

## 研究論文

大韓熔接學會誌  
 第7卷第3號 1989年9月  
 Journal of the Korean  
 Welding Society  
 Vol. 7, No. 3, Sep., 1989

## 熔接構造用 高張力鋼의 熔接部 韌性에 미치는 微細組織과 熔接入熱量의 影響

張雄成\* · 方國守\* · 張來雄\* · 嚴基元\*\*

### Effects of Microstructure and Welding Heat Input on the Toughness of Weldable High Strength Steel Weldments

W.S.Chang\*, K.S.Bang\*, R.W.Chang\*, K.W.Uom\*\*

**Key Words :** HAZ Toughness(HAZ 인성), High Strength Steel(고장력강), TMCP Steel(TMCP강), High Heat Input Welding(대입열 용접), Microalloying (미량합금)

#### Abstract

This study was undertaken to evaluate the allowable welding heat input range for high strength steels manufactured by various processes and to compare the weldability of TMCP steel for high heat input welding with that of conventional Ti-added normalized steel.

The allowable welding heat input ranges for conventional  $50\text{kg/mm}^2$  steel to guarantee D or E grade of ship structural steel were below 150 and  $80\text{kJ/cm}$  respectively. Such a limit in welding heat input was closely related with the formation of undesirable microstructures, such as grain boundary ferrite and ferrite side plate in the coarse grain HAZ.

In case of  $60$  and  $80\text{kg/mm}^2$  quenched and tempered steels, for securing toughness in weldments over toughness requirements for base metal, each welding heat input had to be restricted below 60 and  $40\text{kJ/cm}$ , that was mainly due to coarsened polygonal ferrite in weld metal and lower temperature transformation products in coarse grain HAZ.

The TMCP steel could be appropriate as a grade E ship hull steel up to  $200\text{kJ/cm}$ , but the Ti-added normalized steel could be applied only below  $130\text{kJ/cm}$  under the same rule. This difference was partly owing to whether uniform and fine intragranular ferrite microstructure was well developed in HAZ or not.

\* 정회원, 산업과학기술 연구소 용접연구센타

\*\* 정회원, 한양대학교 정밀기계공학과

## I. 서 론

일반적으로 고장력강은 용접 입열량이 증대됨에 따라 용접부 특성, 특히 인성이 저하된다고 알려져 있으며 이러한 인성을 지배하는 인자는 매우 복잡하고 다양하지만 그 중에서도 가장 중요한 인자는 용접부 미세 조직이라고 할 수 있다<sup>1)</sup>. 따라서 용접 입열량 변화에 따른 용접부 인성 문제는 용접부 미세 조직의 변화로서 설명되어질 수 있으며, 이러한 관계는 Normalizing, Controlled Rolling, Quenching and Tempering(QT), TMCP(Thermo-Mechanical Controlled Rolling) 등 강 제조과정에서 적용되는 열 및 가공 이력에 따라 그 정도에 차이가 있을 것으로 생각된다.

본 연구에서는 상기의 요인들을 감안하여 후판 고장력강 중 제조 Process별로 대표적인 강종에 대한 용접 입열량 감수성을 평가하고 입열량에 따른 용접부 인성변화를 금속 조직학적인 관점에서 고찰하였다.

## 2. 실험방법

본 실험에서 사용한 강재는 인장 강도 50-80 kg/mm<sup>2</sup>급 후판 고장력강에서 대표적 강종을 선정하였으며 그 화학 조성은 Table 1과 같다.

상기 강종들은 그 강도 수준에 따라서 화학 조성은 물론 제조 공정이 상이하여 A강은 Nb, V이 첨가된 HT50급 선금용강(LR-EH34S)으로 Normalizing처리에 의해 제조되었으며 B, C강은 각각 HT60급 압력용기용강(JIS-SPV50) 및 HT80급 용접구조용강(ASTM-A514B)으로 QT 처리에 의해 제조되었다.

또한 통상의 Ti첨가, Normalizing처리에 의한 대입열 용접용강(X강)과 함께 제어압연 및 가속

냉각에 의해 제조된 TMCP강(Y강)을 시험재로 채택하여 대입열 용접부 특성을 평가하였다.

실험 강재의 용접 입열량 변화에 따른 용접부 성능을 조사하여 강재의 강도 수준, 제조 조건별 한계 허용 입열 범위를 설정하기 위해 각 강종별로 대표적인 용접방법을 적용하여 Table 2에 나타낸 용접 조건에 의해 실 용접을 행하였다.

선박 및 해양 구조물용 강재인 A강은 생산성 향상을 위해 고능률 자동화 용접이 주로 적용되므로 본 실험에서는 80에서 150kJ/cm 입열량 범위에서 편면 2 pole Tandem SAW법을 적용하였으며 B, C강의 경우 저장용 Tank, 압력용기등의 건조시 수직간 부재의 용접에 주로 적용되는 입향 조건으로 30-80kJ/cm 입열량 범위에서 SMAW법을 적용하였다. 대입열용접용 X, Y강은 A강과 동일한 용접 재료 및 용접법을 적용하여 동일 판 두께(27mm)에 대해 약 130에서 200kJ/cm 범위에서 대입열 용접을 실시하였다.

앞서 선급 고장력강인 A강과 X, Y강은 모두 선급 EH규격을 목표로 제조된 강으로서 모재 및 용접부 성능 평가는 각 선급 협회에서 적용하는 기준이 다르므로 본 연구에서는 영국 선급(LR)의 기준에 따라서 모재는 -40°C에서, 용접열영향부 등은 자동 용접시 재료 평가 기준인 -20°C에서 충격 흡수 에너지가 34J 이상을 만족하는지 여부를 조사하여 평가하였다.

이상의 각 강종별 용접부 시험편은 Macro부식 후 Notch위치를 Weld Metal, Fusion Line(이하 FL), FL에서 2mm또는 4mm위치에 선정하여 표준 Charpy충격 시험편으로 가공한 후 강종별 용접 입열량 변화에 따른 충격 시험을 실시하여 모재 및 용접부 규격 온도에서의 충격 특성 만족 여부 및 Notch 위치별 차이를 조사하였다.

