

# HSB600강 가스메탈아크용접부에서 입열량과 용접후 열처리가 기계적 특성과 미세조직에 미치는 영향

주동휘<sup>1</sup>, 장복수<sup>1</sup>, 임영민<sup>1</sup>, 고진현<sup>1\*</sup>  
<sup>1</sup>한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부

## The effect of heat input and PWHT on the mechanical properties and microstructure of HSB600 steel weldments with GMAW

Dong-Hwi Ju<sup>1</sup>, Bok-Su Jang<sup>1</sup>, Young-Min Lim<sup>1</sup> and Jin-Hyun Koh<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>School of Energy·Materials·Chemical, Korea University of Technology and Education

**요 약** 교량용 고성능 강재는 높은 인장강도, 항복강도, 고인성, 용접성등이 요구된다. 교량 구조용 강재인 TMCP HSB600강의 GMA용접부에서 입열량(1.4~3.2kJ/mm)과 용접후 열처리가 기계적 특성과 미세조직에 미치는 영향을 조사하였다. 용접된 상태에서는 입열량이 증가할수록 인장강도와 경도는 감소하였다. 입열량 1.4kJ/mm에서는 빠른 냉각 속도에 의해 베나이트적 페라이트와 탄화물 집합체 등의 경한 미세조직이 생성되었고 입열량 2.1kJ/mm에서는 침상형 페라이트가 다량 생성되었으며, 고입열량인 3.2kJ/mm에서는 입계페라이트 사이트 플레이트와 구형 페라이트가 많이 생성되었다. 용접 후 열처리를 통해 용접부의 잔류응력의 감소와 결정립 조대화로 인하여 인장강도와 경도는 감소하였으나 충격흡수에너지에는 큰 차이가 없었다.

**Abstract** High performance steel for bridges requires higher performance in tensile and yield strength, toughness, weldability, etc. The purpose of this study is to investigate the weldability of HSB 600 steel. The effects of heat input (1.4~3.2kJ/mm) and postweld heat treatment (PWHT, 600℃, 40hr.) on the TMCP HSB600 steel weldments made by GMAW process were investigated. The tensile strength and hardness of as-welded specimens decreased with increasing heat input. Charpy V-notch impact energy did not show any significant difference by postweld heat treatment. The fine-grained acicular ferrite was mainly formed in the 2.1kJ/mm of heat input while polygonal and side plate ferrites were dominated in the high inputs. Meanwhile, tensile strength and hardness of PWHT weldments decreased due to the coarsening and globularization of ferrite microstructure and reduction of residual stresses with increasing heat inputs. However, there was no significant difference in the impact energy absorption.

**Key Words** : HSB600 steel, GMA Welding, Heat input, Microstructure, Mechanical property

### 1. 서론

기존의 고강도 강재는 극후화 되면서 강도 확보를 위해 다량의 합금원소를 첨가하여 제조하는데 이로 인해 탄소당량이 높아져서 용접성이 저하되는 현상이 발생한다. 높은 강도를 갖지만 인성이 낮아 피로균열 및 취성과

피가 일어나기 쉽고, 제작 시 성형 및 용접이 까다로워서 시공성이 떨어지는 단점을 가지고 있다. 이러한 문제점을 보완하여 강도, 제작성능 및 용접성을 개선시킨 교량 맞춤형 강재 (High Performance Steel for Bridges)가 개발되었다[1].

이러한 고성능 강재는 열간 가공제어법 (Thermo

\*Corresponding Author : Jin-Hyun Koh

Tel: +82-10-5406-4027 email: jhkoh@kut.ac.kr

접수일 12년 02월 14일

수정일(1차 12년 3월 29일, 2차 12년 04월 05일)

개재확정일 12년 05월 10일

Mechanical Control Process, TMCP)을 적용하여 강도를 확보함으로써 동일 강도의 일반강재에 비해 탄소당량 (Ceq)이나 용접균열감응도 (Pcm)를 낮출 수 있기 때문에 대입열 용접이 가능하며 판 두께 100mm까지 항복강도가 일정하고, 충격흡수에너지가 -20℃에서 47J 이상으로 고 인성을 보장한다[1]. 또한 용접 예열 조건을 대폭 완화할 수 있는 등 용접성이 매우 우수한 강재이다[2].

