

< 論 文 >

2017-T3 알루미늄 합금의 疲勞龜裂進展과 龜裂닫힘現象

宋 智 浩\* · 金 一 鉉\*\* · 辛 龍 承\*\*\*

(1979年 12月 24日 接受)

Fatigue Crack Growth and Crack Closure in 2017-T3 Aluminum Alloy

Ji Ho Song, Il Hyun Kim and Yong Seung Shin

Abstract

Kikukawa-Compliance method using a conventional clip-on gauge was employed to investigate fatigue crack growth and crack closure in 2017-T3 aluminum alloy. The crack growth rate plot against stress intensity range  $\Delta K$  on a log-log diagram exhibits a bilinear form with a transition at the growth rate of  $10^{-4}$  mm/cycle. The bilinear form appears still in the plot of growth rate versus effective stress intensity range  $\Delta K_{eff}$ . Fatigue crack growth rate could be well represented by  $\Delta K_{eff}$ . The experimental results indicate that the effective stress intensity range ratio  $U$  depends on the maximum stress intensity factor  $K_{max}$ , but the stress ratio  $R$  does not affect  $U$ . The crack opening stress intensity factor  $K_{op}$  tends to increase with increasing  $K_{max}$  and decrease with increasing  $\Delta K$ .

1. 序 論

荷重이 零이 되기 前인 引張荷重下에서도 疲勞龜裂이 部分的으로 또는 全體의으로 닫히는 現象(crack closure phenomenon, 龜裂닫힘現象)을 觀察한 Elber는, 疲勞龜裂進展은 龜裂이 完全히 열려 그 龜裂先端에 特異性이 存在하는 동안 일어난다고 생각하는 것이 合理的이라 指摘하고, 疲勞龜裂進展速度  $\frac{da}{dN}$  를 stress intensity range(應力強度係數幅)  $\Delta K$ 로 表示하는 從來의

$$\frac{da}{dN} = A \cdot \Delta K^m \quad (1)$$

과 같은 形式보다는, 龜裂닫힘現象을 考慮한 有效應力強度幅(effective stress intensity range)  $\Delta K_{eff}$ 를 使用하여 다음과 같이 表示하는 것이 바람직하다는 提案을 했다<sup>1,2)</sup>.

\* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

\*\* 正會員, 大林工業專門大學

\*\*\* 正會員, 韓國科學技術情報센터

$$\frac{da}{dN} = C \cdot \Delta K_{eff}^n = C \cdot (U \Delta K)^n \quad (2)$$

여기서  $U$ 는 有效應力強度係數幅比(effective stress intensity range ratio) 또는 有效應力幅比(effective stress range ratio)라 하여, 다음과 같이 定義되는 量으로서

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{op}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{\Delta \sigma_{eff}}{\Delta \sigma} \quad (3)$$

$K_{op}$  및  $\sigma_{op}$ 는, 各各, 龜裂이 完全히 열리는 點(crack opening point, 龜裂열림點)에서의 應力強度係數 및 應力이다.

Elber는 2024-T3 알루미늄합금의 경우,  $U$ 는 應力比  $R \left( = \frac{K_{min}}{K_{max}} = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}} \right)$ 에만 依存하여,  $-0.1 < R < 0.7$ 에서  $U = 0.5 + 0.4R$

과 같은 關係가 成立한다는 結果도 같이 報告했다<sup>2)</sup>.

龜裂닫힘現象을 考慮한 有效應力強度係數概念은, 一定振幅荷重下에서의 應力比 $R$ 과 같은 力學的 因子的 疲勞龜裂進展速度에 미치는 影響을 定量的으로 表示可能

Table 1. Chemical composition(%) and mechanical properties

Designation	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Al	Tensile strength $\sigma_B$ (kg/mm <sup>2</sup> )	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation %
2017-T3	4.26	0.59	0.28	0.56	0.18	0.036	Rest	44.9	28.3	19

할 뿐만 아니라, 變動荷重下에서 일어나는 龜裂進展의 遲延(retardation) 또는 加速(acceleration)現象에 대해서도 定量的 說明可能性<sup>2)</sup>을 保有하고 있어, Elber 以來, U의 應力比R 및 K值依存性<sup>3-11)</sup>, threshold level에서의  $\Delta K_{eff}$ 값<sup>6,11)</sup>, 또는 變動荷重下에서의 龜裂 열림點의 舉動<sup>12-16)</sup> 등에 關係 研究가 活潑히 이루어지고 있다.

