



## HSA800 후판재의 완전용입 맞댐용접부 휨-인장강도 실험

이철호<sup>1\*</sup> · 김대경<sup>2</sup> · 한규홍<sup>2</sup> · 박창희<sup>2</sup> · 김진호<sup>3</sup> · 이승은<sup>4</sup> · 김도환<sup>4</sup>

<sup>1</sup>교수, 서울대학교, 건축학과, <sup>2</sup>박사과정, 서울대학교, 건축학과, <sup>3</sup>수석연구원, RIST, 강구조연구소, <sup>4</sup>책임연구원, RIST, 강구조연구소

## Flexural Tensile Strength of CJP Groove Welded Joints Connecting Thick HSA800 Plates

Lee, Cheol Ho<sup>1\*</sup>, Kim, Dae Kyung<sup>2</sup>, Han, Kyu Hong<sup>2</sup>, Park, Chang Hee<sup>2</sup>, Kim, Jin Ho<sup>3</sup>,  
Lee, Seung Eun<sup>4</sup>, Kim, Do Hwan<sup>4</sup>

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

<sup>2</sup>Ph.D Candidate, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

<sup>3</sup>Sr. Principal Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

<sup>4</sup>Sr. Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

**Abstract** - As a continuing work of previously conducted standard tension tests, full-scale flexural tests were conducted in this study to assess the structural performance the CJP groove welded joints connecting thick HSA800 plates. Two welding electrodes were available at the time of this experimental research; one was GMAW-based electrode A and the other FCAW-based electrode B. Three full-scale box-type beam specimens with single bevel- and V-groove CJP welded joints were fabricated from 60mm and 25mm thick HSA800 plates according to the AWS-prequalified groove welded joint details. In designing the specimens, all possible limit states like local and lateral torsional buckling were carefully controlled in order to induce flexural plastic yielding or eventual joint fracture. All the CJP joints made by both welding electrodes showed satisfactory performance and were able to transfer the tensile flange forces higher than that corresponding to the measured tensile strength of HSA800 flange plates. However, it should be noted that, during fabrication, serious concerns about the welding efficiency and workability of the GMAW-based electrode were raised by a certified welder. The fracture occurred at the unbeveled (or vertical) interface between the weldment and the base metal when the GMAW-based electrode was used in the single-bevel joint, implying the possibility of insufficient melting. Thus, the FCAW-based electrode B is again recommended as the choice of welding electrode for HSA800 plates. The limited test data of this study implies that the V-groove CJP joint should be used in favor of the single bevel CJP joint, if possible.

**Keywords** - High-strength steel, Thick plate, Weldability, Flexural-tensile test, CJP weld, GMAW, FCAW

### 1. 서론

초고층건물 및 장경간 교량의 경제적 설계를 위하여 고강

도강재의 사용이 증가하고 있다. 최근 국내에서 인장강도 800MPa급의 고강도강재(HSA800)가 개발되어 초고층건물에 현장적용 되고 있다. 초고층건물에 작용하는 횡력 또는 중력하중은 주요부재 및 이들의 접합부에 거대한 응력을 유발한다. 이들 부재나 접합부에 일반강재를 사용할 경우 종종 80~100mm를 상회하는 극후판재가 요구되어 설계, 제작, 양중, 접합 등에 큰 어려움을 야기하곤 한다. 현재 시공 중인 국내 초고층건물인 L타워에 최근에 개발된 HSA800 강재를 적용하여 소요 후판재의 두께를 60mm까지 줄인 사례에서 보듯이, 고강도 강재를 사용하면 부재 및 접합부의 슬림화를

Note.-Discussion open until April 30, 2015. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on November 25, 2013; revised July 31, 2014; approved on August 2, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-02-880-8735 Fax. +82-02-878-9061

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

도모할 수 있어 부재 및 접합비용의 절감은 물론 설계, 제작, 운반, 양중에 이르기까지 많은 이득을 취할 수 있다.

주요 하중전달 부재 및 구조시스템 간의 접합부에서 용접부 안전성은 가장 중요한 이슈가 된다. 특히 강재가 고강도화되고 후판화될수록 용접성능의 확보에 세심한 기술적 고려가 요구됨은 잘 알려져 있다. HSA800 강재를 구조재료로 사용하기 위한 기초연구로서 HSA800 보의 국부좌굴과 회전능력<sup>[1],[2]</sup> 및 압축재로서의 적용성 평가<sup>[3],[4],[5]</sup> 등 부재레벨의 연구는 이미 수행된 바가 있다. 그러나 HSA800급의 고강도 강재는 아직 현장적용 사례가 많지 않고, 고강도 후판 강재의 용접성능에 대한 선행연구 역시 희소하다.

이를 고려하여 본 저자는 선행연구<sup>[6]</sup>를 통하여 HSA800 후판강재에 적용가능한 가스메탈아크용접(gas metal arc welding, GMAW) 방식의 용접재와 플럭스코어아크용접(flux cored arc welding, FCAW) 방식의 용접재를 선정한 후, 후판용접시편 표준인장실험을 통해 두 용접재의 성능을 비교평가하고 권장 용접재-용접상세를 제시한 바 있다.

본 연구에서는 선행연구에서 사용한 두 용접재 및 완전용입용접(CJP) 상세를 실물크기 보의 휨 실험에 적용하여 휨-인장을 받는 용접부의 성능을 신뢰도 높게 평가하고자 하였다.

## 2. 후판 용접 요구사항 검토 및 용접재 선정

후판재의 경우 용접에 따른 열영향, 냉각시의 수축에 따른 응력집중의 증대 등으로 인해 소재 및 상세 등에 더욱 엄격한 요구조건이 부과된다. 선행연구<sup>[6]</sup>에서 2010 AISC-Manual<sup>[7]</sup> 및 2010 AWS 기준<sup>[8]</sup>에 따라 검토한 바 있는 후판 용접에 관한 요구사항을 간략히 정리하였다.

### 2.1 후판재 용접에 대한 설계기준 검토

두께 50mm 이상의 후판 강재의 이음에 대한 설계요구조건은 2010 AISC-Manual의 “J1.5, Splice in Heavy Sections”에서 제시하고 있으며<sup>[7]</sup>, CJP 용접 시 다음 사항을 반드시 만족할 것을 요구하고 있다.

#### 2.1.1 모재 CVN 최소 요구치

후판 강재에 대한 CVN 요구조건으로 모재의 CVN 최소값을 상온 21°C에서 27J 이상으로 규정하고 있다. HSA800의 CVN 값은 47J @ -5°C로서 이를 만족한다.

