



용접부의 형상과 공정변화에 따른 소구경 분기배관의 피로강도 특성평가

백 중 현* · 김 우 식*

*한국가스공사 연구개발원 배관연구센터

S-N Fatigue Strength of Small Diameter Branch Welded Pipe with Variation of Welding Shapes and Welding Procedures

Jong-hyun Baik* and Woo-sik Kim*

*R&D Div., Korae Gas Corporation, Ansan 425-790, Korea

Abstract

S-N fatigue tests were conducted to investigate the fatigue strength of small diameter socket and butt welded joints made 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. Tensile strength was not affected by the welding procedure. Fatigue strength in socket weld joints increased with increasing pipe diameter, area of weld metal and weld leg length of pipe side.

* Corresponding author : jhbaek@kogas.re.kr

(Received January 27, 2004)

Key Words : Butt weld, Fatigue strength, GTAW, Socket, SMAW, Weldode

1. 서 론

각종 석유화학 플랜트 및 가스공급 시설물에는 유체의 안정적인 공급과 압력조절을 위하여 각종 분기배관이 설치되어 있다. 분기배관 설치는 일반적으로 용접에 의하여 시행되며 사용되는 용접방법으로는 맞대기용접(Butt Weld) 공정인 Weldolet 용접(이하 "WOL"로 표기)과 필릿 용접법인 Socket 용접(이하 "SOC"로 표기)법이 사용되고 있으며, 작업의 편의성으로 인하여 SOC 용접 공정이 일반적으로 사용되고 있다^{1,2)}.

ASME B31.3, B31.8, BS 2633 및 CSA Z662에서는 SOC 용접부에 대한 용접설계를 Fig. 1과 같이 규정하고 있다. 용접부의 강도유지를 위하여 socket 용접부의 다리길이(leg length)는 최소 1.25t (t=배관벽 두께)로 하며 단, 1/8"(3.2 mm), 또는 5/32"(4 mm) 이상을 유지하도록 하고 있다.

또한 초층 용접시 root부의 응고균열방지 및 고온의 유체 사용시 배관과 fitting과 열팽창계수의 차이에 의한 열응력 유입으로 초층 용접부의 균열방지를 위하여

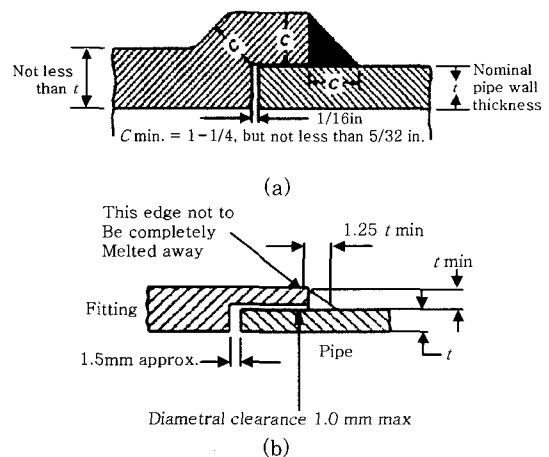


Fig. 1 Standards on the socket weld joint. (a) ASME B31.8 (B) BS 2633

slip-on-gap (fitting과 배관 사이의 간격)을 1/16", 즉 1.5~1.6 mm를 유지하도록 하고 있다⁵⁻⁹⁾. 필릿용접부의 형상은 convex와 concave 형태로 구분되며 ASME B31.8에서는 용접부 형상을 응력집중을 최소화하기 위하여 concave 형상으로 설계하도록 권고하고 있다⁶⁾.

ASME B31.3에서는⁷⁾ 필릿용접부의 다리길이 계산시 "Equal leg fillet weld"에서의 이론 목두께 (theoretical throat)는 0.707x다리길이 이며, "Unequal leg fillet weld"에서의 이론 목두께는 용접부 수직부와 수평부의 끝단에서 서로 연결한선과 용접초층부에서 직각을 이루는 선과의 교차점에서 용접초층부까지의 거리이다. Fig. 2에는 필릿용접부 다리길이 계산하는 그림을 나타낸 것이다.

