한국기계가공학회지, 제5권, 제3호, pp.58～64 (2006. 9)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 5 No. 3, pp.58～64 (2006. 9)

구조용강의 용접방법에 따른 부식피로특성 연구

박경동*, 유형주#

A Study on Corrosion Fatigue Characteristics Based on Welding Methods of Structural Steel

Keyoung-Dong Park*, Hyoung-Ju Ryu#

ABSTRACT

The security of stability for fractures of all sorts of parts and structure has become a first subject these days. We have need to organize fatigue characteristics of weldment because fatigue break out suddenly without a change of shape. In this study, we execute the fatigue test according to different of the welding method at the same materials. It was investigated about a fatigue limit according to welding methods of SMAW, FCAW and SAW at normal temperature and a frequency of 10Hz. The important results of the experimental study on fatigue characteristics of weldment are as follows: The fatigue limit of welding methods became low in the order of SMAW, FCAW, SAW.

Key Words : Fatigue Characteristics(피로특성), Welding Methods(용접방법), Weldment(용접부), Fatigue Limit (피로한도), Fatigue Life(피로수명)

1. 서 론

각종 부품이나 구조물 접합방법으로 용접법을 많이 사용하고 있다. 그러나 용접은 국부적으로 단시간에 가열, 냉각되기 때문에 용접부는 변형 수축이 발생하고, 용접한 재료에 잔류응력이 생겨 구조물의 파괴원인이 되고 있다. 또한, 저장탱크나 압력용기, 구조물의 경우 피로에 의한 파괴사고는 경제적 손실 및 인적손실을 초래할 수 있다.[1] 특히 구조재료에 있어서는 피로 및 부식기구가 그 재료의 수명을 결정하는 주된 기구이다. 그러나 피로의 진행은 외형상의 변화를 거의 수반하지 않고 파괴가 갑자기 일어나므로 큰 사고의 원인이 되는 것이 많다.[2),3)] 배관의 경우 배관 모재보다는 용접부에서 결함이 발생할 확률이 높아서 안정성 평가에 있어서 가장 중요한 인자로 자리 잡고 있다. 이는 용접부의 경우 각종 초기결함, 국부적 응력, 변형집중, 잔류응력, 열영향부 재질의 국부적인 열화 등 복잡한 야금학적, 역학적 특성을 지니고 있기 때문이다. 그리고 이러한 문제가 있는 용접부의 부식으로 인해 피로에 대한 안정성은 더욱 불안한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 구조용강 용접부의 피로특성을 정량화하기 위해 용접방법에 따른 부식 피로실험을 실시하여 용접부의 균열성장거동과 피로수명을

* 부경대학교 기계공학부
# 교신저자 : 부경대학교 대학원 기계설계학전공
E-mail : galmaegi05@nate.com

평가하고자 한다. 또한 본 연구결과를 통하여 부식피로파괴로 인한 안전사고를 예방하고 유지보수비용 절감과 적절한 보수주기 결정 및 설계에 기여하고자 한다.

2. 시험편 및 실험방법

2.1 시험편

본 연구에 사용된 재료는 구조용 강으로 사용되는 탄소강(JIS G 3456)으로서 모재의 화학적 성분과 기계적 성질은 Table 1, 2같다. 용접은 V 홈의 양쪽 경사각이 40°가 되도록 시험편을 가공하여 1G자세(아래보기 자세)로 용접을 실시하였으며, 시험편을 가공하여 실드아크용접(Shielded Metal Arc Welding : SMAW)과 플럭스코어용접(Flux Cored Arc Welding : FCAW) 및 서브머지드아크용접(Submerged Arc Welding : SAW)을 실시하였고 각 용접방법에 따른 용가제의 화학적 성분과 기계적 성질을 Table 3, 4에 나타내었다. 그리고 각 용접방법별 피로시험을 하기 위한 시험편의 형상과 치수를 Fig. 1에 나타내었다.

