입열량이 고변형률 강관 원주 용접부 특성에 미치는 영향

이진우^{*,†} · 송우현^{*} · 서동한^{*} · 이종섭^{*}

^{*}POSCO 기술연구원 강재솔루션 연구그룹

Effect of Heat Input on Girth Welds Properties of High Strain Steel Pipe

Jin-woo Lee^{*,†}, Woo-hyun Song^{*}, Dong-han Seo^{*} and Jong-sub Lee^{*}

^{*}Steel solution research group, Technical research laboratories, POSCO, Pohang 790-785, Korea

[†]Corresponding author : jwlee36@posco.com

(Received August 14, 2009 ; Revised September 4, 2009 ; Accepted October 30, 2009)

Abstract

SBD (Strain-based design) of pipe lines have gained world-wide attention in recent years. The present research aims to evaluate the fracture characteristics of API (America Petroleum Institute) SBD X100 girth weldment that typically applied for cold climate and deep water offshore, with the focus on the influence of heat input changing with 6kJ/cm and 10kJ/cm from GMAW (Gas Metal Arc Welding).

At a low heat input at 6kJ/cm, the weld metal had Multi-phase matrix (Acicular ferrite + Banite + Martensite) that could fill up both fracture toughness and strength as reported previously. Also, the weld metal exhibited 859MPa YS (Yield strength), 108J impact toughness at -40℃ and 0.52mm CTOD (Crack Tip Open Displacement) at -10℃. These results can be satisfied with the requirement of API SBD X100 girth weldment and Alaska pipe line project.

Key Words : SBD (Strain Based Design); API (America Petroleum institute), GMAW(Gas Metal Arc Welding) fracture toughness; Girth weldment; CTOD (Crack Tip Open Displacement);

1. 서 론

환경문제로 인한 신 재생에너지의 개발 및 수요 창출이 지속적으로 증가함에도 화석연료가 2030년까지 세계 1차 에너지 수요의 84 %를 차지 할 것으로 예상되며 특히 원유의 비중이 35 %에서 32 %로 약간 감소하지만 가장 중요한 에너지원의 위치를 고수할 것으로 예상된다. 또한 전 세계적으로 에너지 소비 증가 추세에 따라 극한지의 오일과 가스 자원의 개발이 강하게 요구되고 있으며 특히 북극지역의 원유 추정매장량은 4120억 배럴에 달하며 그 개발에 Oil Major社들의 개발 의지가 강력하다.

하지만 이런 극한지에서의 오일 및 가스의 수송은 수송거리의 장대화, 저온인성 보증 온도를 저하를 초래하는 기후조건 및 지진 등 지정학적 요건에 따라 라인파

이프용 강재 물성의 고강도화, 고인성, 및 고변형률 등의 고성능화를 요구하고 있다. 특히 최근에는 고강도 라인파이프의 길이 방향 연신을 확보에 관한 연구가 진행되고 있다. 파이프 길이 방향의 한계 변형을 2~3 % 대로 만족시키기 위해서는 파이프 자체의 한계 변형을 확보하는 것이 중요하지만 파이프와 파이프를 연결하는 원주 용접부 물성을 안정적으로 확보 하여야만 시스템 전체의 안정성을 확보할 수 있는 것으로 보고되고 있다¹⁻²⁾. 예를 들어 알래스카 라인 파이프 구축 프로젝트의 SBD X100 강재의 원주 용접부는 용접금속의 항복강도 830 MPa 수준, 용접부 저온 충격인성은 -30 ℃에서 65 J이상, 용접부(용접금속, Fusion line) CTOD 값이 0.15 mm 이상이 요구하고 있다¹⁾.

따라서 본 연구에서는 입열량을 제외한 동일 용접조건에서 현장 작업성 및 경험상으로 실제 적용 가능한 최저, 최고 두 수준(6 ~ 10 kJ/cm)의 입열량 조건을

설정하여 프로젝트 요구 물성치를 만족 여부를 검토하고 이를 최대한 만족시키는 조건에서 용접부의 안정된 파괴인성 확보 여부를 확인하는 것을 목적으로 하고 있다.

