

용접공정 및 용접형상 변화에 따른 소구경 분기배관 용접부의 피로특성

Fatigue Properties of the Small Diameter Branch Welded Pipe Joint with variation of Welding Procedures and Welding Shapes.

백 종현*, 김철만, 김우식

* 한국가스공사 연구개발원 배관연구센터

ABSTRACT S-N fatigue tests were conducted to investigate the fatigue strength of the small diameter socket and butt welded joints of carbon steels. Experimental parameters were pipe diameter, throat depth, shape of socket welds and welding procedure. Filler metals used in SMAW and GTAW procedure were E9016-G with diameter of 4.0 mm and ER70S-G with diameter of 2.4 mm. API 5L Gr.B pipes were adopted as a small diameter branch pipes. All socket fittings were machined from ASTM A105 carbon steel. Fatigue strength in socket weld joints increased with increasing pipe diameter, area of weld metal and weld leg length of pipe side.

1. 서 론

각종 석유화학 플랜트 및 천연가스 시설물에는 유체의 안정적인 공급과 압력조절을 위하여 각종 분기배관이 설치되어 있다. 분기배관 설치는 일반적으로 용접에 의하여 시행되며 사용되는 용접 방법으로는 맞대기용접 (Butt Weld) 공정인 Weldolet 용접 (이하 "WOL"로 표기)과 필릿 용접법인 socket 용접(이하 "SOC"로 표기)법이 사용되고있으며, 작업의 편의성으로 인하여 SOC 용접 공정이 일반적으로 사용되고 있다^{1,2)}. 용접부에는 용접공정 특성상 재질의 불균일성과 용접 잔류응력등이 존재하며³⁾, SOC 용접으로 연결된 소구경 배관 용접부는 WOL 용접부에 비하여 취약한 부분이며 비파괴검사의 한계로 인해 건설초기에 내재되어 있는 용입부족, 용입불량 등과 같은 용접불량 부위는 미소균열로 성장될 가능성이 있다.

미소 균열 중 일부는 각종 기계적 진동과 운전 압력변화에 의한 피로하중의 영향으로 안전성에 영향을 미칠 수 있는 크기의 균열로 성장할 수 있으며, 이러한 균열로 인한 누설 및 파열 시에는 막대한 경제적 손실, 인명 피해 및 대기 오염

에 의한 환경 피해가 발생하게 된다^{4,5)}. EPRI에서 보고된 자료에 의하면^{1,2)} 원전설비에서 피로손상으로 인하여 446건 사고가 발생되었으며 그 발생 부위의 80%는 SOC 용접부로 보고되고 있으며, 일본 간사이전력 원전설비에서도 피로에 의한 사고사례가 보고되고 있다⁴⁾. 해외의 경우 실제크기 배관시험을 통해 용접부 형상변화에 따른 피로수명평가를 위한 실험을 수행하고 있으며, 이를 바탕으로 안전성평가 기준을 제정하여 운용하고 있다^{1,2)}.

본 연구는 소구경 배관 필릿용접부인 socket 용접부위를 대상으로 피로강도 평가를 수행함으로써 용접부 형상, 용접공정변화 및 배관직경변화에 따른 건전성을 평가하고자 하였으며, 또한 맞대기 용접을 실시하여 socket 용접부와 기계적 성능을 비교 평가하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 분기배관은 API 5L Gr.B 이며, socket으로 사용된 fitting은 ASTM A105이며, Table 1에는 화학적 성분을 나타내었다. 성분 분석 결과 배관재료의 탄소당량은 0.16으로 분석

되었으며, fitting재는 0.43으로 분석되었다.

Table 1. Chemical composition of pipe and fitting.

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cu	C.E*
	Ni	V	Ti	Nb	Mo	Cr	
Materials							
API 5L Gr.	0.06	0.096	0.45	<0.001	0.008	0.05	0.16
	0.016	<0.01	0.002	<0.001	0.04	0.044	
ASTM	0.23	0.166	1.06	0.003	0.078	0.114	0.43
A105	<0.01	<0.01	0.002	<0.001	0.03	0.02	

기계적 물성 평가를 위해서 분기배관을 용접하였으며 Table 2에는 용접조건을 나타내었다. SOC 용접에서는 용접공정에 따른 기계적 물성변화를 비교하기 위하여 SMAW 공정과 GTAW 공정을 실시하였다. SMAW 공정에서 사용된 용가재는 직경 4.0 mm인 저수소계 E9016-G을 사용하였으며, GTAW 공정에서는 직경 2.4 mm인 ER70S-G 용가재를 사용하였다. 대부분의 용접은 직경 1" 배관에 대하여 실시하였으며 직경변화에 따른 특성변화를 관찰하기 위하여 3/4" 배관에 대해서도 물성을 평가하였다. 분기배관 연결형상 변화에 따른 특성을 평가하기 위하여 필릿용접 형상인 SOC 용접과 WOL 용접 형상인 맞대기 용접을 실시하였다. 맞대기 용접부는 직경 1" 배관을 사용하여 GTAW 공정으로 용접하였다.

