

<論 文>

5083-O 알루미늄 합금의 疲勞균열進展 學動과 균열닫힘에 관한 研究†

朴 榮 祖* · 金 楨 圭* · 金 一 鉉**

(1985年 10月 10日 接受)

A Study of Fatigue Crack Growth Behavior and Crack Closure in 5083-O Aluminum Alloy

Young Jo Park, Jung Kyu Kim and Il Hyoun Kim

Key Words: Crack Closure(균열닫힘), Stress Ratio(응력비), Fatigue Crack Growth Rate (피로균열진전속도), Effective Stress Intensity Factor(유효응력확대계수), Maximum Stress Intensity Factor(최대응력확대계수)

Abstract

To establish the evaluation of the fatigue crack growth behavior in 5083-O aluminum alloy, constant load-amplitude fatigue crack growth tests were carried out under the small scale yielding conditions. Crack length and closure of this material were measured by the compliance method using a clip-on gage.

The main results obtained as follows: The fatigue crack growth rate against stress intensity factor range ΔK exhibits the trilinear form with two transitions at the growth rate 5.5×10^{-6} and 5.5×10^{-6} mm/cycle, in the so-called Region II. The trilinear form appears still in the plot of growth rate versus effective stress intensity factor range ΔK_{eff} . Stress ratio R affects the relationship of crack growth rates versus ΔK but does not affect the reation of crack growth rate versus ΔK_{eff} . The experimental results indicate that the effective stress intensity range ratio U depends on the maximum stress intensity factor K_{max} , but not on the stress ratio R .

1. 序 論

反復荷重下에서 疲勞균열進展學動은 균열닫힘現象을

† 大韓機械學會 '85年度 材料 및 破壞部門學術講演會 (3.23)에서 發表

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 機械設計學科

** 正會員, 大林工業專門大學 機械設計學科

고려한 有効應力擴大係數幅 ΔK_{eff} 에 의하여 주로 지배된다⁽¹⁻⁴⁾. 또한 이 균열닫힘 現象은 變動荷重下에서 일어나는 균열進展의 지연 또는 가속현상을 정량적으로 설명할 수 있고⁽²⁾, 小規模降伏條件下에서의 균열進展學動에 중요한 역할⁽¹⁾을 하므로 疲勞균열進展速度評價에 있어서 균열닫힘기구 및 [거동에 관하여 많은 연구가 進行되고 있다⁽¹⁻⁸⁾.

균열닫힘現象이 생기는 원인으로서는, 疲勞균열은 균열선단에 형성한 塑性領域을 뚫고 진전하므로 균열벽에 塑性스트레치(stretch)가 잔류하게 되어 이 결과 균열은 특정한 應力擴大係數 K 값, 즉 K_{op} 까지 열리지 않는 이른바 塑性誘起型(plastic-induced crack closure)⁽²²⁾이 있고 이외에도 酸化물誘起型(oxide-induced crack closure)⁽⁹⁾ 및 破面 거칠기誘起型(roughness-induced crack closure)⁽¹⁰⁾ 등이 알려져 있다. 그러나 균열닫힘 現象에는 이들 因子 以外에 力學的 因子인 應力比 R 및 最大應力擴大係數 K_{max} ⁽¹¹⁾ 등의 영향이 존재하고 있을 뿐만 아니라 材料의 영향도 있음⁽⁴⁾이 보고되고 있다. 한편 균열닫힘현상은 試驗片의 형성, 균열길이 및 부하형식에는 거의 영향을 받지 않는다는 견해⁽⁴⁾도 있어 균열進展舉動에 미치는 균열닫힘에 관한 자료의 축적이 절실히 요구되고 있다.

本 研究에서는 균열 닫힘에 관한 연구의 일환으로 5083-O 알루미늄합금을 사용하고 小規模降伏條件下에서 一定振幅荷重疲勞試驗을 시행하여 이 材料의 疲勞균열 進展速度와 균열닫힘에 관하여 검토하였다.

2. 實驗方法

사용한 재료는 두께가 30mm 인 5083-O 알루미늄합금으로서 340°C에서 1 시간 어닐링 처리된 것이다. 이의 化學的 成分 및 機械的 性質은 Table 1, 2 와 같다.

