

<論 文>

5083-H113 알루미늄합금의 表面균열進展舉動과 균열닫힘 現象

朴榮祖* · 金楨圭* · 辛龍承** · 金永運***

(1986年 9月 30日 接受)

Surface Crack Propagation Behavior and Crack Closure Phenomena in 5083-H113 Aluminum Alloy

Young Jo Park, Jung Kyu Kim, Yong Seung Shin and Yeong Un Kim

Key Words: Fatigue Surface Crack(피로표면균열), Aspect Ratio(형상비), Effective Stress Intensity Factor Range(유효응력 확대계수폭), Plasticity-Induced Crack Closure(소성유기 균열닫힘)

Abstract

The propagation and closure behavior of surface crack initiated at a sharply notched specimens were investigated in 5083-H113 aluminium alloy under constant amplitude of tension load by the unloading elastic compliance method. The crack shape(aspect ratio) was found to be approximately semicircular during the crack was being small and to be changed to semi-elliptical during it was being long.

The propagation rate of a surface crack initiated from notch root decelerated with increasing crack length when the crack was small and then accelerated when it was large. The effect of stress ratio was large in lower ΔK range, but the effective stress intensity factor range ΔK_{II} was found to diminish the difference of the crack propagation rate. By considering the increase in crack closure stress with crack length and examining the microphotographs, plasticity-induced and roughness-induced crack closure mechanisms were predominant in the range of this study.

1. 序 論

機械, 構造物部材가 使用中, 破損을 일으키는 가장

一般的인 경우는 反復荷重을 받을 때 部材中에 存在하는 缺陷 또는 작은 균열을 基點으로 하여 일어나는 疲勞破壞이고 특히 3次元特性을 지닌 균열形態로 나타내는 表面균열은 機械, 構造物의 安全性評價에 대단히 重要하다(1-3). 종래 表面균열의 疲勞균열進展舉動 및 균열進展의 下限界값 ΔK_{th} 는 긴 균열(long crack)을 가진 試驗片을 使用하여 이들 疲勞균열進展特性이 應力擴大係數(stress intensity factor) 값에 의하여 결정

* 正會員, 漢陽大學校 工科學 機械設計學科

** 正會員, 京畿工業開放大學 機械工學科

*** 漢陽大學校 大學院

될수 있다는 假定아래서 檢討되었다⁽³⁾. 그런데 낮은 ΔK 領域에서의 작은 균열과 긴 균열의 進展速度와의 관계, 自然發生 또는 人工缺陷을 利用한 表面균열과 貫通균열의 疲勞균열進展舉動에 관한 最近에 發表된 많은 研究結果^(2~18)를 檢討하여 보면 긴 균열 또는 貫通균열進展舉動을, 表面균열을 가지고 있는 機械構造物部材의 疲勞壽命豫測에 適用함은 檢討의 餘地가 많다고 생각된다.

여로서 同--한 ΔK 에 있어서 작은 균열의 進展速度는 貫通균열의 것보다 빠르고 또한 疲勞균열進展의 下限界값 ΔK_{th} 以下에서도 작은 균열은 傳播되고 있음이 報告되고^(2~10) 있다. 또한 貫通균열의 進展舉動을 表面균열과 比較한 研究結果에 의하면 表面균열의 進展速度는 貫通균열의 것과 一致한다는 報告^(11,12) 以外에 表面균열의 進展速度가 貫通균열의 것에 비해 느리다는 相反된 結果^(13,14)도 있다. 그리고 이러한 結果는 應力比의 大小와 관련이 있다고 하는 報告^(2~5,15~18)도 있지만 균열단합을 考慮하면 應力比의 影響이 消滅함이 알려져 있다^(2~5,15~17). 이와 같이 표면균열進展舉動과 긴 貫通균열의 것과는 반드시 같다고는 할수 없다.

本 研究에서는 작은 人工缺陷을 가진 表面균열의 進展舉動을 밝히기 위하여 熔接性이 좋고 強度도 적당하며 耐蝕性이 좋아 海洋構造無材 및 熔接構造物材로서 널리 사용되는 5083-H113 알루미늄합금을 준비하고 이 材料의 疲勞表面균열 進展舉動에 미치는 應力比의 影響을 균열단합과 함께 檢討하였다.

2. 實驗方法

使用한 材料는 두께가 30mm 인 5083-H113 알루미늄 合金材로서 本 材料의 化學的 成分과 機械的 性質은 Table 1 및 2 와 같다. 試驗片의 採取方向은 L-T

方向이 되도록 하였고 試驗片과 初期 노치의 形狀은 Fig. 1 에 보인 바와 같다.

初期노치는 放電加工에 의한 것으로 이때 使用한 電極은 直徑이 0.6mm 되는 銅線을 두께가 0.3mm 피게 研磨한 후 그 한 끝을 半圓形으로 加工한 것이다.

疲勞試驗은 MTS 式製 10 톤용 油壓 서어보식 疲勞試驗機를 使用하였으며 正弦波形的 荷重을 負荷하여 實溫에서 行하였다. 荷重反復數의 速度는 11Hz로 하였다.

