

SUS 321 전자비임 용접부의 피로균열진전거동

Fatigue Crack Propagation Behavior for Electron Beam Welded Joint of SUS 321

김 재 훈*

Jae-Hoon Kim

(1997년 3월 28일 접수, 1997년 6월 10일 채택)

ABSTRACT

Fatigue crack propagation behaviors and life prediction for SUS 321 plate and its electron beam weld metal were investigated using compact tension specimens.

The larger the stress ratio is, the faster the crack propagates, but the variation of crack propagation rate decreases. The effect of stress ratio is greater in the slow crack propagation area than in the faster one. The crack propagation rate of electron beam weld metal is faster than that of base metal because of hardening, weld defect and residual stress in welding area. The crack propagation rate of transverse weld metal has a lower than that of base metal due to the effect of residual stress, but in the time of passing through welding area, has a higher rate.

The crack propagation rate using ΔK_{eff} can be well plotted regardless of stress ratio. The fatigue life prediction method of considering crack closure more exactly predicts fatigue life than conventional one.

1. 서 론

용접부의 불안정 취성파괴 및 피로파괴는 결함이나 불균일한 기하학적 형상 때문에 생기는 응력 집중이 원인이 되는 경우가 많다. 파괴 및 피로균열의 생성. 전파에 영향을 주는 인자는 용접부 잔류응력, 열영향부의 조직, 용착금속내의 개재물, 용합불량 및 기포 등이다^{1~3)}. 용접결함을 함유한

용접부가 반복하중을 받으면 재료의 허용응력 보다 훨씬 낮은 하중에서 파괴가 되며, 수명의 대부분은 피로균열 전파거동에 의해 지배되므로, 이들의 균열진전특성과 피로수명의 평가는 용접재의 설계나 보수 관리상 중요시 되고 있다^{4~6)}.

기존의 피로수명 예측 방법은 응력비에 의한 영향을 받고 있으며, 특히 낮은 응력에서 예측수명과 실제수명의 차이가 크게 나타나고 있다. 이로

*충남대학교 기계설계공학과

인한 부재 중량의 과도한 설계와 검사 간격을 단축 시킴으로써 불필요한 낭비를 초래하게 된다. 균열 단합 개념은 Elber^{7,8)}가 피로균열진전 시험 도중 인장하중상태하에서도 균열선단이 닫혀 있음을 발견하고 균열진전 평가에 있어 실제로 균열선단이 열려 있는 유효응력확대계수폭 ΔK_{eff} 로 평가하면 균열진전속도는 응력비에 관계없이 하나의 관계로 잘 정리된다. 이를 이용하면 시편 실험의 횟수를 줄이고 수명 예측의 정밀도를 개선 할 수 있다.

최근 국내에서 개발되어 원자력 압력용기에 이용되는 SUS 321은 입체부식 및 피로 강도가 우수하며, 특히 강도, 인성, 내식성, 내산화성이 우수한 소재이다. 그러나 용접부의 피로균열진전 특성과 잔존수명 평가를 위한 설계 자료가 미흡한 실정이므로 이들의 안정성 평가 문제는 반드시 검토되어야 한다. 또한 용접 기술의 진보에 따라 많은 용접 구조물 제작에 이용되고 일부 이종 재료간의 접합에도 응용되고 있는 전자비임 용접은 용접부의 냉각속도가 크기 때문에 용접부가 현저히 경화되기 쉽다. 이와 같이 현저히 경화된 전자비임 용접부에 대한 피로균열진전 거동에 관한 연구는 미흡한 실정이다.

본 연구는 SUS 321 전자비임 용접재에 대하여 일정하중에 의한 피로시험을 수행하여 피로균열진전 방향이 용접 비이드와 평행하는 경우와 직교하는 경우에 용접재의 균열진전 거동을 모재와 비교하고, 직교 용접재에 대한 열영향부의 균열성장 거동을 평가하였다. 그리고 균열단합점에 의한 유효 응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 를 이용하여 피로수명을 예측하였다.

