

< 論 文 >

5083-H113 A1 合金의 疲勞균열進展舉動에 미치는 균열형태의 영향

김 정 규* · 신 용 승** · 윤 의 박***

(1988년 4월 1일 접수)

Influence of Crack Geometry on Fatigue Crack Growth Behavior in 5083-H113 Aluminium Alloy

Jung Kyu Kim, Yong Seung Shin and Eui Park Yoon

Key Words : Fatigue Crack Growth Rate(疲勞균열進展速度), Through-Thickness Crack(관통
균열), Surface Crack(表面균열), Crack Closure(균열닫힘), Stress Ratio(應力比)

Abstract

The fatigue crack growth and crack closure behavior of long through-thickness cracks and small half-penny shaped surface cracks were investigated in 5083-H113 Aluminum alloy under constant amplitude testing by the unloading elastic compliance method. It was found that, in the Region II, the crack growth behavior of both through-thickness and surface cracks exhibited the tri-linear form with two transitions and no concern with stress ratio R . In the Region II_{ab} and II_b, through-thickness cracks grew faster than surface cracks in length direction, but at $\Delta K \leq 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ for $R=0.1$ the growth rates of surface cracks in depth direction, grew faster than those of through-thickness cracks. When the crack closure was considered, the growth rates of through-thickness cracks lay between the growth rates of depth direction and the growth rates of length direction in surface cracks. It is suspected that this was caused by the difference of crack closure at depth and length direction of surface cracks.

1. 序 論

機械 구조물의 部品 또는 部材에 존재하는 균열은 관통균열(through-thickness crack)보다는 제작 과정이나 취급과정 또는 가동중에 疲勞와 腐蝕에 의하여 생긴 表面균열(surface crack) 또는 部分관통균열(part-through crack)의 형태로서 나타나는 경우가 보통이다. 관통균열에 있어서는 균열의 정

상적인 進展速度 da/dN 은 應力擴大係數의 범위(stress intensity factor range) ΔK 및 應力比 R 의 함수로서 표현되며 이 관계로부터 실제 부재에서 검출된 균열의 위험성을 판정 또는 부재의 殘存수명을 산출할 수 있다. 한편 표면균열의 진전거동은 균열先端部の 위치에 따라 應力상태가 변하는 3차원의 특성을 가지고 있으므로 관통균열의 것에 비하여 실험 및 해석에 어려움이 많다. 표면 균열의 진전거동에 관한 최근의 연구^(1~10)에 의하면 發生初期의 작은 표면 균열(short crack)과 긴 표면 균열(long crack)에서 그 거동이 다를 뿐만 아니라 긴 표면균열이라 하여도 관통균열의 진전속도와 다

* 정회원, 한양대학교 공과대학 기계설계학과

** 정회원, 서울산업대학 기계공학과

*** 한양대학교 공과대학 재료공학과

른 양상을 나타내는 경우가 많다. 이들 연구의 예로서 표면균열(0.006~0.5mm)의 진전거동을 논한 Pearson⁽²⁾은 균열의 진전속도가 느린 범위에서는 표면균열의 것이 관통균열의 것에 비해 빠르며, 높은 영역에서는 이와 반대의 현상을 보고하고 있다. Lankford⁽¹³⁾, Brown⁽⁴⁾ 등의 연구에서는 표면균열의 진전속도가 관통균열의 것에 비해 빠르지만 높은 ΔK 영역에서는 거의 동일한 경향을, 그리고 熔接構造用鋼을 사용한 渡邊⁽⁵⁾의 연구결과에 의하면 下限界 부분을 포함한 全速度영역에서 표면균열이 관통균열보다 느린 속도로 진전하며, Maddox⁽⁶⁾, Sullivan⁽⁷⁾, 北川⁽⁸⁾ 등의 연구에서는 이들 균열의 진전속도가 일치함을보고하고 있다.

이상과 같이 관통균열과 표면균열의 진전거동은 반드시 일치하지 않으므로 관통균열을 이용한 許容缺陷치수의 판정, 殘存壽命의 산출에는 문제가 있다고 하겠다. 그런데 이러한 균열진전거동에 차이가 생기는 원인으로 微視組織⁽⁹⁾, 탄소성 효과^(10,11), 균열단합^(1,9,12) 등에 관하여 검토되고 있지만 아직도 불명확한 상태이며 또한 국내에서도 미소표면균열의 진전거동에 대하여 연구되고 있지만⁽¹³⁾ 아직도 이에 관한 많은 자료가 필요하다고 생각된다.

본 연구에서는 熔接性이 좋고 強度도 적당하며 腐蝕에 대한 저항성이 좋아 海洋構造物 및 熔接構造用材로서 널리 사용되고 있는 5083-H113 Al 합금을 준비하고 이 재료의 균열형태에 따른 피로균열진전거동을 밝히기 위하여 관통균열과 표면균열의 진전거동에 미치는 應力比의 영향을 균열단합과 함께 검토하였다.

2. 實驗方法

2.1 材料 및 試驗片

사용한 재료는 두께가 30mm인 5083-H113 Al 합금으로서 이의 화학성분과 기계적성질은 前報⁽¹⁴⁾와 같다.

