

HSA800 강재의 SAW 용접성 및 이음성능 연구

최영한¹ · 김상섭^{2*}

¹석사과정, 한국기술교육대학교, 건축공학과, ²교수, 한국기술교육대학교, 디자인·건축공학부

A Study for the Weldability and Welded Joint Performance on the SAW of HSA800 Steel

Choi, Young Han¹, Kim, Sang Seup^{2*}

¹Master Course, Department of Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

²Professor, School of Design & Architectural Engineering, KOREATECH, Cheonan, 31253, Korea

Abstract - In this research, 9 SAW welding specimens with 1 hour post-heat treatment (PH1) and 2 hours (PH2) were experimented to confirm the weldability and the joint performance of 60mm thickness HSA800 steel. SAW tests with PH1 & PH2, including weld impact test, bend test, hardness test, macroscopic test, and microscopic test, had a good test results. However, from the chemical composition test results, P composition was not satisfied with Korean Industrial Standards(KS). According to the weld-zone tensile tests, 2 hours post-heat SAW is recommended because the mechanical characteristics of SAW PH2 were better than those of SAW PH1.

Keywords - HSA800, TMCP, SAW, Weldability, Welded joint performance, Post heat treatment, Homogeneity

1. 서론

건축물의 초고층화, 장경간화에 따라 높은 안전성과 내구성이 요구되고 있으며, 초고층 건축물의 경우 건물높이에 따른 자중의 증가뿐만 아니라 지진하중, 풍하중의 증가에 대해 고려해야한다. 이러한 하중의 증가에 따라 부재의 크기가 대형화·극후화되고 있다^[1]. 강재의 극후화는 설계시 항복강도의 저감, 두께에 따른 강도의 균질성 등에 대한 품질관리를 필요로 하게 되며, 용접량 증가에 따른 시공성 저하를 초래한다. 극후판의 일반강재 대신 고강도 강재를 적용할 경우 부재두께를 감소시켜 시공성을 향상시킬 수 있으므로 초고층 건축물의 설계시 고강도 강재를 적용하는 것이 유리하다.

또한 건축구조용 강재는 일반구조용 강재보다 엄격한 기준을 요구하고 있으며, 일반강재에 요구되는 기준 외에도 용접성, 항복강도 및 인장강도의 상한치, 항복비, 두께방향 성능 등이 추가로 요구되는 강재이다^[2]. 따라서 안전성과 시공성을 확보한 초고층 건축물의 건설을 위해서는 고강도·고성능 건축구조용 강재의 적용이 필요한 추세이다^[3].

이에 따라 TMCP로 압연된 인장강도 800N/mm²급 강재인 HSA800 강재가 개발되어 사용되고 있으며, 한국산업표준(이하 KS)에서는 KS D 5994 「건축구조용 고성능 압연강재」^[4]에 따라 HSA800 강재의 규격을 정하고 있다.

일반적으로 강재의 용접성은 원활한 용접작업성과 용접 후 용접부에서의 강도발현 여부를 판단하는 강재성능을 의미한다. 용접성은 강재의 성능뿐만 아니라 용접재료나 용접 조건에 따라 좌우되므로 적합한 용접재료 및 용접조건으로 작업하는 것이 중요하다^[1].

또한 용접부의 안전성은 주요 하중전달 부재 및 구조시스템 간의 접합부에서 중요한 문제이며^[5], 고강도·후판 강재 일수록 용접성능을 확보하는데 있어 용접재 설계, 용접사의 기 능도, 용접조건 등을 고려하여 종합적으로 검토하여야 한다.

Note.-Discussion open until August 31, 2017. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on July 17, 2016; revised October 24, 2016; approved on October 24, 2016.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-41-560-1330 Fax. +82-41-560-1224

E-mail. kimss@koreatech.ac.kr

HSA800 강재의 GMAW(외국 용접재), FACW(국내 ‘P’사, ‘K’사의 용접재)에 대해 용착금속 인장시험, 맞대기 용접이음 인장시험, 용접부 충격시험, 맞대기 용접이음 굽힘시험을 실시하여 용접특성을 확인한 연구^[1]가 있다. 따라서 본 연구에서는 HSA800 60mm 강재를 SAW 방식으로 용접하고 9종의 시험을 실시하여 HSA800 강재의 SAW 용접성 및 이음성능에 대해 연구하고자 한다.

2. 용접성 및 이음성능 공시체 계획

HSA800 60mm강재의 용접성 및 이음성능을 확인하기 위해 플럭스 내에서 잠함용접하는 서브머지드 아크용접(SAW)을 활용하여 공시체를 제작하였다.

공시체는 350×600×60의 강재를 30°베벨형(V) 개선하여 용접선이 압연직각방향으로 길이가 600mm가 되도록 그루브용접하였으며, 루트간격은 그루브용접의 최대 루트간격인 10mm로 하였다(Fig. 1).

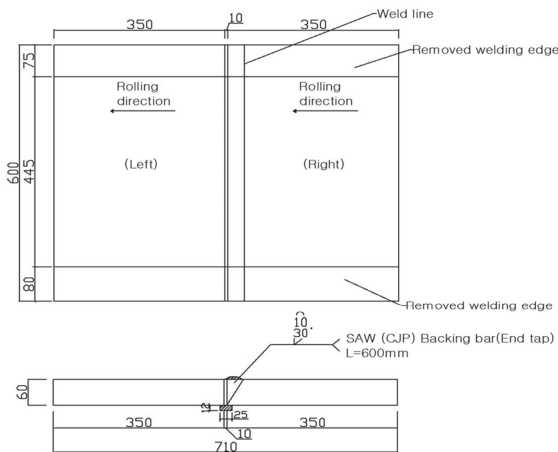


Fig. 1. Specimen W2 of SAW

Table 1. Specimens of SAW

Specimen	Welding process	Welding type	Specimen size L×C×T (mm)
W2	SAW PH1	CJP groove welding (Bevel 30°)	710×600×60
	SAW PH2		

Note1 Specimen size indication-L: rolling direction,

C: rolling orthogonal direction, T: thickness

Note2 PH1: post heat treatment 1hour

PH2: post heat treatment 2hour

Note3 W2: root opening-10mm

또한 서브머지드 아크용접은 대입열 용접으로 용접부의 용접직후열 관리가 매우 중요하다. 따라서 직후열 시간에 따른 이음성능을 비교하기 위해 용접직후열 관리를 1시간(PH1)과 2시간(PH2)으로 구분하여 1세트씩 총 2세트의 공시체를 제작하였다. Table 1에 공시체 기호 및 제작사항을 정리하였다.

3. SAW에 적용한 용접재 및 WPS

SAW 용접이음부에는 H사의 Superflux800과 M-4(4.0φ)를 적용하였으며, 이는 HSA800, HSB800 구조물용 초고장력강용 다층용접 적용을 위한 용접재이다. Table 2~3은 용착금속의 기계적 성질 및 화학성분의 일례를 나타낸 것이다^[6]. 현재 국내에는 800N/mm²급 용접재료에 대한 규정이 마련되어 있지 않아 용착금속의 기계적 성질은 HSA800 강재에 대한 KS와 비교하였다.

예열은 60mm 기준으로 150°C이며 초층부근 FCAW 2패스는 φ1.4, 260~320A, 28~36V, 250~350mm/min이고, SAW는 φ4.0, 500~650A, 30~32V, 400~600mm/min으로 용접한다.