龜裂단함現象은, 力學的 因子以外에 notch等の 幾何學的 因子 또는 環境條件等の 龜裂進展에 미치는 影響을 檢討하려 할 경우에도 考慮하여야 할 重要한 事項으로서, 따라서 材料의 全般的인 疲勞龜裂進展舉動을 論하려 할 경우 龜裂단함現象에 關한 充分한 data의 蓄積이 重要하다 할 수가 있을 것이다.

그러나, 龜裂단함現象의 檢出 및 測定은 容易한 편은 아니며, 더욱이 測定方法에 따라 相違한 結果가 얻어질 憂慮性도 없지 않아 있으므로<sup>6,17)</sup>, 筆者中の 한사람은 現在 龜裂進展 觀察에 널리 使用되고 있는 主要測定方法을 檢討하여, 現時點에서는 compliance測定을 通하여 龜裂단함現象 및 龜裂길이를 同時에 連續적으로 測定하는 方法이 合理的이고 經濟的인 點을 밝히고, 이를 考案者의 이름에 따라 Kikukawa-Compliance法이라 命名하고 또한 이를 利用함에 있어, 實際考案者의 方法보다 簡便하고 經濟的인 點을 勘案하여, 製作 또는 購入이 比較的 容易한 clip-on gauge를 使用하는 試驗法을 提案한 바 있다<sup>18)</sup>.

本 論文은, 筆者들이 clip-on gauge를 使用한 Kikukawa-Compliance法을 利用함에 있어 測定感度 改善을 위해 若干의 方便을 講究하고, 이에 의해 2017-T3 알루미늄合金材에 대해 疲勞龜裂進展實驗을 施行하여 얻은, 몇가지 興味있는 結果에 대해서 報告한 것이다.

## 2. 試驗材料 및 試驗片

本 試驗에 使用한 材料는 두께가 30mm인 2017-T3 알루미늄合金板材로서, 그 化學成分 및 機械的性質은 Table 1과 같다.

ASTM이 提案하고 있는 疲勞龜裂進展速度試驗法 ASTM-E647-78T<sup>19)</sup>에 準據하여, 試驗片으로서 CT-

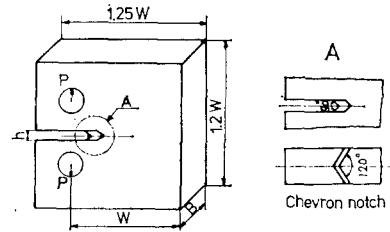


Fig. 1. Test specimen configuration.

試驗片(compact tension type)을 使用하기로 하고, 初期疲勞龜裂發生을 위한 notch(crack starter notch) 形狀으로서는 龜裂發生의 容易性 및 그 後의 進展經路 등을 勘案하여 Fig. 1에 보이는 바와 같은 chevron notch를 選擇했다. cutter tip angle은 90°로 하고 notch밑半徑은 可及의 0.25mm以下가 되도록 했다. 試驗片採取方向은 L-T方向이며, 試驗片두께는 10mm로 하였다.

龜裂이 chevron-notch部分을 充分히 離脫한 後의 本試驗片에 대한 K값은 다음式으로 부터 얻어진다.

$$K = \frac{P(2+a)}{B\sqrt{W}(1-\alpha)^{3/2}} (0.886 + 4.64\alpha - 13.32\alpha^2 + 14.72\alpha^3 - 5.6\alpha^4) \quad (4)$$

여기서  $\alpha = a/w$ 이며, 이 式의 有效範圍는  $a/w > 0.2$ 이다<sup>19)</sup>.

## 3. 試驗裝置 및 試驗方法

試驗裝置로서는 MTS-10t 油壓 servo式疲勞試驗機(Series 810)를 使用하였으며, 荷重변율이 速度는 11Hz를 採用했다.

龜裂길이 및 龜裂단함現象은, load cell의 荷重出力 및 clip-on gauge의 變位出力을 利用하여 Kikukawa-Compliance法으로 檢出하나, 이 경우 荷重信號와 變位信號와의 電氣的減算이 必要하여, 荷重 및 變位信號의 S/N比는 勿論, noise의 絕對值도 測定感度(sensitivity)에 큰 影響을 끼치게 된다. 筆者들이 保有하고 있는 MTS-system(406 Control Package)의 荷重信

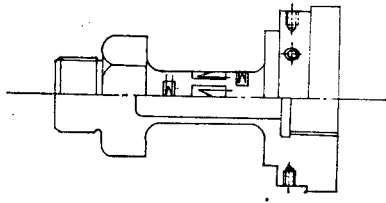


Fig. 2. Load cell.

