을 무시하고 힘의 작용선과 용접선의 각도만 고려하여 필릿용접부의 공칭강도  $F_{nw}$ 를 계산하는 식 (3)(AISC 2010 J2-5)<sup>[11]</sup>을 적용한 식 (4)로 계산하였으며(Fig. 6), 계산결과 용접치수는 12mm이다.

$$F_{nw} = 0.60F_{EXX}(1.0 + 0.5\sin^{1.5}\theta) \quad (3)$$

여기서,  $F_{EXX}$  : 용접봉의 공칭인장강도

$\theta$  : 용접길이방향에서 하중방향까지의 각도

$$S \geq \frac{R}{\phi 0.6F_{EXX}(A+B)(0.707)} \quad (4)$$

여기서,  $A = \{1 + 0.5\sin^{1.5}\theta_n\}b$

$$B = \{1 + 0.5\sin^{1.5}\theta_v\} \frac{1}{2}d_{pl}$$

$b$  : 전단이음판의 폭

### 3.3 실험체 셋업, 가력 및 계측

Fig. 7은 실험체의 셋업을 나타낸 것이다. 기둥 단면의 중심에서 보 가력부 중심까지의 거리는 3,800mm이다. 기둥 플랜지에서 2,500mm의 위치에 횡지지 가새를 설치하였다. 가력은 KBC 2009의 0722.2.4.2 강구조 보-기둥모멘트접합부의 가력방법에 따랐다. 이에 변위제어로 층간변위비 0.375%, 0.5%, 0.75%까지는 6회, 1%는 4회, 이후 1.5%, 2%, 3%, 4%, 5%에서는 2회 상하로 반복 가력하였다. 1% 층

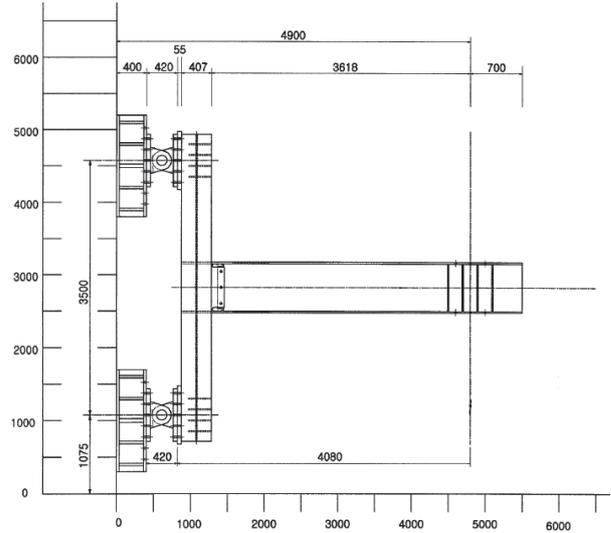


Fig. 7. Test set-up

간변위비에 해당하는 보 단부 변위는 38mm이다.

실험체에는 접합부의 전체 회전각 성분을 패널존, 기둥, 보의 성분으로 분리할 수 있도록 변위계를 설치하고, 연속판과 보 플랜지의 변형도를 계측할 수 있도록 변형도계를 설치하였다.

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 실험결과

#### 4.1.1 실험체 WEAK-DB700-SW

실험이 진행됨에 따라 변형 확인용 회철이 보 플랜지의 RBS 부분부터 연속판과 맞댐용접한 부분까지의 구간에서 먼저 약간씩 벗겨지기 시작해 실험 종료시에는 거의 벗겨졌다. 예상대로 이 부분에 응력과 변형이 집중되었다. 보의 웨브는 RBS 부분의 상부와 하부부터 회철이 벗겨지기 시작해 점차 중립축 부분까지 확대되었다. 연속판은 실험 종료시까지 회철이 약간만 벗겨졌는데, 이는 연속판이 보 플랜지보다 3mm, 8mm 두껍기 때문인 것으로 판단된다. 연속판과 맞댐용접한 기둥의 플랜지 부분, 즉 패널존은 네곳의 끝 부분만 회철이 벗겨졌는데, 이는 강한 패널존으로 설계했기 때문인 것으로 판단된다. 전단이음판 역시 회철이 약간만 벗겨졌는데 보의 웨브보다 두께가 두껍기 때문인 것으로 판단된다.