2. 실험방법

사용된 재료는 고장력 스테인레스강인 SUS 321로써 그 화학적 성분 및 기계적 성질은 Table 1, 2와 같다. 용접부 형상, 용접 방법 및 용접 조건은 Table 3과 같다. 용접후 방사선 투과 검사를 실시하여 방사선 검사규격 ATAC-STD-114를 적용, STD II 이상의 등급만을 채택하여 용접성이 양호한 것만을 사용하였다.

시험편은 용접비이드와 균열진전 방향이 평행하도록 한 평행용접 시편은 T-L 형으로, 직교하는 직교용접 시편은 L-T형으로 채취하였으며 시험편

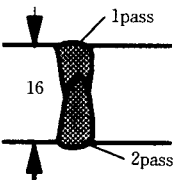
Table 1 Chemical composition of SUS 321 (wt%)

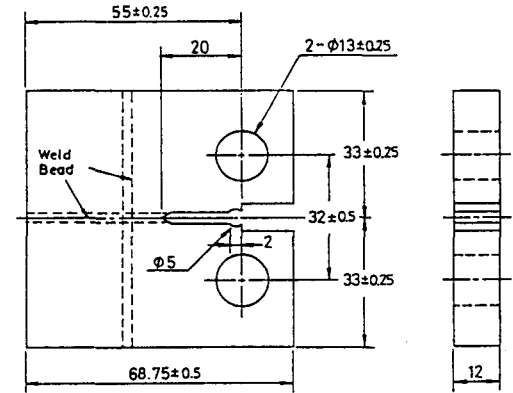
C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Ti	Co
0.04	0.45	1.74	0.031	0.003	9.19	17.12	0.48	0.08

Table 2 Mechanical properties of SUS 321

Tensile strength σ_u (Kg/mm ²)	0.2% Yield strength σ_y (Kg/mm ²)	Elongation (%)	Rockwell hardness H _{RB}
56.7	24.3	58.4	82.6

Table 3 Welding method and welding parameter

Welding method	Welding parameter	
	Accelerating voltage	150KV
	Beam current	35mA
	Welding speed	500mm/min
	Heat input	1260J/mm



(Dimension : mm)

Fig. 1 Compact tension specimen

규격은 Fig. 1과 같이 CT 시편으로 가공하였다. 기계가공은 노치를 $a_n \geq 0.2W$ 로 하고 노치선단은 균열발생이 용이하고 균일하게 진전하도록 와이어 방전가공을 하였다. 시험편의 표면은 실리콘 카바이드 에머리 페이퍼로 #1500까지 순차적으로 연마하고, 알루미늄분말로 버핑(buffing)을 하여 균열길이 측정을 용이하게 하였다.

피로시험은 20톤 Shimadzu사 전기유압식 피로 시험기를 이용하였다. 균열길이 측정은 디지털화

된 100배의 이동현미경으로 앞면과 뒷면에서 측정하여 레코더에 기록하였다. 안정균열성장 영역의 균열 단립점은 크립게이지를 이용하여 하중-하중점 변위의 제하 탄성 컴플라이언스법에 의해 산출하였다.

예비크랙은 노치표면에서 1.0mm 이내로 하여 노치의 영향을 최소화 하였다. 피로시험은 하중제어 방식으로 응력비 $R=0.1, 0.3, 0.5$ 에서 수행하였고, 파형은 정현파, 하중 반복수는 7Hz로 하였다. 피로하중은 용접재인 경우 $P_{max}=1200kg_f$, 모재인 경우 $P_{max}=1000kg_f$ 로 일정진폭하중으로 실험하였다. da/dN 의 산출은 다소 분산성은 있으나 정확한 데이터 점을 얻기 위해서 분할법(secant method)을 사용하였다. 응력확대계수 범위 ΔK 와 유효 응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 도 ASTM에 의한 CT시험편의 적용식을 이용하여 계산하였다⁹⁾.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 균열진전속도