2. 사용재료 및 실험 방법

본 실험에 사용된 시험재는 두께 19.8 mm의 SBD (Strain Based Designed) X100 plate를 사용하였다. 그 화학성분 및 기계적 특성을 Table 1과 Table 2에 각각 나타내었다. 또한 시험재의 미세조직을 Fig. 1에 나타내었다. UEI(Uniform Elongation), 저YR(Yield Ratio) 값 및 고인성을 얻을 수 있는 Bainitic ferrite조직을 이루고 있음을 확인할 수 있다.

탄소 함유량은 적지만 많은 합금원소의 함유로 인하여 모재의 C_{eq} 가 0.48로 다소 높은 수준인 것이 확인된다. 또한 API(America Petroleum Institute) 규정에서 X100의 항복강도 하한 값이 680 MPa을 나타내지만, 시험재의 항복강도가 이에 미치지 못하는 것을 확인할 수 있다. 이것은 판재를 파이프로 제작할 때 가공공정 (UOE forming) 을 거치면 가공 경화에 의

해 700 MPa이상으로 강도가 상승하게 하게 되는 현상을 확인하였다. 따라서 본 시험재는 API 규정의 X100의 강도 하한 값을 만족시키는 것으로 가정할 수 있다.

Table 3에 본 연구에서 사용된 용접조건과 Groove 형상에 대하여 나타내었다.

시험편은 길이 800 mm, 넓이 250 mm, 두께 19.8 mm인 직사각형 판을 입열량에 따라 U 그루브의 형상을 달리하여 기계 가공하였으며, 자동용접로봇을 이용하여 GMAW(Gas Metal Arc Welding)으로 다층 용접하였다. 보호가스로는 85 % Ar 과 15 % CO_2 배합한 혼합가스를 사용하였다. 입열량 조건은 6 kJ/cm (이하 Gweld 6로 표기) 와 10 kJ/cm (이하 Gweld 10으로 표기) 두 수준으로 나누어 용접을 실시하였다. 입열량에 따라 개선각 형상 디자인 및 패스별 용접조건이 변화를 Table 3에 상술하였다. 또한 용접재료는 포함하여 용접금속 내에서 Ti가 Austenite boundary 내에서 Ti입자가 먼저 석출되어 Aciccur조직 핵 생성 사이트 역할을 하여 입내 조직 미세화 시켜 파괴인성 향상에 이점이 있다 평가 받는 Ti을 0.055%를 포함한 ESAB Autrod - 13.25 (solid wire)를 채용하였다.

Table 1 Chemical compositions of base metal (unit:wt%)

C	Si	Mn	P	S	Al	other
0.061	0.13	1.89	0.006	0.001	0.024	Ni,Mo,Nb,Ti, N,V
$C_{eq} = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$ $C_{eq}: 0.48$						

Table 2 Mechanical properties of base metal

	σ_{ys} (MPa)	σ_{TS} (MPa)	Elongation (%)
Welding direction	602	785	7.8
Rolling direction	563	741	7.9

Fig. 1 Microstructure of Base metal (SBD X100)

Table 3 Welding condition and Groove shape

	Weld consumable			Welding condition			
Base metal	Solid Wire	Shield gas		Process	Heat Input		Groove type
SBD X100	ESAB Autrod 13.25	85%Ar +15%CO ₂		GMAW (Sing torch)	6 kJ/cm 10 kJ/cm	U-Groove	
Groove shape and dimension				Condition of heat input
6kJ/cm	10kJ/cm	Gweld 6 for 6kJ/cm		Gweld 10 for 10kJ/cm	
	A	5°	7.5°	Pass Num.	Heat input	Pass Num.	Heat input
	B	45°	45°	1(Root)	5.1	1(Root)	6.9
	C	37.5°	30°	2(Hot)	6.2	2(Hot)	9.3
	D	2.8mm	2.8mm	3~6(Fill)	6.2	3~6(Fill)	10.3
	E	1.3mm	1mm	7~8(Cap)	6.2	7~8(Cap)	12
	F	1.3mm	2mm	Average	6.1kJ/cm	Average	10kJ/cm

