

<論 文>

Notch材 疲勞와 Kikukawa-Compliance法

(第 1 報 基礎的 檢討)

宋 智 浩* · 朴 榮 祖*

(1978年 4月 8日 接受)

Notched Specimen Fatigue and Kikukawa's Compliance Technique

(Part I. On Some Basic Testing Results)

Ji Ho Song and Yung Jo Park

Abstract

Kikukawa's compliance method using the conventional crack mouth clip-on gauge was proposed as a desired measurement technique to monitor the notched specimen fatigue behavior. The measurement technique makes it possible to continuously monitor the initiation and growth of incipient small part-through crack originated at the notch root and the phenomenon of crack closure.

The variation of natural flaw geometry with fatigue cycling was investigated. The test results on 7075-T6 aluminium alloy suggest the dependence of effective stress intensity factor range ratio U on the maximum stress intensity factor K_{max} .

1. 序 言

되풀이 荷重을 받는 部材의 疲勞壽命은 一般的으로 疲勞龜裂의 發生, 그 疲勞龜裂의 傳播 그리고 不安定 最終破斷의 三段階로 크게 나눌 수가 있으며, 疲勞에 관한 研究에 있어서는, 壽命을 이러한 三段階의 期間으로 나누어, 各 期間에 있어서의 支配的인 基本的 因子를 析出하여, 그 因子가 미치는 影響을 明白히 해 나가는 것이 合理的이다.

各 期間에 있어서의 支配的인 基本的 因子, 特히나 巨視的 側面에서의 因子는 때때로 다르는데 普通이므로 이에 따라 採用할 試驗方法 또는 結果分析에 있어서의 手法도 달라지게 마련으로, 疲勞龜裂의 發生과 傳播를 明確히 區別할 수 있는 定量的 基準이 確立되어 있지 않은 現在에 있어서는, 通常的으로는 疲勞龜

裂發生에 關係서는 平滑試驗片에 의한 疲勞壽命의 評價 또는 疲勞中の 材料舉動에 대한 巨視的 및 微視的 觀察이, 龜裂傳播에 關係서는 大部分 龜裂材 試驗片에 의한 進展舉動의 破壞力學的 檢討 및 破面觀察이 主要한 手段이 아닌가 한다. 세번째 段階인 不安定 最終破斷에 關係서도 龜裂傳播와 同一한 手法이 使用되나, 動的 破壞條件의 決定이란 側面을 除外하고는 이 期間은 全疲勞壽命에 寄與하는 比率이 매우 작으므로 無視하는 것이 普通이다.

한편 實際에 있어서 우리들이 가장 많이 直面하는 notch等 應力集中源을 갖은 部材의 疲勞에 있어서는, notch의 銳利 程度에 따라서, 더우기 注目하는 疲勞壽命領域에 따라서도 龜裂發生 까지의 期間과 龜裂傳播 期間이 各各 全壽命을 支配하는 比率은 變化하여, 때로는 두 期間이 같은 程度로 支配的인 경우도 생긴다. 그러므로 notch材의 疲勞壽命을 評價할 때에는 龜裂의 發生과 傳播를 區別할 수 있는 定量的 基準의 確立과 各 期間에 대한 基本的 因子에 의한 檢討가 必要하나, 이에 關한 系統的 研究는 거의 없다.

다만 notch 材疲勞에 있어서는 停留龜裂(Non-propagating crack)이라는 工學的으로 대단히 興味가 있는 현

*正會員, 漢陽大學校工科大學

**1977年 6月 25日 大韓機械學會 應用力學部門委員會 學術講演會에서 發表

本論文에 대한 討論은 1978年 12月 15日까지 本學會 事務室로 送付하여 주십시오.

象이 먼 以前부터 注目되어, 이에 關한 많은 研究結果의 蓄積이 있으며^{(1), (2)}, 또한 近年의 破壞力學의 進歩에 따라 最近에 있어서는 notch 材疲勞에 있어서의 特히나 龜裂發生에 대해 破壞力學의 手法을 適用하는 研究結果가 報告되기 始作을 했다⁽³⁾⁻⁽⁷⁾.

한편, 現在의 實際設計의 立場에서는 疲勞龜裂의 發生이라는 것은 部材의 應力集中部에 發生한 龜裂이 그 應力集中域과 같은 程度의 크기에 成長했을 때를 말하며, 龜裂傳播過程이라는 것은 疲勞龜裂이 應力集中域을 벗어나 最終破斷에 이르기까지의 過程을 말하고 있다⁽⁸⁾. 그러므로 設計의 立場에서의 疲勞龜裂發生까지의 過程은, 所謂 龜裂發生까지의 過程과 應力集中域內에서의 龜裂成長過程을 包含하고 있어, 應力集中域內의 龜裂成長을 巨視的 龜裂傳播過程으로 看做하는 研究者의 認識과는 差異가 있다.

이러한 實情에 있어서, 現在까지 얻어진 龜裂發生 또는 龜裂傳播에 關한 많은 疲勞試驗結果와 近年 多角의 廣範圍하게 發展해 온 破壞力學의 手法을 檢討하여 notch材疲勞에 있어서의 疲勞龜裂의 發生에 대한 合理的, 特히나 工學의 그리고 手法의 見地에서의 定義確立에 대한 考察과 同時에 現時點에 있어서의 破壞力學의 手法의 notch材 疲勞에 대한 有用성과 問題點을 明白히 하여, 이를 解決해 나아감은 工學의 및 工業的으로 대단히 有益한 일이다.