Fig. 2 (a), (b), (c)는 모재와 용접재에 대하여 균열진전속도와 응력확대계수폭을 나타낸 da/dN -

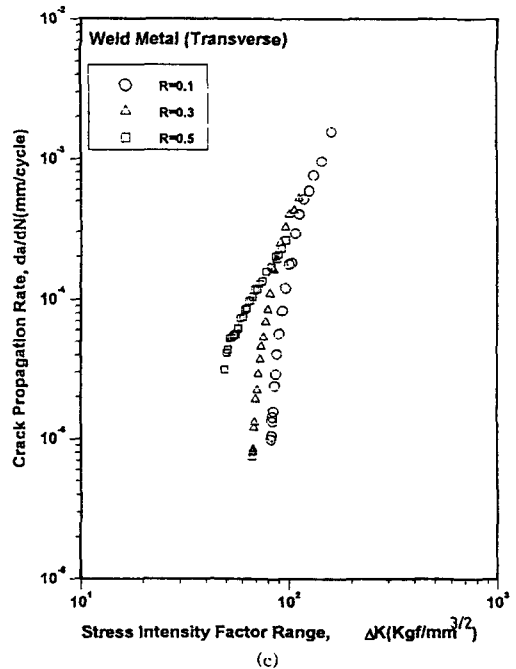
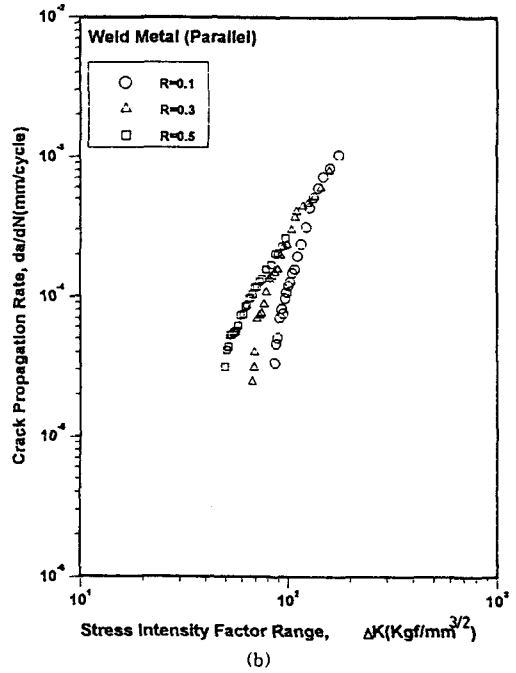
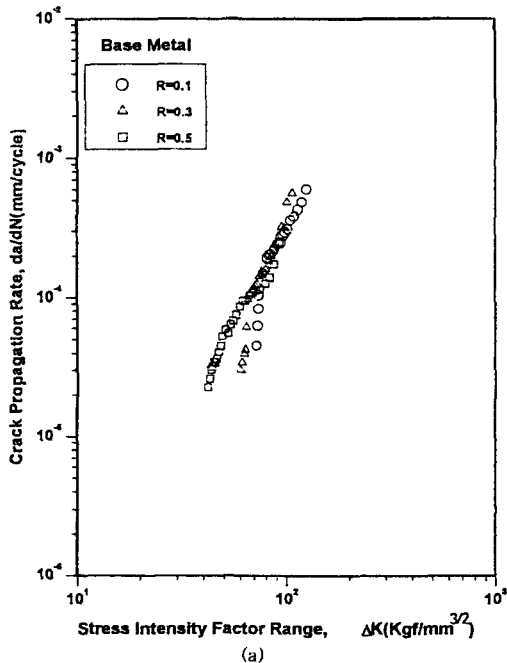


Fig. 2 Fatigue crack propagation rate vs. stress intensity factor range in base metal and weld metal

ΔK 선도이다. 그림에서 균열진전속도는 응력비의 증가에 따라 커지고 있으나 진전속도가 빨라짐에 따라 응력비에 관계없이 거의 동일한 속도로 모이고 있다. 이는 안정성장영역에서 균열진전속도는 응력비에 의한 영향을 받지만 진전속도가 증가함에 따라 최대응력확대계수 K_{max} 가 파괴인성 K_{IC} 에 도달함으로써 해서 가속되어 불안정 파단하기 때문이다¹⁰⁾.

