

<論 文>

# 彈塑性疲勞균열進展과 $J$ 積分

宋智浩\* · 金一鉉\*\* · 安國榮\*\*\* · 朴榮祖\*\*\*\*

(1983年 8月 10日 接受)

## Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth and $J$ Integral

Ji Ho Song, Il Hyun Kim, Kook Young Ahn and Young Jo Park

### Abstract

Constant-load-amplitude fatigue crack growth tests were carried out on 5083-0 aluminum alloy under elastic and elastic-plastic conditions. Crack length, crack closure and monotonic fatigue deformation were measured by Kikukawa's unloading elastic compliance monitoring technique and elastic-plastic fatigue crack growth rates were analysed in terms of  $J$  integral. Elastic-plastic fatigue crack growth rates can be well expressed by effective cyclic  $J$  integral until general yielding occurs. Beyond general yielding, monotonic fatigue deformation becomes significant and growth rates cannot be characterized by a single parameter of effective cyclic  $J$  integral alone. However, introducing one more parameter, maximum  $J$  integral  $J_{max}$  to account for the effect of monotonic fatigue deformation, can explain fatigue crack growth behavior beyond general yielding.

### 1. 緒 論

균열先端에 形成되는 塑性域의 크기가 균열길이 및 試驗片의 各部 치수에 비해 充分히 작아 이른 바 小規模降伏條件이 成立하는 경우에는 應力強度係數<sup>1)</sup>(stress intensity factor) 등에 의해 代表되는 線形破壞力學이 疲勞破壞를 비롯한 여러 破壞現象에 대해 有用한 定量的 評價手段이 되나, 材料가 全面降伏을 하는 경우 또는 發生直後의 微小균열이 成長하는 경우와 같이, 균

열先端에 形成되는 塑性域의 크기가 균열길이 또는 試驗片의 一部치수에 비해 無視못하게 되는 大規模降伏條件下에서는, 그 物理的 意味를 喪失하게 되어, 이러한 경우의 破壞에 대해서는 彈塑性 破壞力學的 評價法이 必要하게 된다. 彈塑性 破壞力學에서, 線形破壞力學에서의 應力強度係數  $K$  値와 같이, 균열先端의 力學的 狀態를 一義의로 代表하여 破壞를 直接的으로 支配하는 力學的 特性值로서 期待되고 있는 것이 Rice<sup>2)</sup>에 의해 提案된  $J$ 積分이다.  $J$ 積分에 관해서는 理論上 除荷(unloading)를 許容하지 않는 一面이 있어 균열發生條件의 評價 또는 破壞靱性評價에 있어서의 試驗片의 小形化라는 側面에서의 研究가 現在 역시 많기는 하나, 元來의  $J$ 積分이 지니는 여러 制約을 넘어 安定 균열 成長에 관한 評價方法으로서도 研究가 活潑히 이

\* 正會員, 大阪大學 工學部  
\*\* 正會員, 漢陽大學校 大學院, 大林工業專門大學  
\*\*\* 正會員, 韓國機械研究所 大德船舶分所  
\*\*\*\* 正會員, 漢陽大學校 工科大學

Table 1 Chemical composition (%) and mechanical properties

Designation	Cu	Si	Fe	Mn	Mg	Zn	Cr	Ti	Al	Yield strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Tensile strength (kg/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)
A-5083-0	0.043	0.086	0.22	0.48	4.66	0.011	0.16	0.024	Rest	15.6	30.8	25.0

루어지고 있다. 그 代表的인 例의 하나가 低되풀이數 疲勞(low-cycle fatigue)균열에 대한 應用이다.

低되풀이數 疲勞領域에서의 균열進展速度를 J積分概念에 의해 처음으로 評價한 것은 Dowling 과 Begley<sup>3)</sup>로서, 특히 Dowling 은 A533B 鋼에 대한 一連의 研究<sup>4,5)</sup>로 부터 塑性疲勞下의 균열進展速度는, 試驗片의 幾何學的 形狀에 關係없이 균열닫힘(crack closure)現象을 考慮한 有效되풀이 J積分幅  $\Delta J_{eff}$ (但, Dowling 은  $\Delta J$ 記號를 그대로 使用하고 있음)에 의해 잘 整理된다는 結論을 얻고 있다. 다만 그의 研究에서는, 荷重一定試驗時 惹起되는 여러 評價問題를 避하기 위하여 균열이 進展함에 따라 適當한 比率로 荷重이 減少되도록 變位限界를 增加시키는等 大部分 變位制御試驗條件을 採擇하고 있는 特徵이 있다.

