

《論 文》

60kg/mm² 급 조질고장력강의 용접입열량에 따른 기계적 특성 변화

김은석 · 박경채 · 정인삼

*장원기능대학 용접학과

경북대학교 금속공학과

The Change of Mechanical Properties on Weld Heat Input in
60kg/mm² Quenched and Tempered High Strength Steel

O. S. Kim*, K. C. Park and I. S. Chung

*Dept. Welding, Changwon Industrial Masters' College, Changwon 641-772

Dept. Metallurgical Eng. Kyungpook National University, Taegu 702-701

ABSTRACT

For the purpose of studying the change of mechanical properties of weld parts, shielded metal arc welding, one-pole and two-pole submerged arc welding were accomplished weldability on 60kg/mm² quenched and tempered high strength steel.

Charpy impact values of the weld metal in welded parts by SMAW and SAW were lower than those of the heat affected zone and increased in order of bond, coarsened, refined and carbon spheroidized regions in the heat affected zone.

Grain size of prior austenite or M-A constituent did not significantly affect toughness of welded parts, but precipitated carbide films which forms at the grain boundaries or within matrix and volume fraction of pearlite were most important factor for toughness.

1. 서 론

용접구조물이 대형화 되어감에 따라 용접방법도 대입열량으로 시공되는 추세이며, 용접시공의 고능률화와 용접이음부의 안정성 확보라는 취지에서 대입열 용접부의 인성개선이 보다 중요한 과제로 대두되고 있

다. 일반적으로 고장력강은 입열량이 증가하면 열영향부의 인성은 저하된다고 알려져 있으며, 이와같은 인성저하를 방지하기 위해서 여러가지 연구가 수행되어져 왔다¹⁾. 특히 모재와 근본적으로 동등한 강도와 인성을 갖는 용접부를 얻기 위해 새로운 용접와이어 개발에 눈을 돌리게 되었다. 용접금속에 침상 페라이트

량을 조정하기 위해 용접 와이어에 Si, Mn, Al 및 Ti 등과 같은 복합탄산제²⁾와 Nb, V, Ca, Ni, Cr, Mo 및 B 등과 같은 여러 합금원소³⁾를 첨가하는 시도가 이루어졌다.

지금까지 연구결과에 의하면 대입열 용접 열영향부의 인성저하는 일반적으로 prior 오스테나이트 결정립의 조대화⁴⁾, 상부 베이나이트의 생성⁵⁾, 표면단위나 페라이트 lath폭의 증가 또는 M-A constituent⁶⁾의 생성 등에 의한 것이라고 보고 되고 있다. 특히 용접금속과 열영향부의 경계부 근방의 인성은 입열량에 의해 베이나이트 조직이 형성된 경우 또는 다른 조직과 혼합조직을 나타내는 경우 또 prior 오스테나이트 결정립이 조대화하는 경우 등에 저하되는 것으로 알려져 있으나⁷⁾, 경계부의 인성을 지배하는 요인이 아직 명확하게 규명되었다고는 말하기 어렵다.

따라서, 본 연구에서는 용접경계부의 인성을 저하시키는 지배적인 원인을 규명하기 위해 용접 입열량의 증가에 따라 용접금속 및 열영향부의 취화거동을 prior 오스테나이트 결정립 조대화와 광학현미경으로 관찰하기 힘든 M-A constituent, 입계 및 입내 탄화물 석출 현상 등을 투과전자현미경으로 관찰한 2차상⁸⁾들과 충격치와의 관계를 규명코자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용한 모재는 두께 22mm의 ASTM A 537-2에 해당하는 재료로서 910℃ 정도에서 두께 1.6mm당 20분으로 roller quenching하였고, 다시 630℃에서 두께 1.9mm당 20분으로 tempering 후 공냉한 60kg/mm²급 조질 고장력강이다. Table 1은 모재의 화학성분 및 기계적 성질을 나타낸 것이다.

모재의 용접을 위하여 용가제로서 수동용접에서는

저수소계 고장력강용 AWS E9016-G 용접봉을, 자동용접에서는 AWS F7A8-EH14, φ4.8mm를 사용했다.

