

다층용접배관 용접부에서 균열단합현상을 고려한 피로균열성장특성 평가

김철한[†] · 조선영^{*} · 배동호^{**}

(2000년 7월 6일 접수, 2001년 3월 31일 심사완료)

Evaluation of Fatigue Crack Growth Characteristics Considering Crack Closure Phenomenon in Weldment of Multi-Pass Welded Pipe

Cheol-Han Kim · Sun-Young Cho and Dong-Ho Bae

Key Word: Welding Residual Stress(용접잔류응력), Crack Closure(균열단합), Crack Opening Point(균열열림점), Stress Intensity Factor by Welding Residual Stress(용접잔류응력 확대계수), Effective Stress Intensity Factor Range(유효응력확대계수폭), K_{op} (균열열림응력확대계수)

Abstract

To obtain representative fatigue crack growth characteristic curve in residual stress field, fatigue crack growth test was carried out at various stress ratio and fatigue crack growth characteristic curve was represented using crack closure concept. Obtained results are as follows; K_{op}/K_{max} was independent of K_{max} when R was lower than 0.5 and crack closure phenomenon was not observed when R is higher than 0.5. therefore neglecting crack closure behaviour, actual fatigue crack growth rate can be underestimated. Thus, considering crack closure phenomenon, fatigue crack growth characteristics curve of A106 Gr B Steel weldment can be effectively estimated.

1. 서 론

용접은 높은 생산성, 우수한 경제성 등에 힘입어 산업설비 또는 구조물의 제작수단으로 널리 이용되고 있다. 그러나, 용접부에서는 각종 용접 결함과 기하학적인 형상에 의한 응력집중부(stress concentration zone)가 발생할 뿐만 아니라, 용접입열(heat input)과 용접부재의 구속으로 인해 심한 경우 부재의 항복강도(yield strength) 이상의 용접 잔류응력(welding residual stress)이 발생하게 된다.⁽¹⁾ 이러한 응력집중 또는 용접잔류응력이 외부의 피로하중(fatigue load)과 중첩될 경우에는 용접

부의 피로강도가 현저하게 저하됨으로써 구조물 파손의 주된 원인이 되기 때문에, 용접구조물의 안전설계나 신뢰성 평가를 위한 용접부의 피로균열진전 해석에는 보다 세심한 주의가 필요하다.

잔류응력장 내에서의 피로균열성장특성 해석에는 선형탄성파괴역학(LEFM)이 널리 이용되고 있으며, B.M. Kapadia,⁽²⁾ X.R. Wu⁽³⁾ Y.W. Shi⁽⁴⁾ 등과 같은 많은 연구자들에 의해 피로균열 진전거동에 미치는 잔류응력의 영향이 실험적, 해석적 방법으로 연구되었다. 이러한 연구들은 피로균열진전에 미치는 잔류응력의 영향이 궁극적으로 응력비의 변화가 피로균열진전에 미치는 영향과 같다는 관점에서 수행되었다. 그리고, W. Elber에 의해 균열단합 현상을 고려한 유효응력확대계수폭(effective stress intensity factor range, ΔK_{eff})이 제안된 이후에 잔류응력장에서의 피로균열진전거동을 균열단합현상을 이용해 해석하고자 하는 연

[†] 책임저자, 회원, 성균관대학교 대학원
E-mail : kch@nature.skku.ac.kr
TEL : (031)290-7479 FAX : (031)295-1937
^{*} 성균관대학교 대학원
^{**} 성균관대학교 기계공학부

구가 활발히 진행되었다. 이는 균열단합현상을 고려한 응력비 변화에 따른 피로균열진전 특성곡선의 분산폭을 효과적으로 줄여 응력비 변화에 무관한 대표적 특성곡선을 얻을 수 있었기 때문이었다. 따라서, 본 연구에서는 공기중 피로균열진전시험을 통하여 얻은 피로균열성장특성곡선을 균열단합현상을 고려하여 재정리하고 균열단합현상을 고려하지 않았을 때와 비교, 검토하였다.