그러나 實際에 있어서는 負荷條件으로서 荷重이 주어지는 경우도 많아, 荷重條件下의 研究結果<sup>6-11)</sup>도 있기는 하나 이 경우 특히 問題가 되는 것은 累積되는 一方向疲勞變形(되풀이크리프變形을 包含)에 대한 評價이다. 이에 關係 安藤과 小倉<sup>12)</sup>, Garwood<sup>13)</sup> 등이 J積分에 의한 R-曲線測定方法으로 提案하고 있는 3-parameter 法을 塑性疲勞에 應用하여, 疲勞균열先端의  $J_{max}$ 를 評價하는 方法을 새로히 提案하고, 高張力鋼에 대한 3點굽힘試驗에서 그 妥當性을 報告하고 있다. 그러나 그들의 試驗도 最大처짐漸增條件下에서 施行되고 있으며 試驗範圍도 限定되어 있을 뿐더러, 疲勞균열進展舉動에 있어서의 重要因子인 균열닫힘에 關係한 考慮도 缺如되어 있어, 荷重制御下의 塑性疲勞균열進展에 대한  $\Delta J$ 의 限界性 또는  $J_{max}$ 의 有用性에 關係한 充分한 結論을 얻지 못하고 있다.

J積分 概念에 의한 塑性疲勞균열研究는 微小균열에 대한 應用等 특히나 實用的 側面에서 많은 注目を 받고 있기는 하나, 그 研究結果는 現在도 매우 적은 實情에 있다.

本 論文은 5083-0 材알루미늄 合金에 대해 一定振幅 荷重條件下에서 彈性 및 彈塑性疲勞균열進展試驗을 施行하여 J積分 概念에 의한 進展速度評價에 關係한 論한 것으로서, 특히 균열닫힘現象 및 累積되는 一方向疲勞變形의 進展速度에 미치는 影響을 檢討한 것이다.

2. 試驗材料 및 試驗片

使用한 材料는 두께가 25mm 인 5083-0 알루미늄合金 材料로서, 340°C에서 1時間 最終풀림處理한 것이다. 그 化學的 成分 및 機械的 性質은 Table 1과 같다.

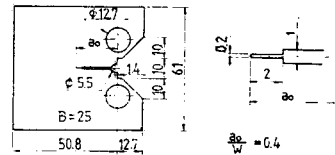


Fig. 1 Test specimen configuration

試驗片은 Fig. 1과 같은 標準CT-試驗片이며, 그 採取方向은 L-T方向이다.

CT-試驗片에 대한 J積分값으로서는 本 研究에서는 Rice 들<sup>14)</sup>의 簡便法에 의한 값과 Merkle 과 Corten<sup>15)</sup>의 軸力의 影響을 考慮한 값 두가지를 使用하고 있다. 各 方法에 의한 되풀이 荷重下의 J積分값은 Fig. 2와 같은 荷重-荷重點變位曲線을 利用하여 다음과 같이 算出된다.

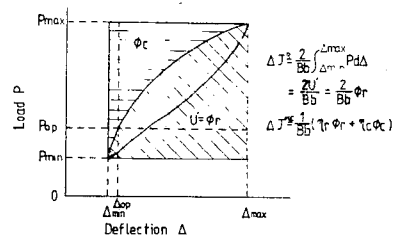


Fig. 2 Determination of  $\Delta J$  from load versus deflection curve

Rice 들의 되풀이 J積分幅  $\Delta J^R$ :

$$\Delta J^R = \frac{2}{Bb} \int_{\Delta_{min}}^{\Delta_{max}} p d\Delta = \frac{2}{Bb} \phi_r \quad (1)$$

Merkle 과 Corten 의 되풀이 J積分幅  $\Delta J^{M \cdot C}$

$$\Delta J^{M \cdot C} = \frac{1}{Bb} (\eta_r \phi_r + \eta_c \phi_c) \quad (2)$$

여기서

B : 試驗片두께

$b$  : 試片未破斷殘存斷面(ligament)길이로서

$b = w - a$ ,  $w$  : 試片幅,  $a$  : 균열길이 (Fig.1 參照)

$$\eta_r = \frac{2(1+\alpha)}{(1+\alpha^2)}, \quad \eta_c = \frac{2\alpha(1-2\alpha-\alpha^2)}{(1+\alpha^2)^2}$$

$$\phi_r = \int_{\Delta_{\min}}^{\Delta_{\max}} p d\Delta, \quad \phi_c = \int_{p_{\min}}^{p_{\max}} \Delta dp$$

$$\alpha = \left\{ \left( \frac{2a}{b} \right)^2 + 2 \left( \frac{2a}{b} \right) + 2 \right\}^{\frac{1}{2}} - \left( \frac{2a}{b} + 1 \right)$$

이다.

균열닫힘現象이 일어날 경우에는, 균열열림點(opening point)을 測定하여 그 열림點의 값을 위 積分範圍의 下限値로 하므로써, 有效되풀이  $J$  積分幅  $\Delta J_{eff}$  또는  $\Delta J_{eff}^c$  가 얻어진다.