이 論文은 이러한 觀點에서 始作된 系統的 研究의 첫 段階로서, notch材 疲勞研究에 있어서 바람직한 試驗方法에 關한 檢討와 그 試驗方法에 의해서 얻어진 몇가지 基礎的인 實驗結果에 대해서 報告한 것이다.

2. notch材 疲勞와 龜裂進展舉動觀察法

龜裂發生까지의 期間과 龜裂傳播期間이 各各 疲勞壽命의 相當한 部分을 차지하는 notch材 疲勞에 關하여 序言에서 指摘한 問題에 대한 하나의 Approach로서는 支配的 基本因子의 檢出이 比較的 困難한 龜裂發生까지의 期間에 보다는 疲勞損傷量이 龜裂의 길이라는 直接的 量으로 表示되고, 또한 結果分析에 있어서의 手法이 現在 어느 程度까지는 確立되어 있다고 看做할수 있는 龜裂傳播面에 먼저 注目하는 것이 現時點에서는 有利하다고 생각이 된다.

純粹한 龜裂進展舉動만을 對象으로 하는 龜裂材疲勞에 關한 研究은 대단히 盛大하여, 이에 따라 龜裂傳播舉動을 觀察하는 方法도 多數 開發되어, 疲勞破壞機構 및 設計應用面에 有益한 示唆을 주는 結果도 많이

報告되고 있다.

以下에 있어서는 現在 使用되고 있는 龜裂傳播에 關한 測定法을 概觀하여, notch材疲勞에 適合한 測定法을 檢討해 보기로 하겠다.

龜裂傳播舉動을 觀察하기 위한 方法으로서는 光學的 測定法⁽⁹⁾, Compliance法⁽¹⁰⁾⁻⁽¹²⁾, 電位差法^{(13), (14)} 및 音響的 測定法^{(15), (16)} 등이 있다. 光學的 測定法은 가장 簡便한 方法으로 從來에 있어서 主流의이었고 現在에도 널리 使用되나, 表面만을 對象으로 함으로 表面과 內部的 應力狀態의 相違에 따르는 龜裂傳播舉動의 顯著한 差異를 檢出못한다는 本質的인 缺點을 지니고 있다. 故로 이 方法 單獨에 의한 結果로부터 얻어진 結論은 자칫하면 非合理的인 경우가 많게 된다. 이에 비해 Compliance法, 電位差法 및 音響的 測定法은 一般的으로 內部를 包含한 龜裂舉動, 特히 近來 龜裂進展舉動의 重要한 因子로 認識되어 있는 crack closure phenomenon^{(18), (19)}(龜裂閉口現象)을 檢出할 수가 있어, 現在 龜裂舉動觀察의 主要한 方法으로 되어 있다. 各方法에 대한 比較 檢討도 2, 3 報告되어 있어^{(17), (18)}, 여기서는 詳細한 것은 省略하나, 裝置에 대한 費用 및 使用上의 環境條件, 結果分析에 있어서의 處理等을 考慮할 때, Compliance法이 經濟的이고 使用이 簡便하며 精度에 있어서도 適當한 考慮를 함으로서 他方法에 비해 優秀한 利點을 갖고 있다.

著者는 現在 使用되는 Compliance法을 다음과 같이 分類해 보기로 하겠다.

- 1) 從來의 crack mouth clip-on gauge法⁽²⁰⁾
- 2) Elber-gauge法⁽¹⁰⁾
- 3) Kikukawa-Compliance法⁽¹²⁾

從來의 clip-on gauge法이라는 것은, 元來 破壞靱性(Fracture toughness) 試驗中의 龜裂길이의 變化에 따르는 Compliance 變化測定을 目的으로 製作된 clip gauge를 利用하여, 疲勞中의 龜裂길이만을 測定하는 方法을 말하며, Elber-gauge法이라는 것은, Elber가 처음으로 使用한 方法으로, 龜裂先端 또는 龜裂先端前方의 變位를 檢出하여, 應力-全變位 Hysteresis loop로부터 crack closure에 關한 情報만을 얻는 測定法을 말한다. 近來의 Robert-Schmidt의 gauge法⁽¹¹⁾도 이 範疇에 屬한다. 이 方法에 있어서는 平面應力狀態(plane stress state)에 있는 表面上의 舉動만을 檢出한다는 點에 留意해야 하며, 또한 crack closure 現象을 全壽命을 通해서 充分한 感度로 測定하려면 龜裂進展에 따라 gauge의 位置를 移動시킬 必要가 있으며, 그 絕對的 感度도 다음의 Kikukawa法에는 뒤떨어지는 傾向이 있다.