試驗片의 모양은 Fig. 1 과 같은 CT 시험편이며 이의 채취방향은 균열의 진전방향이 材料의 幅方向인 L-T 方向이다.

疲勞試驗은 MTS 10 톤 油壓 서어브식 試驗機를 사용하여 一定振幅荷重下에서 應力比 $R=0.1, 0.3$ 및 0.5 에 대하여 행하였다. 荷重反復速度는 11Hz 를 채택하고 試驗片이 이력영향을 받지 않도록 낮은 荷重값에서부터 실험을 행하였다. 균열길이 및 균열닫힘의 측정은 클립-언제이지를 이용한 콤플라이언스法⁽²³⁾을 사용하였다. Fig. 2 는 감산용 전기회로⁽²³⁾를 통하여 신크로스코프상에 나타난 균열의 히스테리시스를 촬영하여 나타낸 것으로 균열열림점의 측정은 먼저 균열이 완전히 열린 상태 (a)의 彈性變位成分을 로우드셀出力을 이용하여 조정함으로써 감산하고 균열의 진전에

Table 2 Mechanical properties

Designation	Yield strength	Tensile strength	Elongation
	σ_y (kgf/mm ²)	σ_b (kgf/mm ²)	ϵ (%)
5083-O	15.6	30.8	25.0

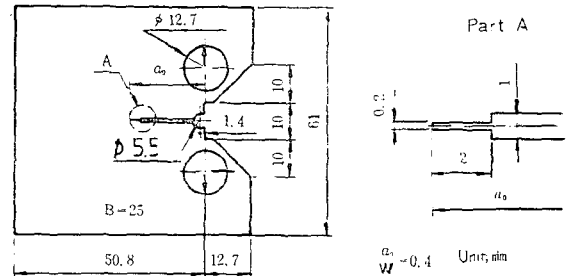


Fig. 1 Test specimen configuration

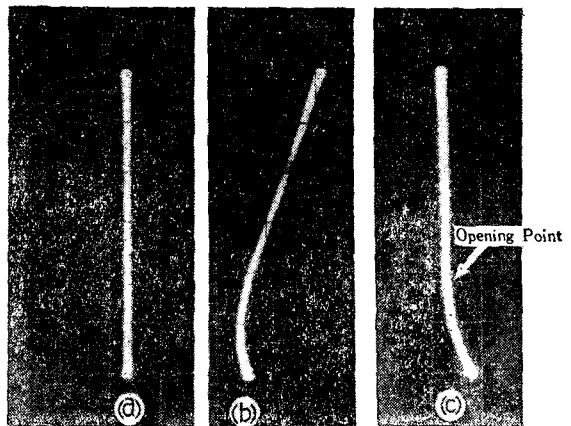


Fig. 2 Example of measurements of crack length and crack closure

따른 히스테리시스 (b)를 이 감산된 變位信號와 荷重信號에 의해 荷重軸에 평행이 되도록 조정 한 후(c), 이 히스테리시스의 곡율이 변화하는 점을 읽었다. 균열進展速度의 천이과정을 파악하기 위한 破面觀察은 走査電子顯微鏡을 사용하였다.

CT 試驗片에 對한 K 값⁽¹²⁾ 및 ΔK_{eff} 의 評價法⁽²⁾은 다음 式과 같다.

$$K = \frac{P(2+\alpha)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2)$$

Table 1 Chemical composition(wt. %)

Designation	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al
5083-O	0.043	0.086	0.22	0.48	4.66	0.011	0.16	0.024	Rest

$$+14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \tag{1}$$

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{1 - K_{op}/K_{max}}{1 - R} \tag{2}$$

- 여기에서 P : 荷重
- B : 試驗片 두께
- W : 試驗片 폭
- α : a/W (a : 균열길이)
- U : 有効應力擴大係數幅比
- K_{max}, K_{min} : 最大 및 最小應力擴大係數
- K_{op} : 균열열립점의 應力擴大係數
- R : 應力比