W2(SAW) PH1 공시체는 55패스로 평균 전압 32V, 평균 전류 635A, 평균 입열량 2.9kJ/mm, 층간온도 200°C 이하로 관리하여 용접하였다(Table 4).

W2(SAW) PH2 공시체는 55패스로 평균 전압 32V, 평균

Table 2. Mechanical properties of weld metal^[6]

(superflux800×M-4)

Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Charpy absorbed energy (J)			Base metal	Thickness (mm)
			-5°C	-20°C	-40°C		
748	807	22	128	111	91	AH36 buttering	25
-	835	-	114	96	-	HSA800	25

Table 3. Chemical composition of weld metal (%)^[6]

(superflux800×M-4)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Base metal	Thickness (mm)
0.05	0.14	1.60	0.023	0.001	2.52	0.55	0.50	AH36 buttering	25
0.05	0.16	1.86	0.017	0.001	2.04	0.50	0.39	HSA800	25

Table 4. WPS of SAW

Welding process	Specimen	Pass	Average volts (V)	Average current (A)	Average heat input capacity (kJ/mm)
SAW PH1	W2	55	32	635	2.9
SAW PH2	W2	55	32	635	2.8

전류 635A, 평균 입열량 2.8kJ/mm, 층간온도 200°C 이하로 관리하여 용접하였다(Table 4).

4. 용접성 및 이음성능시험 계획 및 방법

SAW의 용접성 및 이음성능을 확인하기 위하여 용접공시체에서 9종의 시험편을 채취하였으며, Table 5와 같이 총 128개의 시험편을 제작하여 9종의 시험을 실시하였다.

4.1 용접부 화학성분시험 계획 및 방법

용접부 화학성분시험은 용착금속의 화학성분 함유가 KS에 적합한지 여부를 확인하고 강도, 인성, 내충격성 등 용착금속의 기계적인 특성 및 성능에 영향을 끼치는 성분의 과다함유 여부를 확인하는 것을 목적으로 한다.

용접부 화학성분시험편은 KS D 1652 「철 및 강의 스파크 방전 원자 방출 분과 분석 방법」에 따라 Fig. 2와 같이 20(L)×20(C)×10(T)의 크기로 용착금속부내에서 강재두께의 1/4 지점이 측정면이 되도록 채취하였으며, SAW PH1 및 PH2 공시체에서 1개씩 총 2개를 제작하였다.

4.2 용착금속부 인장시험 계획 및 방법

용착금속부 인장시험은 용착금속의 인장강도 및 변형능력을 확인하여 소요성능의 발휘여부를 확인하고 모든 성능이 KS에 적합한지 확인하는 것을 목적으로 한다.

용착금속부 인장시험편은 KS B 0821 「용착금속의 인장 및 충격시험」에 따라 KS B 0801 「금속 재료 인장시험편」의 10호 시험편을 참고하여 Fig. 3과 같이 SAW PH1 및 PH2 공시체에서 용접길이 방향으로 3개씩 총 6개의 시험편을 용착금속부내에서 채취하였다. 물림부 지그를 별도 제작하고 양단부를 나사형으로 가공하여 물림부를 교체할 수 있도록 하였다.

Table 5. Test list of SAW

Division	Specimens	Test division	Quantity
SAW PH1	WC-W2-1	Chemical composition test	1
	WMT-W2-1~3	Weld metal tensile test	3
	WPT-W2-1~3	Weld zone plate tensile test	3
	WT-4W2-1~3	Weld zone rod tensile test	3
	WT-2W2-1~3		3
	WC-W2-WM-1~15	Weld zone impact test	15
	WC-W2-BD-1~15		15
	WC-W2-HA-1~15		15
	WB-W2-1~3	Bend test	3
	WH-W2-1	Hardness test	1
	WMA-W2-1	Macroscopic test	1
	WMI-W2-1	Microscopic test	1
	SAW PH2	WC-W2-2	Chemical composition test
WMT-W2-4~6		Weld metal tensile test	3
WPT-W2-4~6		Weld zone plate tensile test	3
WT-4W2-4~6		Weld zone rod tensile test	3
WT-2W2-4~6			3
WC-W2-WM-16~30		Weld zone impact test	15
WC-W2-BD-16~30			15
WC-W2-HA-16~30			15
WB-W2-4~6		Bend test	3
WH-W2-2		Hardness test	1
WMA-W2-2		Macroscopic test	1
WMI-W2-2		Microscopic test	1
Total			128

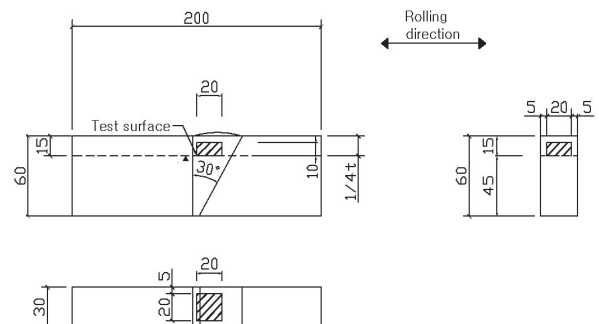


Fig. 2. Chemical composition and microscopic specimen

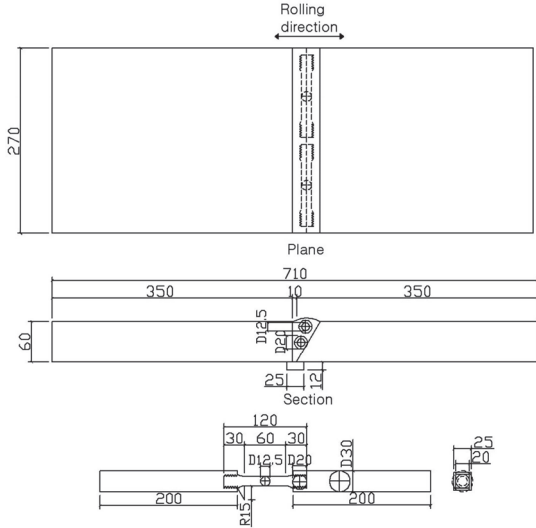


Fig. 3. Weld metal tensile specimen

용착금속부 인장시험은 KS B 0802 「금속 재료 인장시험 방법」에 따라 실시하였다. 시험기는 2000kN급 만능 재료 시험기(Universal Testing Machine: 이하 UTM)를 사용하였으며, 2mm/min의 속도로 변위제어방식을 사용하여 가력을 실시하였다. 또한, 강재용 스트레인게이지를 평행부 중앙에 부착하여 변형도를 확인하였다.

4.3 용접부 인장시험 계획 및 방법

용접부 인장시험은 용접이음부의 인장강도 및 변형능력을 확인하여 소요성능의 발휘여부를 검토하고 파단 시의 파단형태를 확인하여 용접 이음부의 안전성을 검토하는 것을 목적으로 한다.

용접부 인장시험편은 KS B 0801 「금속 재료 인장시험편」에 따라 평판 인장시험편은 14B호 시험편, 봉형 인장시험편은 10호 시험편으로 제작하였다. 14B호 시험편은 Fig. 4와 같이 전두계를 기준으로 SAW PH1 및 PH2 공시체의 용접부에서 압연방향으로 3개씩 총 6개를 채취하였으며, 10호 시험편은 Fig. 5와 같이 강재두께의 1/4지점, 2/4지점에서 각각 3개씩 총 12개를 채취하였다.