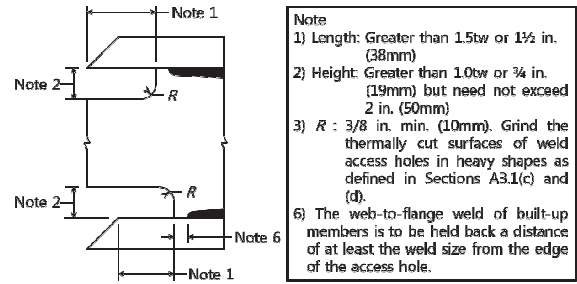


Fig. 1. Recommended weld access hole geometry of built-up members per the 2010 AISC Specifications: assembled after cutting<sup>[7]</sup>

### 2.1.2 용접접근공의 형상 및 치수

조립부재 접합부의 취성파괴의 원인인 용접수축 및 응력집중을 최소화시키기 위해서 용접접근공(weld access hole)의 크기 및 형상을 만족시켜야 한다(Fig. 1). 플레이트를 용접한 후 용접접근공을 가공할 시에는 가공과정에서의 열변형 등에 의해 예상치 않은 응력이나 균열 등이 발생할 수 있다. 따라서 플레이트 간 용접을 하기 전에 용접접근공을 가공해야 한다.

### 2.1.3 열 절단 시 온도관리조항 및 표면처리/검사조항

열 절단 시 표면 층의 경화와 초기 균열발생을 최소화하기 위하여 66°C 이상에서 전열처리(preheating)할 것을 요구하고 있다. 또한 따낸 부분과 용접접근공의 경화된 표면층을 그라인딩해야 하며 노치나 균열의 검사에 자분탐상법(magnetic particle inspection) 등의 비파괴 시험법을 사용할 것을 권장한다.

## 2.2 용접재에 대한 기준

2010 AWS D1.1의 3.3절에서 CJP 용접 시 모재와 용접재의 선택 및 조합<sup>[8]</sup>에 대해 다루고 있다. 언더매칭도 허용하고 있으나 모재항복을 선행시키기 위해서 일반적으로 모재 강도와 유사하거나 약간 상회하는 용접재를 선택한다. 오버매칭 시 열영향이 증대되므로 필요이상의 오버매칭(가령 70MPa 이상)은 권장하지 않는다.

산류응력이나 뒷댐재에 의한 기하학적 불연속성이 용접부 파단에 영향을 준다. 이에 민감한 용접재는 용접부에 매우 낮은 노치인성을 갖게 하므로 2010 AISC-Manual에서는 4°C에서 27J을 용접재의 CVN 최소값으로 한다. 이 값은 모재의 최소 CVN 값(21°C에서 27J)보다 보수적이다.

### 2.3 용접재 선정

포항산업과학원 예비 실험연구를 참고하여, 설계요구조건을 충족시키는 GMAW 방식의 용접재A(외국산)와 FCAW 방식의 용접재B(국내산)를 선택하였다. Table 1을 보면 두 용접재 모두 최소요구 CVN 값을 충분히 만족시킨다. Table 2는 HSA800과 두 용접봉의 강도를 비교한 것으로 두 용접재 모두 오버매칭 되었다.

Table 3과 4는 선정된 용접재A와 B의 용접조건으로, 용접재A는 전류 뿐 아니라 전압관리도 해야 하는 등 용접재B보다 용접조건이 까다롭다는 것을 알 수 있다. 실험체 제작담당을 맡은 용접공에 따르면, 용접재A(GMAW)의 경우 온도관리 및 전원의 전압에 민감하게 반응하여 미세한 차이에 의해 균열이 쉽게 형성되는 것으로 나타났다. 또한 용접물이 쉽게 퍼지지 않고 냉각 속도가 빠른 탓에 비드 형성이 어려워 현장에서 전자세 용접이 쉽지 않을 것으로 우려를 표명하였다. 비파괴검사(자동초음파탐상검사) 시 용접재A로 용접한 실험체의 경우 내부 균열이 검출되어 용접공의 말을 뒷받침하였다.

**Table 1.** Comparison of CVN values for filler metal

AISC min. CVN	Weld rod A (GMAW)	Weld rod B (FCAW)
27J @ 4°C (2010 AISC)	70J @ 0°C 60J @ -20°C 50J @ -30°C	85J @ -20°C 50J @ -40°C

**Table 2.** Nominal strength of HSA800 and weld rods

		Nominal yield strength ( $F_{y,n}$ , MPa)	Nominal tensile strength ( $F_{u,n}$ , MPa)
Base metal	HSA800 (THK 60mm)	650	800
Filler metal	Weld rod A	850	890
	Weld rod B	792	864

**Table 3.** Welding conditions of weld rod A

Dia. (mm)	0.8	1.0	1.2
Arc voltage (V)	16~22	18~28	20~33
Welding current (A)	40~170	80~280	120~350
Wire feed (m/min)	2.0~10.8	2.7~14.7	2.7~12.4
Deposition rate kg weld metal/hour	0.4~2.6	1.0~5.4	1.5~6.6

**Table 4.** Welding conditions of weld rod B

Dia.(mm)		1.2	1.4	1.6
Welding current (A)	F (PA/1G)	160~340	200~380	240~420
	HF (PC/2G)	(24~32)	(25~33)	(26~35)
	VU (PF/3G)	140~180	(22~26)	

**Table 5.** CJP weld test variables

Filler metal	Weld type	ROD (Root opening distance)
Weld rod A	Single bevel 30°	10mm, 20mm
	V-groove 30°	10mm, 20mm
Weld rod B	Single bevel 30°	10mm
	V-groove 30°	10mm

### 3. CJP 용접 표준인장실험 결과

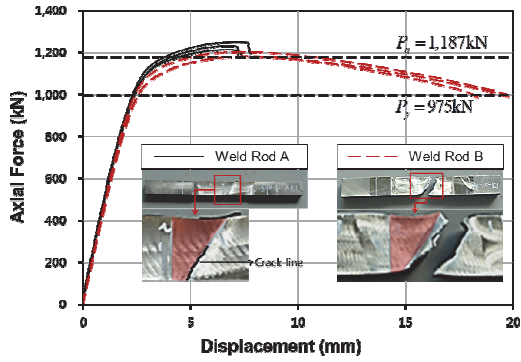
선행연구<sup>[6]</sup>에서 AWS D1.1의 기인증(pre-qualified)된 바 있는 대표적 완전용입용접(CJP) 및 부분용입용접(PJP) 상재를 선정하여 HSA800 후판재 용접이음부 표준인장실험을 통해 용접재 및 용접상재 성능을 비교·평가하였다.

실험에 적용한 CJP 용접상재는 용접자세, 용접량, 루트간격을 고려하여 선정하였다(Table 5). 파단이전 최대하중( $P_{test}$ )이 모재의 인장강도( $F_{u,m}A_{g,BM}$ ) 이상의 발휘를 만족기준으로 하되 접합부의 연성능력도 반영하여 용접부와 용접재를 평가하였다. 이 절에서는 루트간격 10mm의 CJP 용접 표준인장실험 결과를 간략히 리뷰한다.

