

研究論文

탄소강-스테인리스강 용접부의 피로균열진전 특성에 관한 연구

권재도*·김우현**·김길수***·박중철****·배용탁****·김중형****

A Study on the Fatigue Crack Growth Characteristics for the Weldment of Carbon steel-Stainless steel

J. D. Kwon*, W. H. Kim**, K. S. Kim***, J. C. Park****, Y. T. Bae**** and J. H. Kim****

Key words : fatigue crack growth rate(피로균열진전속도), stress intensity factor range(응력
확대계수 범위), base metal(모재), weld joint of bimaterial(이종재료 용접부)

Abstract

Various equipments in plants are welded with two different materials and it is required to investigate the effects of fatigue crack propagation on the neighborhood of a welded portion.

The characteristics of fatigue crack growth in the base metal of carbon and stainless steel, in the carbon and stainless steel sides located in the neighborhood of welded portion(carbon/stainless steel), respectively and welded portion, are investigated.

The results show that the crack growth in the welded portion(carbon/stainless steel) is an average value of the crack growths in the carbon and stainless steel respectively located in the neighborhood of the welded portion. It is found that the crack growth in the welded portion is not significantly different from those in the carbon and stainless steel sides. Hence it can be concluded that the structure welded with two different materials would not impede the integrity based on the fatigue crack growth.

※ 1998년 1월 5일 접수

* 정회원, 영남대 기계공학부

** 비회원, 한국산업인력공단 영주직업전문학교

*** 비회원, 한국원자력 안전기술원

**** 비회원, 영남대학교 대학원

1. 서 론

최근 기계 구조물의 접합방법으로 용접 이음이 다수 채용되고 있다. 특히 원자력 발전설비, 해양 구조물, 교량, 선박 및 석유화학 플랜트등과 같은 기계 구조물의 안전성, 강도 및 경제적인 면에서 이종재료를 용접해야 하는 경우가 생기게 된다. 이와 같은 용접부를 포함한 기계구조물의 주요 파손 원인은 피로 및 환경파괴가 주류를 이룬다. 아울러 기계구조물의 용접부의 강도평가에 대한 기존의 연구에는, 용접부의 피로강도에 관한 연구¹⁾ 잔류응력과 용접부의 피로강도 및 피로균열진전거동에 관한 연구 고온에서 용접부의 저싸이클피로 및 균열진전거동에 관한 연구 등이 다수 보고 되어 있다. 그러나 용접에 사용되는 모재의 재질이 서로 다른 이종재료 용접부의 피로균열진전 특성에 관한 연구결과는 찾아보기 힘들었다. 특히 원전설비에는 스테인리스강과 탄소강 용접이 사용된 예가 있으며, 이들 용접부의 정기 검사시 이종재료 용접부에 균열이 검출되었을 경우, 수명 및 건전성 평가를 수행하기 위한 기초 자료를 제공하기 위하여 이종재료 용접부 및 열영향부의 피로균열진전거동을 규명할 필요성이 있다.

따라서 본 연구에서는 탄소강과 스테인리스강 판재로서 용접을 한 경우 피로균열진전거동을 규명해 보기 위해서, 탄소강 모재, 스테인리스강 모재 및 탄소강-탄소강, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-스테인리스강 용접부로 피로균열진전 시험편을 제작하여, 모재와 각용접부의 용착금속부 및 열영향부의 피로균열진전 특성을 규명하여 보았다. 아울러 피로균열진전시험후의 파면을 전자 현미경으로 관찰하여 피로균열진전 기구도 규명하여 보았다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험용 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 재료는 스테인리스강(KS D 3693)과 탄소강(KS D 3515)의 판재로서 이 재료에 대한 화학적 성분은 Table 1과 같다. 여기서 weld metal부의 화학조성분석은 이종재료 용착금속부에 대한 분석결과이다.

