

이종금속 용접재의 열 사이클에 따른 피로파괴 거동에 관한 연구 A Study on the Fatigue Fracture Behavior of Heat Cycle of Welded Dissimilar

신근하* 김진덕**
Kun-Ha Shin Jin-Deok Kim

ABSTRACT

It is very difficult to find not only optimized welding condition but also fatigue characteristics of the dissimilar weld.

In this study, Low carbon steel(SS41) and austenitic stainless steel(STS304) were welded by GTAW welding with STS309 stainless wire rod and Single Edge Notch specimens were used for the examination of fatigue behavior on welding heat cycle.

The fatigue crack growth rate in HAZ of SS41 was the highest. The second was in STS 304 bond line and the lowest was in HAS of STS304.

1. 서 론

용접은 다른 접합법에 비하여 이음 강도가 매우 높으며, 중량절감 및 공기단축등 효율적 장점을 갖고 있으나, 제작시 고열을 수반한 야금학적 접합방법이어서 금속의 조직변화, 잔유응력, 변형등에 따른 기계적 성질의 저하 원인이 되기도 한다. 한편 산업사회의 발달로 인하여 사용환경이 더욱 가혹하여지고, 내식성 및 내열성이 많이 요구되는 압력용기, 화

학공업, 식품공업, 석유화학공업등의 기기및 장치, 내마모성을 요구하는 마찰풀리(Pulley)등의 육성 용접부등에는 저 탄소강 대신 스테인레스강 등이 사용되는 이종 용접법이 발달하게 되었다. 실제 이종 용접시 탄소의 이동에 따른 오오스테나이트 결정립계에 크롬 탄화물($M_{23}C_6$)의 석출에 따른 입계부식의 발생, 모재와 용착금속간 결정립의 변화, 조직의 차이, 비금속 개재물의 유입, 탈탄등 야금학적 문제가 많이 발생되고 있다. 특히 저탄소강과 스테인레스강의 이종 용접시, 동종재료 용접과 달리 발생하는 문제점으로는 (1)저 탄소강과 스테인레스강의 열팽창

* 아주대학교 생산자동화공학과

** 수원전문대학 용접공학과

계수의 차이가 크기 때문에 용접시 큰 잔류응력이 발생하며 (2)고온으로 장시간 가열하면 탄소의 이동으로 인한 탈탄 또는 침탄이 생긴다. (3)용합부에 마르텐사이트 조직이 형성되어 용접후 균열이 생기기 쉽다. 특히 수소가스는 강중에 침입하여 탄소와 반응하여 메탄을 형성하고, 이 현상은 강중의 탈탄 및 입계에서의 메탄 집적에 의하여 강의 강도 및 연성이 저하되므로 녹, 기름등 모재의 청결에 주의를 기울여야 한다. 이에 본 연구는 오오스테나이트계 스테인레스강과 저탄소강과의 이종 용접시 기계적 성질과 조직 변화에 따른 피로파괴 거동을 일면노치(Single Edge Notch:SEN)시험편을 이용하여 해석하고, 피로균열 전파율과 응력확대 계수와의 관계를 고찰하였다.

2. 실험방법

2.1 재료 및 시험편

본 실험에 사용한 재료는 오오스테나이트계 스테인레스강(STS304)과 구조용강 SS41이다. 이들 재료를 Fig.1과 같이 GTAW 용접하였으며, 용접용 와이어는 Cr의 입계석출에 따른 회석율을 샤프러(Schaeffler)다이아그램을 이용하여 구하여 오오스테나이트 조직에 가깝게 KS STS 309를 사용하였으며, 와이어 화학성분 및 용접조건을 각각 Table 1 과 Table 2에 표시하였고 기계적 성질은 Table 3과 같다.

Table 1 Chemical composition of used steels

Material	C	Mn	Cr	Ni	Si	P	S
STS 304	0.04	0.73	18.13	8.19	0.62	0.03	0.06
SS 41	0.15	0.73	0.003	-	0.04	0.01	0.01
STS 309	0.05	1.70	23.2	13.8	0.38	-	-

Table 2 Welding condition

사용전류	185 A
사용전압	21 IV
용접봉 지름	2.8 mm
사용가스(전면 및 이면)	아르곤
전극봉 종류	텅스텐
전극봉 지름	3.2 mm
용접 방법	DCSP 수동

Table 3 Mechanical properties of materials

Materials	Tensile Strength (kg/mm ²)	Yield Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
SS 41	47	29	33	134
AWM	45	30	27	
STS304	68	33	60	169
STS309	71	42	53	178