층간변위비 4%에서 Fig. 8과 같이 플랜지에 10~20mm 정도, 웨브에 30~40mm 정도의 국부좌굴이 발생하였으며

25~40mm 정도의 횡좌굴이 발생하였다. 층간변위비 5%에서 플랜지에 30mm 정도, 웨브에 70mm 정도의 국부좌굴과 50mm 정도의 횡좌굴이 발생하였다. 국부좌굴과 횡좌굴 대부분이 RBS가 도입된 부분에서 발생하였다.

Fig. 9는 층간변위비와 기둥 플랜지 끝단에서의 정규화된



Fig. 8. LB and LTB of WEAK-DB700-SW at 4% story drift

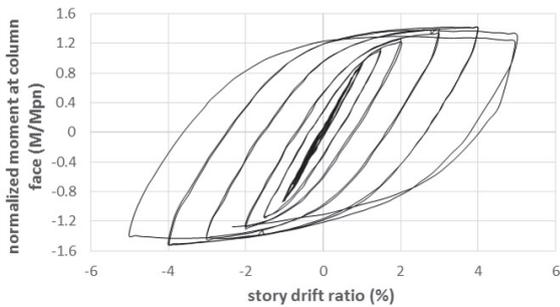
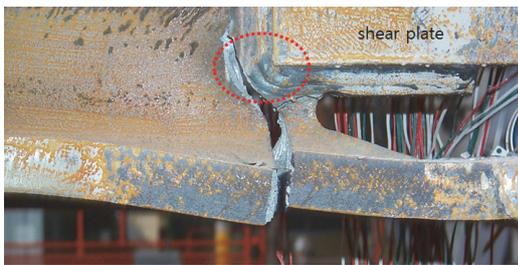


Fig. 9. Story drift ratio of WEAK-DB700-SW



(a)



(b)

Fig. 10. Fracture of WEAK-DB700-SW at 5% story drift

(normalized) 모멘트의 관계를 표현한 그래프이다. 층간변위비 4%까지는 강도저하가 전혀 발생하지 않는 안정적인 거동을 보였으며, 층간변위비 5%의 첫 번째 주기에서 미세한 강도저하가 발생하였고 두 번째 주기에서 강도저하가 약간 커지면서 Fig. 10에 보이는 바와 같이 전단이음판의 C-형 필릿용접부 꼭지점 부분의 응력집중에 의한 찢어짐 (tearing)이 발생하였고, 이의 진전에 따라 최종적으로 보 하부 플랜지의 전체 폭에 걸친 파단이 발생하였다. 소성회전 각은 최대 0.04 radian 이었다.

#### 4.1.2 실험체 WEAK-DB600-SW

실험 진행에 따라 변형 확인용 회칠이 벗겨지는 양상은 실험체 WEAK-DB700-SW와 유사하였으나, 다만 전단이음판의 회칠이 좀 더 벗겨진 차이가 있었다. 결국 실험체 WEAK-DB600-SW에서도 응력과 변형은 보 플랜지의 RBS 부분부터 연속판과 맞닿음접합 부분까지의 구간에 집중되었다.

층간변위비 4%에서 플랜지에 10~20mm 정도, 웨브에 50~55mm 정도의 국부좌굴이 발생하였으며 50~55mm 정도의 횡좌굴이 발생하였다. 층간변위비 5%에서 Fig. 11과 같이 플랜지에 25~30mm 정도, 웨브에 60~70mm 정도의