2. 시험편

시험편 재질은 각종 플랜트의 배관재료써 널리 이용되고 있는 A106 Gr B강으로서 화학성분과 기계적 성질은 Tables 1, 2와 같다. 용접부 개선은 컴파운드 베벨(compound bevel)의 형태로 NC선반을 이용하여 정밀가공 하였다.

Table 1 Chemical composition of A106 Gr B

C	Mn	Si	P	S	Ni	Cr+Mo	Ni+Cu
0.10	0.86	0.21	0.01	0.004	0.10	0.06	0.39

Table 2 Mechanical properties of A106 Gr B

Y.S.	T.S
367MPa	486MPa

Table 3 Welding conditions and process

	GTAW+FCAW	
	GTAW	FCAW
Gas (%)	Ar 99.99	Ar 99.99
Flow rate (ℓ/min)	15~20	15~20
Filler metal	ER70S-G	E7016
Current(A)	100~120	190~210
Volts Range(V)	12~13	30~32
Travel speed(cm/min)	8~10	25~30
PWHT	N/A	

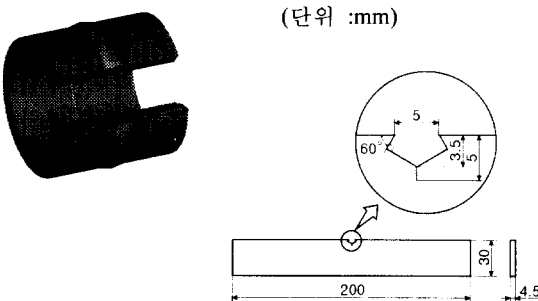


Fig. 1 Configuration and position of specimen

그리고, 1번째 패스는 GTAW(gas tungsten arc welding)로 용접하고, 2번째 패스부터는 FCAW (flux cored arc welding)를 이용하여 Table 3과 같은 조건에서 반자동으로 총 24패스의 용접을 하였다. 용접시 후속패스가 시작되기 전 용접부의 온도는 200℃정도가 되도록 하였다. 이 때 온도의 측정은 온도측정용 초크를 사용하였다. 배관의 치수는 두께 30mm, 외경 254mm이다. 시험편 제작을 위해 먼저 용접배관을 톱기계를 이용하여 용접선에 직각방향으로 절단한 후, 두께가 5.5mm가 되도록 밀링머신(milling machine)을 이용하여 평면질삭 하였으며, 특히, 양쪽면을 0.5mm씩 정밀연삭하여 다듬질하였다. 시험편 가공의 전과정은 기계가공에 의한 잔류응력의 이완을 최대한 억제하기 위하여 습식으로 진행하였다. 예균열을 위한 노치(notch)는 지름 0.2mm 와이어(wire)를 이용하여 Fig. 1의 형상으로 방전가공하였으며, 노치의 위치는 용접부 내표면의 루트(root)부이다. 이 부분은 일반적으로 높은 인장잔류응력분포를 나타내는 부분으로서, 실배관에 있어서는 균열의 시작점으로 추정되는 곳이다.

3. 실험장치 및 실험방법

피로시험장치는 서보 유압식 피로시험기(10ton, MTS 810)를 사용하였다. 부하형태는 25Hz의 일정진폭 정현파(sine wave)로 하였으며, 실험시 인가하중의 최대값은 $P_{max} = 7840N$ 이다. 또한, 하중비의 변화에 따른 피로균열진전 특성 및 균열단합거동을 파악하기 위하여 응력비(R)를 0.1, 0.3, 0.5로 변화시켜가며 피로실험을 수행하였다. 예균열의 길이는 2mm로 하였으며, 균열길이의 측정간격은 0.2mm이내가 되도록 하였다. 이상의 실험방법으로부터 획득된 피로데이터를 이용하여, 피로균열성장특성을 파괴역학적으로 해석하였으며, 응력확대계수의 계산은 식 (1)⁽⁵⁾을 따랐다.