용접 이음부의 인장시험은 KS B 0802 「금속 재료 인장시험 방법」에 따라 실시하였으며, 시험기는 2000kN급 UTM을 사용하였다. 시험 전 5% Nital 용액을 인장시험편의 용접부 표면에 도포하여 에칭을 실시함으로써 용접부의 조직을 사전에 파악한 후 2mm/min의 속도로 변위제어방식을 사용하여 가력을 실시하였다. 또한, 강재용 스트레인게이지를

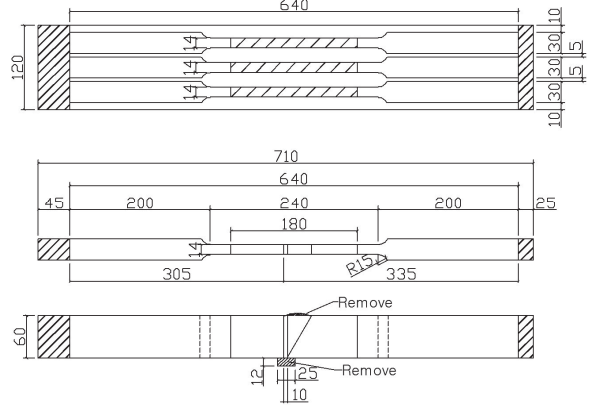


Fig. 4. Weld zone plate tensile specimen

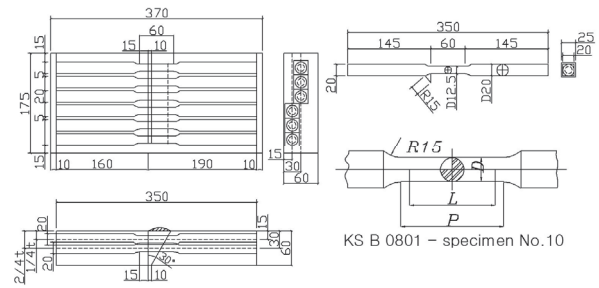


Fig. 5. Weld zone rod tensile specimen

평행부 중앙에 부착하여 변형도를 확인하였다.

4.4 용접부 충격시험 계획 및 방법

용접부 충격시험은 용접부의 샤르피 흡수에너지를 확인하고 저온에서 취성저항성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

용접부 충격시험편은 KS B 0809 「금속 재료 충격시험편」의 V노치 시험편에 따라 채취하였다. 용접부 충격시험편의 채취는 Fig. 6과 같이 용착금속부(Weld metal), 열영향부(Heat affected zone), BOND부(Fusion line) 3가지 부위가 노치의 위치에 있도록 하여 이루어졌으며 노치의 방향은 용접길이 방향으로 향하게 하여 채취하였다. 또한 두께방향을 기준으로 1/4지점에서 열영향부 시험편, 2/4지점에서 용착금속부 시험편, 3/4지점에서 BOND부 시험편을 채취하였다. 온도별 샤르피 흡수에너지의 분포 및 파면율을 확인하기 위해 SAW PH1 및 PH2 용접부의 용착금속부, 열영향부, BOND부를 5개의 온도영역(-60°C, -40°C, -20°C, -5°C, 20°C)에서 각 온도당 3개씩 총 90개의 시험편으로 충격시험을 실시하였다.

시험은 KS B 0810 「금속 재료 충격시험 방법」에 따라 500N·m급 샤르피 충격시험기를 이용하여 실시하였으며,

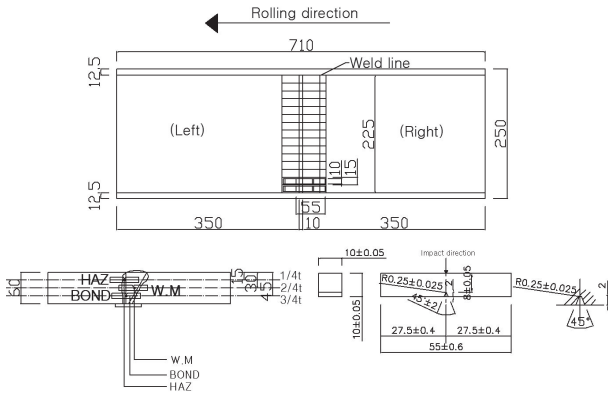


Fig. 6. Weld zone impact specimen

충격시험편의 냉각은 메탄올(99%)과 드라이아이스를 이용하였으며 각 온도별로 10분 이상 냉각상태를 유지하였다.

4.5 용접부 굽힘시험 계획 및 방법

용접부 굽힘시험은 굽힘으로 소성변형이 되는 용접부의 표면 혹은 근처에서 발생하는 결함의 존재를 확인하여 용접부의 건전성을 파악하는 것을 목적으로 한다.

용접부 굽힘시험편은 KS B 0832 「금속 재료 용접부의 파괴 시험 - 굽힘시험」를 참고하여 Fig. 7과 같이 용접이음부가 측정면이 되도록 채취하였으며, SAW PH1 및 PH2 공시체에서 3개씩 총 6개의 시험편을 제작하였다.

굽힘시험은 KS B 0832 「금속 재료 용접부의 파괴 시험 - 굽힘시험」에 따라 2000kN급 UTM과 포머를 이용하여 180° 3점 굽힘시험을 하였다. 시험 전 5% Nital 용액을 시험편의 용접부 표면에 도포하여 에칭을 실시함으로써 용접부의 조직을 사진에 파악한 후 변위계로 2mm/min의 속도로 가력 하였다.

4.6 용접부 경도시험 계획 및 방법

용접부 경도시험은 용접부 주위의 경도를 측정함으로써 용접성과 용접부의 건전성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

용접부 경도시험편은 용접단부로부터 50mm 이격된 지점에서 Fig. 8과 같이 115(L)×20(C)×60(T)의 크기로 SAW PH1, PH2 공시체에서 1개씩, 총 2개를 제작하였다.

경도시험은 KS B 0811 「금속 재료의 비커스 경도시험 방법」에 따라 비커스 경도시험기 및 TS-2000 측정 시스템을 활용하였다. 에칭은 고운 Sand Paper로 측정면을 연마한 뒤 5% Nital 용액을 측정면에 도포하였으며, 에칭으로 확인된 조직을 바탕으로 상·하단으로부터 5mm 이격된 선과 두

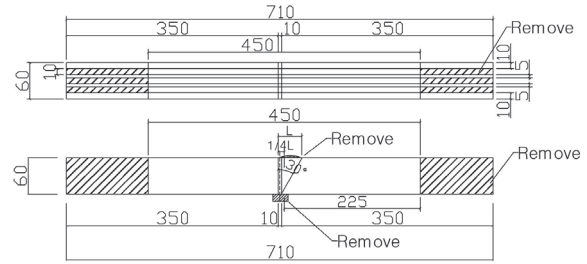


Fig. 7. Bend specimen

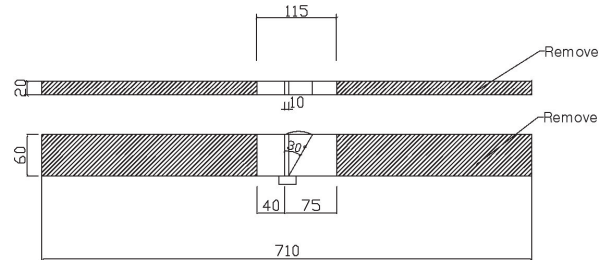


Fig. 8. Hardness and macroscopic specimen

께 1/4선, 2/4선 4개의 선을 측정선으로 하였다. 모재부 및 용착금속부는 1mm 간격, 열영향부는 0.5mm 간격으로 측정하였다. 경도측정은 5kgf의 하중으로 5초간 가력하였다.