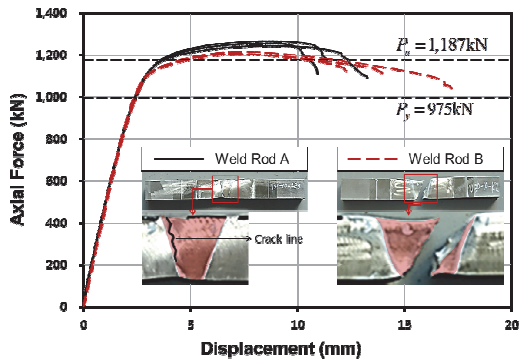
Fig. 2는 루트간격 10mm인 용접재A 시편과 용접재B 시편 결과이다. Fig. 2에 도시한  $P_y$ 와  $P_u$ 는 모재(HSA800 60t)의 소재인장실험에서 구해진 항복강도( $F_{y,m}$ , 650MPa)와 인장강도( $F_{u,m}$ , 791MPa)를 통해 산정한 값으로, 용접재 A로 용접한 모든 실험체의 강도는 모재의 인장강도 791MPa를 만족하는 것으로 나타났다.

단일 베벨형 30°의 용접재B 시편 중 일부의 경우 모재 인장강도를 조금 못 미치는 것으로 나타났고 용접재A 시편과 비교하였을 때 강도는 3~5% 정도 하회하였다. 그러나 용접재A 시편보다 연성거동의 지표 중 하나인 넥킹(necking)이 확연하게 발생하였음을 확인할 수 있다.

HSA800 60mm 후판재 CJP 용접이음부 성능평가와 관련한 선행연구의 결과는 다음과 같다. GMAW-용접재A와

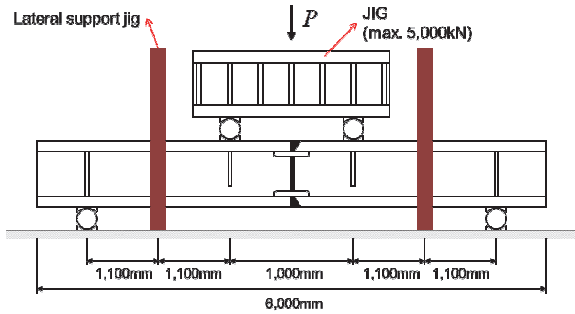


(a) 30° single bevel

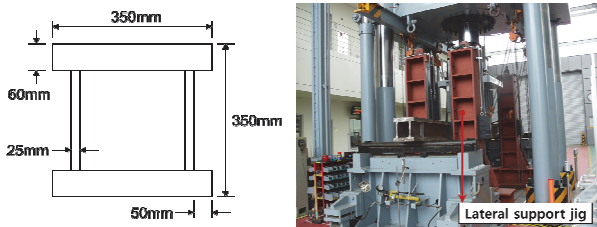


(b) 30° V-groove

Fig. 2. Effects of weld rod and CJP type on strength and deformability with comparison of ruptured specimens



(a) Specimen dimensions



(b) Section dimensions

Fig. 3. Dimensions and geometry of flexural tensile joint test specimen

FCAW-용접재B로 제작된 모든 CJP용접부의 강도는 모재 계층인장강도를 상회하는 만족스런 강도성능을 발휘하였으나 용접재B로 용접한 이음부가 연성 측면에서 우수하고 안정적인 거동을 보였다. 또한 용접재A는 용접 작업성과 효율 측면에서 우려되는 점을 많이 내포하고 있어, 용접재B를 HSA800 강재의 용접재로 권장하였다.

#### 4. 휨 부재 실험체 설계 · 제작 및 가력 계획

선행연구<sup>[6]</sup>로 수행한 두께 60mm의 HSA800 강재 표준인장실험에서는 가력용량의 한계와 실험셋팅의 어려움으로 인해 실험 보의 폭을 갖는 시편 실험체를 인장실험하지 못하였다. 이에 대한 우회 방법으로 실험대 보의 휨 실험을 통해 보 플랜지 용접부에 휨에 의한 인장력을 도입시켜 용접부가 60mm 후판의 전강도를 전달할 수 있는지 확인하는 방식을 택하였다.

휨 실험은 4점 가력으로 한다. 4점 가력을 하면 재하점 사이 구간에서 일정한 크기의 휨 모멘트가 작용하게 되므로, 재하점 구간 내에 용접부는 순수 인장력만 받게 되어 의도한 실험을 구현할 수 있다.

휨 실험 가력에 사용할 만능시험기(UTM)의 가력용량은 10,000kN이지만 가력부 지그의 허용 가력용량이 5,000kN 이므로 이에 맞추어 보 실험체 설계를 Fig. 3과 같이 하였다. 횡비틀림 좌굴 한계상태 가능성을 최소화하기 위해 실험체 단면은 박스형으로 하였다. 플랜지와 웨브는 HSA800으로 하였으며 각각의 두께는 60mm와 25mm이다.

#### 4.1 휨-인장 실험체 한계상태 검토

다음은 실험 시 플랜지 용접부 근방의 인장파괴 이전에 다른 파괴모드가 선행되지 않도록 2010 AISC-Manual<sup>[7]</sup>을 통해 실험체의 한계상태를 검토하였다. 실험체 검토를 위해 HSA800의 항복강도는 공칭항복강도인 690MPa, 탄성계수는 205,000MPa로 가정하였다

##### 4.1.1 국부좌굴

국부좌굴 검토를 보수적으로 하기 위해 단면을 Fig. 4와 같은 박스형으로 가정하여 휨을 받는 압축부재 조항을 통해 단면분류를 하였다. 박스형 단면은 양단지지된 요소로만 구성되어있다.



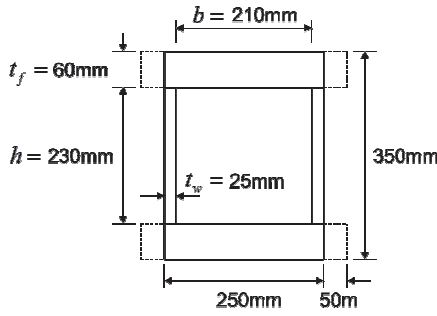


Fig. 4. Assumed section shape for examination of local buckling

플랜지의 판폭두께비는 다음 식 (1a)의 값과 같으며, 이는 힘을 받는 압축부재 조항의 콤팩트 한계세장비( $\lambda_p$ , 식 (1b)) 값보다 낮은 값이므로 플랜지는 콤팩트에 해당된다.

$$\frac{b}{t_f} = \frac{250 - 2 \times 25}{60} = 3.33 \quad (1a)$$

$$\lambda_p = 1.12 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 19.31 \quad (1b)$$

웹의 판폭두께비는 다음 식 (2a)와 같으며, 식 (2b)의 콤팩트 한계세장비 값보다 작으므로 콤팩트에 해당한다.

$$\frac{h}{t_w} = \frac{350 - 2 \times 60}{25} = 9.2 \quad (2a)$$

$$\lambda_p = 2.42 \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 41.71 \quad (2b)$$

플랜지와 웹 모두 콤팩트 조건을 만족시켰으므로 이 단면은 콤팩트 단면에 해당되며 국부좌굴이 발생하지 않는다.