또한 용접층수 변화에 따른 물성변화를 평가하기 위하여 1~3층으로 용접층수를 변화하였다. Table 2의 B 시험편의 경우는 초층 용접후 2번째층의 용접부가 분기배관 방향으로 더 길게 용접한 형태이며, C 시험편은 분기배관 방향과 fitting 방향으로 용접부 다리길이가 같게 SMAW 공정으로 용접한 것이며, E 시험편은 다리길이가 같게 GTAW 공정으로 용접한 것이다.

피로시험을 위해 사용된 장비는 유압서버 만능 시험기로 최대용량은 50톤이며 모든 상온에서 실시하였다. 피로시험은 S-N 피로시험을 실시하였다. 피로시험은 하중제어 방식을 사용하였으며 부가하중은 인장시험을 통하여 얻은 최대하중의 0.8~0.2를 사용하였으며 하중비는 0으로 하였으며, 피로시험 사이클은 부가 하중의 크기에 따라 5 ~ 13 Hz 범위에서 실시하였다. 시험기는 피로 시험편이 파단되면 자동으로 정지되도록 설정하였으며 파단시점을 피로수명으로 평가하였다.

Table 2 . Welding design for mechanical test.

Joint	No.	Process	Filler Metal (Dia.)	No. of passes	Pipe dia.
Fillet (Socket)	A	SMAW	E9016-G (4.0 mm)	1	1"
	B	SMAW	E9016-G (4.0 mm)	2	1"
	C	SMAW	E9016-G (4.0 mm)	2	1"
	D	SMAW	E9016-G (4.0 mm)	3	1"
	E	GTAW	ER70S-G (2.4 mm)	2	1"
	F	SMAW	E9016-G (4.0 mm)	1	3/4"
Butt (Weldolet)	G	GTAW	ER70S-G (2.4 mm)	2	1"

3. 실험결과

3.1. 연결방법 변화에 대한 피로강도 효과

Fig. 1에는 연결형상 변화에 따른 피로강도 특성을 평가결과이다. 시험편 E는 필릿용접 형상인 SOC 용접으로 가공되었으며, 시험편 G는 WOL 용접 형상인 맞대기 용접으로 제작된 것이다. 맞대기 용접으로 제작된 시험편 G가 SOC 용접공정으로 제작된 시험편 E에 비하여 높은 피로강도를 나타내었다. 부가하중이 0.8 UTS인 고응력하에서는 두 시험편이 비슷한 피로강도를 나타내나, 부가하중이 점차로 감소함에 따라 SOC 용접부가 맞대기 용접부에 비하여 더 낮은 피로수명을 나타내고 있었다. 이는 연결부위의 구조적 차이로 응력집중계수가 SOC 용접부에서 더 높아 맞대기 용접부가 더 높은 피로수명을 나타낸 것이다.

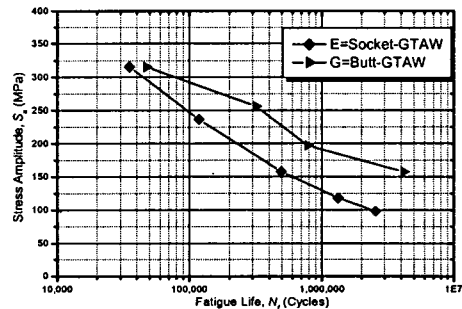


Fig. 1. S-N fatigue data for socket and Butt welded joint.

3.2. 용접 적층 변화에 대한 피로강도 효과

Fig. 2에는 용접 적층 변화에 따른 피로강도 변화효과를 나타낸 것이다. 시험편 B는 초층 용접 후 2번째층 용접층을 분기배관방향으로 용접층을 형성한 것이며, 시험편 C는 용접다리길이 가 동일하도록 용접층을 형성한 것이다. 저응력 하에서는 시험편 C의 경우가 더 높은 피로강도를 나타내나, 백만 사이클 이후에는 거의 비슷한 피로강도를 나타내고 있다.