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} \left[1.12 - 0.231 \left(\frac{a}{W} \right) + 10.55 \left(\frac{a}{W} \right)^2 - 21.72 \left(\frac{a}{W} \right)^3 + 30.39 \left(\frac{a}{W} \right)^4 \right] \quad (1)$$

그리고, 균열단합거동을 파악하기 위한 균열열림점(crack opening point)은 식 (2)의 개구변위 V 와 하중 P 와의 상관관계로부터 ΔV (offset displace-

ment)를 구함으로써 결정하였다.

$$\Delta V = g(V - CP) \tag{2}$$

여기에서, C 는 컴플라이언스(compliance)이며, g 는 게인(gain)을 나타낸다. 즉, Fig. 2에서 보는 바와 같이 측정된 V 와 P 가 $V = CP$ 일 때는 $\Delta V = 0$ 으로 일정한 값을 가지지만, $V \neq CP$ 일 때는 ΔV 는 0이 아닌 값을 갖게 되어 $P-\Delta V$ 관계에서 곡선부를 형성하게 된다. 그러므로 $P-\Delta V$ 선도상에서 직선부와 곡선부가 만나는 지점을 균열열림점으로 결정하였다.⁽⁶⁾ ΔV 를 구하기 위한 컴플라이언스값은 측정범위 2mm의 정밀 COD계이지를 부착하고, A/D변환기(16bit, 100 kHz)를 이용하여 시험기에서 나오는 하중값과 COD값을 300Hz의 속도로 컴퓨터에 입력하였다.

그리고, 획득된 데이터는 상용 프로그램인 visual C++로 개발된 전용프로그램을 이용하여 회귀분석함으로써 데이터의 신뢰성을 높였다. 그리고, 균열길이의 측정은 50배율의 이동식 광학 현미경을 이용하여 측정하였다.

4. 실험결과

용접부의 잔류응력은 반복하중과 중첩될 경우 σ_{max} 와 σ_{min} 에 각각 중첩되어 응력비를 변화시

키는 원인이 되므로, 피로균열성장특성에 직접적으로 영향을 미친다. 따라서, 본 연구에서는 실제 용접된 배관으로부터 시험편을 채취하고 기계가 공하는 과정에서 용접잔류응력이 상당량 이완되었을 것으로 보고, 시험편 제작후에 남아있는 잔류응력장내에서 피로균열성장거동과 잔류응력의 영향을 평가하는 것이 타당하다고 판단되어, 시험편 가공후의 잔류응력분포를 해석적인 방법과 실험적인 방법을 통하여 평가하였다. 먼저, Fig. 3의 FEA 결과와 Fig. 4의 실험결과를 보면 전체적인 잔류응력분포형태는 용접직후에 나타나는 잔류응력분포와 유사하지만, 용접직후의 용접잔류응력의 최고치가 300MPa 정도였음을 감안한다면

