

SA508 class 3 서브머지드 아크용접부의 기계적 성질에 미치는 입열량의 영향

서윤석* · 고진현* · 김남훈* · 오세용** · 주기남***

*한국기술교육대학교 신소재 공학과

**충남대학교 기계공학과

***한국원자력연구소

Effect of Heat Input on the Mechanical Properties of SA508 class 3 Steel Weldments with Submerged Arc Welding

Yun-seok Seo*, Jin-Hyun Koh*, Nam-Hoon Kim*, Se-Yong Oh** and Kee-Nam Choo***

*Dept. of Advanced Materials Engineering, Korea University Technology and Education, Chonan 330-708, Korea

**Dept. of Mechanical Engineering, Chung Nam National University, Daejeon 305-764, Korea

***Korea Atomic Energy Research Institute, Daejeon 305-600, Korea

Abstract

The present study is to investigate the effect of heat input on the microstructure, tensile properties and toughness of single-pass submerged arc bead-in-groove welds produced on SA508 class 3 steels. The heat input was varied in the range of 1.6, 3.2 and 5.0 kJ/mm. The toughness of weld metals was evaluated by using subsize Charpy V-notch specimens in the temperature range of -190°C to 20°C. The weld microstructure and fractography were observed by optical and scanning electron microscopies, respectively.

With increasing heat inputs, tensile strength and hardness of weld metals were decreased while elongation was increased. The poor notch toughness at 1.6 kJ/mm was attributed to the formation of ferrite with aligned second phase and bainitic microstructure with high yield strength while that at 5.0 kJ/mm was due to the presence of grain boundary and polygonal ferrites. The microstructure of the intermediate energy input welds consisted of a high proportion of acicular ferrite with limited polygonal ferrites, which provide improved notch toughness.

* Corresponding author ; yunseok3@kut.ac.kr

(Received July 14, 2004)

Key Words : Reactor pressure vessel, SA508 class 3 steel, Submerged arc welding, Heat input, Bead-in-groove, Mechanical property, Microstructure

1. 서 론

원자력 발전소 압력용기 강재로 사용되고 있는 ASME SA508 class 3 강은 주요합금원소로 C, Mn, Ni, Mo을 함유하며 저합금 페라이트계 후판단조 강이다. 현재 건설되는 원자력 발전소의 압력용기는 SA508 class 3 강으로 용접하여 제조되고 있는 경우가 많다. 압력용기는 원자력발전소의 사용 수명기간 동안 용기로 서 건전성을 유지할 수 있게 우수한 기계적 성질이 요

구되고 있다. 특히 용접부를 포함한 압력용기는 그 수명동안 고속 중성자 조사 때문에 재료의 열화를 피할 수 없다.

압력용기 등 구조용강 용접금속에서 가장 요구되는 성질은 고인성이다. 고인성은 용접 미세조직 관점에서 침상 페라이트(acicular ferrite, AF)의 구성 비율에 달려 있음은 잘 알려져 있다. 침상 페라이트는 페라이트 래드가 짧은 니들(needle)형상을 하고 결정립 내에서 불규칙하게 배위되어 서로 광주리 엮는 형상(basketweave)으로 얽혀 있기 때문이다. 이와 같이

서로 얽혀있는 성질과 미세한 결정립 크기 때문에 취성 균열 성장에 최대 저항을 갖는 것으로 알려져 있다¹⁻³⁾.

구조용 페라이트계강 용접부의 최종 성질은 용착금속의 조성, 입열량과 냉각속도에 의해 영향을 받는다. 냉각속도가 빨라지면 입계 페라이트(grain boundary ferrite, GBF), 사이드플레이트 페라이트(sideplate ferrite, SPF), 침상 페라이트, 베이나이트(bainite, B)와 마르텐사이트(martensite, M) 순으로 미세조직이 생성 된다. 이들 페라이트 미세조직 중 GBF, SPF 또는 상부 베이나이트는 용접금속 인성을 해치고 균열 성장 경로로서 역할을 한다.

따라서 본 연구에서는 입열량이 용접부의 미세조직과 충격인성에 미치는 영향을 조사하기 위해 SA 용접으로 가능한 범위 내에서 입열량을 크게 변화시키고, 용착금속속에서 충격시편을 채취하기 위해서 강판에 그루브를 가공하고 한 패스의 비드를 용착하는 bead-in-groove 방식을 선택하였다⁴⁾. 저 입열의 단일 패스 용접부에서는 용입이 비교적 작으므로 표준형태의 전 용접금속 충격시편은 가공이 어렵기 때문에 서브사이즈 충격시편을 준비하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용된 모재는 SA508 class3 강으로 두께 18mm, 가로 90mm, 세로 400mm의 시험편을 사