號用 transducer出力에는 微小한 數KHz의 高周波成分 noise外에, 電源에 關係되는 120Hz의 低周波成分 noise가 10mVp-p(定格荷重比 0.1%) 包含되어 있어, 이는 測定感度の 顯著한 低下를 招來하므로, 荷重信號의 S/N比를 높임과 同時에 compliance測定에 있어서 noise를 可及의 除去할 수 있도록, Fig. 2와 같은 1t用 load cell를 自家製作하여 Fig. 2 中에 表示한 바와 같이 strain gauge(自己溫度補償形 foil phester gauge, 350Ω)를 計 8장 貼付하여, 各各 4개의 strain gauge로 形成되는 두개의 bridge回路를 만들어, 試驗機制御用信號와 測定用信號를 分離시켰다.

變位檢出用 clip-on gauge로서는 MTS社製(Series 632.02)를 使用하였다.

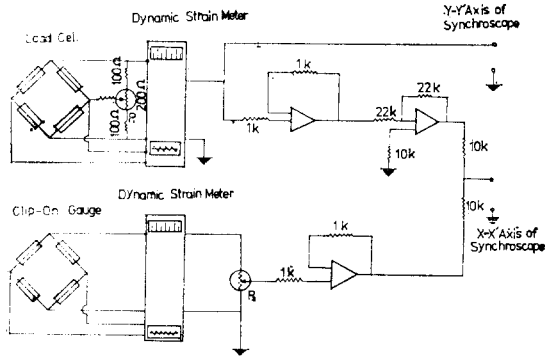


Fig. 3. Circuit diagram for monitoring crack length and crack closure.

Compliance測定用 荷重信號 및 clip-on gauge 變位信號는, Fig. 3과 같이 (low-pass filter가 裝備되어 있는) dynamic strain meter 및 OP-Amp를 거쳐 增幅 및 減算되어, 各各 synchroscope의 y軸 및 x軸에 入力된다. 實際測定過程에 關係서는 文獻<sup>6,18)</sup>에 詳細히 記述되어 있으므로 여기서는 省略하기로 하였으나, Fig. 3中の Helipot  $P_1$ (1000눈금, 10회轉)은 荷重測定用이며, Helipot  $P_2$ (1000눈금, 10회轉)는 龜裂길이

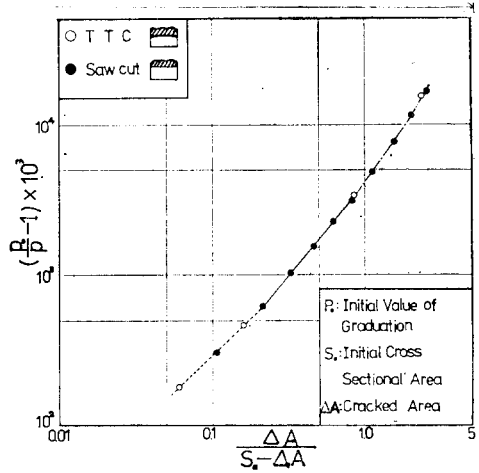


Fig. 4. Calibration curve.

測定用으로서, 測定은 所謂 零點補償法(zero method)으로 行하여 졌다.

Fig. 4는 試驗片斷面中の 龜裂面積과 Helipot  $P_2$ 의 눈금의 變化와의 calibration線圖로서, 가로軸 및 세로軸은 各各, 各瞬間의 試驗片殘存面積 및 Helipot 눈금값으로 나누어 無次元化되어 있다. Fig. 4中の 白點은 實際疲勞龜裂에 의해 얻어진 結果이며, 黑點은 試驗片數와 時間을 節約하기 위하여 0.2mm두께의 톱으로 缺陷의 길이를 漸次 增加시켜 얻어진 結果로서, 前報告<sup>18)</sup>의 경우와 마찬가지로, 두 結果는 잘 一致하고 있음을 알 수가 있다. Helipot의 눈금과 龜裂面積과의 關係는 兩對數線圖上에서 4개의 直線으로 近似하여 使用하였으며, 本 試驗의 경우 龜裂길이의 檢出感度は  $30\mu$ 以下이다.