Kikukawa-Compliance法이라는 것은 考案者인 菊川(Kikukawa)에 의한 除荷彈性 Compliance法이라 불리우는 것이다. 그는 疲勞龜裂進展舉動이 試驗片表面의 平面應力狀態에 의해서 보다는 內部的 平面變形率狀態(Plane Strain State)에 의해서 主로 支配된다는點을 留意하여 試驗片內部를 包含한 平均的인 龜裂舉動을 連續的으로 檢出하기 위하여, 面內굽힘(plane bending) 疲勞試驗에 있어서 試驗片裏面に Strain gauge를 貼付하여, Crack closure 現象測定感度を 높임과 더불어 龜裂의 길이도 同時測定할 수 있도록, 全變形率信號로부터 龜裂이 完全히 열린 狀態에서의 彈性變形率成分을 減算하여, 應力과 이 減算된 變形率의 Hysteresis loop를 그리게 했다. 다만 試驗方法上, 各試驗片에 일일이 Strain gauge를 貼付하는 번거러움이 있다. 여기서 內部를 包含한 平均的인 Compliance變化를 檢出하여, Crack closure現象 및 龜裂의 길이를 同時에 그리고 全壽命을 通하여 連續的으로 測定하는 方法을, 廣義的으로, Kikukawa-Compliance法이라고 定義해 두겠다.

以上으로부터 알 수가 있는바와 같이 現在에 있어서 龜裂進展舉動을 觀察하기 위한 測定法으로서, Kikukawa-Compliance法이 合理的이고, 簡便하며 經濟的이므로 이를 notch 材疲勞에 利用하기로 하나, 實際的인 Kikukawa(菊川)의 試驗方法에서 使用하는 試驗片裏면에 Strain gauge를 일일이 貼付하는 形式은 避하여, 從來의 Clip-on gauge를 利用할 수 있는 試驗方法을 取하기로 했다. 한편 初期疲勞龜裂은 一般的으로 自然龜裂(natural flaw)의 形態로 發生하여 進展하는데, 이러한 自然龜裂의 進展舉動은 實際的에 매우 重要함으로 notch 밑에 發生하는 初期 自然龜裂의 進展에 따르는 形狀의 變化等에 關해서도 充分히 檢討하도록 했다.

3. 試驗材料 및 試驗方法

使用한 材料는 알미늄合金 7075-T6로서 그 化學成分

Table I. Chemical composition (%)

Designation	Cu	Mn	Mg	Si	Fe	Zn	Ti	Cr	Be	Al
7075-T6	1.52	0.11	2.51	0.16	0.26	5.52	0.006	0.22	0.0016	rest

Table II. Mechanical properties

Designation	0.2% proof stress $\sigma_{0.2}$ (kg/mm ²)	Tensile strength σ_B (kg/mm ²)	Elongation (%)	Reduction of area ψ (%)	Fracture ductility ϵ_F (%)	Fracture toughness K_{Ic} (kg/mm ^{3/2})
7075-T6	42.6	52.7	11.8	18	19.8	106.2

* $\epsilon_F = l_n[1/(1-\psi)]$

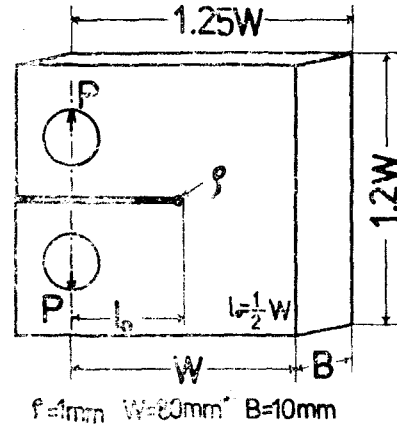


Fig. 1. Test specimen configuration

및 機械的 性質을 Table I, II에 提示했다. 試驗片形狀은 第2節에서 論한 目的에 알맞도록, Fig. 1과 같은 CT-標準試驗片에 半徑의 1mm인 圓 notch를 附加한 것으로, 두께가 10mm인 것을 主로 使用했으나, 必要에 따라서는 5mm 두께인 것도 使用했다. 이 試驗片의 應力集中係數는 $\alpha=4.78$ 이다⁽²¹⁾. 以下에 있어서는 便宜上, notch 밑의 最大應力 $\sigma_{H,max}$ 를

$$\left. \begin{aligned} \sigma_{H,max}/\sigma_n &= 98.05 \\ \sigma_n &= \frac{P}{BW} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

로부터 計算하여, 應力의 代表值로 使用했다. 試驗은 油壓 Servo式 疲勞試驗機를 使用하여, 되풀이速度 10Hz, 應力比 $R(= \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}) = 0.1$ 로 행하여 졌다.

Crack closure 및 龜裂길이의 測定方法에 대해서는, Kikukawa(菊川)의 方法⁽¹²⁾과 同一함으로 詳細한 것은 省略하기로 하고, 여기서 巨視的 塑性變形이 안 일어나는 경우에 대해서 그 要點만을 記述하기로 하겠다. Fig. 2에서 보는바와 같이, CT-試驗片에 附着한 clip gauge의 全變位出力信號로부터, 龜裂이 完全히 열린 狀態의 彈性變位成分을 Load cell 出力을 利用하여 減算하여 이 減算된 變位信號와 荷重信號에 의한 Hysteresis