4.7 용접부 매크로시험 계획 및 방법

용접부 매크로시험은 용접부 조직을 육안으로 확인하여 조직의 건전성을 평가하는 것을 목적으로 한다.

용접부 매크로시험편은 용접단부로부터 50mm 이격된 지점에서 Fig. 8과 같이 115(L)×20(C)×60(T)의 크기로 SAW PH1 및 PH2 공시체에서 1개씩, 총 2개를 제작하였다.

매크로시험은 KS D 0210 「강의 매크로 조직 시험 방법」에 따라 실시하였으며, 측정면을 고운 Sand Paper로 연마한 뒤 5% Nital 용액을 표면에 40분~1시간 가량 도포하여 부식시켜 조직의 건전성을 확인하였다.

4.8 용접부 마이크로조직시험 계획 및 방법

용접부 마이크로조직시험은 용접부 마이크로조직의 변태 상태를 통해 건전성을 확인하는 것을 목적으로 한다.

용접부 마이크로조직시험편은 20(L)×20(C)×10(T)의 크기로 용접부 화학성분시험편과 동일하게 용착금속부 내에서 각 1개씩, 총 2개를 채취하였다.

시험은 ASTM E407-07 Micro-Structure of Metals & Alloys에 따라 실시되었다. 표면의 부식은 5% 이내의 Nital

용액을 이용하였다. 마이크로조직은 각 시험편을 $\times 100$, $\times 500$ 두 가지 배율로 촬영하였다.

5. 용접성 및 이음성능 시험결과

5.1 용접부 화학성분시험 계획 및 방법

용접부 화학성분시험 결과는 Table 6과 같다. 용착금속의 화학성분 중 C, Si, Mn, S는 HSA800 강재의 KS를 만족하지만, P는 관리기준 보다 약간 높게 나타났다.

5.2 용착금속부 인장시험 결과

용착금속부 인장시험 결과는 Table 7과 같으며, 응력-변형도 곡선은 Fig. 9, 10과 같다. SAW PH1, PH2 용착금속의 항복강도, 인장강도, 연신율은 모재인 HSA800 60mm 강재의 KS를 만족하는 것으로 나타났으나, 항복비는 KS 상한치인 85%보다 높게 나타났다.

Table 6. Chemical composition test result of SAW (unit: %)

Division	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni
PH1	0.06	0.18	1.72	0.018	0.003	0.12	2.26
PH2	0.06	0.19	1.71	0.017	0.003	0.12	2.26
KS* (100mm and below)	0.20 and below	0.55 and below	3.00 and below	0.015 and below	0.006 and below	-	-

※ KS D 5994 High-performance rolled steel for building structure

Table 7. Weld metal tensile test result of SAW

Division	Specimens	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)
SAW PH1	WMT-W2-1	763.7	813.5	22.97	93.9
	WMT-W2-2	773.4	813.8	21.04	95.0
	WMT-W2-3	747.2	833.5	24.60	89.6
	Average	761.4	820.3	22.87	92.9
SAW PH2	WMT-W2-4	739.2	809.8	19.89	91.3
	WMT-W2-5	767.1	793.0	21.27	96.7
	WMT-W2-6	784.9	800.6	22.59	98.0
	Average	763.7	801.1	21.25	95.4
KS ¹⁾ (1/4)		650~770	800~950	16.0 and above	85.0 and below

1) KS D 5994 High-performance rolled steel for building structure

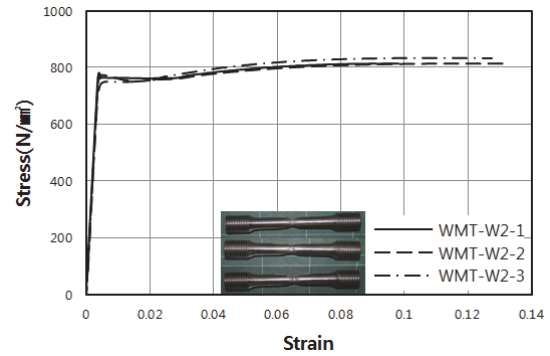


Fig. 9. Stress strain curve of WMT-W2-1~3

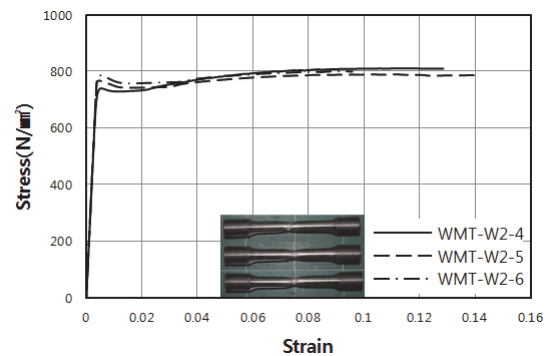


Fig. 10. Stress strain curve of WMT-W2-4~6

5.3 용접부 인장시험 결과

5.3.1 용접부 평판 인장시험 결과

모재인 HSA800 60mm 강재의 인장시험 결과^[7]는 Table 8과 같으며, KS를 만족하는 것으로 나타났다.

용접부 평판 인장시험 결과는 Table 9와 같다. SAW PH1의 인장강도는 793.9N/mm²으로 HSA800 강재의 KS 하한치인 800N/mm²보다 약간 낮게 나타났으며, 응력-변형도 곡선은 Fig. 11, 파단형태는 Fig. 12에 나타내었다.

SAW PH2의 인장강도는 799.5N/mm²으로 KS 하한치인 800N/mm²보다 약간 낮게 나타났으며, 응력-변형도 곡선

Table 8. Tensile test result of HSA800 60mm^[7]

Division	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)	Yield ratio (%)
rolling direction(1/4)	730.3	875.2	19.9	83.5
KS (1/4)	650~770	800~950	16.0 and above	85.0 and below

Table 9. Weld zone plate tensile test result of SAW

Division	Specimens	Breaking mode	Tensile strength (N/mm ²)
SAW PH1	WPT-W2-1	HAZ breaking	792.9
	WPT-W2-2	HAZ breaking	796.1
	WPT-W2-3	HAZ breaking	792.7
	Average	-	793.9
SAW PH2	WPT-W2-4	HAZ breaking	804.4
	WPT-W2-5	HAZ breaking	799.4
	WPT-W2-6	HAZ breaking	794.8
	Average	-	799.5