용접부에는 용접공정 특성상 재질의 불균일성과 용접 잔류응력등이 존재하며, 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^{3,10,11)}.

미소 균열 중 일부는 각종 기계적 진동과 운전압력변화에 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 오염에 의한 환경 피해가 발생하게 된다^{4,5)}.

EPRI에서 보고된 자료에 의하면 원전설비에서 피로 손상으로 인하여 446건 사고가 발생되었으며 그 발생 부위의 80%는 SOC 용접부로 보고되고 있으며^{1,2)}, 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 운영하고 있다.

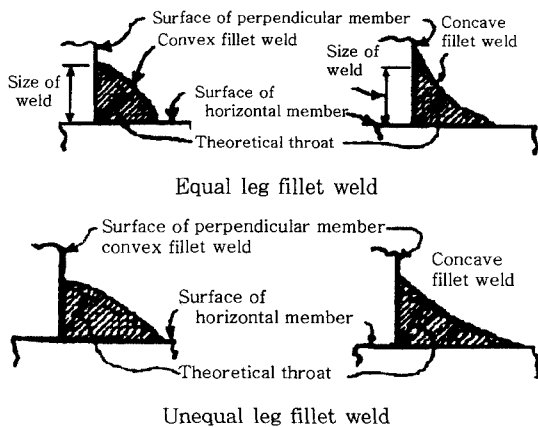


Fig. 2 Fillet weld size in ASME B31.3

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

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편 용접

본 연구에 사용된 분기배관은 API 5L Gr.B 이며, socket으로 사용된 fitting은 ASTM A105이며, Table 1에는 화학적 성분을 나타내었다. 성분분석 결과 배관재료의 탄소당량은 0.16으로 분석되었으며, fitting재는 0.43으로 분석되었다. 탄소당량은 용접성 평가를 위한 식으로 0.45 이하이면 용접시 균열발생이 현저히 감소된다.

기계적 물성 평가를 위해서 Table 2에 나타낸 다양한 용접조건을 사용하여 시험편을 제작하였으며 그 형상을 Fig. 3에 나타내었다. SOC 용접에서는 용접공정에 따른 기계적 물성변화를 비교하기 위하여 SMAW 공정과 GTAW 공정을 실시하였다. SMAW 공정에서 사용된 용가재는 직경 4.0 mm인 저수소계 E9016-G 을 사용하였으며, GTAW 공정에서는 직경 2.4 mm인 ER70S-G 용가재를 사용하였다. 대부분의 용접은 직

Table 1 Chemical composition of pipe and fitting

Elements Materials	C	Si	Mn	P	S	Cu	C.E.*
	Ni	V	Ti	Nb	Mo	Cr	
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 A105	0.23	0.166	1.06	0.003	0.078	0.114	0.43
	<0.01	<0.01	0.002	<0.001	0.03	0.02	

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"

경 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.

Fig. 3의 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.

2.2 시험방법

시험에 사용된 장비는 유압서버 만능 시험기로 최대 용량은 50톤이며 상온 대기중에서 실시하였다. S-N 피로시험은 하중제어 방식을 사용하였으며, 부가하중은 인장시험을 통하여 얻은 최대하중의 0.8~0.2를 사용하였다. 하중비는 0으로 하였으며, 피로시험 사이클은 부가 하중의 크기에 따라 5~13 Hz 범위에서 실시하였다. 시험기는 피로시험편이 파단되면 자동으로 정지되도록 설정하였으며 파단시점을 피로수명으로 평가하였다. Fig. 4에는 S-N 피로시험시 사용된 시험편의 형상을 나타내었다. 피로시험시 시험편의 파단부위가 시험편이 시험기의 jaw face와 고정된 끝단부위에서 계속 파단되는 현상이 관찰되어 이를 방지하고자 두께 1 mm의 스테인레스 박판을 시험편의 끝단부위에 감싼

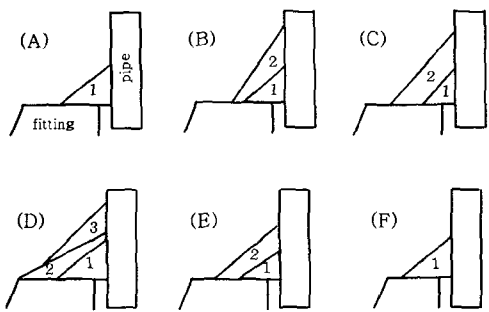


Fig. 3 Welding sequence of socket weld joint

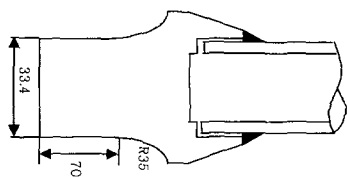


Fig. 4 Specimen for fatigue test

후 피로시험을 실시하였다.