Fig. 11. LB and LTB of WEAK-DB600-SW at 5% story drift

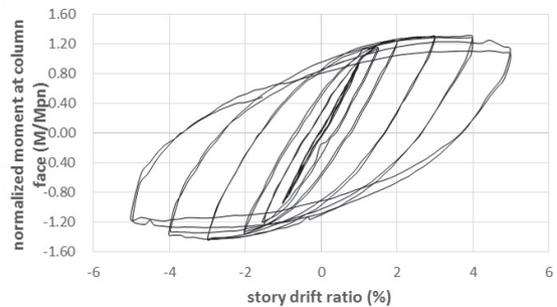


Fig. 12. Story drift ratio of WEAK-DB600-SW

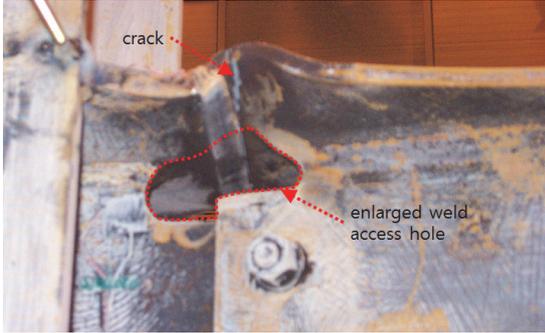


Fig. 13. Fracture of WEAK-DB600-SW after 5% story drift

국부좌굴과 70~80mm 정도의 횡좌굴이 발생하였다. 횡좌굴과 웨브의 국부좌굴은 RBS가 도입된 부분에서 발생하였지만, 플랜지의 국부좌굴은 연속판과 맞댐용접한 부분 가까이에서 주로 발생하였다.

Fig. 12는 층간변위비와 기둥 플랜지 끝단에서의 정규화된 모멘트의 관계를 표현한 그래프이다. 층간변위비 4% 두 번째에 미세한 강도저하가 발생하였으며, 층간변위비 5%에서는 첫 번째 주기와 두 번째 주기에서 강도저하가 약간씩 추가로 발생하였다. 그리고 층간변위비 6% 시작 하는 시점에서 Fig. 13에 보이는 바와 같이 국부좌굴이 심하게 발생한 보 상부 플랜지의 맞댐용접부 근처에서 저주기피로(low cycle fatigue)에 의한 균열이 발생하였다. 소성회전각은 최대 0.042 radian 이었다.

## 4.2 실험결과 분석

### 4.2.1 응력도 집중의 완화

Fig. 14는 WEAK-DB700-SW와 WEAK-DB600-SW의

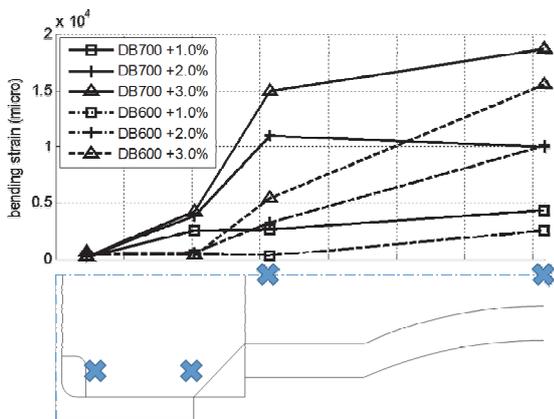


Fig. 14. Bending strain profile of beam top flange and horizontal continuity plate

보 상부 플랜지 RBS 중간과 맞댐용접부, 그리고 연속판의 휨 변형도(bending strain)를 층간변위비 1%, 2%, 3%에서 겹쳐 나타낸 것이다.

연속판 부분(왼쪽의 2개 x표시 위치)의 변형도가 상당히 작는데, 이것은 연속판 두께를 보 상부 플랜지보다 3mm 두 겹께 하고 75mm 스틱아웃하여 강화시킨 결과로 판단된다. 그리고 보 부분(오른쪽의 2개 x표시 위치)의 변형도가 상당히 큰데, 이것은 RBS를 도입하여 보 플랜지를 약화시킨 결과로 판단된다.

이로부터 RBS부터 스틱아웃 단부까지의 구간이 구조적 '퓨즈(fuse)' 역할을 하여 휨모멘트가 가장 큰 기둥 플랜지 끝단(왼쪽 두 번째 x표시 위치)의 응력도 집중을 완화시켰다는 것을 알 수 있다. 즉, 보 플랜지의 RBS, 연속판의 스틱아웃, 두께 증가가 기둥 플랜지 끝단에 위치하는 맞댐용접부에서 응력도 집중에 의해 발생하는 보 플랜지의 조기 취성과파괴를 방지하고 특수모멘트골조의 내진 요구사항(4% 층간변위비와 80% 이상의 휨모멘트 강도 유지)을 만족시키는 데에 필수적인 역할을 한다는 것을 알 수 있다.

### 4.2.2 전단이음판 C-형 필릿용접부

본 연구에서는, 전단이음판에 작용하는  $V_{pl}$ 과  $H_{pl}$ 의 편심을 무시하고, 그 합력의 작용선 방향만 고려한 식 (4)로 전단 이음판의 C-형 필릿용접부 크기를 결정하였다. 2개 실험체 모두에서 실험의 종료시까지 전단이음판의 C-형 필릿용접부에서는 문제점이 관찰되지 않았다. 따라서, 전단이음판에 작용하는 힘의 편심이 갖는 영향에 대해서 보다 구체적으로 고찰해 볼 필요가 있는 것으로 판단된다.