용하였다. 그리고 Fig. 1과 같이 강판 중앙에 깊이를 4, 6, 8mm와 R 6mm로 가공하여 세가지의 U형 그루브(groove)를 준비하였다. 용접재료는 압력용기 제작시 요구되는 규격에 따라 서버머지드 아크용접 와이어와 염기성 저온 소결형 플럭스를 선정하였다. Table 1은 모재의 화학조성이고, Table 2는 용접 와이어의 화학조성이다. 플럭스는 사용하기 전 250℃에서 4시간 동안 건조하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 용접조건

용접 입열량은 압력용기용 강재 SA508 cl.3의 용접 사양서의 용접조건을 고려하여 선정하였다. 본 실험에는 Table 3과 같이 용접전압을 일정하게 유지하고 용접전류와 속도를 변화시켜 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm의 3가지 입열량을 선정하고, 단일 패스로 비드인 그루브를 용접하였다. 용접 예열온도는 120℃였고, 600℃에

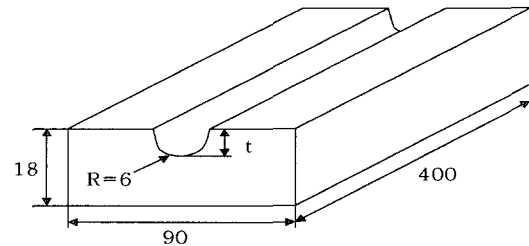


Fig. 1 Schematic diagram of a single U-groove specimen machined along the base plate centerline($t=4, 6$ and 8 mm)

Table 1 Chemical composition of SA508 class 3 steel(wt.%)

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo	V	Al
Wt. %	0.19	0.26	1.35	0.006	0.003	0.02	0.86	0.15	0.49	0.005	0.022
Spec.	Max	0.15	1.20	Max	Max	-	0.40	Max	0.45		
		~	~				~		~		
	0.25	0.40	1.50	0.025	0.025	-	1.00	0.25	0.60		

Table 2 Chemical composition of welding wire(wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cu	Ni	Cr	Mo
0.13	0.02	1.80	0.006	0.003	0.02	0.04	0.02	0.53

Table 3 Welding parameters of SA508 cl.3 steel used in this study

Heat input (kJ/mm)	Welding Current (A)	Voltage (V)	Travel speed (cm/min)	PWHT	Preheat T(℃)
1.6	580	30	65	600℃ 40hrs	120
3.2	600	30	34		
5.0	660	30	24		

서 40시간 동안 용접 후열처리를 실시하였다.

2.2.2 미세조직검사 및 화학분석

용접시편은 2~3% Nital 용액으로 부식한 후 광학 현미경과 주사전자 현미경으로 미세조직을 관찰하였다. 용접금속의 화학조성은 고주파 유도결합 플라즈마 분광 분석기(inductively coupled plasma spectrometer, ICP)와 발광분석기(emission spectrometer)를 사용하여 분석하였다.

2.2.3 충격 시험

소형충격시편은 용접 중앙선을 기준으로 용접 길이방향으로 55mm를 절단하고 모재 표면 아래로 용접비드를 2mm 절삭한 후 5×5×55mm 치수로 가공하고, 깊이 1 mm, R이 0.25mm이고 45°의 노치를 가공하여 준비하였다⁵⁾. 노치는 용접 중심선을 따라 위치하도록 가공하였다. 완전한 연성-취성 전이곡선을 구할 수 있게 충격시험은 -190℃~20℃ 범위에서 액체질소를 사용하여 실험하였다.

충격시험으로 파괴된 시편의 연성 파면율(ductile fracture)은 KS B 0810에 따라 횡 팽창률은 KS A 0021에 따라 구하였다. 시편 파면의 파괴모드는 주사전자현미경으로 조사하였다.

2.2.4 인장시험과 경도시험

표점거리 25mm, 직경 5mm의 전 용접 금속의 인장 시편을 가공하였으며, 인장시험 시 크로스헤드 속도는 5mm/min 였다. 경도시험은 미세조직검사에 사용되었

던 시편을 이용하여 용접부 표면 2mm 아래에서 용접 가로방향을 따라 1mm 간격으로 비커스 경도기로 1kgf 하중을 사용하여 시험하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용입 깊이와 화학 조성

Fig. 2는 입열량 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm으로 용접된 단면의 매크로조직으로 입열량의 증가에 따라 용접 폭은 크게 증가하고 있음을 보여주고 있다. 그리고 열 영향부 또한 용접 입열량이 증가함에 따라 크게 증가하는 것으로 나타났다.

Table 4는 입열량 변화에 따른 용접금속의 화학조성을 보여주고 있다. 입열량에서는 차이가 있었지만 C, Mn과 Mo 등 주요 합금원소량은 입열량이 증가함에도 불구하고 큰 변화가 없으나, Ni량은 감소하였다. 이것은 Table 2와 같이 용접와이어에 함유된 Ni량이 모재에 비하여 상당히 적기 때문에 용접 입열량 증가에 따라 좀더 많은 양의 와이어의 용입에 의한 모재와 와이어의 많은 희석효과에 기인 하는 것으로 보여진다.