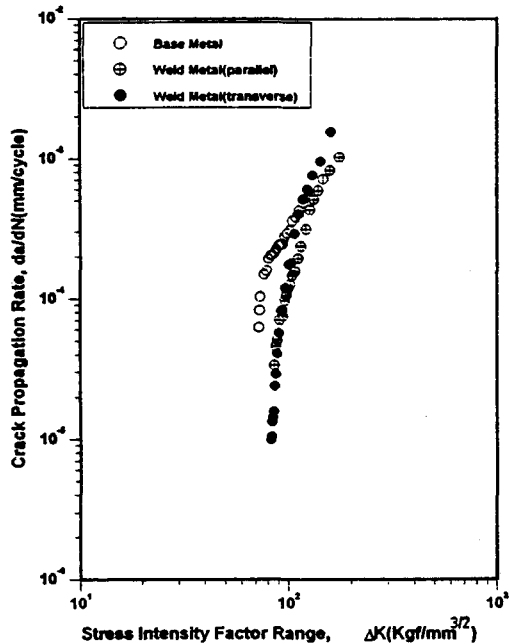


Fig. 3 Fatigue crack propagation rate vs. stress intensity factor range for stress ratio $R=0.1$

Fig. 3은 응력비 $R=0.1$ 인 경우, 모재 및 용접재의 균열진전속도와 응력확대계수 폭을 나타낸 $da/dN-\Delta K$ 선도이다. 평행과 직각 용접재의 균열진전속도는 비슷하게 나타나고 있으나, 모재보다 용접재가 더 작은 진전속도를 보이고 있다. 그러나 균열진전의 가속화를 표시하는 균열진전속도의 변화율은 용접재의 경우가 모재보다 진전속도가 더 빨리 증가하고 있다. 이는 용접부가 모재에 비해 경도는 증가하였으나 용접 열영향에 의하여 상당히 취약해졌기 때문으로 사료된다.

Table 4는 모재와 평행용접재에서 Paris식⁵⁾ $da/dN=C(\Delta K)^m$ 으로 부터 최소자승법으로 구한 재료상수 C 와 m 값을 응력비 R 에 따라 나타낸 것

이다. m 값은 R 의 변화에 관계없이 용접재가 모재보다 크게 나타났다. 이는 용접재가 모재보다 진전속도 변화율이 더 급격하게 증가됨을 알 수 있다.

Table 4 Material constants of Paris' equation

Material	R	C	m
Base metal	0.1	7.13×10^{-11}	3.32
	0.3	6.17×10^{-10}	2.81
	0.5	2.44×10^{-9}	2.52
Weld metal	0.1	2.81×10^{-14}	4.79
	0.3	9.93×10^{-12}	3.67
	0.5	6.56×10^{-10}	2.83

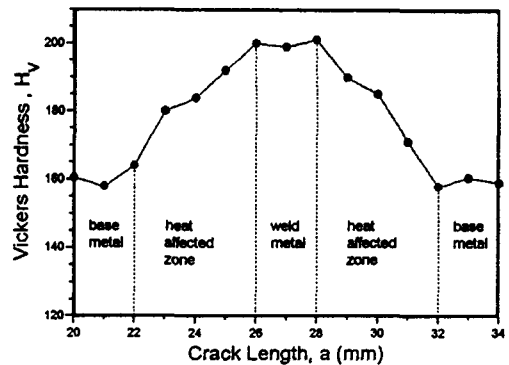


Fig. 4 Vickers hardness distribution in the transverse weld metal

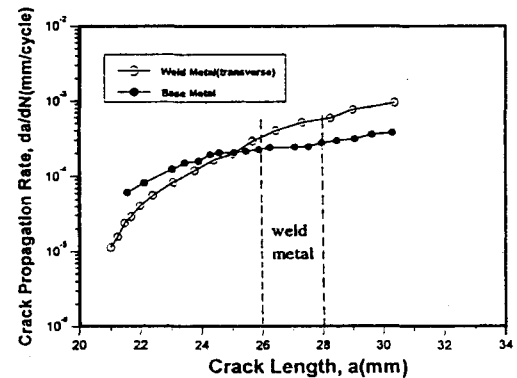
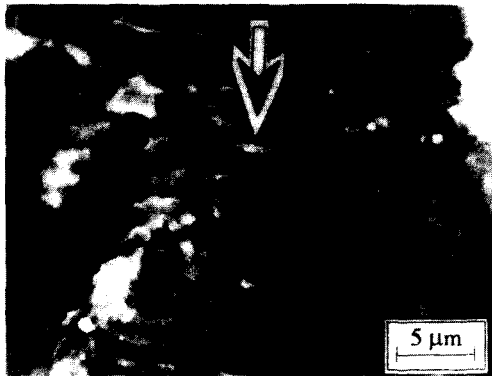