3. 실험결과

3.1 용접부 단면관찰

Fig. 5에는 SOC 용접부에 대한 단면을 나타낸 것이다. 시험편 A는 SMAW 공정으로 1 pass 용접을 실시한 형태이며, 시험편 B는 분기배관 방향으로 길게 용접된 형태이며, 시험편 C는 용접다리길이가 같게 용접되었으며, 시험편 D는 3 pass로 용접되어 있으며, 시험편 E는 GTAW 공정으로 2 pass로 용접되어 있으며 시험편 F는 3/4" 배관에 2 pass로 용접되어 있는 형태이다.

각 초층 용접부에는 SOC 용접에서 일반적으로 관찰되는 용입부족과 같은 결함은 관찰되지 않았으며, GTAW 공정에서는 SMAW 공정에 비하여 초층용접부의 용입이 깊게 형성되어 있었다. SMAW 용접공정인 A, B, C, D 및 F번 시험편은 용접부가 볼록한 convex 형상이며, GTAW 용접공정인 E번 시험편은 concave 형상으로 용접되었다. ASME B31.8에서는 SOC 용접부의 응력집중을 감소시키기 위하여 용접부의 형상은 concave 형상을 유지하도록 권고하고 있다⁶⁾.

3.2 인장강도 평가

용접부 형상변화에 따른 SOC 용접부와 WOL 용접부에 대하여 인장시험을 실시하였으며, 그 결과를 Table 3에 나타내었다. 인장강도 평가결과 모두 모재부에서 파단되었다. 즉, 용접층수 변화와 용접공정 변화에 따라서는 인장강도의 큰 변화는 없었다.

Table 3에서 H시험편은 용접부가 없는 모재 시험편으로 인장강도는 A~G 시험편에 비하여 낮은 값을 나

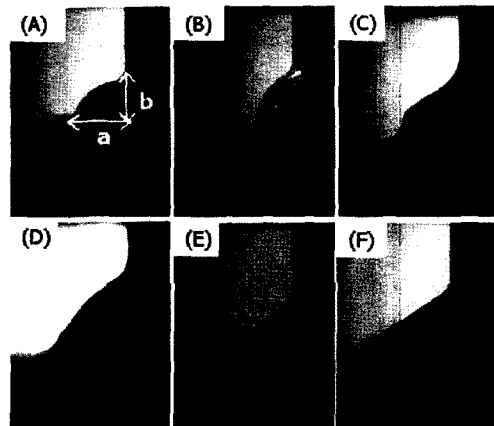


Fig. 5 Cross section of socket weld joint

Table 3 Tensile strength on the weld joint

No.	Max.Load (kg.f)	UTS (MPa)	Welding procedure
A	14,176	393.41	1", SMAW, SOC Joint
B	14,254	395.57	1", SMAW, SOC Joint
C	14,164	393.08	1", SMAW, SOC Joint
D	14,352	398.29	1", SMAW, SOC Joint
E	14,102	391.36	1", GTAW, SOC Joint
F	13,602	446.52	3/4", SMAW, SOC Joint
G	14,206	394.25	1", GTAW, Butt Joint
H	13,754	381.70	1", No Welding, Base Metal

타내고 있었다. 이는 용접부가 있을 경우는(A~G) 용접부가 없는 시험편에(H) 비하여 인장시험시 하중의 분포가 용접부에 분산된 후 모재부에서 파단되기 때문에 비록 모든 시험편에서 모재부에서 파단되더라도 용접이음부가 있을 경우 더 높은 인장강도를 나타낸 것으로 판단된다.