본 연구에서는 교량 맞춤형 강재인 HSB 600 강을 보호가스 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub> 를 사용하여 가스메탈아크용접 (Gas Metal Arc Welding, GMAW)을 실시하고, 입열량이 용접된 상태 (As-welded)에 미치는 영향과 강구조물의 신뢰성 향상에 필요한 용접후 열처리 (Post Weld Heat Treatment)가 용접부의 미세조직과 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 시편 용접 및 열처리

본 연구에 사용된 재료는 교량 구조용 압연 강재 HSB600강으로 다층패스 용접을 위하여 시험편은 두께 20mm, 폭 150mm, 길이 500mm, 홈 각도 50°로 가공하여 루트간격을 3mm로 하고 동일한 재질의 밀면 막이판 (backing plate)과 시작 및 종료되는 위치에 엔드탭 (end tap)을 가접하고 V홈 맞대기 용접을 실시하였다.

실험조건은 Table.1과 같으며 용접기는 500A급 인버터 (inverter)용접기를 사용하여 V홈 맞대기 이음으로 아래보기자세 (IG)에 와이어는 직경이 1.4mm인 Supercored 81 60킬로급 고장력강 와이어 (AWS규격:E81T1-Ni1)를 사용하였고, 패스 간 층간온도는 100℃이하를 유지하였다. 보호가스는 80%Ar + 20%CO<sub>2</sub> 가스 분위기에서 GMA용접을 하였으며, 입열량은 2.1kJ/mm를 기준으로 입열량이 작은 조건은 1.4kJ/mm, 입열량이 높은 조건은 3.2kJ/mm로 설정하였으며, 용접 후 600℃에서 40시간 동안 용접후 열처리 실시 후 공냉을 실시하였다. Table.2는 모재로 사용된 HSB600강의 화학조성이다.

[표 1] 용접 및 열처리 조건

[Table 1] Welding & PWHT parameters

Current (A)	Volts (V)	Travel speed (cm/min)	Heat input (kJ/mm)	Pass numbers	PWHT
280	30	36	1.4	11	600℃ 40hrs
280	30	24	2.1	7	
300	36	20	3.2	7	

[표 2] HSB600강의 화학조성 (wt.%)

[Table 2] Chemical composition of HSB600 steel (wt.%)

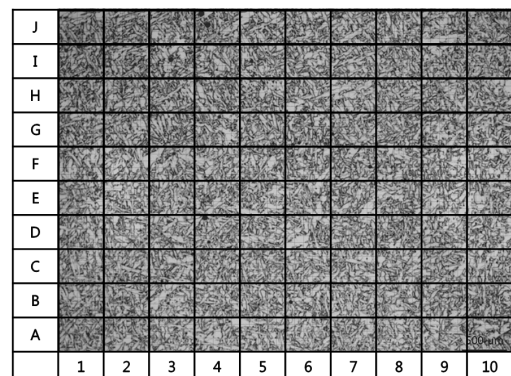
C	Si	Mn	P	S	Others
0.04	0.15	1.55	0.005	<0.002	Cr, Mo, Ni, Ti, B.

### 2.2 냉각곡선, 미세조직 및 기계적 시험

입열량 변화와 냉각속도와의 관계를 조사하기 위해 입열량을 실험 범위와 같은 1.4, 2.1, 3.2kJ/mm의 냉각곡선을 측정하였다. 냉각속도를 정량화하기 위해서 1050℃에서 450℃의 범위로 측정을 실시하였다.

미세조직을 관찰하기 위하여 용접이 완료된 시편을 용접방향에 횡방향으로 시편을 절단 및 채취하여 연삭, 미세연마 후 4% Nital 용액으로 5초간 에칭하고, 광학 현미경과 주사전자현미경으로 미세조직을 관찰하였다.