龜裂닫힘現象에서의 龜裂열림點(crack opening po-

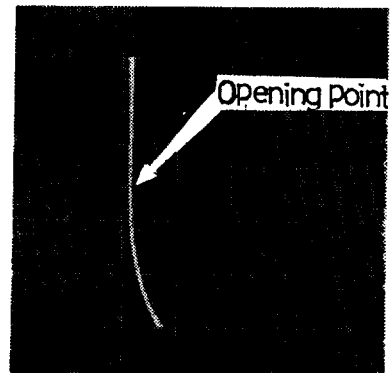


Photo. 1. Applied load-subtracted displacement relation.

int)의測定은寫眞撮影에의했으며,그一例가Photo. 1이다.

初期疲勞龜裂의發生 및 chevron notch部에서의進展은可及의 낮은荷重 level( $\Delta P$ =約 200kgf,  $P_{max}$ =約 280kgf)에서 일어나도록 하였으며,龜裂이 chevron notch部로부터  $h$ (約 3mm, Fig. 1參照)以上進展한狀態에서부터進展速度에 대한 data를 얻기 시작하였다.

試驗은應力比  $R=0.3$ 과  $0.5$ 에 대해서荷重漸增方式으로 행하여 졌다.

4. 試驗結果 및 考察

Fig. 5는兩對數線圖上에서應力強度係數幅 $\Delta K$ 와龜裂進展速度 $\frac{da}{dN}$ 와의關係를 나타낸 것으로,應力比가  $R=0.3$ 에서  $0.5$ 로增加하면龜裂進展速度도增加하나,

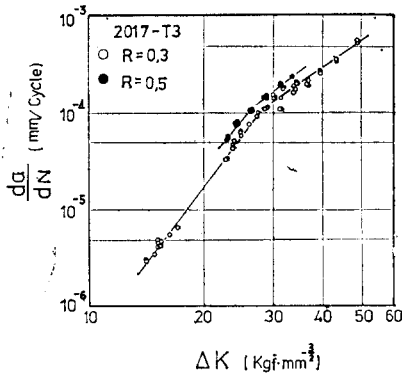


Fig. 5. Crack growth rates as a function of  $\Delta K$

그增加程度는그다지크지않아, 2017-T3알루미늄合金의 경우應力比 $R$ 의影響을그리強하지는않는것으로 보인다. 또한그림에서알수있는바와같이,應力強度係數幅 $\Delta K$ 와龜裂進展速度 $\frac{da}{dN}$ 와의關係는應力比  $R=0.3$  및  $0.5$ 의 두 경우 모두龜裂進展速度  $10^{-4}$ mm/cycle附近에서 그傾斜가變化하는舉動을 나타내고 있으며,各 경우에 대해서回歸(regression)關係를 구하여 보면

i)  $R=0.5$ 의 경우

a)  $\frac{da}{dN} \leq 1.24 \times 10^{-4}$ mm/cycle에 대해

$$\frac{da}{dN} = 8.57 \times 10^{-12} \cdot \Delta K^{5.00} \quad (\text{相關係數 } r=0.983)$$

b)  $\frac{da}{dN} \geq 1.24 \times 10^{-4}$ mm/cycle에 대해

$$\frac{da}{dN} = 4.66 \times 10^{-9} \cdot \Delta K^{3.09} \quad (r=0.984)$$

ii)  $R=0.3$ 의 경우

a)  $\frac{da}{dN} \leq 1.19 \times 10^{-4}$ mm/cycle에 대해

$$\frac{da}{dN} = 3.59 \times 10^{-12} \cdot \Delta K^{5.15} \quad (r=0.995)$$

b)  $\frac{da}{dN} \geq 1.19 \times 10^{-4}$ mm/cycle에 대해

$$\frac{da}{dN} = 1.04 \times 10^{-8} \cdot \Delta K^{2.78} \quad (r=0.965)$$

가 되어,傾斜 $m$ 의 크기는  $R=0.3, 0.5$ 의 두 경우 거의同一한 값을 취하고 있다.

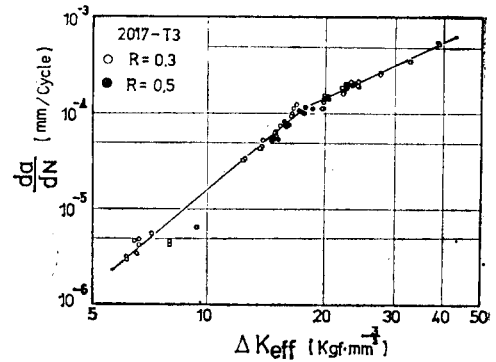


Fig. 6. Crack growth rates as a function of  $\Delta K_{eff}$ .