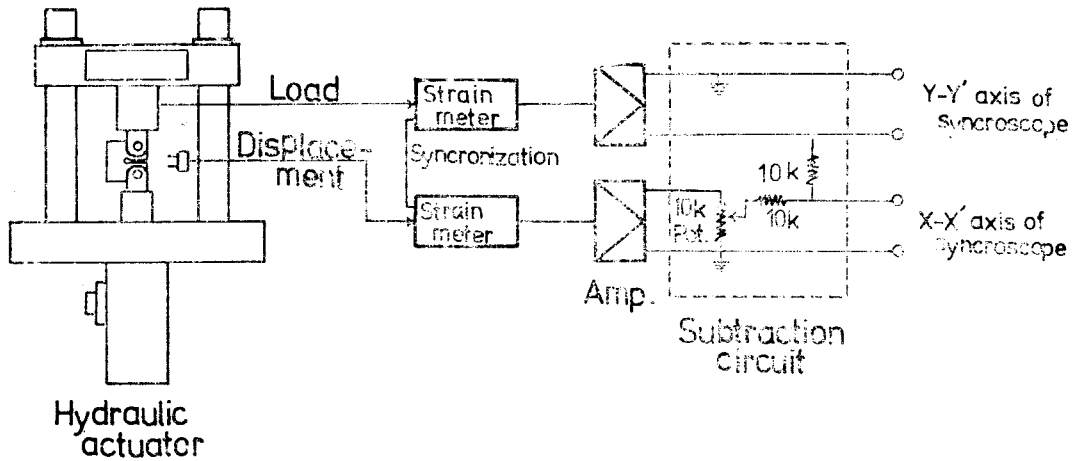


Fig. 2. Block diagram for monitoring the crack growth

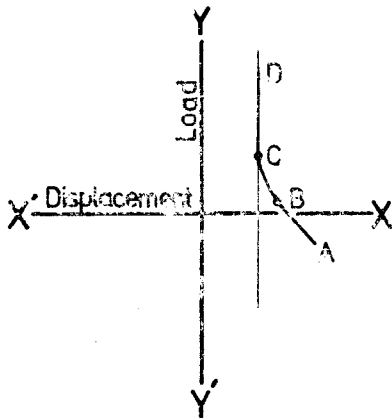


Fig. 3. Load-displacement hysteresis loop

loop를 Fig. 3과 같이 CD部分이 Y-Y'軸에 平行이 되도록 그린다. 여기서 AB部分은 龜裂이 完全히 닫혀 있는 狀態이며 B에서 부터 漸次 열리기 始作하여 C點에서 完全히 열리게 된다. 이 C點이 crack opening point가 되며, effective stress intensity factor range ratio U는 다음 式으로부터 求해진다.

$$U = \frac{K_{max} - K_{op}}{K_{max} - K_{min}} = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{op}}{\sigma_{max} - \sigma_{min}} = \frac{\Delta\sigma_{eff}}{\Delta\sigma} = \frac{\Delta K_{eff}}{\Delta K} \quad (2)$$

龜裂의 길이는 龜裂이 進展함에 따라 CD의 傾斜가 變化함으로, CD의 傾斜가 Y-Y'軸에 平行이 되도록 Fig. 2의 回路中의 Potentiometer를 調整하여, 그 눈금의 變化量을 測定하면, 미리 準備해 둔 Fig. 7(後出)와 같은 calibration curve로부터 算出해 낼수가 있다.

이 方法에 의하면, 表面을 觀察하는 光學的 測定法

으로는 試驗片의 幾何學的 制限等에 의해서 檢出하기 困難한, 自然龜裂, 所謂 表面龜裂(Surface flaw) 또는 部分貫通龜裂(part-through crack)의 形態로 나타나는 初期疲勞龜裂에 대해서도, Compliance의 變化, 即 CD部分의 傾斜의 變化를 檢出함으로써, 그 發生을 把握하고 進展學動을 測定할 수가 있다. Clip gauge는 Maraging鋼을 使用하여 一體로 製作된 것을 使用했다.

Compliance 測定외에도, 必要를 느낄때는 언제나 平均應力을 負荷한 狀態에서 試驗을 中斷하여, 試驗片表面을 移動光學顯微鏡(×40)으로 觀察하여, 兩表面上的 龜裂의 有無 및 長이를 測定했다.

4. 試驗結果 및 考察

4.1. notch 밑의 初期疲勞龜裂

Photo I은 CT-試片 notch 밑에 發生, 成長한 典型的인 自然龜裂의 一例이다.



Photo. I Natural flaw

Fig. 4는 實際의 龜裂의 形狀과 半橢圓을 比較한 것으로, 龜裂이 작은 경우에는 거의 半橢圓, 成長하여 커지면 若干 差異가 나는 경우도 생기나, 自然龜裂을 半橢圓形龜裂로 다루워 거의 問題가 없다는 것을 알수가 있다. Fig. 5는 이러한 龜裂의 길이 a 와 길이 $2c$ 와의 關係를 求한 것으로서, 試驗範圍內에서는 試驗片 두께와는 關係없이, 兩對數線圖上에서 直線으로 나타나 自然龜裂 (以下, 部分貫通龜裂로 統一)의 形狀은 하나