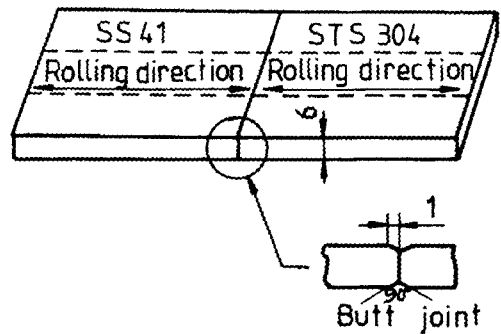


Fig.1 Configuration of test specimen to weld

열사이클에 의한 용접재의 조직변화가 기계적 성질 변화에 따른 경도분포를 알아보기 위하여 Fig. 2와 같은 시험편으로 조직검사와 그림에서 표시한 위치에서 경도를 측정하였다.

현미경 조직관찰을 위하여 연마한 후 나이탈(Nital)용액으로 SS41부를 부식하고, 용착금속부와 스테인레스강부는 부식액(HCl 15ml + HNO₃ 10ml + Glycelin 5ml + CH₃COOH 10ml)으로 부식한 후 200배의 배율로 각 부분의 현미경 조직을 Fig.3에 나타낸다.

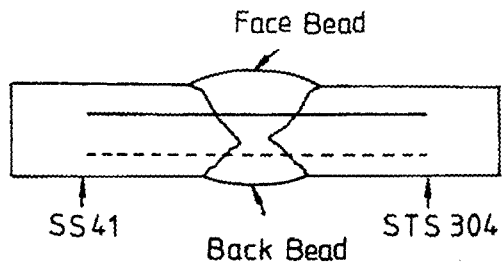


Fig.2 Specimen of microstructure and hardness measuring location

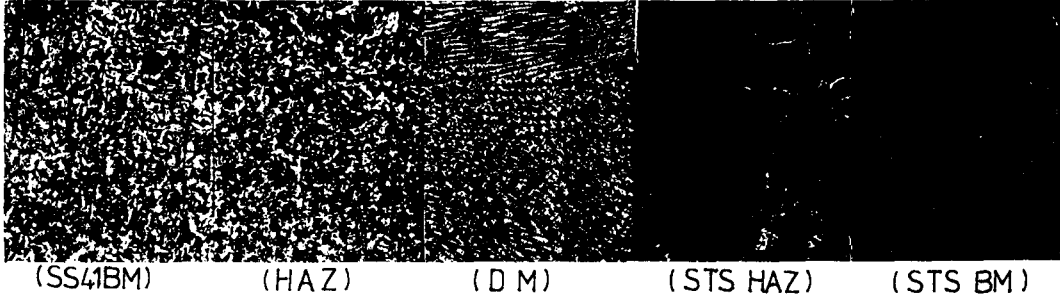


Fig.3 Microstructure of dissimilar welded joint

2.2 실험장치 및 방법

인장시험 및 피로시험은 최대용량 20톤의 전기유압식 피로시험기(Instron 1350)를 사용하였으며 균열의 길이를 측정하기 위하여 0.01mm 까지 측정 가능한 이동식 현미경을 사용하였다. 응력파형은 모든 시험에 대하여 정현파형(Sine wave)을 사용하였고, 응력비(R)는 0.05, 주파수는 20Hz로 하여 ASTM E 647규정에 의거하여 실험하였고, 시험편의 형상 치수는 Fig.4와 같다.

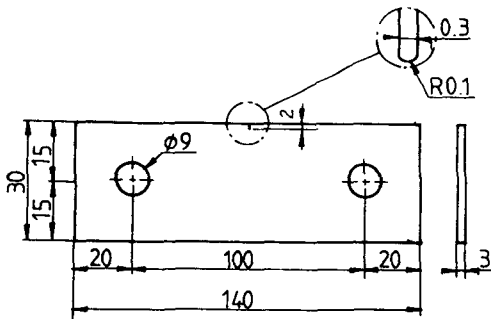


Fig.4 Configuration of single edge notched specimen

3. 실험결과 및 고찰

3.1 용접부의 경도분포 및 현미경 조직검사

이종금속 경도분포는 Fig.5와 같이 연강부에서 용착금속부로 이동함에 따라 경도가 증가되었으며, 특히 경계부(Bond Zone)에서 경도가 가장 높았다. 이 현상은 이종재료의 용접에 따라 용착금속부에 마르텐사이트 조직이 형성되며, 특히 경계부에는 탄소의 이동에 따른 크롬 탄화물의 입계석출에 따라 경도값이 높아진 것으로 사료된다. SS41쪽의 HAZ부에는 탄소의 이동에 따른 탈탄에 의하여 경도값이 가장 낮았다.

