

HSB600강 GMA 용접부에서 입열량과 용접후 열처리가 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향

고진현¹, 김남훈¹, 장복수¹, 주동휘¹, 임영민^{1*}
¹한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부

The effect of Heat input and PWHT on the microstructure and mechanical properties of HSB600 steel weldments

Jin-Hyun Koh¹, Nam-Hoon Kim¹, Bok-Su Jang¹, Dong-Hwi Ju¹
and Young-Min Lim^{1*}

¹School of Energy·Materials·Chemical, Korea University of Technology and Education

요 약 본 연구에서는 교량용 구조용 강재인 HSB600 강의 용접부에서 입열량 (1.5~3.6 kJ/mm)과 용접후 열처리 (PWHT, 600℃, 40hr.)가 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향에 관해 연구하였다. HSB600 강재를 GMA용접을 실시하였다. 용접된 상태에서는 인장강도와 경도는 입열량이 증가할수록 저하되었으며 충격 흡수 에너지는 큰 차이를 보이지 않았다. 낮은 입열량인 1.5 kJ/mm에서 침상형 페라이트가 가장 많이 생성되었다. 용접후 열처리를 통해 경도와 인장강도가 저하되었고, 용착금속의 충격흡수에너지가 증가되었다.

Abstract The effects of heat input (1.5~3.6 kJ/mm) and post weld heat treatment (PWHT, 600℃, 40hr.) on the TMCP HSB600 steel weldments made by GMAW process were investigated. The tensile strengths and hardness of as-welded specimens were decreased as heat input increased, but CVN (Charpy V-Notch) impact energy did not show any differences. The fine-grained acicular ferrite was mainly formed in the low heat input while polygonal and side plate ferrites were dominated in the high heat inputs. Meanwhile, tensile strength and hardness of PWHT weldments were decreased due to the coarsening and globular of microstructure as well as reduction of residual stresses.

Key Words : HSB600 steel, GMA Welding, Welding process, Weldability, Mechanical property

1. 서론

국내 교량이 장대화, 대형화 되고 있는 추세에 따라 고강도 강재의 수요가 증가하고 있다. 이에 따라 교량용 고강도화 및 고인성화 강재의 기술개발과 기존의 교량용 강재 대비 인성 및 용접성능 등을 향상시키기 위한 연구개발이 진행되고 있다[1].

기존의 고강도 강재는 높은 강도를 갖고 있지만, 인성이 낮아 피로균열 및 취성파괴가 일어나기 쉽고, 제작시

성형 및 용접이 까다로워 시공성이 떨어지는 단점이 있다. '교량 구조용 압연 강재'인 HSB (High Performance Steel for Bridge)600 강은 강도, 용접성 및 시공성이 우수하다고 알려져 있다[2]. 일반적으로 강재의 고강도화 및 고인성화를 위해서는 다양한 미세 합금원소의 첨가가 요구되나, 합금원소의 첨가는 강재 용접성을 저하시키는 원인이 되므로, 첨가되는 합금의 원소량을 최소화하면서도 압연과 냉각을 통하여 고강도 강재를 제조할 수 있는 TMCP (Thermo Mechanical Controlled Process)공법으로

본 논문은 중소기업청 산학공동기술개발사업 및 한국기술교육대학교 교육연구진흥비 지원에 의해 수행되었음.

*교신저자 : 임영민(plorida@kut.ac.kr)

접수일 11년 09월 20일 수정일 (1차 11년 10월 27일, 2차 11년 12월 12일) 게재확정일 11년 12월 13일

고강도 및 고인성 강재를 제조하고 있다. 이 TMCP 강종인 HSB600강은 저합금 원소를 함유하고, 제어압연과 고속냉각 공정에 의해 제조 된다[3].

일반적으로 조선이나 강교 등 강구조물 제작 시 신뢰성 향상을 위해 조립공정 이후 용접 후 열처리 (Post Weld Heat Treatment, PWHT)는 강구조물의 실시되고 있으며, 이는 PWHT가 저응력 파괴, 내식성, 크리프 성능을 향상하기 때문이다[4].

본 연구에서는 교량 구조용 강재인 HSB600 강에서 입열량과 PWHT가 용접부의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 분석하였다.

