

HSA800 후판재의 맞댐용접부 인장강도 실험

이 철 호^{1)*} · 김 대 경²⁾ · 한 규 흥²⁾ · 박 창 희²⁾
김 진 호³⁾ · 이 승 은⁴⁾ · 김 도 환⁴⁾

¹⁾ 교수, 서울대학교, 건축학과 ²⁾ 박사과정, 서울대학교, 건축학과 ³⁾ 수석연구원, RIST, 강구조연구소 ⁴⁾ 책임연구원, RIST, 강구조연구소

Tensile Testing of Groove Welded Joints Joining Thick-HSA800 Plates

Lee, Cheol Ho^{1)*} Kim, Dae Kyung²⁾ Han, Kyu Hong²⁾ Park, Chang Hee²⁾
Kim, Jin Ho³⁾ Lee, Seung Eun⁴⁾ Kim, Do Hwan⁴⁾

¹⁾ Professor, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

²⁾ Ph.D. Candidate, Dept. of Architecture, Seoul National University, Seoul, 151-742, Korea

³⁾ Sr. Principal Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

⁴⁾ Sr. Researcher, Steel Structure Research Division, RIST, Incheon, 406-840, Korea

ABSTRACT : In this study, a standard tensile welded-joint test was conducted to select a welding electrode suitable for recently developed HSA800 steel. Two welding electrodes were available at the time of this study: one was GMAW-based and the other FCAW-based. The tensile test specimens were fabricated by joining 60mm-thick HSA800 plates according to the AWS-prequalified groove welded joint details. Specimens which violate the standard root opening distance (ROD) were also included to see if poor construction tolerance could be accommodated. During fabrication, serious concerns about the welding efficiency of the GMAW-based product were raised by a certified welder. Both welding electrodes showed satisfactory and similar performance from welded joint strength perspective. But groove welded joints made by using the FCAW-based rod consistently showed more ductile and stable behavior. The AISC provisions for PJP joint strength were shown to be very conservative under direct tensile loading. Violating the AWS prequalified ROD by 100% apparently passed the strength criteria, but unusual crater-like fracture surface was observed.

KEYWORDS : high-strength steel, thick plate, weldability, standard tension test, GMAW, FCAW

1. 서 론

초고층건물의 다이아그리드 부재, 아웃리거 부재, 메가기둥, 또는 이들의 접합부에는 횡력 또는 중력하중에 의해 거대한 응력이 작용한다. 이들 부재나 접합부에 일반강을 사용할 경우 종종 100mm를 상회하는 극후판재가 요구되어 설계, 제작, 양중, 접합 등에 큰 문제를 야기하곤 한다. 현재 시공 중인

국내 최고의 초고층건물인 L타워에 최근에 개발된 HSA800강재를 적용하여 소요 후판재의 두께를 60mm까지 줄인 사례에서 보듯이, 고강도 강재를 사용하면 부재 및 접합부의 슬림화를 도모할 수 있어 설계, 제작, 양중에 이르기 까지 많은 이득을 취할 수 있다.

물론 이 경우에도 주요 하중전달 부재 및 구조시스템 간의 접합부에서 용접부 안전성은 가장 중요한 이슈가 된다. 특히 강재가 고강도화하고 후판화될수록 용접성능의 확보에 세심한 기술적 고려가 요구됨은 잘 알려져 있다. HSA800급의 고강도 강재는 아직 현장적용 사례가 많지 않고, 고강도 후판강재의 용접성능에 대한 선행연구 역시 희소하다. 본 연구에서는 후판재 용접에 요구되는 몇 가지 소재특성을 정리하고 HSA800 강재에 적용가능한 것으로 추천된 두 가지 용접재를 사용하여 후판재 맞댐이음 용접부의 용접성능을 비교평가

Note.-Discussion open until February 28, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on December 21, 2012; revised June 8, 2013; approved on July 20, 2013.
© KSSC 2013

* Corresponding author

Tel. +82-2-880-8735 Fax. +82-2-878-9061
E-mail: ceholee@snu.ac.kr

하고 권장 용접재를 제시하였다.

2. 후판 용접 요구사항 검토

이미 언급한 바와 같이 후판재의 경우 용접에 따른 열영향, 냉각시의 수축에 따른 응력집중의 증대 등으로 인해 소재 및 상세 등에 더욱 엄격한 요구조건이 부과된다. 관련 조항을 2010 AISC-LRFD 기준⁽¹⁾ 및 2010 AWS 기준⁽²⁾에 따라 검토하였다.

2.1 후판재 용접에 대한 설계기준 검토

두께 50mm 이상의 후판 강재의 이음에 대한 설계요구조건은 2010 AISC-LRFD의 "J1.5. Splice in Heavy Sections"에 제시되어 있다⁽¹⁾. 본 연구는 두께 60mm의 HSA800 후판 강재를 대상으로 하므로 이 절의 설계조항을 통해 사용의 타당성을 검증한다. 50mm 이상의 후판을 CJP(Complete Joint Penetration)로 용접할 때는 다음의 네 가지 사항을 반드시 만족할 것을 요구하고 있다.

2.1.1 모재의 CVN 최소 요구치

CVN(Charpy V-Notch) 값은 재료의 인성능력을 판단하는 중요한 지표이다. 후판 강재에 대한 CVN 요구조건은 2010 AISC-LRFD Section A3.1c(rolled heavy section)와 Section A3.1d(built-up heavy section)에서 모재의 CVN 최소값은 상온 21°C에서 27J 이상으로 규정하고 있다. Table 1에

Table 1. AISC Minimum CVN requirement of built-up heavy shapes and CVN of HSA800

Built-up heavy section requirement	HSA800 (60mm)
27J @ 21°C	47J @ -5°C

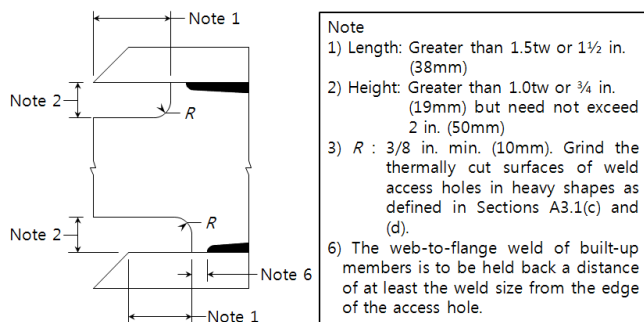


Fig. 1 Recommended weld access hole geometry of built-up members per the 2010 AISC specifications: assembled after cutting⁽¹⁾

서 보듯이 HSA800 강재는 47J @ -5°C로서 이를 충분히 만족시키고 있다.