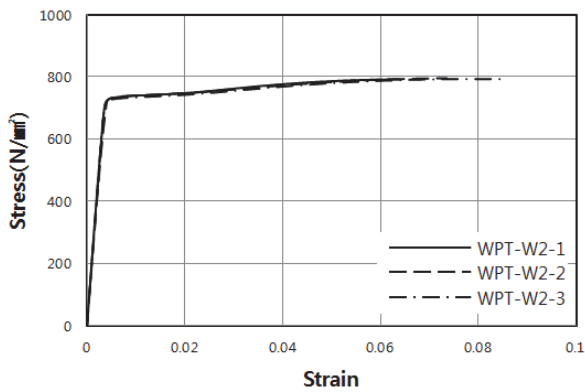


Fig. 11. Stress strain curve of WPT-W2-1~3

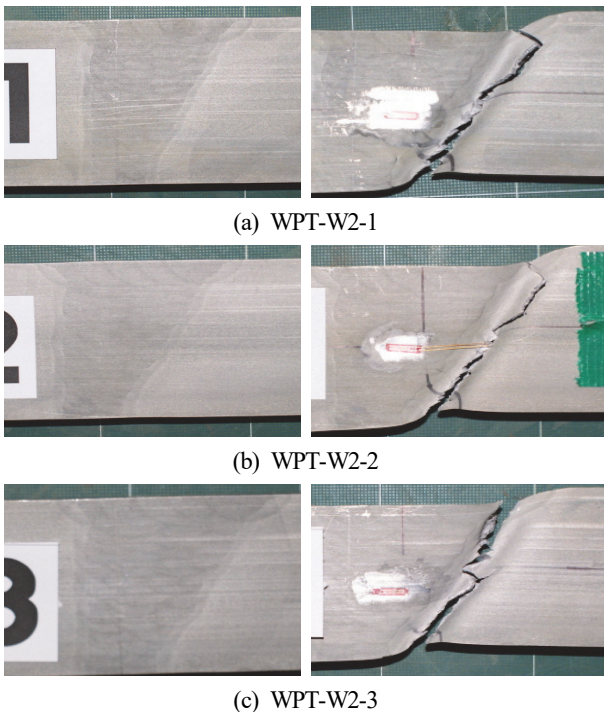


Fig. 12. Breaking mode of WPT-W2-1~3

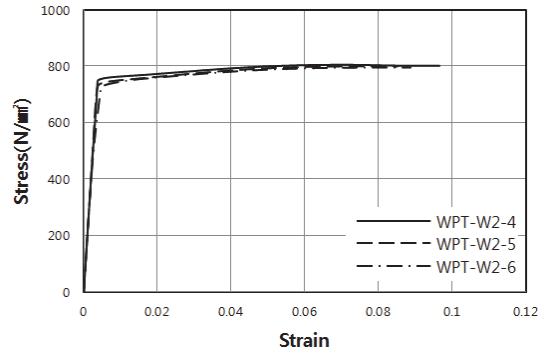


Fig. 13. Stress strain curve of WPT-W2-4-6

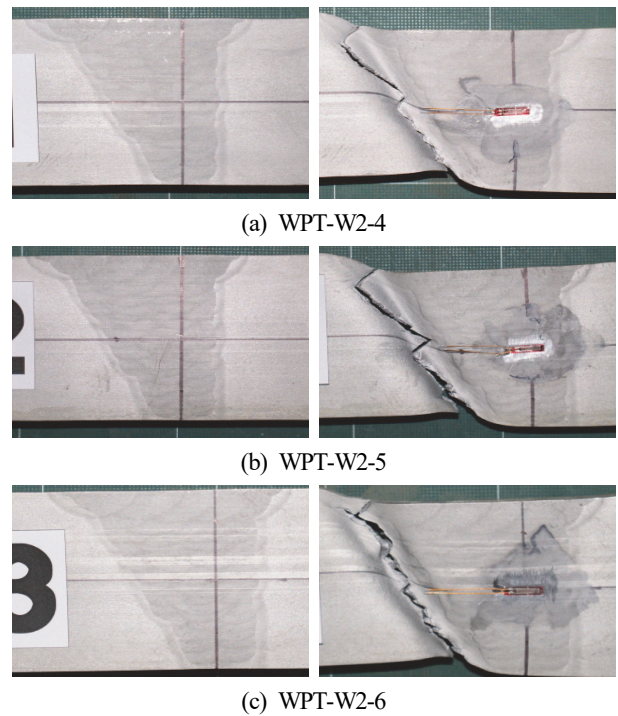


Fig. 14. Breaking mode of WPT-W2-4-6

은 Fig. 13, 파단형태는 Fig. 14에 나타내었다.

용접부 평판 인장시험 결과 SAW PH1 및 PH2 모두 열영향부의 파괴로 넥킹현상이 거의 나타나지 않으며, 다소 취성적인 파단형태를 나타내며 파괴되었다. SAW PH1 및 PH2 용착금속의 인장강도는 820.3N/mm², 801.1N/mm²로 나타나 모재의 인장강도인 875.2N/mm²보다 낮게 나타나 열영향부에서 파단이 일어난 것으로 판단된다. 용접부의 파괴가 용착금속부에서 발생하면 변형능력 크게 떨어지지 않으나 열영향부 또는 본드부에서 발생하면 변형능력이 떨어지기 때문에 용접시 주의하여야 한다.

5.3.2 용접부 봉평 인장시험 결과

용접부 봉형 인장시험 결과는 Table 10과 같다. SAW PH1 두께 1/4지점의 인장강도는 786.4N/mm²으로 HSA 800 강재의 KS 하한치인 800N/mm²보다 낮게 나타나 KS를 만족하지 못한 것으로 나타났으며, 열영향부에서 파단이 일어났다. 응력-변형도 곡선은 Fig. 15에 나타내었다.

SAW PH1 두께 2/4지점의 인장강도는 748.9N/mm²으로 KS 하한치인 800N/mm²보다 낮게 나타났으며, 열영향부에서 파단이 일어났다. 응력-변형도 곡선은 Fig. 16에 나타내었다.

SAW PH2 두께 1/4지점의 인장강도는 803.7N/mm²으로 KS 하한치인 800N/mm² 이상으로 나타났으며, 열영향부에서 파단이 일어났다. 응력-변형도 곡선은 Fig. 17에 나타내었다.

SAW PH2 두께 2/4지점의 인장강도는 755.8N/mm²으로 나타나 KS 하한치인 800N/mm²보다 낮게 나타났으며, 열영향부에서 파단이 일어났다. 응력-변형도 곡선은 Fig.18에 나타내었다.

SAW PH2의 경우, 1/4지점의 인장강도가 KS를 만족하고, 2/4지점의 인장강도가 1/4지점 인장강도의 85% 이상으로 나타나 강재의 균질성에 대한 기준^[7]을 만족하는 것으로 나타났다.

Table 10. Weld zone rod tensile test result of SAW

Division	Specimens	Breaking mode	Tensile strength (N/mm ²)	
SAW PH1	1/4	WT-4W2-1	HAZ breaking	795.4
		WT-4W2-2	HAZ breaking	769.0
		WT-4W2-3	HAZ breaking	794.8
		Average	-	786.4
	2/4	WT-2W2-1	HAZ breaking	747.9
		WT-2W2-2	HAZ breaking	747.4
		WT-2W2-3	HAZ breaking	751.4
		Average	-	748.9
(WT-2W2) / (WT-4W2)			95.23%	
SAW PH2	1/4	WT-4W2-4	HAZ breaking	806.7
		WT-4W2-5	HAZ breaking	801.2
		WT-4W2-6	HAZ breaking	803.2
		Average	-	803.7
	2/4	WT-2W2-4	HAZ breaking	752.0
		WT-2W2-5	HAZ breaking	757.5
		WT-2W2-6	HAZ breaking	757.9
		Average	-	755.8
(WT-2W2) / (WT-4W2)			94.04%	