단위조직의 분율은 국제용접협회 (IIW : International Institute welding)의 규정에 따라 500배에서 관찰하였다 [3]. 미세조직 관찰은 직사각형 모양으로 12시야 (가로4×세로3)로 나누어 측정하였다, IIW에서는 단위 미세조직 성분을 5가지의 대분류 조직 (Principal constituents)으로 분류하고 있다. 즉, 분류 조직은 침상형 페라이트 (Acicular Ferrite, AF), 입계구상형 페라이트 (Primary Ferrite, PF), 제2상을 가진 페라이트 (Ferrite Side Plate, FS), 페라이트 탄화물 집합체 (Ferrite Carbide Aggregate & Bainitic Ferrite, FC+BF), 마르텐사이트 (Martensite, M)의 5가지이다[6]. 본 실험에서는 각 입열량별로 12장의 사진을 찍어 Fig.1과 같이 100개의 지점을 관찰하였다.



[그림 1] 미세조직 정량화 패턴 (X500)

[Fig. 1] Optical micrograph superimposed with grid pattern (X500)

경도는 마이크로 비커즈 경도시험기를 사용하였고, 용접부 표면으로부터 2mm 직하에서 표면에 평행하게 1kgf

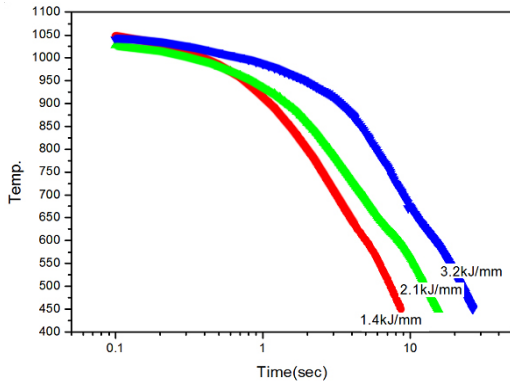
의 하중으로 압입시간 10초에 조건으로 측정하였다. 인장시험은 KS B 0833 1호에 따라 환봉형 인장 시험편을 제작하였으며, 50ton 만능인장시험기를 사용하여 크로스헤드 속도 5mm/min으로 수행하였다.

충격시험은 용착부의 인성을 조사하기 위하여 ASTM E 23~83 기준에 따라 표준형태의 충격시험편 (10x10x55mm)을 용접부 표면으로부터 2mm 깊이에서 V형 노치로 가공한 시험편을 입열량별로 가공하였으며, 입열량 조건에 따른 연성-취성 전이 곡선을 구하기 위하여 -60℃에서 0℃ 범위까지 충격실험을 실시하였다. 그리고 충격시험편의 파단면은 주사전자 현미경을 사용하여 관찰하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 입열량에 따른 미세조직변화 및 분율

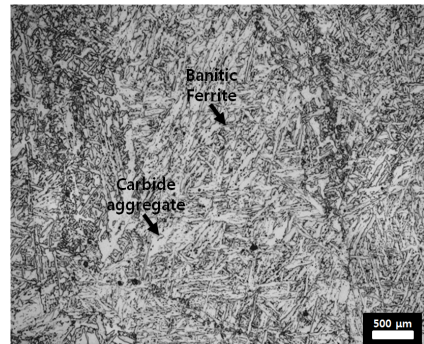
입열량에 따른 냉각속도는 Fig.2와 같이 관찰되었다. 용접 직후 온도 1050℃부터 450℃로 저하될 때까지의 시간을 측정된 결과 1.4kJ/mm에서는 냉각속도가 9초, 입열량이 증가함에 따라 냉각속도는 저하하여 입열량이 2.1kJ/mm는 10.7초, 3.1kJ/mm는 12.5초였다. 이러한 냉각속도의 차이는 용착금속의 미세조직이 입열량에 따라 상이하게 나타나는 결과를 가져온다.