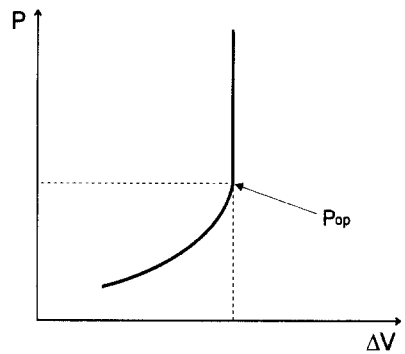


Fig. 2 Determination of crack opening point

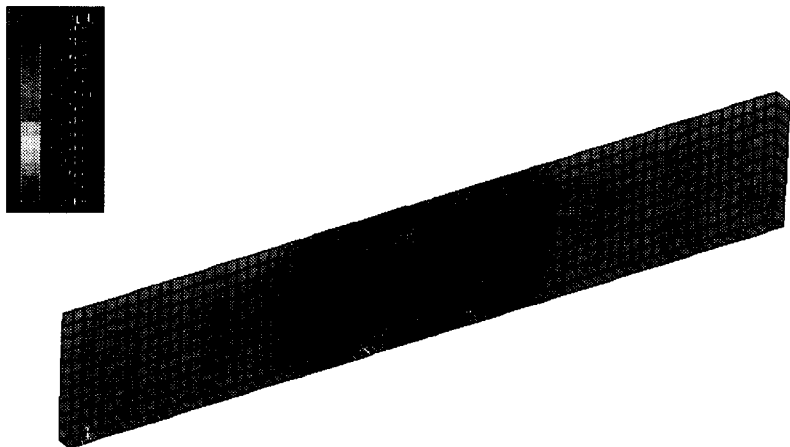


Fig. 3 Residual stress distribution of specimen

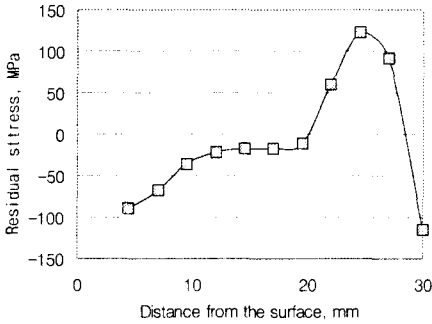


Fig. 4 Axial residual stress in the center of specimen

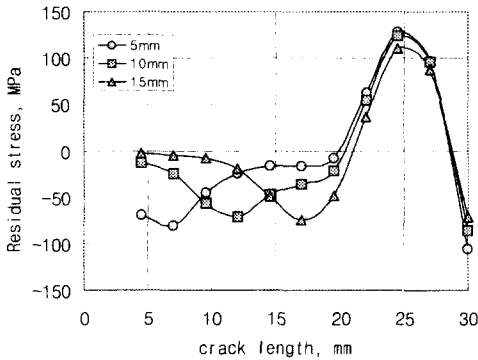


Fig. 5 Residual stress variation according to crack propagation

정량적으로는 상당히 작은 값을 알 수 있다.⁽⁷⁾ 이는 시험편 채취시 절단에 의해 원주방향 구속이 제거되었기 때문이다. 하지만 FEA에는 기계가 공에 의한 잔류응력의 이완은 고려되어 있지 않기 때문에, 본 연구에서는 정확한 잔류응력의 분포를 확인하기 위해 파단법을 이용해 실험적으로 잔류응력을 측정하였다. 실험에 사용된 계이지는 측정부가 1mm인 M&M사의 정밀계이지를 사용하였다. Fig. 4는 측정된 축방향 잔류응력을 도시한 것이다. 또한, Fig. 5의 균열진전에 따른 균열전방에서의 잔류응력 변화를 보면, 균열이 진전하여도 균열 바로 전방에는 일정한 크기의 압축잔류응력장이 유지되고 있는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 연구에서 대상으로 한 용접부 잔류응력장 내에서의 피로균열진전은 압축잔류응력장에서 진행된다고 볼 수 있다.

Fig. 6은 하중비가 0.1, 0.3, 0.5인 경우에 각각

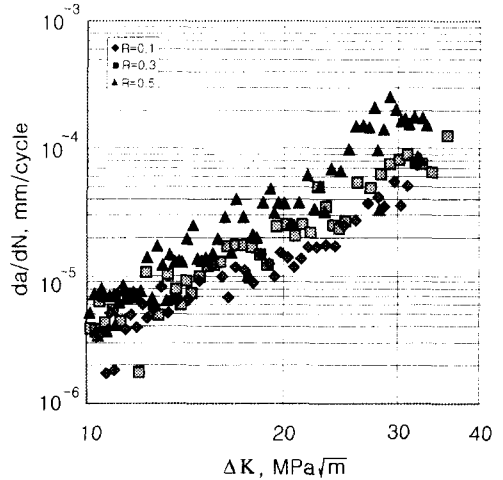


Fig. 6 Relationship between da/dN and ΔK

의 실험하중에 대한 응력확대계수폭(ΔK)과 균열성장속도(da/dN)와의 관계를 나타낸 것이다.