용접은 입열량의 변화를 주기 위해 다중수동과 one-pole 및 two-pole Tandem자동 서브머지드 방법으로 하였다. 그리고 one-pole로는 양면용접, two-pole로는 한쪽 편면 용접을 하였다. 각 용접 조건은 Table 2에 나타내었다. 수동용접에서는 용접입열이 17kJ/cm로 비교적 적었고 one-pole 용접에서는 57kJ/cm 및 two-pole 용접에서는 104kJ/cm로 대입열이다.

Table 2. Welding condition

Welding Cond. Process	Electrode	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat input (kJ/cm)	Remarks
SMAW		160~190	24	15	17	
SAW(one pole)		750	38	30	57	DCSP
SAW(two pole)	L*	800	45	35	104	DCSP
	T**	750	33			AC

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

충격치는 용량이 30kgm(259J)인 샤피 충격시험기(MFL.PSW 300)을 이용하여 ASTM E23의 규정⁹⁾에 따라 시험하여 측정하였다. 충격시험편은 Charpy V-notch 시험편으로써 판 표면으로부터 5mm 정도 기계가공 후 시험편을 채취했다.¹⁰⁾

시험은 모재, 용접금속, 및 열영향부를 구분하여 하였다. 여기서 열영향부는 15% HNO₃용액으로 macro 부식 시킨 후 노치 위치를 용접금속과 열영향 경계부, 결정립 조대화부, 결정립 미세화부, 뜨임부로 구분하였다. 또 용접금속은 노치를 용접금속부의 중심부에 두었으며 모재에는 압연방향에 대한 두께방향으로 했다.

충격 시편의 파단면은 주사전자현미경(Hitachi×600)을 이용하여 관찰하였으며 가속전압은 20kV로 하였다.

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of base metal

Base metal A 537-2 (22mm)	Chemical composition(wt%)									Mechanical property				Ceq*	Pcm**
	C	Si	Mn	P	S	Cu	Al	Cr	V	YS	TS	EL	V-charpy		
										(kg/mm ²)	(%)	(%)	(-20℃)		
	.14	.35	1.38	.009	.003	.016	.049	.069	.013	52	62.7	29	28.2	.339	.2067

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

**Pcm=C+Mn/26+Si/30+Cu/20+Ni/60+Mo/15+V/10+5B(%)

미세조직 관찰은 투과전자현미경(JEOL-JEM 2000 FX II)을 이용하였으며, 사용된 가속전압은 200kV로 하였다. 투과전자현미경 조직관찰용 박편은 다이아몬드 절단 휠로 0.3mm정도 두께로 절단하여, 0.1mm이하로 기계연마한 후 3mm직경으로 펀칭하여 제트연마하였다. 이때 전해연마액은 20% 과염소산과 80% 에타놀이, 전해액의 온도는 -40℃였으며, 전압은 40V로 하였다.¹¹⁾

M-A constituent 분률측정은 다결정 시료의 잔류 오스테나이트 양을 정량적으로 측정하는 목적으로 마르텐사이트와 오스테나이트의 두 상만 함유한다는 전제하에서 X선 회절법에 의한 직접비교법을 이용하였다.

3. 실험결과

3. 1. 용접부의 충격에너지 특성

Fig. 1은 용접입열 변화에 따른 용접부를 용접금속부(WM), 열영향부(HAZ), 모재부(BM)로 나누어서 Charpy 충격 흡수에너지(-20℃)를 구한 결과이다.

열영향부는 다시 자동용접에서는 용접금속과 열영향부의 경계부(Bond), 조대화부(HAZ1), 미세립부(HAZ2), 탄화물이 구상으로 석출된 트립부(HAZ3)로 구분하였고 수동용접에서는 열영향부 폭이 좁아 경계부와 미세립부(HAZ1)로 구분하였다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 용접금속부에서 흡수에너지가 가장 낮

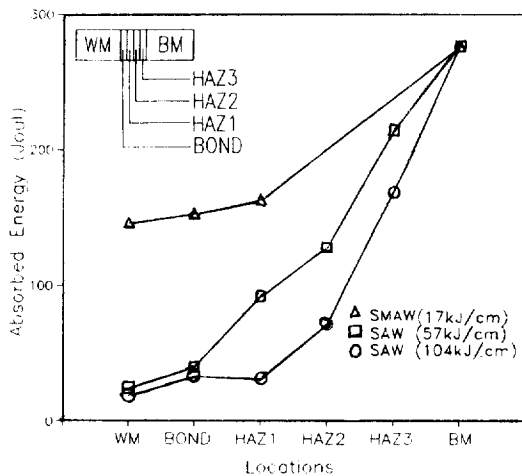


Fig. 1. Charpy test absorbed energy on each zone of weld at -20℃

으며 열영향부에서는 경계부가 대체로 제일 낮게 나타났다.