#### 4.1.2 횡비틀림좌굴

횡비틀림좌굴을 제어하여 소성모멘트에 도달할 수 있도록 하는 횡지지거리( $L_p$ )를 산정하였다. Fig. 3과 같이 실험체를 셋팅할 경우, 가력 시 가력지그에 의한 상부 압축플랜지의 구속효과로 인해 횡지지 효과를 얻을 수 있으며, 이는 산정된 횡지지거리( $L_p$ ) 3,145mm를 만족시킨다(식 (3)). 그러나 실험의 안정성을 확보하기 위해 Fig. 3과 같이 가력부와 반력지점 중간에 횡지지 지그를 설치하기로 하였다.

$$L_p = 1.76r_y \sqrt{\frac{E}{F_y}} = 3,145mm \quad (3)$$

#### 4.1.3 웹 국부항복/ 크리플링/ 횡좌굴

보의 플랜지 면에 수직방향으로 집중하중이 작용하는 경우 웹에 발생가능한 한계상태는 국부항복, 크리플링, 횡좌굴이 있다. 이 세 가지 한계상태 중 어느 하나라도 발생한다면 실험체가 소성강도를 발휘할 수 없으므로 이를 검토한다.

$$\Phi R_n = 1.0 \times (5k + l_b)t_w F_{yw} = 7,245kN \quad (4a)$$

$$\Phi R_n = 0.75 \times 0.8t_w^2 \left[ 1 + 3 \left( \frac{l_b}{d} \right) \left( \frac{t_w}{t_f} \right)^{1.5} \right] \sqrt{\frac{EF_{yw}t_f}{t_w}} = 8,024kN \quad (4b)$$

$$\Phi R_n = 0.85 \frac{C_r t_w^3 t_f}{h^2} \left[ 0.4 \left( \frac{h/t_w}{L_b/b_f} \right)^3 \right] = 2,815kN \quad (4c)$$

식 (4a)~(4c)은 각각 웹의 국부항복강도, 크리플링강도, 횡좌굴강도이다. 실험은 4점 재하로 진행하므로 가력지그를 통해 두 곳으로 하중이 분배된다. 또한 단면이 박스형으로 웹이 두 개 있으므로 웹 하나 당 UTM 가력크기의 1/4 하중을 받는다. 따라서 최대가력용량을 5,000kN으로 가정할 시 웹 하나 당 1,250kN을 받는다. 이 값은 위 식들의 값보다 훨씬 작은 값이므로 웹은 이 세 가지 한계상태에 도달하지 않는다(Table 6).

#### 4.2 힘-인장 실험체 설계

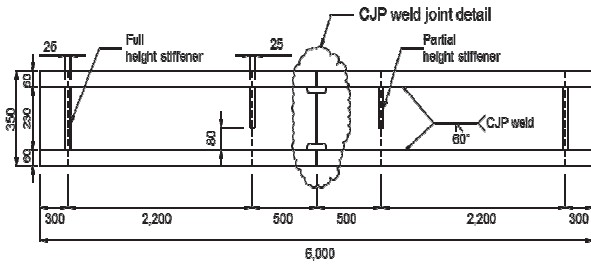
힘 실험에 적용한 HSA800 60mm 플랜지 용접이음상세는 선형연구 표준인장실험에서 사용한 CJP 용접상세(단일 베벨형 30°, V형 그루브 30°)와 동일하게 하였으며 루트간격은 10mm로 2010 AWS D1.1의 권장사항을 준수하였다. (Table 7). 용접 후 뒷담재는 제거하지 않았다.

Table 6. Limit state criteria for web with concentrated forces

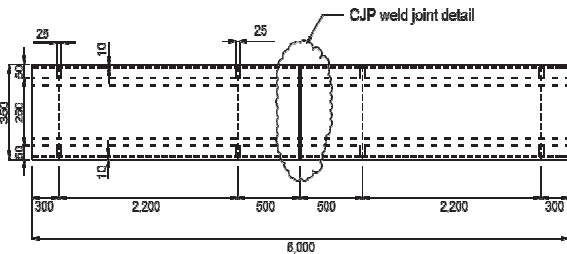
Limit State		Capacity	Demand
Web	Local Yielding	7,245kN	1,250kN
	Local Crippling	8,024kN	
	Side-sway Buckling	2,815kN	

Table 7. CJP weld built-up beam test variables

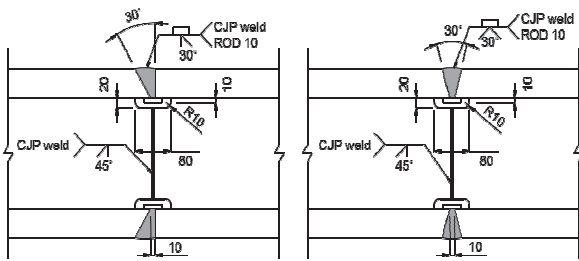
Specimen designation	Filler metal	Flange joint weld type	ROD
A-VG30	Weld rod A	V-groove 30°	10mm
A-SB30	Weld rod A	Single bevel 30°	
B-VG30	Weld rod B	V-groove 30°	



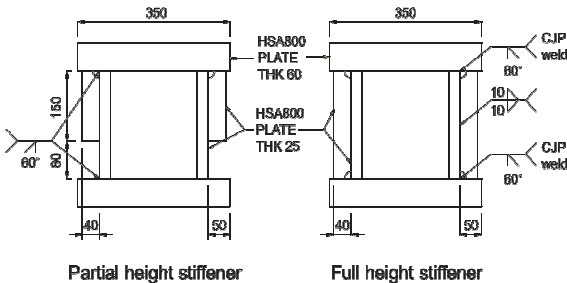
(a) Side view



(b) Top view



(c) CJP weld joint details  
(30° single bevel and 30° V-groove)



(d) Section details

Fig. 5. Fabrication of flexural tensile joint test specimen

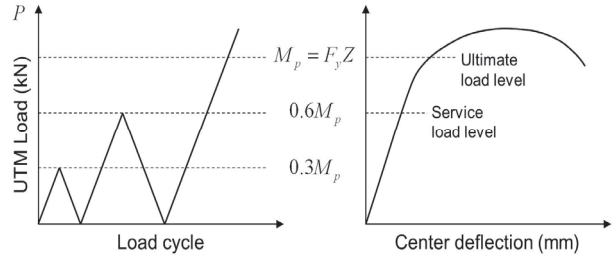


Fig. 6. Loading protocol

재하점 사이 거리는 1,000mm로 하여 소성모멘트 구간을 충분히 확보하였으며, 실험체 정 중앙에 용접부를 두었다. 휨-인장 실험체의 중앙부의 용접접근공(Weld access hole)은 Fig. 1에 따라 설계하였다(Fig. 5(c)).

재하점 하단의 보강 스티프너를 전 높이로 할 경우 스티프너 용접열이 하부 인장플랜지 강도에 영향을 미칠 수 있다. 이로 인해 스티프너 하단의 인장플랜지에서 취성파단이 발생한 실험연구가 이미 보고된 바 있다<sup>2)</sup>. 따라서 가력지점의 스티프너는 하부 플랜지에 용접 열 영향을 주지 않기 위해 부분 높이 스티프너로 한다(Fig. 5(d)).

플랜지와 웨브가 만나는 곳과 용접과 스티프너의 용접은 용접재A의 수량제한으로 인해 국산 용접재B로 하였다. 플랜지와 웨브의 접합부는 전단흐름 검토를 수행하였으며, 강도측면에서 용접재B를 적용하여도 문제가 없는 것으로 나타났다.