이 재료로부터 시험편의 채취방향은 L-T 방향이 되도록 하였고 관통균열과 표면균열의 시험편형상과 치수는 Fig. 1(a, b)에 보인 바와 같으며 표면균열은 방전가공에 의한 것이다.

2.2 疲勞試驗 및 균열길이 교정곡선

본 연구에서는 10톤용 유압 서보식 피로시험기를

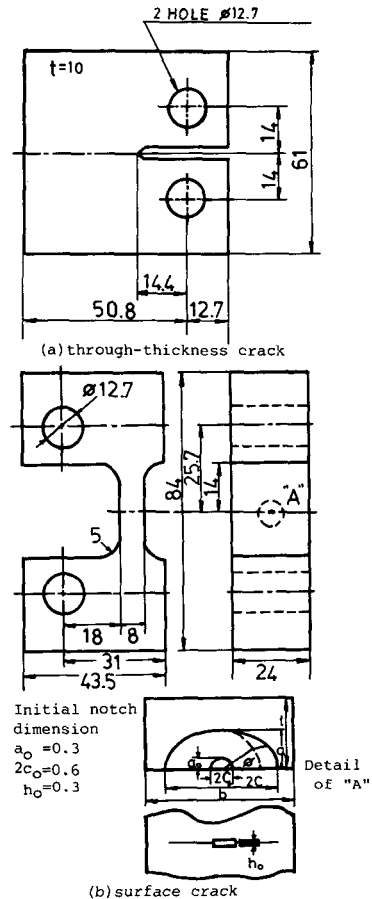


Fig. 1 Configuration of test specimens (unit: mm)

사용하였으며 하중반복 속도는 11Hz로 하고 正弦波形으로 하중을 負荷하여 $R=0.1, 0.3$ 및 0.5 의 應力比에서 각각 피로시험을 행하였다. 그리고 관통균열의 경우에는 ΔK 감소 방식에 의해 균열진전의 下限界 ΔK_{th} 를 찾은 후, ΔK 증가방식에 의해 피로시험을 행하였고 이때 예비균열은 ASTM E 647-83⁽¹⁵⁾에서 추천한 대로 3mm 진전시켰다. 균열길이 및 균열단합은 除荷彈性 컴플라이언스(compliance)법으로 측정하였으며 사용된 전기회는 前報⁽¹⁴⁾와 같다. 이때 관통균열의 경우에는 클립 게이지(clip-gage)를 사용하였지만 표면균열의 경우에는 균열이 존재하는 반대면에 스트레인 게이지(strain gage)를 부착시켜 측정하였다.

Fig. 2는 이 방법에 의한 균열길이의 교정곡선(calibration curve)을 나타낸다. 관통균열의 경우에는 초기단면적 S_0 를 가진 CT 시험편에 알맞은

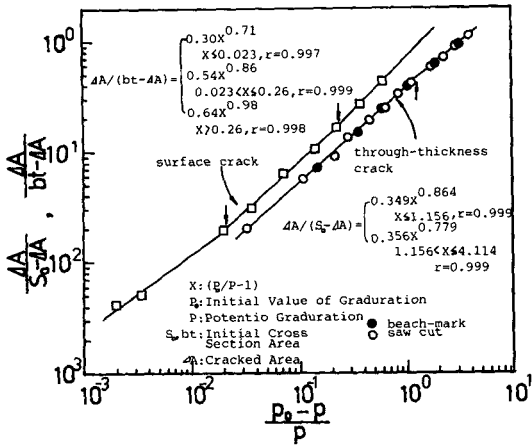


Fig. 2 Calibration curve for converting potential graduation measurements to crack length

荷重을 가하여 포텐쇼미터 (potentio meter)의 초기 값을 설정한다. 다음에 시험편을 두께 0.2mm 씩으로 가상균열을 낸 후 이 균열길이에 상당하는 포텐쇼미터의 눈금값 $(P_0 - P)/P$ 과 공구현미경으로 측정한 균열길이의 평균값에 해당하는 면적을 각각 무次元化한 값 $\Delta A / (S_0 - \Delta A)$ 를 두축으로 잡아 교정곡선을 구하였다. 이 그림에서의 흑점은 이 방법의 정당성을 검토하기 위하여 실제로 균열을 진전시키면서 진전속도를 변화시킬 때 형성되는 비치마크 (beach mark)로, 실제 균열에 대한 데이터를 나타낸 것이다.

또한 표면균열의 경우에는 가상균열을 만드는 것이 어려우므로 비치마크만을 이용하여 初期노치면적과 균열면 면적의 합 ΔA 를 시험편의 나머지 면적 $(bt - \Delta A)$ 로 나누어 무次元化한 값을 얻어 교정곡선을 구한 것이다.

균열진전속도 da/dN 은 ASTM E 647-83에 의한 사이컨트法 (secant method)으로 산출하였고, 應力擴大係數의 평가에 있어서 관통균열의 ΔK 는 다음 식으로 구하였다.

$$\Delta K = \frac{\Delta P(2+a)}{3\sqrt{B}(1-a)^{3/2}} (0.886 + 4.64a - 13.32a^2 + 14.72a^3 - 5.64a^4)$$

여기서 ΔP : 하중변화의 폭

B : 시험편 두께

a : a/W

(a =균열길이, W =시험편 폭)

표면균열의 경우에는 ASTM E 740-80⁽¹⁶⁾에서 추천한 Newman과 Raju의 식⁽¹⁷⁾을 사용하였다.