2. 실험방법

2.1 시편 용접 및 열처리

본 연구에서 사용된 시편은 교량 구조용 압연 강재 HSB600으로 다층패스 용접을 위하여 그림 1과 같이 두께 50 mm, 폭 150 mm, 길이 500 mm의 치수를 가진다. 두 판재 사이 루트간격은 3 mm, 용접시작 및 종료 위치에 탭 (tap)을 가접하여 V자형 홈 (50°) 맞대기 이음이 준비되었다. 표 1과 2는 HSB600강, 용접와이어의 화학조성이다.

[표 1] HSB600강 화학조성

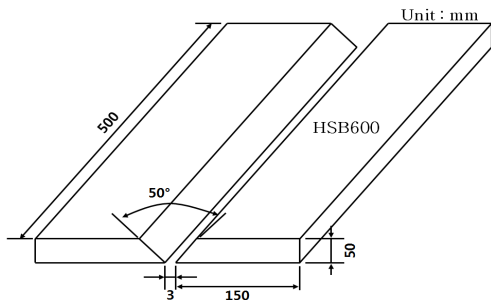
[Table 1] Chemical composition of HSB600 steel

C	Si	Mn	P	S	Others
0.04	0.15	1.55	0.005	<0.002	Cr, Mo, Ni, Ti, B.

[표 2] 용접 와이어 화학조성

[Table 2] Chemical composition of welding wire

C	Si	Mn	Ni	Mo
0.04	0.35	1.17	0.92	0.2



[그림 1] 용접 시험편

[Fig. 1] Weld specimen preparation

실험조건은 현장에서 사용되고 있는 용접절차시방서 (WPS : Welding Procedure Specification)에 따라 표 3과 같이 설정하였다. 500A급 인버터용접기를 사용하였고 아래보기자세에서 직경이 1.2 mm인 K81T (AWS규격:E81T1-Ni1) 와이어를 이용하여 맞대기 이음 용접하였다. 패스 간 온도는 평균 100 °C였고, CO₂ 가스 분위기에서 GMA (Gas Metal Arc welding) 용접하였다. 입열량은 WPS를 참고하여 2.2 kJ/mm를 기준으로 입열량이 작은 조건은 1.5 kJ/mm, 입열량이 높은 조건은 3.6 kJ/mm로 설정하여 용접하였고, 용접 후 600 °C에서 40시간 동안 PWHT를 실시하였다.

[표 3] 용접 및 열처리조건

[Table 3] Welding parameters

Current (A)	Volts (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/mm)	Pass numbers	PWHT
280	30	15	1.5	11	600 °C 40hrs
280	30	25	2.2	6	
280	30	35	3.6	5	

2.2 미세조직 및 기계적 시험

용접이 완료된 시편을 용접방향에 횡방향으로 시편을 절단하여 채취하였다. 절단한 시편을 연삭, 연마 후 5 % Nital용액으로 부식한 후 광학 현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

미세조직 분석은 국제용접협회 (IIW : International Institute welding)의 규정에 따라 500배율에서 미세조직 사진을 직사각형 모양으로 12시야 (가로4×세로3)로 나누어 측정하였다. 단위 미세조직 성분은 5가지의 대분류 조직 (Principal constituents, 분류 조직은 PF, AF, FS, FC, M의 5가지)의 기준에 따라 분석되었다[5].

인장시험은 KS B 0833 1호에 따라 환봉형 인장 시험편을 제작하였으며, KS B 0802 에 따라 50 ton 만능인장 시험기를 사용하여 크로스헤드 속도 5 mm/min로 수행하였다.

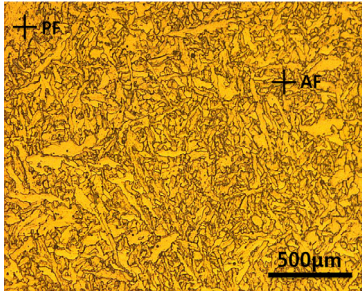
충격시험편은 ASTM E 23~83 에 따라 용접부 표면으로부터 2 mm 깊이의 V형 노치가 가공된 표준 충격시험편 (10×10×55 mm)을 각각 3개씩 준비하여 온도 -80 °C로부터 0 °C 범위에서 시험을 수행하였다. 저온을 유지하기 위하여 사용된 냉매는 공융용 메틸알콜과 드라이 아이스와의 혼합물이었다. 그리고 파단된 충격시험편의 단면은 주사전자 현미경으로 관찰하였다.