Fig. 6은龜裂進展速度 $\frac{da}{dN}$ 을龜裂합력現象을考慮한有效應力強度係數幅 $\Delta K_{eff}$ 로整理한 것으로,이 경우本試驗範圍內에서는應力比 $R$ 에關係없이龜裂進展速度는 $\Delta K_{eff}$ 에의해一義의으로表示됨을알수가 있다. 그러나,이 경우에도 Fig. 5의 경우와 마찬가지로龜裂進展速度  $10^{-4}$ mm/cycle附近에서傾斜가變化하는興味있는舉動을 나타내고 있으며,龜裂進展速度 $\frac{da}{dN}$ 와 $\Delta K_{eff}$ 의回歸關係는

a)  $\frac{da}{dN} \leq 1.30 \times 10^{-4}$ mm/cycle에 대해

$$\frac{da}{dN} = 5.64 \times 10^{-9} \cdot \Delta K_{eff}^{3.43} \quad (r=0.989)$$

b)  $\frac{da}{dN} \geq 1.30 \times 10^{-4}$ mm/cycle에 대해

$$\frac{da}{dN} = 4.30 \times 10^{-7} \cdot \Delta K_{eff}^{1.95} \quad (r=0.981)$$

가 된다.

兩對數線圖上에서龜裂進展速度 $\frac{da}{dN}$ 와應力強度係數幅 $\Delta K$ 사이의直線關係가成立하는 이른바 Region II의區間(普通  $10^{-6}$ mm/cycle로부터  $10^{-3}$ mm/cycle에

이르는 速度區間)에서, Fig. 5와 같이 比較의 높은 進展速度  $10^{-4}$ mm/cycle 附近을 境界로 하여 直線의 傾斜가 減少하는 現象은 高力알루미늄합금系 2024-T3 또는 7075-T6材에서 一般的으로 觀察되는 現象은 아니며, 따라서 이에 關한 報告는 거의 없는 實情이나, 最近 角田과 Pelloux<sup>20)</sup>가 7075-T6材에 대해 이러한 現象을 觀察하여 應力狀態의 遷移(平面變形率狀態→平面應力狀態)를 그 原因으로 推測하고 있다. 筆者들의 調査에 의하면, 各 研究當事者에 의한 言及은 없으나, Katcher와 Kaplan의 2219-T851材에 대한 實驗結果<sup>4)</sup> 및 小寺澤과 南坂의 2017-T3材에 대한 實驗結果<sup>21)</sup>에서 Fig. 5와 같은 舉動을 若干 觀察할 수가 있다. 그러나, Region II 區間에서  $\frac{da}{dN}$ 와  $\Delta K$ 의 關係를 나타내는 直線의 傾斜가 進展速度  $10^{-4}$ mm/cycle 附近에서 顯著하게 減少하는 典型的인 例는, 近來 Yoder, Cooley 및 Crooker의  $\beta$ -燒鈍된 Ti-6Al-4V 合金에 關한 一連의 研究<sup>22~25)</sup>에서 報告되어, 이 遷移現象은 이 材料의 微視組織 Widmanstätten Packet의 크기와 龜裂先端에서 되풀이되는 塑性域의  $y$ 方向(進展方向에 直角인 方向)의 크기와의 相對的 關係에서 說明되고 있다.

따라서 Fig. 5에서 나타난 2017-T3알루미늄합금의 遷移現象도 매우 稀貴한 現象은 아닌 것 같으며, 또한 現象의 類似性 및  $\frac{da}{dN}$ 와  $\Delta K_{eff}$ 와의 關係에서도 여전히 傾斜가 變化한다는 事實等으로 미루어 보아, 이에 대

한 合理的인 說明은 金屬學의 微視組織의 影響까지도 包含된 系統的인 研究結果를 얻어 비로서 이루어 지리라 생각이 된다.

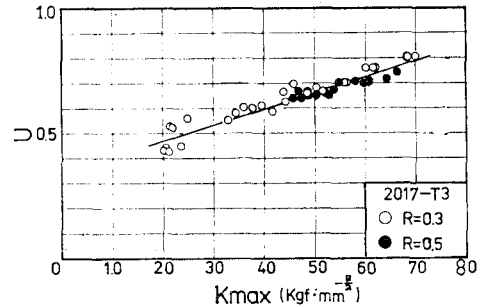


Fig. 7. Relationship between U and  $K_{max}$

Fig. 7은 有効應力強度係數幅比U의 應力強度係數最大值 $K_{max}$  依存性을 나타낸 것으로, 本 試驗範圍內에서는 應力比R에 關係없이 하나의 直線으로 表示되어, U는  $K_{max}$ 에만 依存하고 있음을 알 수가 있다. 즉, U는

$$U = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} = 0.340 + 0.0064K_{max}$$

와 같은 形式으로 表示되어, 2017-T3알루미늄합금의 경우 疲勞龜裂進展速度  $\frac{da}{dN}$ 은 應力比R에 關係없이  $\Delta K$  및  $K_{max}$ 만의 函數로 나타낼 수 있음을 示唆하고 있다.