2.1.2 용접접근공의 형상 및 치수

용접접근공(weld access hole)의 형상은 조립 부재의 접합부 성능에 크게 영향을 미치기 때문에 2010 AISC-LRFD J.1.6절에서는 Fig. 1과 같이 조립 부재의 용접접근공의 크기 및 형상에 대해 기준을 정해두고 있다. 제안된 형상과 치수는 용접부 취성과파괴의 원인이 될 수 있는 용접수축 및 응력집중을 최소화하기 위함이다. Fig. 1의 Note 1과 2는 용접 작업성의 확보 및 비파괴검사 등의 편의를 위하여 최소 길이를 각각 38mm와 19mm로 제한하는 규정이다. 필렛반경 R값은 응력집중을 방지하기 위해 10mm 이상이어야 한다. Note 6은 웨브와 플랜지의 용접 시 용접 개시점과 종료 지점에서 발생할 수 있는 결함을 방지하기 위함이고, 용접사이즈만큼의 거리를 확보할 것으로 규정하고 있다. 플레이트를 용접한 후 용접접근공을 가공할 시에는 가공 시 발생한 열과 진동으로 인해 예상치 않은 응력이나 크랙 등이 발생할 수 있으므로 용접접근공은 플레이트를 용접하기 전에 가공되어야 한다.

2.1.3 열 절단 시 온도관리조항

2010 AISC-LRFD M.2.2절에서는 50mm 이상의 후판을 열 절단 시 표면 층의 경화와 초기 크랙발생을 최소화하기 위하여 66°C 이상에서 전열처리(preheating)할 것을 요구하고 있다.

2.1.4 표면처리/검사조항

따낸 부분과 용접공의 경화된 표면층을 그라인딩하는 것이 요구되며 노치나 크랙의 검사에 자분탐상법(magnetic particle inspection) 등의 비파괴 시험법을 사용할 것을 권장한다.

이상 네 가지 조항이 후판 강재에 요구되는 조건이다. 2010 AISC-LRFD 이전 규정에서는 응력집중을 줄이기 위해 후판이음부의 모든 뒷담채와 용접탭을 제거하는 것이 요구되었으나, 2010 규정에서는 이 조항을 삭제하고 경험 있는 엔지니어의 판단에 맡기고 있다.

2.2 용접재에 대한 기준

2010 AWS D1.1의 3.3절에서는 CJP 용접 시 모재와 용접재의 선택 및 조합⁽²⁾에 대해 취급하고 있다. 이 조항에서는 용접재의 모재에 대한 언더매칭도 허용하고 있다. 그러나 모재향복을 선행시키려면 일반적으로 모재 강도와 유사하

Table 2. Base metal and matching filler metal according to the practice in the united states

Base metal		Matching filler metal
A36	$F_y=250\text{MPa}$ $F_u=350\text{MPa}$	$F_{EXX}=490\text{MPa}$
A572	$F_y=350\text{MPa}$ $F_u=490\text{MPa}$	
A992	$F_y=350\text{MPa}$ $F_u=490\text{MPa}$	
A913 Gr.65	$F_y=450\text{MPa}$ $F_u=560\text{MPa}$	$F_{EXX}=560\text{MPa}$
HSLA80D	$F_y=650$ $\sim 770\text{MPa}$ $F_u=800$ $\sim 950\text{MPa}$	$F_{EXX}=890\text{MPa}$

거나 약간 상회하는 용접재를 선택해야 한다. Table 2는 미국 쪽의 매칭 용접재의 일례로, 용접재 인장강도(F_{EXX})가 모재 인장강도(F_u)와 같거나 상회하도록 택하고 있음을 알 수 있다. 열영향이 증대되므로 필요이상의 오버매칭(가령 70MPa 이상)은 권장되지 않는다.

잔류응력이나 뒷담재에 의한 기하학적 불연속성이 파단에 영향을 주는데 이에 민감한 용접재는 용접부에 매우 낮은 노치인성을 갖게 한다. 2010 AISC-LRFD J2.6절에서 용접재의 CVN 최소요구조건으로 상온 4°C에서 27J을 갖도록 하고 있다. 이 값은 모재의 최소 CVN 값(21°C에서 27J)보다 훨씬 보수적이다. 용접부의 경우 용접 열 영향으로 인해 CVN 값이 낮아지는 경향이 있으므로, 접합부의 취성파괴를 막기 위해서는 동일한 온도 조건에서의 모재 CVN 값보다 용접재의 CVN 값이 높아야하기 때문이다.

2.3 용접재 선정

본 연구의 실험이 진행될 당시 HSA800강재에 적합한 용접재의 개발이 완료되지 않은 상태였었다. 포항산업과학원 예비 실험연구를 참고하여 GMAW(gas metal arc welding) 방식의 용접재 A(외국산)와 FCAW(flux cored arc welding) 방식의 용접재 B(국내산)를 본 연구의 용접재로 선택하였다. Table 3 및 4에서 보듯이 두 용접재는 모두 설계요구조건을 충족시키고 있다. 용접재에 대한 CVN 요구조건과 선정된 용접봉의 CVN 값은 Table 3과 같다. 두 용접재 모두 최소요구치를 충분히 만족시키고 있음을 알 수 있다. Table 4는 HSA800과 두 용접봉의 강도를 비교한 것으로 두 용접재 모두 충분히 오버매칭 되었음을 알 수 있다. Table 5와 6은 선정된 용접재 A와 B의 용접조건이다. 두 표를 비교해보면 GMAW 방식인 용접재 A는 전류 뿐 아니라 전압관리도 해

Table 3. Comparison of CVN values for filler metal

Filler metal requirement	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 4. Nominal strength of HSA800 and selected weld rods

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

Table 5. Welding conditions of weld rod A

Diameter (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 6. Welding conditions of weld rod B

Diameter (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)		

야 하는 등 용접재 B보다 용접조건이 까다롭다는 것을 확인할 수 있다.