Table 1 Chemical composition of the base metal

Material	C	Si	Mn	P	S
JIS G 3456	0.15	0.19	0.65	0.016	0.005

Table 2 Mechanical properties of the base metal

Material	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)
JIS G 3456	443	309	29

Table 3 Chemical composition of filler metal(wt,%)

Material	C	Si	Mn	P	S
SMAW	0.07	0.53	0.98	0.014	0.010
FCAW	0.040	1.29	0.49	0.010	0.009
SAW	0.07	1.45	0.4	0.013	0.012

Table 4 Mechanical properties of filler metal

Material	Tensile strength(MPa)	Yield strength(MPa)	Elongation (%)
SMAW	558	490	32
FCAW	582	548	28
SAW	540	440	31

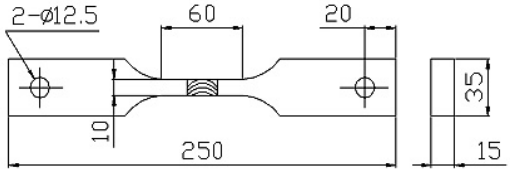

Fig. 1 Dimension of specimen (unit:㎜)

2.2 실험방법

용접방법에 따른 용접부의 경도분포를 조사하기 위해 로크웰경도시험기(AKASHI 600)로 경도를 측정 하였다.

부식 침지실험을 위한 장치로 부식환경조에 탈기처리하지 않은 두 가지 부식수용액(6% $FeCl_3$, 3.5% NaCl)에서 180일 동안 시험편을 침지시켰다.

피로실험은 전기유압서보 피로시험기(INSTRON 8821S, 100KN)를 이용하여 ASTM E466시험법에 따라 하중제어방식으로 실험을 하였다.[4] 피로하중 파형은 인장-인장 형태의 정현파로 하였고 주파수는 10Hz로 하였다. 피로파단 사이클 수는 컴퓨터와 연결된 소프트웨어에 의해 측정하였다. 각 용접방법에 따른 피로수명을 측정하기 위하여 모재와 용접시편을 대상으로 S-N선도를 통해 피로한도를 구하였으며 피로실험은 2×10^6 cycle까지에서 미파단 시편이 발생할 때까지 하중을 변화시켜가면서 시험을 수행하였다.[5] 시험편의 피로균열 발생 및 전파 예상경로를 명확히 하고 노치의 영향을 최소화하기 위해 핀이 걸리는 부분을 샌드페이퍼 #1200으로 매끄럽게 연마한 후에 피로실험을 실시하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 용접방법에 따른 경도분포

Fig. 2은 용접방법에 따른 각 시험편의 경도분포를

나타낸 것이다. 용접부에 있어서는 SMAW용접법이 85.4(H_RB)로 가장 높았고, FCAW, SAW순으로 나타났다.

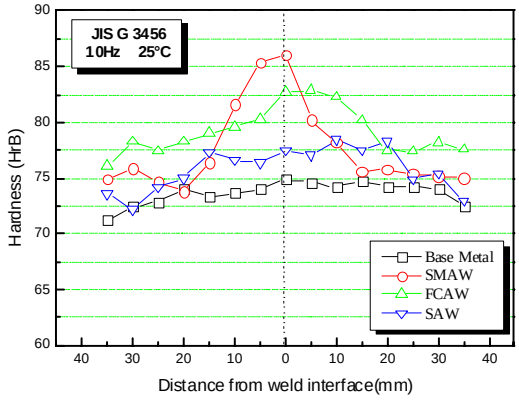

Fig. 2 Result of Rockwell hardness test

3.2 용접방법에 따른 피로시험

구조용 강의 각 용접별 피로수명을 평가하기 위하여 모재와 각 용접별 시험편을 대상으로 피로시험을 수행하여 Fig. 3~5와 같은 결과를 얻었다.

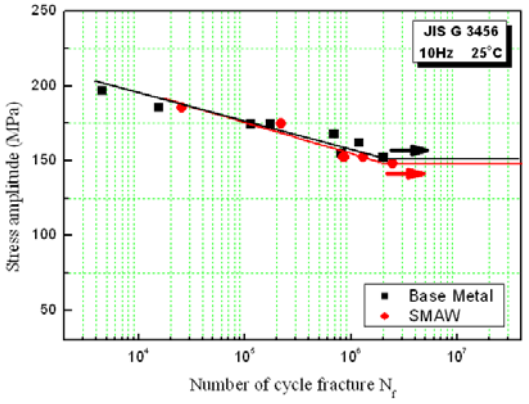

Fig. 3 Fatigue test results of Base Metal and SMAW

Fig. 3에서 더 이상 파괴가 일어나지 않는 피로한도가 모재의 경우에는 152㎫이고, SMAW용접의 경우에는 148㎫로 모재의 피로수명이 약 2.7%정도 높게 나타나고 있음을 알 수가 있다. FCAW용접의 경우에는 Fig. 4에서와 같이 피로한도가 148㎫로 SMAW용접과 같은 피로한도를 나타내었다. SAW용접의 경우에는 Fig. 5에서와 같이 145㎫로 모재에 비해 약 4.6%의 낮은 피로수명을 보였다. 전술된 경도분포와 용접방법별로 비교 할 경우 경도가 높을수록 피로한도도 높은 값을 나타내었다.