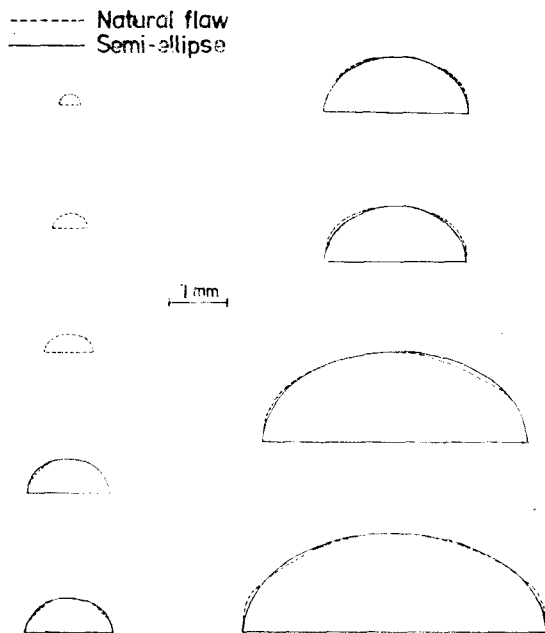


Fig. 4. Comparison of the natural flaw with the semi-ellipse

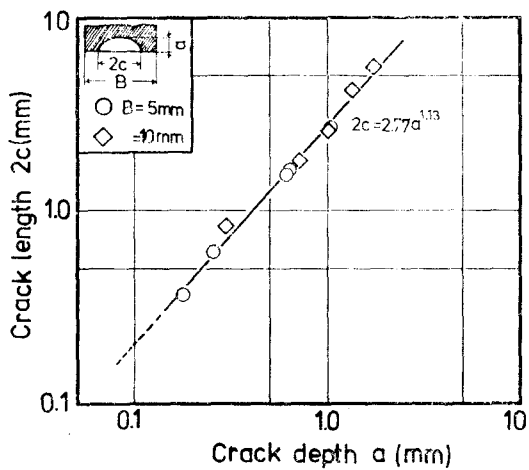


Fig. 5. Crack front shape variation

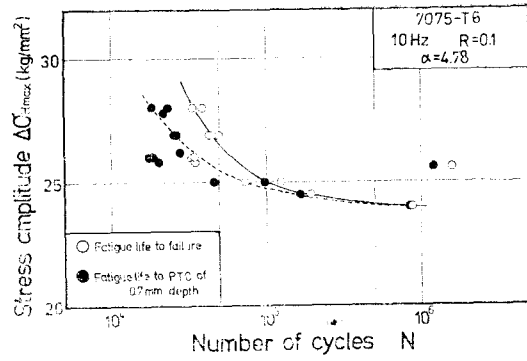


Fig. 6. S-N diagram

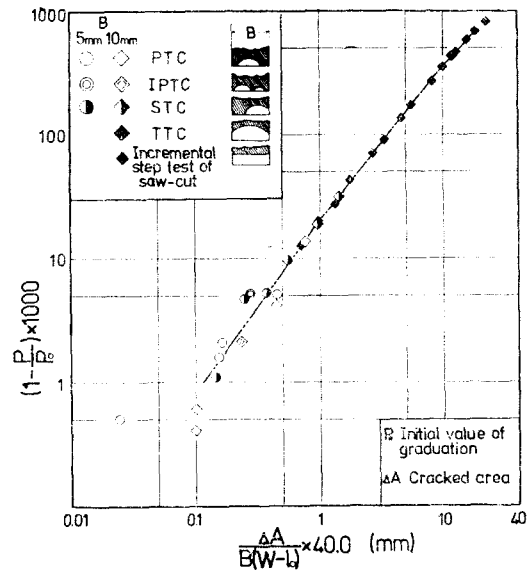


Fig. 7. Calibration curve

의 parameter, 龜裂의 길이 a 또는 길이 $2c$ 로서 表現할 수 있다는 것을 말해준다. 다만 이러한 疲勞荷重下의 部分貫通龜裂의 幾何學的形狀의 變化는 荷重形式에는 勿論材料에 따라서도 다르며, 特別 人工欠陥으로부터 發生할 때에는 주어진 初期欠陥의 形狀에 크게 影響을 받으므로^(22,23), 이러한 경우의 部分貫通龜裂의 進展舉動을 論할 때에는 初期人工欠陥의 影響에 대해서 充分히 考慮하는 등의 細心한 注意가 必要하다.

Fig. 6은 여기서 採用된 試驗片에 대한 S-N 曲線으로, 그림中에는 龜裂發生에 대한 하나의 尺度로서 部分貫通龜裂의 길이 a 가 0.7mm에 到達할 때까지의 疲勞壽命을 黑點으로 表示해 두었다.