용접방법은 스테인리스강-스테인리스강 용접, 스테인리스강-탄소강 용접에는 GTAW, 탄소강-탄소강 용접에는 SMAW 용접을 자격인증된 용접사가 실시하였고, 용접봉은 ER-308L (스테인리스 용접부), ER-309L(탄소강/스테인리스강 용접부) 및 E7016(탄소강 용접부)을 사용하였으며, 시험편의 용접 조건은 GTAW의 경우 65.7A, 용접봉 직경 2.4 ϕ , 용접속도 1.4 cm/min으로 하였고, SMAW의 경우 110A, 용접봉 직경 3.2 ϕ , 용접속도 1.56 cm/min으로 하였다.

본 연구에서는 이종금속 용접부에 대한 피로균열진전 거동을 파악하기 위해 스테인리스강 모재, 탄소강 모재, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-탄소강, 탄소강-스테인리스강의 용접부 및 스테인리스강쪽의 열영향부(HAZ)에 대하여 피로균열진전 시험을 수행하기 위해 다수의 시험편을 제작하였다. ASTM E-647 규격에 따라 제작한 피로균열진전 시험편의 규격을 Fig. 1에 나타내었으며 그리고 용접부의 구체적 형상 및 인공노치의 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

시험편의 형상은 중앙균열(Center crack tension : CCT) 시험편으로 중앙노치는 피로균열발생 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위해서, 우선 센터드릴로 중앙에 구멍(hole)을 뚫은 후 방전가공(Electro discharge machining : EDM)으로 인공노치 길이, $2a = 6.6\text{mm}$, 곡률반경, $\rho = 0.2\text{mm}$ 로 일정하게 가공하였으며, 인공노치 선단으로부터

Table 1. Chemical composition of KS D 3693 stainless steel and KS D 3515 carbon steel(%)

Composition Material	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	N	Mo	Cu
KS D 3693	0.05	0.04	0.032	1.31	0.52	18.3	8.4	0.06	-	-
KS D 3515	0.15	0.003	0.018	0.61	0.27	-	-	-	-	-0.03
Weld metal	0.01	0.04	0.88	0.73	18.18	9.19	-	0.18	0.28	

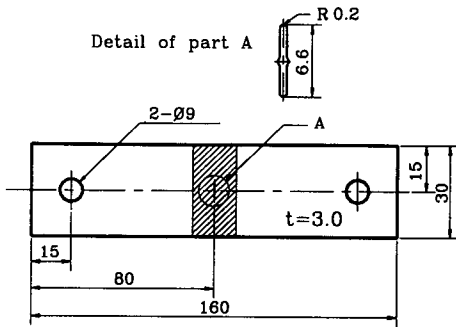


Fig. 1 Geometry of CCT specimen

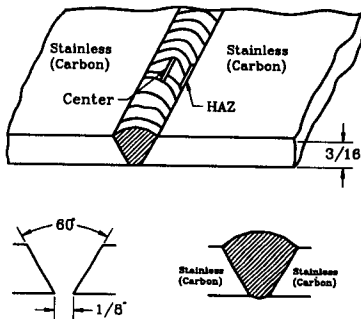


Fig. 2 Geometry of weld joint and artificial notch

약 0.2mm의 피로균열을 진전시킨 뒤 균열진전길이를 측정하여 피로균열진전속도 계산에 사용하였다. 피로균열진전 길이의 정확한 측정과 레프리카(replica)의 채취를 위하여 시험편의 표면을 #200에서 #2000까지의 에머리 페이퍼(emery paper)로 연마 후, 최종적으로 산화 알루미늄 연마제로 마무리 연마를 하여 본 시험에 사용하였다.

2.2 용접부의 경도

탄소강 및 스테인리스강 모재, 탄소강-탄소강, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-스테인리스강 용접부의 용착금속부 및 열영향부의 경도값을 측정하기 위해서 Rockwell 경도 시험기를 사용하였다. 시험조건은, A타입 스케일, 꼭지각 120°인 다이아몬드 압입체를 사용하여, 초기하중은 10Kg, 시험하중은 60Kg으로 시험을 수행하였다.