Fig. 5 Fatigue crack propagation rate in the heat affected zone of the weld metal

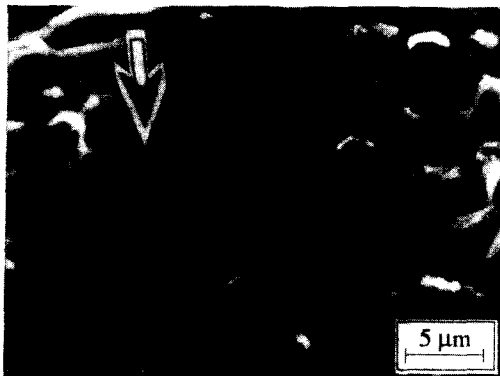
Fig. 4는 직각방향 용접재에 대하여 균열진전방향의 경도의 분포를 나타낸 것으로 경도 차이에 의해 모재, 열영향부, 용접부의 3개 영역으로 구분

된다. 그림에서 용접부의 경도가 가장 크고 모재와 용접부 사이에 경도의 천이구역인 열영향부가 존재하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 5는 피로균열이 용접 비이드에 직각으로 성장하는 경우와 모재에 대해 피로균열진전속도를 균열길이에 따라 도시한 것이다. 용접부까지는 열영향부가 있는 전자비임 용접재가 모재보다 균열진전속도가 작으나 용접부를 지나면서 속도가 크게 증가함을 알 수 있다. 또한 용접재의 진전속도 변화율이 모재보다 큼을 알 수 있다. 이는 전자비임 용접시에 나타나는 고열에 의한 재질의 변화와 열영향부의 잔류응력 분포에 있어서, 용접비이드로 근접할 때까지는 압축잔유응력에 의해 균열진전을 지체 또는 감소시키나, 용접비이드 부위에서 인장 잔류응력으로 바뀜으로 해서 균열진전속도가 가속되는 것으로 사료된다.



(a) Base metal



(b) Weld metal

Photo 1 SEM Fractographs of stable crack propagation region in base metal and weld metal

Photo 1 (a)와 (b)는 모재와 용접부의 피로균열의 파단 후 안정성장영역에서 SEM으로 파단면을 촬영한 것이다. (a)에서 모재인 경우의 피로파괴 기구는 스트라이에이션(striation)으로 나타났고, (b)에서 용접부의 파단면은 미소 보이드 같은 용접결함을 함유하고 있는 연성스트라이에이션으로 모재와 용착금속이 혼합되어 기공과 불순물이 파단면에 산재하여 있는 것을 알 수 있었다.

3.2 ΔK_{eff} 에 의한 균열진전속도

Elber⁸⁾의 균열닫힘을 고려한 ΔK_{eff} 에 의해 정리하면, 균열진전속도는 Paris식⁵⁾으로 응력비에 관계없이 잘 표현될 수 있다. 균열열림점을 고려하여 유효 응력확대계수 범위 ΔK_{eff} 에 의한 균열진전속도를 Fig. 6, 7에 나타내었다. 이 경우 da/dN 은 ΔK_{eff} 에 의하여 하나의 직선으로 비교적 잘 정리되어 R의 영향이 감소되고 있음을 알 수 있다. Table 5는 모재와 평행용접재에서 $da/dN=C(\Delta K_{eff})^m$ 로 부터 최소자승법으로 구한 C, m를 나타낸 것이다.