전단이음판 C-형 필릿용접부 자체에는 문제가 발생하지 않았지만, 실험체 WEAK-DB700-SW의 층간변위비 5% 두 번째 주기에서 Fig. 10과 같이 전단이음판 C-형 필릿용접부 꼭지점 부분의 응력집중에 의한 보 웨브의 찢어짐과 보 하부 플랜지의 전체 폭에 걸친 파단이 발생하였다. 이는 전단이음판의 C-형 필릿용접부에 의한 열영향, 전단이음판과 보 웨브의 두께 차이 및 날카로운 꼭지점 형상에 의한 단면의 급격한 변화에 따른 응력집중 등이 그 원인으로 사료된다.

이에 대한 대책은 Fig. 15에 나타낸 바와 같이 전단이음판의 꼭지점 부분을 약간 잘라내거나 이에 전단이음판의 형상을 장방형이 아니라 사다리꼴로 변경하는 것이다. 이렇게 되면 파단이 발생한 부분에서 용접의 열영향을 감소시키고 전단이음판과의 두께 및 형상 차이에 의한 단면의 급격한 변화

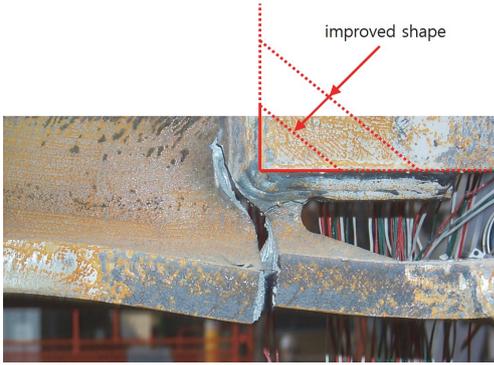


Fig. 15. Improved shape of C-shaped fillet weld

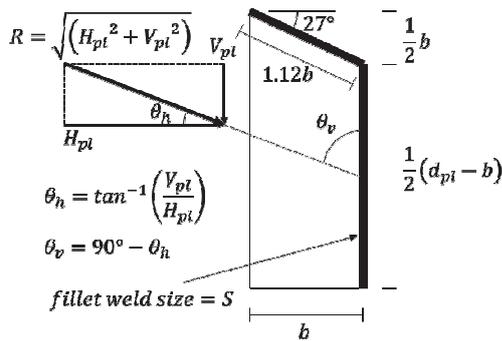


Fig. 16. Improved weld size of C-shaped fillet weld

를 제거하여 손상을 방지할 할 수 있을 것으로 예상된다.

전단이음판의 형상을 사다리꼴로 변경하면 C-형 필릿용접의 방향이 달라지기 때문에 전단이음판의 C-형 필릿용접의 크기는 전단이음판의 사다리꼴 형상을 반영한 식 (5)를 이용하여 계산할 수 있다(Fig. 16).

$$S \geq \frac{R}{\phi 0.6 F_{EXX}(A+B)(0.707)} \tag{5}$$

여기서,  $A = \{1 + 0.5 \sin^{1.5}(27^\circ - \theta_h)\}(1.12b)$

$$B = \{1 + 0.5 \sin^{1.5}\theta_v\} \frac{1}{2}(d_{pi} - b)$$

### 4.2.3 용접접근공의 크기

실험체 WEAK-DB600-SW는 층간변위비 4%에서부터 보 상부 플랜지의 맞댐용접부 근처에서 국부좌굴이 발생하였고, Fig. 13에 나타난 바와 같이 층간변위비 6% 시작하는 시점에서 심한 국부좌굴과 함께 저주기피로에 의한 균열이 발생하였다. 이 균열은 국부좌굴에 의한 영향이 큰 것으로 판단된다.