3. 實驗結果 및 檢討

3.1 第Ⅱ段階 領域에서의 疲勞균열進展舉動

Fig. 3은 應力擴大係數幅 ΔK 와 疲勞균열進展速度 da/dN 과의 관계를 표시한 것이다. 낮은 進展速度領域일수록 應力比 R 의 영향이 크게 나타나고 있음을 알 수 있다. 또한 da/dN 은 R 값의 變化에 관계없이 모두 3段階의 균열進展速度領域으로 나누어지고 있다. 즉 $da/dN \approx 5.5 \times 10^{-6}$ mm/cycle 부근까지(第Ⅱ_a領域이라고 함)는 ΔK 에 대하여 완전한 균열進展速度를 나타내지만 이 부근에서부터 進展速度는 加速되어(第Ⅱ_{ab}領域) $da/dN \approx 5.5 \times 10^{-5}$ mm/cycle 부근에서 다시 완만하게(第Ⅱ_b領域) 진전함을 알 수 있다. 각각의 領域에 對하여 da/dN 와 ΔK 와의 관계식을 구하여 보면 Table 3과 같다. 이 表에서 第Ⅱ_a領域 및 第Ⅱ_{ab}領域에서는 기울기 m 값이 약 3~4의 일반적인 재료상

Table 3 $da/dN = C(\Delta K)^m$

da/dN (mm/cycle)	Stress ratio	C	m
Region II _a $da/dN \leq 5.5 \times 10^{-6}$	0.1	3.14×10^{-11}	4.01
	0.3	1.61×10^{-10}	3.56
	0.5	2.16×10^{-9}	2.80
Region II _{ab} $5.5 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.5 \times 10^{-5}$	0.1	2.66×10^{-26}	15.65
	0.3	2.77×10^{-23}	13.74
	0.5	5.66×10^{-20}	11.66
Region II _b $da/dN \geq 5.5 \times 10^{-5}$	0.1	1.67×10^{-10}	4.08
	0.3	6.61×10^{-9}	3.00
	0.5	6.87×10^{-9}	3.04

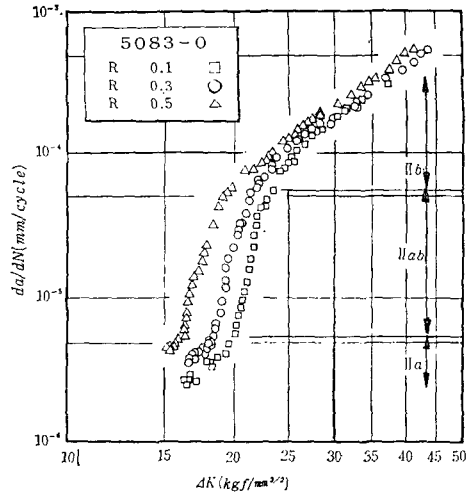


Fig. 3 Fatigue crack growth rates as a function of ΔK

수의 값이나 第Ⅱ_{ab}領域에서는 m 값이 약 12~16의 아주 높은 값으로 특이한 현상임을 보여주고, 또한 각 領域에서의 m 값은 應力比 R 이 낮을수록 높아지는 경향이 있음을 알 수 있다. Fig. 4는 Fig. 3의 da/dN 과 균열단합을 고려한 有効應力擴大係數幅 ΔK_{eff} 와의 관계를 나타낸 것이다. 균열進展速度는 ΔK_{eff} 에 의하여 하나의 곡선으로 표시되어 da/dN 에 미치는 R 의 영향이 없음을 보여준다. 또한 da/dN 은 Fig. 3의 결과와 마찬가지로 5.5×10^{-6} mm/cycle 및 5.5×10^{-5} mm/cycle 부근의 進展速度領域에서 변화하는 거동을 나타내고 있다. 각각의 균열진전속도 영역에 대하여 da/dN 과 ΔK_{eff} 와의 관계식을 구한 결과는 Table 4와 같다.