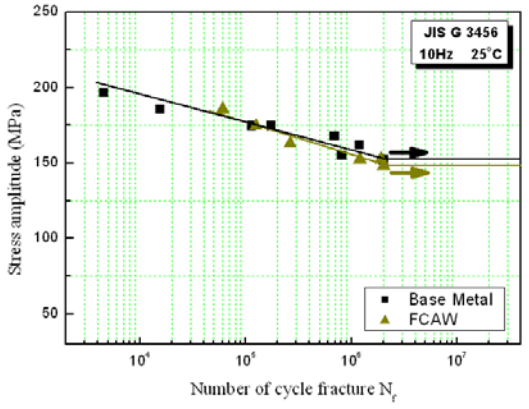

Fig. 4 Fatigue test results of Base Metal and FCAW

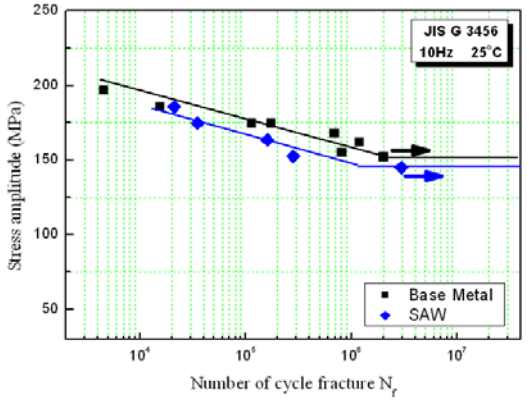

Fig. 5 Fatigue test results of Base Metal and SAW

따라서 모재에 비해서 SMAW와 FCAW용접은 같은 피로한도를 나타내었고 SAW가 가장 낮은 피로한도를 나타내었다. Fig. 6은 각 용접방법별 작용응력과 피로수명 관계를 비교한 것으로서 용접법에 따른 피로한도의 차이가 크게 나타나고 있지 않는 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상은 용접시 용접결함이나 열영향부에서 재료의 열화에 의한 것으로 판단되나, 이 문제는 후속 연구에서 재론하기로 한다.

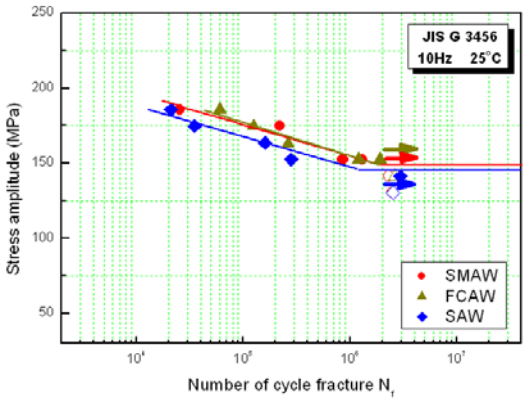

Fig. 6 Fatigue test results of according to welding methods

3.3 용접방법에 따른 부식피로시험

배관재의 부식에 따른 피로 수명의 변화를 알아보기 위해 각기 다른 용접법으로 제작된 시험편을 6% $FeCl_3$, 3.5% NaCl에서 180일간 부식 시킨 후 피로시험을 수행하고, 그 결과를 Fig. 7~12에 도시하였다.