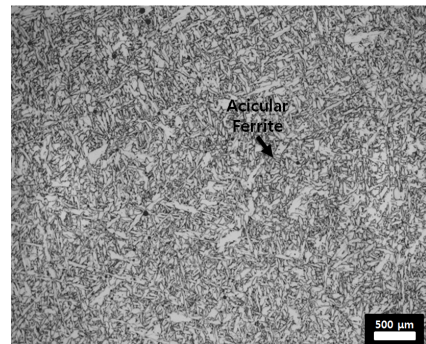
[그림 2] 입열량에 따른 냉각곡선 (HI)  
[Fig. 2] Cooling curves with different heat inputs (HI)

Fig.3의 (a), (b), (c)는 용접 입열량이 각각 1.4, 2.1, 3.2 kJ/mm에서 용접된 상태 (AW)의 용접 미세조직이다. 입열량이 1.4kJ/mm인 Fig.3 (a)에서의 미세조직은 용접패스수가 많고 패스당 용착층이 작아 빠른 냉각속도로 인하여 Fig. 4에서와 같이 55%의 AF, 25%의 베이나이트적 페라이트와 10%의 다각형 페라이트로 구성되었으며, 입열량 2.1kJ/mm의 미세조직은 Fig.3 (b)에서와 같이 가장

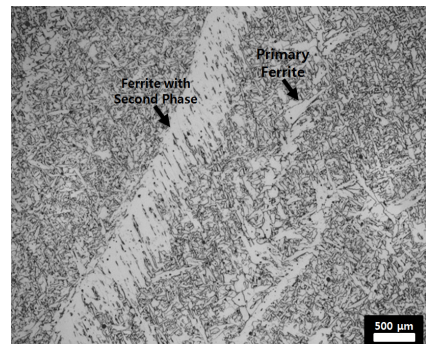
많은 AF가 생성되었으며, 이 결과는 Fig.4 에서 구한 분율과 같이 적당한 냉각속도 때문에 AF생성이 72%로 고분율의 AF를 갖는 미세조직이 생성된 것으로 사료된다. 고입열인 Fig.3 (c)에서는 용접 패스수가 적고 한 패스당 용착금속이 많아 입계에서 시이드 플레이트 페라이트와 다각형 페라이트조직이 관찰되었고 Fig.4에서와 같이 45%의 AF의 생성과, 특히 페라이트가 입계에서 한 방향으로 동시적 핵색성(sym pathetic nucleation)된 결과 페라이트 사이트플레이트가 다량 생성되었다.



(a) AW : 1.4 kJ/mm

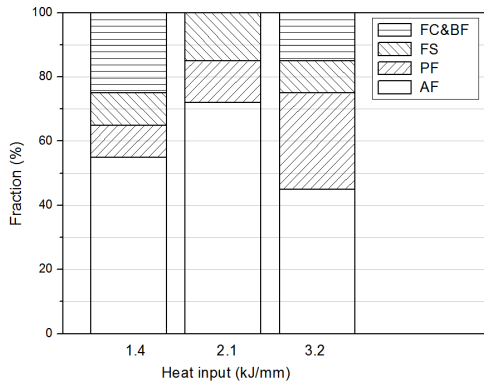


(b) AW : 2.1 kJ/mm



(c) AW : 3.2 kJ/mm

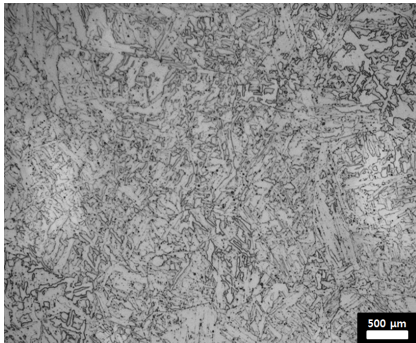
[그림 3] 입열량에 따른 용접된 상태의 미세조직  
[Fig. 3] Microstructures of as-welded specimens with heat inputs (kJ/mm)



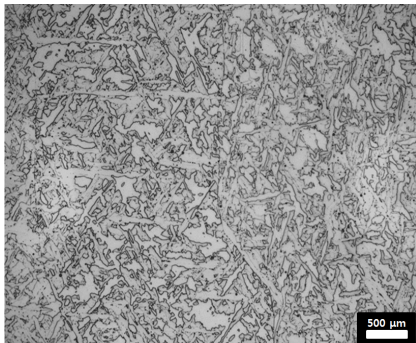
[그림 4] 입열량에 따른 미세조직 변화  
[Fig. 4] Microstructural variation with heat input

Fig.5의 (d),(e),(f)는 각 입열량별로 PWHT의 조직사진이다. AW와 비교했을 때 AF, PF, FS 모두 페라이트 조직의 형상이 모서리가 둥글고 좀 더 넓은 모양으로 변화된 것을 관찰할 수 있다. 이것은 PWHT를 통해 결정립이 조대화 및 구형화된 것이다.