3. 용접상세 설계기준 검토

우선 2010 AWS D1.1에서 기인증(pre-qualified)된바 있는 대표적 완전용입(맞댐) 상세^{[2],[3]}를 선정하고, 이를 HSA800 후판재 이음부에 적용하여 용접재의 성능을 비교평가한다.

3.1 CJP 설계기준 검토

3.1.1 CJP 용접상세

다음 Fig. 2는 2010 AWS D1.1에서 기인증된 CJP 용접상세들 중 대표적인 것들이다. Table 7~10은 CJP용접 관련 모재두께, 그루브 각도, 용접자세 등의 제한조건을 정리

한 것이다. 표의 용접자세 기호에서, All은 전자세, F(Flat)는 아래보기자세, H(Horizontal)는 수평보기자세, V(Vertical)는 수직보기자세, OH(Overhead)는 상향용접자세를 나타낸다.

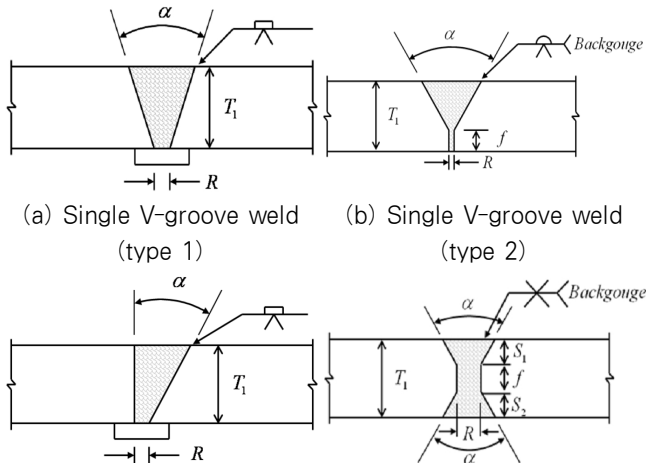


Fig. 2 Examples of AWS-prequalified CJP weld details

Table 7. CJP weld limitations for single V-groove: type 1

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW
Unlimited	5	30°	F,V,OH	Required
	10	30°	F,V,OH	Not req.
	6	45°	F,V,OH	Not req.

Table 8. CJP weld limitations for single V-groove: type 2

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Root Face (f , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW
Unlimited	6	0~3	45°	All	Not req.

Table 9. CJP weld limitations for single bevel groove

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW
Unlimited	5	30°	All	Required
	6	45°	All	Not req.
	10	30°	F,H	Not req.

Table 10. CJP weld limitations for double V-groove

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Root Face (f , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Gas Shielding for FCAW
Unlimited	0~3	0~3	60°	All	Not req.

3.1.2 CJP 용접강도

2010 AISC-LRFD J2.1절에서 CJP의 유효두께는 모재의 두께와 동일한 것으로 한다. 만일 두께가 다른 두 강판을 CJP 용접하는 경우는 둘 중 얇은 쪽의 두께를 유효두께로 하여 유효면적을 구한다. CJP 용접부 강도 R_n 는 모재의 강도($F_{nBM}A_{BM}$)와 용접재 강도($F_{nw}A_{we}$)중 낮은 쪽을 통해 산정한다(식 (1)).

$$R_n = \min(F_{nBM}A_{BM}, F_{nw}A_{we}) \quad (1)$$

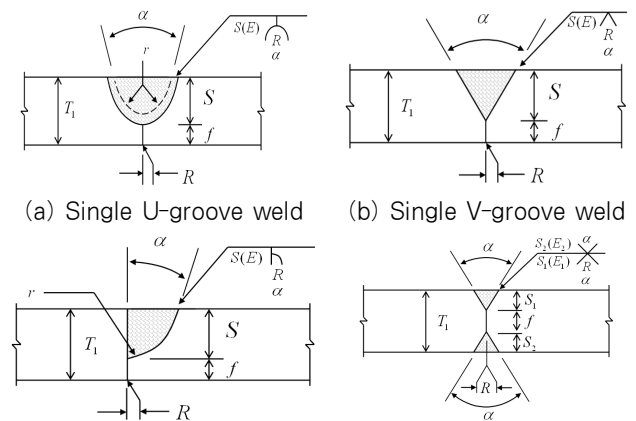


Fig. 3 Examples of AWS-prequalified PJP weld details

Table 11. PJP weld limitations for single U-groove

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Bevel Radius (r , mm)	Root Face (f , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Weld Size (E)
6(min.)	0	6	3(min.)	20°	All	S

Table 12. PJP weld limitations for single V-groove

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Root Face (f , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Weld Size (E)
6(min.)	0	3(min.)	60°	All	S

Table 13. PJP weld limitations for single J-groove

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Bevel Radius (r , mm)	Root Face (f , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Weld Size (E)
6(min.)	0	10	6(min.)	30°	All	S

Table 14. PJP weld limitations for double V-groove

Base Metal Thickness (T_1 , mm)	Root Opening (R , mm)	Root Face (f , mm)	Groove Angle (α)	Allowed Welding Positions	Total Weld Size ($E_1 + E_2$)
12(min.)	0	3(min.)	60°	All	$S_1 + S_2$

3.2 PJP 설계기준 검토

3.2.1 PJP 용접상세

다음 Fig. 3과 Table 11~14는 2010 AWS D1.1에서 기인증된 대표적 PJP 용접상세 관련 정보를 요약한 것이다.