일반적으로 피로균열성장특성에 있어서 하중비가 증가하면, Paris' law의 피로균열성장속도 관계측에서 C 값이 증가되어 균열성장속도가 가속되는 것으로 알려져 있다.⁽⁸⁾ 본 연구에서도 하중비가 증가함에 따라 균열진전속도가 가속되는 일반적인 경향을 나타내고 있다.

5. 균열단합현상을 고려한 피로균열 성장특성 평가

5.1 K_{op} 에 미치는 K_{max} 의 영향

Fig. 7은 각 하중비에 대한 K_{op} , K_{min} 과 K_{max} 와의 관계를 나타낸 것이고, Fig. 8은 K_{op}/K_{max} 과 K_{max} 의 관계를 나타낸 것이다. 일반적으로 K_{op} 에 미치는 K_{max} 의 영향에 관한 현재까지의 연구결과들을 살펴보면 크게 3가지로 분류된다. 첫 번째는 K_{op}/K_{max} 이 K_{max} 에 관계없이 거의 일정한 값을 가진다는 것과,^(9,10) 두 번째는 K_{op} 값은 K_{max} 에 독립적이라는 것,⁽¹¹⁾ 마지막으로 K_{op}/K_{max} 이 K_{max} 가 증가함에 따라 단계적으로 감소한다는 결과들이 있다.⁽¹²⁾ 이처럼

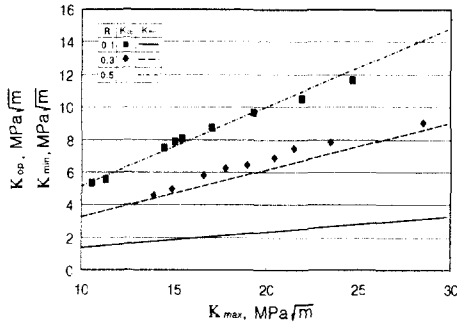


Fig. 7 Relationship between K_{op} and K_{max}

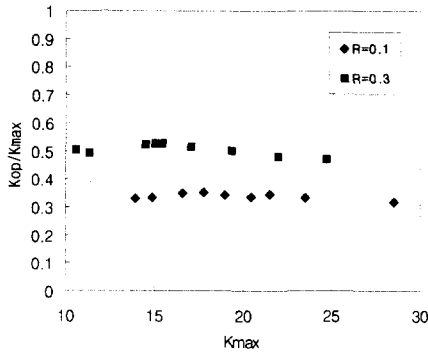


Fig. 8 Relationship between K_{op}/K_{max} and K_{max}

K_{op} 에 미치는 K_{max} 의 영향이 다양한 형태로 나타나는 것은 균열단합을 일으키는 기구가 다양하고, 실험하중의 부하형태 등과 같은 실험절차상의 영향 또한 무시할 수 없기 때문이라고 알려져 있다.

본 연구에서는 Figs. 7, 8에서 보는 바와 같이 균열단합현상이 관찰되는 $R=0.1, 0.3$ 인 경우에 K_{op} 이 K_{max} 의 커짐에 따라 증가하며, 이 때 K_{op}/K_{max} 은 K_{max} 에 거의 독립적인 첫 번째 경우와 같은 경향을 보여 주고 있다. 일반적으로 압축잔류응력장에서 피로균열이 진전할 때에는 균열열림점을 상승시키는 역할을 하며, 균열이 진전함에 따라 그 영향이 감소하는 것으로 보고 되어 있다.⁽¹³⁾ 따라서, Figs. 7, 8과 같은 경향은 압축잔류응력의 영향보다는 소성유기균열단합이론(plasticity induced crack closure)으로 설명하는 것이 효과적이라 생각된다. 즉, 일정하중 피로균열 진전시험의 경우 균열이 진전함에 따라 K_{max} 값