또한 有效應力擴大係數의 범위 ΔK_{eff} 는 다음과 같다.

$$\Delta K_{eff} = U \cdot \Delta K$$

여기에서 U : 有效應力擴大係數 범위의 비

3. 實驗結果

3.1 관통균열의 進展舉動

Fig. 3은 관통균열의 應力比 R 에 따른 疲勞균열 進展舉動을 검토하기 위하여 $R=0.1, 0.3$ 및 0.5 에서의 피로균열진전속도 da/dN 을 應力擴大係數의 범위 ΔK 에 대하여 정리한 것이다. 균열진전저동은 R 값의 크기에 관계없이 II 영역에서 2개의 천이점, 즉 T_1 점 ($da/dN \approx 4.3 \times 10^{-6}$ mm/cycle)과 T_2 ($da/dN \approx 3.7 \times 10^{-5}$ mm/cycle)에서 기울기가 변하는 3개의 곡선 (IIa 영역, IIab 영역 및 IIb 영역) 형태로 나타난다. 균열진전속도 da/dN 은 IIb 영역을 제외한 동일한 ΔK 에서 R 값이 클수록 증가함을 알 수 있다. 또한 피로균열진전의 下限界값 ΔK_{th} 는 R 값이 감소할수록 증가하며 應力比 $R=0.1, 0.3,$ 및 0.5 에서 각각 $2.25 MPa\sqrt{m}, 2.02 MPa\sqrt{m}, 1.92 MPa\sqrt{m}$ 의 값을 가진다. 이상의 결과에서 da/dN 의 R 의존성은 일반 鐵鋼材

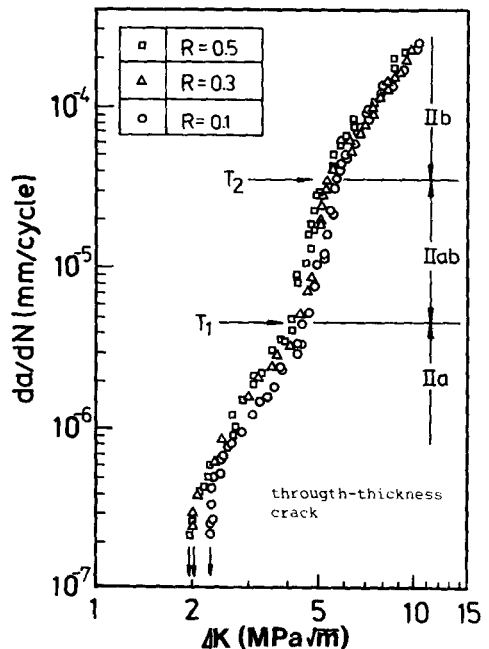


Fig. 3 Variation of fatigue crack growth rate (da/dN) with stress intensity factor range (ΔK)

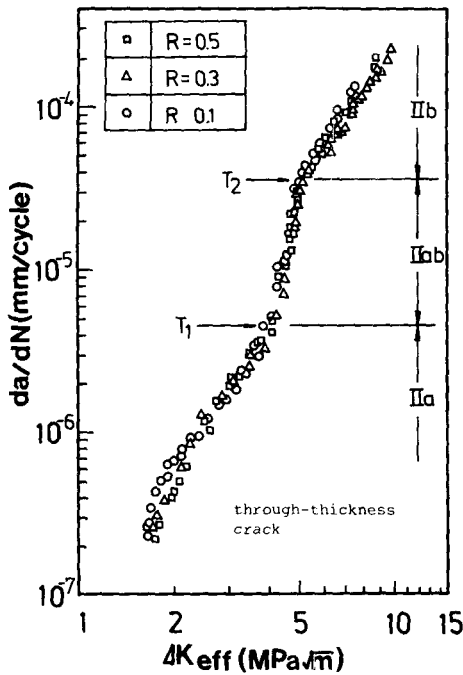


Fig. 4 Variation of fatigue crack growth rates (da/dN) with effective stress intensity factor range (ΔK_{eff})

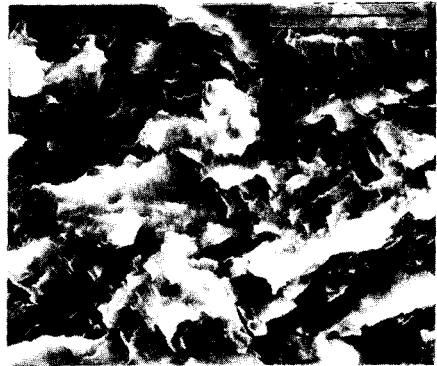
料^(18,19)에 비하여 낮지만 이 재료의 da/dN 은 R 에 의존함을 알 수 있다.