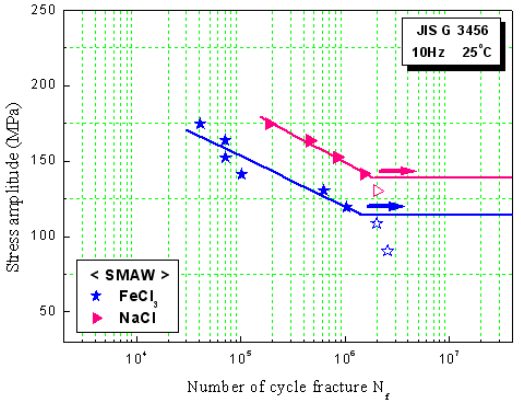

Fig. 7 Fatigue test results of SMAW

Fig. 7에서와 같이 더 이상 파괴가 일어나지 않는 피로한도가 $FeCl_3$수용액에 침지된 SMAW용접재의 경우 115㎫이고, NaCl의 경우에는 피로한도가 139㎫로 $FeCl_3$에 비해 약 21%의 피로수명이 높게 나타남을 알 수 있다. FCAW용접의 경우에서는 Fig. 8과 같이 $FeCl_3$수용액에 침지된 용접재의 피로한도(104㎫)에 비해 NaCl수용액에 침지된 용접재의 피로한도(138㎫)가 약 33%정도 높게 평가되었다. SAW용접의 경우에는 Fig. 9에서와 같이 $FeCl_3$에서는 78㎫로 NaCl의 117㎫에 비해 약 50%의 피로수명이 높게 나타났다. 모재의 경우 Fig. 10과 같이 $FeCl_3$에서 120㎫, NaCl에서는 139㎫로 NaCl에서 약 16% 높게 나타났다.

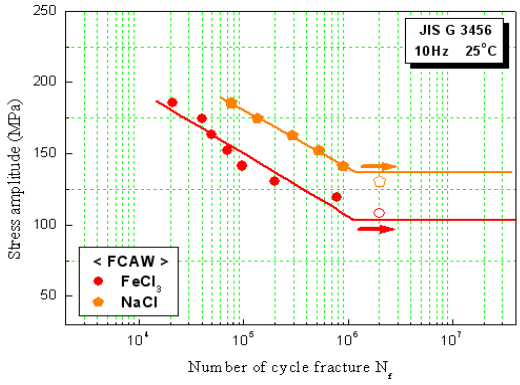

Fig. 8 Fatigue test results of FCAW

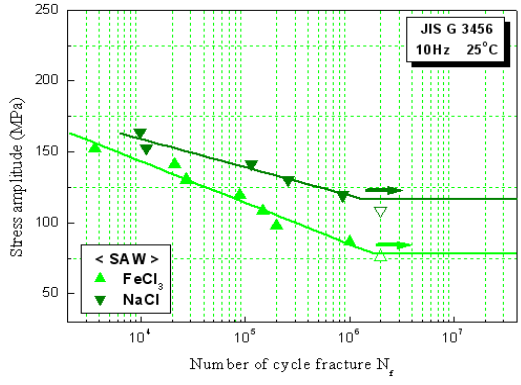

Fig. 9 Fatigue test results of SAW

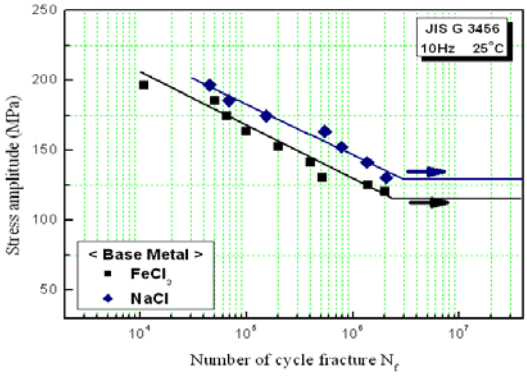

Fig. 10 Fatigue test results of Base Metal

또한 Fig. 11은 6% $FeCl_3$수용액에 노출된 용접재의 피로거동을 용접방법을 기준으로 하여 비교한 것으로서, 모재의 피로한도는 120㎫이고, SMAW의 경우 115㎫, FCAW용접의 경우에도 104㎫로 피로한도를 나타내었으며, SAW의 경우에는 78㎫로 모재에 비해 SMAW는 4.1%, FCAW는 13.3%, SAW는 35%의 낮은 수치를 나타내었다.

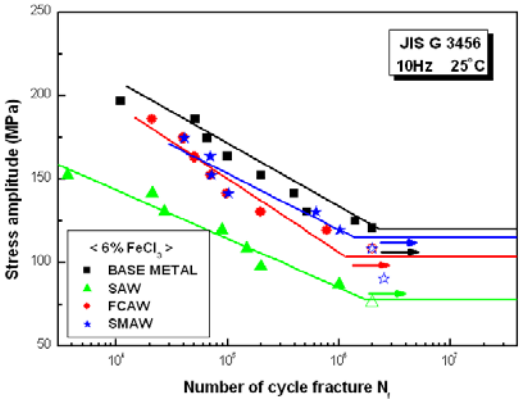

Fig. 11 Fatigue test results according to $FeCl_3$

Fig. 12는 3.5% NaCl수용액에 노출된 용접재의 피로거동을 모재와 함께 비교한 것으로서 이 결과에 의하면, 모재와 SMAW용접의 경우 139㎫로 같은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. FCAW용접의 경우에는 138㎫, SAW용접의 경우에는 117㎫로 각 약 1%, 16% 정도 낮은 수치를 나타내고 있었다.