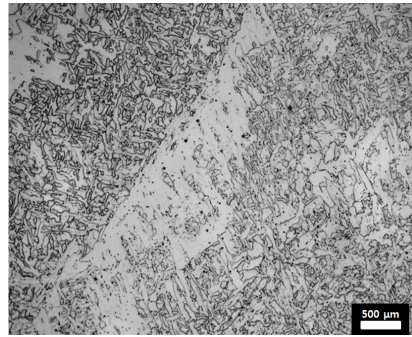
Fig.6은 AF가 가장 많이 생성된 2.1kJ/mm의 미세조직의 주사전자 현미경 사진으로 AF가 비금속계재료에서 생성되고 있음을 보여주고 있다.



(d) PWHT : 1.4 kJ/mm



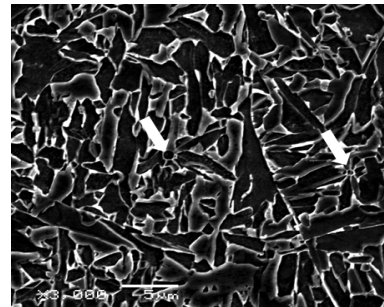
(e) PWHT : 2.1 kJ/mm



(f) PWHT : 3.2 kJ/mm

[그림 5] 입열량에 따른 열처리후 미세조직

[Fig. 5] Microstructures of PWHT specimens with heat inputs (kJ/mm)



[그림 6] AF의 미세조직 주사전자현미경 사진 (X 3000)

[Fig. 6] SEM micrograph of acicular ferrite (X 3000)

### 3.2 인장시험

Table 3은 AW와 PWHT의 입열량에 따른 용접부의 인장강도이다. AW 용접부의 인장강도는 628~676 MPa, PWHT 용접부는 549~656MPa 범위로서, 연신율은 AW는 32~44%, PWHT는 37~48%로 열처리 전과 후 모두 30%이상을 상회하였으며 PWHT가 AW보다 연신율이 4~5% 상승하였다. 이와 같이 입열량 증가에 따라 인장강도가 감소하였고, 연신율은 증가하였다. 이것은 PWHT에 의한 템퍼링 효과로 용접부의 잔류응력이 완화되었다. 이는 앞서 고찰한 바와 같이 미세조직의 구형화 때문으로 사료된다.

[표 3] 열처리 전과 후의 인장강도

[Table 3] Tensile strength and elongation of AW & PWHT specimens

Heat input (kJ/mm)	AW			PWHT		
	1.4	2.1	3.2	1.4	2.1	3.2
T.S (MPa)	676	638	628	656	586	549
El.(%)	32.1	40.4	44.2	37.3	43.1	48.8

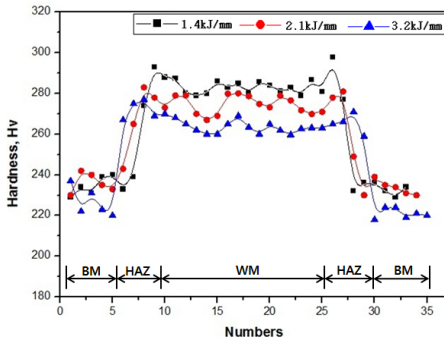
### 3.3 경도시험

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 AW와 PWHT된 용접시편의 모재부, 열영향부, 용접부의 미세경도 시험결과이다. 모재의 경도는 219~240 Hv 범위이고, AW의 시편은 입열량 1.4, 2.2와 3.2 kJ/mm에서, 용접부의 경도는 각각 279~286 Hv, 267~280 Hv와 259~270 Hv 범위이다. 또한 PWHT에 의해 용접부의 경도는 각각 230~240 Hv, 221~235 Hv와 203~211 Hv 범위이다.