### 4.3 휨-인장 실험체 가력계획

실험체 가력은 Fig. 6과 같이 소성모멘트  $M_p$ 의 30% 및 60%에 해당하는 하중으로 일방향 반복가력하여 사용하중 상태에서 용접부의 상태를 점검한 후 최대하중까지 가력하여 용접성능을 보수적으로 평가한다.

## 5. 실험결과 분석 및 고찰

### 5.1 모재 인장시편 실험결과

모재(HSA800 60mm)의 재료 물성치를 파악하여 휨-인장실험을 평가하기 위해 본 실험에 앞서 소재인장실험을 수행하였다. 실험체 제작에 사용된 모재를 절취해 금속재료 인장시험편 규정 (KS B 0802:2003, 2008)<sup>9)</sup>에 따라 4호 봉형 시험편으로 제작하였다. 시험편의 변형률은 신율계를 통해 구하였으며 신뢰도를 높이기 위해 3개의 시험편을 테스트하였다.

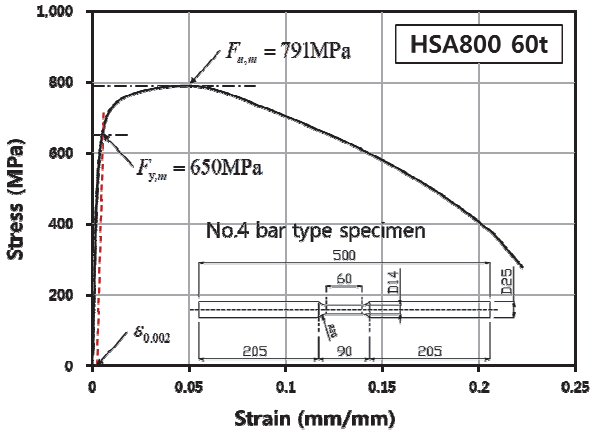


Fig. 7. Measured stress-strain relationship of base metal

Table 8. Measured base metal tensile properties

	Elastic modulus $E$ (MPa)	Yield strength $F_{y,m}$ (MPa)	Tensile strength $F_{u,m}$ (MPa)	Yield ratio YR	Yield strain $\epsilon_y$ (%)
HSA800 (60mm)	199,953	650	791	0.822	0.372

실험결과 HSA800 60mm의 항복강도와 인장강도 값은 각각 공칭항복강도 690MPa와 공칭인장강도 800MPa를 조금 하회하였다(Fig. 7, Table 8). 이는 후판일수록 압연공정이 적어 강도가 낮게 나타나기 때문으로 판단된다.

### 5.2 힘-인장 실험결과

식 (5)는 소재계측강도를 바탕으로 실험체의 소성강도를 산정한 것이다. Fig. 8은 각 실험체가 소성모멘트  $M_p$ 에 도달했을 때 모습이다. 소성모멘트에 도달하는 동안 인장 플랜지의 용접부에 균열이나 파단이 일어나지 않았다.

$$M_p = F_{y,m}Z = 650\text{MPa} \times 7,412,500\text{mm}^4 = 4,818\text{kNm} \quad (5a)$$

$$P_u = \frac{2M_p}{l} = \frac{2 \times 4,818\text{kNm}}{2,200\text{mm}} = 4,380\text{kN} \quad (5b)$$

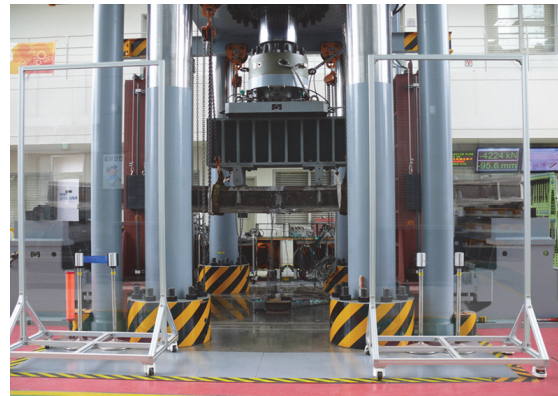
Table 9와 Fig. 9에서 보듯이 모든 실험체는 사용하중상태에서 그 성능을 만족하였고 소성강도보다 더 큰 강도를 전달하였다. A-VG30 실험체의 경우 용접부가 파단이 나기 전인 4,952.6kN에서 가력을 중지하였으나, 플랜지 용접부는



(a) A-VG30 specimen



(b) A-SB30 specimen

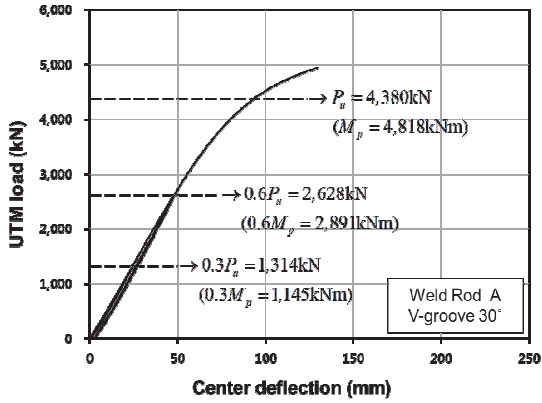


(c) B-VG30 specimen

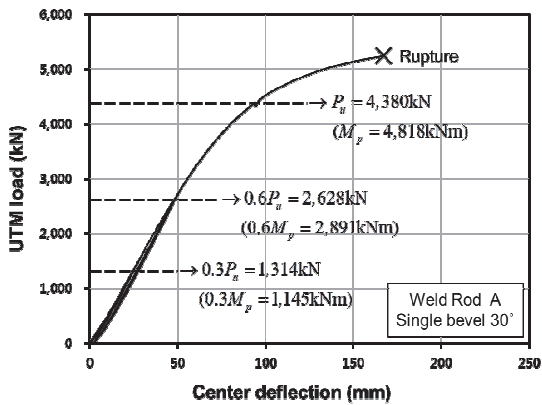
Fig. 8. Plastic moment level of beam specimen

Table 9. Result of flexural-tensile tests

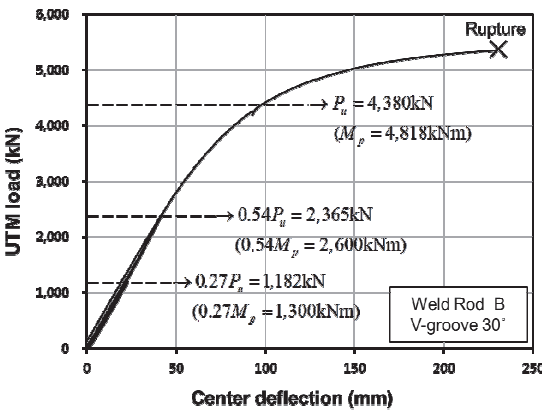
Specimen	Max.UTM load $P_{max}$ (kN)	Max. deflection $\Delta_{max}$ (mm)	$P_{max}/P_u$ (%)
A-VG30	4952.60	130.06	113.07
A-SB30	5233.09	167.33	119.48
B-VG30	5346.51	230.56	122.07



(a) A-VG30 specimen



(b) A-SB30 specimen



(c) B-VG30 specimen

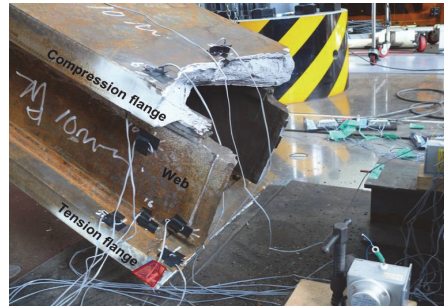
Fig. 9. Repeated load and center deflection relationship

소성강도에 대해 약 13% 정도 상회하는 강도를 발현하였다. A-SB30과 B-VG30 실험체의 경우 실험체가 파단이 날 때까지 가력하였으며, 파단 시 소성강도를 각각 약 19.5%, 22% 정도 상회하였다.