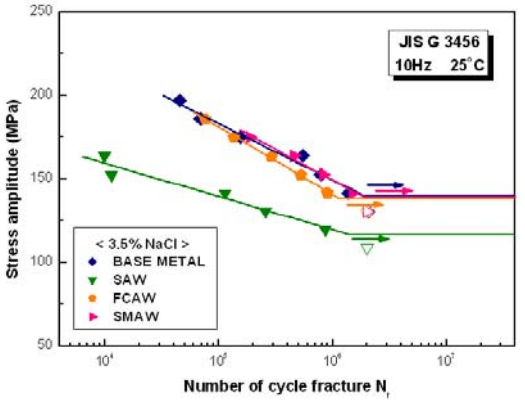

Fig. 12 Fatigue test results according to NaCl

3.4 응력에 따른 피로수명 비교

용접방법에 따른 용접재의 내피로 특성을 모재와 비교 평가하기 위하여 두 가지 응력의 크기(152.4㎫, 174.7㎫)에 따른 용접재의 피로수명을 측정하여 비교하였다.

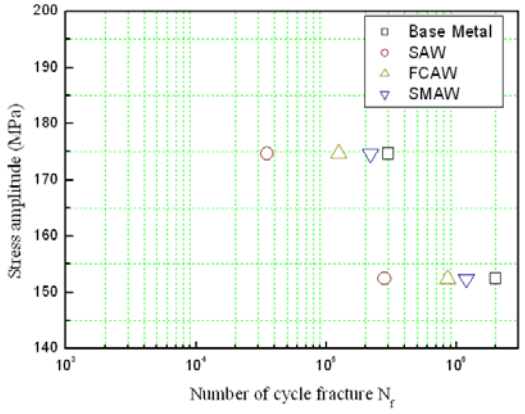

Fig. 13 Relations between stress amplitude and cycle by welding methods

Fig. 13에 도시된 바와 같이 σ_a=152.4㎫에서 보인 용접재의 피로저항능력은 순서로 나타났으며, 모재(2,000,000 cycle), SMAW(1,195,430 cycle), FCAW(854,750 cycle), SAW(280,610 cycle)로 나타났고, σ_a =174.7㎫일 때 역시 모재(300,000 cycle), SMAW(219,214 cycle), FCAW(124,237 cycle), SAW(35,048 cycle)순으로 나타났다.

3.5 응력에 따른 부식피로수명 비교

부식성 환경에 노출된 용접재의 내피로 특성을 모재와 함께 비교하기 위하여 두 가지 응력의 크기(141.4㎫, 152.4㎫)에 따른 사이클 수를 측정하여 비교하였다. Fig. 14에서 알 수 있는 바와 같이 6% $FeCl_3$용액의 경우 141.4㎫일 때와 152.4㎫일 때 모두 모재, SMAW, FCAW, SAW 순으로 파단 사이클을 나타냈다.

Fig. 15에서는 3.5% NaCl용액의 경우 응력이 141.4㎫일 때와 152.4㎫일 때 모두 모재, SMAW, FCAW, SAW 순으로 나타났다. 따라서 σ_a의 크기를 기준으로

비교한 경우 SMAW용접재가 피로수명이 높은 것을 알 수가 있었다.

Table 5는 Fig. 14~15를 수치로 정리한 것이다.

