
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 35 卷 第 3 號 1998年 8月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 35, No. 3, August 1998

SAW 맞대기 용접부의 야금학적 특성과 비드높이에 따른 피로강도 연구

이해우*, 신용택*, 박정웅*, 석한길**

A Study on Metallurgical Properties and Fatigue Strength depending on Bead Height in SAW Butt Joints.

by

H.W. Lee*, Y.T. Shin*, J.U. Park* and H.G. Suk**

요 약

본 논문은 서브머지드 아크 2pole 용접시 용접비드 높이에 따른 피로강도와 야금학적 특성을 고찰하였다. AWS(American Welding Society) Code D1.1에 의하면 피로강도 측면에서 비드높이가 1/8"(3.2mm)를 초과하지 못하도록 규정하고 있으나, 실구조물 용접시 대부분 비드높이가 이 규정을 초과하고 있다. 따라서 본 연구에서는 as-weld상태에서의 피로시험편과 비드높이 3mm인 피로시험편을 제작하여 야금학적 고찰 및 피로강도를 비교 평가하였다.

Abstract

This paper is a study on the fatigue Strength depending on bead height.

According to the AWS CODE D1.1, reinforcement shall not exceed 1/8"(3.2mm) in height. Most of the bead heights exceed AWS rule in actual welding. So we estimated the fatigue Strength of the as-welded specimens and the removed bead specimens of which height is 3mm with SAW 2 pole process.

As a result, this paper presents that fatigue Strength is not concerned with as welded condition and removed 3mm bead height, also fatigue Strength obtained as welded specimens are satisfied with those proposed by the UK DEN, DNV and AWS.

접수일자 : 1998년 3월 12일, 재접수일자 : 1998년 7월 13

*. 삼성중공업 조선플랜트연구소 용접연구팀

** . 삼척대학교 금속공학과

1. 서론

용접부는 홈각도 및 홈형상에 따라 용착량이 달라지며 개선형상이 V형 홈형상보다는 I형 홈형상인 경우 용착량이 적어 변형이 감소할 뿐만 아니라 홈각도 가공에 따른 시수절감 효과도 있어 생산성 향상 측면에서 유리하다. 그러나 I형 홈형상의 적용 범위는 두께에 제한을 받는데, 용접부 두께가 두꺼워질수록 용접 전류, 전압이 높아지게 되고 이에 따라 비드높이도 증가하게 된다.

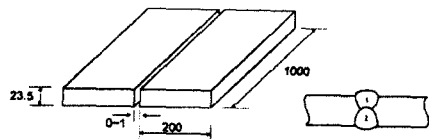
AWS(American Welding Society, structural welding code D1.1)⁽¹⁾에서 명시하고 있는 허용 비드높이는 피로강도 측면에서 1/8"(3.2mm)를 초과하지 못하도록 규정하고 있으며 실제 현업에서 비드높이가 3.2mm를 초과할 때에는 선급협회로부터 초과비드에 대한 제거를 요청받고 있는 실정이다. 비드형상 파라메타인 프랭크각, 곡률반경, 비드높이 등의 영향에 의해 피로강도가 결정된다는 연구 결과⁽²⁾가 있으나 최근 용접기 및 용접재료의 개발 등 용접조건이 변화함에 따라 기존에 연구되었던 자료를 활용하는 데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 서브머지드 2 pole I형 홈용접에서 적용 가능한 최대두께인 23.5mm를 용접하여 야금학적 특성과 용접비드 높이에 따른 피로수명을 비교평가 하였다.

2. 실험 방법

2.1 사용 모재 및 시험편 형상

본 연구에 사용된 강재는 두께 23.5mm의 선급용 강재 DH32 TMCP(Thermo Mechanical Controlled Process) 강을 사용하였으며 시험편 형상은 Fig. 1과 같다.



(unit : mm)

Fig. 1 Schematic diagram of weld specimen

2.2 용접 방법

본 연구에서는 서브머지드 2 pole(선행:DCRP, 후행: AC)로 용접하였으며 전면용접 실시후 뒤집어 후면용접을 실시하였다. 용접와이어 및 플럭스는 AWS F7(P)4-EL8에 해당하는 용접재료를 사용하였으며 용접조건은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Welding conditions

		Current (A)	Voltage (V)	Welding Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
First weld	Lead	1150	36	95	46.8
	Trail	800	41	95	
Second weld	Lead	1340	37	95	52.0
	Trail	800	41	95	

2.3 화학 조성

모재 및 용접부의 화학조성은 건식분석방법인 Spectrometer(Spectrovac-2000, Baird)로 3회 분석하여 평균값을 기록하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다.