한편 광범위한 용접 입열량(냉각조건) 변화에

Table 1 Chemical compositions of steels investigated

Steel	C	Si	Mn	P	S	Ni	Mo	V	Cr	Nb	Ti	B	Pcm*	Ceq**	Remarks
A	0.14	0.40	1.32	0.016	0.004	0.01	-	0.046	-	0.02			0.23	0.38	HT50
B	0.15	0.28	1.30	0.018	0.005	0.11	0.15	0.035	-				0.24	0.42	HT60
C	0.15	0.22	0.89	0.020	0.005	-	0.17	0.047	0.59	-	0.013	0.0015	0.26	0.48	HT80
X	0.13	0.35	1.43	0.016	0.004	0.11	0.01	0.043	-	-	0.019	-	0.22	0.39	Nor.
Y	0.105	0.22	1.43	0.013	0.004	0.02	0.08	0.040	-	0.01	0.013	-	0.19	0.38	TMCP

\* Pcm=C+Si/30+(Mn+Cr+Cu)/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B(%)

\*\* Ceq=C+Si/24+Mn/6+Ni/40+Cr/5+Mo/4+V/14(%)

Table 2 Welding conditions

Steel	Process & Consumables	Joint Detail	Preheating & Interpass temp. (°C)	Welding Condition				
				Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Speed cm/m	Heat Input (kJ/cm)
A	· One-side SAW · EH14(4.8φ) PF152E		-	L*	850	34	39	80
				T**	650	35	39	
				L	1000	35	35	102
				T	650	38	35	
				L	1050	35	27	153
				T	850	38	27	
B	· SMAW · E9016G (4.0φ)		150	1G	200	26	10	31
				3G	160	23	4.5	49
				3G	160	25	3	80
				1G	200	26	10	31
C	· SMAW · E11016G (4.0φ)		150	3G	180	24	6	43
				3G	180	25	4.5	60

\* L : Leading Electrode, \*\* T : Trailing Electrode

따른 용접부 인성을 용접 열Cycle재현 시험을 통해 조사하고 재현 HAZ조직과의 관련성을 살펴보았다. 용접 열 Cycle은 고주파 유도 가열 방식의 Metal Thermal Cycle Simulator(이하 MTCS)를 이용하여 최고 가열 온도는 용접 열영향부 조립역에 상당하는 1,350°C로 하고 800°C에서 500°C간의 냉각 시간(이하  $\Delta T_{8/5}$ )은 10초에서 1,000초 범위에서 냉각 속도를 변화시켜 부여하였다.

실험 강재의 용접 입열량 변화에 따른 용접부 각 부위별 미세 조직은 광학 현미경 관찰을 통해 용접부 인성과의 상관성을 조사하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3. 1. 50~80kg/mm<sup>2</sup>급 고장력강의 용접 입열량 감수성 평가

Table 3은 실험강재의 기계적 성질을 정리한 것이다. 모든 강종이 규격에서 지정한 인장 특성

Table 3 Mechanical properties of steels used

Steel	Tensile Properties			Impact Properties		
	YP kg/mm <sup>2</sup>	TS kg/mm <sup>2</sup>	EI (%)	vE <sub>T</sub> kg-m	vTrE (°C)	vTrS (°C)
A	35.3 ( $\geq 34.5$ )*	52.9	30	vE <sub>-40</sub> 11.3 ( $\geq 3.5$ )	-40	-36
B	64.5 ( $\geq 50$ )	73.9 (62-74)	27 ( $\geq 19$ )	vE <sub>-10</sub> 16.0 ( $\geq 4.8$ )	-55	-56
C	79.1 ( $\geq 70$ )	85.4 (77.5-91.0)	24 ( $\geq 18$ )	vE <sub>-15</sub> 16.7 ( $\geq 3.6$ )	-55	-53

\* : Specification Requirements

을 만족시키며 충격인성의 경우 A강은 에너지 천이 온도(vTrE)가 약 -40°C 정도인데 비해 B, C강은 -55°C 정도로서 조절 처리에 의해 모재 저온인성이 다소 우수한 값을 나타내었다.

Fig. 1은 A강의 용접입열량 변화에 따른 SAW 용접부 충격시험 결과를 나타낸 도표이다. A강이 선급 EH규격의 용접부 충격흡수 에너지값

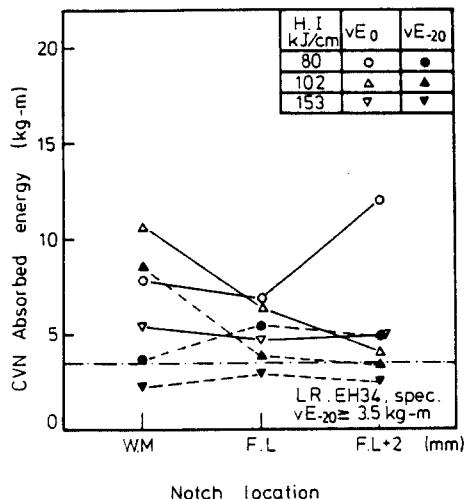


Fig.1 The change of Charpy impact energy with welding heat input for each notch location in welded joint of steel A

( $vE_{20} \geq 3.5 \text{ kg}\cdot\text{m}$ )을 만족하는 입열 적용한계는 약  $80 \text{ kJ}/\text{cm}$ 이며 DH 규격 ( $vE_0 \geq 3.5 \text{ kg}\cdot\text{m}$ ) 적용시에는  $150 \text{ kJ}/\text{cm}$  정도까지 용접이 가능함을 알 수 있었다. HAZ 충격 인성은 입열량 증가에 따라 일의 적으로 감소하여 약  $100 \text{ kJ}/\text{cm}$  이상에서는 EH 규격을 만족시킬 수 없는데 비해 용접금속의 인성은  $100 \text{ kJ}/\text{cm}$  정도의 입열 조건에서 그 이상 또는 이하의 조건에서 보다 훨씬 우수한 충격 특성을 보였다.