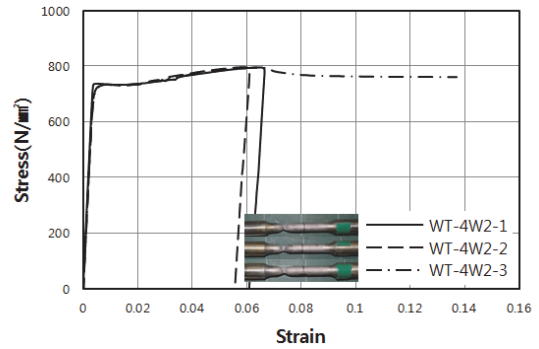


Fig. 15. Stress strain curve of WT-4W2-1~3

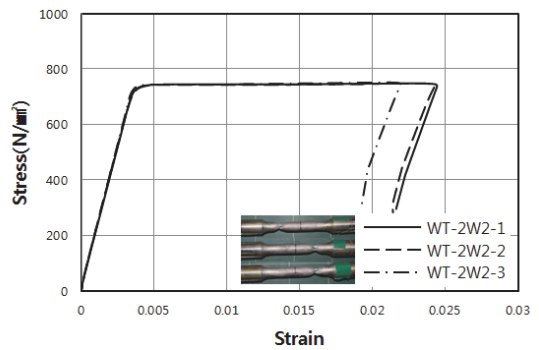


Fig. 16. Stress strain curve of WT-2W2-1~3

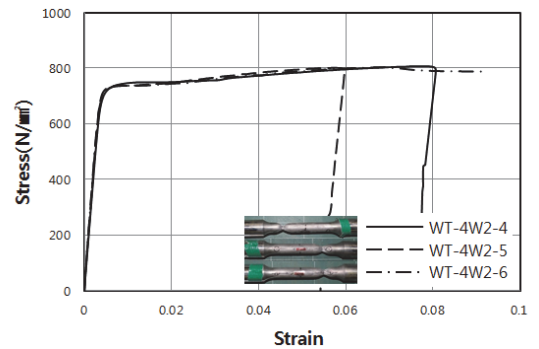


Fig. 17. Stress strain curve of WT-4W2-4~6

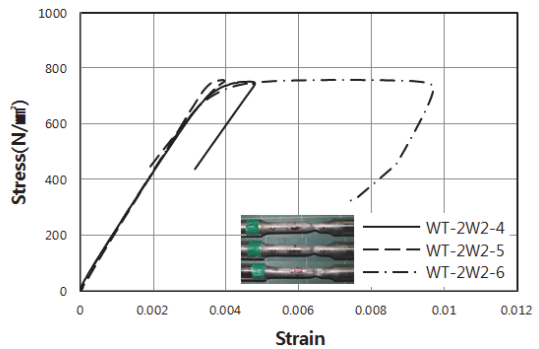


Fig. 18. Stress strain curve of WT-2W2-4~6

용접부 평판 및 봉형 인장시험 결과, SAW PH1에 비하여 PH2의 인장강도가 양호하게 나타났다. 따라서 SAW의 경우 직후열처리하는 1시간보다 2시간을 권장한다.

5.4 용접부 충격시험 결과

용접부 충격시험 결과는 Table 11과 같으며, Fig. 19는 샤르피 흡수에너지와 취성과면율의 천이온도 곡선을 나타낸다.

SAW PH1 및 PH2의 -5°C에서 샤르피 흡수에너지는 모두 47J 이상으로 KS를 만족하는 것으로 나타났으며, 모든 온도영역에서 샤르피 흡수에너지가 47J 이상으로 나타나 인성이 양호한 것으로 판단된다.

또한, 천이온도는 샤르피 흡수에너지 곡선과 취성과면율 곡선이 만나는 점의 온도이며 낮게 나타날수록 저온에서의 취성저항성이 좋다. 따라서 SAW PH1 및 PH2의 경우 저온에서의 취성저항성이 좋은 것으로 판단된다.

5.5 용접부 굽힘시험 결과

용접부 굽힘시험 결과는 Table 12와 같다. 용접부 굽힘시험 전 모든 시험편을 에칭한 후 용접이음부의 조직을 육안으로 확인한 결과, 용접이음부에 불건전한 조직이나 균열은 발견되지 않았다.

SAW PH1의 굽힘시험 결과(Fig. 20) 굽힘시험편 모두 터짐이나 균열이 발생하지 않아 건전한 용접부로 판단된다.

SAW PH2의 굽힘시험 결과(Fig. 21) 1개의 시험편에서

용접부의 터짐이 발생하였으나, 균열의 크기가 2mm 이하의 미세균열로써 용접부의 성능에는 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다. 따라서 건전한 용접부로 판단된다.

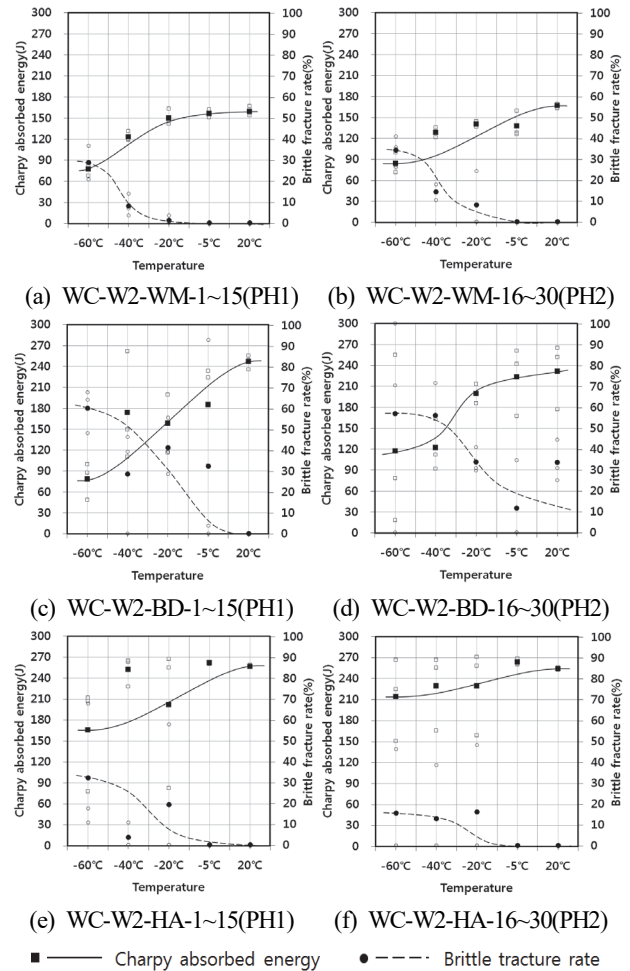


Fig. 19. Transition temperature curve of SAW

Table 11. Weld zone impact test result of SAW (Average of 3 specimens, Unit: J (%))

Division	Specimens	Test result				
		-60°C	-40°C	-20°C	-5°C	20°C
SAW PH1	WC-W2-WM	76.9 (28.6)	122.9 (8.0)	149.6 (1.1)	155.7 (0)	158.8 (0)
	WC-W2-BD	78.2 (60.1)	173.4 (28.6)	157.7 (41.1)	184.6 (32.2)	246.3 (0)
	WC-W2-HA	165.1 (32.0)	251.9 (3.6)	201.2 (19.2)	261.4 (0)	256.2 (0)
SAW PH2	WC-W2-WM	83.8 (34.1)	128.1 (14.1)	140.0 (8.0)	137.3 (0)	166.7 (0)
	WC-W2-BD	116.7 (56.8)	121.8 (55.9)	198.7 (33.7)	223.0 (11.5)	230.9 (33.4)
	WC-W2-HA	213.5 (15.4)	228.9 (12.8)	228.9 (16.0)	262.8 (0)	253.2 (0)