3.3 용접부 피로강도 평가

3.3.1 연결방법 변화에 대한 피로강도 효과

Fig. 6에는 연결형상 변화에 따른 피로강도 특성 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 기하학적 형상차이로 응력집중계수가 SOC 용접부에서 더 높아 맞대기 용접부가 더 높은 피로수명을 나타낸 것이다.

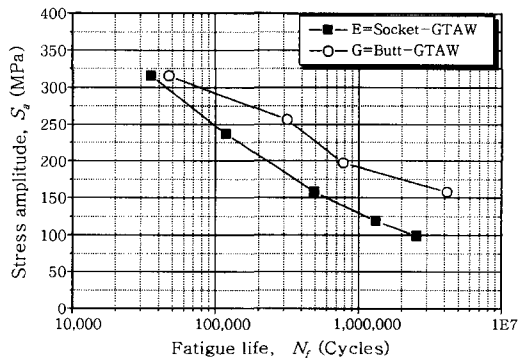


Fig. 6 S-N fatigue data for socket and Butt joint

3.3.2 직경 변화에 대한 피로강도 효과

배관 직경변화에 따른 피로강도 효과를 관찰하기 위하여 SMAW 공정으로 용접된 시험편 A(1")와 시험편 F(3/4")에 대하여 S-N 피로시험을 실시하여 그 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

배관직경 변화에 따른 피로강도 효과에 대한 국외 연구결과에 따르면 탄소강의 경우 2", 1" 및 3/4"로 배관 직경이 감소함에 따라 피로강도가 증가하는 경향을 나타내었으며, 그 원인으로는 응력집중이 배관직경이 증가함에 따라 증가하였다^{1,2)}.

본 연구에서는 저응력과 고응력 범위에서는 시험편 A에서 약간 우수한 피로강도가 나타났다.

3.3.3 용접 적층 변화에 대한 피로강도 효과

Fig. 8에는 용접 적층 변화에 따른 피로강도 변화효과를 나타낸 것이다. 시험편 B는 초층 용접후 2번째층 용접층을 분기배관방향으로 용접층을 형성한 것이며, 시험편 C는 용접다리길이가 동일하도록 용접층을 형성한 것이다. 저응력하에서는 시험편 C의 경우가 더 높은 피로강도를 나타내나, 백만 사이클 이후에는 거의 비슷한 피로강도를 나타내고 있다.