3. 2. 충격시편의 파단면 관찰

Photo. 1은 용접입열 변화에 따른 각 용접금속 중앙

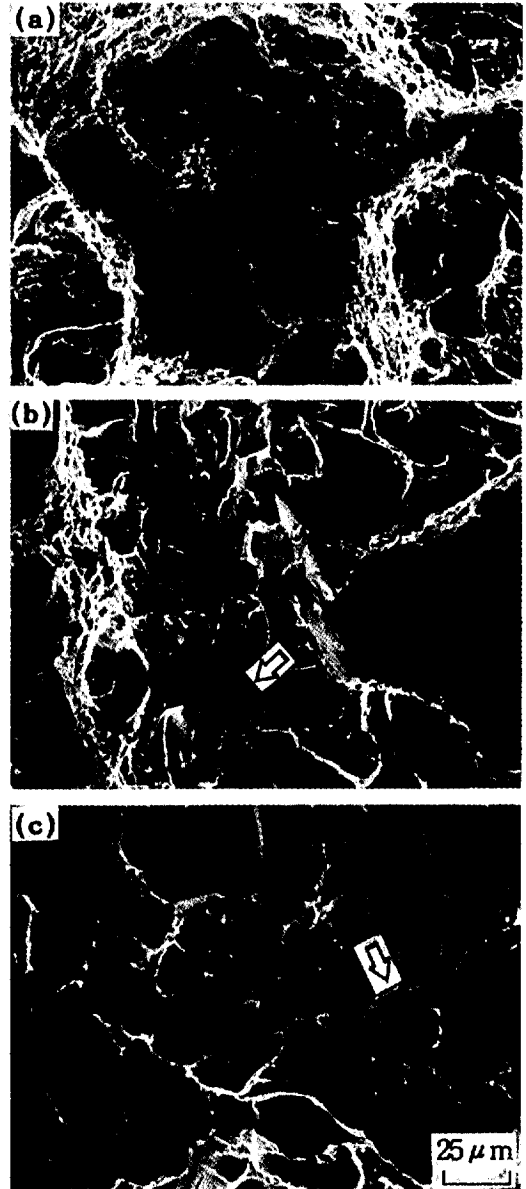


Photo. 1 SEM fractographs of WM at -20℃
 (a) SMAW(17kJ/cm)
 (b) SAW(57kJ/cm)
 (c) SAW(104kJ/cm)

부의 충격시편 파단면의 주사전자현미경 사진이다. (a)는 수동 용접부 경우로써, 적은 입열과 다층 용접으로 인한 뜨임효과를 받아 일부 미세한 덩플도 보이고 전반적으로 파면단위가 미세하여 인성이 우수함을 나타내 주고 있다. (b)는 one-pole 자동용접부의 경우이고, (c)는 two-pole 자동용접부의 경우로써 전형적인 벽개 파괴 양상을 나타내며 파면단위가 크고, river(화살표)가 facet증상부로부터 주변을 향하고 있는 것이 있다. 이것은 다수의 미세한 크랙이 합해져 파괴된 모양을 나타낸다.

Photo. 2는 two-pole 자동용접 열영향부의 주사전자현미경 파단면사진을 나타낸 것이다. (a)는 경계부로서 prior 오스테나이트의 조대화, ferrite side plate 입계의 필럼형태의 탄화물 석출현상 등으로 river(화살표)패턴을 나타내는 전형적인 벽개파괴 양상을 보인

다. (b)는 열영향부중 결정립의 조대화된 구역(HAZ1)으로서 경계부와 비슷한 파괴형태이나 파면단위가 경계부보다 작은 것을 알 수 있으며, (c)는 미세화 구역(HAZ2)으로 파면단위가 아주 미세하여 인성이 보다 우수할 것으로 예상할 수 있고, (d)는 탄화물이 구상으로 석출된 뜨임부(HAZ3)로써 가느다란 포물선을 닮은 연성이 tear 덩플이 보이고 노치 아래부의 크랙 시작점으로 방향을 하고 있다.