Fig. 3은 경도시험 결과를 나타낸 것으로, 탄소강 용접부의 경우 용착금속부, 경계부 및 열영향부에서의 경도값은 모재보다 높음을 알 수 있고, 스테

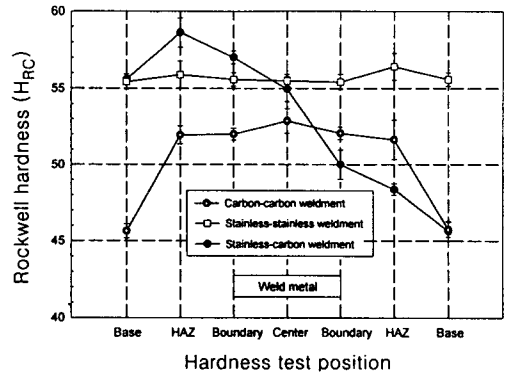


Fig. 3 Hardness distribution on the base metal and weld joint of bimaterial, carbon steel and stainless steel

인리스강의 경우는 유사한 값을 가지며, 탄소강-스테인리스강의 용착금속부는 스테인리스강-스테인리스강 용착금속부와 유사한 값을 나타내지만 스테인리스강 쪽의 경계부 및 열영향부에서의 경도값은 스테인리스강-스테인리스강 용접부에 비해 높고, 탄소강 쪽의 경계부 및 열영향부에서의 경도값은 탄소강-탄소강 용접부에 비해 낮아짐을 알 수 있다. 이와 같이 이종재료간 용접부에서의 스테인리스강쪽의 열영향부의 경도치가 스테인리스강-스테인리스강 열영향부의 경도치보다 높은 이유는 Cr 함량이 많고, 경도 및 항복강도가 높은 용접봉을 사용한 것이 하나의 원인이라고 사료된다.

2.3 용접부 조직관찰

용접부의 용접후 조직을 관찰하기 위하여 탄소강-탄소강, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-스테인리스강 용접부를 수직된 방향으로 방전가공(wire cutter)으로 절단하여 연마한 후 5% 니탈 용액 및 염산과 질산(HCl+HNO₃)을 사용하여 에칭한 후 광학현미경에서 관찰하여 보았다.

Fig. 4는 탄소강-탄소강, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-스테인리스강 용접부 절단면 사진과 모재, 용착금속부 및 열영향부의 200배 광학현미경 조직사진을 나타낸 것이다. Fig. 4(a)는 탄소강-탄소강 용접부의 단면사진으로서 용접 경계부인 C점에서 조직이 조대해 짐을 알 수 있고, Fig. 4(b)는 스테인리스강-스테인리스강 용접부의 단면

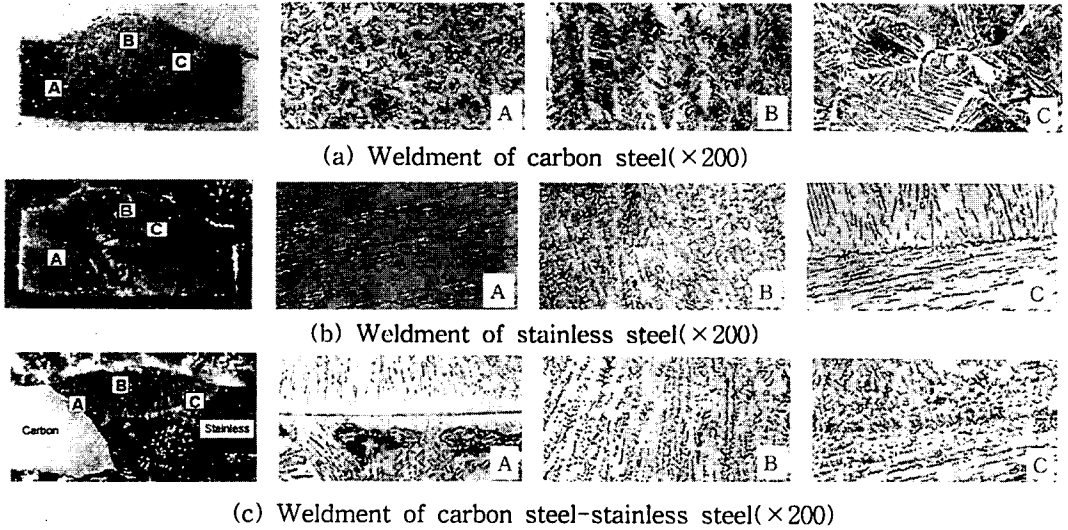


Fig. 4 Microstructures of the base metal and weldment of carbon steel, stainless steel and dissimilar material

사진으로서 용착금속의 용접경계부인 C점에서 용접부와 모재인 스테인리스강 사이에 뚜렷한 경계부가 나타나 있으며, Fig. 4(c)의 탄소강-스테인리스강 용접부의 단면사진으로서 탄소강 모재와 스테인리스강 용접부로 인한 용접경계부인 A점에서는 이종재료간의 경계층을 뚜렷하게 관찰 할 수 있었다.