疲勞균열進展速度 da/dN 와 應力擴大係數幅 ΔK 와의 관계에서 (Table 3), 균열進展의 가속화의 정도를 나타내는 m 값은 第Ⅱ_{ab}領域에서 가장 크고 또한 應力비가 낮을수록 높아지는 경향을 보였지만 da/dN 에 균열단합을 고려 하므로써 (Table 4) 第Ⅱ_a 및 第Ⅱ_{ab}領域

Table 4 $da/dN = C'(\Delta K_{eff})^{m'}$

da/dN (mm/cycle)	Stress ratio	C'	m'
Region II _a $da/dN \leq 5.5 \times 10^{-6}$	0.1, 0.3, 0.5	6.02×10^{-8}	1.76
Region II _{ab} $5.5 \times 10^{-6} \leq da/dN \leq 5.5 \times 10^{-5}$	0.1, 0.3, 0.5	1.37×10^{-13}	7.02
Region II _b $da/dN \geq 5.5 \times 10^{-5}$	0.1, 0.3, 0.5	3.67×10^{-8}	2.63

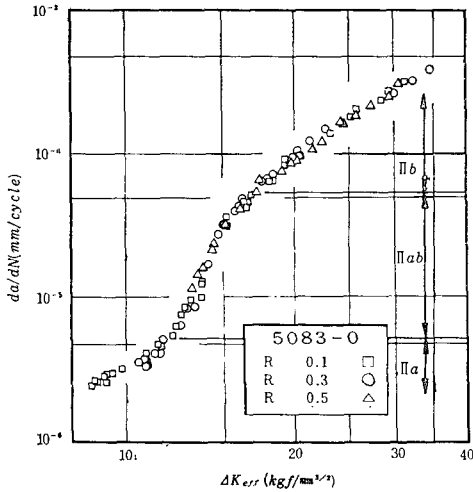


Fig. 4 Fatigue crack growth rate as a function of ΔK_{eff}

에서의 m' 값은 현저히 저하한 값을 나타내고 있다. 이상의 관계식 (Table 3 및 4) 으로부터 應力比가 낮은 수목 그리고 낮은 균열進展速度영역일수록 균열단합현상이 크다고 생각된다. Fig. 5는 有效應力擴大係數幅比 U 와 ΔK 및 R 과의 관계를 나타낸 것이다. 이 그림에서 나타난 바와 같이 낮은 ΔK 영역일수록 그리고 R 값이 저하할수록 균열단합 現象이 뚜렷함을 알 수 있다. 그러므로 위에서 설명한 결과는 균열단합에 의한 영향이라고 할 수 있다.

한편 Fig. 3 및 Fig. 4에서 第II段階 疲勞균열進展速度의 領域임에도 불구하고 m 값 및 m' 값이 변화하여 직선이 꺾이는 현상은 일반적인 것은 아니지만, 최근 2017-T3 알루미늄합금⁽³⁾, 7075-T6 알루미늄합금⁽¹³⁾ 및 Ti-6Al-4V 合金材⁽¹⁴⁾에서도 관찰되고 있다. 이러

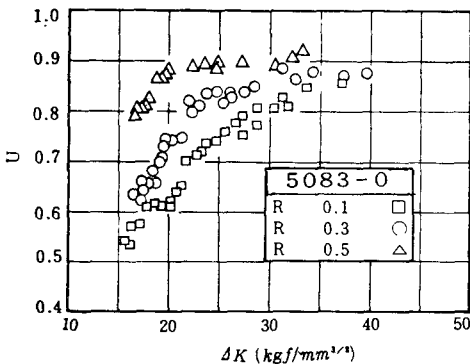


Fig. 5 Closure behavior of fatigue crack as a function of ΔK

한 현상의 원인으로서는 應力狀態의 變化⁽¹³⁾ 및 塑性 領域의 크기 r_p 와 微視組織의 크기와의 관계⁽¹⁴⁾로서 설명되고 있다. 또한 中央균열試驗片을 이용한 5083-O 알루미늄합금의 實驗結果⁽¹⁵⁾에서도 疲勞균열進展速度에 차이가 생기고 이러한 舉動이 생기는 원인을 微視破壞機構를 통하여 검토한 결과 第II_a領域에서 第II_{ab}領域으로의 천이는 周期塑性領域의 크기 r_p 가 平均結晶粒徑의 크기 d 와 거의 같은 단계에서 일어나고, 第II_a領域에서 第II_b領域으로의 천이는 $r_p \approx 3d$ 에서 일어나며, 또한 각 영역에서의 지배적인 破面樣相은 延性的 破面에서 粒界破面으로, 그리고 스트라이에이션 임을 보고 하고 있다.