표면비이드(Face Bead)와 이면비이드(Back Bead)와의 경도분포를 비교하여 보면 이면비이드쪽의 경도분포는 표면비이드쪽 보다 경도차가 적음을 알 수 있고, 이것은 전면 용접후의 예열효과 영향으로 사료된다.

따라서 이종금속 용접시에는 재질과 두께에 따라 예열조건 및 열처리 조건에 따른 기계적 성질변화가 동종재료인 경우보다 매우 크리라 생각된다.

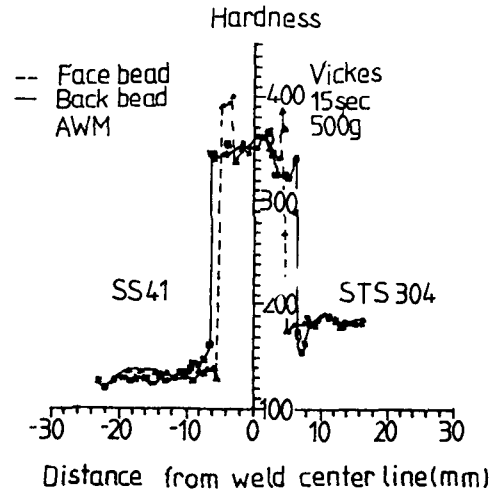


Fig.5 Hardness distribution in AWM

Fig.1의 조직을 보면 용접시의 열 사이클에 따라 서로 다른 조직됨을 알 수 있다. HAZ의 결정립의 크기가 모재에 비하여 훨씬 크고 입계에 크롬을 주성분으로하는 탄화물과 질화물의 생성을 볼 수 있다.

3.2 용접부의 피로강도 및 파괴거동

SS41과 STS304와의 이종용접시 가장 취약부분인 SS41 HAZ부의 피로수명을 구해봄으로서, 이종용접재의 강도문제를 예측하고, 용착금속과 STS

304와의 경계부 및 STS304 HAZ의 피로파괴 거동을 고찰하기 위하여 Fig.4와 같이 2mm의 일면노치 (Single Edge Notch: SEN)를 주어 20Kgf/mm²의 응력상태에서 실험하였다. 실험결과는 Paris식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 의하여 정리하였으며 K값은 ASTM E 410에 규정된

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F(\alpha), \alpha=a/W, F(\alpha)=1.12-0.231\alpha +10.55\alpha^2-21.72\alpha^3+30.39\alpha^4$$

을 사용하였다. 여기서 σ :응력, a:크랙길이, W:시험편 폭이며, 상수 C와 m은 $\log(da/dN)$ 와 $\log(\Delta K)$ 의 크랙 안정구간에서 최소자승법에 의해 구했다.

시험편의 피로균열발생과 최종 파단에 이르기까지의 반복수를 Table 4에 나타내었다. 균열길이의 측정은 시편을 시험기로부터 분리시키지 않고 레프리카(Replica)방법을 사용하여 금속 현미경으로 50배 확대하여 측정하였다.

Table 4 Number of stress cycle to fracture

Test piece	20 Kgf/mm ²	
	N _i (initiation)	N _f (Frature N)
SS41 HAZ부	7.0x10 ³	2.0x10 ⁴
STS BOND부	2.8x10 ⁴	1.1x10 ⁵
STS HAZ부	7.0x10 ⁴	1.7x10 ⁵

Table 5 Material constant C and m in Paris Eq. [$da/dN=C(\Delta K)^m$]

Classification	C	m
SS41 HAZ부	9.97x10 ⁻⁷	4.59
STS BOND부	2.17x10 ⁻¹⁰	3.99
STS HAZ부	3.19x10 ⁻¹⁰	3.79.

Fig.6은 레프리카 방법에 의하여 측정된 Bond부에 대한 균열가지(Crack branch) 현상을 나타내었다. 이 현상은 용접시 열사이클 변화에 따른 크롬 탄화물의 석출에 기인된 것으로 사료된다.