2.4 피로시험방법

탄소강 및 스테인리스강 모재, 탄소강-탄소강 용접부, 스테인리스강-스테인리스강 용접부 및 탄소강-스테인리스강 용접부의 용착금속부 및 스테인리스강쪽의 열영향부에 인공노치를 가공한 시험편으로 피로균열진전시험을 수행하였다.

본 시험에 사용된 피로 시험기는 Shimadzu사의 유압 서보 피로시험기 (hydraulic-servo fatigue test machine : model EFD-EDN-20V)로서 최대 용량은 10ton이고, 시험조건은 하중비 R=0.05의 정현파형 (sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였고, 주파수는 10Hz로 일정하게 하고, 상온에서 습도 50±5%, 시험응력 Δσ=107 MPa, 초기 응력확대계수 범위 ΔKi = 10.9 MPa √m의 동일조건하에서 피로균열진전 시험을 수행하였다. 또한 균열길이의 정확한 측정을 위해서 1/100mm 까지 측정 가능한 이동식 광학현미경을 사용하였고, 균열진전

의 양상을 알아보기 위해 피로시험도중 20~30회의 표면 레프리카를 채취하여 실험 종료후 광학 현미경으로 관찰하여 보았다.

3. 시험결과 및 고찰

이상과 같은 시험 결과로부터 얻은 피로균열진전길이 a 및 하중반복횟수 N의 관계로부터 피로균열진전속도 (da/dN)는 시컨트법 (secant method)¹⁰⁾을 사용하여 구하였으며, 응력확대계수 범위 (ΔK)는 다음과 같은 H. Tada¹¹⁾의식을 이용하여 구하였다.

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\pi a} F(\zeta)$$

$$F(\zeta) = (1 - 0.025\zeta^2 + 0.06\zeta^4) \sqrt{\sec(\pi \zeta/2)}$$

$$\zeta = 2a/W \text{ (균열길이, W: 시험편의 폭)}$$

위에서 구한 피로균열진전속도 (da/dN)와, 응력확대계수범위 (ΔK)의 관계를 양대수 (log-log) 그래프에 나타낸 결과를 탄소강, 스테인리스강, 이종재료 용접부로 나누어 각각 Fig. 5, 6 및 7에 나타내었다.

Fig. 5은 탄소강 모재, 탄소강-탄소강 용접부의 용착금속부 및 열영향부의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수 범위 (ΔK)사이의 관계를 나타낸 그림이다. 피로균열진전 속도는 탄소강 모재

가 탄소강-탄소강 용접부, 탄소강-탄소강 열영향부보다 빠르게 나타났다. 그러나 열영향부의 피로균열 진전속도는 저 ΔK 영역에서는 늦게 진전하다가 $\Delta K=25\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 범위 근처부터 탄소강 용착금속부보다 빨라짐을 알 수 있었다.

Fig. 6은 스테인리스강 모재, 스테인리스강-스테인리스강 용접부의 용접부 및 열영향부의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수 범위 ΔK 사이의 관계를 나타낸 그림이다. 피로균열진전속도는 스테인리스강-스테인리스강 용착금속부 및 열영향부는 비슷한 경향을 보였으며, 스테인리스강 모재는 피로균열진전 속도가 용접부보다 느림을 알 수 있었다.

Fig. 7은 탄소강-스테인리스강 용접부의 용착금속부 및 열영향부의 피로균열진전속도 (da/dN)와 응력확대계수 범위 ΔK 사이의 관계를 나타낸 그림으로 동선도에서 탄소강 모재 및 스테인리스강 모재의 피로균열진전 거동을 실선 및 점선으로 나타내었다. 여기서 이종재료의 용착금속부가 열영향부보다 피로균열진전 속도가 다소 빠르고, 저 ΔK 영역에서는 탄소강 및 스테인리스강 모재보다 균

열진전 속도가 빠르나, 고 ΔK 영역으로 가면 모재보다 균열진전속도가 늦어지는 것을 알 수 있었다.