한편 Fig. 4는 da/dN 을 균열단함을 고려한 有效應力擴大係數의 범위 ΔK_{eff} 에 대하여 나타낸 것이다. 이 그림에서부터 $da/dN - \Delta K$ 의 관계에서 나타나는 R 의 영향이 상당히 없어진 것으로 보아 동일한 ΔK 영역에서 R 에 따른 da/dN 의 차이는 균열단함의 정도에 기인한 것임을 알 수 있지만 II영역에서의 da/dN 의 천이현상은 균열단함을 고려하여도 나타난다.

이와같은 현상은 Al합금에서 특히 명확하게 나타나는 것으로 알려져 있으며^(20,21), 그 원인으로는 소성영역의 크기 R_p 와 微視組織의 크기 d 와의 관계로부터 설명되고 있다. 일 예로서 II_a영역에서 II_{ab}영역으로의 천이는 R_p 가 d 와 거의 같은 단계에서, 그리고 II_b영역으로의 천이는 $R_p \approx 3d$ 에서 일어나며 前者의 천이는 延性破壞에서 임계과피로, 그리고 後者의 천이는 임계과피에서 스트라이에이션(striation)으로 변할 때 일어남이 보고되고 있다. 본 실험에서도 각 영역에서의 微視破面을 Fig. 5(a~c)로부터 검토한 결과 II_a영역에서는 延性的

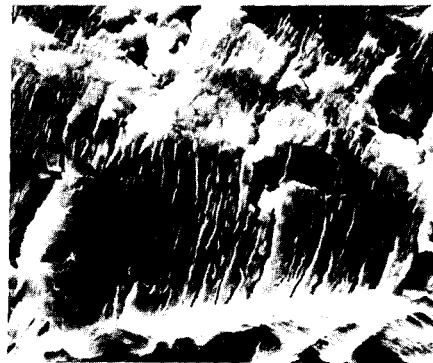


(a)



(b)

10um



(c)

- (a) Region II
 $da/dN = 3.54 \times 10^{-6}$ mm/cycle
- (b) Region II_{ab}
 $da/dN = 1.31 \times 10^{-5}$ mm/cycle
- (c) Region II_b
 $da/dN = 1.71 \times 10^{-4}$ mm/cycle

Fig. 5 Scanning electron micrographs at $R=0.1$. Arrow indicates direction of crack growth

인 剪斷形, 균열진전속도가 가속화하는 II_{ab}영역에서는 입계파괴, 그리고 da/dN 의 증가율이 둔화되는 II_b영역에서는 스트라이에이션에 의한 파괴가 지배적임으로 보아 II영역에서의 피로균열진전의 특이한 현상은 微視破壞機構의 차이에 의한 것이라고 할 수 있다.

3.2 표면균열의 進展舉動

Fig. 6은 표면균열의 진전속도에 미치는 應力比 R 의 영향을 균열길이 및 깊이방향의 疲勞균열進展速度 dc/dN , da/dN 을 應力擴大係數의 범위 ΔK 에 대하여 나타낸 前報⁽¹⁴⁾의 결과이다. 이 그림에서 균열진전속도의 곡선은 관통균열의 경우와 마찬가지로 II영역에서 R 값의 변화에 관계없이 3영역으로 나누어지고 있다. 즉 $da/dN \approx 3.6 \times 10^{-6}$ mm/cycle ($da/dN \approx 5 \times 10^{-6}$ mm/cycle) 부근까지는 완만한 진전속도의 변화를 나타내지만 이 부근에서 진전속도는 가속되며 $da/dN \approx 3 \times 10^{-5}$ mm/cycle ($dc/dN \approx 5 \times 10^{-5}$ mm/cycle) 부근에서 다시 진전속도의 증가율이 둔화됨을 알 수 있다. 또한 da/dN 및 dc/dN 에 대한 R 의 의존성은 낮은 ΔK 영역에서 현저하며 ΔK 가 증가할수록 감소함을 알 수 있고 전반적으로 균열깊이 방향의 진전속도 da/dN 가

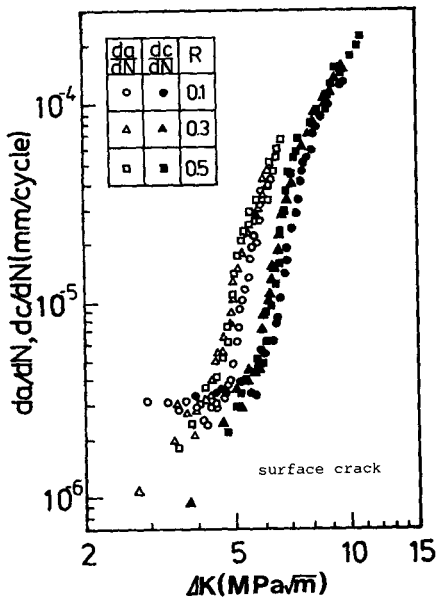


Fig. 6 Variation of fatigue crack growth rates (da/dN , dc/dN) with stress intensity factor range (ΔK)