미세경도는 용접부 표면 2 mm 아래에서 사용하중 1 kgf로 압입 유지시간 10초로하여 0.5 mm 간격으로 마이

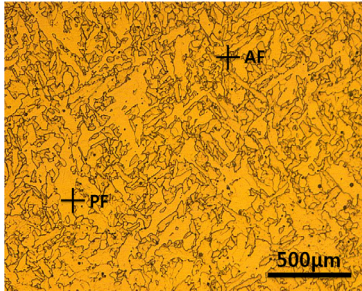
크로 비커즈 경도계를 사용하여 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

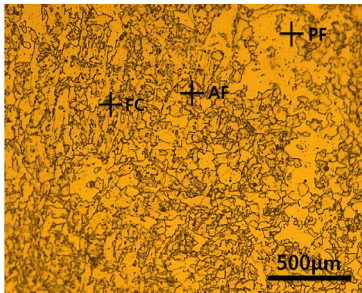
3.1 미세조직



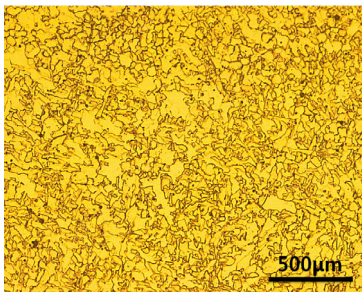
(a) 용접된 상태 : 1.5 kJ/mm



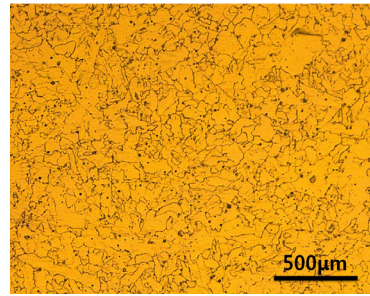
(b) 용접된 상태 : 2.2 kJ/mm



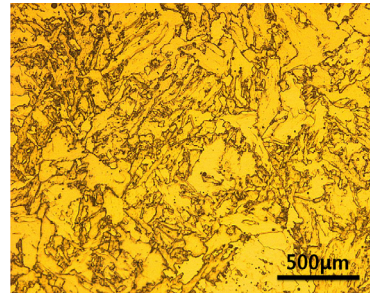
(c) 용접된 상태 : 3.6 kJ/mm



(d) PWHT : 1.5 kJ/mm



(e) PWHT : 2.2 kJ/mm



(f) PWHT : 3.6 kJ/mm

[그림 2] 용접부의 미세조직

[Fig. 2] Microstructures of As-welded and PWHT specimens with heat inputs

그림 2는 입열량별로 용접된 시편의 미세조직이다.

그림 2(a), (b)와 (c)는 용접 입열량이 각각 1.5, 2.2, 3.6 kJ/mm에서의 용접 상부비드의 미세조직이다. 저 입열인 그림 2(a)는 용접패스수가 많고 패스당 용착층이 작아 주상정 조직의 양이 적고 크기 또한 작게 생성되었다. 고입열인 2(c)에서는 용접 패스수가 적고 한 패스당 용착금속이 많아 조대한 주조조직인 주상정이 분명하게 관찰되었다.

그림 2(a)에서는 미세한 페라이트 입자 (래스)들이 서로 결속된 AF조직이 다량 생성되었다.

그림 2(d)는 입열량인 1.5 kJ/mm 용접부의 PWHT의 조직사진이다. 그림 2(a)와 비교 했을 때 AF, PF, FS 모두 PWHT전보다 페라이트 조직의 크기가 넓고 모서리가 둥근 모양으로 변화된 것을 알 수 있다. 이것은 PWHT를 통해 결정립이 조대화 및 구형화가 된 결과로 판단된다.

3.2 미세조직 분율

조직 구성분율에 따라 기계적 성질이 어떻게 변화되는지를 알아보고자, 입열량별로 용접된 상태 (as-welded)에서 조직을 정량화하기 위해 실험방법에서 언급된 IIW 기법을 사용하여 미세조직의 구성분율을 측정하였다.

