

이종재료 용접부의 피로균열진전 특성

Fatigue Crack Growth Characteristics on The Weld Joint of Bimaterial

권재도*, 김우현**, 박중철**, 배용탁**, 김종형**

*:영남대 기계공학부, **:영남대 대학원

ABSTRACT This paper was conducted the fatigue crack growth test on the base metal and weld joint of bimaterial(carbon-stainless steel), carbon steel and stainless steel. As the result, the fatigue crack growth rate of weld joint on the stainless-stainless steel is faster than stainless base metal, and weld joint on the carbon-carbon steel heat affected zone is slower than carbon base metal. And fatigue crack growth rate of carbon-stainless steel weld joint and heat affected zone is similar to the behavior of stainless base metal. In conclusion, weld joint of bimaterial is stable in the fatigue crack growth behavior.

1. 서론

최근 기계 구조물의 접합방법으로 용접 이음이 각광을 받고 있다. 특히 원자력 발전설비, 해양구조물 및 석유화학 플랜트등의 기계 구조물의 안전성, 강도 및 경제적인 면에서 이종 재료를 용접해야 하는 경우가 생기게 된다. 그런데, 이와같은 용접부를 포함한 기계구조물의 주요 파손 원인은 피로 및 환경파괴가 주류를 이룬다. 이와같은 기계구조물의 용접부에 대한 기존의 연구를 살펴보면, Shuichi FUKUDA의 용접부의 잔류응력이 피로균열진전에 미치는 영향에 관한 연구, Akihiko OHTA의 용접부 및 열영향부에서의 피로균열진전 특성에 관한 연구, Sandifer, J. P의 모재, 용접부 및 열영향부에서의 파괴인성, 충격 및 피로균열진전 특성에 관한 연구등이 있다.

그러나 용접에 사용되는 모재의 재질이 서로다른 이종재료의 용접부 피로균열진전 특성에 관한 연구결과는 찾아보기 힘들었다. 따라서 본 연구에서는 탄소강, 스테인레스강 모재 및 탄소강-탄소강, 스테인레스강-스테인레스강, 탄소강-스테인레스강 용접부 및 열영향부의 피로균열진전 특성을 규명하여 보았다. 아울러 피로균열진전시험후의 파면을 전자 현미경으로 관찰하여 균열진전 기구를 규명하여 보았다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험용 재료 및 시험편

본 연구에 사용된 연구용 재료는 스테인레스강(ASTM A-240)과 탄소강(ASTM A36)의 판재로서 이 재료에 대한 화학적 성분은 Table 1과 같다.

Table 1. A-240 스테인레스강과 A36 탄소강의 화학적 성분(%)

재질 \ 성분	C	S	P	Mn	Si	Cr	Ni	Cu
A-240	0.03	0.04	0.04	2.00	1.00	18.00	9.00	-
A 36	0.03	0.01	0.04	0.88	0.073	18.18	9.19	0.28

용접은 TIG 및 SMAW 용접을 자격인증된 용접사가 실시하였고, 용접봉은 ER-308L, ER-309L 및 E7016을 사용하였으며, 시험편의 용접 조건은 TIG의 경우 65.7A, 용접봉 직경 2.4 Ø, 용접속도 1.4 cm/min으로 하였고, SMAW의 경우 110A, 용접봉 직경 3.2 Ø, 용접속도 1.56 cm/min 으로 하였다.

본 연구에서는 이종금속 용접부에 대한 피로균열진전 거동을 파악하기 위해 스테인레스강 모재, 탄소강 모재, 스테인레스강-스테인레스강, 탄소강-탄소강, 탄소강-스테인레스강의 용

접부 및 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 형상을 Fig. 2에 나타내었다.

본 시험편은 중앙균열(Center crack tension : CCT) 시험편으로 중앙노치는 피로균열발생 특성에 미치는 영향을 최소화하기 위해서, 우선 센터드릴로 중앙에 홀(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, 피로균열 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 사용 하였다.

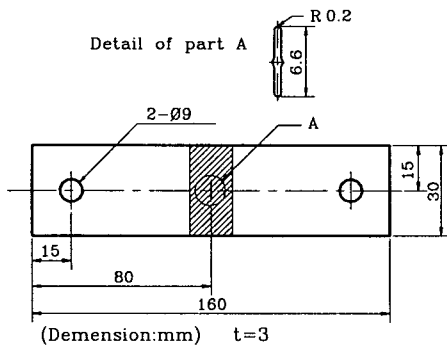


Fig. 1 중앙노치 피로시험편의 형상 및 치수

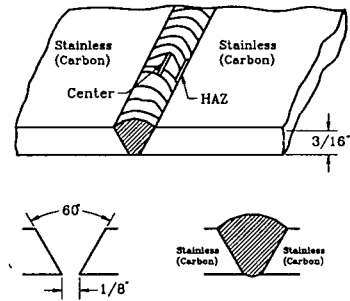
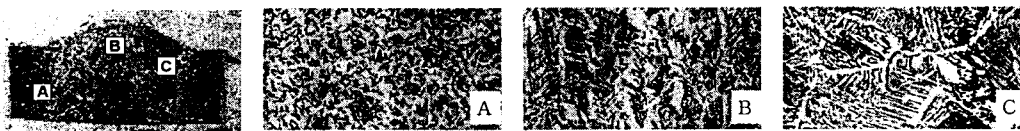