Fig. 10은 A-SB30 실험체가 파단 났을 때의 모습이다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 10. Collapse and weld joint rupture of A-SB30

인장 플랜지 용접부가 파괴되면서 실험체가 반력 지그에서 튀어 올랐다 떨어졌고, 이 과정에서 UTM Head가 손상되었다. Fig. 10(b)와 (c)를 보면 하부 인장 플랜지 중 개선하지 않은 쪽에서 용접재가 깨끗하게 떨어져나갔음을 알 수 있다. 이는 용접 시 용접재가 용융되어 모재에 정확하게 용착되지 못하였기 때문이다. 용접재 A의 경우 온도관리 및 전압에 민감하고, 용접물이 쉽게 퍼지지 않으며, 냉각속도가 빠른 탓에 비드 형성이 어렵다는 본 실험의 실험체 제작을 담당한 용접공의 용접재A에 대한 용접성 평가 진술내용과 일치한다.

Fig. 11은 B-VG30 실험체의 용접부의 파단모습이다. Fig. 11(a), (b)를 보면 A-SB30 실험체와는 달리 인장 플랜지의 용접열 영향부(Heat affect zone)부분에서 파단이 발생했음을 알 수 있다.



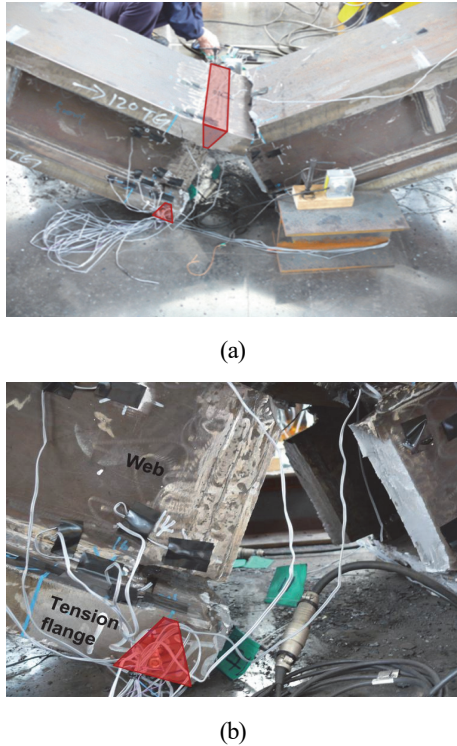


Fig. 11. Collapse and heat affect zone rupture of B-VG30

### 5.3 힘-인장 실험결과 분석

용접접근공의 플랜지에서 응력집중이 일어나므로 이 구간의 모재 플랜지 강도를 분석한다. 보 실험체의 용접부 강도를 평가하기 위해 다음 Fig. 12와 같이 실험체에 소성계이지를 설치하여 변형률을 측정하였다.

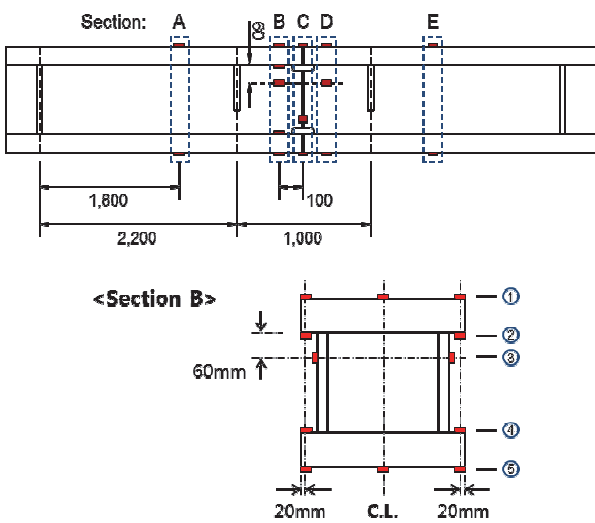
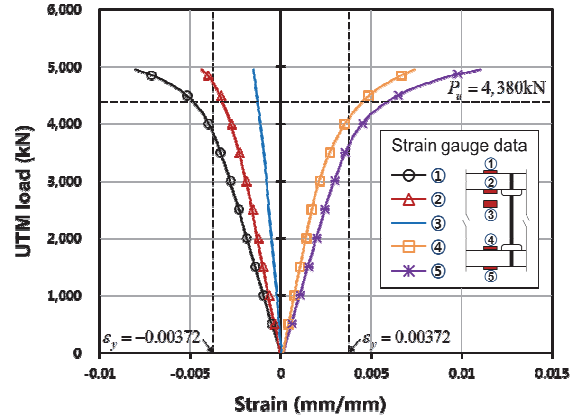
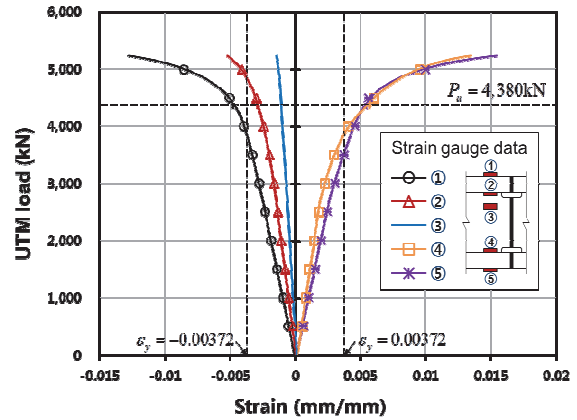


Fig. 12. Strain gauge layout

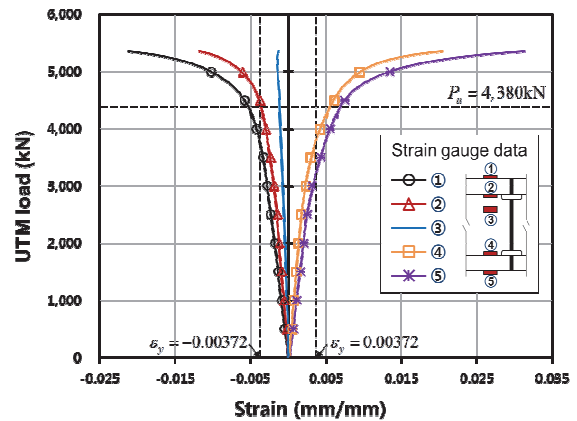
각 실험체의 단면 B에서 측정된 변형률의 평균 데이터는 Fig. 13과 같으며, 용접부 근방에서 웨브 변형률은 탄성범위에 머물렀다.