용접적층 변화에 따른 피로강도 변화에 대한 국외연구결과에 따르면 최종층의 용접부가 분기 배관 방향에 용접될 경우에는 용접부 toe 부위에서 압축잔류응력이 생성되어 용접다리 길이가 같은 용접부에 비하여 더 높은 피로강도를 나타내고 있다^{2,3)}.

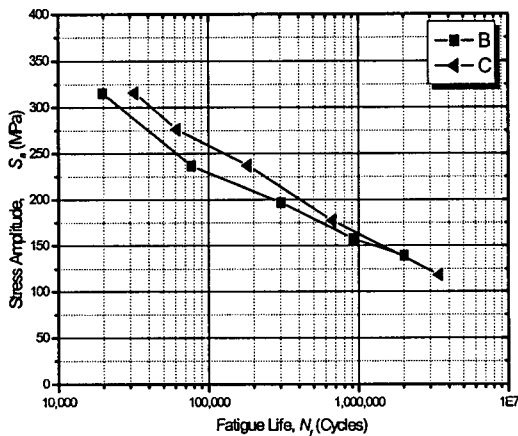


Fig. 2. S-N fatigue strength with variation of weld sequence.

3.3. 용접부 면적 변화에 대한 피로강도 효과

Fig. 3에는 용접부 단면적 변화에 따른 피로강도 효과를 나타낸 것이다. 용접부 단면적은 각 용접부의 다리길이를 측정하여 계산하였다. 시험편 A, C, 및 D는 용접 pass를 각각 1, 2 및 3 pass를 실시한 시험편이며 단면적은 38.82, 50.72 및 73.67 mm²이다.

용접 단면적이 증가함에 따라 용접부의 피로강도는 증가하는 경향을 나타내고 있었으나, 시험편 D는 시험편 C에 비하여 용접 단면적이 45% 증가하였음에도 불구하고 시험편 C와 D의 피로강도 강도는 비슷한 수치를 나타내었다.

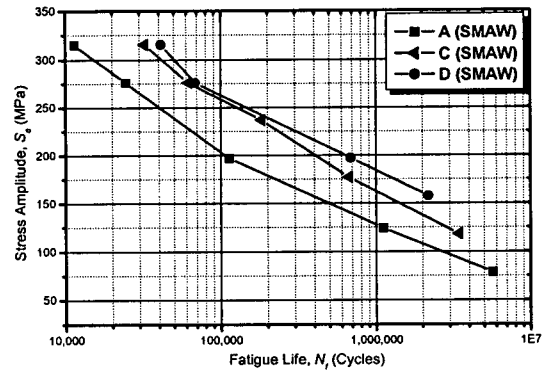


Fig. 3. Influence of weld metal area on the S-N fatigue strength.

4. 결 론

Socket 용접에 있어서 용접부 형상변화에 따라서 피로강도는 차이가 있으며, GTAW 공정에서 Socket 용접부 보다는 Butt 용접부가 피로강도가 높으며, 분기배관 방향으로 용접길이가 긴 경우, 용접부 단면적이 증가할수록 피로강도가 증가하는 경향을 나타내었다.

참고문헌

- Higuchi.M, Nakagawa.A, Iida.K, Hayashi.M, Yamaguchi.T, Saito.M and Sato.M, 1998, "Experimental Study on Fatigue Strength of Small-diameter Socket-welded Pipe Joints", J. of pressure Vessel Technology, Vol. 120, pp.149~163.
- Riccardella.P.C, Pan.S.H, Sullivan.M, Schletz.J and Gosselin.S.R, 1998, "Vibration Fatigue Testing of Socket Welds", Pressure Vessel and Piping Codes and Standards, Vol. 360, pp. 453~463.
- Yamashita.T, Hattori.T, Iida.K, Hayashi.M, Nomoto.T, and Sato.M, 1997, "Effect of Residual Stress on Fatigue Strength of Small-diameter Welded Pipe Joint", J. of pressure Vessel Technology, Vol. 119, pp.428~434.
- Tsujikura.Y, 1998, "Fatigue failures of small diameter pipe welds in PWR plant", Welding in the World, Vol. 41, pp.10~19.
- Iida.K, Matsuda.F, Sato.M, Nayama.M and Akitomo.N, 1996, "Study on crack generation at root of socket welds", Nuclear Engineering and Design, Vol. 166, pp. 85~98.