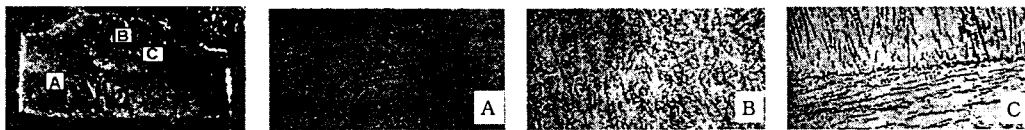
Fig. 2 용접부 형상 및 노치의 위치

2.2 용접부 조직관찰

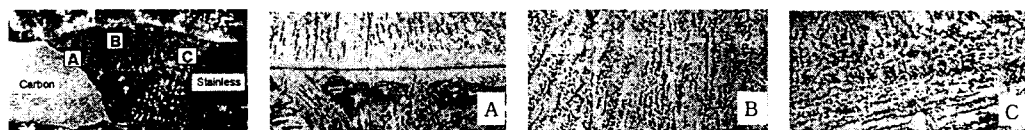
Fig. 3은 용접부 절단면 사진과 모재, 용융금속부 및 열영향부의 200배 광학현미경 조직사진을 나타낸 것이다. Fig. 3(a)는 탄소강-탄소강 용접부의 단면사진으로서 용접 경계부인 C점에서 조직이 조대해 짐을 알 수 있고, Fig. 3(b)는 스테인레스-스테인레스강 용접부의 단면사진으로서 용접경계부인 C점에서 용접부와 모재인 스테인레스강 사이에 뚜렷한 경계부가 나타나 있으며, Fig. 3(c)의 탄소강-스테인레스강 용접부의 단면사진으로서 A점 용접경계부에서는 이종재료간의 현저한 조직 차이가 보임을 관찰 할 수 있었다.



(a) 탄소강-탄소강 용접부의 조직사진(×200)



(b) 스테인레스강-스테인레스강 용접부의 조직사진(×200)



(c) 탄소강-스테인레스강 용접부의 조직사진(×200)

Fig. 3 탄소강-탄소강, 스테인레스강-스테인레스강, 탄소강-스테인레스강 용접부의 조직사진

2.3 피로시험방법

본 시험에 사용된 피로 시험기는 Shimadzu사의 유압 서어보 피로시험기(hydraulic-servo fatigue test machine : model EFD-EDN-20V)로서 최대 용량은 10ton이고, 시험조건은 하중비 $R=0.05$ 의 싸인파형(sine wave), 인장-인장 하중형태를 채택하였고, 주파수는 10Hz로 일정하게 하고, 상온에서 습도 $50\pm 5\%$, 응력레벨은 $\Delta\sigma=107\text{ MPa}$, $\Delta K_i = 10.9\text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ 의 동일조건하에서 모재 및 용접재에 대하여 피로균열진전 시험을 수행하였다. 또한 균열길이의 정확한 측정을 위해서 1/100mm 까지 측정가능한 이동식 광학현미경을 사용하였고, 균열진전의 양상을 알아보기 위해 피로시험도중 20~30회의 표면 레프리카를 채취하여 광학 현미경에서 실험 종료후 관찰 하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 ΔK -da/dN 선도

피로균열진전시험 결과로 얻은 a-N의 관계로부터 피로균열진전속도(da/dN)는 시컨트법(secant method)을 사용하여 구하였고, 응력확대계수 범위 (ΔK)는 다음과 같은 H. Tada의 식을 이용하여 구하였다.