B강 및 C강의 입향 SMAW 용접 조건별 충격시험 결과는 Fig. 2와 Fig. 3에 정리하였다. B강의 경우 용접 열 영향부 인성은  $80 \text{ kJ}/\text{cm}$  적용시까지 모재 규격치 ( $vE_{10} \geq 4.8 \text{ kg}\cdot\text{m}$ )를 만족하지만 용접금속의 인성은  $80 \text{ kJ}/\text{cm}$  적용시 급격히 저하되어 통상의 용접재료 적용시 용접부 인성 확보를 위해 약  $60 \text{ kJ}/\text{cm}$  이하로 입열량을 제한해야 되었다.

HT80급 C강의 경우 용접부 인성이 앞서의 두 강종에 비해 상당히 낮은 수준을 보이고 약  $40 \text{ kJ}/\text{cm}$  이상 입열 조건에서는 특히 용접금속의 인성이 문제가 되므로 그 이하로 제한되어야 하였다. 또한 Bond부(F. L.) 인성은 동일한 조질 고장력강인 B강에 비해 훨씬 낮게 나타났으며 이는 고강도 확보를 위해 다량으로 첨가된 합금성분의 화합물 형성에 의한 Bond 취화에 기인한 것으로 생각되었다<sup>2)</sup>.

상기의 세 강종 용접부 인성변화 양상을 부위별

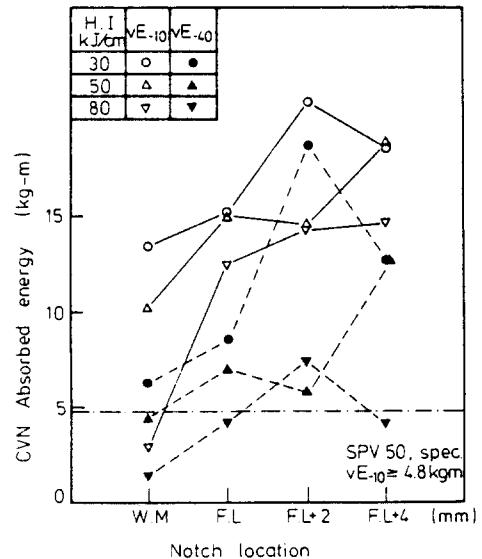


Fig.2 The change of Charpy impact energy with welding heat input for each notch location in welded joint of steel B

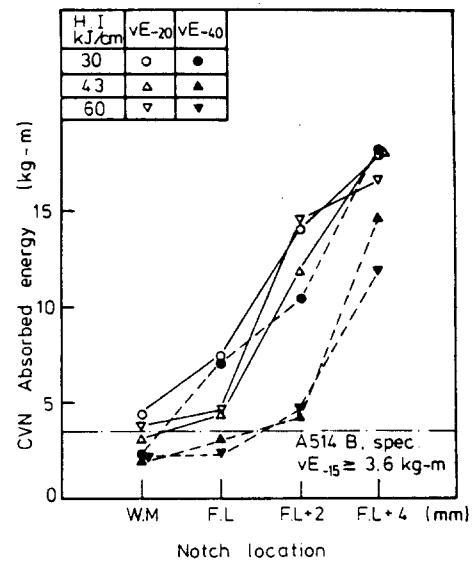
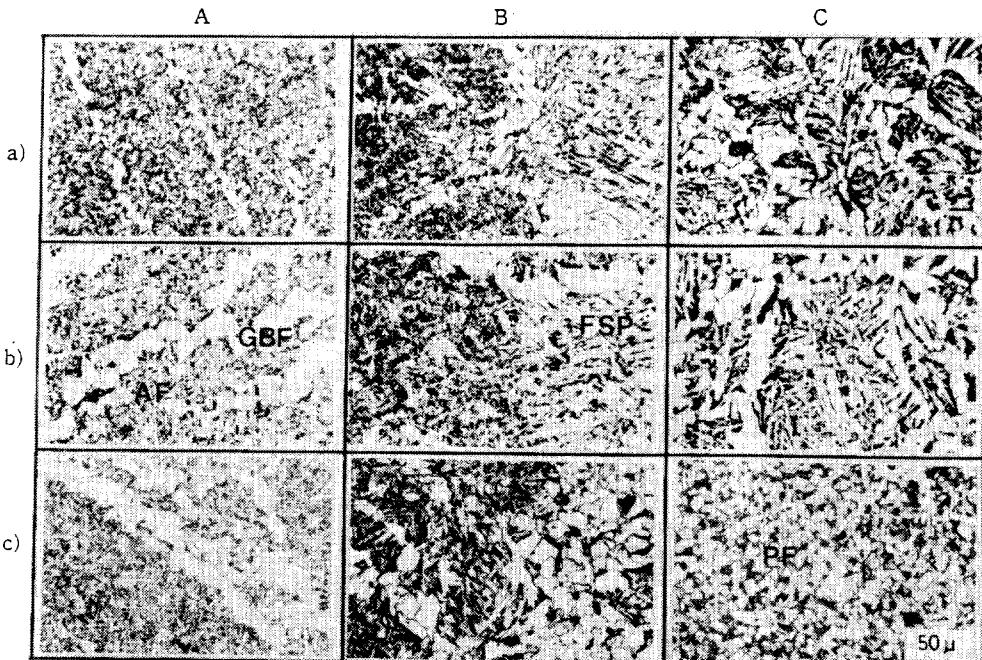


Fig.3 The change of Charpy impact energy with welding heat input for each notch location in welded joint of steel C

조직관찰을 통해 비교 검토하였다. Photo. 1은 A강의 용접입열량별 용접금속, FL, FL+2mm 각 위치에 있어서 현미경 조직을 나타낸 것이다. 용접금속의 조직은 입열량 변화에 관계없이 Grain Boundary Ferrite(이하 GBF) 및 Acicular Ferrite(이하 AF) 주체의 조직으로 되어



**Photo.1** Variation of microstructures in welded joint of steel A for A) W.M, B) F.L and C) 2mm from F.L with welding heat input, a) 80, b) 102 and c) 80kJ/cm

있으며 입열량 증가시 이들 조직이 조대화 되는 경향을 나타내었으며 102kJ/cm과 150kJ/cm조건 사이에는 큰 차이가 보이지 않고 단지 Polygonal Ferrite(이하 PF)조직 분율이 다소 증가함을 알 수 있었다. FL조직은 모든 조건에서 공통적으로 용접금속으로부터 발달한 GBF조직이 FL영역을 통해 전형적인 Epitaxial 성장 거동을 보이며 입열량 증대시 입내 조직이 Ferrite Side Plate(이하 FSP)주체의 조직에서 PF조직 위주로 변화하고 GBF조직이 다소 조대화됨을 관찰할 수 있었다.