Fig. 8은 탄소강, 스테인리스강 모재, 탄소강-탄소강 용착금속부 및 열영향부, 스테인리스강-스테인리스강 용착금속부 및 열영향부, 탄소강-스테인리스강 용착금속부 및 열영향부에 대한 $da/dN-\Delta K$ 관계를 동일 그래프 상에 나타낸 것이다. 아울러 Fig. 9는 Paris의 법칙이 만족되는 안정성장 영역에서 Fig. 5, 6 및 7의 실험결과로부터 최소자승법 (least square method)을 이용하여 구한 $\Delta K-da/dN$ 관계를 나타낸 그림이다.

동선도에서 스테인리스강-스테인리스강 용접열영향부의 피로균열진전속도가 가장 빠르고, 다음이 탄소강-스테인리스강 용착금속부, 스테인리스강 모재, 탄소강 모재, 탄소강-스테인리스강 열영향부, 탄소강-탄소강 용착금속부, 탄소강-탄소강 열영향부의 순서로 나타났다.

따라서 이종재료인 탄소강-스테인리스강 용착금속부나 열영향부의 균열진전 속도가 스테인리스강-스테인리스강 용착금속부 및 열영향부보다 늦게 나타나며, 스테인리스강 및 탄소강 모재와 유사

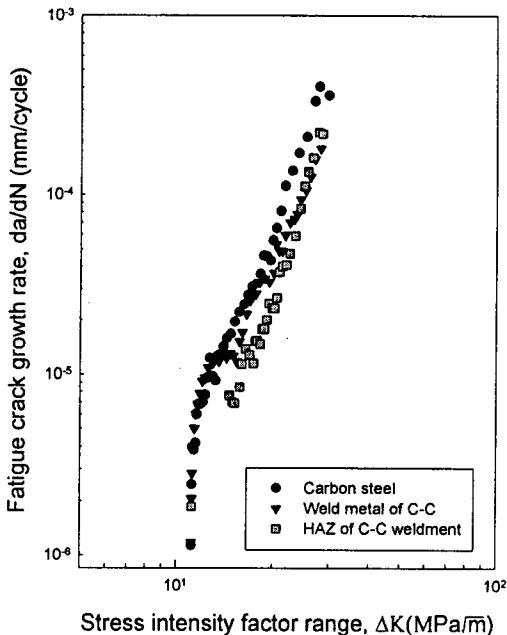


Fig. 5 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK for carbon steel

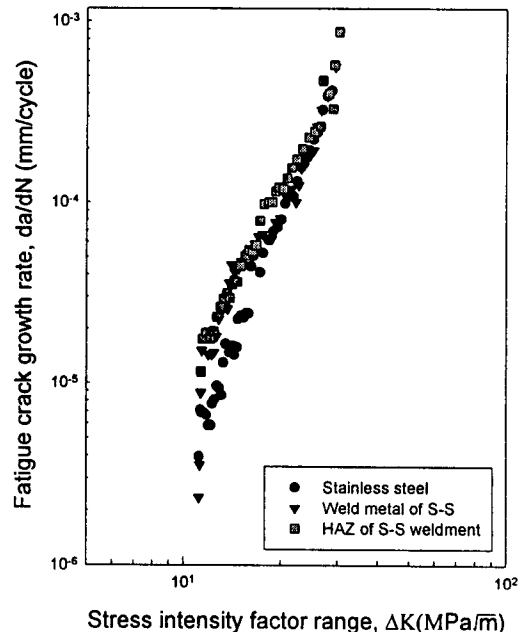


Fig. 6 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK for stainless steel