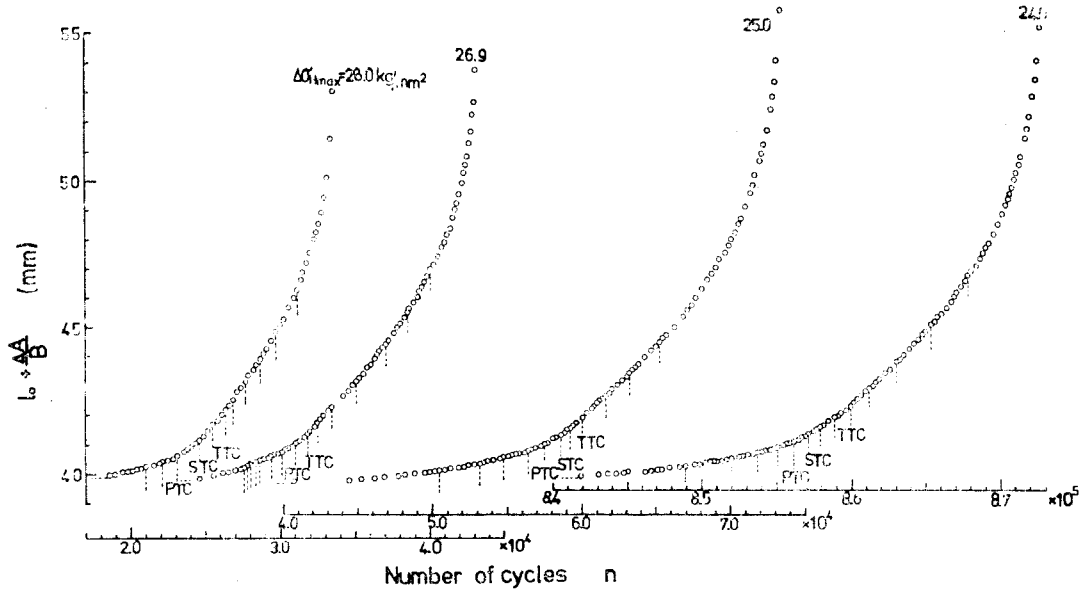


Fig. 8. Fatigue-cracked area variation with fatigue cycling

4.2. 龜裂進展의 測定

Fig. 7은 Fig. 2의 回路中의 potentiometer(10回轉, 눈금 1000)의 눈금과 CT-試驗片에 생긴 各種의 龜裂의 크기와의 關係를 求한 것으로, 橫軸에는 龜裂面積 ΔA 를 잡고 있으며, 使用時 便利하도록 各軸은 適當한 初期值로 나누워 주어있다.

龜裂의 種類는 PTC(Part-Through Crack, 部分貫通 龜裂), IPTC(Incomplete Part-Through Crack, 不完全部分貫通 龜裂), STC(Side-Surface-Through Crack, 一側面貫通 龜裂) 및 TTC(Through-Thickness Crack, 貫通 龜裂)로 表示했다. 이러한 線圖를 作成함에 있어서 可能한 限, 試驗片數를 節約하기 위하여 0.2mm 두께의 틈으로 龜裂의 長이를 漸次 增加시키는 step-test도 施行하여 그 結果도 같이 打點하였다.

그림으로부터 알 수 있는 바와 같이, 龜裂의 形狀에는 關係없이 龜裂面積과 Potentiometer 눈금과의 사이에는 一義的 關係가 存在하며, 이러한 Calibration曲線을 利用하면 龜裂의 進展을 評價할 수가 있다.

Fig. 8은 notch CT-試驗片에 있어서 되풀이數에 따라 龜裂面積이 變化하는 狀態를 測定한 代表例로서, 龜裂이 完全貫通 龜裂이며 또한 龜裂前面이 直線이라고 看做될 때, 또는 적어도 龜裂前面曲率이 龜裂進展中 一定하다고 假定할 수 있는 경우에 限해서, 세로軸의 $\Delta A/B$ 量이 龜裂長이의 實際의 增加量에 對應을 하게된

다. 그러나, 部分貫通 龜裂의 進展期間은 勿論, 完全貫通 龜裂의 進展期間에 있어서도, 龜裂前面曲率은 龜裂이 進展함에 따라 變化하는 것이 普通이므로, 龜裂進展 舉動을 分析하는데 있어서는 實際의 龜裂 長이를 算出할 必要가 있다. Fig. 8中의 data點 아래로 그어진 點線은 兩側 表面을 移動光學顯微鏡으로 觀察한 時點을 나타내고 있으며, 觀察한 結果는 PTC, STC 또는 TTC로 表示했다.

STC 및 TTC 進展期間에 대해서는 側表面에 나타난 龜裂의 長이도 觀測時마다 測定을 했다. 疲勞 龜裂이 部分貫通 龜裂로서 進展하는 期間에 있어서는, 龜裂의 長이는 Fig. 5의 龜裂의 長이와 長이에 關한 關係를 利用하면 算出할 수가 있다. 疲勞 龜裂이 不完全部分貫通 龜裂로서 發生, 成長할 可能性도 있으나, 兩側表面 觀察結果로 보아, 그러한 경우가 存在하더라도 극히 初期段階에 局限되어 있다고 생각이 되며, 後 結果에 있어서 흩어짐(scatter)등의 原因이 될 可能性은 있으나, 여기서는 特別히 考慮함이 없이 全部 完全部分 貫通 龜裂로 다루었다.

部分貫通 龜裂로부터 貫通 龜裂로 遷移하는 部分에 대해서는, 龜裂이 完全貫通할 直前に 있어서는 두께方向 殘存面積의 減少에 따르는 necking 現象等 破壞形式이 變化하는 複雜한 問題가 있고, 本研究上 直接的 必要性도 거의 없으므로 이 期間에 대해서는 評價를 하지 않기로 했다.