Fig. 4(a)는 탄소강 및 스테인레스강 모재, 탄소강-탄소강 용접중양부 및 열영향부, 스테인레스-스테인레스강 용접중양부 및 열영향부, 탄소강-스테인레스강 용접중양부 및 열영향부에 대한

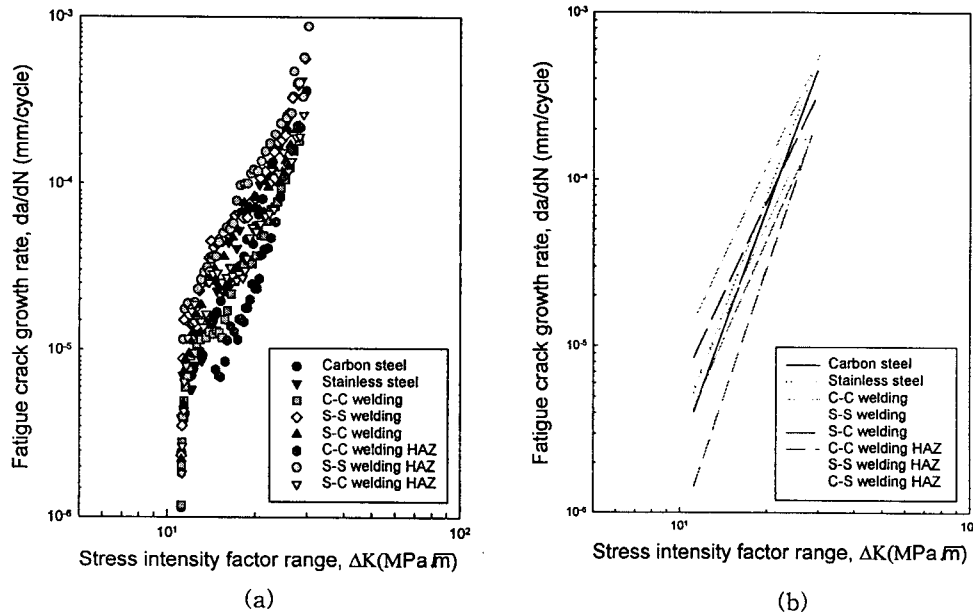


Fig. 4 탄소강 및 스테인레스강 모재, 탄소강 용접부, 스테인레스강 용접부, 탄소강-스테인레스강 용접부의 da/dN- ΔK 선도

ΔK -da/dN 관계를 동일 그래프상에 나타낸 것이다. 아울러 (b)는 Paris의 법칙이 만족되는 안정성장 영역에서 위의 실험결과로부터 최소자승법(least square method)을 이용하여 구한 ΔK -da/dN 관계를 나타낸 그림이다. 또한 이 직선은 Paris의 균열진전 법칙인 $da/dN=C(\Delta K)^m$ 이 성립되고, 수명예측에서 중요한 파라미터로 작용하는 m 및 C의 값을 최소자승법으로 구하여 보았다.

3.2 피로균열진전거동 규명

탄소강, 스테인레스강 모재, 탄소강-탄소강, 스테인레스강-스테인레스강, 탄소강-스테인레스강의 용접부 및 열영향부의 피로균열진전 거동을 규명하기 위하여 피로파단면을 전자현미경에서 관찰하고 표면 레프리카를 광학현미경에서 관찰 하였다.

Fig. 5는 탄소강, 스테인레스강 모재, 및 용접부의 피로균열진전후 파단면을 전자 현미경에서 관찰한 것이다. 특히 스테인레스강이 포함된 모재 및 용접부에서 깊이 방향으로의 2차 균열이 발생됨을 관찰할수 있었다.