3.2 용접부의 미세조직

Fig. 3(a), (b)와 (c)는 입열량 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm에서 용접된 용접금속을 광학현미경으로 관찰한 미세조직이다. Fig. 3(a)는 입열량 1.6 kJ/mm에서 용접된 미세조직으로 주로 미세한 페라이트와 작은 크기의 니들(ferrite needle)형태의 페라이트가 생성되었

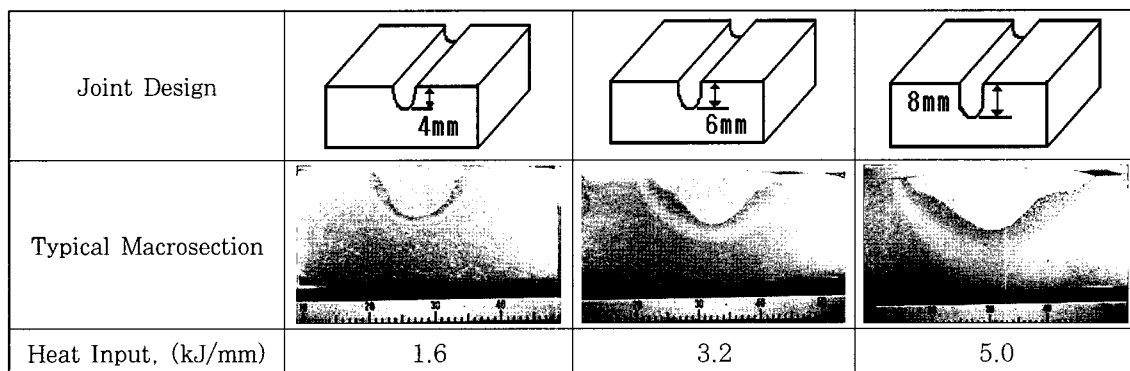


Fig. 2 Schematic diagram of submerged arc bead-in-groove welds and corresponding macrographs

Table 4 Chemical composition of weld metals made with different heat inputs

Heat input (kJ/mm)	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Al	V
1.6	0.16	0.24	1.44	0.008	0.009	0.57	0.14	0.51	0.026	0.01
3.2	0.14	0.27	1.47	0.009	0.009	0.54	0.13	0.51	0.025	0.01
5.0	0.13	0.28	1.47	0.01	0.01	0.49	0.11	0.50	0.025	0.01

고, Fig. 3(b)는 입열량 3.2 kJ/mm에서의 용접금속의 미세조직으로 다량의 침상 페라이트(AF)와 소량의 다각형 페라이트(polygonal ferrite)로 구성되었다. 입열량 5.0 kJ/mm에서는 페라이트 형상이 조대화된 입계 페라이트와 둥근 다각형 페라이트가 증가되었다. 입열량이 1.6에서 3.2 kJ/mm로 증가함에 따라 침상 페라이트가 더 많이 생성되었는데 이것은 모재의 희석효과(dilution effect)에 기인하는 것으로 사료된다^{6,9)}.

Fig. 4는 용접부의 미세조직을 주사전자현미경으로 관찰한 사진이다. Fig. 4(a), (b)와 (c)는 입열량이 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm로 용접된 것이다. 광학현미경 조직사진에서 관찰한 바와 같이 입열량 1.6 kJ/mm에서는 작은 래드 형상의 페라이트들이 생성되었으나 입열량 3.2 kJ/mm에서는 페라이트 입자들이 서로 얽혀져 있는 형상을 보이고 있으며 입열량이 5.0 kJ/mm로 증가함에 따라 조대화된 페라이트들로 구성되어있다. 이상에서 고찰한 바와 같이 본 실험에서 사용한 입열량 범위에서 낮은 입열량(1.6 kJ/mm)의 빠른 냉각 속도에서는 용접금속에서 상부 베이나이트가 생성되었고, 3.2 kJ/mm에서는 침상 페라이트가 많이 생성되었으며 용접 입열량이 증가함에 따라 구형화 내지 다각형 페라이트가 생성되었다. 이것은 입열량 증가에 의해 용접부의 냉각속도가 느려졌기 때문으로 사료된다⁸⁾.

Fig. 5는 입열량 1.6 kJ/mm, Fig. 6은 입열량

5.0kJ/mm로 SA 용접부의 열영향부를 보여주고 있다. 본 실험에서 사용한 입열량에서 입열량이 증가할수록 열영향부의 폭은 크게 증가하였음이 조직사진으로 확인되었다.