용접부의 미세조직은 5 %-Nital을 이용하여 상온에서 5초간 부식시켜 광학현미경을 이용하여 관찰하였다. 용접부 화학시험은 건식분석방법인 스펙트로 분석기를 이용하여 평가하였으며, 경도는 마이크로비커스 경도기를 사용하여 하중 10 kg 하중유지 시간 15초의 조건으로 측정하였다. 용착금속에 대한 기계적 특성을 관찰하기 위하여 용착금속의 중앙부에서 용접선 방향으로 인장 시험편을 2개를 채취하여 ASTM E8에 따라 인장시험을 실시하였다. 인장 시험을 통하여 얻어진 항복강도와 인장강도는 이들 평균값을 이용하여 피로균열생성시험에 필요한 하중계산에 이용하였다. 또한 용접부 충격인성은 저온 샤르피 충격시험기를 사용하여 WM과 F/L에서 -60, -40, -20, 0, 20 °C 다섯 수준으로 평가하였다. 용접부 파괴안정성을 평가하기 위하여 MTS社의 25톤 피로시험기를 이용하여 CTOD 시험을 -10°C에서 실시하였다. Fig. 2에 CTOD 시험편의 채취방법, 형상 및 노치선 선정위치에 대하여 나타내었다.

피로균열 생성시험은 $a/w=0.5$ 를 기준으로 하여 2.5 mm 까지 균열을 생성하였다. 피로 균열 생성은 BS 7448에 의거하여 응력비 0.1, 주파수 3Hz에서 실행하였으

며, 대부분 약 40,000~50,000 사이클에서 $a/w=0.5$ 균열을 생성하였다. 노치위치는 용접 중심선과 F/L에서 가공하였다

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부 미세조직 및 강도

Fig. 3에 입열량에 따른 용접부의 마크로 사진과 용접금속 미세조직을 나타내었다.

Gweld 6이 Gweld 10에 비해 낮은 입열량(6 kJ/cm) 의해 용접됨에 따라 냉각속도가 빨라져 용접 열영향부의 영역이 약 1.2 mm로 Gweld 10의 1.8 mm보다 작은 것이 확인된다.

Gweld 10은 AF(Acicular Ferrite) + M(Martensite)의 이상계 조직을 가지고 있는 것으로 보인다. AF가 인성을 확보하고 M가 강도를 확보하는 Multi-Phase 용접금속 설계 개념에 부합하는 조직을 나타내고 있음이 확인되나 인성과 강도를 상호 보완하는 LB(Low Banite)조직은 관찰되지 않았다. 이에 반하여 낮은 입

(a) Macro photo of Gweld 6, 6kJ/cm

(b) Macro photo of Gweld 10, 10kJ/cm

(c) Microstructure of Gweld 6, 6kJ/cm

(d) Microstructure of Gweld 10, 10kJ/cm

Fig. 3 Macro photo of welds and microstructure of weld metal for SBD X100 Girth welds

Table 4 Chemical composition of weld metal

	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	N(ppm)	O(ppm)	Ceq	Pcm
Gweld 6	0.079	0.61	1.55	0.008	<0.002	0.006	0.33	0.81	83	340	0.49	0.22
Gweld 10	0.082	0.50	1.41	0.008	<0.002	0.006	0.32	0.78	61	240	0.44	0.21
BM	0.065	0.27	1.87	0.0048	0.0008	-	0.26	0.34	-	-	0.46	0.19

$$Ceq = C + Mn/6 + (Cr + Mo + V)/5 + (Ni + Cu)/15$$

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

열량으로 인하여 Gweld 10 보다 빠른 냉각된 Gweld 6는 AF+ LB + M 삼상계를 이루고 있어 강도와 인성측면에서 밸런스를 갖추 조직을 확보한 것으로 사료된다.