FL에서 2mm떨어진 부위의 조직은 FL조직에 비해 GBF조직이 상당히 발달되어 있는 특징을 지녔다. 즉, A강은 HAZ인성의 경우 입열량 증대에 따른 인성 저하 현상은 주로 냉각속도 자연에 의한 Austenite결정립 성장과 이에 따른 GBF 조직의 조대화에 기인한 것으로 생각되었다.

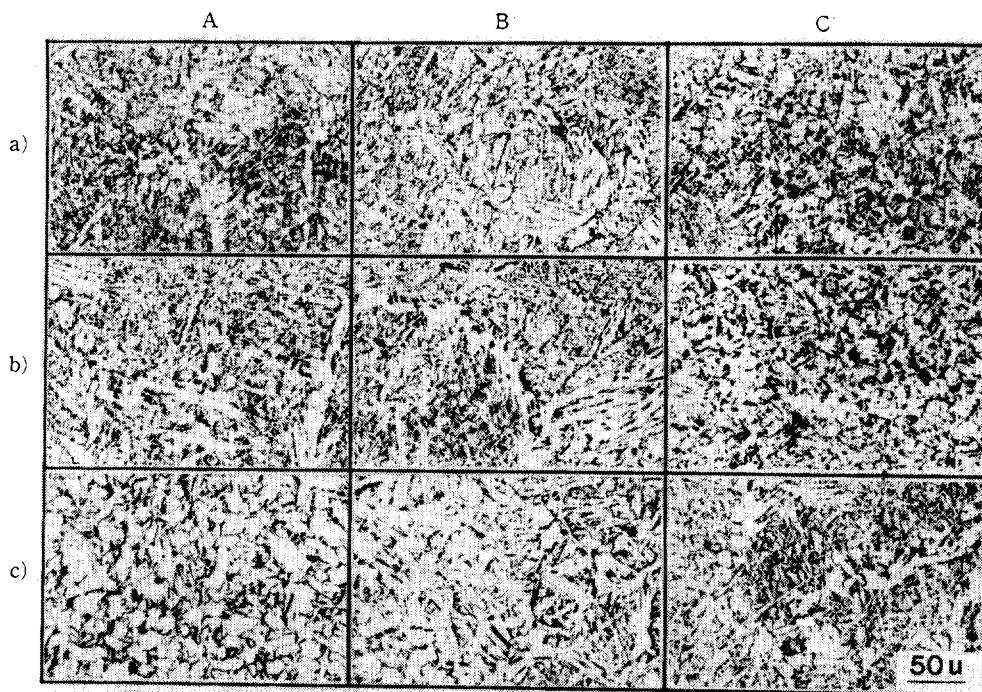
B,C강의 용접부 조직은 Photo. 2 및 Photo. 3에서 나타내었다. 비교적 저입열조건에서 용접금속 조직은 GBF, AF, FSP 등의 조직이 혼재해 있으나 급격한 인성저하가 생긴 80kJ/cm 입열 조건에서 조직은 조대한 PF 조직 주체로 이뤄져 있었다. HAZ 조직은 입열량 증가시 Bainite주체에서

Ferrite중심의 조직으로 변화되었다. C강 용접금속의 경우 본 실험 조건내에서는 입열량에 관계없이 다양한 형태의 미세 Ferrite주체의 조직에 일부 Martensite 또는 Bainite조직이 혼재해 있으며 이는 강도 확보를 위해 다량 첨가된 Ni, Mn, Mo 등의 소입성 효과에 의한 것임을 쉽게 판단할 수 있었다. C강 HAZ조직의 FL부근에서는 앞서 용접 금속에서 잘 발달된 Ferrite 조직의 영향을 받아서 비교적 조대한 Ferrite조직이 용접 금속조직과 일정 방위 관계를 지니며 입열량 증대에 따른 결정립 성장 거동을 뚜렷이 나타내었다.

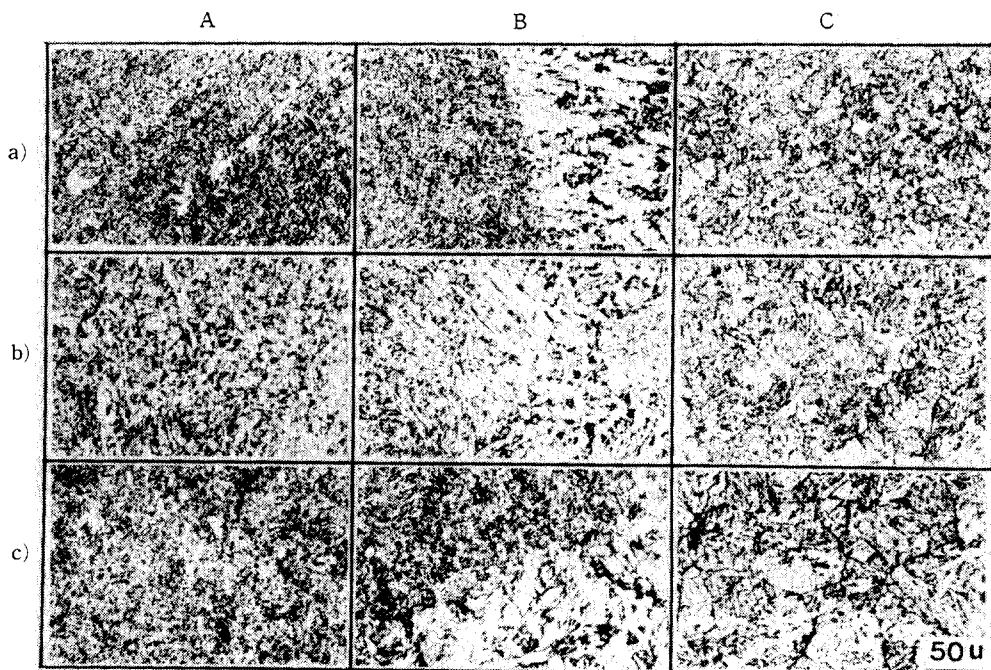
### 3.2. TMCP강과 Ti첨가 Normalized강의 대입열 용접특성 평가

Fig. 4는 Ti첨가 및 Normalizing처리에 의해 제조된 HT50급 대입열 용접용강인 X강과 제어압연에 이어 가속냉각처리에 의해 제조된 동등 강도 수준의 TMCP강인 Y강의 모재 충격 특성을 조직과 함께 비교한 것이다.