용융 경계부에 인접한 열영향부는 조대 입자영역, 중간 결정립 미세화영역과 결정립 미세화영역으로 나눌 수 있다. 입열량이 1.6 kJ/mm(Fig.5)으로부터 5.0 kJ/mm(Fig. 6)로 증가함에 따라 이들 각 영역의 크기와 결정립 크기도 현저하게 차이가 발생하였다. 이것은 용접 열사이클 중 도달한 최고 온도와 냉각속도의 차이에 기인하는것으로 사료된다. 용융선에 인접한 조대화 영역은 마르텐사이트가 생성되었고, 용융선에서 거리가 멀어짐에 따라 중간정도 크기의 결정립이 생성



Fig. 5 Microstructure of heat affected zone (heat input, 1.6 kJ/mm, $\times 200$)

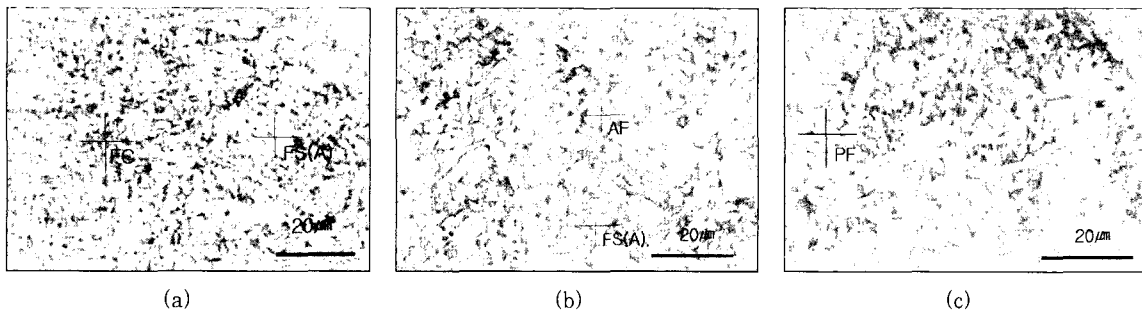


Fig. 3 Microstructures of weld metals as a function of heat inputs($\times 1,000$). (a) 1.6, (b) 3.2 and 5.0 kJ/mm AF-Acicular ferrite, PF-Primary ferrite, FS(A)-Ferrite with aligned second phase, FC-Ferrite carbide aggregate⁷⁾

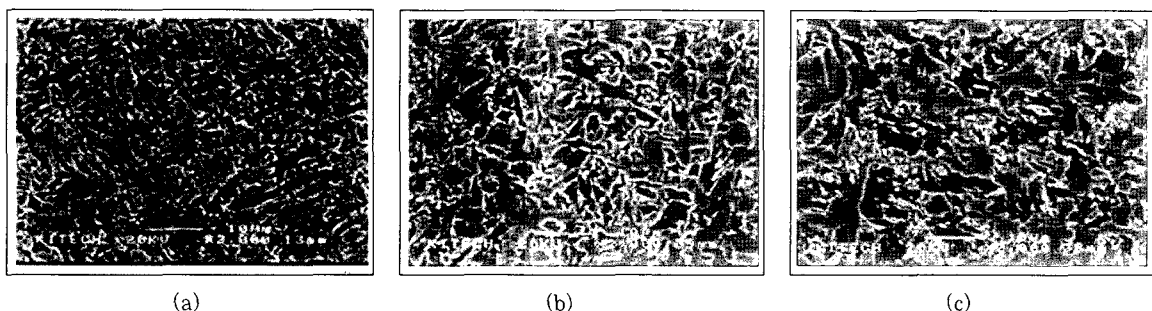


Fig. 4 SEM micrographs of weld metals made with different heat inputs. (a) 1.6, (b) 3.2 and (c) 5.0 kJ/mm

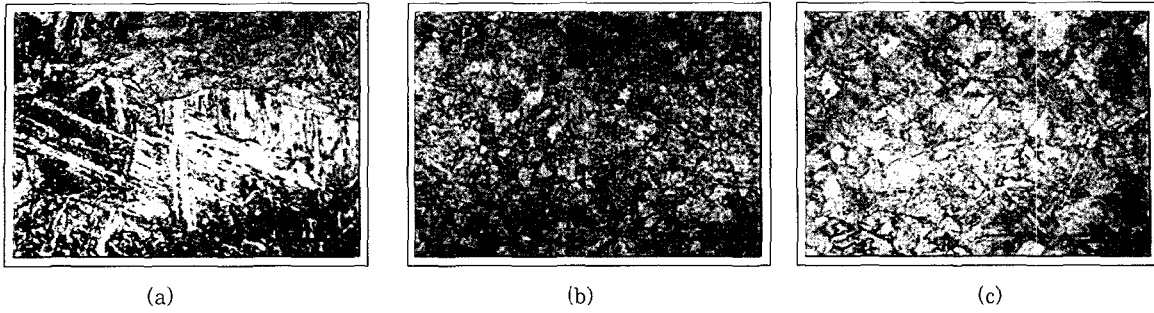


Fig. 6 Microstructural variation in the weld heat affected zone (heat input, 5.0 kJ/mm, ×200)
 (a) Grain-coarsened region, (b) intermediate grain-refined region and (c) grain-refined region

되었고, 용융선에서 더욱 멀어지면 열영향부는 구형으로 재결정화된 미세한 결정립들을 보여주고 있다.