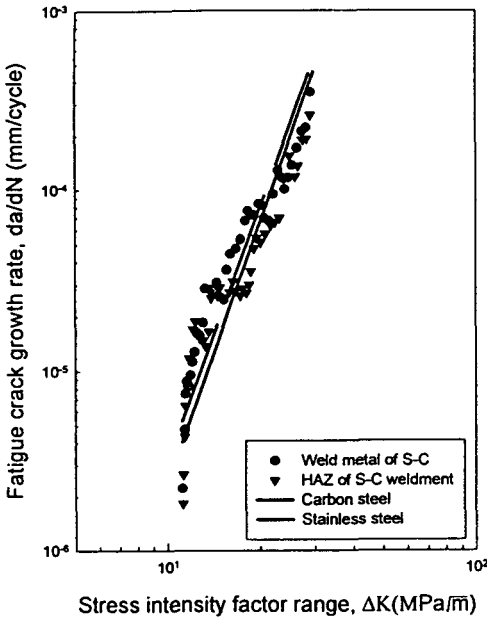


Fig. 7 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK for weld joint of carbon steel-stainless steel

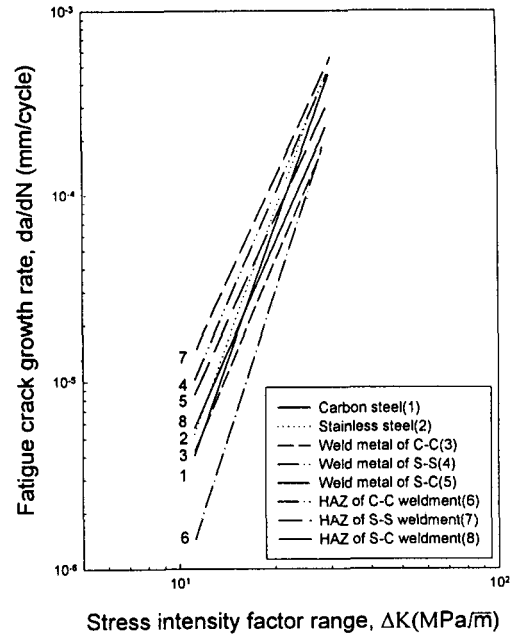


Fig. 9 Straight lines by the least square method from experimental data

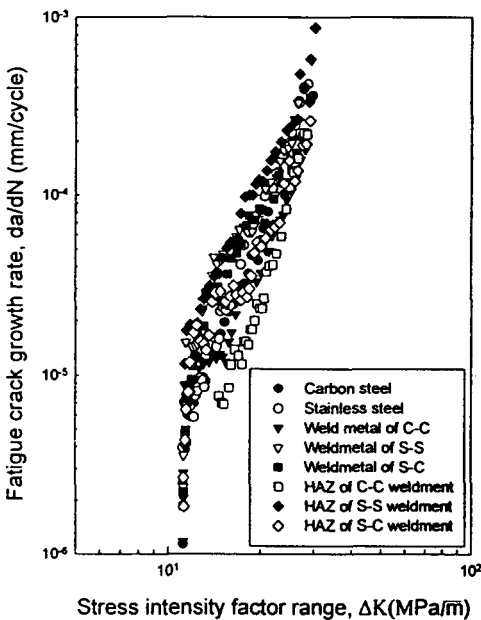


Fig. 8 Relationship between fatigue crack growth rate, da/dN and stress intensity factor range, ΔK for experimental data

한 경향을 나타낸다고도 볼 수 있다. 그러므로 이종 재료를 용접해서 사용하더라도 피로균열진전 거동의 관점에서 볼 때 스테인리스강-스테인리스강 용접부와 유사한 특성을 갖기 때문에 안정적이라고 사료된다. 또한 스테인리스강-스테인리스강 열영향부와 스테인리스강-탄소강 열영향부의 균열진전 속도 차이의 원인으로서는 화학조성 및 기계적 성질이 다른 용접봉을 사용한 것이 하나의 원인이라고 사료된다.

Fig. 10은 탄소강, 스테인리스강 모재, 탄소강-탄소강, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-스테인리스강 용접부의 용착금속부 및 열영향부의 피로균열진전시험후 파단면을 전자 현미경에서 관찰한 것이다. 특히 스테인리스강이 포함된 모재 및 용접부에서 깊이 방향으로의 2차 균열이 다수 발생됨을 관찰할 수 있었다.