表面에 나타난 균열길이 c 및 깊이 方向의 균열길이 a 를 監視하고 균열단합을 測定하기 위하여 Kikukawa 의 除荷彈性킬플라이언스法⁽¹³⁾을 採擇하였다. 이 方法은 自家製作한 1톤용 로드셀로부터의 信號과 試驗片 背面에 附着한 變形率게이지로부터의 信號를 減算用電子回路⁽⁵⁾로 處理하여 싱크로스콥에 履歷루우프의

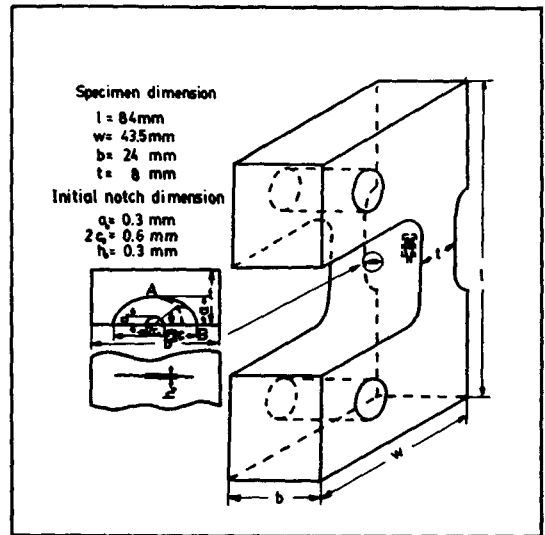


Fig. 1 Configuration of test specimen

Table 1 Chemical composition(wt. %)

| Designation | Cu | Si | Fe | Mn | Mg | Zn | Cr | Ti | Al |
|-------------|-------|-------|------|------|------|-------|------|-------|-----------|
| 5083-H113 | 0.043 | 0.086 | 0.22 | 0.48 | 4.66 | 0.011 | 0.16 | 0.024 | Remainder |

Table 2 Mechanical properties

| Designation | Yield strength MPa | Tensile strength MPa | Shear strength MPa | Elongation 1/16 in. thick specimen, % | Modulus of elasticity MPa × 10 ³ |
|-------------|--------------------|----------------------|--------------------|---------------------------------------|---|
| 5083-H113 | 228 | 317 | 173 | 16 | 71 |

變화를 생기게 [하고 이 變화를 없애도록 포텐쇼미터 (potentiometer)를 調整하면서 初期抵抗值, P_0 와 任意 反復數에서의 抵抗值 P 를 測定하여 實驗을 中斷함이 없이 균열進展과 同時에 균열단합을 함께 測定하는 것이다.

균열길이의 變化的 形狀의 變化는 균열이 어느 정도 큰 範圍에서는 비치 마크法을 利用하였고 균열이 작은 範圍에서는 이 方法이 바람직하지 못하여 다음과 같은 方法을 使用하였다. 즉 疲勞荷重을 中斷하고 靜荷重을 가한후 다시 疲勞荷重으로 균열을 進展(疲勞-靜荷重-疲勞)시킨 후 破斷하고 破面을 電子顯微鏡으로 撮影하여 균열 形狀의 變化를 觀察하였다.

Secant 法으로 구한 表面균열進展速度的 評價에서 應力擴大係數값 K 는 前報⁽⁵⁾에서도 使用한 Newman and Raju 式⁽¹⁹⁾에 의하여 구하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 形狀比의 變化

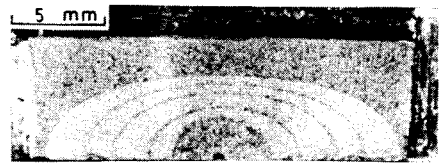
表面에 나타난 균열의 길이는 보통 移動顯微鏡 또는 테프리카法에 의하여 測定이 可能하지만 길이방향으로 進展한 균열길이를 測定함에는 어려운 점이 많다. 그런데 反復數의 增加에 따라 成長하는 表面균열은 균열면의 形狀에 變化가 생기게 되므로 이러한 形狀을 定量的으로 把握함은 表面길이로부터 균열길이를 類推함에 있어 중요한 資料가 된다.

Fig. 2(a)는 비치 마크法에 의해 얻은 균열의 形狀變化를 나타낸 巨視破面寫眞이고 Fig. 2(b)는 疲勞-靜荷重-疲勞 (fatigue-overload-fatigue)의 過程을 거친 후 얻어진 初期노치 先端附近의 균열면의 모양이다.

Fig. 2(a)에서 균열모양의 變化에 注意하면 처음에는 半圓에 가까운 균열면의 形狀을 나타내지만 反復荷重數의 增加에 따라 표면쪽의 균열길이 c 가 깊이방향의 균열길이 a 보다 顯著히 成長하여 균열면은 표면의 길이방향을 長軸으로 하는 橢圓形으로 變해가는데 이러한 현상은 다른 곳⁽²⁰⁾에서도 볼 수 있다.

한편 初期노치 先端附近에 있어서는 Fig. 2(c)의 模式圖에 나타낸 바와 같이 Cruse⁽²¹⁾ 등 및 Fleck 등⁽²²⁾의 報告와 마찬가지로 표면에서의 균열길이 c 가 균열길이 a 보다 약간 遲延되는 傾向임을 알 수 있다. 이러한 現象의 理由로는 표면과 약간 안쪽에서의 應力狀態가 다르기 때문에 균열進展에 대한 抵抗의 차이에 起因된다고^(23, 24) 할 수 있다.

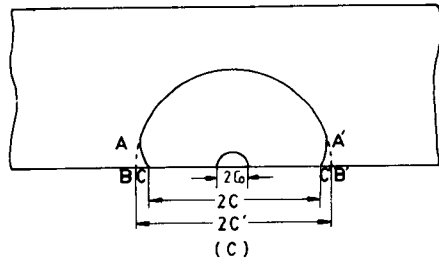
따라서 균열면의 形狀變化를 檢討하기 위하여 形狀



(a)



(b)



(c)

Fig. 2 Variation of surface crack shape in bending load obtained by (a) beach mark technique, (b) fatigue-overload-fatigue technique and (c) schematic diagram of crack shape

比 a/c 와 균열길이 a 를 두께 t 로 無次元한 量 a/t 의 關係를 Fig. 3에 나타내었다.