X강은 0°C에서의 흡수 에너지(vEo) 및 에너지 천이 온도(vTrE)가 각각 26kg·m, -40°C수준인데 비해 Y강의 경우 Upper Shelf Energy가 약 40kg·m이고 -40°C까지는 흡수에너지의 천이현



**Photo.2** Variation of microstructures in welded joint of steel B for A) W.M, B) F.L and C) 2mm from F.L with welding heat input, a) 30, b) 50 and c) 80kJ/cm



**Photo.3** Variation of microstructures in welded joint of steel C for A) W.M, B) F.L and C) 2mm from F.L with welding heat input, a) 31, b) 43 and c) 60kJ/cm

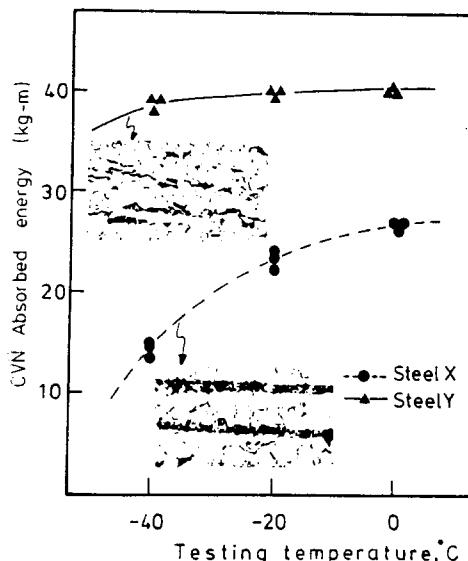


Fig.4 Comparison of Charpy impact properties of high heat input weldable steels

상이 전혀 나타나지 않았다. 이는 모재 조직에서 알 수 있듯이 TMCP강의 경우 제어 압연 및 가속냉각에 의한 최종 Ferrite조직의 미세화와 변형대 및 저온 변태 조직 형성을 통한 강도 상승 효과를 이용하여 탄소를 비롯한 경화원소의 첨가량을 줄일 수 있으므로 통상재에 비해 극히 우수한 모재 인성을 나타내었다.

X강의 용접입열량 변화에 따른 평면 1층 SAW 용접부위별 충격시험 결과를 Fig.5에 도시하였다. 그림에서 알 수 있듯이 선급 DH규격은 본 실험에서 적용한 최대 입열조건인 197kJ/cm까지 적용 가능하였으나 EH규격은 134kJ/cm 이상의 입열적용시 규격하한 이하로 인성이 저하됨을 보였다. 이 경우 HAZ 인성은 입열량 증가에 따라 일의적으로 감소하지만 용접금속 인성은 앞서 A강에서와 같이 134, 165kJ/cm입열 적용시 보다 197kJ/cm조건에서 보다 높은 인성을 나타내어 HAZ인성과는 다른 경향을 보였다. 한편 Y강의 경우 Fig.6에서 나타나듯이 197kJ/cm까지 적용시에도 EH규격을 충분히 만족시킬 수 있었다. Y강의 경우도 X강에서와 같이 용접 금속 인성이 최고 입열량 197kJ/cm 조건에서 가장 우수하며 HAZ인성은 입열량 증가시 다소 감소하기는 하지만 전체적으로 매우 높은 인성을 보였다. 이와 같이 SAW용접 금속의 인성 변화는 HAZ 인

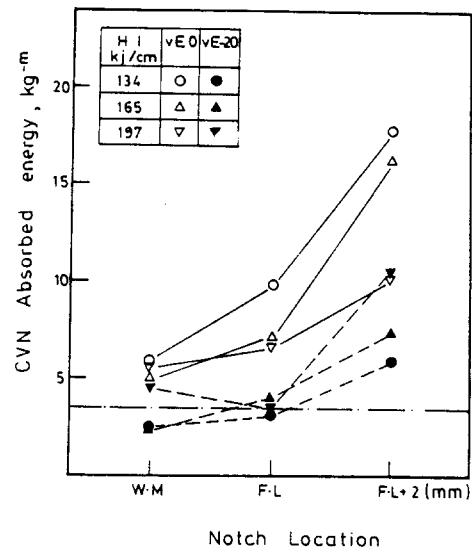


Fig.5 The change of Charpy impact energy with welding heat input for each notch location in the welded joint of steel X