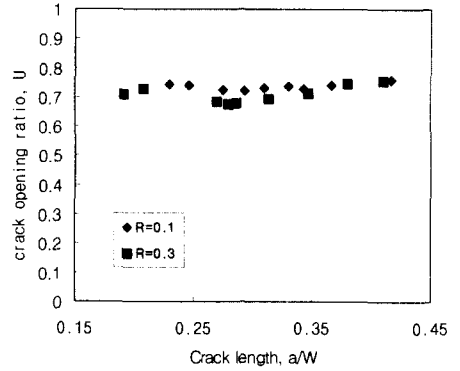


Fig. 9 Relationship between U and a/W

은 증가하며, 이와 함께 균열선단의 잔류소성변형(residual plastic strain)도 커지게 된다. 그러므로 하중감소시 균열선단의 압축응력이 작용하는 영역이 넓어지기 때문에 균열을 여는데 필요한 최소하중의 크기가 점차 증가하게 된다.

한편, $R=0.5$ 인 경우에는 균열단합현상이 관찰되지 않았다. 그 이유는 실험하중의 최소값에 의한 균열선단의 인장응력이 균열선단에 형성된 압축잔류응력의 값보다 크기 때문이다.

5.2 K_{op} 에 미치는 하중비(R)의 영향

유효응력확대계수폭과 일반적인 응력확대계수폭과의 비를 나타내는 균열열림비($U = \Delta K_{eff} / \Delta K$)와 하중비와의 관계에 대하여는 W. Elber에 의해 식 (3)과 같은 형태로 처음 제안되었다.

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = a + b \cdot R \quad (3)$$

여기서, a 와 b 는 실험상수이며, 알루미늄의 경우 $a=0.5, b=0.4$ 의 값을 제안하였다.

U 와 R 의 관계에 있어서 균열단합 현상이 발생하지 않을 경우에는 $\Delta K_{eff} = \Delta K$ 임으로 $U=1$ 의 값을 가지게 되나, 균열단합 현상이 일어날 경우에는 ΔK_{eff} 가 ΔK 보다 작게 되어 $U < 1$ 의 값을 가지게 된다.

따라서, 본 연구에서도 각 하중비에 대한 균열 길이와 균열열림비의 관계를 나타낸 Fig. 9에서 하중비가 0.3인 경우가 0.1인 경우에 비해 약간

높은 U값을 나타내었다. 이 결과와 Fig. 8의 결과로부터 정량적인 관계를 살펴보면, 하중비가 0.1일 때는 K_{op}/K_{max} 는 0.339이었으며, 하중비가 0.3일 경우에는 K_{op}/K_{max} 가 0.504로 나타났다. 그리고, 동일 하중비에 대해 Fig. 9에서는 균열길이 증가함에도 불구하고 U값이 거의 일정한 경향을 보여주고 있다. 그 이유는 균열이 성장함에 따라 K_{max} 값이 증가하지만 Fig. 7에서 나타난 것과 같이 K_{op} 값도 함께 상승하기 때문이다. 또한, 식 (3)에 식 (4)를 대입하면 식 (7)을 얻게 된다.

$$K_{min} = R \cdot K_{max} \quad (4)$$

$$\frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - R \cdot K_{max}} = a + b \cdot R \quad (5)$$

$$\frac{1 - \frac{K_{op}}{K_{max}}}{1 - R} = a + b \cdot R \quad (6)$$

$$\frac{K_{op}}{K_{max}} = (1 - a) + (a - b) \cdot R + b \cdot R^2 \quad (7)$$

본 연구에서는 이 식에 Fig. 8의 결과를 대입하여, $a=0.747$, $b=-0.129$ 를 얻을 수 있었고, 따라서, 본 연구에서와 같은 실험조건에서 A106 Gr B강의 용접부에 대한 식 (8)은 다음과 같이 정리될 수 있었다.

$$\frac{K_{op}}{K_{max}} = -0.129R^2 + 0.876R + 0.253 \quad (8)$$

5.3 균열단힘현상을 고려한 피로균열성장특성

잔류응력장에서의 피로균열진전에 있어서 잔류응력은 식 (9)~식 (11)과 같이 K_{max} , K_{min} , 하중비를 변화시키게 된다.