Table 4 입열량에 따른 용접금속의 화학분석 결과를 나타내었다. 입열량 변화에 따른 용접금속의 성분조성은 거의 차이가 없으나 Gweld 6의 경우가 Ceq가 높게 나타났다. 이는 입열량이 높은 Gweld 10 모재의 희석률이 Gweld 6 보다 다소 높기 때문이라 사료된다.

3.2 용접부 경도 및 강도

Fig. 4에 상부 2 mm 지점에서의 용접금속에서 열영향부를 통하여 모재까지 경도 분포를 나타내었다.

입열량 변화에 따른 경도 분포의 뚜렷한 변화가 관찰되었다. Gweld 6의 용접금속은 295 Hv를 나타내고 Gweld 10의 용접금속은 252 Hv 값을 나타내고 있다. X100 모재 경도 수준이 약 250 Hv정도 인 것으로 볼 때 입열량 6 kJ/cm인 Gweld 6은 1.18 수준의 오버매칭을 나타내고 입열량 10 kJ/cm 인 Gweld 10은 Even-matching 수준을 나타내고 있는 것이 확인된다. 또한 두 조건 모두 두드러진 HAZ 연화는 확인되지 않았다. Fig. 5의 용접부 인장시험결과에서 보여지듯 용접부 오버매칭 수준이 차이가 있음에도 불구하고

Fig. 4 Hardness distribution of Girth welds

Fig. 5 Photograph of tensile tests for SBD X100 Girth welds

Table 5 Result of tensile test for all weld metal for SBD X100 Girth welds

	Test direction	0.2% YS (MPa)	TS (MPa)	Fractured Position
Gweld 6	Transverse	-	762	BM
	Longitudinal (All weld metal)	859	893	-
Gweld 10	Transverse	-	758	BM
	Longitudinal (All weld metal)	744	798	-
Target	Stress-based	≥ 690	≥ 770	
	Strain-based	≥ 830	-	

Gweld 6, 10 두조건 모두 모재부에서 파단이 일어나 용접부의 건전함을 나타내지만 Strain base design 파이프 설계 추천사항으로 원주용접부의 오버매칭 정도를 15~20% 수준을 추천하고 있어 Gweld 6의 조건이 Strain based design 컨셉에서는 더 안정적으로 판단될 수 있다.

Table 5에 용접금속에 대한 인장시험 결과를 나타내었다. 용접금속 인장시험 결과 Gweld 6의 항복강도는 859 MPa를 나타내었다. 이는 API 규정의 SBD X100에서 추천하는 용접금속의 항복강도가 830 MPa를 넘어야 하는 기준에 부합되는 결과로써 만족할 만한 결과로 인정될 수 있다. 또한 인장강도는 893 MPa를 나타내었다. 용접금속의 인장강도가 항복강도보다 약간 높아 별 차이가 없는 것으로 보인다. 이것은 다층용접의 템퍼링 효과로 인하여 유다즈 현상이 발생하여 항복강도의 피크 값이 급격히 상승되어 생긴 결과로 사료된다. Gweld 10의 항복강도는 744 MPa로 API 규정의 Stress based design X100에서 추천하는 용접금속의 항복강도가 690 MPa를 넘어야 하는 기준에는 부합하는 값을 얻었지만 Strain based design 기준에는 약 90 MPa 정도 모자랐다. 위 시험결과로부터 동일 용접 조건하에서 6~7kJ/cm 입열량 수준이 API SBD X100 용접부 설계 규정에 부합하는 인장강도를 확보하는데 유리하다고 판단할 수 있다.