Fig. 8은 龜裂열림點의 K值依存性을 나타낸 것으로,

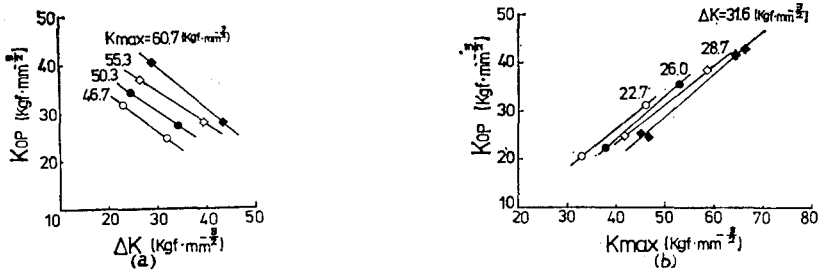


Fig. 8. Dependence of  $K_{Op}$  on K value

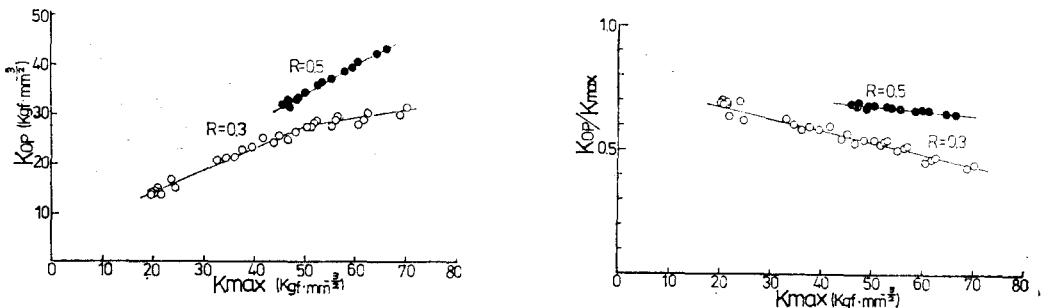


Fig. 9.  $K_{Op}$  behavior for different stress ratios.

Fig. 8 (a)와 (b)는 각각 龜裂열립點의  $K_{op}$ 에 미치는  $\Delta K$  및  $K_{max}$ 의 影響을 나타내고 있다.  $K_{max}$ 값을 固定한 狀態에서  $\Delta K$ 를 增加시키면 ( $R \rightarrow$ 小)  $K_{op}$ 는 낮아지며,  $\Delta K$ 를 一定으로 하여  $K_{max}$ 값을 上昇시키면 ( $R \rightarrow$ 大)  $K_{op}$ 는 높아지고 있어,  $K_{max}$ 값의 增加는 주로  $K_{op}$ 의 上昇에,  $\Delta K$ 값의 增加는 주로  $K_{op}$ 의 低下에 寄與하고 있음을 알 수가 있다.

Fig. 9는 應力比R의 一定한 경우의  $K$ 值의 變化에 따르는 龜裂열립點의 舉動을 나타낸 것으로, 세로軸에는 Fig. 9 (a)에서는  $K_{op}$ , Fig. 9 (b)에서는  $K_{op}$ 의  $K_{max}$ 에 대한 비  $K_{op}/K_{max}$ 를 잡고 있다. R이 一定한 경우,  $K_{op}$  ( $\Delta K$  또는  $K_{max}$ )이 增加하면 그 全體的 效果로서  $K_{op}$ 는 높아지나,  $\Delta K$ 값이 어느程度 커지면,  $K_{max}$ 의 增加에 의한 上昇效果와  $\Delta K$ 의 增加에 의한 低下效果가 비슷한 程度가 되어,  $K_{op}$ 는 飽和하는 樣相을 보이게 되는 것 같다. 한편,  $K_{op}$ 의  $K_{max}$ 에 대한 比率는  $K$ 值의 增加에 따라 減少하고 있으며, 그 傾向은  $K_{max}$ 의 增加에 따르는  $\Delta K$ 의 增加가 큰, 應力比R이 작은 경우에 더욱 顯著하다. 이와 같이, 2017-T3알루미늄 合金의 경우에는  $K_{max}$ 의 增加에 따라  $K_{op}/K_{max}$ 는 減少하여, 따라서 應力強度係數幅의 有效成分比率는 높아져, 結局 Fig. 7과 같이  $K_{max}$ 에 따라 U가 增加하는 舉動을 나타내게 되는 모양이다.