2.4 인장시험

인장시험편은 환봉으로 제작하였으며 모재는 압연방향과 평행한 방향으로, 용접부는 순수한 용착 금속에서 시험편을 채취하였다. 시험 결과를 Table 2에, 시험편 형상 및 치수는 Fig. 2에 각각 나타내었다.

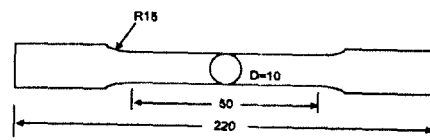


Fig. 2 Schematic diagram of tensile test specimen

2.5 경도 시험

경도시험은 매크로 비커스 경도기를 사용하였으며 시험편을 정마한 후 하중 10kgf, 하중 부여 시간을 10초로 하였다.

Table 2 Chemical compositions of base/weld metal

Identification		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	V	Ti	TS kgf/mm ²	YS kgf/mm ²	E (%)
Base metal (DH32 TMCP)	Spec.	0.18 max.	0.10 ~0.50	0.90 ~1.60	0.030 max.	0.035 max.	0.40 max.	0.20 max.	0.10 max.	0.02 max.	45 ~60	32.0 min	22
	Experi.	0.10	0.23	1.13	0.014	0.009	0.02	0.03	0.002	0.013	53.4	40.3	30.5
Weld metal	First weld	0.09	0.26	1.15	0.015	0.011	0.03	0.03	0.003	0.007	52.4	35.4	34.2
	Second weld	0.09	0.23	1.11	0.015	0.010	0.03	0.03	0.002	0.006			

2.6 미세조직 관찰시험

용접부 및 모재의 미세조직을 관찰하기 위하여 시험편을 연마 및 정마하였으며 3% nital에서 10초간 부식한 후 광학현미경으로 관찰하였다.

2.7 응력집중계수 측정

용접부의 비드형상은 Fig. 3에 나타난 것과 같이 치과용 실리콘 고무를 용접부 표면 및 이면에 부착하여 완전히 굳은 다음 비드 길이 방향 3mm 간격으로 절단하여 50배 확대경으로 토우부의 곡률반경과 프랭크각을 측정하였다.

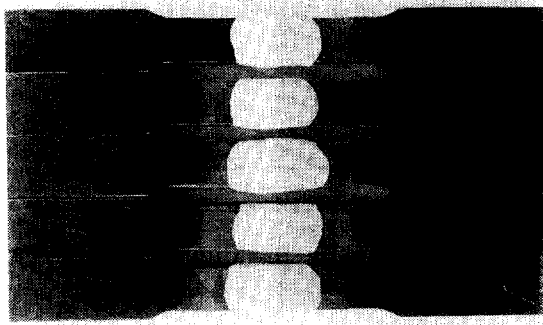
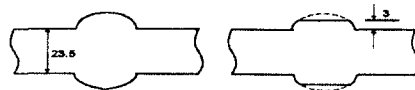
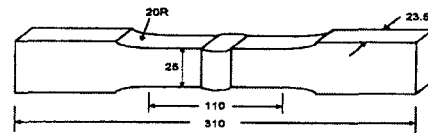


Fig. 3 Measurement of bead contour with silicon rubber

2.8 피로 시험



(A) as welded specimen (B) 3mm bead height specimen

Fig. 4 Dimensions of fatigue testspecimen

피로 시험은 최대용량 ±25ton인 축인장압 축시험기를 사용하여 응력비 R=0.1, 진폭 비 A=0.8인 편진하중제어로 피로 시험을 실시하였으며 하중 파형은 정현파이고 반복속도를 3Hz로 하였다. 피로 시험편은 Fig. 4에서와 같이 as weld상태와 비드높이를 3mm로 제거한 시험편으로 구분하여 피로시험을 실시하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 Macro/micro 조직