初期에는 a 에 비하여 표면에서의 둔화가 나타나 $a/c > 1$ 인 形態를 취하는 것을 알 수 있고 균열이 상당히 커졌을 때는 $a/c < 1$ 로서 $a/c=1$ 과 $a/t=1$ 을 맺는 선 주위에 혼어짐을 알 수 있다. 形狀比는 다음과 같다.

$$a/c = 1.2 - 1.5a/t, \quad r = -0.959 \text{ (相關係數)} \quad (1)$$

Fig. 4는 표면쪽의 균열길이 c 와 균열길이 a 와의 關係를 명확히 하기 위하여 나타낸 것으로 應力比 R 값에 關係없이 하나의 꺾어진 곡선으로 표시되며 最小 자승법으로 구한 식은

$$a = \begin{cases} 1.1c^{0.77}, & c \leq 2.0, \quad r = 0.996 \text{ (相關係數)} \\ 1.3c^{0.56}, & c > 2.0, \quad r = 0.986 \end{cases} \quad (2)$$

로 된다. 이 그림에서 보면 $c < 1.5\text{mm}$ 에서 $a/c > 1$ 인 形態를 취하고 $c = 1.5\text{mm}$ 近傍에서는 半圓形의 形態로 그리고 $c > 1.5\text{mm}$ 에서는 $a/c < 1$ 인 半橢圓形의 균열면이 됨을 알 수 있다.

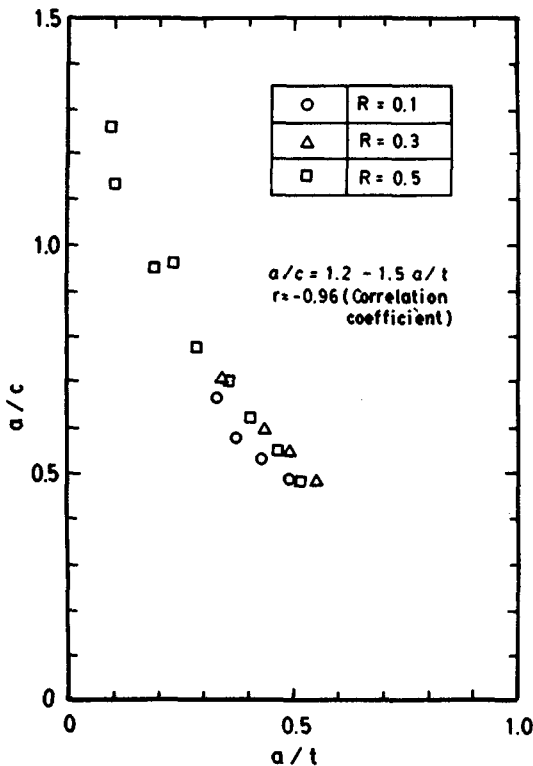


Fig. 3 Change of aspect ratio of surface cracks

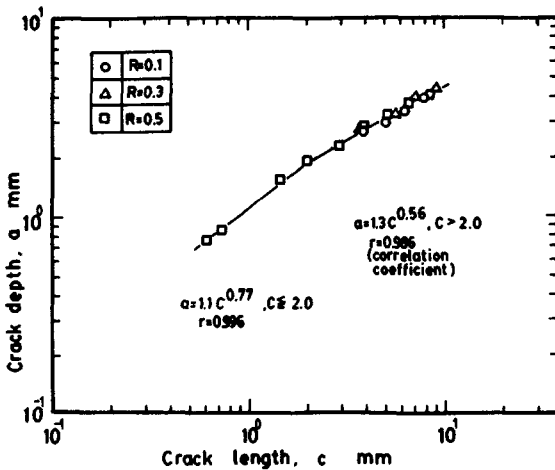


Fig. 4 Relation between crack length (c) and crack depth (a) of surface cracks

3.2 균열의進展舉動

균열길이 c 및 균열깊이 a를 幅의 半 b/2 및 두께 t로 無次元化한 量 2c/b 및 a/t를 縱軸에, 橫軸에는 포

텐쇼미터의 初期抵抗値 P₀를 균열이 進展했을 때의 抵抗値 P로 무차원화한 양 P₀/P-1로 하여 앞에서 얻은 資料들을 나타내면 Fig. 5과 같은 曲線이 된다. 여기서 R의 影響은 찾아볼 수 없고 2c/b는 P₀/P-1 = 0.024에서 꺾어지는 두개의 直線으로 나타낼 때

$$2c/b = \begin{cases} 0.61 (P_0/P-1)^{0.40}, & P_0/P-1 \leq 0.024, r=0.999 \\ 0.88 (P_0/P-1)^{0.49}, & P_0/P-1 > 0.024, r=0.999 \end{cases} \quad (3)$$

와 같은 식이 되며 a/t는 P₀/P-1과 直線관계가 있어 a/t = 0.60 (P₀/P-1)^{0.29}, r = 0.998 (4)로 表示되는 식으로 된다.

또한 初期노치 面積과 균열면 面積의 合 ΔA를 試片의 나머지 面積 bt-ΔA로 無次元化하여 P₀/P-1과의 關係를 그릴 때 역시 R의 依存性은 나타나지 않으며 두 점에서 꺾이는 직선으로 되고

$$\Delta A / (bt - \Delta A) = \begin{cases} 0.30 (P_0/P-1)^{0.71}, & P_0/P-1 \leq 0.023, r=0.997 \\ 0.54 (P_0/P-1)^{0.86}, & 0.023 < P_0/P-1 \leq 0.26, r=0.999 \\ 0.64 (P_0/P-1)^{0.98}, & P_0/P-1 > 0.26, r=0.998 \end{cases} \quad (5)$$

로 表示된다.

이상의 關係式으로부터 一定荷重下에서의 荷重反復數의 增加에 따른 표면균열길이 및 균열깊이의 進展舉動을 나타낸 것이 Fig. 6이다.

균열의 發生과 成長은 平均荷重이 가장 높은 (P_{mean} = 1800N) R=0.5에서 가장 빨리 發生·成長하고 平均荷重이 가장 낮은 (P_{mean} = 800N) R=0.1의 경우가 가장 늦게 發生·成長함을 알 수 있다. 또한 R에 관계없이 初期에는 c 및 a가 다같이 完만하게 성장하다가 荷重反復數의 增加와 함께 成長이 急激해짐을 볼 수 있고 c ≈ 1.5mm까지는 c < a인 形態로 成長하다가 그 以上에서는 c > a인 橢圓形으로 變化하는 傾向이 나타난다.