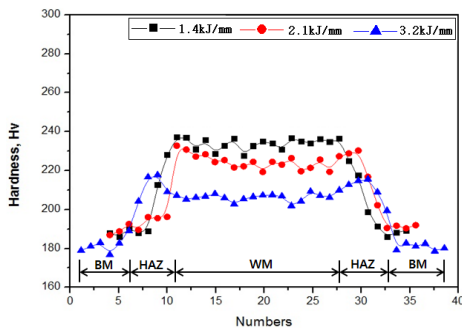
용접된 상태에서 입열량이 증가할수록 경도가 감소하였다. 이는 저입열 (1.4kJ/mm)의 경우 Fig. 2와 같이 냉각 속도가 빠르므로 미세조직에서 고찰된 바와 같이 베나이트적 페라이트와 입자가 미세화된 AF가 다량 생성되었기 때문이다.

또한 PF 조직의 폭이 커지고, 점차 다각화 되어 PF 분율이 증가됨으로 경한 미세조직이 적게 생성되었기 때문에 앞에서 이미 고찰하였다.

PWHT 후 경도 저하는 Fig.3의 미세조직에서 나타낸 것과 같이 후열처리에 의한 구형화와 미세조직 (PF 등)의 조대화 및 용접잔류응력의 이완 효과로 생각 된다.



[그림 7] 용접된 상태의 경도값  
[Fig. 7] Hardness of As-welded



[그림 8] PWHT의 경도값  
[Fig. 8] Hardness of PWHT

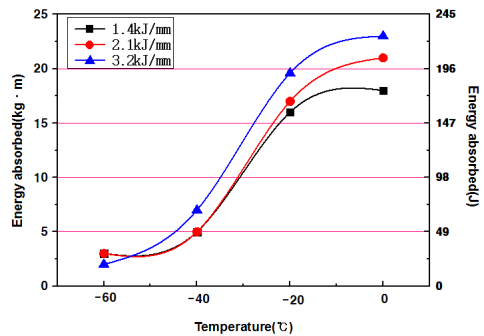
### 3.4 충격시험

Fig.9와 Fig.10은 입열량에 따른 AW와 PWHT 용접시편의 샤르피 V노치 충격시험편을 -60℃에서 0℃까지 시험한 충격흡수에너지이다.

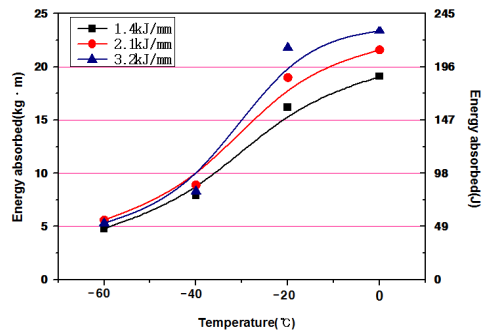
Fig.9에 나타난 AW에서 충격시험 결과는 입열량 3.2kJ/mm에서 가장 높은 충격 흡수에너지를, 입열량이 1.4kJ/mm에서 가장 낮은 충격에너지를 보여주고 있다.

PWHT 시편의 충격 흡수에너지는 열처리 전 결과보다 흡수 에너지 값이 다소 높지만 큰 차이가 없다. 열처리 전 후에서 충격흡수에너지의 작은 차이는 PWHT를 통해 잔류응력 감소와 조직의 약간 조대화 및 구상화 등의 미세조직 변화와 이들의 구성 분율의 차이가 충격흡수에너지에는 큰 영향을 미치지 못한 것으로 사료된다. 그리고 본 강재의 용접부의 충격인성 값은 모재 규격기준인 47J (-5℃, 도로교 품질기준)과 40J (-20℃, 고속철도교 품질기준)을 모두 상회하였다[7].

Fig.9의 AW와 Fig.10의 PWHT를 비교해보면 도로교 규격기준인 -5℃에서 충격값이 미세한 차이를 보이기 때문에 실험에 사용된 시험재료는 용접후 열처리가 반드시 필요한 공정인지는 검토가 필요하다고 사료된다.