용접적층 변화에 따른 피로강도 변화에 대한 연구결

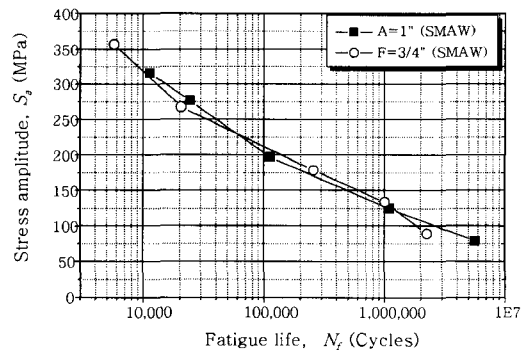


Fig. 7 S-N fatigue strength with variation of pipe diameter

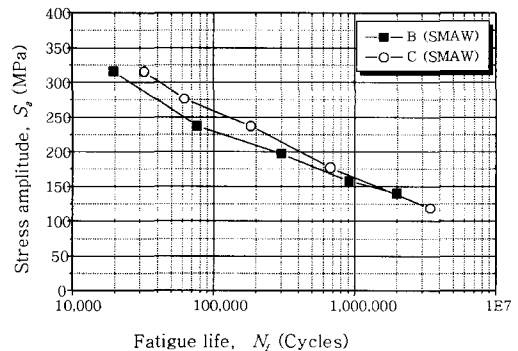


Fig. 8 S-N fatigue strength with variation of weld sequence

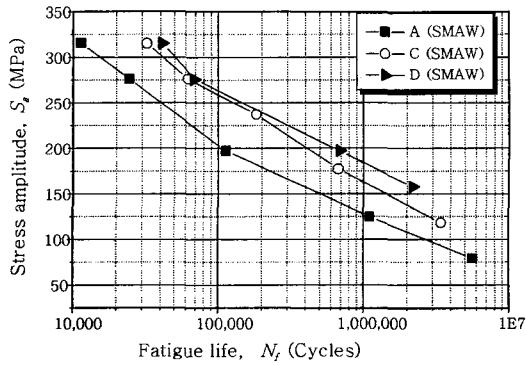


Fig. 9 Influence of weld metal area on the S-N fatigue strength

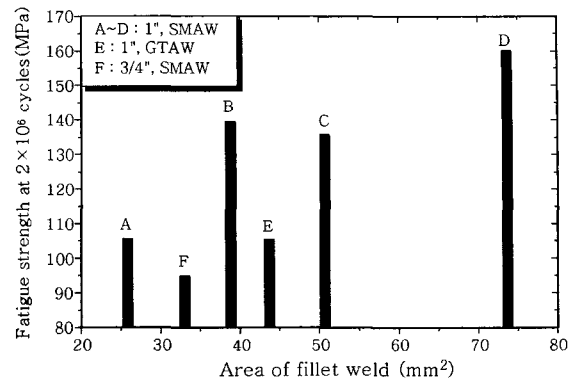


Fig. 10 S-N fatigue strength at 2×10^6 cycle

과에 따르면 최종층의 용접부가 분기배관 방향에 용접될 경우에는 용접부 toe 부위에서 압축잔류응력이 생성되어 용접다리 길이가 같은 용접부에 비하여 더 높은 피로강도를 나타낸다고 보고하고 있다^{2,3)}.

3.3.4 용접부 면적 변화에 대한 피로강도 효과

Fig. 9에는 용접부 단면적 변화에 따른 피로강도 효과를 나타낸 것이다. 용접부 단면적은 Fig. 5의 (A)번 그림에서 표시된 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 증가하였으나, 시험편 D는 시험편 C에 비하여 용접 단면적이 45% 증가하였음에도 불구하고 시험편 C와 D의 피로강도 강도는 비슷한 수치를 나타내었다.

3.3.5 용접공정 변화에 따른 파단위치

피로시험시 각 시험편의 파단은 root부와 toe 부위에서 발생되었다. SMAW 공정에서는(A~D, F시험편) 가장 낮은 저응력에서만 root부에서 균열이 발생되어 파단이 발생되었으며 고응력에서는 toe부위에서 균열이 생성되어 파단되었다. GTAW 공정에서는(E시험편) 이와는 달리 가장 높은 고응력 부위에서만 toe부위에서 균열이 발생되었으며, 이후 응력이 낮아짐에 따라 균열은 root부에서 발생하여 파단되었다. 초기균열의 생성이 toe부에서 발생하면 용접부에 대한 자분탐상 또는 액체침투검사시 결합검출이 용이하다.

3.3.6 2×10^6 사이클에서의 피로강도

SOC 용접부 형상변화에 따른 피로강도 변화 요인을 평가하기 위하여 SOC 용접부의 다리길이, 목길이를 측정후 용접부의 단면적을 계산하여 2×10^6 사이클에서의 피로강도를 평가하였으며 그 결과를 Fig. 10에 나

타내었다.

용접부의 다리길기와 목길이는 용접층수가 가장 많은 D번 시험편이 제일 크며, 단면적에 있어도 D번 시험편이 가장 크다. SMAW 공정에서 2 pass로 용접된 B와 C의 시험편의 경우 C번 시험편이 더 큰 용접 단면적이 측정되었다. 이는 용접시 용접부 형상을 다르게 실시하였기 때문이다. 시험편 A, B, C 및 D는 1" 배관에 대해 SMAW 용접을 실시 한 것이다. 용접부 면적이 증가함에 따라 피로강도가 증가하였다.

B와 C의 경우 모두 2 pass로 SMAW 용접을 실시한 것으로 B시험편은 용접면적이 38.82 mm², C시험편은 50.72 mm²이다. 용접면적이 더 작은 B시험편의 경우가 C시험편에 비하여 더 높은 피로강도를 나타내고 있다. B 시험편은 2 pass 용접시 분기배관 쪽으로 용접층을 형성함으로써 용접부 toe 부위에 잔류응력을 유발시켜 피로강도를 증가시켰기 때문이다.