Photo. 3은 수동용접 열영향부와 모재의 충격시편 파단면의 주사전자현미경 조직을 나타낸 것이다. (a)는 수동용접의 경계부로서 약간의 벽개파괴와 microvoid coalescence의 두가지 파괴기구 양상을 보여준다. (b)는 미세화부(HAZ1)인데 결정립 미세화로 파면단위가 아주 미세함을 알 수 있다. (c)는 모재로써 등축정 덩플이 나타나고 있으며, 전반적으로 tear 덩플을 나타내

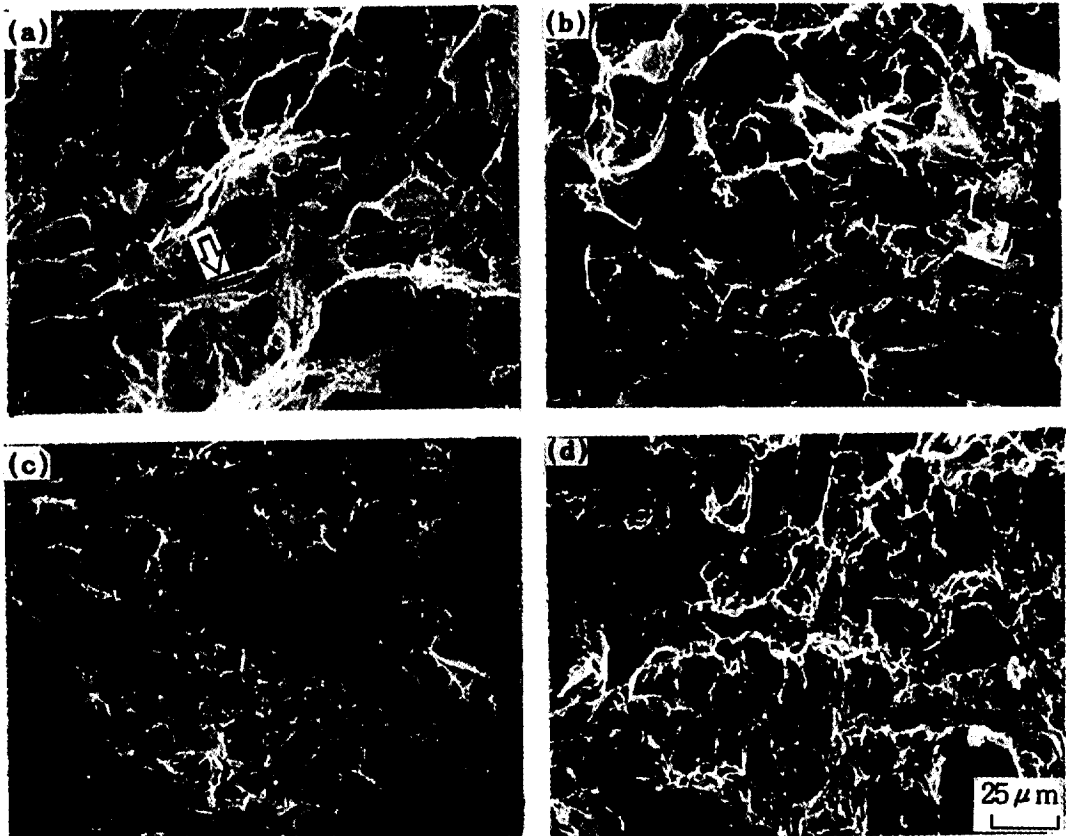


Photo. 2 SEM fractographs of HAZ using SAW (104kJ/cm) at -20°C
 (a) BOND (b) HAZ 1 (c) HAZ 2 (d) HAZ 3