Note Test result is Charpy absorbed energy and () is Brittle fracture rate

Table 12. Bend test result of SAW

Divison	Specimens	Bend test	Test result	Note
SAW PH1	WB-W2-1	Transverse side bend test	O.K	No crack
	WB-W2-2	Transverse side bend test	O.K	No crack
	WB-W2-3	Transverse side bend test	O.K	No crack
SAW PH2	WB-W2-4	Transverse side bend test	O.K	No crack
	WB-W2-5	Transverse side bend test	O.K	Cracked it
	WB-W2-6	Transverse side bend test	O.K	No crack

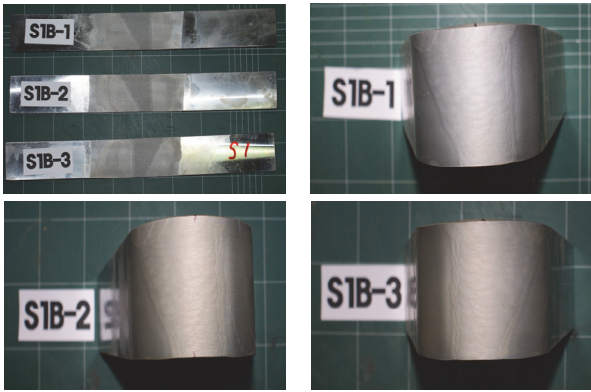


Fig. 20. Bend test of SAW PH1

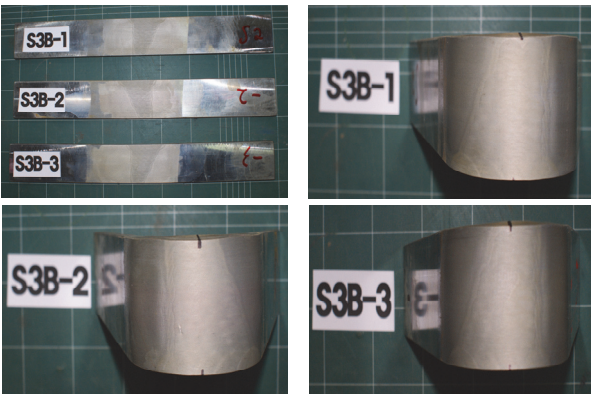


Fig. 21. Bend test of SAW PH2

5.6 용접부 경도시험 결과

용접부 경도시험 결과는 Table 13과 같으며, Fig. 22는 SAW PH1 공시체의 경도분포를 나타내고, Fig. 23은 SAW PH2 공시체의 경도분포를 나타낸다.

경도분포가 전체적으로 350Hv를 넘지 않아 용접부는 취성적인 경향을 보이지 않는 양호한 용접부로 판단된다.

Table 13. Hardness test result of SAW

Division	Specimens	Measuring line	Hardness (Hv)	
			Max	Min
SAW PH1	WH-W2-1	5mm from top	314.58	199.41
		1/4 (15mm)	306.22	180.74
		2/4 (30mm)	280.65	181.99
		5mm from bottom	333.39	181.99
SAW PH2	WH-W2-2	5mm from top	304.41	197.51
		1/4 (15mm)	326.27	197.98
		2/4 (30mm)	340.70	205.27
		5mm from bottom	328.28	181.57