그래서 本 研究結果인 da/dN 의 변화도 각 領域에서의 微視破壞機構와 관계가 있을 것으로 생각되어 微視破面에 對하여 검토하였다. Fig. 6은 각 균열進展速度領域에서의 疲勞破面의 一例를 나타낸 것이다. 第II_a領域에서는 명확한 특징이 없는 剪斷型의 延性破面이 많이 존재하고 있고, 균열進展의 加速現象이 가장 현저한 第II_{ab}領域에서는 粒界破面이, 그리고 第II_b領域에서는 스트라이에이션에 의한 破面이 지배적이었다. 이상의 결과로부터 疲勞균열進展速度의 차이현상은 微視破壞機構와 관련이 있다고 할 수 있고, 또한 第II_a 및 第II_{ab}領域에서 균열단합 現象이 현저한 것은 微視組織에 민감한 剪斷型 延性破面 및 粒界破面과 관련이 있다고 생각된다.

3.2 균열단합現象과 K_{max} 와의 관계

균열단합現象의 정도를 나타내는 有效應力擴大係數幅比 U 는 應力比 R ⁽⁶⁾ 및 最大應力擴大係數 K_{max} ⁽⁶⁾의 영향을 받고 있음이 알려지고 있지만 특히 K_{max} 의 영향에 대해서는 상반된 결과가 얻어지고 있다. 즉 U 는 K_{max} 가 증가함에 따라 상승한다는 보고가 있지만^(6,11) Shih 등⁽⁷⁾ 및 Unangst 등⁽⁸⁾은 K_{max} 가 증가함에 따라 U 의 감소현상의 결과를 얻고 있어 U 에 미치는 K_{max} 의 영향에 대해서는 아직도 불충분하여 이에 관한 검토가 필요하다고 생각된다.

Fig. 7은 最大應力擴大係數 K_{max} 의 변화에 따른 有效應力擴大係數幅比 U 의 거동을 보인 것으로 K_{max} 의 증가에 따라 U 값은 전반적으로 상승하지만 다음과 같은 특징을 보여주고 있다. 즉 R 의 크기에 관계없이 U 는 $K_{max} \approx 31 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 부근까지는 급상승하고, 그 이후 $K_{max} \approx 42 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 까지는 다소 기울기가 완만하게 증가한다. 그러나 $42 \text{ kgf/mm}^{3/2} < K_{max} < 69 \text{ kgf/mm}^{3/2}$ 에서는 U 값이 0.88~0.92로 거의 일정한 값을