Fig.7은 SS41의 HAZ부, 용착금속과 STS304와의 Bond부, STS304 HAZ부에 대한 피로시험결과 균열길이 a와 하중반복수 N과 상관관계를 나타낸 것이다. 균열의 성장속도는 SS41 HAZ부에서 가장 빠르고, 그 다음으로 경계부, STS304 HAZ부의 순



Fig.6 Crack of specimen

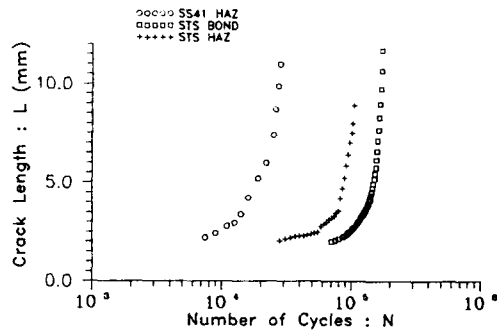


Fig.7 Relation of crack length vs. number of cycles

이었다. Fig.7에서 SS41 HAZ부와 STS 304HAZ부의 균열발생 및 성장유형은 유사하지만 STS304 Bond부에서는 많은 에너지를 소비하는 현상이 발생되고, 균열길이가 어느 일정한 값에 도달하면 STS304측은 크롬 탄화물의 석출, SS41측은 탈탄에 의한 경도저하가 균열의 성장속도를 더욱 촉진시키는 것 같다.

Fig.8는 균열성장속도(da/dN)와 응력확대계수(ΔK)의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 SS41 HAZ의 균열전파속도가 가장 빠르고, Bond부, STS304HAZ의 순서로 나타났다.

Table 5는 Paris의 식 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 에 대한 재료상수 C 및 지수정수 m의 계산결과이다.

4. 결 론

SS41과 STS304와의 GTAW 이종재료 용접시 용접재료의 선정에 따른 기계적 성질 변화와 용접부의 조직변화에 따른 피로균열의 성장거동을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 평활재 시험편의 경우 파단은 SS41HAZ부에서 발생되었고, 부식등을 방지하기 위한 이종용접시 강도설계 기준은 SS41HAZ부의 기계적 성질값을 채택하여야 한다.
2. 이종용접재의 피로균열 성장율은 SS41HAZ에서 가장 높았고, Bond부 STS304 HAZ부 순으로 낮아졌다.
3. 이종용접재에서도 Paris의 식은 잘 적용되었으며 지수 m 은 3~5 사이에 있어 SS41HAZ, Bond, STS304HAZ부 순으로 m 값이 감소하였다.
4. Bond부에 의한 파괴현상은 크롬 탄화물의 석출에 따른 균열가지(Crack Branch)현상이 나타났다.

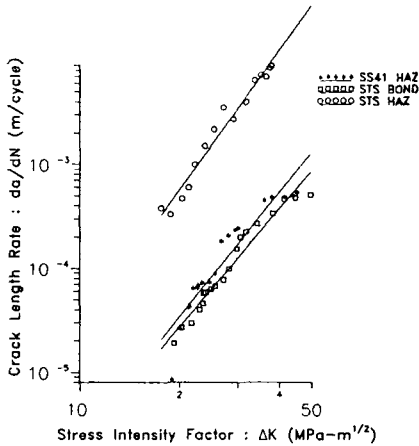


Fig.8 Relation of stress intensity factor vs. crack growth rate

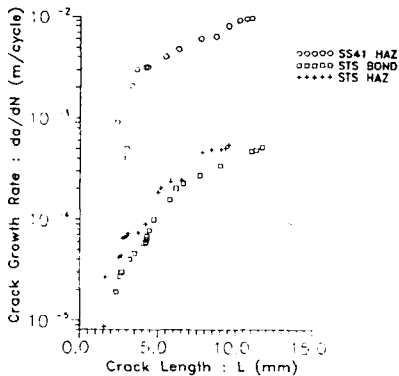


Fig.9 Relation of crack growth rate vs. crack length

Fig.9는 동일응력 상태에서의 피로균열 성장속도를 나타낸 것으로 SS41HAZ, 용착금속과 STS 304와의 Bond부, STS304HAZ부 순으로 균열성장속도가 늦어진다. 여기서 균열길이 길어짐에 따라 균열성장은 가속화 되고 있다.

참 고 문 헌

- [1] R.O.Wylic & P.D.Watson, Log cycle Fatigue Behavior of Dissimilar welds, Jour of engineering for power, pp.353~355, July 1967.
- [2] N.Bailey, Welding dissimilar Metals, pp.353~355, 1986.
- [3] Welding journal by AWS, pp.11~5, January 1991.
- [4] 異種金屬の銲接における問題點, 銲接技術, pp. 21~23, June 1973.
- [5] 鋼とステンレス 鋼の銲接, 銲接技術, pp.33, June 1973.
- [6] 권중완, 이상 스테인레스강의 피로 크랙 전파 특성에 관한 실험적 연구, 영남대 기계공학과 박사 논문, pp.36, August 1989.
- [7] 이승현, 이종금속 용접재의 피로파괴 거동에 관한 실험적 연구, 아주대 기계공학과 석사논문, pp.1~2, August 1989.