강축접합부에서는 보의 플랜지가 기둥 플랜지에 T이음(T joint) 형태로 접합되므로 보의 웨브에만 용접접근공을 생성한다. 반면에 약축접합부에서는 보의 플랜지가 연속판에 맞댐이음(butt joint) 형태로 접합되는데, 연속판 하부의 전단이음판과 보의 웨브에 모두 용접접근공(weld access hole)을 생성하며 이 두 용접접근공은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 하나의 큰 용접접근공이 된다. 이에 따라 더 큰 용접접근공을 갖는 약축접합부의 보 플랜지는 강축접합부의 보 플랜지보다 국부좌굴이 더 쉽게 발생할 수 있다. 본 연구에서는 Fig. 4, 10 (a), 13, 15에 나타난 바와 같이 보 웨브의 용접접근공이 기존의 것과 형상이 다르고 크기가 더 크다. 이 때문에 용접접근공이 더욱 커졌으며, 국부좌굴이 더 쉽게 발생했을 것으로 판단된다.

이러한 점과 실험체 WEAK-DB600-SW에서 저주기피로에 의한 균열에 영향을 준 심한 국부좌굴을 고려하면, 연속판과 보 플랜지의 맞댐용접에 지장이 없는 범위에서 가능한 한 용접접근공을 작게 하는 것이 바람직할 것으로 사료된다. 그리고 본 연구의 용접접근공 형상을 적용할 필요는 없는 것으로 생각된다.

## 5. 요약 및 결론

RBS를 도입한 약축 모멘트 용접접합부의 내진성능을 실험적으로 고찰하고 전단이음판의 형상과 C-형 필릿용접부에 대한 개선방안을 제시한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 약축 모멘트 용접접합부에서 보 전단력은 95% 이상이 보 웨브에 의해 전달되며 초등 휨이론과는 달리 보의 플랜지 근처에서 값이 더 큰 역포물선 분포를 보인다. 이를 반영하여 전단이음판과 보 웨브 사이의 C-형 필릿용접부를 설계한 본 연구의 2개 실험체는 모두 3% 이상의 우수한 소성회전각을 발휘하였다. Gilton과 Uang의 연구의 실험체까지 포함하면 총 4개 실험체가 모두 3% 이상의 우수한 소성회전각을 발휘하였다.
- (2) 본 연구에서는 편심을 무시하고, 합력작용선의 방향만 고려한 약산에 의한 용접설계로도 전단이음판 용접부 강도에 문제는 없었다. 그러나 이는 2개 실험체의 제한된 결과이고, 보 사이즈나 보 스패ん길이 등 설계조건에 따라 그 편심의 영향 정도를 무시할 수 없는 경우가 있을

수도 있다. 따라서 후속연구를 통해, 실무적으로 간편하고 일반성있는 탄성 약산설계법을 용접부의 비탄성 거동을 반영하는 순간중심회전법 결과와 비교하여 개발하고자 한다.