3.3 기계적 성질

3.3.1 충격시험

Fig. 7(a)는 입열량 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm로 강판에 가공된 그루브를 따라 한 패스로 용접된 용접부를 소형 규격으로 가공된 샤르피 V 노치 충격시험편을 상온에서 -190℃범위로 시험된 충격흡수에너지이다. Fig. 7(b)는 충격시험으로 파괴된 시험편의 횡팽창률과 시험 온도와의 관계이고, Fig. 7(c)는 연성파면율과 온도와

의 관계이다. 이들 3가지 결과를 살펴보면 입열량 3.2 kJ/mm에서 흡수에너지가 가장 높고, 입열량 5.0 kJ/mm에서 가장 낮은 흡수에너지를 보여주고 있으며, 입열량 1.6kJ/mm에서 흡수에너지는 앞의 두 곡선사이의 흡수에너지를 보여주고 있다 Fig. 8은 입열량에 따른 흡수에너지와 연성파면율의 관계로 이들 두 곡선이 만나는 연성-취성 전이온도는 각각 -56℃, -80℃와 -42℃로 입열량 3.2 kJ/mm에서 가장 낮다. 입열량 3.2 kJ/mm은 다른 입열량에서 용접된 것 보다 시험 온도 범위 전역에서 가장 우수한 충격흡수 에너지를 보여 주고 있다. 이것은 Fig. 3의 미세조직에서 고찰한 바와 같이 입열량 3.2 kJ/mm에서 용접 미세조직이 입열량

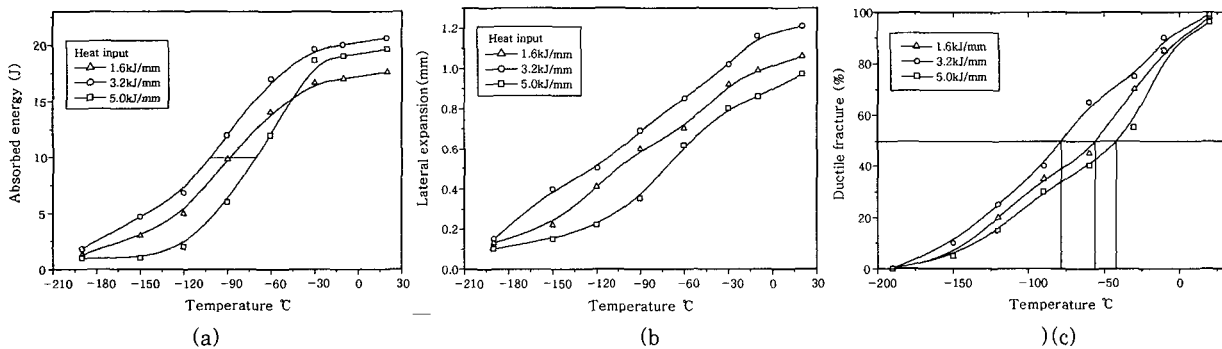


Fig. 7 Results of impact test of weld metals (a) Absorbed energy vs. temperature (b) Lateral expansion vs. temperature (c) Proportion of ductile fracture

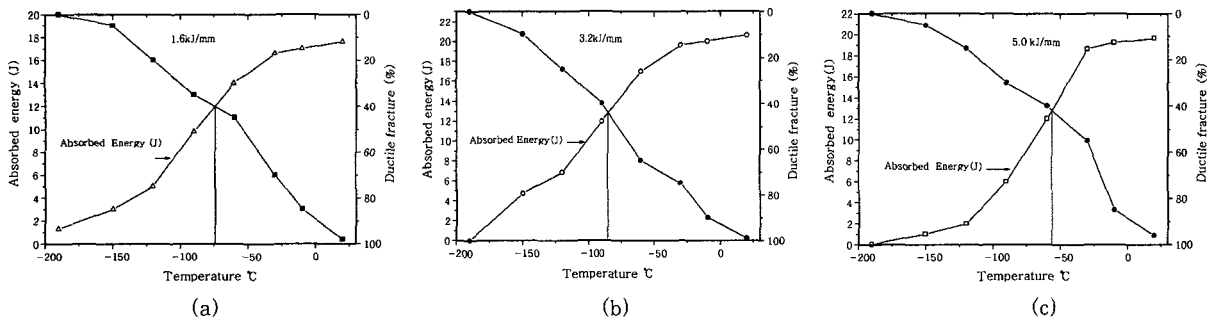


Fig. 8 Absorbed energy and lateral expansion of weld CVN specimens with heat input (a) 1.6, (b) 3.2 and (c) 5.0 kJ/mm

1.6과 5.0 kJ/mm에서 보다 충격인성에 유리한 침상 페라이트가 더 많이 생성되었고 충격인성에 불리한 입계 페라이트, 다각형 페라이트나 베이나이트 조직의 생성이 적었기 때문으로 사료된다.