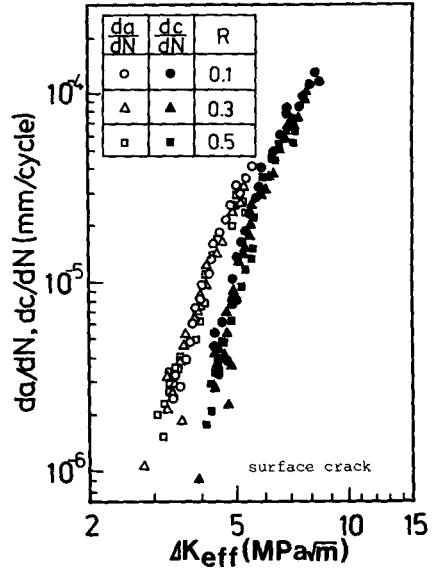


Fig. 7 Variation of fatigue crack growth rates (da/dN , dc/dN) with effective stress intensity factor range (ΔK_{eff})

깊이방향의 진전속도 dc/dN 보다 빠르다. Fig. 7은 이들의 균열진전속도를 有效應力擴大係數의 범위 ΔK_{eff} 로 정리한 것으로서 균열진전에 미치는 R 의 영향은 상당히 감소되어 좁은 흠어짐 폭안으로 정리되며, 또한 균열발생初期의 완만한 균열진전 현상도 소멸되어짐을 알 수 있다.

4. 考 察

Fig. 8(a~c)은 관통균열과 표면균열의 진전거동을 동일한 應力比에 대하여 나타낸 것이다. 관통균열의 진전속도 II_{ab}영역에서는 표면균열의 깊이방향의 진전속도가 관통균열의 것에 비하여 약간 느린 경향을 나타내고 있다. 또한 II_a영역에 있어서도 $R=0.3, 0.5$ 에서는 II_{ab}영역과 마찬가지로의 경향을 보이고 있으나 응력비가 가장 낮은 $R=0.1$ 의 경우에는 표면균열의 깊이방향의 진전속도가 관통균열의 것보다 오히려 빠른 것을 알 수 있다. 한편 표면균열의 깊이방향의 진전속도는 $R=0.1$ 에서 $\Delta K \leq 5 MPa\sqrt{m}$ 영역을 제외하면 R 의 대소에 관계없이 ΔK 영역에서 관통균열보다 상당히 느림을 보이고 있다. 관통균열과 표면균열의 進展速度에 관한 종래의 연구결과를 검토하면 앞에서 記述한 바와 같이 반드시 같은 舉動을 나타내고 있지 않지

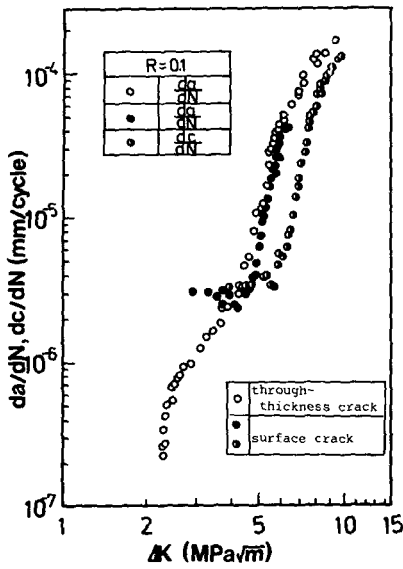


Fig. 8(a) Variation of fatigue crack growth rates (da/dN , dc/dN) with stress intensity factor range (ΔK)

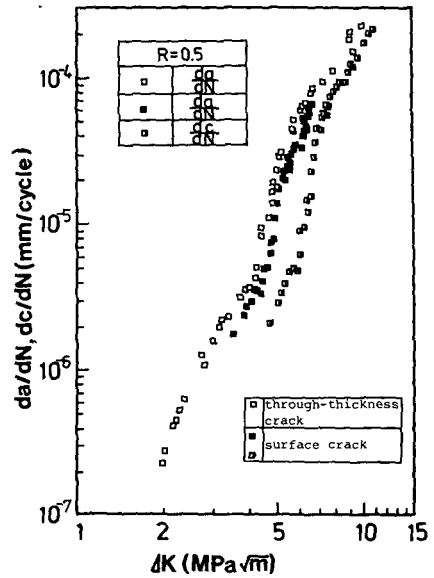


Fig. 8(c) Variation of fatigue crack growth rates (da/dN , dc/dN) with stress intensity factor range (ΔK)

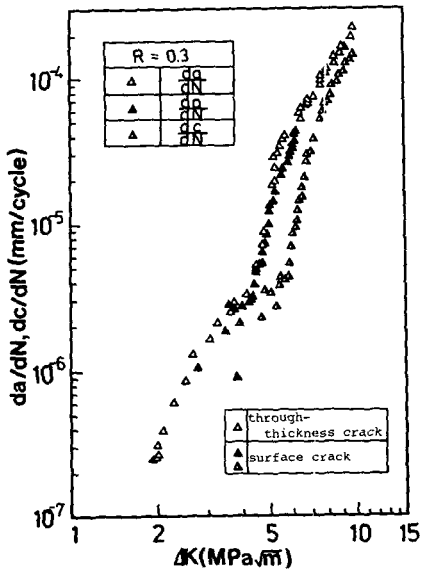


Fig. 8(b) Variation of fatigue crack growth rates (da/dN , dc/dN) with stress intensity factor range (ΔK)

만 본 研究의 결과에서는 $R=0.1$ 의 낮은 進展速度 영역 ($\Delta K \leq 5 MPa\sqrt{m}$)을 제외하면 표면균열의 진전속도가 관통균열의 것에 비하여 느리다고 하는 渡邊⁽⁵⁾의 결과와 일치한다고 하겠다. 이와같이 균열형태에 따른 균열進展舉動의 차이는 균열단합현

상과 관련이 있음이 Fleck⁽¹⁾, 小寺澤⁽⁹⁾ 등에 의해 보고되고 있으나 이에 관한자료는 불충분하다.