한편 c, a ≈ 1.5mm 近傍에서 荷重反復數에 대한 균열 성장의 增加率이 鈍화됨을 나타내고 있어 이 關係를 명확히 알아 보기 위하여 균열進展速度 dc/dN, da/dN과 應力大係幅 ΔK의 關係를 檢討하였다. Fig. 7(a), (b)는 各各 dc/dN 및 da/dN과 ΔK의 關係이다.

Fig. 7(a)로부터 균열進展速度는 ΔK = 5.6MPa√m 近傍까지는 增加率이 鈍化되고 以後부터는 直線의으로 增加하고 ΔK = 7.6MPa√m 近傍에서 다시 鈍화됨을

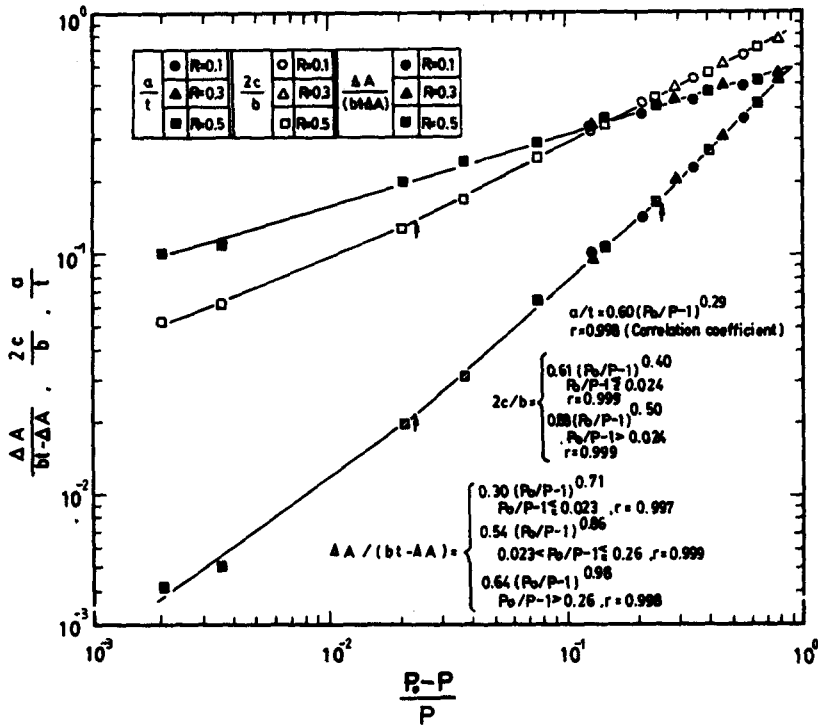


Fig. 5 Crack length (c), crack depth (a) and crack area (ΔA) calibration curve as a function of $P_0/P-1$

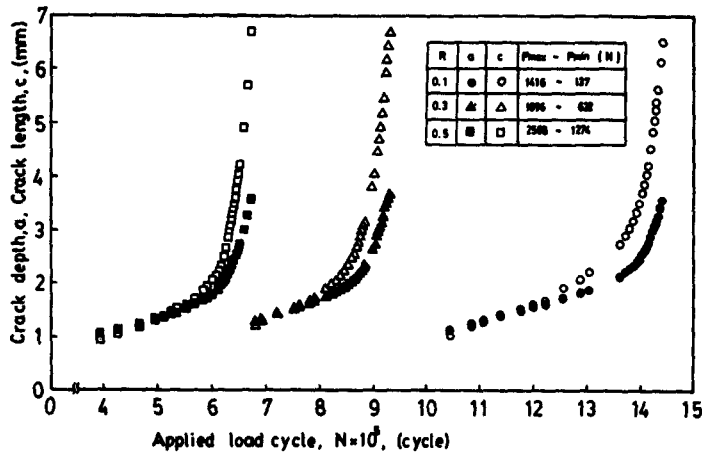


Fig. 6 Fatigue crack length (c) and crack depth (a) vs. numbers of applied load cycle (N)

보인다. 또한 그림 (b)에서도 da/dN 은 $\Delta K = 4.2 \text{MPa} \sqrt{m}$ 近傍까지鈍化되다가以後는直線으로增加, 그리고 $\Delta K = 5.5 \text{MPa} \sqrt{m}$ 附近에서 다시鈍化되는樣相을 나타낸다.

以上에서와 같이 균열進展速度 dc/dN , da/dN 은세部分으로構成되어 있고 특히本研究에서實驗한 ΔK

領域中 試驗片表面 ($\phi = 0$)에서 $\Delta K > 5.5 \text{MPa} \sqrt{m}$ 인領域과 깊이방향($\phi = \frac{\pi}{2}$)에서 $\Delta K > 4.5 \text{MPa} \sqrt{m}$ 인領域에서는 위로볼록(Concave)한 특성을 보이는데 5083-O 알루미늄 合金材의 경우⁽²⁵⁻²⁷⁾에도 $10^{-5} \text{mm/cycle} < da/dN < 10^{-3} \text{mm/cycle}$ 範圍에서 $da/dN - \Delta K$ 관계가