용착금속부에서 피로균열이 진전 할 때는 용접 부류에 따라서는 균열분기 현상이 나타났다. 따라서 피로균열진전 현상을 표면 레프리카를 채취하여 광학 현미경에서 관찰하여 보았다.

Fig. 11은 피로균열진전 시험 시 균열분기현상이 발생할 때 레프리카를 채취하여 광학 현미경에서

관찰한 그림으로 (a)는 탄소강-탄소강 용착금속부의 형상이며, (b)는 탄소강-스테인리스강 용착금속부의 형상을 나타낸다. Fig. 10(a)의 경우 다수의 균열분기현상이 발생함에 따라 피로균열진전속도가 다소 늦어짐을 관찰 할 수 있었다. 그러나 스테인리스강 용착금속부 및 (b)의 탄소강-스테인리스

강 용착금속부에서는 균열분기현상의 발생빈도가 탄소강-탄소강 용착금속부 보다 적게 나타났으며, 아울러 균열진전속도는 모재보다 다소 빠른 특성이 있는 것으로 사료된다. 이러한 균열분기의 원인으로는 용접부에 계재물 또는 석출물이 존재하는 것이 하나의 원인이라고 사료되어진다.

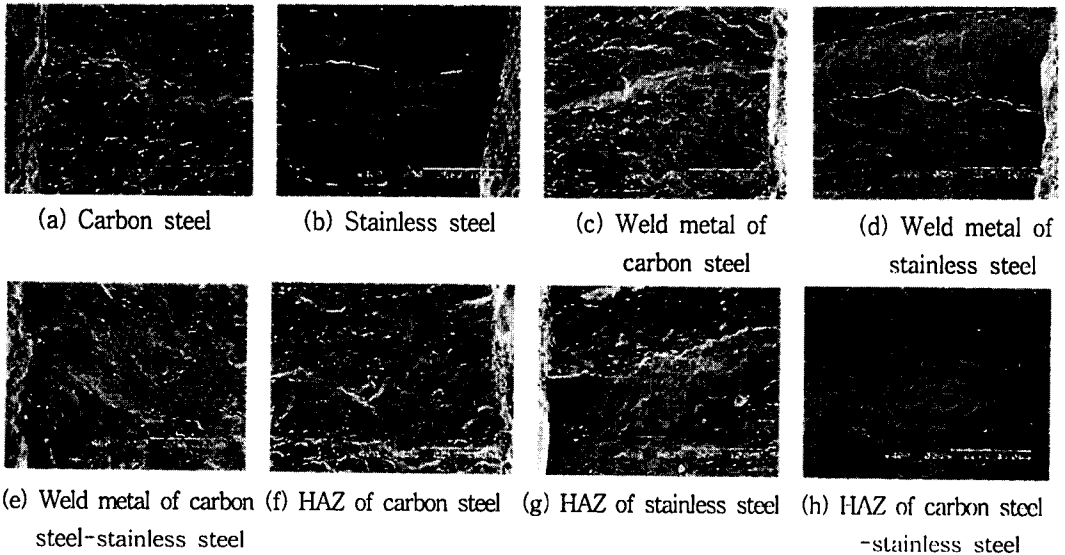


Fig. 10 SEM Fractographs of the base metal and weld joint of bimaterial, carbon steel and stainless steel