지금까지 U의 力學的 因子 依存性에 關係서는, 序論에서 記述한 Elber의 結果와 같이 U는 應力比R에만 依存한다는 報告<sup>2,4)</sup>, 또는 U는 R 및  $K_{max}$ 의 兩者의 影響을 받으며  $K_{max}$ 에 대해 陽(+ )의 依存性을 나타낸다는 結果<sup>5,6)</sup>와 이와 反對로  $K_{max}$ 의 陰(-)의 依存性을 갖고 있다는 報告<sup>3,8)</sup> 등이 있으나, 2017-T3알루미늄 合金의 경우와 같이 R에 關係없이  $K_{max}$ 에 의해 U가 一義的으로 決定된다는 結果는 本研究가 처음이다.

U의 一般的 性質로서는 R 및  $K_{max}$ 의 函數라 생각하는 것이 合理的으로, 現在 特異한 結果로서 認識되고 있는 U의 陰(-)의  $K_{max}$ 依存性을 報告한 Shih와 Wei 등의 結果<sup>3,8)</sup>를 包含하여 모든 結果에 대한 力學的 因子에 의한 定性的 說明은, Fig. 8에서 보는 바와 같은  $K_{max}$  및  $\Delta K$ 가  $K_{op}$ 에 미치는 影響, 詳細하게는  $K_{max}$ 의 增加에 따르는  $K_{op}$ 의 上昇效果와  $\Delta K$ 의 增加에 따르는  $K_{op}$ 의 低下效果의 材料 및 試驗條件에 대한 依存性 및 兩效果의 相對的 優劣을 通하여 可能하다고 생각이 된다. 따라서 材料의 龜裂닫힘 現象을 論할 때에는, 全體的 意味에서의 U의 力學的 因子 R,  $K_{max}$  또는  $\Delta K$  依存性은 勿論, 各 因子가 龜裂열립點의  $K_{op}$ 값에 미치는 影響等도 詳細히 檢討해 둘 必要가 있다 하겠다.

## 5. 結 論

龜裂닫힘 및 龜裂닫힘 現象에 대한 測定法으로 clip-on gauge를 使用한 Kikukawa-Compliance法을 採用하여, 2017-T3알루미늄 合金에 대해 疲勞龜裂進展試驗을 施行하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

1) 兩對數線圖上에서 龜裂進展速度  $\frac{da}{dN}$ 와 應力強度係數幅  $\Delta K$ 와의 關係를 나타내는 直線은 龜裂進展速度  $10^{-4}$ mm/cycle附近에서 그 傾斜가 減少하여 꾸부러지는 舉動을 보이며, 이 舉動은  $\frac{da}{dN}$ 와 有效應力強度係數幅  $\Delta K_{eff}$ 와의 關係에서도 여전히 나타난다.

2) 應力比R의 龜裂進展速度에 미치는 影響은  $\Delta K$ 의 整理에서는 나타나나,  $\Delta K_{eff}$ 에 의한 整理에서는 消滅하여, 龜裂進展速度는  $\Delta K_{eff}$ 에 의해 一義的으로 決定된다.

3) 2017-T3알루미늄 合金의 경우, 有效應力強度係數幅比U는 應力比R에 關係없이 應力強度係數最大値  $K_{max}$ 에만 依存하는 傾向을 보인다.

4) 龜裂닫힘 現象에 미치는 K值의 影響으로서,  $K_{max}$ 의 增加에 따르는 龜裂열립點의  $K_{op}$ 의 上昇效果와  $\Delta K$ 의 增加에 의한  $K_{op}$ 의 低下效果를 들 수 있으며, U의 舉動은 이 上昇效果와 低下效果의 材料 및 試驗條件에 대한 依存성과 兩效果의 相對的 優劣에 의해 決定된다고 생각할 수 있다.

本 研究는 漢陽大學校校內研究費에 의해 이루어진 것임을 付記하고, 圖面作成等에 協力한 漢陽大學校大學院生 李榮俊君에게 謝意를 表한다.