표 4는 입열량별 용접된 상태 시편의 미세조직을 정량

화하여 구한 분율표이다.

입열량이 증가함에 따라 AF분율은 감소하고 PF와 FS의 분율은 증가하였다. 낮은 입열량인 1.5 kJ/mm에서는 AF가 전체 미세조직의 89 %를 구성하고 있으며, 입열량이 증가할수록 PF와 FS미세조직의 비율은 증가하였다. FC (Ferrite Carbide)는 강의 공석조성에서 냉각속도가 빨라 펄라이트로 생성되지 못하고 페라이트와 탄화물 덩어리로 구성된 강 용접부에서 나타나는 조직으로 세 입열량 모두에서 미량 관찰 되었다[6].

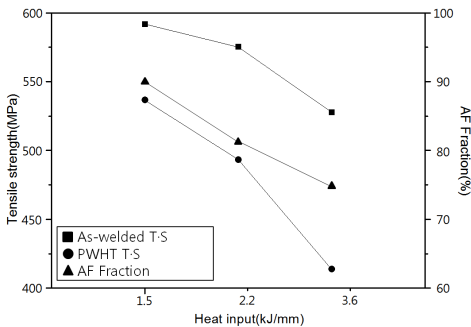
[표 4] 미세조직 정량화 분율 (%)
[Table 4] Microstructure fraction (%)

condition	heat -input (kJ/mm)	AF	PF	FS	FC
As-welded	1.5	89.14	6.42	4.25	0.19
	2.2	82	11.84	6	0.16
	3.6	75.92	15.22	8.66	0.2

3.3 인장시험

그림 3은 용접된 상태와 PWHT 처리된 용접부에서 입열량에 따른 인장강도의 변화를 나타내고 있다. 용접된 상태에서 용접부 인장강도는 528~592 MPa, 연신율은 22.4~27 % 였고, PWHT에서 용접부의 인장강도는 414~537 MPa, 연신율은 23~28 %로 두 조건을 비교하면 PWHT 후에 인장강도는 55~114 MPa만큼 감소되었고, 연신율은 1 % 가량 증가하였다.

그림 3에 나타난 입열량별 AF분율 곡선과 인장강도 값의 곡선은 거의 비슷한 비율로 입열량이 증가함에 따라 값이 저하되었다. 이는 미세한 페라이트 래스들의 상호 연결된 AF의 생성량과의 관계 때문으로 AF량이 증가하면 용착금속의 강도와 인성이 증대되는 효과가 있기 때문이다[7-9]. 이에 따라 기계적 특성은 AF의 비율에 따라 변화됨을 확인할 수 있다.



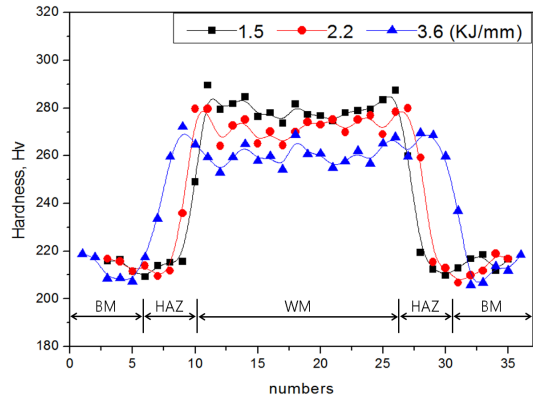
[그림 3] AF분율과 인장강도
[Fig. 3] AF Fraction & tensile strength

3.4 경도시험

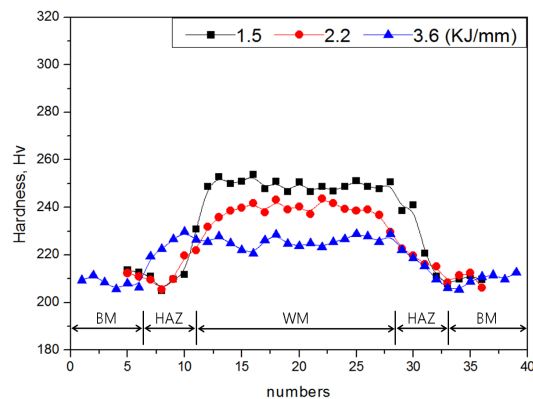
그림 4와 그림 5는 입열량 1.5, 2.2와 3.6 kJ/mm에서 용접된 상태와 PWHT 용접부의 경도변화를 조사한 것이다. 모재의 경도는 164~180 Hv 범위였다.