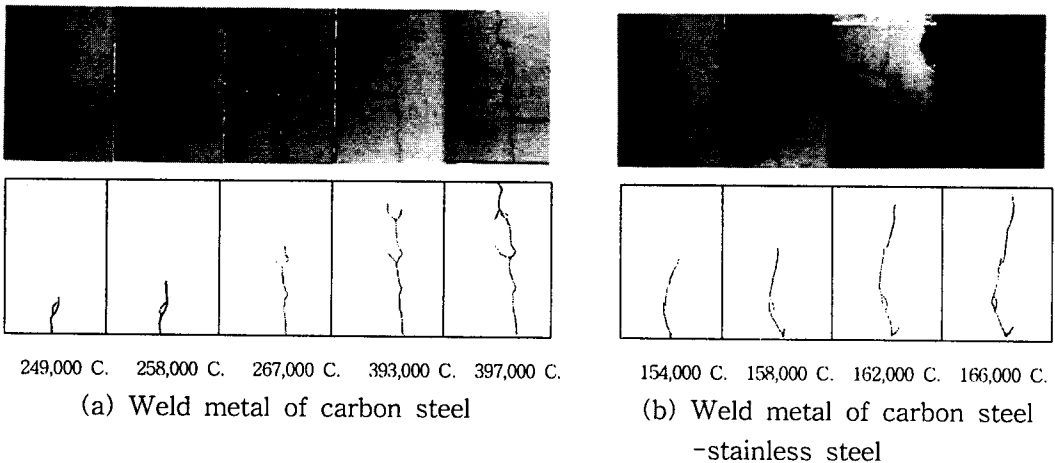


Fig. 11 Observation of surface replica on the base metal and weld metal of bimaterial, carbon steel and stainless steel

4. 결 론

이상과 같이 탄소강 모재, 스테인리스강 모재, 탄소강-탄소강, 스테인리스강-스테인리스강, 탄소강-스테인리스강 용접부에 대해 피로균열진전 시험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 용접부를 절단하여 현미경에서 관찰한 결과 동일재료 용접부에 비해 이종재료 용접부의 조직에서 현저한 차이를 나타내며 경계면이 형성된 것을 알 수 있었다.

(2) 탄소강 용접부 및 열영향부의 균열진전 속도는 모재보다 느리고, 스테인리스강 용접부 및 열영향부의 균열진전 속도는 탄소강의 경우와는 반대로 모재보다 빠르며, 탄소강-스테인리스강 용접부는 스테인리스강-스테인리스강 용접부의 피로균열진전속도 보다는 느다. 아울러 탄소강 및 스테인리스강 모재와 유사한 경향을 나타내었다. 따라서 탄소강-스테인리스강 용접부의 강도를 피로균열진전거동의 측면에서 보면 안정적이라고 사료된다.

(3) 피로균열시험후 파단면의 전자현미경 사진과 레프리카에 의한 광학현미경 사진을 비교 하여 보면 용접부에서 2차 균열이 발생한 것이 다수 관찰되었으며 이는 피로균열진전 속도에 영향을 미친 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 윤중근, 박동환, 용접부의 피로거동, 技術現況(VOL. 7 NO. 4), pp. 41-53, (1987)
2. Shuichi FUKUDA, Shuji WATARI, Kohsuke HORIKAWA, 疲勞き裂傳ばにおよぼす溶接殘留應力の影響, 日本機械學會論文集(A編)

(昭 56-4), pp. 384-390

3. Lawrence, F. V., Jr., Burk, J. D., Yung, J-Y, Influence of Residual Stress on the Predicted Fatigue Life of Weldments, ASTM STP 776, (1982) pp. 33-43
4. Nelson, D. V., Effects of Residual Stress on Fatigue Crack Propagation, ASTM STP 776, (1982) pp. 172-194
5. Raske, D. T., Low-Cycle Fatigue and Cyclic Deformation Behavior of Type 16-8-2 Weld Metal at Elevated Temperature, ASTM STP 648, (1978) pp. 57-72,
6. Brinkman, C. R., Strizak, J. P., King, J. F., Elevated Temperature Fatigue Characterization of Transition Joint Weld Metal and Heat Affected Zone in Support of Breeder Stream Generator Development, ASTM STP 648, (1978) pp. 218-234
7. Tatsuo SAKAI, Toshiro KIKUCHI, Takao TANAKA, Krizo FUJITANI, 突合せ溶接手の疲勞壽命分布に關する一研究, 材料, 第30卷, 第339號, (1981) pp. 1218-1224
8. 이용복, 조남익, 박강은, SS400 용접부의 표면피로균열거동에 관한 연구, 대한용접학회지 제14권 제2호, (1996) pp. 90-95
9. Sandifer, J. P. and Bowie, G. E., Fatigue Crack Propagation in A537M steel, Fatigue Testing of Weldments, ASTM STP 648, (1978) pp. 185-196
10. ASTM, Standard Test Methode for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM E647-88a, (1988)
11. Y. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 1, p. 3, (1979)