3.2.2 PJP 용접강도

2010 AISC-LRFD J2.1절에서 PJP의 유효두께는 용접 형식, 용접자세, 각도 등에 따라 약간 다르나 대부분이 그루브 두께 또는 이에서 3mm를 감안한 것으로 한다. PJP 용접부의 강도는 용접재의 전단강도로 하고 있다(식 (2)).

$$R_n = 0.6F_{EXX}A_{we} \quad (2)$$

4. 실험체의 설계 및 제작

실험에 적용할 CJP 용접상세는 3장의 용접상세 중에서 용접자세, 용접량, 루트간격을 고려하여 선정하였다. 용접자세는 시공현장에서의 용접가능 유무와 밀접하고, 용접량은 용접비용과 관계된다. 2010 AWS: D1.1에서는 3장에서 보듯이 맞댐용접의 최대 루트간격을 10mm로 정해놓았다. 루트간격이 10mm가 넘는 경우 용접비드의 형성이 어렵고, 용접

부의 중앙에 크랙이 발생하기 쉽기 때문이다^[4]. 그러나 제작 오차, 현장에서의 세우기 오차에 의해 루트간격이 20mm에 이르는 등 표준치를 초과하는 경우도 발생하는 상황을 감안하여 루트간격 20mm인 경우도 성능평가를 하기로 하였다. 선택된 CJP상세와 그 단면의 용접량(단면적으로 표시)은 다음 Fig. 4와 같다. PJP 상세는 Fig. 5와 같이 Double V-groove 60°를 선택하였다.

본 실험의 HSA800 강재의 두께가 60mm이기 때문에 일반적으로 사용하는 시편의 규격으로는 실험기기의 가력용량을 초과하는 문제가 있다. 따라서 강의 맞대기 용접이음 규정(KS B 0833)^[5]에 따라 후판 강재 용접시편을 다음 Fig. 6과 같이 설계·제작하였다.

실험결과와 신뢰도를 높이기 위해 각 상세 당 3개의 시편을 제작하였다. Fig. 7과 같이 폭 270mm의 판을 용접한 후 이격거리를 두어 절단하였다. 이격거리는 절단 시 시편에서 서로 간에 열 영향이 미치지 않도록 하기 위함이다.

두 용접재 A와 B는 서로 다른 방식(각각 GMAW, FCAW)의 용접방식을 가지고 있으므로 각각에 대한 특성을 살펴볼 필요가 있다.

GMAW(gas metal arc welding)는 모재의 흑피 및 녹의 발생 정도와 용접 시 발생하는 용융지, 가스차폐손실 등에 민감하게 반응하므로 강구조물의 현장용접 시 대체적으로 잘

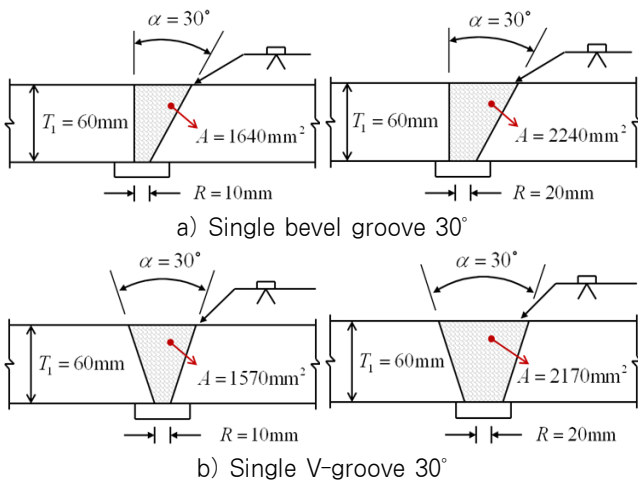


Fig. 4 CJP weld details used in tensile test specimens

Table 15. CJP weld test variables

	Weld Type	Root opening
Weld rod A	Single bevel 30°	10mm, 20mm
	V-groove 30°	10mm, 20mm
Weld rod B	Single bevel 30°	10mm
	V-groove 30°	10mm

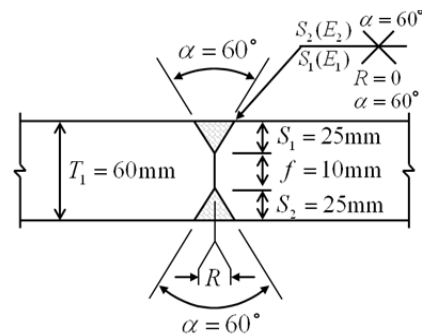


Fig. 5 PJP weld details used in tensile test specimens

Table 16. PJP weld groove type tested

	Weld Type	Root opening
Weld rod A and B	Double V-groove 60°	0 mm

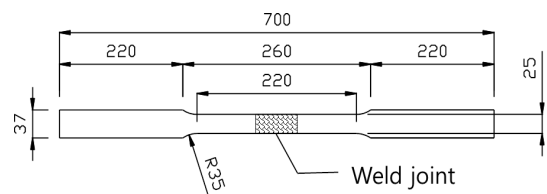


Fig. 6 Dimensions and geometry of tensile test specimen

사용되지 않는 용접법이다. 일반적으로 GMAW는 싱글패스 용접에서 사용된다(AISC Steel Design Guide 21, 2006). 이를 고려하면 용접재 A의 적용은 회의적인 것이었으나 용접재의 오버매칭을 선호하는 일부 기술자들의 의견이 반영된 것이다.

FCAW(flux cored arc welding)는 기존의 GMAW를 보완하여 보다 효율적으로 용접을 실시할 수 있도록 개선한 용접방식이다. 튜브 형태의 용접와이어 내부에 충전된 플럭스를 용접 아크열로 녹인 후 이에 따라 발생한 CO₂가스를 이용한다. CO₂차폐가스는 용접부를 보호하여 안정된 용접을 가능케 한다. 현재 강구조제작공장 등에서 널리 쓰이는 건설분야에서 가장 친숙한 용접법이라 할 수 있다.

실제로, 본 실험의 실험체 제작 담당을 맡은 용접공에 따르면, 용접재 A(GMAW)의 경우 온도관리 및 전원의 전압에 민감하게 반응하여 미세한 차이에 의해 크랙이 쉽게 형성되는 것으로 나타났다. 또한 용접물이 쉽게 퍼지지 않고 냉각속도가 빠른 탓에 비드 형성이 어려워 현장에서 전자세 용접이 쉽지 않을 것으로 우려를 표명하였다. Fig. 8은 시편 채취 전에 용접부 비파괴검사(자동초음파탐상검사)를 실시한 모습으로 용접재 A의 경우 내부 크랙이 검출되어 용접공의 말을 뒷받침하였다. 크랙의 크기가 비파괴검사의 기준치보다 크게 나타난 실험체는 실험에서 제외시켰다.