Table 5 Cycle number by size of stress

부식 후		모재	SMAW	FCAW	SAW
NaCl	141.4㎫	1,600,000	1,500,000	900,000	114,000
	152.4㎫	900,000	824,928	523,691	11,402
$FeCl_3$	141.4㎫	399,000	102,000	98,000	21,000
	152.4㎫	200,000	71,315	70,349	3,656

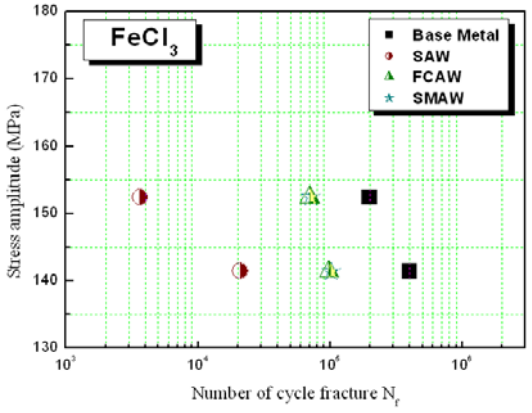

Fig. 14 Relations between stress amplitude and cycle by welding methods of 6% $FeCl_3$

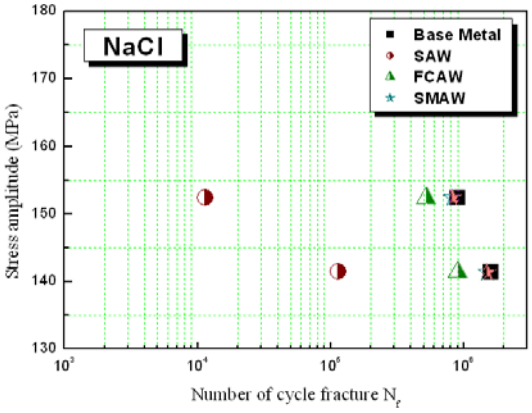

Fig. 15 Relations between stress amplitude and cycle by welding methods of 3.5% NaCl

4. 결 론

구조용강 용접부의 피로수명을 정량화하기 위해 용접방법에 따른 피로실험을 실시하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 용접방법에 따른 각 시험편의 경도분포가 SMAW(85.4 H_RB)로 가장 높았고 FCAW(82.6 HrB), SAW(77.4 H_RB)순으로 분포되었다.
2. 용접방법에 따른 피로시험 결과 더 이상 파괴가 일어나지 않는 피로한도가 모재(152㎫), SMAW(148㎫), FCAW(148㎫), SAW(145㎫)로 모재에 비해 각각 SMAW · FCAW(2.7%), SAW(4.6%) 로 낮은 피로한도를 나타내었다.
3. 용접방법에 따른 부식피로시험 결과 6% $FeCl_3$에서는 모재(120㎫), SMAW(115㎫), FCAW(104㎫), SAW (78㎫)로 모재에 비해 SMAW(4.1%), FCAW(13.3%), SAW(35%) 낮은 수치를 나타내었다. 또한 3.5% NaCl에서는 모재 · SMAW(139㎫), FCAW(138㎫), SAW(117㎫)로 모재에 비해 FCAW, SAW 각각 약 1%, 16% 정도 낮은 수치를 나타내고 있었다.
4. 응력에 따른 피로수명 비교에 있어 응력이 152.4㎫일 때 모재(2,000,000 cycle), SMAW(1,195,430 cycle), FCAW(854,750 cycle), SAW(280,610 cycle)로 나타났고, 응력이 174.7㎫일 때 역시 모재(300,000 cycle), SMAW(219,214 cycle), FCAW(124,237 cycle), SAW(35,048 cycle)로 나타났다.
5. 응력에 따른 부식피로수명 비교에 있어 6% $FeCl_3$ 용액과 3.5% NaCl용액에서 141.4㎫일 때와 152.4㎫일 때 모두 모재, SMAW, FCAW, SAW 순으로 나타났다. 따라서 각 응력구간에 따른 비교에 있어서 용접재의 경우 SMAW용접재가 피로수명이 높은 것을 알 수가 있었다.

이러한 결과는 용접방법에 따른 용접부의 잔류응력 및 열영양부(HAZ)에서 변형과 수축으로 발생한 균열이 용접종단부에서 약간 내부로 크랙이 발생하여 파단되어 셀형 수지상 凹凸모양의 파단면을 나타내었다.

참고 문헌

1. 김우식, 고영태, “가스배관의 안정성 평가방안에 대

한 고찰 (Ⅰ),” 한국산업안전학회 춘계학술대회 논문집, pp. 7-12. 2000.
2. 이용복, 김호경, 정진성, 피로해석의 기초, 청문각, pp. 1-31 1999.
3. 김영표, 김우식, “배관 용접부에 존재하는 결함의 피로수명 평가,” 대한용접학회지 제19권 제5호, pp. 460-465. 2001.
4. ASTM E466, “Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Test of Metallic Materials,” ASTM. 1996.
5. 이강용, “재료강도학” pp. 82-84 1999.