용접된 상태에서 열영향부의 경도는 입열량 1.5, 2.2와 3.6 kJ/mm에 따라 각각 190~227 Hv, 215~220 Hv 와 193~204 Hv 범위이고, 용착금속의 경도는 각각 200~205 Hv, 190~201 Hv 와 183~186 Hv 범위이다.

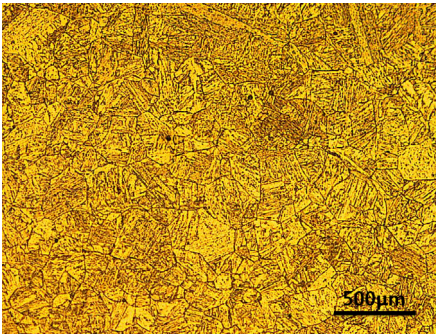
또한 PWHT에서 열영향부의 경도는 입열량 1.5, 2.2와 3.6 kJ/mm에 따라 각각 190~205 Hv, 180~209 Hv 와 200~216 Hv 범위이고, 용착금속의 경도는 각각 180~188 Hv, 183~189 Hv 와 176~180 Hv 범위이다.



[그림 4] 용접된 상태의 경도값
[Fig. 4] Hardness of As-welded



[그림 5] PWHT의 경도값
[Fig. 5] Hardness of PWHT



[그림 6] 열영향부(HAZ)의 미세조직 (2.2 kJ/mm)
[Fig. 6] Microstructure of HAZ (2.2 kJ/mm)

이와 같이 열영향부와 용착금속 모두 경도가 모재 보다 높게 측정되었다. 이는 그림 2의 용착금속의 미세조직과 용접 시 발생한 잔류응력과 그림 6에 나타난 열영향부의 미세조직에서 경한 마르텐사이트가 생성되었기 때문이다.

용접상태에서 입열량이 증가할수록 상부비드에 경도는 감소하였다. 이는 저 입열 (1.5 kJ/mm)의 경우 용접 최고 온도에서 유지시간이 짧기 때문에 냉각속도가 급하므로 미세조직에서 고찰된 바와 같이 페라이트 입자가 미세화된 AF가 다량 생성되었기 때문이다. 입열량이 증가함에 따라 경도가 낮아지는 것은 PF조직의 폭이 커지고, 점차 다각화 되어 PF 페라이트 분율이 증가됨으로 경한 미세조직이 적게 생성되었기 때문으로 이는 앞에서 이미 고찰되었다.

또한 PWHT 후 경도 저하는 이미 그림 2의 미세조직에서 고찰한 바와 같이 PWHT에 의한 미세조직의 구형화와 PF등의 조대화와 용접잔류응력 이완으로 인해 경도가 감소된 것으로 사료된다.

3.5 충격시험

그림 7과 그림 8은 입열량 1.5, 2.2와 3.6 kJ/mm에서의 용접된 상태와 PWHT의 샤르피 V 노치 충격시편을 -80 °C에서 0 °C까지 시험된 충격흡수에너지이다.

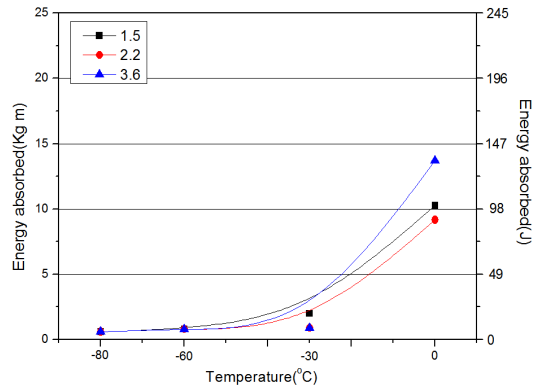
그림 7에 나타난 용접상태에서의 충격 시험 에너지를 보면 낮은 온도 (-80 °C, -60 °C)에서는 충격 흡수 에너지가 거의 비슷하였고, -30 °C에서는 미세한 차이가 보였지만, 충격 에너지 값에서 큰 차이가 나지 않았다.