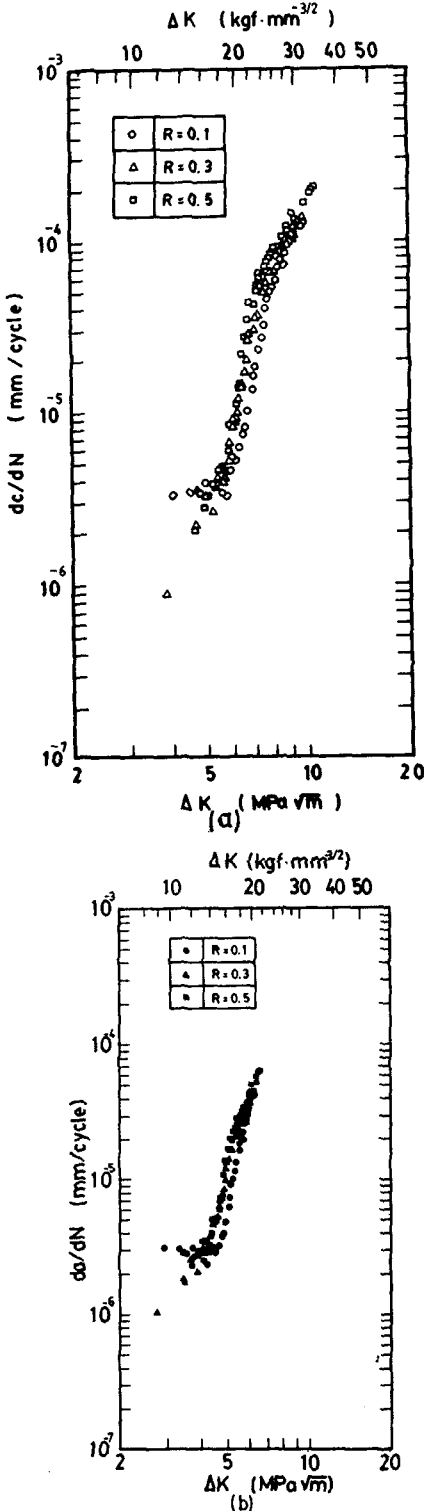


Fig. 7 Relation between fatigue crack propagation rate and stress intensity factor range

위로 볼록한 現象을 보여 이러한 現象은 材料의 特性이라고 생각된다.

進展速度的 R 依存性에 관해서도 세 部分으로 區分하여 說明된다. $\Delta K \approx 5.6 \text{MPa}\sqrt{m}$ (깊이 방향에서는 $4.2 \text{MPa}\sqrt{m}$)까지는 R 依存性이 특히 크고 $5.6 \text{MPa}\sqrt{m} \sim 7.6 \text{MPa}\sqrt{m}$ (깊이 방향에서는 $4.2 \sim 5.5 \text{MPa}\sqrt{m}$)까지 一定한 依存性을 보이며 $\Delta K > 7.6 \text{MPa}\sqrt{m}$ (깊이 방향에서는 $5.5 \text{MPa}\sqrt{m}$)에서는 依存性이 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다.

初期균열의 進展舉動이 鈍化되거나 停止되는 傾向은 노치效果에 의한 것이 하나의 原因으로 指適되고⁽⁷⁻⁹⁾ 있지만 균열進展에 대한 鈍化現象이 가장 顯著한 本研究의 균열치수가 物理的인 작은 균열 (physical short crack)^(2,4,6)의 크기에 해당되는 것으로 보아 균열進展 鈍化現象은 균열단합을 이용하여 說明할 수 있다^(2,3)고 생각된다.

3.3 균열단합 現象

Fig. 8(a), (b)는 dc/dN , da/dN 과 有效應力擴大係數幅 ΔK_{eff} 와의 관계로서 全 ΔK_{eff} 領域에서 R 값에 관계없이 균열進展速도는 좁은 홀어짐의 폭안에 整理됨을 알 수 있어 균열進展의 鈍化現象은 균열단합과 관련이 있다고 할 수 있다.

代表的인 균열단합機構로서는 酸化物誘起型, 破面거칠기誘起型 및 塑性誘起型 등이 알려져 있지만 ΔK_{th} 보다 높은 領域에서 實驗한 本研究의 結果에 미치는 균열단합의 影響은 前者에 의한 것보다는 後者の 두 機構에 의한 것이 중요하다고 할 수 있다.

Fig. 9는 微視破面寫眞의 代表的인 例로서 낮은 ΔK 領域에 있어 $R=0.1$ 에서는 剪斷型 (Mode II) 破面이 많고 $R=0.3$ 및 $R=0.5$ 에서는 引張型 (Mode I) 破面이 많으며 ΔK 가 높은 領域에서는 R에 관계없이 비슷한 破面樣相을 나타내고 있다. 따라서 낮은 ΔK 領域에서의 균열進展鈍化現象은 7075-T651 알루미늄 合金의 結果⁽⁵⁾와 마찬가지로 破面거칠기에 의한 균열단합^(6,17)의 影響을 排除할 수는 없다.

한편 Elber⁽²⁸⁾에 의해 提案된 塑性誘起균열단합은 疲勞균열이 균열先端에 形成한 塑性域을 通過하여 進展하므로 疲勞荷重의 引張荷重中에서도 破面사이의 接觸을 일으켜 壓縮應力을 作用하게 하고 또한 塑性變形을 한 균열面이 增加함에 따라 接觸面積을 커지게하여 균열열립에서의 應力擴大係數 K_{op} 를 增加시킨다⁽¹⁸⁾. 따라서 第II段階領域에서의 균열단합現象을 塑性誘起의 影響에 대하여 檢討할 필요성이 있다고 생각된다.