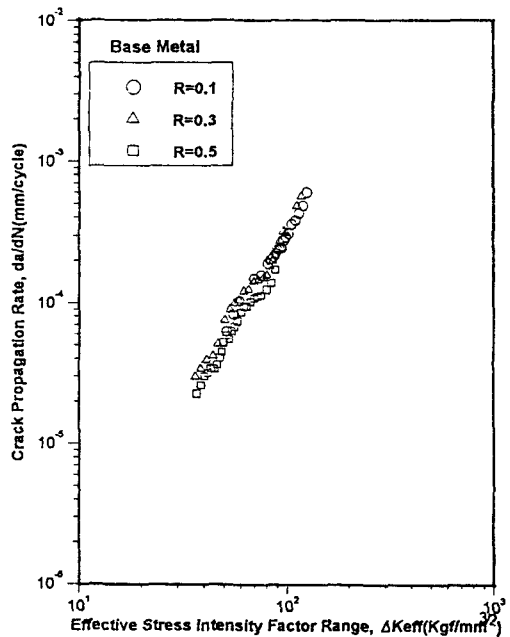


Fig. 6 Fatigue crack propagation rate vs. effective stress intensity factor range in base metal

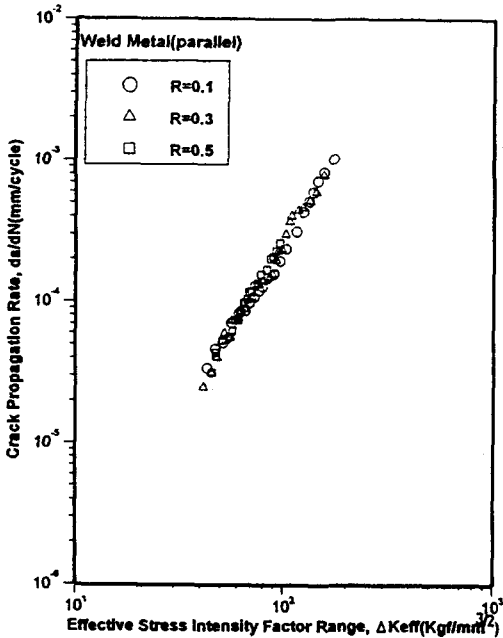


Fig. 7 Fatigue crack propagation rate vs. effective stress intensity factor range in parallel weld metal

Table 5 Material constants by means of effective stress intensity factor range

Material	C'	m'
Base metal	6.5×10^{-9}	2.33
Weld metal	3.74×10^{-9}	2.49

3.3 피로수명 예측

용접이음 재료는 용접작업시 기공, 용접개재물 및 열영향부의 용접잔류응력등으로 인한 용접결합이 존재하여 일반 금속재료와는 균질성이 크게 다르며 이러한 존재가능한 결합으로 말미암아 파단수명은 매우 짧게 된다. 실제 구조물은 모재부와 용접부로 구성되는데 모재에 존재 가능한 균열 또는 결합의 치수는 $10^{-1}mm$ 이하의 미시적인 치수로 평가되고, 용접부에는 $10^{-1}mm$ 이상의 거시적인 치수이다. 그러므로 용접재의 피로수명 추정이 구조물의 파단수명 설계에 매우 중요시 되고 있어, 각 재료의 미소한 등가 균열길이의 결합이 이미 존재한다고 가정하여 처음부터 피로균열의 전파문제로 해석하게 된다.

균열단합을 고려한 균열진전속도식에서 구한 재료상수 C', m'을 이용하여 균열전파에 소요되는 수

명, 즉 균열 전파수명에 관한 S-N곡선을 다음과 같이 얻을 수 있다. 피로균열의 전파수명은

$$N_d = \left\{ 1/C' (U \cdot \Delta \sigma)^{m'} \right\} \int_{a_0}^{a_d} [\sqrt{W} f(\alpha)]^{-m'} da$$

(여기서, $U = \Delta K / \Delta K_{eff}$, $\Delta \sigma = \Delta K / [\sqrt{W} f(\alpha)]$, $f(\alpha) = (2 + \alpha) / (1 - \alpha)^{3/2} \cdot \{ 0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4 \}$, $\alpha = a/W$ 이다.)

으로부터 예측할 수 있다¹¹⁾. 그리고 심프슨의 적분법을 이용하여 N_f 과 $\Delta \sigma$ 의 선도를 구하였으며, 허용되는 최대 균열길이를 0.1~0.5mm를 피로한도에 대한 등가 균열길이로 보아 예측한 피로수명과도 비교하였다.