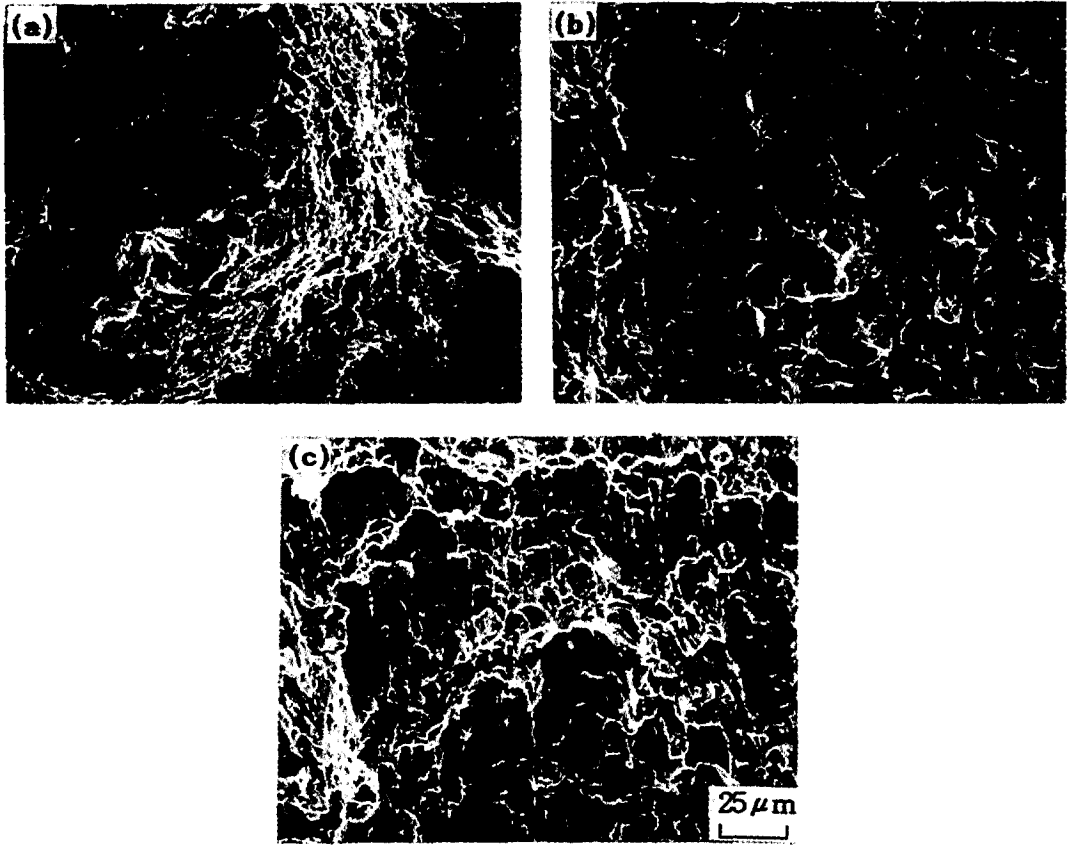


Photo. 3 SEM fractographs of SMAW (17kJ/cm) and base metal at -20°C

(a) BOND (b) HAZ 1 (c) Base metal

어 연성파괴 양상을 나타내고 있다. 따라서 파단면의 주사전자 현미경 형상은 Fig. 1의 충격흡수에너지와 비교하면 잘 일치하는 것을 알 수 있다.

3. 3. 미세조직

Photo. 4는 용접금속부의 투과전자현미경사진이다. 입열량 17kJ/cm (a)는 적은 용접입열로 다층용접한 결과 결정립이 대체로 미세하고 용접중 뜨임효과를 받아서 결정립계 및 입내에 탄화물이 구상으로 석출된 것을 볼 수 있다. 입열량 57kJ/cm (b)와 입열량 104kJ/cm (c)에서는 느린 냉각속도로 인해 결정립계를 따라서 필립형태의 탄화물(화살표)이 석출된 것을 볼 수 있으며, 특히 (c)에서는 탄소확산이 충분히 이루어져 $\gamma \rightarrow \alpha$ 변태시 많은 양의 퍼얼라이트(화살표)가 형성된 것을 볼 수 있다.

Photo. 5는 열영향부중 결정립 조대화 영역의 투과전자현미경사진이다. 입열량 17kJ/cm (a)는 다층용접으로 인한 뜨임효과를 받아서 침상 페라이트 입계에 탄화물이 구상(화살표)으로 석출된 것을 볼 수 있으며, 퍼얼라이트 조직은 나타나지 않았다. 입열량 57kJ/cm (b)와 입열량 104kJ/cm (c)는 용접금속부와 같이 느린 냉각속도로 인해 결정립계를 따라서 필립형태의 탄화물(화살표)이 석출된 것을 볼 수 있으며, 많은 양의 퍼얼라이트가 형성되어 있었으며, (b)보다 (c)가 퍼얼라이트 양이 많은 것을 알 수 있다.