Fig. 9(a~c)는 관통균열과 표면균열의 균열단합의 정도를 알기 위하여 應力擴大係數의 범위 ΔK 와 有效應力擴大係數의 범위 U 와의 관계를 응력비 R 에 대해서 나타낸 것이다. 이 그림에서 응력비가 가장 낮은 $R=0.1$ 의 경우, $\Delta K \leq 4 MPa\sqrt{m}$ (길이 방향에서는 $\Delta K \leq 5 MPa\sqrt{m}$)에서는 관통균열이 표면균열보다 同一 ΔK 에 대한 U 값이 작고 이 ΔK 이상의 범위에서는 반대로 관통균열이 표면균열보다 U 값이 크게 됨을 알 수 있다. 한편 응력비 $R=0.3, 0.5$ 에서는 전반적으로 관통균열이 표면균열보다 동일한 ΔK 에서 큰 U 값을 가져 균열단합의 영향이 작음을 알 수 있다.

이와같이 균열형태는 균열단합의 크기에 현저한 영향을 미친다고 할 수 있으므로 Fig. 8의 균열형태에 따른 疲勞균열進展舉動의 차이에 대하여 균열단합을 고려하여 검토하였다. Fig. 10(a~c)은 응력비에 대해서 나타난 균열진전속도와 ΔK_{eff} 와의 관계이다. 관통균열과 표면균열의 진전속도를 균열단합을 고려한 연구에 의하면^(9,22,23) 이들 균열의 진전속도는 대략 일치하는 것으로 보고되고 있지만, 동일한 ΔK 에 있어서 표면균열의 길이방향의 진전속도는 관통균열의 것과 비교할 때 약간 빠른 경향

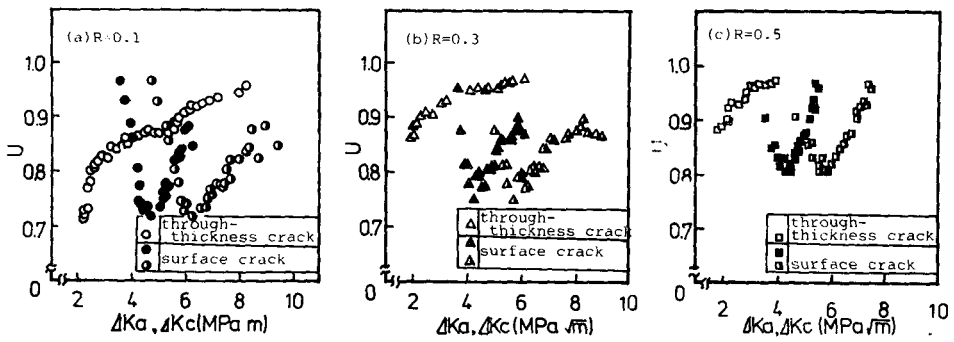


Fig. 9 Relation between effective stress intensity factor ratio (U) and stress intensity factor range (ΔK)