- (3) 전단이음판은 상하 꼭지점 부분을 일부 잘라내거나 완전히 사다리꼴 형상으로 변경하여 C-형 필릿용접부 꼭지점 부분의 응력집중을 최소화하는 것이 바람직하다. 이때 C-형 필릿용접부의 용접크기는 사다리꼴의 전단 이음판 형상을 반영해서 설계한다.
- (4) 약축 모멘트 용접접합부의 보 플랜지는 연속판에 맞댄 이음 형태로 접합되므로 T이음 형태로 접합되는 강축접합부에 비해서 용접접근공이 커지고 국부좌굴이 쉽게 발생할 수 있다. 이는 보 플랜지 맞댐용접부의 피로파괴를 유발할 수 있다. 따라서 맞댐용접에 지장이 없는 범위에서 용접접근공의 크기를 최소화할 필요가 있다.
- (5) RBS, 스틱아웃, 트림, 연속판 두께 증가 등과 같이 약축 모멘트 용접접합부의 내진성능 실험에서 이미 검증된 상세들은 따르도록 한다.
- (6) 본 연구에서 제안한 약축 모멘트 용접접합부는 충분한 소성변형능력을 보였으므로 특수모멘트골조에 적용 가능한 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축 연구개발사업의 연구비 지원(13AUDP-B066083-01)에 의해 수행되었습니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Rentschler, G.P., Driscoll, G.C., and Chen, W.F. (1980) Tests of Beam-to-Column Web Moment Connections, *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineering, Vol.106, No.5, pp.1005-1022.
- [2] Driscoll, G.C., Jr., and Beedle, L.S. (1982) Suggestions for Avoiding Beam-to-Column Web Connection Failure, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.19, No.1, pp.16-19.
- [3] Popov, E.P., and Tsai, K.C. (1989) Performance of Large Seismic Steel Moment Connections Under Cyclic Loads, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.26, No.2, pp.51-60.
- [4] Gilton, C., 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.122, No.11, pp.452-463.
- [5] 박종원, 강승민, 오용준(2007) 약축 보-기둥 접합부의 경제성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제6호, pp.663-670.  
Park, J.W., Kang, S.M., and Oh, Y.J. (2007) A Study on the Economy of Weak-axis Beam-to-Column Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.6, pp.663-670 (in Korean).
- [6] 이강민, 정희택, 윤석용, 이은모, 오경환(2008) 브라켓 및 WUF-B 형식 철골모멘트골조 약축접합부 내진성능평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제4호, pp.483-491.  
Lee, K.M., 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).
- [7] 김성배, 조한솔, 이태규, 김상섭(2014) 실물대 실험을 통한 H형강 기둥의 신형상 약축접합부 성능평가에 관한 연구, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제30권, 제9호, pp.19-29.  
Kim, S.-B., Cho, H.-S., Lee, T.-G., and Kim, S.-S. (2014) A Study on the Performance Evaluation for New Shape Weak-Axis Connection of H-Shape Beam-to-Column in Full-Scale Test, *Journal of Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.30, No.9, pp.19-29 (in Korean).
- [8] American Institute of Steel Construction (2010) *Prequalified Connections for Special and Intermediate Steel Moment Frames for Seismic Applications* (ANSI/AISC 358-10), USA.
- [9] 이철호, 전상우, 김진호(2002) RBS 철골모멘트접합부의 내진거동평가를 위한 반복재하 실물대(實物大) 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제14권, 제4호, pp.557-566.  
Lee, C.H., Jeon, S.W., and Kim, J.H. (2002) Cyclic Seismic Testing of Full-Scale RBS Steel Moment Connections, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.14, No.4, pp.557-566 (in Korean).
- [10] 대한건축학회(2009) 건축구조기준 및 해설, 기문당.  
Architectural Institute of Korea (2009) *Korea Building Code and Commentary*, Kimoondang, Korea (in Korean).

- [11] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.

---

**요 약 :** H형강 철골 모멘트 골조에서는 기둥의 강축 방향 용접 모멘트접합부를 활용하는 것이 구조적으로 가장 이상적이다. 하지만, 모멘트 골조가 직교하는 경우, 기둥의 약축 방향으로도 용접 모멘트접합부를 사용해야 한다. 국내에서는 특히 강축 및 약축 방향 모두를 용접 모멘트접합부를 자주 사용하는 관행이 있다. 대표적인 연성내진상세인 RBS(reduced beam section, 보단면감소)접합부의 경우 국내외적으로 강축접합 위주로 실험연구가 진행되어 약축 RBS 용접모멘트접합부에 대한 실험자료가 매우 희소하다. 본 연구에서는 RBS를 도입한 약축 용접 모멘트접합부의 내진성능을 실험적으로 고찰하였다. Gilton-Uang (2002)의 선행연구를 참고하여 보 플랜지는 연속판과 맞댐용접하고 웨브는 전단이음판과 C-형 필릿용접부로 설계하여 실험을 수행하였다. 보에 사용된 강재가 내진용 강재가 아닌 일반 SS400 강재임에도 불구하고 3% 이상의 소성회전각을 발휘하였다. 제한된 결과이긴 하지만, 전단이음판과 보 웨브 사이의 C-형 필릿용접부 설계에서 보 웨브에 작용하는 휨모멘트와 전단력의 편심의 영향을 구체적으로 고찰할 필요가 있는 것으로 판단된다. 본 실험결과를 토대로 전단이음판 부근의 보 웨브 파단을 방지할 수 있는 C-형 필릿용접 형상 및 설계방안을 제안하였다. 보 플랜지와 연속판의 완전용입 용접부는 맞댄이음(butt joint) 형식이 되어 국부좌굴에 취약하고 이로 인해 피로파괴가 발생하는 경향이 있으므로 용접작업에 지장이 없는 범위에서 용접접근공(스켈럽)의 크기를 최소화할 필요가 있다. RBS형상, 스틱아웃, 트림, 연속판 두께 증가 등과 같이 이미 검증된 약축 모멘트 용접접합부의 내진 상세들은 따르는 것이 바람직하다.

**핵심용어 :** 철골모멘트골조, 보단면감소(RBS)접합부, 내진, 약축, 파단, 피로파괴

---