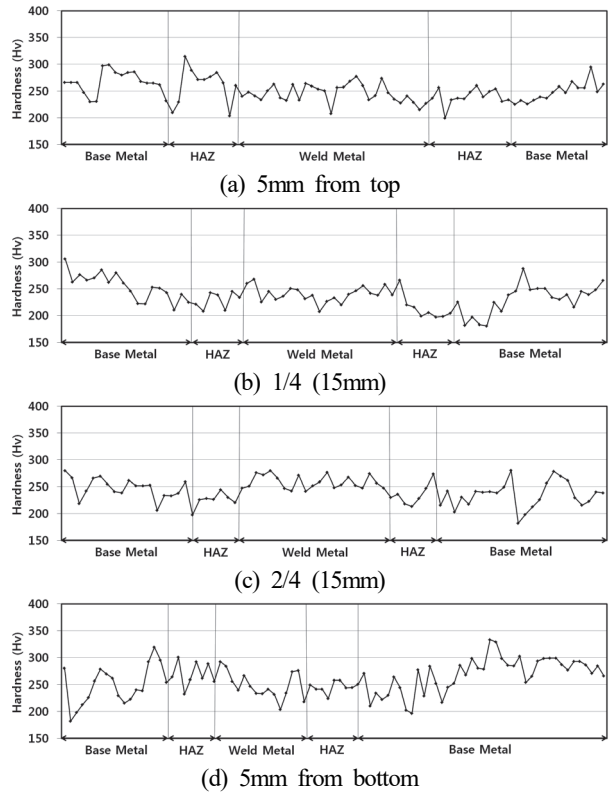


Fig. 22. Hardness of SAW PH1

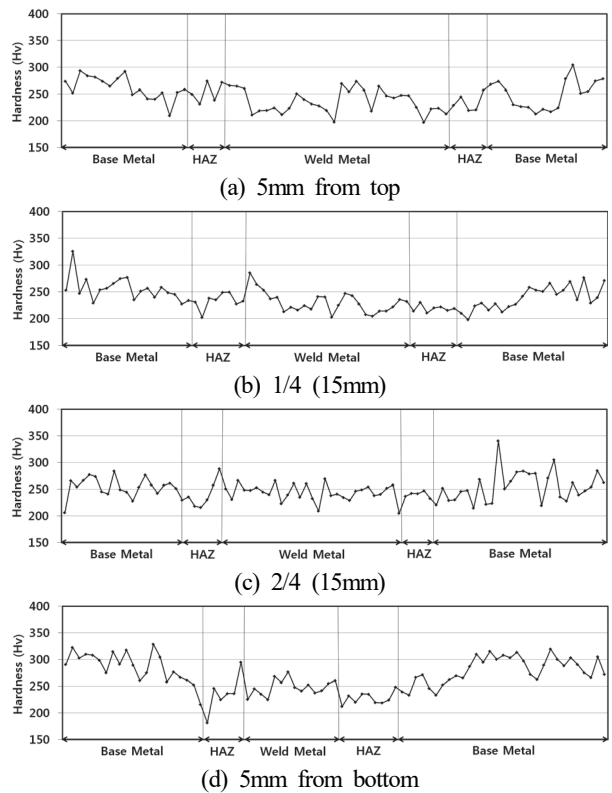


Fig. 23. Hardness of SAW PH2

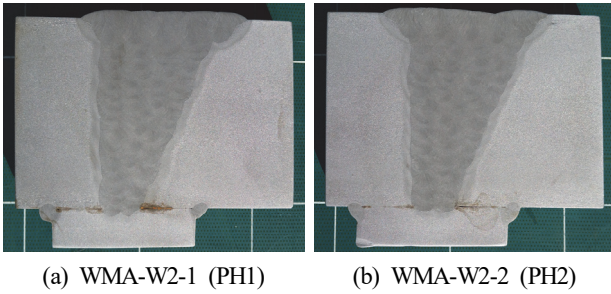


Fig. 24. Macroscopic test of SAW

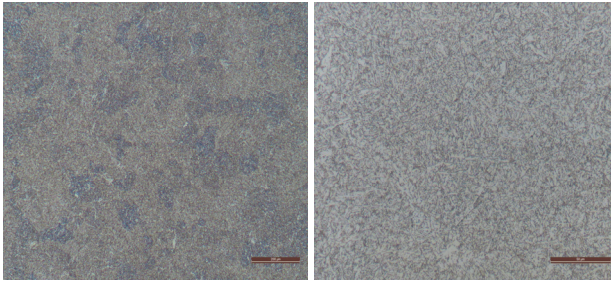


Fig. 25. Microscopic test of SAW PH1

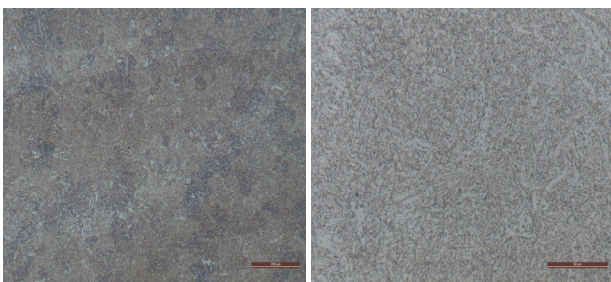


Fig. 26. Microscopic test of SAW PH2

6. 결론

HSA800 60mm 강재의 SAW 용접성 및 이음성능을 확인하기 위하여 9종의 시험을 실시한 결과 다음과 같이 나타났다.

- (1) 용접부 화학성분시험 결과 SAW PH1 및 PH2 용착금속의 화학성분 중 C, Si, Mn, S는 HSA800 강재의 KS를 만족하지만, P는 관리기준 보다 약간 높게 나타났다.
- (2) 용착금속 인장시험 결과 SAW PH1, PH2 용착금속의 항복강도, 인장강도, 연신율은 모재인 HSA800 60mm 강재의 KS를 만족하는 것으로 나타났으나, 항복비는 KS보다 높게 나타났다.
- (3) 용접부 평판 인장시험 결과 SAW PH1 및 PH2의 인장강

5.7 용접부 매크로시험 결과

Fig. 24는 SAW PH1 및 PH2 용접부의 매크로 조직을 나타낸 것이다. 용접부에 대한 매크로조직시험 결과, 두 조직 모두 건전한 것으로 판단된다.

5.8 용착금속부 마이크로조직시험 결과

Fig. 25, 26은 SAW PH1 및 SAW PH2 용착금속부의 마이크로조직을 나타낸 것이다. 용착금속부는 베이나이트 조직과 미세한 페라이트 조직이 잘 발달되어 있어 우수한 강도를 기대해 볼 수 있는 건전한 조직으로 판단된다.

도는 KS 하한치인 $800\text{N}/\text{mm}^2$ 보다 약간 낮게 나타났으며, 열영향부의 파괴로 베키현상이 거의 나타나지 않고 다소 취성적인 파단형태를 나타내며 파괴되었다. 용접부의 파괴가 열영향부 또는 본드부에서 발생하면 변형능력이 떨어지기 때문에 용접시 주의하여야 한다.

- (4) 용접부 봉형 인장시험 결과 SAW PH1의 경우, 1/4지점의 인장강도가 KS를 만족하지 못하였다.

SAW PH2의 경우, 1/4지점의 인장강도가 KS를 만족하고, 2/4지점의 인장강도가 1/4지점 인장강도의 85% 이상으로 나타나 강재의 균질성에 대한 기준^[7]을 만족하는 것으로 나타났다.

- (5) 용접부 평판 및 봉형 인장시험 결과 SAW PH1에 비하여 PH2의 기계적 특성이 양호하게 나타났다. 따라서 SAW의 경우 직후열처리 1시간보다 2시간을 권장한다.
- (6) 용접부 충격시험 결과 SAW PH1 및 PH2의 -5°C 에서 샤르피 흡수에너지는 모두 47J 이상으로 KS를 만족하는 것으로 나타났으며, 모든 온도영역에서 샤르피 흡수에너지가 47J 이상으로 나타나 인성이 양호하며, 저온에서의 취성저항성이 좋은 것으로 판단된다.
- (7) 용접부 굽힘시험, 용접부 경도시험, 용접부 매크로조직시험, 용착금속부 마이크로조직시험 결과 SAW PH1 및 PH2는 모두 양호한 용접부로 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] 김진원, 이승은, 김진호, 이진우, 정홍철(2014) 인장강도 800MPa급 저항복비 고강도 강재 용접부 성능평가, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.17-22.

- Kim, J.-W., Lee, S.-E., Kim, J.-H., Lee, J.-W., and Jeong, H.-C. (2014) Welded Joint Test of the Tensile Strength of 800MPa Grade High Strength Steel with Low Yield Ratio, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.17-22 (in Korean).
- [2] 김도환, 이승은, 정경수, 김진호(2013) 건축구조용 고성능 강재 HSA800의 초고층 적용성 평가, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제25권, 제3호, pp.47-52.
- Kim, D.-H., Lee, S.-E., Chung, K.-S., and Kim, J.-H. (2013) Super-Tall Building Applications of HSA800, the High-Performance Steel for Building Structures, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.25, No.3, pp.47-52 (in Korean).
- [3] 최인락, 정경수, 김도환, 김진호(2014) HSA800 강재 현장 적용사례, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제26권, 제3호, pp.33-39.
- Choi, I.-R., Chung, K.-S., Kim, D.-H., and Kim, J.-H. (2014) Field Application of High-Strength Steel HSA800, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.33-39 (in Korean).
- [4] 국가기술표준원(2011) 건축구조용 고성능 압연강재(KS D 5994: 2011). Korean Agency for Technology and Standards (2011) *High-Performance Rolled Steel for Building Structures* (KS D 5994: 2011), Korea (in Korean).
- [5] 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).
- [6] 현대중합금속(2014) 용접재료, 현대중합금속. Hyundai Welding (2014) *Welding Consumables*, Hyundai Welding, Korea (in Korean).
- [7] 김종락, 이은택, 최영한, 김상섭(2016) HSA800 강재의 소재특성 및 강도의 균질성에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제28권, 제3호, pp.173-183.
- Kim, J.R., Lee, E.T., Choi, Y.H., and Kim, S.S. (2016) A Study on the Material Characteristics of the HSA800 Steel and Homogeneity of Strength, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.28, No.3, pp.173-183 (in Korean).

요 약 : 본 연구에서는 HSA800 60mm 강재의 SAW 용접성 및 이음성능을 확인하기 위해 후열처리 1시간과 2시간에 대한 SAW 공시체를 제작하여 9종의 시험을 실시하였다. 용접부 충격시험, 굽힘시험, 경도시험, 매크로조직시험, 마이크로조직시험 결과 SAW PH1 및 PH2는 양호한 용접부로 나타났으나, 화학성분시험 결과 P성분이 KS를 만족하지 못하였다. 용접부 평판 및 봉형 인장시험결과 SAW PH1에 비하여 PH2의 기계적 특성이 양호하게 나타났기 때문에 SAW의 경우 후열처리는 2시간을 권장한다.

핵심용어 : 모HSA800, TMCP, SAW, 용접성, 용접이음성능, 직후열처리, 균질성