그림 8은 PWHT 후 충격 흡수 에너지는 PWHT 전 결과와 비교하여 0 °C에서의 값이 8~10 J 상승하였다. 이는 PWHT를 통해 조직의 안정화, 조대화 및 구상화와 잔류응력 감소로 충격 흡수 에너지가 증가된 것으로 사료된다. 그리고 이 값은 모재 규격기준인 47 J (-5 °C, 도로

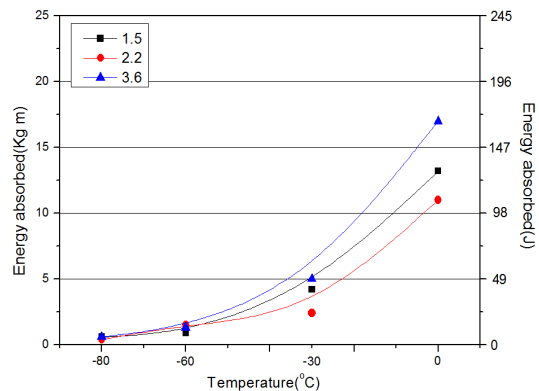
교표준시방서)를 상회하는 충격흡수에너지를 보여주고 있다[1].

충격시험으로 파단된 시편의 파단면을 주사전자현미경 (SEM)으로 관찰하였다. 그림 9와 그림 10은 용접된 상태와 PWHT의 파단면을 나타내고 있다. 그림 9에서 용접된 상태의 파단면은 입열량이 증가할수록 딴플이 없어지고, 파각면 (facet)의 크기가 조대해지고, 넓어졌는데 이는 입열량 증가로 조직이 조대화된 것과 관련이 있다고 사료된다. 그림 10에서는 PWHT를 통해 용접된 상태보다 파각면이 더 넓은 것을 알 수 있다. 저입열량에서는 딴플이 생성되었고 고입열량에서는 강무늬 (river pattern)의 취성파면을 보였다.

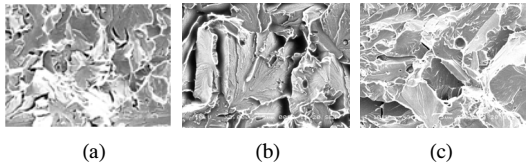
이상의 용접부는 미세조직에서 AF분율의 차이는 있었지만 인장강도와 충격인성에는 큰 영향을 미치지 않는 것으로 보인다.



[그림 7] 용접된 상태의 충격 흡수 에너지
[Fig. 7] Energy absorbed of As-welded

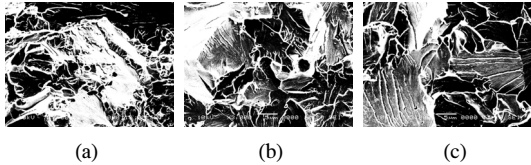


[그림 8] PWHT의 충격 흡수 에너지
[Fig. 8] Energy absorbed of PWHT



[그림 9] 용접된 상태의 충격 시험 파단면
(a) 1.5, (b) 2.2, (c) 3.6 (kJ/mm)

[Fig. 9] Impact test fracture SEM of As-welded



[그림 10] PWHT의 충격 시험 파단면
(a) 1.5, (b) 2.2, (c) 3.6 (kJ/mm)

[Fig. 10] Impact test fracture SEM of PWHT

4. 결론

본 연구는 교량 구조용 압연 강재인 HSB600강을 입열량을 1.5 kJ/mm, 2.2 kJ/mm, 3.6 kJ/mm로 변화시켜 GMA 용접한 후, 600 ℃에서 40시간 동안 열처리 (PWHT)를 실시하여, 이것이 용접부의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 가장 낮은 입열량 1.5 kJ/mm에서 AF가 가장 많이 생성되었으며, 입열량이 증가할수록 PF와 FS의 생성 비율이 증가하였다. 인장강도와 경도는 입열량이 증가할수록 저하되었으나 충격 흡수 에너지는 큰 차이를 보이지 않았다. 교량용 HSB600 강재 용접부에서 강도와 인성에 큰 영향을 미치는 침상형 페라이트 (AF)의 생성에 유리한 조건은 입열량 1.5 kJ/mm 였다.
- 2) PWHT를 실시한 결과 잔류응력 감소와 결정립의 구형화, 조대화로 경도와 인장강도가 저하되었다. 충격시험에서 시험온도 -80 ℃ ~ -30 ℃ 범위에서는 입열량별 충격 흡수 에너지가 미세한 차이를 보였고, 모두 교량품질의 기준을 만족시켰다. 그리고 PWHT에 의해 용착금속의 충격 흡수 에너지가 증가되었다.