Table 6 Actual and predicted cycle values on stress range

Material	R	$\Delta \sigma$	Actual cycle (Na)	Predicted cycle (N_f)	
				Crack closure	Paris' equation
Base metal	0.1	1.340	56780	61071	52002
	0.3	1.097	87560	84316	95295
	0.5	0.760	291920	229920	202663
Weld metal	0.1	1.596	85180	85889	86285
	0.3	1.252	92960	93023	105249
	0.5	0.901	148790	135180	157414

Table 6은 균열단합을 이용한 방법과 Paris식에 의한 기존의 방법으로 평가한 예측수명을 실제수명과 함께 나타낸 것이다. ΔK 를 이용한 수명예측이 실제수명에 비해 다소 과소 평가 되었으며 ΔK_{eff} 를 이용한 방법이 보다 잘 일치함을 알 수 있다. 발생하는 오차는 균열열림점의 측정에 대한 오차로 생각되며 ΔK_{eff} 에 대한 보다 정확한 평가가 이루어 진다면 피로수명은 보다 정확히 예측할 수 있을 것으로 사료된다.

Fig. 8, 9는 모재와 용접재에 대해 응력변동 범위와 파단수명과의 관계를 응력비 R별로 도시한 선도이다. 허용할 수 있는 초기 균열길이, 즉 $a_0 = 0.1mm, 0.5mm$ 인 경우의 파단수명도 함께 나타내었다. 그림에서 응력비 R값이 증가함에 따라 파단수명도 증가하고 평균 허용응력이 증가할수록 파단수명이 감소하고 있음을 볼 수 있다.

용접이음 재료에서는 용접 이음부에 결합이 존재하면 균열의 발생수명은 극히 짧고 피로균열의 전파수명에 전수명의 대부분을 차지한다. 따라서

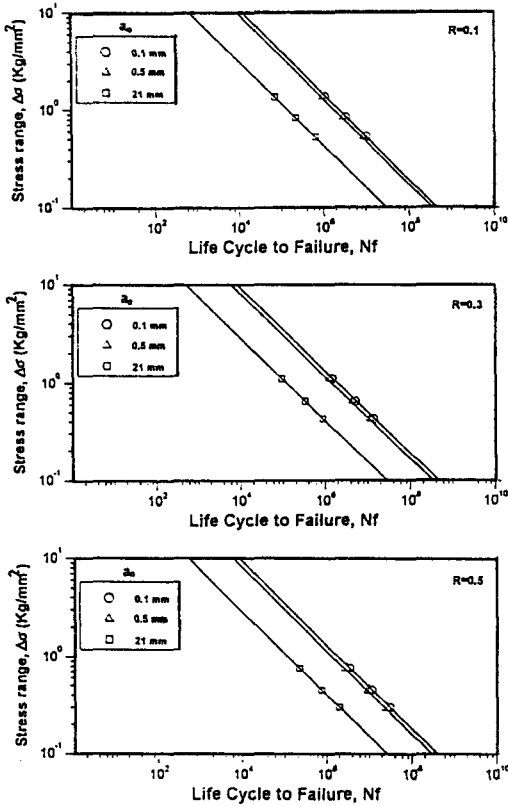


Fig. 8 Stress range vs. fatigue life for base metal

용접결함에 의한 용접 구조물의 최소 허용결함치수를 감지할 수 있고 피로균열의 전파수명을 정확히 예측할 수 있다면, 용접 구조물이 파괴되기 전에 보수 또는 다른 구조물로 대체할 수 있을 것이다.