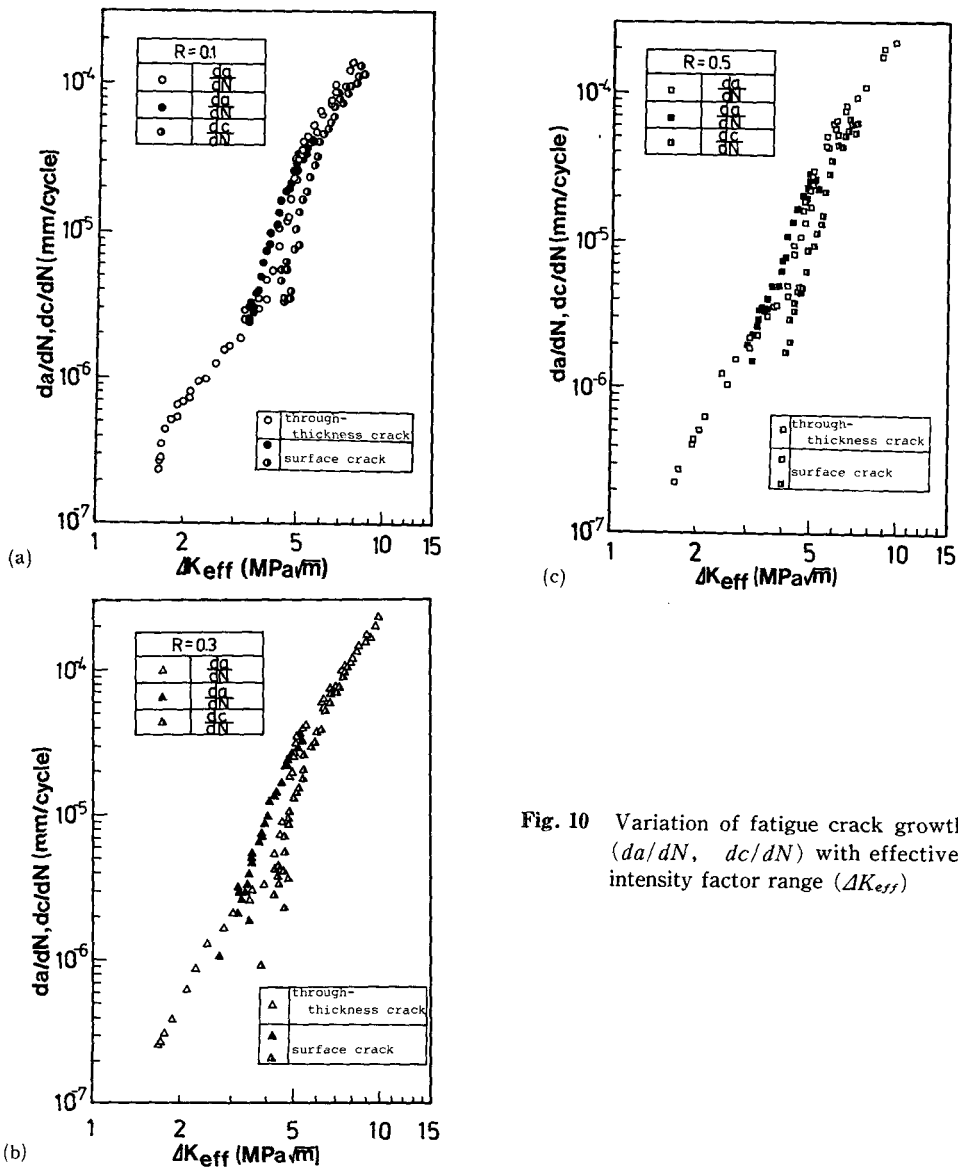


Fig. 10 Variation of fatigue crack growth rates ($da/dN, dc/dN$) with effective stress intensity factor range (ΔK_{eff})

을 나타내고 있으나 표면균열의 길이방향의 것은 관통균열의 것에 비하여 일반적으로 느린 경향을 보이고 있다. 균열進展舉動에 미치는 균열단합의 영향은 平面變形率상태에서 보다는 平面應力상태에서 현저하다는 점^(1,24,25)을 고려하면 三次元 特性을 지닌 표면균열의 진전거동에 있어서는 길이방향보다는 길이방향에서 균열단합이 크다고 생각된다. 그러나 본 연구에서는 除荷彈性컴프라이언스法으로 균열단합을 측정하였기 때문에 표면균열에서의 균열단합은 길이방향과 길이방향에서의 평균값이라고 할 수 있다. 그러므로 표면균열의 균열단합량은 길이방향에서는 과대평가되고 길이방향에서는 과소평가된다고 생각되며, 본질적으로는 균열단합을 고려하면 표면균열이 관통균열과 거의 비슷한 속도로 진전할 가능성이 있다고 하겠다.

5. 結 論

5083-H113 Al 합금의 균열형태에 따른 疲勞균열進展舉動을 밝히기 위하여 관통균열과 표면균열의 진전거동에 미치는 應力比 R 의 영향을 균열단합과 함께 검토하였다. 얻어진 결과는 다음과 같다.

(1) 관통균열의 진전속도 $da/dN-\Delta K$ 및 ΔK_{eff} 와의 관계에서 da/dN 는 II영역에서 R 의 크기에 관계없이 3단계의 진전거동을 나타내며, $da/dN-\Delta K$ 관계에서 나타나는 R 의 영향은 균열단합을 고려하면 감소한다.

(2) 표면균열의 균열길이방향진전속도 da/dN 및 길이방향진전속도 dc/dN 에 대한 R 의 영향은 낮은 ΔK 영역에서 현저하고 본 재료에서는 da/dN 가 dc/dN 보다 빠르다. 또한 R 값의 대소에 따른 균열진전속도의 차이는 균열단합을 고려한 ΔK_{eff} 로 정리하면 거의 소멸된다.

(3) 관통균열은 표면균열의 길이방향에 비하면 진전속도가 빠른 경향을 나타내지만 길이방향과는 거의 비슷하거나 빠르면 $R=0.1$ 인 경우 $\Delta K \leq 4 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ (길이방향 $\Delta K \leq 5 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$)에서는 오히려 표면균열의 진전속도가 빠르다.

(4) 균열단합을 고려하여도 관통 및 표면균열의 진전속도가 일치하지 않는 것은 표면균열의 길이 및 길이방향의 균열단합의 차이에 기인한다고 할 수 있다.

후 기

본 연구는 1986~1987년도 한국과학재단의 연구

비지원에 의한 "알루미늄 합금의 표면균열진전거동에 관한 연구"의 것으로 동 재단에 감사합니다.