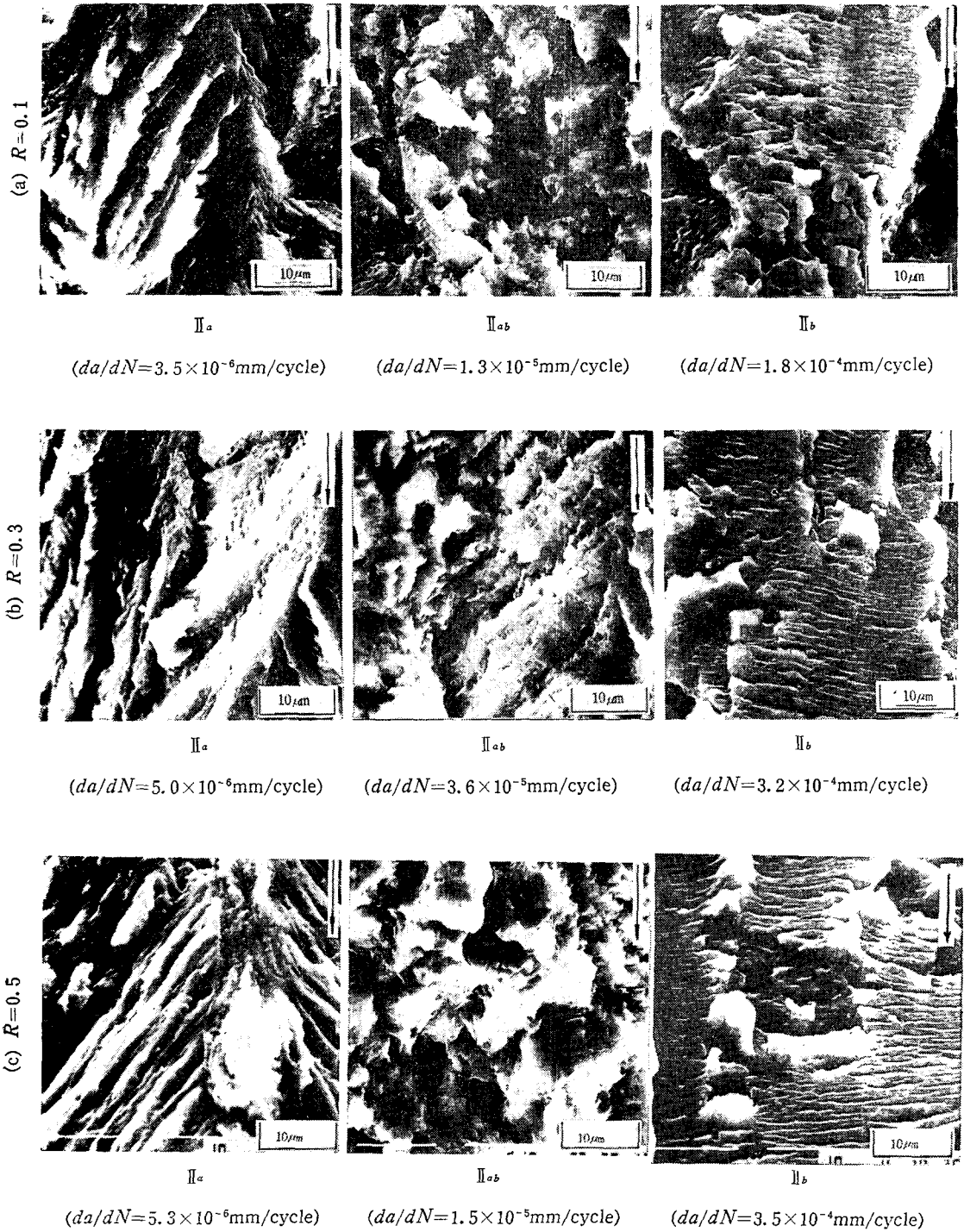


Fig. 6 Electron fractographs of fatigue fracture surface
(Arrow indicates direction of crack growth)

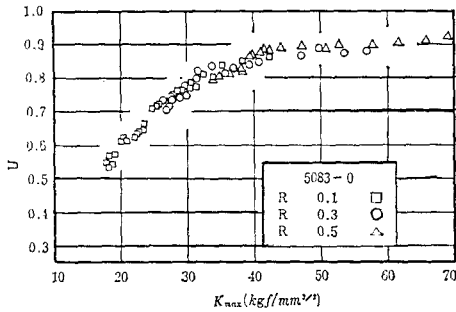


Fig. 7 Crack closure behavior as a function of K_{max}

나타내고 있다. Elber⁽²⁾는 2024-T3 알루미늄합금의 경우, U 는 應力比 R 에만 의존하여 $-0.1 < R < 0.7$ 에서는 $U = 0.5 + 0.4R$ 의 직선관계가 됨을 보고 하였지만 本 알루미늄합금에서는 2017-T3 알루미늄합금⁽³⁾과 마찬가지로 U 는 K_{max} 만의 함수로서 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 그래서 이러한 現象의 원인을 규명하기 위하여 균열 열림짐 K_{op} 에 관하여 검토하였다.