4. 결 론

SUS 321의 모재와 전자비임 용접부에 대해 피로균열진전 거동을 실험 분석하여 피로수명을 추정 한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 각 재료는 응력비 R이 증가함에 따라 피로균열진전속도는 증가하며, 균열진전속도 변화율은 감소한다. 특히 느린 균열진전속도의 영역에서 R의 영향이 크다.
- 2) 용접재가 모재보다 용접부경화, 용접결함 및 잔류응력 등에 기인하여 균열진전속도가 더 빠

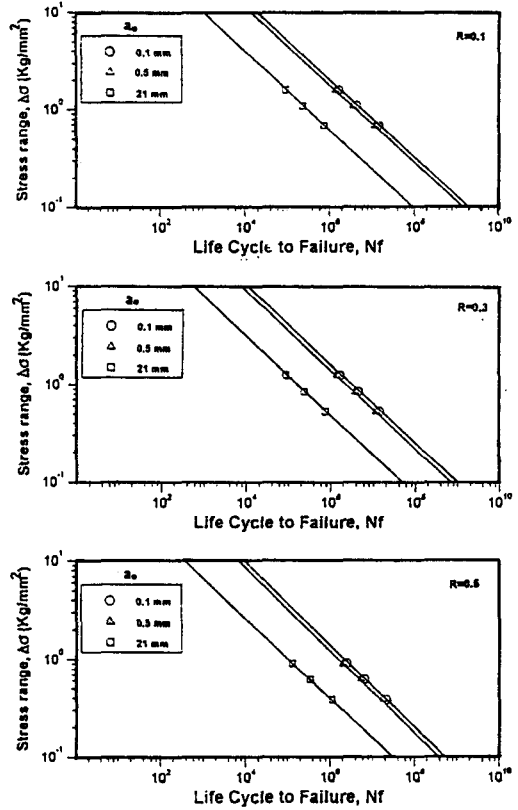


Fig. 9 Stress range vs. fatigue life for parallel weld metal

르게 나타나며 용접 비이드에 직교하는 피로균열은 압축 및 인장 잔류응력의 영향으로 초기 모재보다 작은 진전속도를 보이나 용접부를 통과 하면서 크게 나타난다.

- 3) 균열단합으로 구한 ΔK_{eff} 로 정리하면 균열진전속도는 응력비에 관계없이 비교적 잘 정리된다.
- 4) 균열단합을 이용한 피로수명이 Paris식에 의한 방법보다 더 정확하게 예측할 수 있다. 또한 오차를 줄이기 위해서는 균열단합점에 대한 보다 정확한 평가가 요구된다.

참 고 문 헌

- 1) J.M. Bloom : "An Analytical Assessment of the Effect of residual Stress and Fracture

- Properties on Service Performance of Various Weld Repair Processes”, *Journal of Pressure Vessel technology*, Vol. 103, pp. 373~379, 1981.
- 2) G. Glinka : “Effect of Residual Stresses on Fatigue Crack Growth in Steel Weldment under Constant and Variable Amplitude Loads”, *ASTM STP 677*, pp. 198~214, 1978.
 - 3) B. M. Kapadia : “Influenc of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds”, *ASTM STP 648*, pp. 244~260, 1978.
 - 4) D. V. Nelson : “Review of Fatigue Crack Growth Prediction Method”, *Experimental Mechanics*, Vol. 17, No. 2, pp. 41~49, 1977.
 - 5) P. C. Paris and F. Erdogan : “A Critical Analysis of Crack Propagation Laws”, *Journal of Basic Engineering*, *Trasaction of the ASME*, Series D, pp. 528~534, 1963.
 - 6) B. J. Heath, et al. : “Fracture Mechanics Life Prediction System Using Crack Closure Methodology”, *AIAA/SAE/ASME/ASEE 23rd Joint Propulsion Conference*, pp. 1~6, 1987.
 - 7) W. Elber : “The Significance of Fatigue Crack Closure”, *ASTM STP 486*, pp. 230~242, 1971.
 - 8) Y. Tanaka and I. Soya : “Fracture Mechnics Model of Fatigue Crack Closure in Steel”, *ASTM 1020*, pp. 514~529, 1989.
 - 9) ASTM E647-91 : “Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates”, pp. 674~701, 1991.
 - 10) D. F. Mowbray : “Derivation of a Low-cycle Fatigue Relationship Employing the J-integral Approach to Crack Growth”, *ASTM STP 601*, pp. 36~46, 1976.
 - 11) 綜合技術資料集：金屬の割れ破壊その解析と防止対策，經營開發サツタ-出版部，pp. 732~741, 1980.