References

- [1] Jong-Rak Kim, Sang-Seup Kim, Chul-Ho Lee, Eun-Taik Lee, Ki-Youl Beak, A Study on the Material Characteristics and the Welding Properties of 600MPa Grade Steel (SM 570 TMC) KSSC, v.20, n.6, pp.773-782, 2008
- [2] Hong-Chul Jung, Seung-Gab Hong, Young-Hwan Park, Jong-Bong Lee, The mechanical properties of FCA and SA welded joint in HSB600 steel, KWJS-Autumm, pp.118-120, 2007
- [3] Dong-Gyu Kim, Gue-Seok Kim, Tae-Seup Moon, Myoung-Jae Lee, Yang-Hee Park, A Experimental Study on TMCP Olate of Welding Characteristics, AIK, vol.16, no.2, pp.561-563, 1996
- [4] Seung-Gun Lee, Jong-Sung Kim, Tae-Eun Jin and P. Dong, A Study on Weld Residual Stress Relaxation by furnace and local PWHT Procedures, KSME-Autumm, pp.250-255, 2004
- [5] J. Abson, A. Duncan, R. J. Pageter: Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals, IIW Doc. No. 1533-88, 1988
- [6] J.F. Lancaster, Metallurgy of Welding. Champman&Hall, Fifth edition, pp.183-185, 1993
- [7] Yun-Seok Seo, Jin-Hyun Koh, Nam-Hoon Nam, Se-Yong Oh and Kee-Nam Choo, Effect of Heat Input on the Mechanical Properties of SA508 class 3 steel Weldments with Submerged Arc Welding. KWJS, vol22, pp.38-45, 2005
- [8] Jin-Hyun Koh, Jung-Han Kook, A Study on the Effect of Heat Input on the Microstructure and Toughness of Weldments Made by Domestic Flux Cored Wires. KWJS, vol.11. pp.164-176, 1993
- [9] Jin-Hyun Koh, Gwang-Su Kim, A Characteristic of microstructural evolution, microhardness and tensile properties in CrMoV rotor steel weldment experienced by the cyclic thermal aging heat treatment, KSHT, vol.15, No.4, pp.303-312, 1999

고 진 현(Jin-Hyun Koh)

[정회원]



- 1985년 1월 : Lehigh University 재료공학과 (공학석사)
- 1987년 1월 : Lehigh University 재료공학과 (공학박사)
- 1987년 5월 ~ 1991년 2월 : 한국원자력연구소
- 1991년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부 교수

<관심분야>

용접야금, 마이크로접합, 원자력재료

장 복 수(Bok-Su Jang)

[정회원]



- 2002년 3월 ~ 2004년 2월 : 한국기술교육대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부 (공학박사과정)
- 2000년 3월 ~ 현재 : 정우산기 품질보증팀 팀장

<관심분야>

용접야금, 플랜트산업, 재료공학

임 영 민(Young-Min Lim)

[준회원]



- 2011년 2월 : 한국기술교육대학교 신소재공학과 (공학학사)
- 2011년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부 석사과정

<관심분야>

용접야금, 용접재료

주 동 휘(Dong-Hwi Ju)

[정회원]



- 2005년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 ~ 2009년 2월 : 한국폴리텍 대학
- 2006년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부 (공학박사과정)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 정석항공고등학교 교사

<관심분야>

용접, 재료공학, 기계가공

김 남 훈(Nam-Hoon Kim)

[정회원]



- 2003년 2월 : 한국기술교육대학교 신소재공학과 (공학석사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부 (공학박사과정)

<관심분야>

오버레이용접, 용접재료, 용접전원, 용접기자재