Fig. 8은 應力比 R 이 각각 一定한 경우 ($R=0.1, 0.3, 0.5$), K_{op} 의 K_{max} 의 의존성을 나타낸 것이다. 이 그림으로부터 應力比의 크기에 따라 K_{max} 의 증가에 의한 K_{op} 의 변화양상은 다르고, 應力比가 클수록 K_{op} 의 K_{max} 의 의존성이 증대함을 알 수 있다. 이것은 Fig. 9에서 보는 바와 같이 ΔK 를 각각 ($\Delta K=17, 23, 27, 33$ kgf/mm^{3/2}) 일정하게 한 경우 應力比 R 의 증가에 따라 $K_{max}(=\Delta K/(1-R))$ 가 증가하면 K_{op} 값이 상승하기 때문이다.

한편 Fig. 8의 결과를 K_{op} 의 K_{max} 에 대한 비 K_{op}/K_{max} 와 K_{max} 와의 관계에 대하여 검토하여 보면 Fig. 10에서와 같이 應力比에 따라 K_{op}/K_{max} 의 변화양상

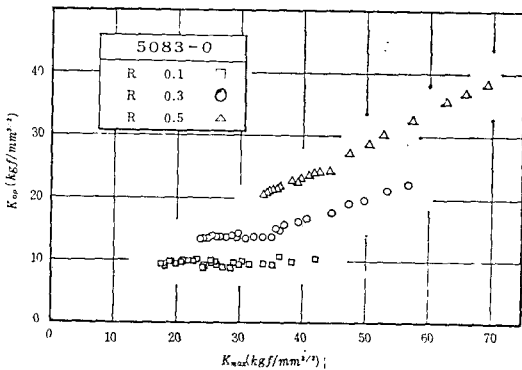


Fig. 8 Relation between K_{op} and K_{max}

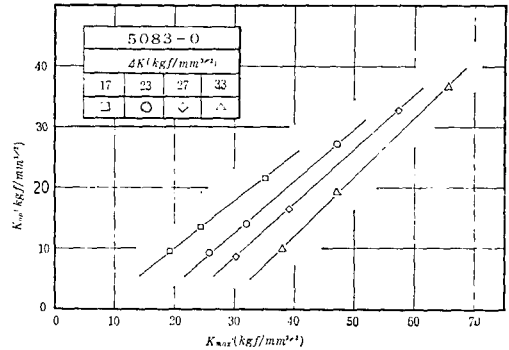


Fig. 9 Dependence of K_{op} on K_{max}

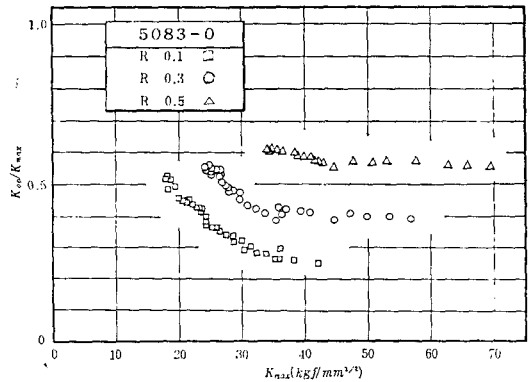


Fig. 10 Relation between K_{op}/K_{max} and K_{max}

은 다르고 應力比가 작을수록 K_{max} 의 저하에 따른 K_{op}/K_{max} 의 증가현상은 뚜렷하다.

따라서 應力比 R 에 관계없이 K_{max} 에 따라 有效應力擴大係數幅 U 가 증가하는 것은 K_{max} 의 증가에 의한 K_{op}/K_{max} 의 감소현상이 應力比의 크기에 따라 다르기 때문이라고 할 수 있다.