5. 실험결과 분석 및 고찰

5.1 성능만족기준

Fig. 9와 같은 성능만족기준을 통해 고강도 HSA800 후판 강제 용접부 실험결과를 분석하고 그 성능을 평가한다. 본 실험은 시편의 완전한 인장파단까지 가력하는 파단실험이다. 따라서 파단이전에 최대하중(P_{test})이 모재의 인장강도($F_{u,m}A_{g,BM}$) 이상의 발휘를 만족기준으로 하되 접합부의 연성능력도 반영하여 용접부와 용접재를 평가하였다.

5.2 모재 인장실험결과

모재(HSA800, 60mm)의 재료물성 파악을 위해 실험체 제작에 사용한 강재와 동일한 모재에서 금속재료 인장시험편

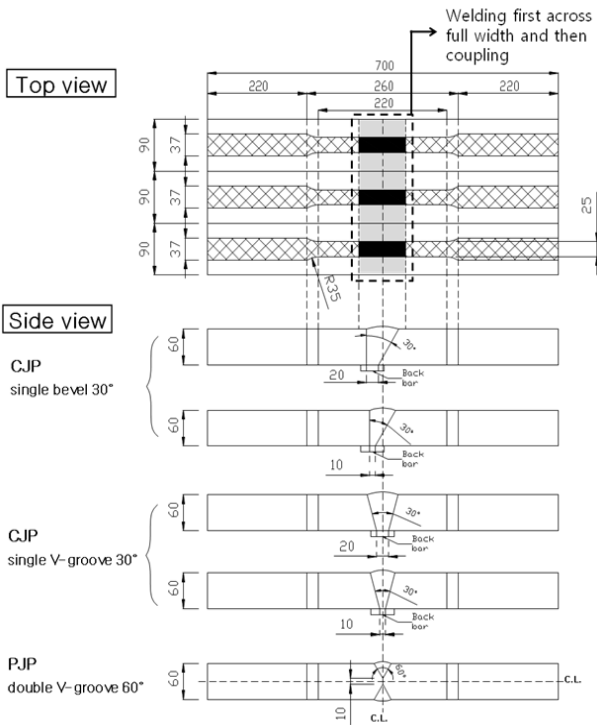


Fig. 7 Fabrication of test specimens (Unit: mm)



Fig. 8 Nondestructive weld examination

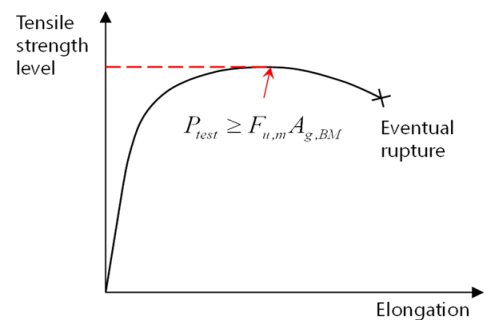


Fig. 9 Acceptance criteria for CJP tension test

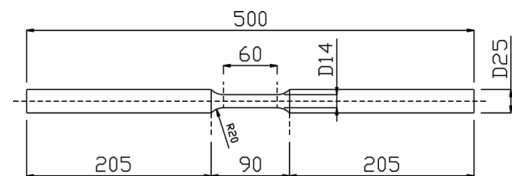


Fig. 10 Geometry of base metal tensile test specimen (No.4 rod specimen)

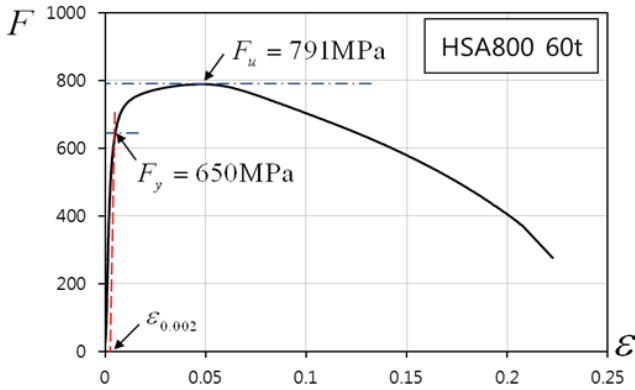


Fig. 11 Results of base metal tension test

Table 17. Measured base metal tensile properties

	Elastic modulus E (MPa)	Yield strength F_y (MPa)	Tensile strength F_u (MPa)	Yield ratio YR	Yield strain ϵ_y (%)
HSA800 (60mm)	199,953	650	791	0.822	0.372

규정(KS B 0802:2003, 2008)^[6]에 따라 Fig. 10과 같이 4호 봉형 시편을 제작하였다. 시편의 변형률은 신율계를 통해 구하였으며 신뢰도를 높이기 위해 3개의 시편을 테스트하였다. 실험결과 인장강도 값은 공칭인장강도 800MPa를 조금 하회하였다(Fig. 11, Table. 17). 이는 후판일수록 압연공정이 적어 강도가 낮게 나타났기 때문으로 보인다.

5.3 용접 인장시편 실험결과

5.3.1 용접재 A의 CJP 실험결과

Fig. 12와 Fig. 13은 용접재 A 시편의 인장실험결과이다. 그림에서 보듯이 모재와 용접재가 만나는 경계면에서 파단이 일어났음을 알 수 있다. 용접재의 모재용착이 쉽지 않았기 때문으로 판단된다.