3.3 용접부 충격인성

Fig. 6에 용접부 저온충격시험 결과를 나타내었다. Gweld 6은 용접금속에서 충격인성값은 -20℃에서 169 J을 -40℃에서 97 J(mean)을 나타내고 있으며 F/L에서 충격인성 값은 -20℃에서 196 J(mean)을 -40℃에서 81 J(mean)을 얻어 타겟인 -30℃에서 65 J(mean)를 상회하는 결과를 나타내고 있다. 또한 Gweld 10은 용접금속에서 충격인성값은 -20℃에서 172 J(mean)을 -40℃에서 108 J(mean)을 나타내고

Fig. 6 Result of Charpy impact test for SBD X100 girth welds

있으며 F/L충격인성 값은 -20°C 에서 196 J (mean)을 -40°C 에서 46 J(mean)를 얻어 WM은 타겟을 상회하나 FL은 타겟과 인접한 값이 예상된다. 이와 같은 결과는 앞서 용접금속 조직에서 기술한 바와 같이 Gweld 6가 AF+LB+M 삼상계를 이루고 있어 강도와 인성의 밸런스를 갖추어 좀더 안정적인 저온충격인성을 보유하고 있는 것으로 사료된다.

위와 같이 Gweld 6, 10 두조건 용접부에 대하여 미세조직 관찰, 용접부 인장강도, 경도시험, 저온충격시험을 통해 평가한 결과 AF+LB+M의 삼상조직을 지닌 Gweld 6가 SBD 파이프 설계 컨셉에 좀더 적절한 오버매칭 수준을 나타내고 만족스러운 저온 충격인성 값을 가지고 있는 것으로 판단되었다. 이에 Gweld 6의 시험편을 파괴인성 평가 방법으로 널리 알려진 CTOD 시험을 하여 파괴인성을 평가하여 고변형률 강관의 원주 용접부 파괴안정성확보 여부를 검토하였다.

3.4 CTOD 시험결과

Fig. 7에 모재 용접금속 F/L에서 CTOD 시험을 진행한 후 파단면에 대한 마크로 사진을 나타내었다. 모재시험편 파단면 (Fig. 7 (a))에서 Precrack은 평균

길이 약 2.5 mm 전 두께에 균일 하게 생성되어 있으며 Precrack 선단에 소성저항역(δ_c) 균일한 길이로 분포 하고 있음이 확인된다. 또한 크랙전파는 시험편 거의 중앙부에서 전파되었음을 확인할 수 있다. 용접금속 시험편 파단면(Fig. 7 (b))에서 Precrack은 평균길이 약 2.5 mm 으로 측정 되었으나 루트 부분에서 약간 Precrack 길이가 약간 짧은 것을 확인 할 수 있다. 이것이 CTOD시험의 유효성에 미치는 영향은 미미하다고 크랙길이 유효성 판별법 (BS 7448 part I)의하여 판단할 수 있다. 또한 소성저항역(δ_c) 이 균일한 길이로 분포하고 있지만 모재와 비교 하여 현저히 짧아 모재보다 낮은 소성저항치를 가지고 있다고 사료된다. 또한 크랙 생성은 Precrack 중앙부에서 생성되어 아래방향으로 수직 전파된 것으로 관찰된다. F/L 시험편 파단면(Fig. 7 (c))에서 Precrack 평균길이는 약 2.5 mm이고 비교적 균일한 길이로 생성되었음이 관찰된다. Root 쪽에서 F/L까지의 Precrack 선단에서 모재와

Fig. 7 Macrograph of fracture section for CTOD specimens of SBD X100 Girth welds

Table 6 Result of CTOD test for SBD X100 girth welds

No	1	2	3	4	5	6	7	8	Min.	Max.	Mean
BM	0.62	0.62	0.62	0.62	* ≥ 0.62				0.620	0.620	0.62
WM	0.62	0.40	0.51	0.60	0.45	0.48	0.58	-	0.40	0.62	0.52
FL	0.49	0.51	0.43	0.55	0.58	0.31	0.40	0.62	0.31	0.62	0.49