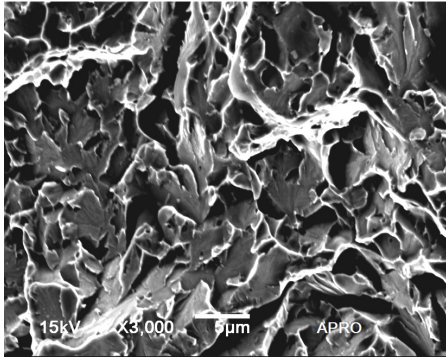


[그림 9] 용접된 상태의 충격흡수 에너지  
[Fig. 9] Energy absorbed of As-welded specimens

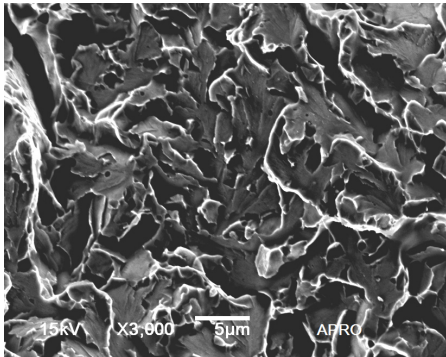


[그림 10] PWHT의 충격 흡수 에너지  
[Fig. 10] Energy absorbed of PWHT specimens

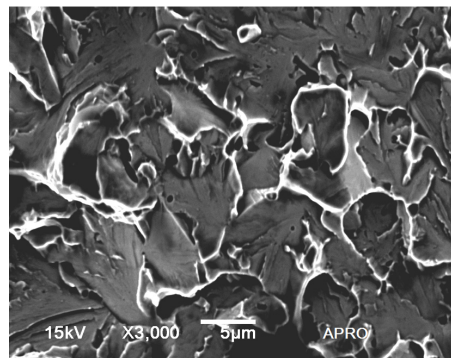
Fig.11과 Fig.12는 시험온도  $-60^{\circ}\text{C}$ 에서 파단된 것을 주사전자현미경으로 관찰한 파단면으로 열처리 전과 후 모두 파각면의 크기가 입열량이 증가할수록 넓어지는 것을 확인할 수 있으며 이는 입열량이 증가할수록 조직이 조대해지는 결과로 판단된다.



(a) AW : 1.4 kJ/mm

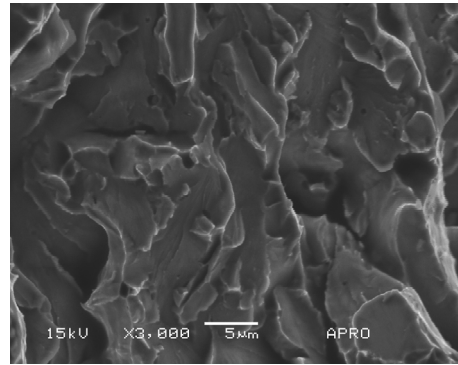


(b) AW : 2.1 kJ/mm

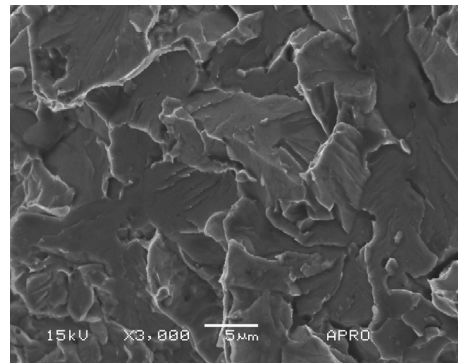


(c) AW : 3.2 kJ/mm

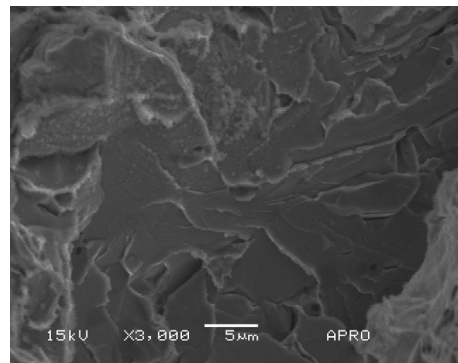
[그림 11] 용접된 상태의 충격시험 파단면  
[Fig. 11] SEM fractography of fractured surface of as-welded ( $-60^{\circ}\text{C}$ ) specimens