3.3.2 충격시험편의 파면해석

Fig. 9(a), 10(a)와 11(a)는 상온(20°C)에서 파괴된 충격시험편의 파면으로 모두 전형적인 연성파단모드인 딴플로 구성되어 있으며, 입열량이 증가함에 따라 딴플 사이즈가 커졌다. Fig. 9(b), 10(b)와 11(b)는 -90°C에서 파괴된 파면으로 입열량 1.6과 5.0kJ/mm의 시험편에서는 의사벽개(quasi-cleavage)의 취성 파면을 보여주고 있으며, 입열량 3.2kJ/mm(Fig. 10(b)) 파면은 딴플이 상당히 많이 존재하는 연성과 일부 취성파면으로 구성되어 있다. 또한 입열량 1.6kJ/mm(Fig. 9(b))와 5.0kJ/mm(Fig. 11(b)) 파면에서는 취성 파면이 압도적으로 많았다. -190°C에서 파괴된 파면으로 하부 셀프영역에 해당하는 Fig. 9(c), 10(c)와 11(c)

는 주로 평활한 각면(flat fracture facet)인 벽개면들로 구성되어 있다. 이 파면들은 입계 페라이트 크기와 대체로 관련이 있고 균열경로가 된다고 알려져 있다. Fig. 12는 충격파면을 보여주고 있다.

3.4 경도 및 인장성질

Fig. 13은 입열량을 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm에서의 용접부 경도변화를 조사한 것이다. 모재의 경도는 210-240 Hv 범위이고, 열영향부의 경도는 입열량 1.6, 3.2와 5.0에서 각각 280-400 Hv, 260-360 Hv와 230-270 Hv 범위이고, 용접금속의 경도는 입열량 1.6, 3.2와 5.0에서 각각 270-290 Hv, 250-270 Hv와 230-250 Hv 범위이다. 이상에서와 같이 열영향부의 경도가 모재 보다 높았다. 이것은 열영향부의 미세조직으로 경한 금속이 생성되었기 때문이다. 그리고 이미 고찰한 바와 같이 입열량이 증가할수록 용접금속의 경도는 감소하였고, 이것은 앞에서 고찰한 바와 같

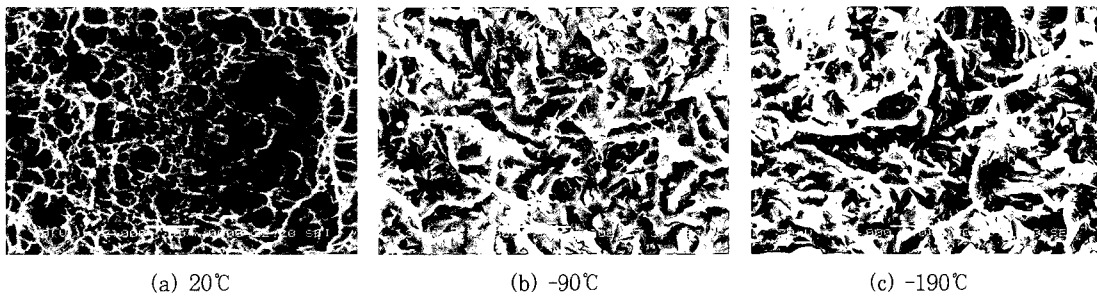


Fig. 9 SEM fractographs of Charpy V notch specimens made with heat input of 1.6 kJ/mm($\times 2,000$)

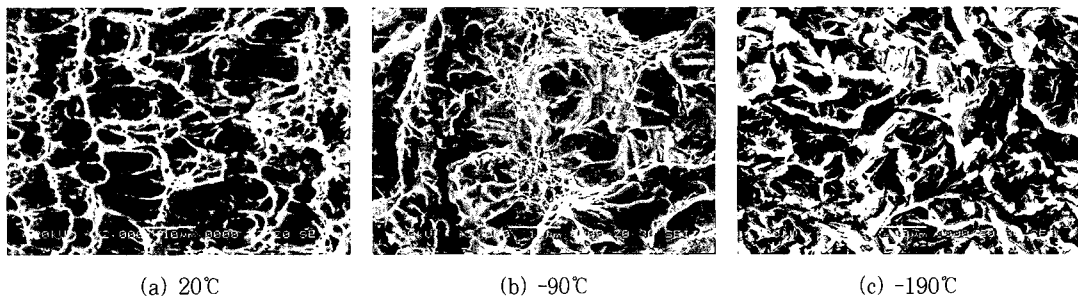


Fig. 10 SEM fractographs of weld CVN specimens made with heat input of 3.2 kJ/mm($\times 2,000$)