Fig. 5는 I형 홈용접한 용접부의 매크로 조직으

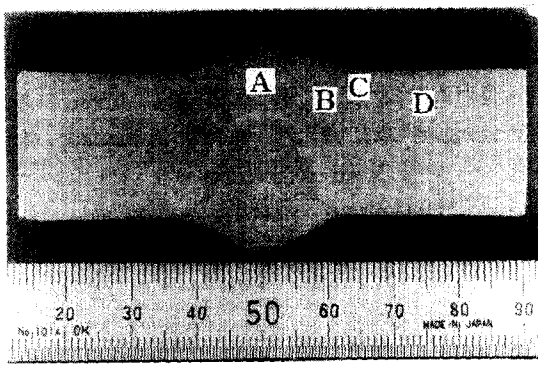


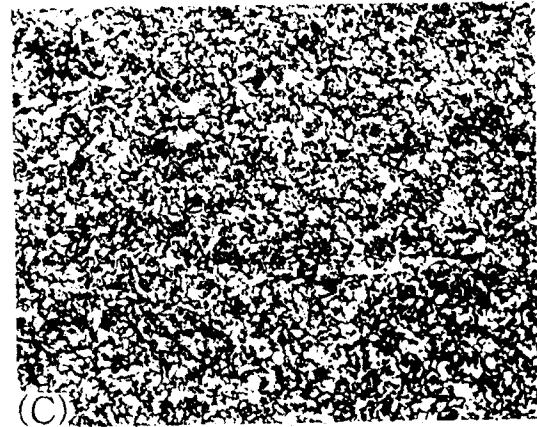
Fig. 5 Macrostructure of weldments



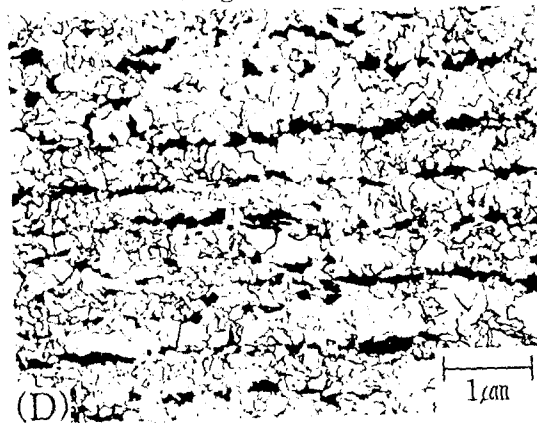
(A) weld metal



(B) over heated zone above 1300° C



(C) grain refined zone



(D) base metal

Fig.6 Microstructure of weldments

로 용착부, 열영향부 및 모재가 선명하게 구분되어 있다. 또한 전면보다 후면 용접부에서 비드높이가 더 높게 형성되어 있는데 이는 후면 용접부의 충분한 용입을 위하여 전면 용접부보다 더 높은 전류를 사용하였기 때문이다.

Fig. 6은 용접부의 마이크로 조직사진으로 (A)는 Fig. 5의 "A"에 해당되는 용착금속(deposited weld metal)의 미세조직이다. 서브머지드 용접과 같이 입열량(heat input)이 클수록 결정립계 페라이트(grainboundary ferrite)량이 증가되고 조대화되며 상대적으로 침상페라이트(acicular ferrite)량은 감소한다. 결정립계 페라이트 주위에 검게 보이는 부분이 침상페라이트로써 용접부의 기계적

성질은 냉각중 변태를 통해 생성된 페라이트형상 (ferrite morphology)에 영향을 받으며, 특히 인성 및 강도는 침상페라이트량과 밀접한 관계가 있다. 즉 인성 및 강도를 향상시키기 위해서는 용접부 미세조직에 침상페라이트가 고분율로 생성되어야 하며 동시에 결정입계 페라이트와 위드만 스테틴 페라이트 사이드 플레이트(FSP, widmanstatten ferrite side plate) 및 상부 베이나이트(upper bainite)의 생성을 최소화시켜야 한다.^(3,4)

Fig. 6의 (B)는 Fig. 5의 "B" 부위의 미세조직으로 용접부중 가장 취약한 결정립 조대화 영역이다. 이 영역은 용접입열에 의해 1300°C 이상까지 가열되었다가 냉각된 조직으로 화학조성에 따라 냉각도중 마르텐사이트 변태가 가능하며 용접부에서 최고 경도값을 나타낸다. 특히 이 부분은 용접 비드 형성으로 인해 필연적으로 노치가 형성되며 대부분 이 영역에서 피로 균열이 생성되어 전파되므로 경도값이 너무 높거나 결정립이 너무 조대한 경우에는 피로수명에 악영향을 미치므로 이들 형성을 최소화한 방지할 수 있는 용접시공이 이루어져야 한다.