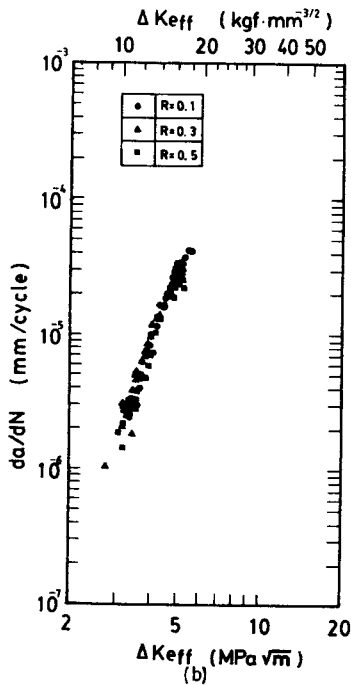
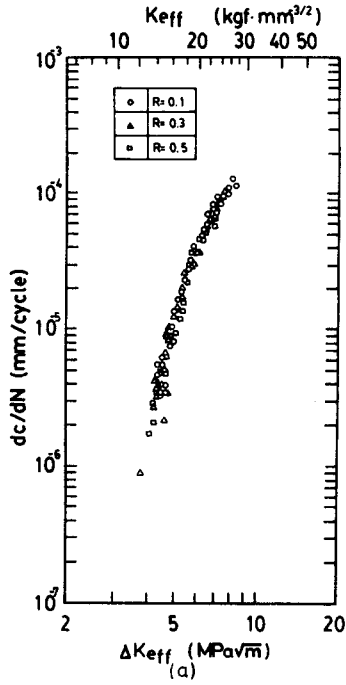


Fig. 8 Relation between fatigue crack propagation rate and effective stress intensity factor range

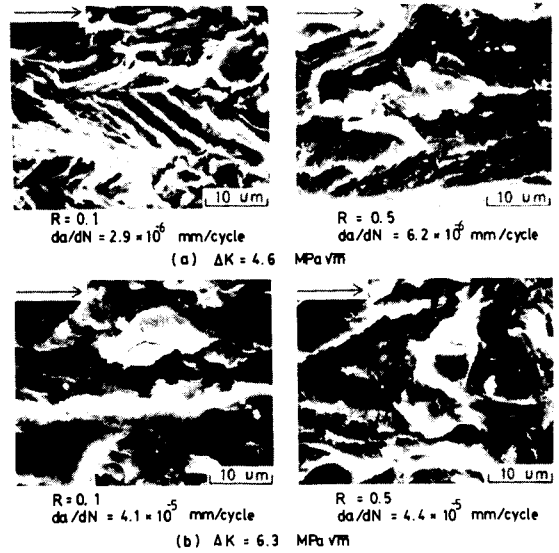


Fig. 9 Scanning electron micrographs of fracture surface

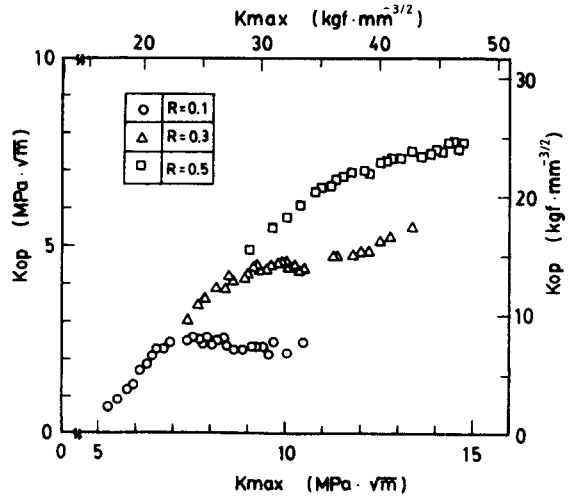


Fig. 10 Relation between stress intensity factor at crack opening point (K_{op}) and maximum stress intensity factor (K_{max})

Fig. 10 은 균열열림점에서의 應力擴大係數 K_{op} 와 最大應力擴大係數 K_{max} 와의 關係이다. $R=0.1$ 인 경우 K_{max} 값이 $5.3 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 에서 약 $6.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 로 變함에 따라 거의 直線의으로 增加하지만 $K_{max}=8.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 까지는 거의 一定하게 維持되며 그 以上에서는 다시 약간 增加하는 傾向을 보인다. 또한 $R=0.3$ 의 경우 $K_{max}=8.5 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 까지 K_{op} 가 增加하다가 $K_{max}=11 \text{ MPa}\sqrt{m}$ 까지 거의 一定하고 그 以上에서는 다시

약간 증가함을 보이며 $R=0.5$ 의 경우도 비슷한 傾向을 보인다. 이와 같이 K_{max} 에 대한 K_{op} 의 增加 · 一定 · 增加現象은 $\Delta K=5.6\text{MPa}\sqrt{m}$ 및 $\Delta K=7.5\text{MPa}\sqrt{m}$ 에서 균열進展速度 (dc/dN)가 변하는 것과 一致한다.

또한 Fig. 11의 有效應力擴大係數幅比 U 와 K_{max} 의 關係를 보면 R 값이 一定할 때 K_{max} 의 增加에 따라 U 는 急激히 減小하여 最小값에 이룬 후 다시 增加하며 이 增加現象은 K_{max} 의 增加에 따라 약간 둔화하는 傾向을 나타낸다.

그리고 Fig. 12와 K_{op} 와 c 와의 關係에 있어서도 R

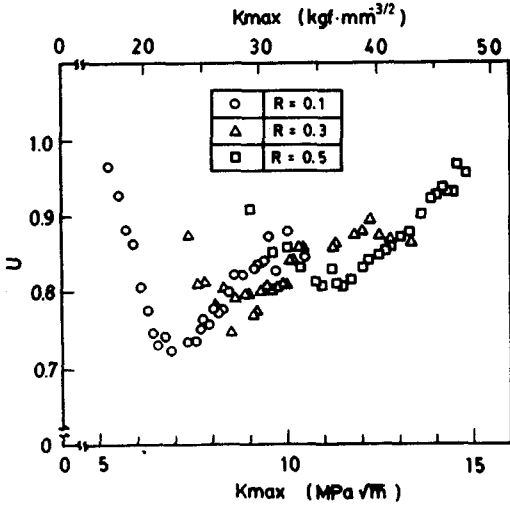


Fig. 11 Relation between effective stress intensity factor range ratio (U) and maximum stress intensity factor (K_{max})