동일한 수준의 소성저항역(δ_c)이 관찰 되었다. Cap 부분에서 F/L부분의 Precrack의 선단에서는 용접금속에서 관찰된 동일한 수준의 소성저항역(δ_c)이 관찰 되었다. 또한 크랙 발생은 용접금속 부분 에서 발생하여 Cap side 방향으로 진행되었음이 확인 된다. 크랙 발생 지점과 그 지점에서의 소성저항치가 용접금속과 거의 같은 결과로부터 F/L에서의 파괴인성치가 용접금속의 파괴인성치와 같은 수준으로 예상되어진다.

Table 6에 SBD X100 모재와 입열량 6 kJ/cm 적용된 원주 용접부의 용접금속 및 F/L에 대한 CTOD 결과값을 나타내었다. SBD X100 plate 모재에서의 CTOD 평가는 모두 2.5 mm 게이지 한계를 초과 함으로써 -10 °C에서 0.62 mm(측정 최대값)를 초과하는 값을 갖는 것만을 확인할 수 있었다. 용접금속은 평균 값으로 약 0.52 mm, F/L에서는 평균값으로 0.49 mm수준의 CTOD 수준을 보여주었다. 이는 프로젝트 요구치 -10°C에서 평균값 0.10 mm를 크게 상회하는 값으로 입열량 6 kJ/cm를 이용하여 제작된 SBD X100 원주 용접부는 -10 °C에서 만족할 만한 파괴안정성을 확보하였다고 판단 할 수 있다.

4. 결 론

1) 현장적용 가능한 입열량 범위 안에서 6 kJ/cm수준의 입열량을 적용할 때 빠른 냉각 속도와 적은 모재 희석률로 인하여 강도와 인성의 밸런스를 갖춘 용접금속의 Muti-phase (AF+LB+M) 확보가 가능하였으며, API SBD X100 설계 컨셉에 대응할 수 있는 용접부의 강도 및 저온 충격인성 물성치를 만족시켰다.

2) 입열량 6 kJ/cm를 적용한 SBD X100 Girth 용접부의 파괴 안정성을 검토한 결과 -10°C 용접금속에서 0.52 mm, F/L에서 0.49 mm의 CTOD값을 얻어 알래스카 프로젝트 요구치인 0.15 mm를 한층 넘어선 안정된 파괴인성 값을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. W. Kan, M. Weir, M. Zhang, D. Lilling : Strain-Based Pipelines-Design Consideration Overview, ISOPE proceeding, July, 2008, 174-181
2. Wang, Y., Liu, M., and David R. : Strain Based Design of High Strength Pipelines, ISOPE Proceeding, July 2007, 3186-3192
3. F. Minami, M. Ohata, and D.Watanabe : Fracture Assessment Procedure for Structural Components under Cyclic and Dynamic Loading, ISOPE Proceeding, July 2007, 3207-3215
4. F. Minami, M. Ohata H. Shimanuki and Y. Hagihara : Method of constraint loss correction of CTOD fracture toughness for fracture assessment of steel components, Engineering Fracture Mechanics, June, 2006, 1996-2020
5. Shin, Y., Kang S., and Kim M.: Evaluation of Fracture Toughness and Microstructure on FCA Weldment According to Heat input, Journal of KWJS, **26-3** (2008), 51-60 (in Korean)
6. Y. Komizo and Y. Fukada: CTOD properties and MA Constituent in the HAZ of C-Mn Microalloyed Steel, The Sumitomo Search, **40** (1989) , 31-40
7. M. G. Dawes : Fracture Control in High Yield Strength Weldments, Welding Research Supplement, 53 1974, 369-378
8. J. Lee, J. Ju J. Jang and Dongil Kwon : Weld Crack assessments in API X65 Pipeline-failure assessment diagrams with variations in representative mechanical properties, Materials Science and Engineering A, 2004, 122-130