Photo. 6은 열영향부중 결정립 미세화 영역의 투과전자현미경사진이다. 수동용접인 (a)에서는 대부분 미세한 페라이트로 이루어져 있으나, 자동용접인 (b), (c)에서는 미세한 퍼얼라이트와 페라이트로 이루어져 있으며, 결정립 조대화 영역과 같이 입열량 57kJ/cm (b)보다



Photo. 4 Transmission electron micrographs of WM
(a) SMAW(17kJ/cm)
(b) SAW(57kJ/cm)
(c) SAW(104kJ/cm)

Photo. 5 Transmission electron micrographs of coarsened grain regions of HAZ
(a) SMAW(17kJ/cm)
(b) SAW(57kJ/cm)
(c) SAW(104kJ/cm)



Photo. 6 Transmission electron micrographs of refined grain regions of HAZ
 (a) SMAW(17kJ/cm)
 (b) SAW(57kJ/cm)
 (c) SAW(1040kJ/cm)

입열량 104kJ/cm (c)에서 퍼얼라이트량이 많아진 것을 알 수 있다.

4. 고 찰

용접금속의 인성을 지배하는 여러가지 요인으로서 용착금속중의 불순원소나 합금원소 등이 화학조성 및 용접입열량, 용접부의 냉각속도 등의 용접조건 등을 들 수 있다.

Fig. 1에서와 같이 용접입열이 작은 수동용접에서 용접금속의 인성이 우수한 것은 냉각속도가 비교적 빠르고, 다층용접으로 인한 조질효과를 받아 대부분이 뜨임 마르텐사이트 및 미세한 침상 페라이트들이 Photo. 4 (a)와 같이 서로 interlocking되어 있기 때문으로 생각되며, 자동용접에서 인성이 저하된 것은 높은 용접입열로 인한 냉각속도가 지연되어 prior 오스테나이트 결정립계를 따라 입계페라이트 생성과 성장이 증가하고 조대한 ferrite side plate 조직이 많아지며 Photo. 4 (b), (c)에서와 같이 입계에 필름형태의 탄화물이 석출되며 충분한 탄소의 확산에 의해 퍼얼라이트 조직이 나타나기 때문이다.

Fig. 1에서 보면 수동용접에서는 열영향부도 인성이 우수하게 나타나고, 입열이 높은 자동용접에서는 용착금속부와 함께 열영향부도 대단히 취화하다는 것을 알 수 있으며, 그 중에서도 경계부가 비교적 가장 인성이 낮게 됨을 알 수 있다. 이는 수동용접에서는 Photo. 2 및 3 (a)에서와 같이 비교적 빠른 냉각속도와 다층용접으로 인한 뜨임효과를 받아서 결정입계 및 입내에 구상의 탄화물이 석출되며 퍼얼라이트 조직은 나타나지 않았기 때문이다. 자동용접에서 인성이 낮은 것은 Photo. 2 및 3 (b), (c)에서와 같이 낮은 냉각속도로 인해 결정립이 크고 필름형태의 탄화물이 입계에 많이 석출되고 용접금속부와 같이 퍼얼라이트 조직이 많아졌기 때문이며, one-pole보다 two-pole 자동용접의 경우가 더 많은 퍼얼라이트 분리를 나타내었다.

용접열영향부의 인성에 영향을 주는 요소는 조직학적 측면에서 보면 prior 오스테나이트 결정립의 크기와, 결정립내 미세조직, 즉 탄화물, 질화물 등의 석출물, M-A constituent 및 비금속 개재물 등을 들 수 있고, 용접시공 조건으로서는 용접입열, pass수, 예열 및 후열, 용접재료, 용접금속의 특성 등이다.

4. 1. prior 오스테나이트 결정립 크기의 영향

용접금속과 열영향 경계부 취화의 원인의 하나로써 약 1100℃ 이상 가열된 영역에서 prior 오스테나이트의 조대화를 들 수 있다. 본 실험에서 경계부를 광학현미경조직 사진을 이용하여 절취법에 의해 측정된 결과 prior 오스테나이트 결정립 크기는 수동용접에서는 140μm, one-pole 자동용접에서는 250μm 및 two-pole 자동용접에서는 350μm이었다. 이것으로부터 Fig. 1에서과 같이 one-pole 및 two-pole 자동용접 경계부의 충격치가 유사하게 나타난 것을 보면 prior 오스테나이트 결정립 크기 자체는 인성에 그다지 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

4. 2. M-A constituent의 영향

최근 고장력강의 대입열 용접에서 ferrite side plate 입계에 잔류하는 M-A constituent가 인성저하의 주요인이 된다는 많은 연구가 행하여졌다.⁶⁾ 본 연구에서도 이와 같은 영향을 조사하기 위하여 투과전자현미경 관

찰을 실시하였으나 잔류 오스테나이트의 발견에 어려움이 있어 X-선 회절법에 의해 각 용접부에서 용접금속부와 열영향부로 나누어 잔류 오스테나이트 분율을 측정했다.