시험편 A와 F는 각각 1"와 3/4" 배관에 대한 SMAW 공정의 SOC 용접부이다. A 시험편은 용접면적이 25.88 mm², F시험편은 33.08 mm²이다. 용접면적이 F번 시험편이 더 높으나, 피로강도는 A번 시험편이 더 높은 결과를 나타내었다.

B와 E 시험편은 1" 배관 용접부로서 B시험편은 SMAW 공정, E 시험편은 GTAW 공정으로 용접된 시험편이다. 용접면적은 B번 시험편은 38.82 mm², E시험편은 43.70 mm²이다. E 시험편이 용접면적이 높음에도 불구하고 피로강도는 B 시험편이 우수한 결과를 보였다.

이상으로 용접공정 및 용접층수 변화에 따른 피로강도를 요약하면 다음과 같다. 용접공정면에 있어서는 SMAW 공정이 GTAW 공정에 비하여 우수한 피로강도를 나타내며 (B와 E비교), 같은 용접공정에서는 배관직경이 증가할수록 피로강도가 향상되며 (A와 F비교), 용접부 형상변화에 따라서는 배관방향으로 용접층

을 형성하는 경우가 피로강도가 높으며 (B와 C비교), 용접부 전체 면적에서는 용접면적이 증가함에 따라 피로강도가 증가하였다 (A, B, C 및 D 비교).

4. 결 론

소구경 분기배관의 연결방식인 Socket 용접에 있어서 용접부 형상과 용접공정 변화에 따른인장강도 및 피로강도의 변화를 알아보았다.

인장강도는 용접공정에 따라 차이를 보이지 않았다. 피로강도는 용접공정 변화에 따라 차이를 나타내었는데, 분기배관 방향으로 용접길이가 긴 경우, GTAW 시공보다는 SMAW 용접시공일 경우, 용접부 단면적이 증가할수록, 배관 직경이 증가할수록 피로강도가 증가하였다.

참 고 문 헌

1. M. Higuchi, A. Nakagawa, K. Iida, M. Hayashi, T. Yamaguchi, M. Saito and M. Sato : Experimental Study on Fatigue Strength of Small-diameter Socket-welded Pipe Joints, J. of pressure Vessel Technology, Vol. 120 (1998), 149~163
2. P. C. Riccardella, S. H. Pan, M. Sullivan, J. Schletz and S. R. Gosselin : Vibration Fatigue Testing of Socket Welds, Pressure Vessel and Piping Codes and Standards, Vol. 360 (1998), 453~463
3. T. Yamashita, T. Hattori, K. Iida, M. Hayashi, T. Nomoto, and M. Sato : Effect of Residual Stress on Fatigue Strength of Small-diameter Welded Pipe Join, J. of pressure Vessel Technology, Vol. 119 (1997), 428~434
4. Y. Tsujikura : Fatigue failures of small diameter pipe welds in PWR plant, Welding in the World, Vol. 41 (1998), 10~19
5. K. Iida, F. Matsuda, M. Sato, M. Nayama and N. Akitomo : Study on crack generation at root of socket welds, Nuclear Engineering and Design, Vol. 166 (1996), 85~98
6. ASME B31.8, Gas Transmission and Distribution Piping Systems, 1995, 24
7. ASME B31.3, Chemical Plant and Petroleum Refinery Piping, 1993, 62
8. BSI 2633, Class I Arc Welding of Ferritic Steel Pipework for Carrying Fluids, 1987, 20
9. CAS Z662, Oil and Gas Pipeline Systems, 1999, 99
10. Y. H. Kim, J. Y. Chung, J. K. Paik, H. S. Kim and D. H. Kim : Ultimate and Fatigue Strength of Ship Hopper Knuckles, Journal of KWS, 18-1 (2000), 77~82
11. D. S. Um, S. W. Kang, T. H. Lee, H. W. Lee and S. H. Choi : A Study on Bending Fatigue Strength of One Side Fillet Welded T-Joint by SM 490A Steel, Journal of KWS, 16-5 (1998), 134~141