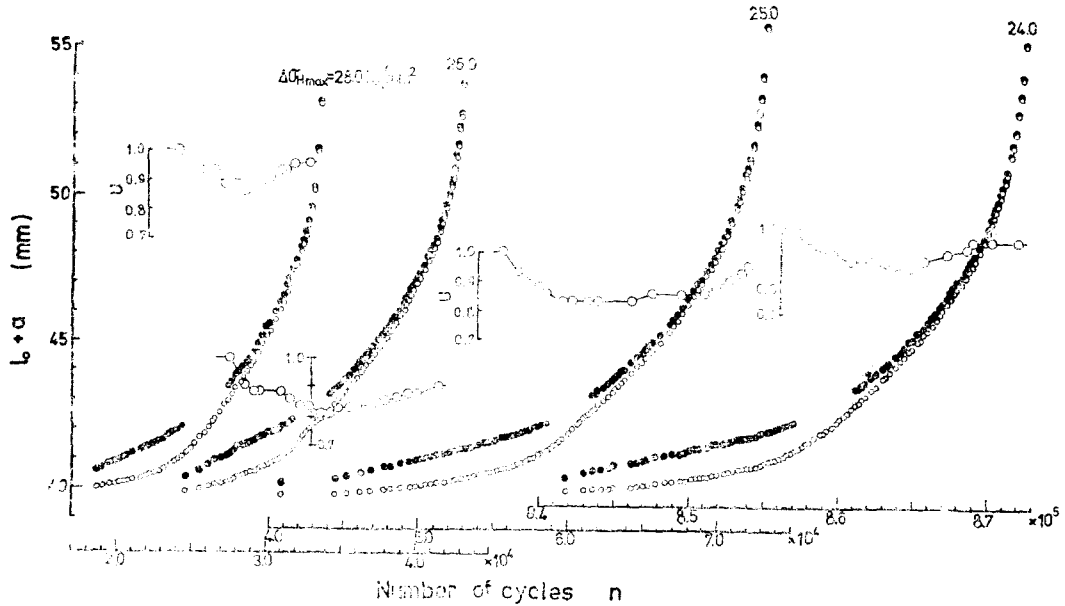


Fig. 9. Fatigue crack propagation curve

貫通龜裂 進展期間에 대해서는, $\Delta A/B$ 의 量을 平均的 龜裂길이로서 다루는 傾向도 있으나⁽¹²⁾, 龜裂의 發生位置는 多少나마 偏心되어 있는 것이 普通이며, 위에서 말한바와 같이 龜裂前面曲率도 變化함으로, 여기서는 兩側表面에 나타난 길이를 參考로 하여 龜裂發生位置의 偏心量과 龜裂前面曲率를 評價하여, 龜裂길이의 最大値를 구했다.

以上과 같이 하여 얻어진 部分貫通龜裂의 길이 또는 貫通龜裂길이의 最大値의 進展舉動이 Fig. 9에 黑點으로 提示되어 있다. 貫通龜裂進展期間에 있어서 實際의 龜裂길이의 最大値와 平均的 龜裂길이와는 龜裂의 길이가 어느程度 긴 領域에 있어서는 거의 差異가 없으나 짧은 領域에 있어서는 絶對値는 勿論 進展舉動에도 顯著한 差異가 생길 憂慮가 있으므로, 龜裂材疲勞에 있어서도 이를 充分히 考慮하여 試驗을 施行할 必要가 있다. 그림中에는 龜裂進展에 따르는 effective stress intensity factor range ratio U 의 舉動도 같이 提示해 두었다. 應力比(stress ratio) R 및 Maximum stress intensity factor K_{max} 이 높은 탓인지, 全體의으로 U 의 값은 높고, 部分貫通龜裂 進展期間의 극히 初期에 있어서는 crack closure는 거의 檢出되어 있지 않으며, 龜裂이 成長하여 部分貫通龜裂로부터 貫通龜裂로 遷移함에 따라 U 는 減少하여 極小値를 갖은다음 徐徐히 增加하는 傾向을 보인다. 後半의 U 가 增加하는 傾向은 U 의 K_{max} 依存性을 示唆하며, 前半의 U 가 減少

하는 傾向은 多分히 龜裂形態遷移에 따르는 塑性變形의 增加 또는 平面應力狀態가 全體에 대해 차지하는 比率의 增加에 의한 減少效果가 U 의 K_{max} 依存性보다 優越함이 그 原因이 아닌가 생각이 된다. 特히 U 의 K_{max} 依存性에 關係서는 그 詳細한 結果를 他日 報告하기로 하겠다.

Fig. 9의 結果에 대해, 이른바 破壞力學的手法을 利用하여 進展舉動을 解析하게 되는데, notch 近傍의 龜裂進展에 關係서는 應力集中源의 影響과 三次元特性에 의해 嚴密한 解가 存在하지 않은 部分貫通龜裂에 대한 stress intensity factor 問題를 解決할 必要가 있다. 應力集中源의 影響에 대한 評價와 現在까지 簡略解 또는 三次元 光彈性實驗에 의해서 얻어진 部分貫通龜裂의 stress intensity factor에 대한 檢討는 後報에서 詳細히 論하기로 하겠다.

5. 結 言

notch材 疲勞에 대한 系統的 研究의 첫 段階로서, notch材 疲勞研究에 있어서 바람직한 試驗方法을 現在 龜裂材疲勞에 대해 使用되는 測定方法을 參考로 하여 檢討, 提案하고 그 試驗方法에 의해서 얻어진 基礎的인 實驗結果에 대하여 考察했다. 얻어진 主要한 結果는 다음과 같다.

1) Notch材 疲勞에 있어서 採用할 試驗方法으로서는

從來의 clip-on gauge를 利用한 Kikukawa Compliance法이 便利하며, 이와 함께 光學的 測定을 併用하는게 바람직하다.