Fig. 2는 수동용접 금속부의 X-선 회절분석 결과이다. 이것을 직접 비교법에 의해 잔류 오스테나이트 양을 계산한 과정을 Table. 3에 나타내었다. 여기서 마지막 4가지 C(γ)값을 산술평균한 값 0.46%가 수동용접금속부의 잔류 오스테나이트 분율이 된다. 이렇게 하여 얻은 잔류 오스테나이트의 부피 분율은 Table 4에 나타냈다. 수동용접에서는 0.38~1.15%, 자동용접에서는 1.45~3.54%로 용접입열에 관계없이 큰 차이가 없다. 이리하여 본 실험에서 인성저하 원인이 M-A constituent 영향이라고 할 수 없다.

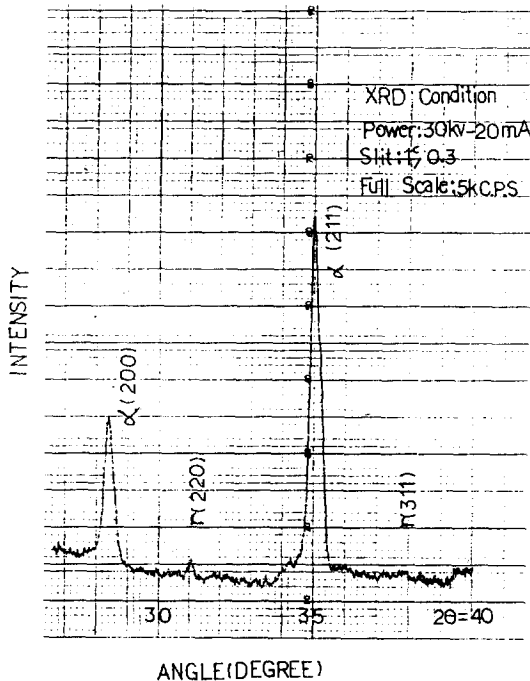


Fig. 2. X-ray diffraction analysis on weld metal using SMAW.

Table 3. Austenite determination factor

Plan Indices Conditions	α(200)	γ(220)	α(211)	γ(311)
2-THEATA	28.83	31.05	35.01	38.29
R	283.774	351.322	539.1	414.638
INTENSITY	929	28	2271	113

$C(\gamma) = 100 / [1 + R \times I(\alpha) / I(\gamma)]$

$R = R(\gamma) / R(\alpha)$

$C(220) / (200) = 0.33, C(311) / (200) = 0.68$

$C(220) / (211) = 0.27, C(311) / (211) = 0.56$

Table 4. Volume fraction of retained austenite by X-ray diffraction

	SAMW		SAW(one-pole)		SAW(two-pole)	
	WM	HAZ	WM	HAZ	WM	HAZ
As-welded	0.46	1.15	2.69	2.55	1.77	2.39
After SR	0.38	1.04	3.54	2.17	1.45	2.31

4. 3. 탄화물의 석출형태

투과전자현미경으로 관찰한 결과 탄화물의 석출은 대입열 자동 용접한 열영향부 조대화 구역의 경우 ferrite side plate와 입계 페라이트의 입계에 용접금속부와 마찬가지로 필립형태로 나타났고, 수동용접의 경우 다층 용접으로 인한 뜨임효과를 받아 미세한 구상의 형태로 나타났다. 또한 자동용접에서는 Photo. 5, 6의

(b), (c)에서와 같이 페라이트-퍼얼라이트 조직도 관찰되었으나, 수동용접의 용접부에서는 퍼얼라이트 조직은 거의 관찰되지 않았다. 이것은 판상인 필립형태의 세멘타이트 석출이 미세한 구상의 형태보다 취성과 파괴의 발생기점으로 작용하여 인성을 저하⁷⁾시킨 것으로 판단되며, 페라이트-퍼얼라이트 조직에서의 취성 파괴는 벽개파괴이고, $\{100\}$ 면에서 생긴다는 것과 같이 조대한 페라이트-퍼얼라이트 조직이 인성이 낮은 벽개파괴의 원인¹²⁾으로 생각된다.