參 考 文 獻

- (1) N. A. Fleck, I. F. C. Smith, and R. A. Smith, 1983, "Closure Behavior of Surface Cracks", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 6, No. 3, pp. 225~239.
- (2) S. Person, 1975, "Initiation of Fatigue Crack in Commercial Aluminum Alloys and the Subsequent Propagation of Very Short Cracks", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 7, pp. 235~237.
- (3) J. Lankford, T. S. Cook, and G. P. Sheldon, 1982, "Fatigue Microcrack Growth in a Nickel-Base Superalloy", *International Journal of Fracture*, Vol. 17, No. 2, pp. 143~155.
- (4) C. W. Brown, and M. A. Hicks, 1983, "A Study of Short Fatigue Crack Growth Behavior in Titanium Alloy IMI 685", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 16, pp. 67~76.
- (5) 波邊, 久田, 平野, 北川, 1980, "三次元き裂問題の光弾性實驗による解析(第三報, 半だ"圓表面き裂の解析と解析結果の總合的檢討", *日本機械學會論文集(A)*, Vol. 46, pp. 396~403.
- (6) S. J. Maddox, 1975, "An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints", *International Journal of Fracture*, Vol. 11, pp. 221~243.
- (7) A. M. Sullivan, and T. W. Crooker, 1976, "Analysis of Fatigue-Crack Growth in a High-Strength Steel Part 1: Stress Level and Stress Ratio Effects at Constant Amplitude", *Journal of Pressure Vessel Technology*, *Transactions of the ASME*, J. Vol. 98, pp. 179~184.
- (8) 北川, 高橋, 1979, "微小な疲勞き裂の成長とその下限界條件に關する破壊力學的研究", *日本機械學會論文集(A)*, Vol. 45, No. 399, pp. 1289~1303.
- (9) 小寺澤, 南坂, 1977, "繰返し曲グによる非量通疲勞き裂の進展", *材料*, Vol. 26, No. 289, pp. 955~961.
- (10) H. Kitagawa, S. Takahashi, C. M. Suh, S. Miyashita, 1978, "Quantitative Analysis of Fatigue process-Microcracks and Slip Lines Under Cyclic Strains", *ASTM STP 675*, pp. 420~449.
- (11) N. E. Dowling, 1977, "Crack Growth During Low-Cycle Fatigue of Smooth Axial Specimens, Cyclic Stress-Strain and Plastic Deformation Aspects of Fatigue Crack Growth", *ASTM STP 637*, pp. 97~121.

- (12) W. L. Morris, 1980, "The Noncontinuum Crack-Tip Deformation Behavior of Surface Microcracks", Metallurgical Transaction A, Vol. 11A, pp. 1117 ; 1123.
- (13) C. M. Suh, Y. G. Kang, D. Y. Suh, and B. W. Hwang, 1987, "Basic Characteristics of Surface Microcracks in Type 304 Stainless Steel at 538°C", KSME Journal, Vol. 1, No. 2, pp. 115~120.
- (14) 박 영조, 김 정규, 신 용승, 김 영운, 1987, "5083-H113 알루미늄 합금의 표면균열진전거동과 균열단합 형상", 대한기계학회논문집, 제11권, 제 2 호, pp. 243~252.
- (15) ASTM Designation E647-83, "Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-8} m/cycle".
- (16) ASTM Designation E740-80, 1980, "Standard Practice for Fracture Testing with Surface Crack Tention Specimens".
- (17) T. C. Newman Jr., and I. S. Raju, 1981, "An Emprical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", Engineering Fracutre Mechanics, Vol. 15, No. 1-2, pp. 185~192.
- (18) O. Vosikovsky, 1979, "The Effect of Stress Ratio on Fatigue Crack Growth Rates in Steels", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 595~602.
- (19) A. Ohta, and E. Sasaki, 1977, "Influence of Stress Ratio on the Threshold Level for Fatigue Crack Propagation in High Strength Steels", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, pp. 307~315.
- (20) 城野, 宋, 岡部, 上杉, 大垣, 江口, 1984, "發生初期微小疲勞き裂から弾塑性巨視疲勞き裂まぐのき裂進展と開閉口舉動", 材料, Vol. 33, No. 368, pp. 560~565.
- (21) 박영조, 김정규, 김일현, 1981, "5083-0 알루미늄 합금의 피로균열진전 거동과 균열단합에 관한 연구", 대한기계학회논문집, 제10권, 제 2 호, pp. 208~214.
- (22) K. Tanaka, and Y. Nakai, 1983, "Propagation and Non-Propagation of Short Fatigue Cracks at a Sharp Notch", Fatigue of Engineering Materials and Structures, Vol. 6, No. 4, pp. 315~327.
- (23) K. Ogura, Y. Miyoshi, and I. Nishikawa, 1985, "Fatigue Crack Growth and Closure of Small Cracks at the Notch Root", Current Ressearch on Fatigue Cracks, Journal of the Society of Materials Science, Japan, pp. 57~78.
- (24) A. F. Blom and D. K. Holm, 1985, "An Experimental and Numerical Study of Crack Closure", Engineering Fracture Mechanics, Vol. 22, No. 6, pp. 997~1011.
- (25) T. C. Lindley and C. E. Richards, 1974, "The Relevance of Crack Closure to Fatigue Crack Propagation", Materials Science and Engineering, Vol. 14 pp. 281~293.