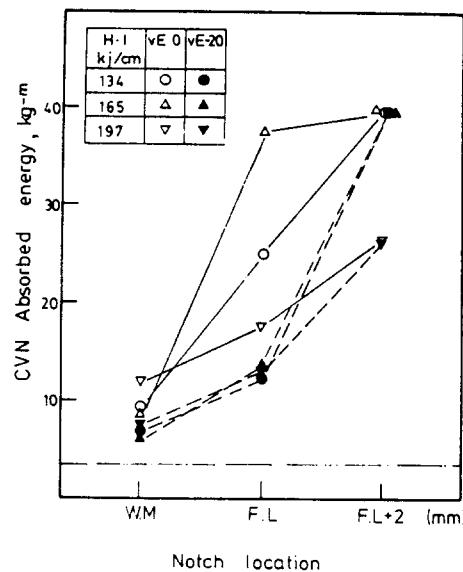
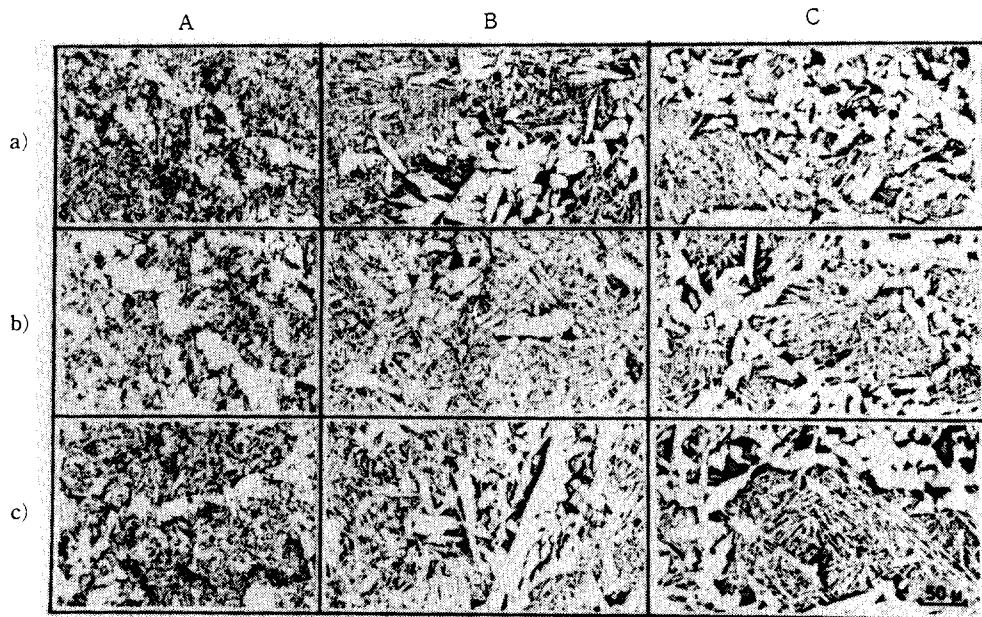


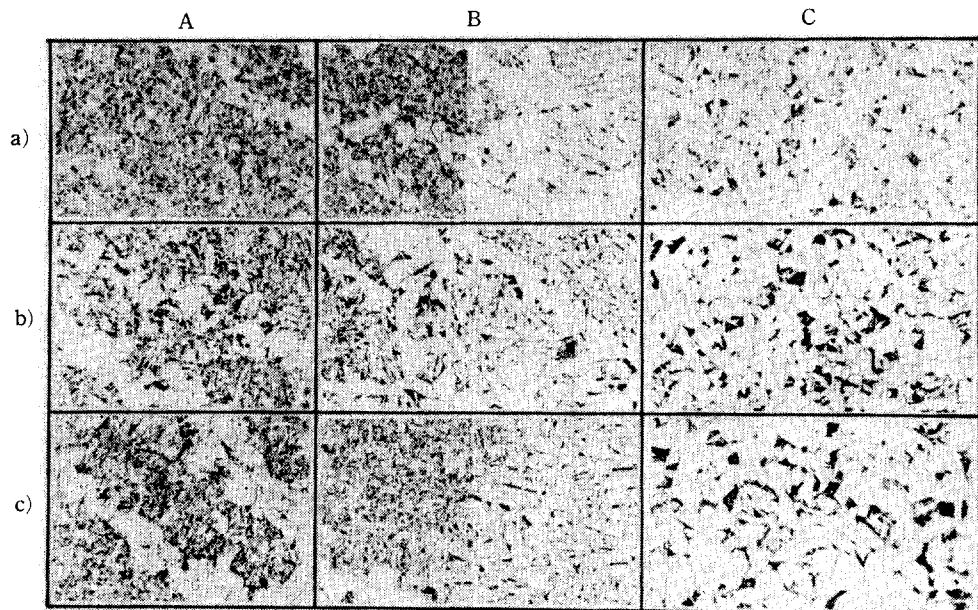
Fig.6 The change of Charpy impact energy with welding heat input for each notch location in welded joint of steel Y

성과는 달리 입열량 증대에 따라 일의적으로 감소하는 것이 아니고 용착 금속 중 산소 함량등과 밀접한 관계가 있음을 확인하였으나 그 논의는 본 논문에서 제외시켰다.

Photo.4 및 Photo.5는 X, Y강의 입열량 변화



**Photo.4** Variation of microstructures in welded joint of steel C for A) W.M, B) F.L and C) 2mm from F.L with welding heat input, a) 134, b) 165 and c) 197kJ/cm



**Photo.5** Variation of microstructures in welded joint of steel C for A) W.M, B) F.L and C) 2mm from F.L with welding heat input, a) 134, b) 165 and c) 197kJ/cm

에 따른 용접부 Notch 위치별 마세조직을 관찰한 것이다. X강 용접금속의 경우 전 입열범위에서 GBF 및 AF조직이 주를 이루고 조직적으로 큰 차이는 보이지 않았으며 이러한 경향은 HAZ조직

에서도 유사하게 나타났으나 단지 FL에서 2mm 떨어진 부위에서는 입열량 증대에 따라서 Prior Austenite 결정립 조대화와 이에 따른 입내 FSP 조직이 크게 발달되어 있음을 알 수 있었다. Y강

용접금속 조직은 X강과 유사하였으며 이들 두 강종의 용접금속 인성 차이는 대입열 용접 적용시 모재로 부터의 성분 회석에 의한 결과로 판단되었다. 앞서 인성 시험 결과에서 나타났듯이 Y강의 우수한 인성은 HAZ조직관찰을 통해 전체적으로 미세한 Ferrite 주체 조직으로 구성되어 있음을 미루어 볼 때 인성과 조직의 상관성을 쉽게 예측할 수 있었다.