Fig. 14에 도시한 P_u 와 P_y 는 모재의 소재인장실험을 통해 구해진 인장강도(F_u , 791MPa)와 항복강도(F_y , 650MPa)를 단면적과 곱하여 구한 값이다(식 (3)). 용접재 A로 용접한 모든 실험체의 강도는 모재의 인장강도 791MPa를 만족하는 것으로 나타났다(Fig. 14).

$$P_u = F_u A = 791\text{MPa} \times 1500\text{mm}^2 = 1187\text{kN} \quad (3a)$$

$$P_y = F_y A = 650\text{MPa} \times 1500\text{mm}^2 = 975\text{kN} \quad (3b)$$

루트간격 10mm와 20mm가 비슷한 연성능력을 보였으나,

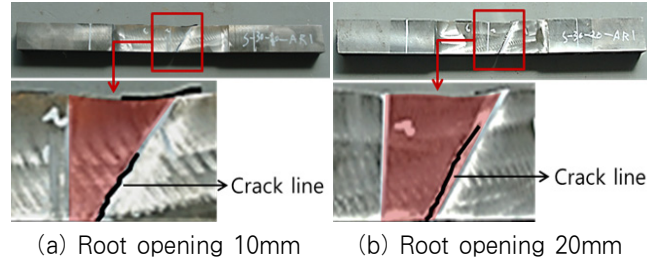


Fig. 12 Failure of CJP weld specimens made by using weld rod A - Single bevel 30°

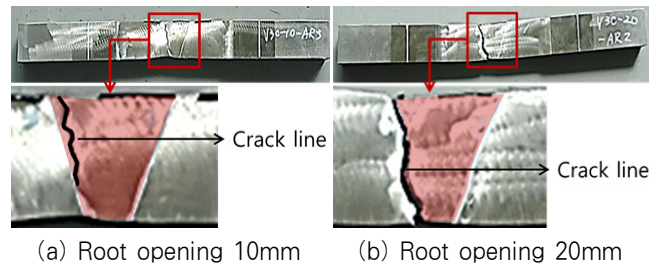
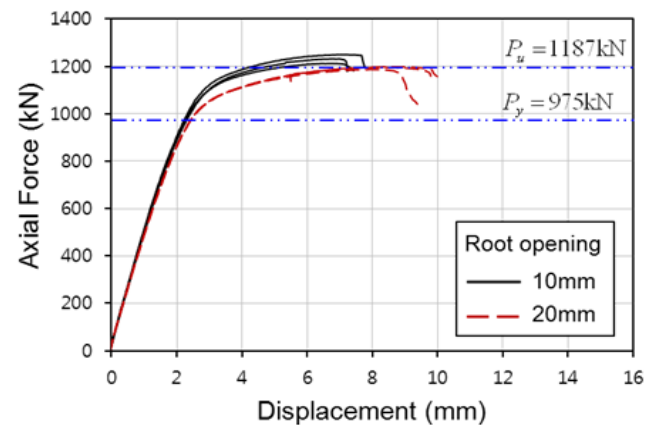
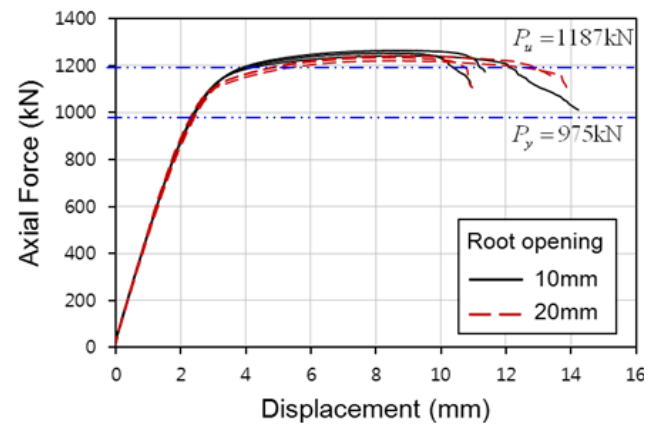


Fig. 13 Failure of CJP weld specimens made by using weld rod A - V-groove 30°



(a) Single bevel 30°



(b) V-groove 30°

Fig. 14 Effect of root opening distance on strength and deformability of CJP weld specimens

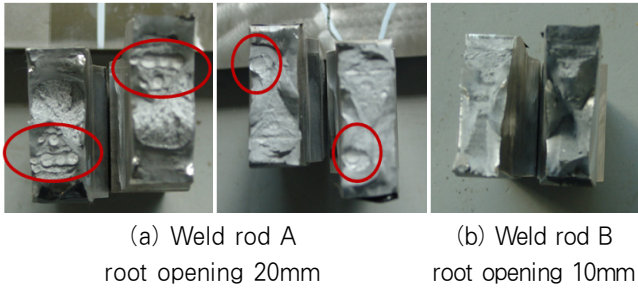


Fig. 15 Comparison of fractured surfaces: V-groove 30°

강도측면에서 20mm가 10mm보다 약간 하회하였다. 또한 루트간격 20mm인 경우는 비파괴검사를 수행하여 크랙 유무를 확인했음에도 불구하고 Fig. 14에서 보듯이 단면 내에 좀처럼 보기 힘든 분화구형의 파단면이 생성되어 있음을 확인하였다. GMAW 방식인 용접재 A로 용접했을 때 용접비드가 형성되기 어려웠기 때문인 것으로 사료된다. 실험결과에서 모재의 인장강도 레벨까지 만족을 하였지만, 용접부 내의 크랙은 용접의 취성과파단으로 이어질 가능성이 높으므로^[3] 규정치를 벗어난 루트 간격 20mm는 회피하는 것이 바람직하다.

5.3.2 용접재 B의 CJP 실험결과

Fig. 16과 Fig. 17은 루트간격 10mm인 용접재 B 시편 결과와 용접재 A 시편 결과를 비교한 것이다. 용접재 A 시편 결과와 마찬가지로 용접재 B 또한 모재와 시편이 만나는