(a) PWHT : 1.4 kJ/mm



(b) PWHT : 2.1 kJ/mm



(c) PWHT : 3.2 kJ/mm

[그림 12] PWHT의 충격 시험 파단면  
[Fig. 12] SEM fractography of fractured surfaces of PWHT ( $-60^{\circ}\text{C}$ ) specimens

#### 4. 결론

본 연구에서는 교량 구조용 압연 강재인 HSB 600강을 V형 가공하여 다층패스로 혼합가스 (80%Ar +20% CO<sub>2</sub>) 분위기에서 GMA용접을 하였다. 용접부의 입열량(1.4, 2.1, 3.2 kJ/mm)과 PWHT (600 $^{\circ}\text{C}$ , 40hr)가 기계적 특성에

미치는 영향을 조사하였다. 그리고 용접부의 미세조직과 인장강도, 경도 및 충격시험을 수행하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) 용접부 미세조직에서는 입열량 2.1kJ/mm에서 적정 냉각속도로 인해 AF가 가장 많이 생성되었고, 용착량이 작고 냉각속도가 빠른 1.4kJ/mm에서는 베이 나이트적 페라이트, 가장 냉각속도가 늦었던 3.2kJ/mm에서는 페라이트 사이트플레이트와 구형 페라이트가 생성되었다.
- 2) PWHT를 통해 잔류응력 감소와 결정립의 구형화로 경도와 인장강도가 저하되었고, PWHT를 통해서 3가지 입열량 모두에서 충격흡수에너지가 소폭 증가하였고, 교량품질의 규격 기준을 상회하였다.
- 3) 용접부 충격흡수에너지 47J이상을 요구하는 교량품질 규격을 기준으로 용접된 상태와 PWHT 조건에서 충격값이 큰 차이를 보이지 않기 때문에 HSB600강의 용접부에서 후열처리는 충격인성측면에서는 효과가 없는 것으로 판단된다.

## References

- [1] J. K. Lee, T. Y. Yoon, K. S. Kim, J. Y. Cho, Development and Commercialization of High Performance Steel for Bridges(HSB600), RIST, vol.22, pp. 297-291, 2007.
- [2] 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.
- [3] D. J. Abson, A. Duncan, R. J. Pageter: Guide to the light microscope examination of ferritic steel weld metals, IIW Doc. No. 1533-88, 1988.
- [4] R. Farrar. P. Harrison: microstructural development and toughness of C-Mn and C-Mn-Ni weld metals: part 2-Toughness, Metal Construction, 19-8, 447R, 1987.
- [5] Z. Zhang and R. A. Farrar: Influence of Mn and Ni on the welds containing Ti and B: Welding Journal, 75-8, 252s, 1996.
- [6] E. Levine, D. C. Hill: structure-property relationships in low C weld metal, J. of KWS, 18-5, 565, 2000.
- [7] Ka-Hee Kim, Hee-Jin Kim, Hoi-Soo Ryou, Verification of Quantitative Evaluation Method for Ferritic Weld Metal Microstructure: Welding Journal, 337-338, 2005.
- [8] 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.

- [9] Jin-Hyun Koh, Nam-Hoom Kim, Bok-Su Jang, Dong-Hwi Ju and Young-Min Lim, The effect of Heat input and PWHT on the microstructure and mechanical properties of HSB600 steel weldments KAIC, Vol. 12, No. 12, pp. 5405-5411, 2011.

## 주 동 휘(Dong-Hwi Ju)

[정회원]



- 2005년 2월 : 공주대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2002년 2월 ~ 2009년 2월 : 한국폴리텍 대학
- 2007년 3월 ~ 현재 : 한국기술교육대학교 에너지·신소재·화학공학부 (공학박사과정)
- 2009년 3월 ~ 현재 : 정석항공고등학교 교사

<관심분야>

용접, 재료공학, 기계가공

## 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

---

**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