$$(K_{max})_{res} = K_{max} + K_{res} \quad (9)$$

$$(K_{min})_{res} = K_{min} + K_{res} \quad (10)$$

$$R_{eff} = \frac{K_{min} + K_{res}}{K_{max} + K_{res}} \quad (11)$$

그러나, $(K_{max})_{res} - (K_{min})_{res} = K_{max} - K_{min}$

이 되므로 응력확대계수폭(ΔK)에는 영향을 주지 못한다. 그러므로, 잔류응력이 피로균열진전특성에 미치는 영향은 응력비 변화가 피로균열진전특성에 미치는 영향과 같다고 할 수 있다. 여러 연구자들에 의해 식 (12)와 같은 유효응력확대계수폭(ΔK_{eff})을 사용하면, 응력비에 영향이 고려된 균열성장특성곡선을 얻을 수 있음이 보고되었다.^(14,15)

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= (K_{max} + K_{res}) - (K_{op} + K_{res}) \\ &= K_{max} - K_{op} \end{aligned} \quad (12)$$

따라서, 본 연구에서는 잔류응력을 고려한 피로균열성장 특성곡선을 얻기 위하여 ΔK_{eff} 를 사용하여 Fig. 6의 균열성장특성곡선을 재정리했을 때, Fig. 10과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 11은 Fig. 6과 Fig. 10의 결과를 비교·도시한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 균열단힘을 고려하지 않았을 때의 분산폭(A)에 비하여 균열단힘현상을 고려했을 때의 분산폭(B)이 약 40% 정도 감소하였다. 이러한 경향을 보이는 것은 하중비가 0.1, 0.3인 경우에는 $K_{min} < K_{op}$ 이기 때문에 $(K_{op} - K_{min})$ 만큼 선도가 왼쪽으로 이동했기 때문이다.

Fig. 11의 결과에서 보는 바와 같이 균열단힘현상을 고려함으로써, 하중비 0.1, 0.3의 데이터가 균열단힘현상이 관찰되지 않는 하중비 0.5의 분

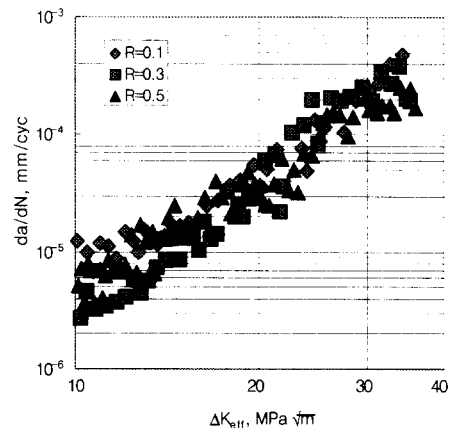


Fig. 10 Relationship between da/dN and ΔK_{eff}

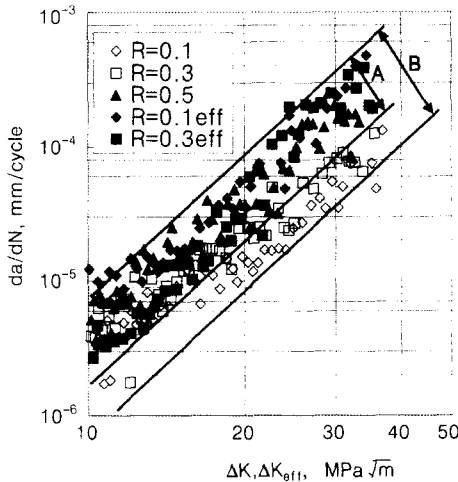


Fig. 11 Comparison of $da/dN - \Delta K$ and $da/dN - \Delta K_{eff}$

산폭 안으로 흡수되는 것을 알 수 있다. 즉, 균열 단합현상을 고려하면 A106 Gr B강 용접부에서 잔류응력에 의한 응력비의 변화에 영향을 받지 않는 균열성장특성곡선을 얻을 수 있음을 의미한다.