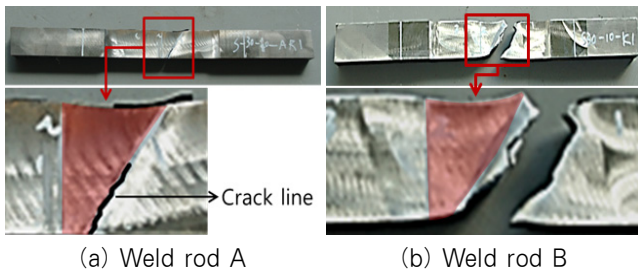


Fig. 16 Comparison of ruptured specimens - CJP Single bevel 30°

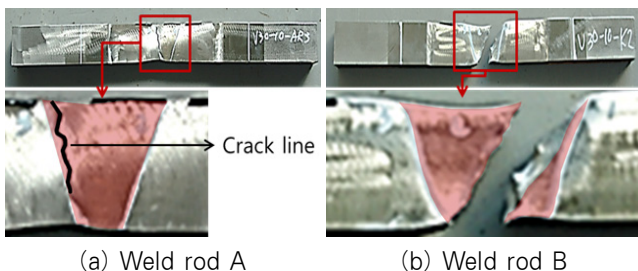
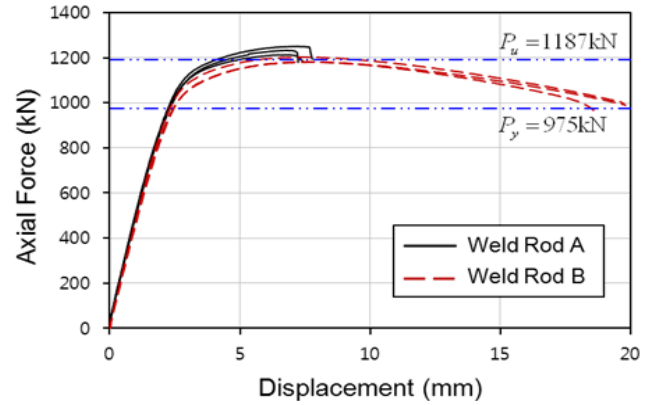
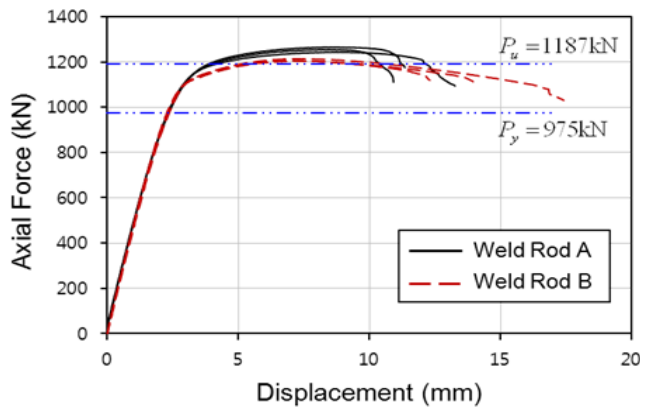


Fig. 17 Comparison of ruptured specimens - CJP V-groove 30°



(a) Single bevel 30°



(b) V-groove 30°

Fig. 18 Effects of weld rod and CJP type on strength and deformability

경계부분에서 파단이 발생하였다. 그러나 용접재 A 시편보다 연성거동의 지표 중 하나인 넥킹(necking)이 좀 더 확연하게 발생하였다.

Single bevel 30°의 용접재 B 시편의 경우 모재 인장강도를 조금 하회하는 것으로 나타났다(Fig. 18). 그러나 용접재 A 시편과 비교하였을 때 강도는 조금 하회(3~5% 하회)하였지만 연성능력이 훨씬 우수한 것으로 나타났다.

5.3.3 PJP 실험결과

PJP 실험의 경우 Fig. 19와 Fig. 20과 같이 용접재 A 시편과 용접재 B 시편의 루트 면(Root face)의 용접 사이즈가 본래 설계와 다르게 제작되어 두 실험결과를 직접 비교할 수는 없지만, 현행기준의 PJP 설계강도와 비교를 통해 두 용접봉의 성능을 평가할 수 있다.

1) 용접재 A의 PJP 실험결과

Fig. 19는 용접재 A의 PJP 실험 결과이다. 현행 설계기준은 PJP 강도를 보수적으로 하기 위해 용접봉의 전단강도(0.6F_{EXX})로 하고 있으나(식 (4)), 실험결과를 보면 알 수

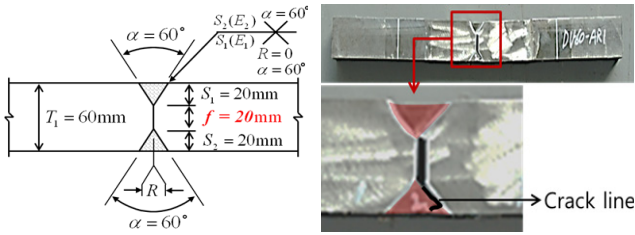


Fig. 19 PJP weld details and fractured specimen - weld rod A and double V-groove 60° used

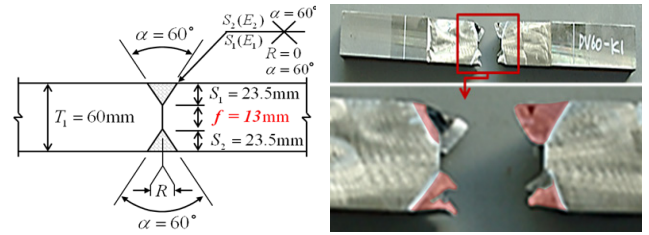


Fig. 21 PJP weld details and fractured specimen - weld rod B and double V-groove 60° used

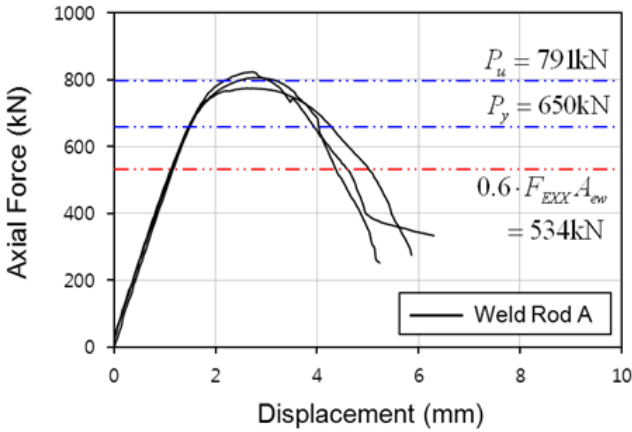


Fig. 20 Measured axial force-axial deformation relationship of PJP weld specimens - weld rod A and double V-groove 60° used