Fig. 5의 "C"부분의 미세조직을 Fig. 6의 (C)에 나타내었는데 이 부분은 Ac3온도보다 약간 높은 900°C로 가열되었다가 냉각된 결정립 미세화 영역으로 결정립 조대화 부분보다 인성이 우수한 특징이 있다.

Fig. 6의 (D)는 Fig. 5의 "D"에 해당되는 모재의 미세조직으로 용접입열의 영향을 받지 않은 영역이다. TMCP(Thermo Mechanical Controlled Process)강재는 재결정 영역(recrystallized region) 온도 이하에서 제어압연(controlled rolling)을 하고 가속냉각(accelerated cooling)을 함으로써 as rolled강이나 normalized강재보다 고강도 및 미세한 조직을 얻을 수 있다.

3.2 경도 시험

Fig. 7은 전면 및 후면의 경도 분포 곡선으로 전면 용접부가 후면 용접부보다 전반적으로 높은 경도값을 보이고 있다. 이는 후면 용접부가 전면 용접시 발생된 입열로 인해 용접부가 예열된 상태

에서 용접을 실시하여 상대적인 냉각속도가 느려 경도값 저하를 가져왔다고 판단된다.

플럭스 코어드 아크용접(Flux Cored Arc Welding)과 같은 저입열 용접시 fusion line 바로 옆에서 최대 경도(peak hardness)가 나타나는 반면 서브머지드 아크용접(Submerged Arc Welding)에서는 최대경도가 뚜렷하게 나타나지 않는 특징이 있다. 이는 서브머지드 아크용접과 같은 대입열 용접에서는 높은 입열로 냉각속도가 느려 베이나이트와 같은 경화조직 생성보다는 퍼얼라이트 및 침상페라이트가 상대적으로 쉽게 변태하기 때문이다.

佐藤邦彦⁽⁵⁾등에 따르면 냉각속도가 동일한 경우에 있어서 열영향부 최고 경도값은 탄소의 함유량에 1차적으로 영향을 받으며 Mn, Cr, Mo등도 2차적으로 경도향상에 영향을 미친다고 설명하고 있다.

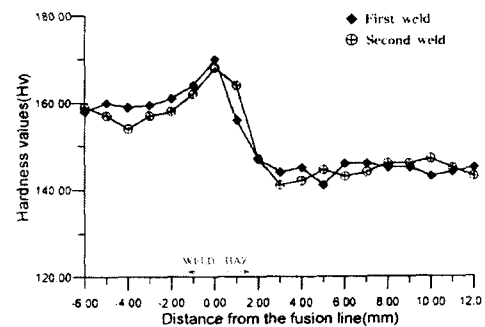


Fig. 7 Hardness profiles of weld metal

3.3 응력집중계수(Stress Concentration Factor : K_t)

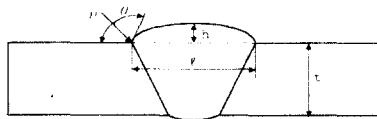
용접구조물에 porosity(기공)나 노치같은 불연속부가 존재하면 피로강도가 크게 감소하며, 피로 균열은 이러한 응력집중부에서 발생하는 것이 보통이다. 용접부 비드에서는 토우(toe)에서 심한 응력집중현상을 보이고 있으며 피로 수명 추정에 응력집중계수가 이용된다.

본 연구에서는 치과용 실리콘 고무를 이용하여 전면 및 후면비드의 곡률반경(ρ)과 프랭크각(θ)

를 측정하고, 식(1)에서 응력집중계수⁽⁶⁾를 계산하여 Table 3에 나타내었다.

Table 3 Statistics for the bead shape parameters

Items	Freq.	Mean				
		ρ	ϕ	h	ℓ	Kt
As welded	90	0.31	140	4.38	23.94	2.54
3mm bead height	90	0.33	138	2.99	23.39	2.37
Items	Freq.	Standard Deviation				
		ρ	ϕ	h	ℓ	Kt
As welded	90	0.305	22.63	2.129	1.734	1.25
3mm bead height	90	0.31	18.38	0.52	2.37	1.26