6. 결론

잔류응력장에서의 피로균열성장특성을 평가하기 위해 다양한 응력비에서 피로균열성장시험을 수행하고, 균열단합현상을 이용해 그 결과를 재정리함으로써, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 응력비가 0.1, 0.3인 경우에 K_{op} 은 K_{max} 의 증가와 함께 증가하였으며, 응력비가 0.5인 경우에는 균열단합현상이 관찰되지 않았다.
- (2) 응력비가 0.1, 0.3인 경우에 균열열림비는 약 0.7 정도의 일정한 값을 가졌다.
- (3) 균열단합현상을 고려한 유효응력확대계수를 사용하여 균열성장특성곡선을 재정리한 결과, 응력비와 무관한 피로균열성장특성곡선을 얻을 수 있었다.

후 기

본 연구는 한국과학기술연구원 성균관대학교 산업설비 안전성 평가 센터의 지원 하에 이루어진

것으로, 관계자 여러분께 심심한 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) Masubuchi K., 1980, "Analysis of Welded Structure," Pergamon Press, pp. 148~188.
- (2) Kapadia B. M., 1982, "Influence of Residual Stresses on Fatigue Crack Propagation in Electroslag Welds," ASTM STP 648, pp. 244~260.
- (3) Wu X. R., 1984, "The Effect of Welding Residual Stress on Brittle Fracture of Plate with Surface Cracks," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 19, No. 3, pp. 427~439.
- (4) Shi Y. W., 1990, "Effect of Welding Residual Stresses on Fatigue Crack Growth Behaviour in Butt Welds of a Pipeline Steel," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 36, No. 6, pp. 893~902.
- (5) Murakami Y., 1987, "Stress Intensity Factors Handbook," Pergamon Press, pp. 9~10.
- (6) Banerjee E., 1984, "A Review of Crack Closure," AFWAL-TF-B4-4031, University of Dayton, pp. 15~47.
- (7) Kim C. H., Bae D. H., Cho S. Y. and Kim B. K., 2000, "Welding Residual Stress Analysis and Fatigue Crack Growth Characteristics of Multi-pass Welded Pipe Weldment," *The 4th International Conference on Fracture & Strength of Solids*, pp. 1345~1355.
- (8) 1993, *Mechanical Behavior of Materials*, Prentice-Hall International, pp. 456~464.
- (9) Elber W., 1971, "The Significance of Fatigue Crack Closure," ASTM STP 486, pp. 230~242.
- (10) Katcher M., Kaplan M., 1974, "Effect of R-Factor Crack Closure on Fatigue Crack Growth for Aluminum and Titanium Alloy," ASTM STP 559, pp. 264~282.
- (11) Masuba J. K., Radon J. C., 1981, "Fatigue Crack Growth at Low Stress Intensities," *Proceedings of Fatigue 81*, pp. 106~116.
- (12) Sunder R., Dash P. K., 1983, "Measurement of Fatigue Crack Closure Through Electron

- Microscopy," *International Journal of Fatigue*, pp. 97~105.
- (13) Bucci R. J., Yu W., 1989, "Fatigue Crack Propagation in ARALL Laminates Measurements of the Effect of Crack-Tip Shielding from Crack Bridging," *Engineering Fracture Mechanics Elmsfor*, NY, Pergamon Press, Inc, Vol. 32, No. 3, pp. 361~377.
- (14) 이용복, 정진성, 조남익, 1996, "SS330 용접재에서 재분포 잔류응력 및 균열단립영향을 고려한 피로거동에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), Vol. 20, No. 7, pp. 2234~2245.
- (15) Todd J. A., Chen L., Yankov E. Y., Mostovoy S., 1997, "Crack Closure Effects of Fatigue Crack Growth Thresholds and Remaining Life in an HSLA Steel," *JPVT*, pp. 37~44.