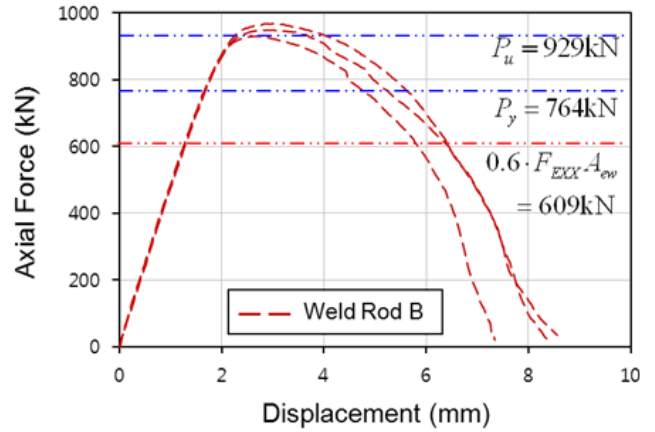


Fig. 22 Measured axial force-axial deformation relationship of PJP weld specimens - weld rod B and double V-groove 60° used

있듯이 모재의 인장강도(F_u)까지도 발휘하는 것으로 나타났다(식 (5), Fig. 20).

$$0.6F_{EXX}A_{ew} = 0.6 \times 890\text{MPa} \times 1000\text{mm}^2 = 534\text{kN} \quad (4)$$

$$P_u = F_u A_{ew} = 791\text{MPa} \times 1000\text{mm}^2 = 791\text{kN} \quad (5a)$$

$$P_y = F_y A_{ew} = 650\text{MPa} \times 1000\text{mm}^2 = 650\text{kN} \quad (5b)$$

2) 용접재 B의 PJP 실험결과

Fig. 21은 용접재 B의 PJP 실험결과이다. 용접재 A PJP 실험체의 결과와 마찬가지로 용접부의 전단강도(식 (6))를 훨씬 상회하였으며 모재의 인장강도를 만족하였다(식 (7)). 용접재 A 시편과 용접상세가 달라 직접 비교할 수 없지만 Fig. 22를 보면 용접재 B가 용접재 A보다 연성능력이 더 우수함을 알 수 있다.

$$0.6F_{EXX}A_{ew} = 0.6 \times 864\text{MPa} \times 1175\text{mm}^2 = 609\text{kN} \quad (6)$$

$$P_u = F_u A_{ew} = 791\text{MPa} \times 1175\text{mm}^2 = 929\text{kN} \quad (7a)$$

$$P_y = F_y A_{ew} = 650\text{MPa} \times 1175\text{mm}^2 = 764\text{kN} \quad (7b)$$

6. 요약 및 결론

모재가 고강도화하고 후판화될수록 용접성능의 확보에 세심한 기술적 고려가 요구됨은 잘 알려져 있다. HSA800 60mm 후판재 용접 이음부 성능평가와 관련한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) HSA800 강재는 현행 2010 AISC-LRFD에서 50mm 이상의 후판재 용접 시에 요구되는 CVN 인성 값을 충분히 상회하는 바람직한 물성을 지닌다.
- (2) GMAW-용접재A와 FCAW-용접재B로 제작된 모든 CJP 용접부의 강도는 모재 계측인장강도를 상회하는 만족스런 강도성능을 발휘하였다. 그러나 FCAW-용접재B로 용접한 이음부가 좀더 연성 측면에서 우수하고 안정적인 거동을 보이는 것으로 나타났다.

- (3) 본문에서 논의한 바와 같이 GMAW는 용접 작업성과 효율측면에서 우려되는 점이 많이 내포하고 있다. 따라서 성능면에서 우수하고 용접작업도 훨씬 효율적이고 수월하며 현장 친화적인 그리고 소재의 가용성 측면에서도 유리한 국내산 FCAW-용접재B가 HSA800 강재의 용접재로 타당하다.
- (4) 현행 표준지침을 위배하는 루트간격 20mm인 경우도 강도는 만족하였다. 하지만 용접부의 취성과단 가능성을 최소화하기 위해서는 표준루트간격 10mm를 만족하는 것이 바람직하다.
- (5) PJP의 경우 현행설계기준에서는 보수적으로 용접재의 전단강도를 기반으로 PJP 용접부 강도를 산정하고 있으나, 본 실험에서 보듯이 직접 인장응력에 대해 거의 인장강도까지 발현하는 것으로 나타나 매우 보수적임을 알 수 있다.

감사의 글

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

참고 문헌(References)

- [1] AISC (2010) *Specification for Structural Steel Buildings*, American Institute of Steel Construction, Chicago, Illinois, USA.
- [2] AWS (2010) *AWS D1.1/D1.1M-2010 Structural Welding Code-steel*, AWS, Miami, FL.
- [3] 한국강구조학회 (2012) *건축강구조 표준접합상세 지침*, 한국강구조학회.
KSSC (2012) *Guidelines of Standard Connection Details in Steel Structures*, Korean Society of Steel Construction, KSSC (in Korean).
- [4] AISC (2010) *Steel Design Guide 21/ Welded Connections-A Primer for Engineers*, American Institute of Steel Construction, Inc., Chicago, Illinois, USA.
- [5] KS (2001), KS B 0833, *강의 맞대기 용접이음 - 인장 시험 방법*.
KS (2001), KS B 0833, *Fusion-welded butt joints in steel-Transverse tensile test*.
- [6] KS (2008) KS B 0802:2003, *금속 재료 인장 시험 방법*
KS (2008) KS B 0802:2003, *Method of tensile test of metallic materials*.

요 약: 본 연구에서는 HSA800 후판 강재에 적합한 용접재를 선정하고자 표준인장실험을 수행하였다. 본 연구 수행 당시 HSA800 강재에 적용가능한 용접재로 GMAW 용접재(외국산)와 FCAW 용접재(국내산) 두 가지가 추천되어 이들을 사용하였다. 맞댐용접상세와 루트간격을 주요 실험변수로하여 표준인장실험을 통해 용접부의 성능을 평가하였다. 강도에 대한 설계요구조건은 두 용접재 모두 만족하였으나 연성능력 측면에서 GMAW 용접재 보다는 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. 또한 현행 용접기준의 표준루트 간격을 벗어날 경우 용착의 어려움으로 비정상 파단면이 형성되고 접합성능도 저하됨이 확인되었다. 부분용입용접 접합부의 실험결과에 의할 때 현행 AISC 기준의 부분용입용접부 강도규정은 매우 보수적임이 확인되었다.

핵심 용어: 고강도강, 후판, 용접성능, 표준인장실험, 가스메탈아크용접, 플렉스코어아크용접