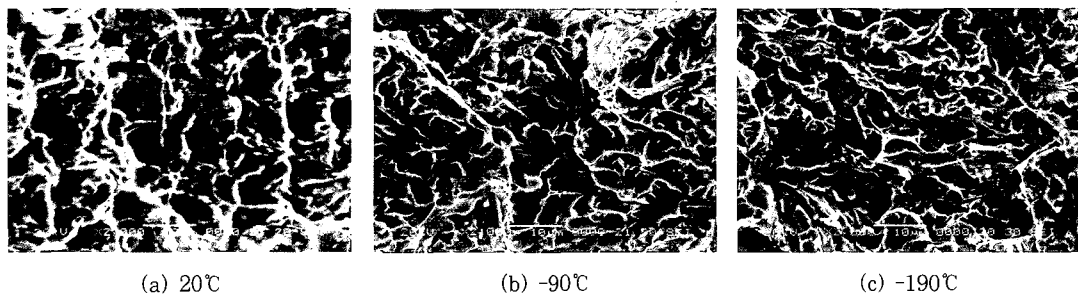


Fig. 11 SEM fractographs of weld CVN specimens made with heat input of 5.0 kJ/mm($\times 2,000$)

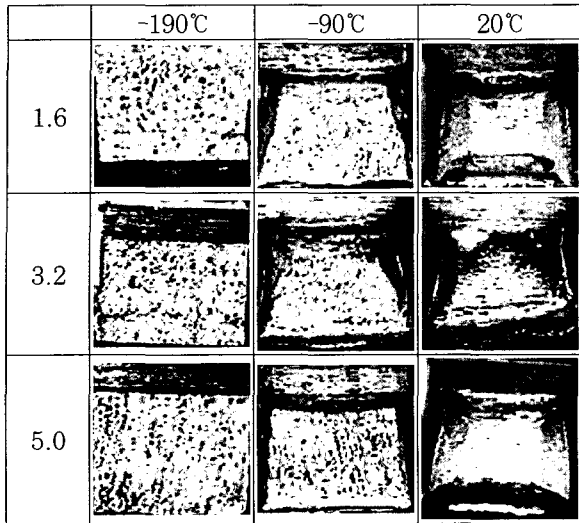


Fig. 12 Fractographs of weld CVN specimens

이 낮은 입열량에서는 상부 베이나이트 조직이 생성되었고, 입열량이 3.2 kJ/mm에서는 침상 페라이트가 생성되었으며 입열량이 5.0 kJ/mm로 증가하면서 페라이트 입자가 조대한 다각형 페라이트와 입계 페라이트의 생성이 증가되었기 때문에 경도가 감소한 것으로 사료된다. Table 5는 전용접금속의 인장시험결과로 입열량이 증가할수록 항복강도와 인장강도는 감소하였으나 연성은 증가하였는데 이것은 앞에서 고찰한 바와 같이 미세조직 변화 때문으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 압력용기강재 SA508 class 3 강판에 U-그루브를 가공하고 서브머지드 아크 용접을 하여 단일패스를 용착하는 bead-in-groove 방식으로 입열량