(a) A-VG30



(b) A-SB30



(c) B-VG30

Fig. 13. Measured strain average data at weld joint of beam specimens



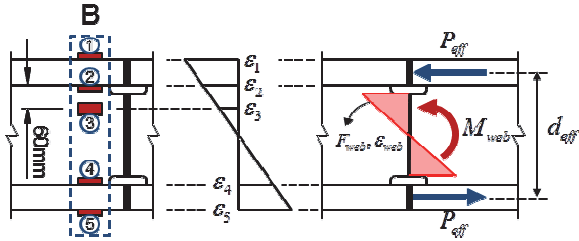


Fig. 14. Strain distribution of base metal near weld joint

$$M_{flange} = M_{exp} - M_{web} \tag{6a}$$

$$P_{eff} = M_{flange} / d_{eff} \tag{6b}$$

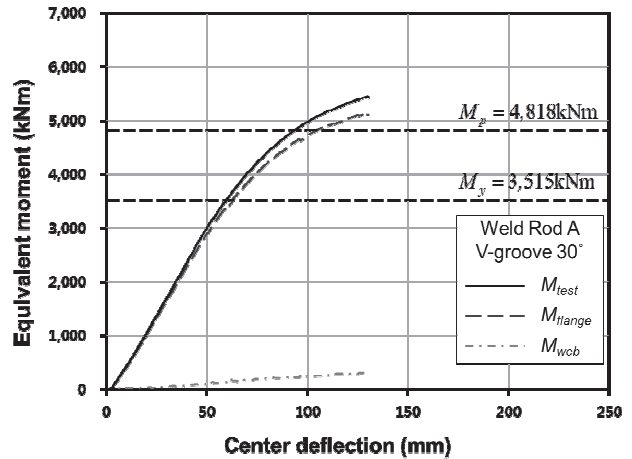
$$A_f F_{y,m} = 21,000\text{mm}^2 \times 650\text{MPa} = 13,650\text{kN} \tag{7a}$$

$$A_f F_{u,m} = 21,000\text{mm}^2 \times 791\text{MPa} = 16,611\text{kN} \tag{7b}$$

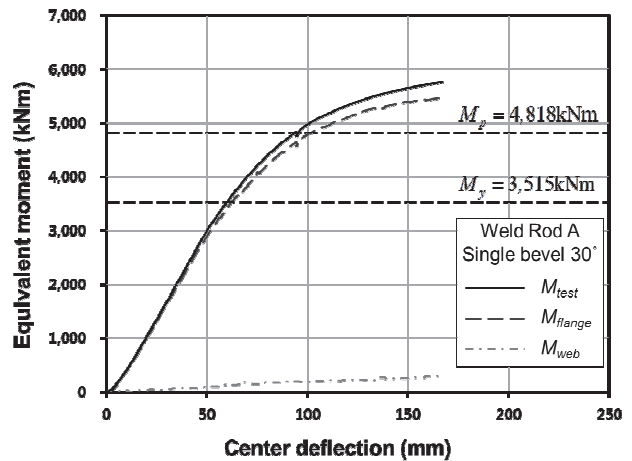
플랜지 강도를 분석하기 위해 단면 B에서 웨브 변형율을 선형분포로 가정하고 이를 용접접근공 근방의 모재 웨브 변형률과 동일한 것으로 하였다. 즉 용접접근공 근방 웨브에서 계측된 변형률 분포를 통해 용접부에 작용하는 등가의 모멘트 크기를 구하였다. 실험에서 계측된 모멘트  $M_{exp}$  값에서 웨브 모멘트  $M_{web}$  값을 제하여 플랜지 모멘트  $M_{flange}$ 를 산정한 후 유효깊이  $d_{eff}$ (290mm)로 나누어 용접부 모재 플랜지에 작용하는 등가의 축력  $P_{eff}$ 를 산정하였다(Fig. 14, 식 (6)). 이를 통해 용접부 모재 플랜지의 축력 값이 소재 인장 실험을 통해 구한 항복강도수준( $A_f F_{y,m}$ )과 인장강도수준( $A_f F_{u,m}$ )을 상회하는지 검토하였다(식 (7)).

Fig. 13을 바탕으로 등가의 웨브 모멘트로 산정했을 때 Fig. 15에서와 같이 처짐에 대해 각 실험체 모두 선형관계를 나타내었다. 전체 모멘트에서 웨브 모멘트를 제하여 플랜지 모멘트를 산정하였는데, Fig. 15에서 보듯이 전체 모멘트에 대해 웨브의 모멘트 기여는 거의 없었으며 플랜지 모멘트가 지배했음을 알 수 있다.

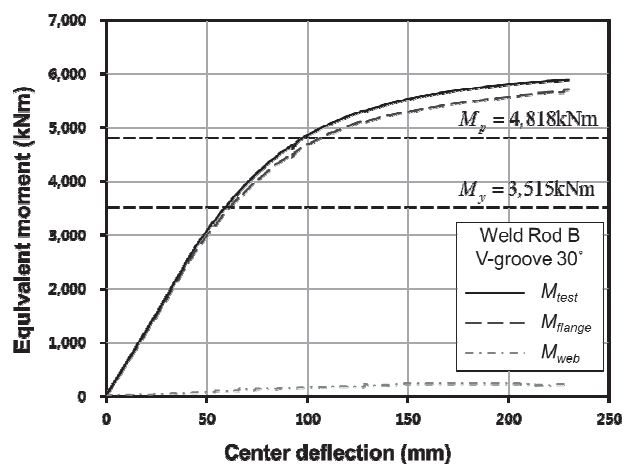
Fig. 15의 플랜지 모멘트를 유효깊이로 나누어 산정한 등가 플랜지 축력은 Fig. 16과 같다. A-VG30 실험체가 최대 강도에 도달했을 때 실험을 종료한 것이 아니었음에도 불구하고 모든 실험체의 플랜지에서 모재의 인장강도 수준을 상회하는 강도를 전달하였다. 파단까지 실험을 진행한 A-SB30 실험체와 B-VG30 실험체 결과를 비교하면 B-VG30 실험체가 우수한 연성능력을 발휘하였음을 알 수 있다.