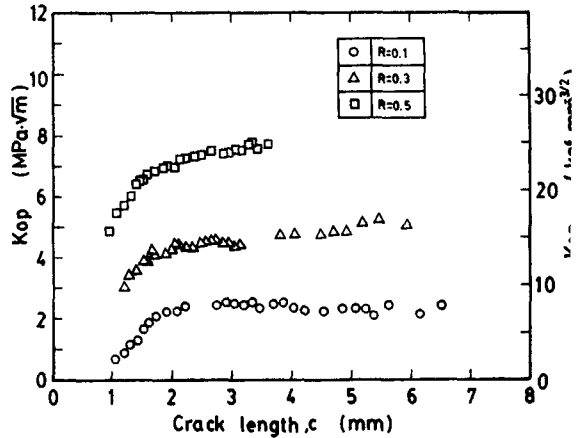


Fig. 12 Relation between stress intensity factor at crack opening point (K_{op}) and crack length (c)

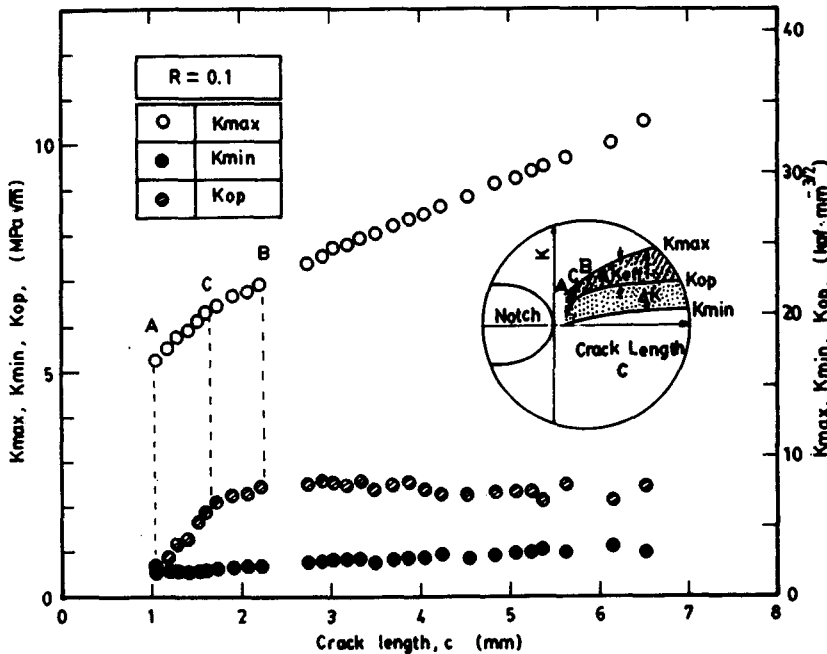


Fig. 13 Variation of stress intensity factors (K_{max} , K_{op} , K_{min}) with increasing crack length (c)
 K_{max} : Maximum stress intensity factor
 K_{op} : Stress intensity factor at crack opening point
 K_{min} : Minimum stress intensity factor

의 증가에 따라 同一한 균열길이에서 K_{op} 값이 증가하는 現象을 나타내고 있다.

以上的 結果에서 K_{max} 의 증가에 따른 K_{op} 의 直線的인 上昇現象, U 의 急激한 減小現象 그리고 c 의 증가에 따른 K_{op} 의 急激한 上昇現象을 나타낸 낮은 ΔK 領域을 除外하면 K_{max} 와 K_{op} 및 U 와의 관계, c 와 K_{op} 와의 관계는 塑性誘起균열단합의 特徵을 잘 나타내고 있어 이 機構에 의한 균열단합의 影響이 크다고 할 수 있다.

그런데 K_{op} 가 K_{max} 및 c 의 증가에 따라 直線的으로 上昇하는 領域($R=0.1$ 인 경우 $\Delta K < 5.5 \text{MPa}\sqrt{m}$)과 K_{max} 의 증가에 따라 U 가 急激하게 低下하는 部分의 균열단합機構에 대해서는 아직도 檢討의 餘地가 있다. Fig. 13은 $R=0.1$ 에 대한 균열길이 c 와 應力擴大係數 K_{max} , K_{min} 및 K_{op} 의 관계를 나타낸 것이다.

그림중의 插圖는 Liaws⁽²⁾가 提案한 塑性誘起 단합機構의 모델로서 本 研究結果와는 잘 一致하고 있다. 따라서 Fig. 9의 낮은 ΔK 에서 觀察한 微視破面の 結果와 함께 檢討하여 보면 K_{max} 에 대한 K_{op} 및 U 의 直線的인 上昇現象과 작은 크랙에서의 K_{op} 의 上昇現象은 塑性誘起 균열단합과 破面거칠기誘起 균열단합의 機構가 存在하기 때문이라고 할 수 있다.

4. 結 論

작은 初期노치로부터 發生한 表面균열의 進展舉動을 檢討하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 表面균열의 初期에는 균열길이에 비하여 균열길이 方向의 成長이 鈍化되며 균열이 클 때는 균열길이 方向이 긴 半橢圓形으로 變化되어 다음과 같은 形狀比를 보인다.

$$a/c = 1.2 - 1.5a/t$$

(2) 平均荷重이 높을 수록 균열이 빨리 發生하여 成長하고 應力比 R 에 관계없이 初期에는 균열이 完滿하게 성장하다가 荷重反復數의 증가와 함께 점점 急激히 成長한다.

(3) 균열진전속도는 ΔK 領域에 따라 增加率이 鈍化·增加·鈍化의 現象을 나타내며 특히 낮은 ΔK 領域에서의 鈍化現象은 R 값이 작을수록 顯著하다.

(4) R 값의 大小에 따른 균열進展速度의 차이는 균열단합을 고려한 ΔK_{eff} 로서 整理하면 거의 消滅되고 本 研究의 ΔK 範圍에서의 균열進展速度의 傾向은 破面거칠기誘起 및 塑性誘起 균열단합機構로써 잘 說明된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 연구비지원에 의한 “알루미늄 합금의 표면균열 진전거동에 관한 연구”의 일부이며 동재단에 감사 합니다.