4. 結 論

小規模降伏條件下에서 5083-O 알루미늄합금에 대하여 一定振幅荷重下의 疲勞균열進展實驗을 시행하여 應力擴大係數幅 ΔK 및 균열 단합을 고려한 有效應力應大係數幅 ΔK_{eff} 에 의한 균열進展舉動과 균열 단합에 관하여 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

- (1) 균열進展速度 da/dN 와 ΔK 의 관계에서는 낮은 ΔK 領域일수록 應力比 R 의 영향이 뚜렷하지만 ΔK_{eff} 와의 관계에서는 R 의 영향이 소멸된다.
- (2) 균열進展速度 da/dN 은 第II段階領域임에도 불구하고 ΔK 또는 ΔK_{eff} 로 정리하여도 $5.5 \times 10^{-6} \text{mm/}$

cycle 및 5.5×10^{-8} mm/cycle 부근의 速度領域에서 각각 친이하는 거동을 나타내어 3領域으로 분류된다. 또한 各領域에서의 微視破面樣相은, 第Ⅰa領域에서는 剪斷型 延性破面, 第Ⅰb領域에서는 粒界破面 그리고 第Ⅰc領域에서는 스트라이에이션이 지배적이다.

- (3) 有効應力擴大係數幅比 U 는 應力比 R 에 관계없이 最大應力擴大係數 K_{max} 에 의해 지배되고 이것은 K_{max} 의 증가에 따른 K_{op}/K_{max} 의 감소에 의해 有効應力擴大係數幅比 U 가 높아지기 때문이다.

후 기

본 연구수행에 있어서 조언을 하여준 한국과학기술원 송지호교수에게 감사합니다.

參 考 文 獻

- (1) W. Elber, "Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension", Engng. Fract. Mech., Vol. 2, pp. 37~45, 1970
- (2) W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", ASTM STP 486, pp. 230~242, 1971
- (3) 宋智浩, 金一敏, 辛龍承, "2017-T3 알루미늄의 疲勞균열進展과 균열닫힘現象", 大韓機械學會論文集, 第4卷, 第2號, pp. 47~53, 1980
- (4) 城野政弘, 宋智浩, 三上省二, 大垣雅由, "機械構造材料의 疲勞き裂進展抵抗とき裂開閉口舉動", 材料, 第33卷, 第367號, pp. 468~474, 1984
- (5) M. Katcher and M. Kaplan, "Effects of R-Factor and Crack Closure on Fatigue Crack Growth for Aluminum and Titanium Alloys", ASTM STP 559, Fracture Toughness and Slow-Stable Cracking pp. 264~282, 1974
- (6) 菊川, 城野, 田中, 高谷, "除荷彈性コンプライアンス法による低進展速度領域における疲勞き裂進展速度とき裂開閉口舉動の測定", 材料, 第25卷, 第276號 pp. 899~903, 1976
- (7) T.T. Shih and R.P. Wei, "A Study of Crack Closure in Fatigue", Engng. Fract. Mech., Vol. 6, pp. 19~32, 1974
- (8) K.D. Unangst, T.T. Shih and R.P. Wei, "Crack Closure in 2219-T851 Aluminum Alloy", Engng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 725~734, 1977
- (9) A.T. Stewart, "The Influence of Environment and Stress Ratio on Fatigue Crack Growth at Near Threshold Stress Intensities in Low-Alloy Steels", Engng. Fract. Mech., Vol. 13, pp. 463~478, 1980
- (10) K. Minakawa and A.J. McEvily, "On Crack Closure in the Near-Threshold Region", Scripta, Meta, Vol. 15, pp. 633~636, 1981
- (11) V. Bachmann and D. Munz, "Crack Closure in Fatigue of a Titanium Alloy", Int. J. of Fracture, Vol. 11, pp. 713~716, 1975
- (12) ASTM Designation: E647-81. Standard Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle
- (13) 角田, R.M. Pelloux, "高力 Al 合金における微小切欠きの疲勞き裂傳ばおよび破斷壽命への影響", 材料, 第27卷, 第299號, pp. 961~966, 1978
- (14) G.R. Yoder, L.A. Cooly and T.W. Crooker, "Fatigue Crack Propagation Resistance of Beta-Annealed Ti-6Al-4V Alloys of Differing Interstitial Oxygen Contents", Metall. Trans., A, Vol. 9A, pp. 1413~1420, 1978
- (15) 城野政弘, 宋智浩, 岡部雅彦, 上杉雅彦, 大垣雅田, 江口直紀, "發生初期微小疲勞き裂かへ彈塑性巨視疲勞き裂までのき裂速度と開閉口舉動", 材料, 第33卷, 第368號, pp. 560~565, 1984