응력집중계수

$$K_t = 1 + f(\theta)(\alpha_1 - 1) \quad (1)$$

여기서,

$$\alpha_1 = 1 + c \left[\left(\frac{1}{2.8\Delta_1 - 2} \right) \cdot \frac{h}{\rho} \right]^\beta$$

$$f(\theta) = \frac{1 - \exp[-0.90\sqrt{\Delta_2}(\pi - \theta)]}{1 - \exp(-0.45\pi\sqrt{\Delta_2})}$$

$$\beta = 0.65 - 0.1 \exp\left(\frac{-0.63\ell}{t}\right)$$

$$c = 1 - 0.48 \exp\left(\frac{-0.74\ell}{t}\right)$$

$$\Delta_1 = (2h + t)/t$$

$$\Delta_2 = \Delta_1/2$$

t : thickness(mm)

비드형상파라메타들은 거의 같은 수치를 보였지만, K_t 값은 as welded 시험편인 경우가 2.54로 비드높이 3mm인 시험편의 2.37보다 약간 높은 수치를 보였다. 이것은 비드높이(h)에만 의존한 것이 아니라 다른 형상 파라메타의 복합적인 작용에 의해 나타난 결과로 판단된다. Fig. 8에서는 각 시험편의 응력집중계수를 보여주고 있으며, Fig. 9에서는 두 시험편을 서로 비교하였는데 측정 부위별로 K_t 값이 거의 균등함으로보아 비드상태가 일정함을 알 수 있다.

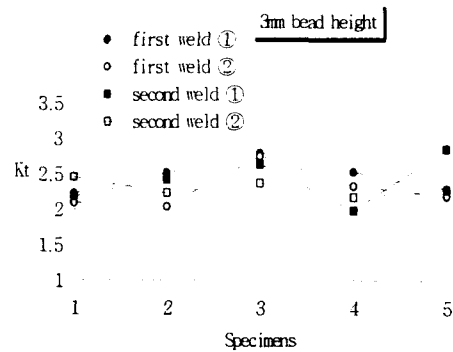
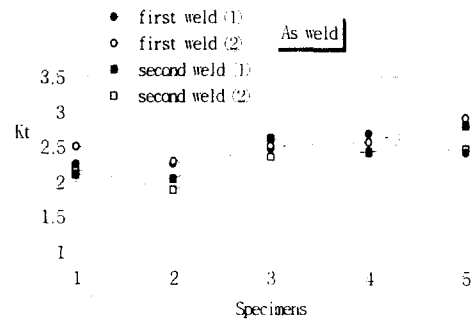


Fig. 8 Deviation of the stress concentration factor(K_t)

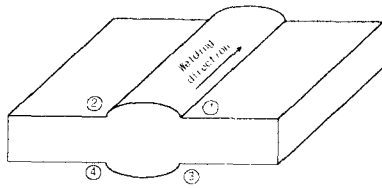
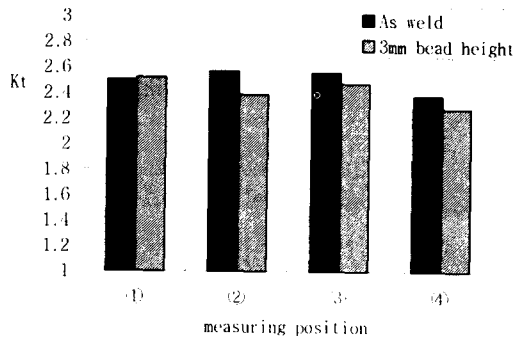