2) 이 方法에 의하면 notch 밑에 생기는 初期의 微小한 部分貫通龜裂의 發生 및 進展舉動을 連續的으로 檢出할 수가 있다.

3) Compliance의 變化는 龜裂形態에 關係 없이 一次的으로는 龜裂面積의 變化에 對應한다.

4) 7075-T6 알루미늄合金의 경우, effective stress intensity factor range ratio U 는 部分貫通龜裂에서 貫通龜裂로 遷移하는 期間에 있어서 極小値를 갖는 傾向이 있으며, 遷移後 貫通龜裂進展期間에 있어서는 K_{max} 依存性을 보인다.

參 考 文 獻

- 1) N.E. Frost and D.S. Dugdale, Fatigue Tests on Notched Mild Steel plates with Measurements of Fatigue Cracks, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, Vol. 5, pp. 182, 1957를 비롯하여, Nonpropagating Crack에 관한 文獻은 특히 V. Weiss and D.N. Lal, Communication: A Note on the Threshold Condition for Fatigue Crack Propagation, *Metallurgical Transactions*, Vol. 5, pp. 1946, 1974에 詳細히 收錄되어 있다.
- 2) 西谷, 鹿毛, 淺い回轉曲面狀くぼみを有する丸棒試驗片のねじり疲勞および回轉曲げ疲勞, 日本機械學會論文集, 43卷, 365號, pp. 1~7, 1977等 西谷 group의 長期間에 걸친 一連의 研究가 있음.
- 3) I. Constable, L.E. Culver and J.G. Williams, Notch Root Radii Effects in the Fatigue of Polymers, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 16, pp. 279~285, 1970.
- 4) A.R. Jack and A.T. Price, The Initiation of Fatigue Cracks from Notches in Mild Steel Plates, *International Journal of Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 401~409, 1970.
- 5) J.M. Barsom and R.C. McNicol, Effect of Stress Concentration on Fatigue-Crack Initiation in HY-130 Steel, *ASTM STP 559*, Fracture Toughness and Slow-Stable Cracking, pp. 183~204, 1974.
- 6) W.G. Clark, Jr., Evaluation of the Fatigue Crack Initiation Properties of Type 403 Stainless Steel in Air and Steam Environments, *ASTM STP 559*, Fracture Toughness and Slow-Stable Cracking, pp. 205~224, 1974.
- 7) K. Heckel and R. Wagner, The Tensile Fatigue Behavior of CT-Specimens with Small Notch Root Radius, *International Journal of Fracture*, pp. 123~129, 1975.
- 8) 鯉淵, 疲勞き裂に基礎をおく壽命設計, 材料, Vol. 26, pp. 1015~1021, 1977.
- 9) 例를 들면, H. Nisitani and K. Takao, Behavior of a Tip of Non-Propagating Fatigue Crack during One Stress Cycle, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 253~260, 1974.
- 10) W. Elber, The Significance of Fatigue Crack Closure, *ASTM STP 486*, Damage Tolerance in Aircraft Structures, pp. 230~242, 1971.
- 11) R. Roberts and R.A. Schmidt, Observation of Crack Closure, *International Journal of Fracture*, Vol. 8, pp. 469~471, 1972.
- 12) 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閉開口舉動の測定, 材料, Vol. 25, pp. 899~903, 1976.
- 13) P.E. Irving, J.L. Robinson and C.J. Beevers, Fatigue Crack Closure in Titanium and Titanium Alloys, *International Journal of Fracture*, Vol. 9, pp. 105~108, 1973.
- 14) T.T. Shih and R.P. Wei, A Study of Crack Closure in Fatigue, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 6, pp. 19~32, 1974.
- 15) O. Buck, C.L. Ho, H.L. Marcus and R.B. Thompson, Rayleigh Waves for Continuous Monitoring of a Propagating Crack Front, *ASTM STP 513*, Stress Analysis and Growth of Cracks, pp. 280~291, 1972.
- 16) O. Buck, C.L. Ho and H.L. Marcus, Plasticity Effects in Crack Propagation, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 5, pp. 23~34, 1973.
- 17) J.D. Frandsen, R.V. Inman and O. Buck, A Comparison of Acoustic and Strain Gauge Techniques for Crack Closure, *International Journal of Fracture*, Vol. 11, pp. 345~348, 1975.
- 18) 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.

- 19) W. Elber, Fatigue Crack Closure under Cyclic Tension, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 2, pp. 37~45, 1970.
- 20) ASTM Designation: E 399-70T, Tentative Method of Test for Plane Strain Fracture Toughness of Metallic Materials, *ASTM STP 463*, Review of Developments in Plane Strain Fracture Toughness Testing, pp. 249~269, 1970.
- 21) R. Wagner, Doktor Arbeit: Lebensdauervorhersage Schwingend Beanspruchter Scharf Gekerbter Bauteile auf der Grundlage der Bruchmechanik, München, 1973. 5.
- 22) D.L. Corn, A Study of Cracking Techniques for Obtaining Partial Thickness Cracks of Pre-selected Depth and Shapes, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 3, pp. 47~52, 1971.
- 23) B. Mukherjee, L.E. Culver and D.J. Burns, Growth of Part-Through and Through-Thickness Fatigue Cracks in Sheet Glassy Plastics, *Experimental Mechanics*, Vol. pp. 90~96, 1969.