Fig. 7은 X, Y강의 용접입열량별 용접부 연속 정도 측정 결과를 비교한 그림이다. X강의 경우 165kJ/cm까지는 모재(Hv 150)와 용접금속의 경도 차이가 약 Hv25에 지나지 않았으며 약 200 kJ/cm로 증대되면 그 차이가 Hv 40정도로 커졌다. 즉, 입열량 증대에 따라 모재로 부터의 dilution 이 커져서 용접금속이 모재로 부터 받는 영향이 증대됨을 알 수 있었다. X강의 HAZ경도는 입열량에 관계없이 대개 Hv-153-195범위에서 변화하였다. Y강은 모든 적용 입열 범위에서 거의 동일한 경도분포를 보였으며 모재는 Hv 140, HAZ는 Hv145-170범위의 경도값을 지녀, X강에 비해 낮은 용접경화성을 나타내었다. 또한 TMCP강의 일반적인 현상으로 대입열용접시 문제로 대두되는 HAZ연화현상<sup>3)</sup>은 본 시험재에서는 나타나지 않았으며 전 HAZ영역에서 모재 이상이 경도값을 보였다. 이는 Nb의 유효 활용외에도 기존의 TMCP강들에 비해 다소 높은 C 및 Ceq 함

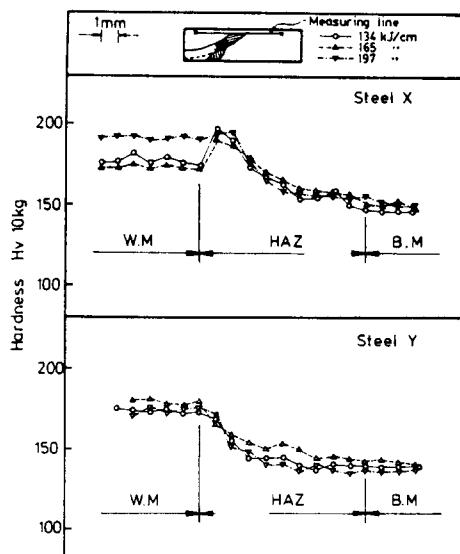


Fig.7 Hardness distribution in weldment of high heat input steels

을 지니고 약 0.1%의 Mo첨가를 행한 화학 조성의 특성에 어느 정도 기인한 것으로 생각되었다.

### 3.3. 용접 열 Cycle 재현에 의한 인성 평가

Fig. 8은 50-80kg/mm<sup>2</sup>급 고장력강의 냉각 속도 변화에 따른 조립역 열영향부에 상당하는 열cycle을 재현한 시험편의 충격 시험 결과를 비교한 것이다.

A, B, C 세 강종이 모두 빠른 냉각 속도(저입열 조건)하에서는 비교적 양호한 인성을 보이지만  $\Delta T_{8/5}$ 가 30초 이상이 되면 전체적으로 인성이 매우 낮아졌다.  $\Delta T_{8/5}$ 가 10초일 때 흡수 에너지는 HT 60급 B강이  $vE_{20}$ 가 15.4kg-m로 가장 높고 A, C강은 각각 9.4, 4.3kg-m의 값을 보였다. Photo. 6은 세 강종의 냉각 조건별 최종 변태 조직을 비교한 사진이다. 저입열 조건에서 가장 높은 인성을 지닌 B강의 경우 Martensite와 Lower Bainite가 적절히 혼재된 조직을 나타내며 A강은 Bainite, C강은 Martensite주체의 조직을 나타내어 고장력강의 HAZ인성 향상을 위해서는 Martensite와 Bainite 2상 조직의 형성이 바람직함을 알 수 있었다.

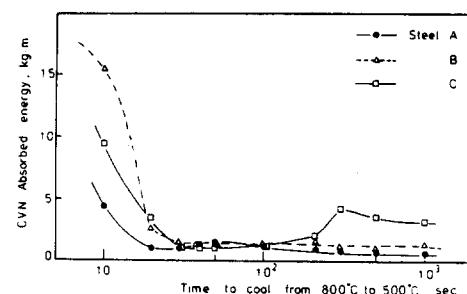


Fig.8 Effect of cooling time on Charpy impact energy of simulated HAZ for various high strength steels (tested at -20°C)

Fig. 9는 대입열 용접용 강재의 재현 HAZ충격 시험 결과로써 Ti 첨가, Normalizing처리한 X강이나 TMCP형 Y강의 경우 앞서의 통상재 A강에 비해 HAZ인성이 우수하며 통상재의 경우 냉각 시간 증가에 따라 인성이 일의적으로 감소하는데 비해 X, Y강의 경우  $\Delta T_{8/5}$ , 50초 냉각 조건을 기점으로 인성 회복 현상을 보여 Y강은 모재보다 우수한 인성을 나타내었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 TMCP강의 경우 C, N등의 저감에 의한

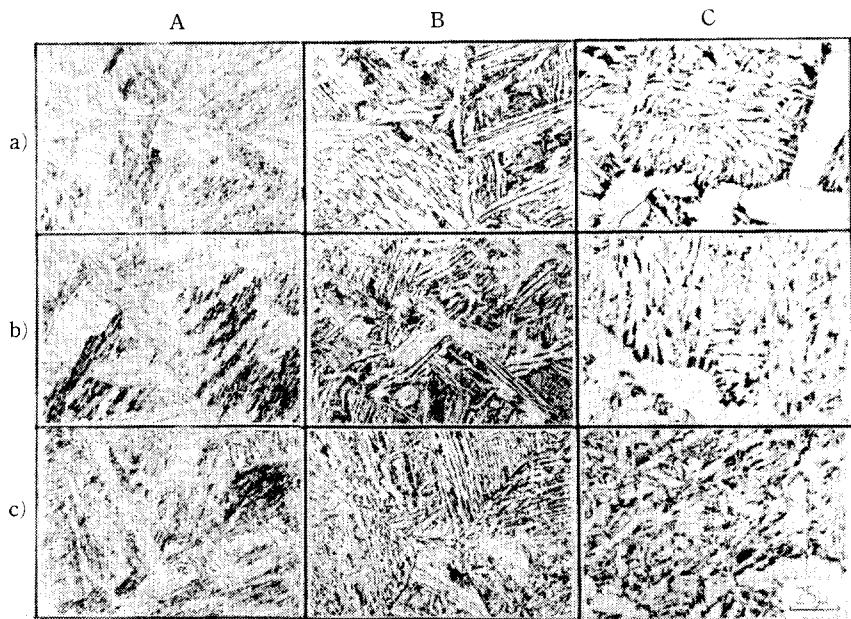


Photo.6 The change of simulated HAZ microstructures in a) steel A, b) steel B and c) steel C with cooling time from 800°C to 500°C, A) 10, B) 50 and C) 300sec