參 考 文 獻

- (1) C.W. Smith, "Stress Intensity and Flaw-Shape Variations in Surface Flaws", *Experimental Mechanics* pp.126~133, April, 1980
- (2) P.K. Liaw and W.A. Logsdon, "Crack Closure: An Explanation for Small Fatigue Crack Growth Behavior", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 22, No. 1, pp.115~121, 1985
- (3) M.N. James and J.F. Knott, "An Assessment of Crack Closure and the Extent of the Short Crack Regime in QIN(HY80) Steel", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 8, No. 2, pp.177~191, 1985
- (4) R. Bu and R.I. Stephens, "Comparison of Short and Long Fatigue Crack Growth in 7075-T6 Aluminum", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol. 9, No. 1, pp.35~48, 1986
- (5) 朴榮祖, 金楨圭, 辛龍承, 金聖珉, "7075-T651 Al 合金의 表面균열進展에 미치는 應力比의 影響", 大韓機械學會論文集, 第10卷, 第1號, pp.62~69, 1986
- (6) 田中啓介, "微小疲勞き裂の傳ば", *材料*, Vol. 33, No. 371, pp.961~972, 1984
- (7) M.H. El Haddad, T.H. Topper and K.N. Smith, "Prediction of Non Propagating Cracks", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 11, pp.573~584, 1979
- (8) M.M. Hammouda, R.A. Smith and K.J. Miller, "Elastic-Plastic Fracture Mechanics for Initiation and Propagation of Notch Fatigue Cracks", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 2, pp. 139~154, 1979
- (9) M.H. El Haddad, K.N. Smith, and T.H. Topper, "A Strain Based Intensity Factor Solution for Short Fatigue Cracks Initiating from Notches", *Fracture Mechanics*, ASTM STP 677, pp.274~289, 1979
- (10) K. Tanaka and Y. Nakai, "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, 1983
- (11) A.M. Sullivan and T.W. Crooker, "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*, Vol. 98, pp.179~184, May 1976
- (12) 北川英夫, 高橋進, "微小な疲労き裂の成長とその下限条件に関する破壊力学的研究", *日本機械學會論文集(A)*, Vol. 45, No. 399, pp.1289~1303, 1979
- (13) 宋智浩, "Notch 材 疲労斗 Kikukawa-Compliance 法", *大韓機械學會論文集*, Vol. 5, No. 1, pp. 46~53, 1981
- (14) J. Lankford, T.S. Cook and G.P. Sheldon, "Fatigue Microcrack Growth in a Nickel-Base Superalloy", *International Journal of Fracture*, Vol. 17, No. 2, pp. 143~155, April 1981
- (15) Y. Nakai, K. Tanaka, and T. Nakanishi, "The Effects of Stress Ratio and Grain Size on Near-threshold Fatigue Crack Propagation in Low-Carbon Steel", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, No. 3~4, pp.291~302, 1981.
- (16) P.K. Liaw, V.P. Swaminathan, T.R. Leax and J.K. Donald, "Influence of Load Ratio on Near-threshold Fatigue Crack Propagation Behavior", *Scripta Metallurgica*, Vol. 16, pp.871~876, 1982
- (17) P.K. Liaw, A. Saxena, V.P. Swaminathan, and T.T. Shih, "Effects of Load Ratio and Temperature on Near-threshold Fatigue Crack Propagation Behavior in CrMoV Steel", *Metallurgical Transactions A*, Vol. 14A, pp.1631~1640, 1983
- (18) S. Suresh and R.O. Ritchie, "On the Influence of Environment on the Load Ratio Dependence of Fatigue Thresholds in Pressure Vessel Steel", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 18, No. 4, pp.785~800, 1983
- (19) J.C. Newman JR. and I.S. Raju, "An Empirical Stress-Intensity Factor Equation for the Surface Crack", *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 15, No. 1~2, pp.185~192, 1981
- (20) 川原正言, "溶接継手強度の破壊力学による評価", "西山記念技術講座", 鐵鋼材料のミクロ組織と破壊力学, 日本鐵鋼協會, 1979
- (21) T.A. Cruse, G.J. Meyers, and R. B. Wilson, "Fatigue Growth of Surface Cracks, Flaw Growth and Fracture", *ASTM STP 631*, pp.174~189, 1977
- (22) N.A. Fleck, I.F.C. Smith and R.A. Smith, "Closure Behavior of Surface Cracks", *Fatigue of Engineering Materials and Structures*, Vol. 6, No. 3, pp.225~239, 1983
- (23) K. Obrtlík and J. Polak, "Fatigue Growth of Surface Cracks in the Elastic-Plastic Region", *Fatigue and Fracture of Engineering Materials and Structures*, Vol 8, No. 1, pp.23~31, 1985
- (24) L. Hodulak, H. Kordisch, S. Kunzelmann and E. Sommer, "Influence of the Load Level on the Development of Part-through Cracks", *International Journal of Fracture*, Vol. 14, pp.R35~R38, 1978
- (25) K. Tanaka, S. Matsuoka, V. Schmidt and M. Kuna, "Influence of Specimen Geometry on Delayed Retardation Phenomena of Fatigue Crack Growth In HT-80 Steel and A5083 Aluminum Alloy", *Advance in Fracture Research, Prints of the International Conference on Fracture(ICF5)*, Cannes, France, Vol. 4, pp.1789~1798, 1981
- (26) 城野政弘, 宋智浩, 岡部雅彦, 上杉暢彦, 大垣雅由, 江口直紀, "發生初期微小疲労き裂から弾塑性巨視疲労き裂までのき裂進展速度と開閉口挙動", *材料*, Vol. 33, No. 368, pp.560~565, 1984
- (27) 朴榮祖, 金楨圭, 金一鉉, 5083-O 알루미늄 合金의 疲労균열進展舉動과 균열 닫힘에 관한 研究, *大韓機械學會論文集*, 第10卷, 第2號, pp.208~214, 1986
- (28) W. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", *ASTM, STP486*, pp.230~242, 1971