Fig. 9 Comparison of Kt for the as welded and 3mm bead height specimens

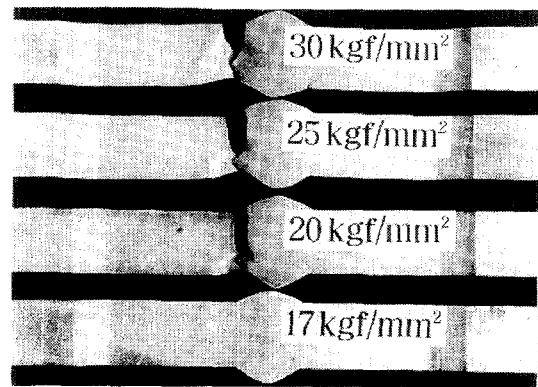
3.4 피로시험 결과

Fig. 10은 피로시험후 파단된 시험편을 보여주고 있다. 모든 시험편의 crack 발생부위는 응력집중부인 토우부이고 저응력으로 갈수록 crack 전진이 많이 이루어졌음을 알 수 있다. 이것은 파단면을 나타낸 Fig. 11에서 분명히 알 수 있다. 즉 저응력에서는 많은 하중반복으로 인해 파면이 매끄러워 매끄러운 피로파면이 넓게 형성되었지만 고응력으로 갈수록 부재가 하중을 견디지 못한 취성파괴의 단면이 두드러지게 나타나고 있다. Fig. 12에서는 응력 20kgf/mm²으로 시험한 비드높이 3mm 시험편의 파면을 주사전자현미경으로 관찰하였는데, 초기 피로 균열 발생 위치인 (A)는 입자 크기가 미세한 반면 크랙이 진전되어 갈수록 (B)와 같이 거친 입자형상을 보여주고 있다. 특히 파단된 (C)에서는 거친 파면과 덩플이 공존하고 있는데, 시험편이 파단될 때 국부적으로 큰 인장응력상태가 되어 덩플이 형성되었다고 판단된다.

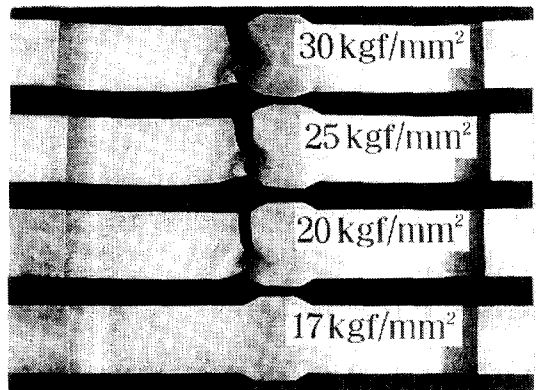
피로시험 결과 S-N선도를 Fig. 13에 나타내었는데 as weld 시험편과 비드높이 3mm인 시험편의 피로 수명은 동일하였으며 피로한도는

17kgf/mm²으로 나타났다.

설계시 피로수명 추정에 주로 이용되는 영국 에너지성(UK Den), 노르웨이 선급 및 AWS에서 제시한 S-N선도와 본 연구결과를 비교 검토해본 결과, 저응력뿐만 아니라 고응력에서도 본 실험 결과가 UK Den's S-N선도보다도 우수한 피로특성을 가지고 있으며 특히 설계응력인 17~20kgf/mm²인 경우는 거의 2배이상의 피로특성을 가지고 있음을 알 수 있다. 이와 같은 결과는 단지 비드높이에 따라 피로특성이 정해지는 것이 아니며 현업에서 단순히 용접부 비드높이만 제거한다고 해서 피로 특성이 향상되지 않는다는 것을 의미한다.

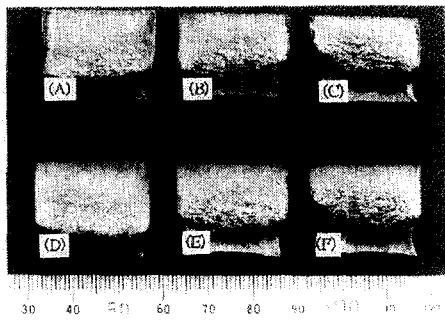


(A) as welded specimens



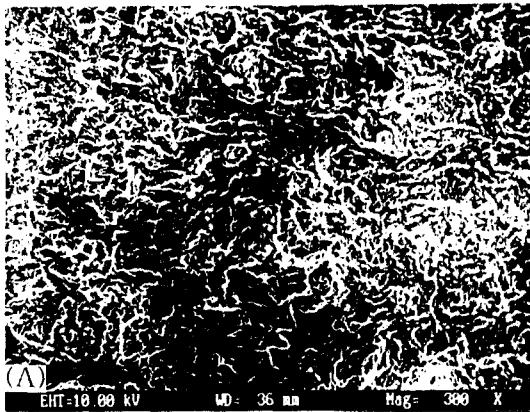
(B) 3mm bead height specimens

Fig. 10 Macrostructure of fractured specimens

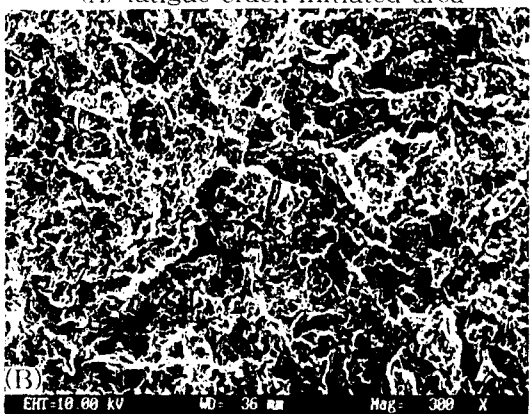


(A) as welded specimen (20kgf/mm²)
 (B) as welded specimen (25kgf/mm²)
 (C) as welded specimen (30kgf/mm²)
 (D) 3mm bead height specimen(20kgf/mm²)
 (E) 3mm bead height specimen(25kgf/mm²)
 (F) 3mm bead height specimen(30kgf/mm²)