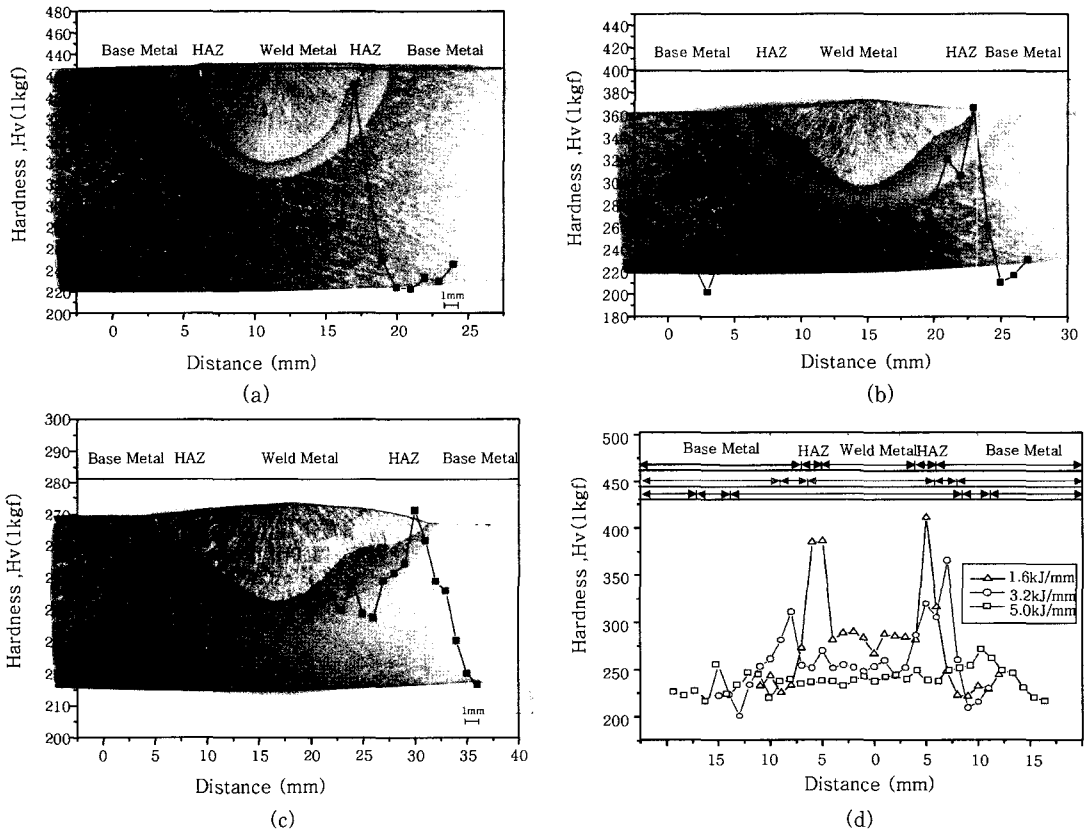


Fig. 13 Hardness profile transverse to welds made with different heat inputs (a) 1.6 kJ/mm (b) 3.2 kJ/mm (c) 5.0 kJ/mm (d) Total (1.6, 3.2 and 5.0 kJ/mm)

Table 5 Tensile test results for all weld metals

Heat input (kJ/mm)	Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Reduction of area (%)
1.6	583	634	22.8	71.2
3.2	567	625	24.2	72.9
5.0	527	615	24.5	73

을 1.6, 3.2와 5.0 kJ/mm로 변화시켜 입열량이 용접부의 미세조직과, 인장강도, 경도 및 서브사이즈 충격시편을 사용하여 흡수에너지에 미치는 영향을 조사하였고, 다음과 같은 결과를 얻었다.

1) 입열량이 증가할수록 용접부 용입에서는 큰 차이가 없으나 폭은 크게 증가하였다. 그러나 입열량이 증가함에 따라 용접금속에서 Ni량을 제외하고 기타주요합금원소에서는 큰 차이가 없었다.

2) 단일패스 용접부에서 입열량이 증가할수록 전용접금속의 인장강도와 경도는 감소하였으나 연성은 증가하였다. 소형 CVN 충격시험에서는 입열량 3.2 kJ/mm로 용접된 용접부에서 인성이 가장 좋았다.

3) 단일패스 용접부의 미세조직은 입열량 1.6kJ/mm에서는 베이나이트, 3.2 kJ/mm에서는 침상 페라이트가 가장 많이 생성하였으나, 입열량 5.0 kJ/mm에서는 입계 및 다각형 페라이트의 생성 비율이 증가하였다. 그리고 충격파면에서도 충격시험 결과와 상응하는 결과를 나타내었다.

참 고 문 헌

1. R.E.Dolby : Welding Institute Research Report , 14 (1976)
2. A.G.Glover, J.I.McGrath and N.F.Eaton : Symposium on Toughness Characterization and Specification for HSLA and Structural Steels, Metallurgical Society of AIME, 1977, 143-160
3. C.B.Dallen, S.Liu and D.L.Olson: Welding Journal, 64 (1985), 140
4. Classification of Microstructure in Low Carbon Low Alloy Weld Metal, IIW Doc, 1983, 1282-1283
5. ASTM standard E 23-83
6. Se-Chul Kim, Nam-Hoon Kim, Jin-hyun Koh, Young-Hwan Kang, Kee-Nam Choo : A Study on the Microstructure and Toughness in the Submerged Arc Weld Metal of SA508 Class 3 Steel, Proceedings of the 2003 Spring Annual Meeting of Korean Welding Society, 2003, 5, 75-77 (in Korean)
7. Guide to the hight microscope examination of ferritic steel weld metals, IIW Doc, No. IX-1533-88 IXJ-123-87 Revision 2
8. Butterworths : K. Easterling, Introduction to the Physical Metallurgy of Welding, Butterworths, 1987, 104
9. A.C.Hunt, A.O.Kluken and G.R.Edwards : Heat Input and Dilution Effects on Microalloyed Steel Weld Metals, Weld. J. 73-1 (1994), 9-15