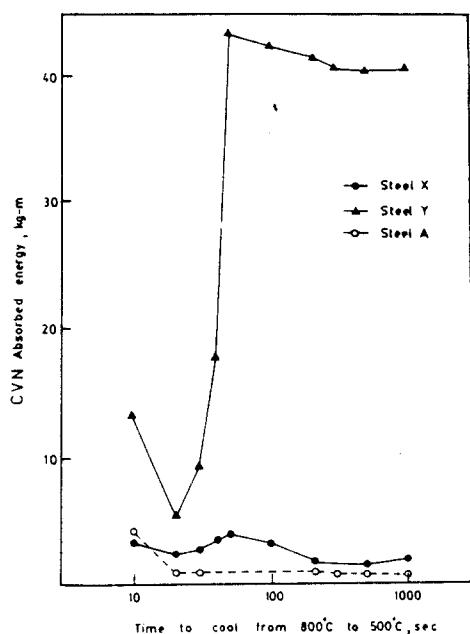
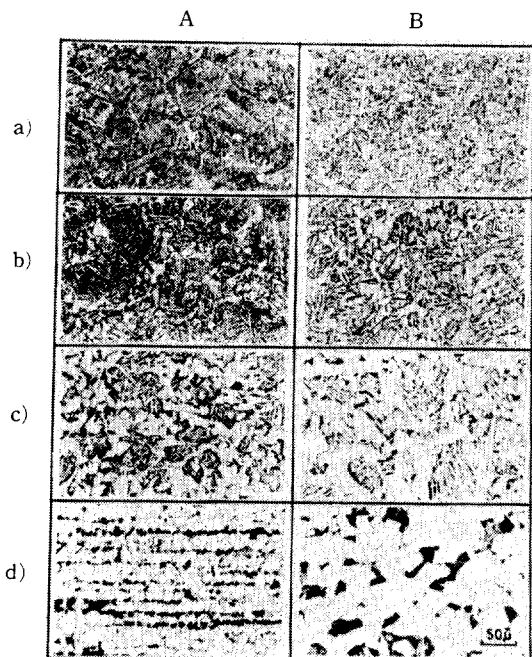


Fig.9 Effect of cooling time on Charpy impact energy of simulated HAZ for high heat input weldable steels(tested at -20°C)

기자 조직의 인성 개선과 Ti, Nb등 탄, 질화물 형성 원소의 유효 활용에 의한 용접부 조직의 균일 미세화 등이 복합적으로 작용하여 나타난 결과이며 대입열 용접상당의 냉각 조건하에서도 인성이 저하되지 않는 것은 Ti, Nb의 복합 첨가시 미량원소의 상호 고용에 의한 복합 석출물의 형성으로 석출물의 안정성 즉, 용해도가 변화되므로 Ti 단독 첨가시 상당량의 Ti계 석출물이 고온 서냉의 용접 열 Cycle을 받는 도중 용해되어 고유의 효과를 상실하는데 비해 고온 안정성이 높아진 것에 기인한 것으로 생각된다<sup>4)</sup>.

Photo.7은 X, Y강의 냉각 조건별 HAZ최종 변태 조직을 비교한 사진이다. X강의 경우  $\triangle T_{8/5}$  가 약 50초 조건에서 Ferrite변태가 상당히 진행되었음을 알 수 있었다.

또한 X강의 입내 조직에서는 Ferrite Lath사이에 탄화물 석출이 Y에 비해 현저히 많이 생겨 있으며 이러한 고탄소 함유 탄화물들이 용접 경화성을 높이고 취성 파괴의 발생 기점으로 작용하여 앞서 충격 시험에서와 같은 낮은 인성을 나타낸 것으로 판단된다.



**Photo.7** The change of simulated HAZ microstructures in a) steel X, b) steel Y and c) steel C with cooling time from 800°C to 500°C, a) 20, b) 50 and c) 210sec and d) 1,000sec

#### 4. 결 론

인장강도 50~80kg/mm<sup>2</sup>급 후판 고장력강 및 HT50급 대입열 용접용강과 TMCP강의 용접입열량 감수성 평가 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 강재의 제조조건 및 강도수준별 적용 가능한 한계 입열량은 통상의 HT50급 선급재의 경우 DH 및 EH 규격 만족을 위한 허용 가능 입열량은 각각 150, 80kJ/cm정도이며 HT60, HT80급 조질 고장력강의 용접 열영향부는 각각 80, 60

kJ/cm 용접 입열량 적용시에도 모재 인성 규격을 만족시킬 수 있었다.

2) Ti첨가 대입열 용접용강과 TMCP강의 편면 1층 SAW대입열 용접시 전자의 경우 선급 DH 및 EH규격 적용시 허용 한계 입열량이 각각 200 kJ/cm 및 130kJ/cm 이하인데 비해 후자의 경우 본 실험 적용 최대 입열 조건인 200kJ/cm까지 EH 강재로서 사용가능하였다.

3) 용접부 인성을 강재에 의해서만이 아니고 용접재료의 영향을 크게 받으며, 이는 강도가 높아질수록, 용접입열량이 증대될수록 야금학적 변화 정도가 커져 용접금속인성 저하가 용접 입열량 제한에 지배적으로 작용하였다.

4) TMCP강의 합금 설계시 대입열 용접부 인성 개선과 HAZ연화 방지를 위해서는 Ti과 Nb의 복합 첨가와 적정 C 및 Ceq수준 유지, 필요시 미량의 소입성원소 활용등이 효과적으로 작용함을 알 수 있었다.

#### 참고문헌

- 1) Material division of JPVRC : 溶接繼手部の靱性に及ぼす各種要因, 日本壓力容器研究會議, (1983), p. 10.
- 2) 坪井, 平井 : 調質鋼 溶接熱影響部の組織とじん性, 溶接學會誌, Vol. 50, No. 1. (1981), p. 28.
- 3) 失島, 川野, 井上, 十河, 佐藤, 豊田 : TMCP型 HT50鋼板のHAZ軟化を有する繼手強度, TMCP鋼の溶接冶金 Symposium, 日本溶接學會, (1985), p. 140.
- 4) 橋本, 岡口 : Ti系複合添加鋼の析出挙動と強度特性, 鐵と鋼, Vol. 72, No. 5(1986), p. S467.