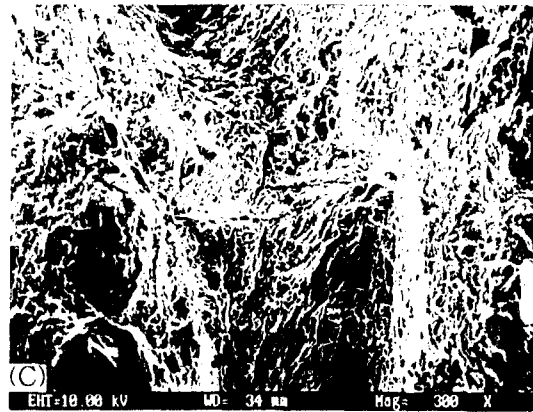
Fig. 11 Macrostructure of fractured surface fatigue specimens



(A) fatigue crack initiated area



(B) fatigue crack propagated area



(C) brittle fractured area

Fig. 12 SEM fractography of fractured fatigue specimens

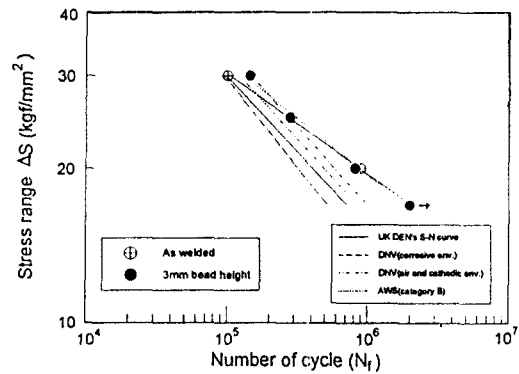


Fig. 13 Result of the fatigue test by the as welded and 3mm bead height specimens.

4. 결론

서브머지드 아크 2 pole 용접시 비드높이에 따른 피로강도와 야금학적 특성을 연구하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. As weld 상태의 시험편과 3mm이상의 bead 를 제거한 시험편의 피로 특성은 차이가 없음을 확인하였다.

2. 경도 측정 결과 후면보다 전면의 경도값이

상대적으로 높게 나타났으며 용착 금속의 미세조직은 대부분 다각화된 결정입계 페라이트와 침상 페라이트로 구성되어 있었다.

3. 23.5mm두께에 대한 I형 홈용접 비드높이의 평균은 4.38mm이었으며(AWS규정 : 1/8":3.2mm), 피로특성에 가장 큰 영향을 미치는 응력집중계수 (K_t)는 As weld시험편인 경우 2.54, 비드높이 3mm인 시험편은 2.37로 나타났다.

4. As weld상태와 비드높이 3mm 시험편의 피로한도는 17kgf/mm^2 로 나타났으며, 영국에너지성(UK DEN's)과 노르웨이선급(DNV) 및 AWS에서 규정한 피로강도보다 우수한 피로특성을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] AWS, Structural Welding Code-Steel D1.1-96, p169~170.
- [2] American Welding Society, Welding Handbook, (vol.1) 8th, 1987, p380~381.
- [3] Schuster, J. and Gentsch, O., The Welding of Fine-Grained Structural Steels for Operating Temperatures low at -60°C with reference to MAG Filler 6NiMnSi 9.4, Welding International, No. 9, 1989, p805~809.
- [4] Committee of Weld, Metallurgical of JWS, Classification of Microstructure in Low-C and Low Alloy Steel Weld Metal and Terminology, IX-1283-83.
- [5] 佐藤邦彦編, 溶接構造要覽, 大阪大學, 1983, p25~32.
- [6] S. Yoshida, et al, Effect of Size and Frequency on Fatigue Properties of SM50B Butt Welded Joint, Journal of Japan Welding Society, Vol.47, No. 9,1978, p627~632