인성개선을 위해서는 이들 조직의 생성을 가능한한 억제시켜야 하는데, 그 방법으로는 강판제조시 경화능 향상 합금원소를 첨가하고 경계부의 조대화 구역조직을 하부 베이나이트로 생성시키든가¹³⁾ 페라이트 변태를 촉진시켜서 미세한 페라이트-퍼얼라이트 조직으로 바꾸는 것이다.¹⁴⁾

이상과 같은 고찰을 통해서 자동용접 열영향부의 인성저하 원인을 살펴보면, 경계부와 열영향부중 조대화 구역은 용접금속과 마찬가지로 느린 냉각속도로 인해 탄화물이 prior 오스테나이트 입계 및 입내에서 조대하게 석출하고, 퍼얼라이트 분율이 증가하므로 인성저하 원인이 된다고 생각되며, 이러한 탄화물의 석출 및 조대화는 ferrite side plate 조직에서 많고 prior 오스테나이트 결정립이 클수록 증가함을 알 수 있다. 그러므로 prior 오스테나이트 결정립보다 탄화물의 석출형태와 퍼얼라이트 조직분율이 인성에 중요한 역할을 하는 것으로 판단된다. 미세화구역은 탄화물의 변화는 명확하지 않고 결정립도 미세하기 때문에 결정립 크기 및 퍼얼라이트 분율이 인성에 영향을 주는 것으로 추정할 수 있다.

5. 결 론

60kg/mm²급 조질고장력강에서 용접입열이 용접금속과 열영향부의 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하기 위하여 수동 및 자동용접(one-pole, two-pole)을 한 후 투과전자현미경으로 관찰한 미세조직과 충격흡수에너지를 비교하여 용접부 인성에 영향을 미치는 요인을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

충격치는 수동 및 자동용접 모두 용접금속부가 가장 낮았으며, 열영향부에서는 경계부, 조대화부, 미세화부 및 뜨임부순으로 증가하였다.

입열량이 증가할수록 결정입계를 따라서 필립형태의 탄화물과 퍼얼라이트 조직이 증가하였다.

Prior 오스테나이트 결정립 크기 및 ferrite side plate 입계에 잔류하는 M-A constituent는 용접부 인성저하에 큰 영향을 미치지 않았고, 입계 페라이트 및 ferrite side plate 입계에 석출되는 탄화물 형태와 퍼얼라이트 조직분율이 인성에 큰 영향을 미친다고 판단된다.

참고 문헌

1. E. F. Nippes, W. F. Savage and R. J. Allio : *Welding J.*, 36 (1957) 513.
2. Proc. Int. Conf., Ed. H. Terashima and P. H. M. Hart : The Welding Institute, London, England, (1983).
3. Proc. 1st National Con. on Fracture, R. E. Dolby, ed., (1979) p. 117.
4. 菊田米男, 荒木孝雄, 佐野精二郎, 柳生俊二, 石野良和 : *溶接學會誌*, 43, No. 10 1047(1974) p. 95.
5. 井川 博, 大重廣明 : *溶接學會誌*, 46 (1977) 713.
6. Y. Hirai : *J. W. S.*, 46 (1977) 37.
7. Y. Kijuta and T. Araki : *J. W. S.*, 43 (1974) 95.
8. G. M. Evans : *OERLIKON-Schweizermitt.*, 38(1980) 20.
9. ASTM Stand., E23 (1978) : Method for Charpy Notch Impact Testing.
10. JIS Z 3040, (1981) : Method of Qualification Test for Welding Procedure.
11. K. C. Thompson-Russell and J. W. Edington, *Practical Electron Microscopy in Materials Science*, Vol. 5 (1977) p. 46.
12. J. Tsuboi and Y. Hirai : *J. W. S.*, 50 (1981) 28.
13. 佐藤, 中彬 : *製鐵研究*, 273 (1971) 9857.
14. 金澤, 中島 : *鐵と鋼*, 61 (1975) 2598.