(a) A-VG30



(b) A-SB30



(c) B-VG30

Fig. 15. Equivalent moment at weld joint of beam specimens

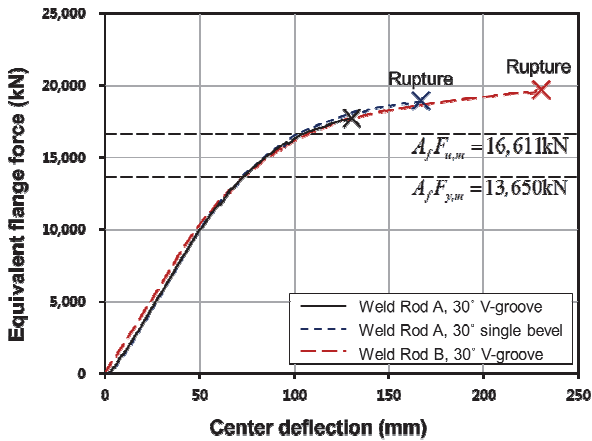


Fig. 16. Comparison of equivalent forces at weld joint of beam specimens

## 6. 요약 및 결론

모재가 고강도화하고 후판화될수록 용접성능의 확보에 세심한 기술적 고려가 요구됨은 잘 알려져 있다. HSA800 60mm 후판재 조립보 용접 이음부의 휨-인장 성능평가와 관련한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다:

- (1) HSA800 강재는 현행 2010 AISC-Manual에서 50mm 이상의 후판재 용접 시에 요구되는 CVN 인성 값을 충분히 상회하는 바람직한 물성을 지닌다. 본 연구에서 HSA800 후판재의 용접재로 선택한 GMAW-용접재A와 FCAW-용접재B는 2010 AISC-Manual과 2010 AWS D1.1의 요구조건을 만족시켰다.
- (2) GMAW-용접재A와 FCAW-용접재B로 제작된 모든 보 실험체 플랜지의 CJP용접부는 소성모멘트 값 이상의 모멘트를 전달하였다. 또한 모든 용접 이음부에서 모재에서 계측된 인장강도 레벨 이상의 축력을 전달하였다.
- (3) 용접재A를 적용한 단일 베벨형 상세의 경우 모재를 개선하지 않은 계면 부분에서 취성파단이 일어났으며, 용접재B를 사용한 V형 그루브 상세의 경우 용접열 영향부에서 파단이 관측되었다. 따라서 가능하면 고강도 후판재의 용접상세로 단일 베벨형보다는 V형 그루브를 사용하기를 권장한다.
- (4) 표준인장실험결과와 마찬가지로 FCAW-용접재B가 상대적으로 안정적이고 우수한 연성능력을 발휘하였다. 본문에서 논의한 바와 같이 GMAW는 용접 작업성과 효

율측면에서 우려되는 점을 많이 내포하고 있다. 따라서 성능면에서 우수하고 용접작업도 훨씬 효율적이고 수월하며 현장 친화적인 그리고 소재의 가용성 측면에서도 유리한 국내산 FCAW-용접재B가 HSA800 강재의 용접재로 타당하다.

## 감사의 글

본 연구는 국토해양부가 주관하고 한국건설교통기술평가원이 시행하는 2009년도 첨단도시개발사업(09첨단도시 A01) 지원사업으로 이루어진 것으로 이에 감사를 드립니다.

## 참고문헌(References)

- [1] Lee, C.-H., Han, K.-H., Uang, C.-H., Kim, D.-K., Park, C.-H., and Kim, J.-H. (2013) Flexural Strength and Rotation Capacity of I-Shaped Beams Fabricated From 800-MPa, *Journal of Structural Engineering*, American Society Civil Engineers, Vol.139, No.6, pp.1043-1058.
- [2] 이철호, 한규홍, 김대경, 박창희, 김진호, 이승은, 하태휴 (2012) 800MPa급 고강도강 보 부재의 국부좌굴 및 비탄성 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제4호, pp.479-490.  
Lee, C.H., Han, K.H., Kim, D.K., Park, C.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Ha, T.H. (2012) Local Buckling and Inelastic Behaviour of 800 MPa High-Strength Steel Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.4, pp.479-490 (in Korean).
- [3] 이철호, 김대경, 한규홍, 김진호, 이승은, 하태휴(2012) 고강도강재 단주의 압축강도 및 잔류응력 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제24권, 제1호, pp.23-34.  
Lee, C.H., Kim, D.K., Han, K.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Ha, T.H. (2012) Compressive Strength and Residual Stress Evaluation of Stub Columns Fabricated of High Strength Steel, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.24, No.1, pp.23-34 (in Korean).
- [4] 유정한, 김주우, 양재근, 강주원, 이동우(2013) 국부좌굴을 고려한 건축구조용 고성능강(HSA800) 조립각형강관 압축재의 적용성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.223-331.  
Yoo, J.H., Kim, J.W., Yang, J.G., Kang, J.W., and Lee, D.W. (2013) Evaluation on Applicability of Built-up Square

Tubular Compression Members Fabricated with HSA800 High Performance Steel Considering Local Buckling, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.223-231 (in Korean).

- [5] 이강민, 이명재, 오영석, 김태수, 김도환(2013) 중심압축력을 받는 건축구조용 고성능강(HSA800) 용접H형 단주의 국부좌굴거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.289-297.  
Lee, K., Lee, M.J., Oh, Y.S., Kim, T.S., and Kim, D.H. (2013) Local Buckling Behavior of Stub H-Shaped Columns Fabricated with HSA800 High Performance Steels Under Concentric Axial Loading, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.289-287 (in Korean).
- [6] 이철호, 김대경, 한규홍, 박창희, 김진호, 이승은, 김도환 (2013) HSA800 후판재의 맞댐용접부 인장강도 실험, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제25권, 제4호, pp.

431-440.

- Lee, C.H., Kim, D.K., Han, K.H., Park, C.H., Kim, J.H., Lee, S.E., and Kim, D.H. (2013) Tensile Testing of Groove Welded Joints Joining Thick-HSA800 Plates, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No. 4, pp.431-440 (in Korean).
- [7] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [8] American Welding Society (2010) *Structural Welding Code - Steel* (AWS D1.1/D1.1M-2010), USA.
- [9] 국가기술표준원(2003) 금속 재료 인장 시험 방법(KS B 0802: 2003).  
Korean Agency for Technology and Standards (2003) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).

---

**요 약 :** 본 연구에서는 HSA800 후판 강재에 적합한 용접재를 선정하고자 휨-인장실험을 수행하였다. 본 연구 수행 당시 HSA800 강재에 적용가능한 용접재로 GMAW 용접재(외국산)와 FCAW 용접재(국내산) 두 가지가 추천되어 이들을 사용하였다. 선행연구인 표준인장실험 결과를 바탕으로 맞댐용접상세와 루트간격을 주요 실험변수로하여 실물크기의 보 실험을 통해 용접부의 성능을 평가하였다. 강도 측면에서 모멘트 및 플랜지 축력 전달에 대한 조건은 두 용접재 모두 만족하였으나 연성능력 측면에서 GMAW 용접재보다는 FCAW 용접재가 일관되고 우수한 거동을 보임이 실험적으로 확인되었다. 특히 GMAW 용접재는 용접효율과 작업성의 문제로 현장에서의 상향용접이 어려운 것으로 파악되었다. 같은 완전용입용접이라도 Single bevel보다는 V-groove가 안정적인 구조거동을 보이는 것으로 나타났다. 표준인장실험결과와 휨-인장실험결과를 토대로 HSA800 후판재의 용접상세 및 용접재를 제시하였다.

**핵심용어 :** 고강도강, 후판, 용접성능, 휨-인장실험, 완전용입용접, 가스메탈아크용접, 플럭스코어아크용접

---