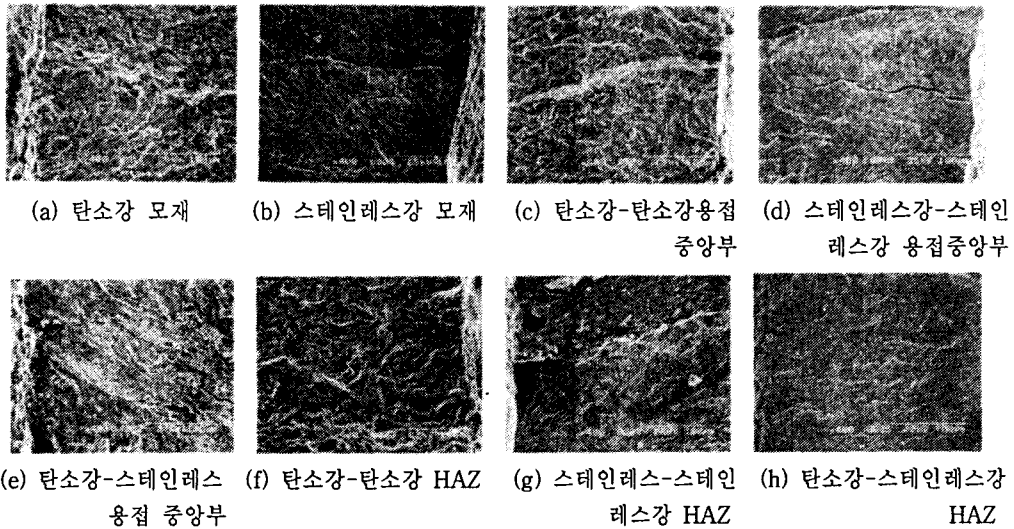


Fig. 5 각재료의 전자현미경사진

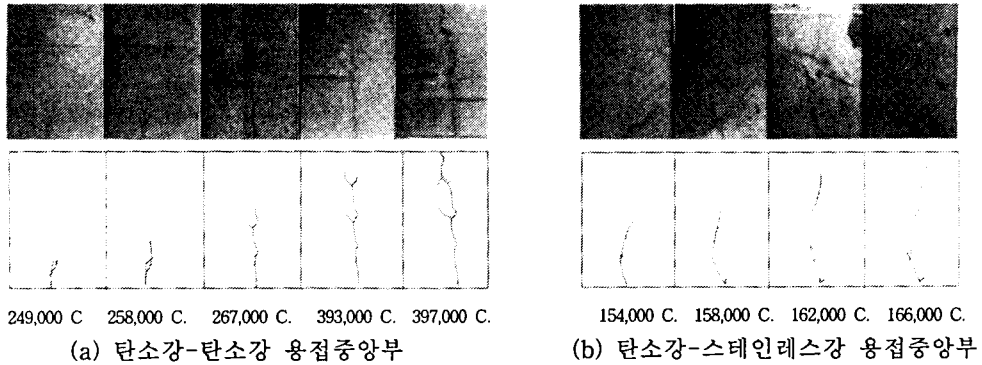


Fig. 6 피로균열진전시 2차 균열의 발생

용접부에서 피로균열이 진전될때는 용접상태, 조건등에 따라 균열진전속도에는 분산이 있었다. 따라서 피로균열진전 형상은 표면 레프리카를 채취하여 금속 현미경에서 관찰하여 보았다.

Fig. 6은 피로균열진전 시험시 2차 균열이 발생할 때 레프리카를 채취하여 광학 현미경에서 관찰한 그림으로 (a)는 탄소강-탄소강 용접중앙부의 형상이며, (b)는 탄소강-스테인레스강 용접중앙부의 형상을 나타낸다. Fig. 6(a)의 경우 많은 양의 2차균열이 발생함에 따라 피로균열진전속도가 상당히 늦어짐을 관찰 할수 있었다. 그러나 스테인레스 용접부 및 (b)의

탄소강-스테인레스강 용접중앙부에서는 2차 균열의 발생빈도는 탄소강-탄소강보다 적게 나타났다.

4. 결론

이상과 같이 탄소강 모재, 스테인레스강 모재, 탄소강-탄소강, 스테인레스강-스테인레스강, 탄소강-스테인레스강 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 계면이 형성된 것을 알 수 있었다.
- (2) 탄소강 용접부 및 열영향부의 균열진전 속도는 모재보다 느리고, 스테인레스강 용접부 및 열영향부의 균열진전 속도는 탄소강의 경우와는 반대로 모재보다 빠르며, 탄소강-스테인레스강 용접부는 스테인레스-스테인레스강 용접부와 유사한 거동을 보이며, 탄소강-스테인레스강 열영향부는 탄소강-스테인레스강 용접부와 유사한 거동을 보이다가 $10.5\text{MPa}\sqrt{\text{m}}$ 이후 부터는 탄소강-탄소강 용접부의 거동이 나타남을 알 수 있었다.
- (3) 용접부 조직관찰 결과 탄소강 용접부의 조직이 조대해짐에 따라 탄소강-탄소강 열영향부에서의 피로균열진전 속도가 늦어짐을 알 수 있었다.
- (4) 피로균열시험후 파단면의 전자현미경 사진과 레프리카에 의한 광학현미경 사진을 비교하여 보면 용접부에서 2차 균열이 발생한 것이 다수 관찰 되었으며 이는 피로균열진전 속도에 영향을 미친 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 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)
2. Akihiko OHTA, late Etsuo SASAKI, Michio KOSUGE, Satoshi NISHIJIMA, "Fatigue Crack Growth and Threshold Stress Intensity Factor for Weld Joints", JSMS MRS 1, pp.(157~174), (1985)
3. Sandifer, J. P. and Bowie, G. E., "Fatigue Crack Propagation in A537M steel", Fatigue Testing of Weldments, ASTM STP 648, pp.(185~196), (1978)
4. 이용복, 조남익, 박강은. "SS400 용접부의 표면피로균열거동에 관한 연구", 대한용접학회지 제14권 제2호, pp.(90~95), (1996)
5. Y. Murakami, Stress Intensity Factors Handbook, Vol. 1, p. 3, (1979)
6. ASTM, Standard Test Methode for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates, ASTM E647-88a, (1988)