## 參 考 文 獻

- 1) W. Elber, Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 2, pp. 37~45, 1970.
- 2) W. Elber, The Significance of Fatigue Crack Closure, ASTM STP 486, Damage Tolerance in Aircraft Structures, pp. 230~242, 1971.
- 3) T.T. Shih and R.P. Wei, A Study of Crack Closure in Fatigue, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 6, pp. 19~32, 1974.
- 4) 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.
- 5) V. Bachmann and D. Munz, Crack Closure in Fatigue of a Titanium Alloy, International Journal of Fracture, Vol. 11, pp. 713~716, 1975.
  - 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, Vol. 25, pp. 899~903, 1976.
  - 7) C.K. Clarke and G.C. Cassatt, A Study of Fatigue Crack Closure Using Electric Potential and Compliance Techniques, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, pp. 675~688, 1977.
  - 8) K.D. Unangst, T.T. Shih and R.P. Wei, Crack Closure in 2219-T851 Aluminum Alloy, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 9, pp. 725~731, 1977.
  - 9) K. Tanaka and S. Matsuoka, A Tentative Explanation for Two Parameters, C and m, in Paris Equation of Fatigue Crack Growth, International Journal of Fracture, Vol. 13, pp. 563~583, 1977.
  - 10) R.D. Brown and J. Weertman, Mean Stress Effects on Crack Propagation Rate and Crack Closure in 7050-T76 Aluminum Alloy, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, pp. 757~771, 1978.
  - 11) A. Ohta, M. Kosuge and E. Sasaki, Fatigue Crack Closure over the Range of Stress Ratios from -1 to 0.8 down to Stress Intensity Threshold Level in HT80 Steel and SUS 304 Stainless Steel, International Journal of Fracture, Vol. 14, pp. 251~264, 1978.
  - 12) M. Kikukawa, M. Jono, K. Tanaka and Y. Kondo, Fatigue Crack Propagation and Crack Closure Behavior under Varying Loading Conditions, Fracture 1977, Vol. 2, ICF4, Waterloo, Canada, pp. 1109~1116, 1977.
  - 13) H. Nisitani and K. Takao, Fatigue Crack Acceleration and Closure in Rotating Bending Tests of 0.54% Carbon Steel, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, pp. 855~866, 1978.
  - 14) R.D. Brown and J. Weertman, Effects of Tensile Overloads on Crack Closure and Crack Propagation Rates in 7050 Aluminum, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 10, pp. 867~878, 1978.
  - 15) 小寺澤, 渡邊, 高良, 過大過小應力下の疲勞き裂傳播と開閉舉動および轉位組織, 材料, Vol. 28, pp. 868~872, 1979.
  - 16) 菊川, 城野, 近藤, 低K領域における2段ならびに3段多重變動荷重下の疲勞き裂進展と開閉口舉動, 材料, Vol. 28, pp. 946~952, 1979.
  - 17) V. Bachmann and D. Munz, Fatigue Crack Closure Evaluation with the Potential Method, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 61~71, 1979.
  - 18) 宋智浩, 朴榮祖, Notch材疲勞斗 Kikukawa-Compliance法(第1報 基礎的檢討), 大韓機械學會論文集, 第2卷, 第1號, pp. 10~18, 1978.
  - 19) ASTM Designation: E647-78T, Tentative Test Method for CONSTANT-LOAD-AMPLITUDE FATIGUE CRACK GROWTH RATES ABOVE  $10^{-8}$ m/cycle.
  - 20) 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播および破斷壽命への影響, 材料, Vol. 27, pp. 961~966, 1978.
  - 21) 小寺澤, 南坂, 繰返し曲げによる非貫通疲勞き裂の進展, 材料, Vol. 26, pp. 955~961, 1977.
  - 22) G.R. Yoder, L.A. Cooley and T.W. Crooker, Enhancement of Fatigue Crack Growth and Fracture Resistance in Ti-6Al-4V and Ti-6Al-6V-2Sn Through Microstructural Modification, Journal of Engineering Materials and Technology, Transactions of ASME, Series H, Vol. 99, pp. 313~318, 1977.
  - 23) 同, Observations on Microstructurally Sensitive Fatigue Crack Growth in a Widmanstätten Ti-6Al-4V Alloy, Metallurgical Transactions A, Vol. 8A, pp. 1737~1743, 1977.
  - 24) 同, Fatigue Crack Propagation Resistance of Beta-Annealed Ti-6Al-4V Alloys of Differing Interstitial Oxygen Contents, Metallurgical Transactions A, Vol. 9A, pp. 1413~1420, 1978.
  - 25) 同, Quantitative Analysis of Microstructural Effects on Fatigue Crack Growth in Widmanstätten Ti-6Al-4V and Ti-8Al-1Mo-1V, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 11, pp. 805~816, 1979.