한편 標準 CT-試片에 대한  $K$  값은 ASTM의 標準式<sup>16)</sup>

$$K = \frac{p \left( 2 + \frac{a}{w} \right)}{B \sqrt{w} \left( 1 - \frac{a}{w} \right)^{3/2}} \left\{ 0.886 + 4.64 \frac{a}{w} - 13.32 \left( \frac{a}{w} \right)^3 + 14.72 \left( \frac{a}{w} \right)^3 - 5.6 \left( \frac{a}{w} \right)^4 \right\} \quad (3)$$

을 使用하여 算出했다.

### 3. 試驗裝置 및 試驗方法

試驗裝置로서는 MTS社製 10t用 油壓서어보式 疲勞試驗機를 使用하였으며, 試驗은 彈塑性領域에서의  $J$  積分評價試驗外에 小規模降伏條件下的  $K$  評價試驗도 함께 施行하여 比較 檢討할 수 있도록 했다. 두 試驗 모두 荷重振幅一定條件下에서 應力比  $R=0.3$  및  $0.5$ 에

대해 行하였으며 특히  $J$  積分 評價試驗에 있어서는 最大荷重을  $p_{\max}=1t$  및  $2t$  으로 固定하였다. 荷重되풀이 速度는,  $J$  積分 評價試驗에서는  $0.01 \sim 0.1\text{Hz}$  를,  $K$  評價試驗에서는  $11\text{Hz}$  를 採擇했다.

균열길이 및 균열닫힘現象은, 筆者들이 使用해 온 Kikukawa-Compliance法<sup>17,18)</sup>을 그대로 利用하여 檢出했다. 다만 彈塑性領域에서의  $J$  積分 評價試驗에서는  $J$  積分값 算出을 위해 荷重-全變位 hysteresis가 必要하므로 Fig. 3과 같은 回路를 構成하여 使用했다. 本測定方法에 關해서는 文獻<sup>17,18)</sup>에 詳細히 記述되어 있으므로 省略하기로 하겠으나, 本方法을 利用하므로써  $J$  積分 評價試驗時 荷重-全變位 hysteresis에서는 나타나지 않는 微小한 균열닫힘現象도 어느 程度 檢出이 可能하게 된다. Fig. 4(a)는 균열길이 및 균열열림點測定用 荷重-減算變位 hysteresis, (b)는  $J$  積分값 算出用 荷重-全變位 hysteresis의 例이다.

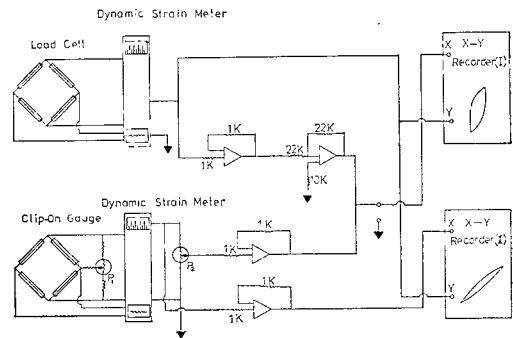


Fig. 3 Circuit diagram for monitoring crack length and crack closure and  $\Delta J$

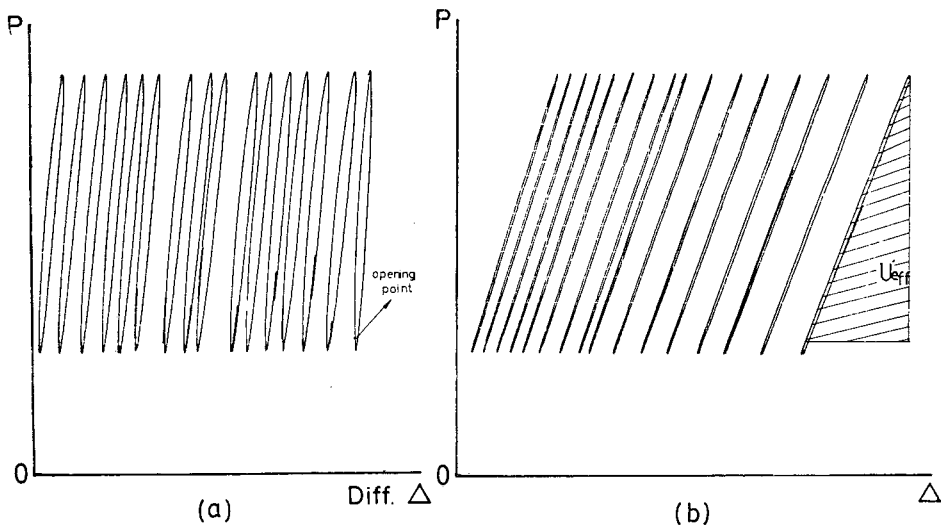


Fig. 4 Load-differential displacement and load-displacement hysteresis loops

4. 試驗結果

Fig. 5는 彈塑性領域에서의 疲勞균열進展速度를 J積分값으로 整理한 것으로서, Fig. 5(a)에서는 Rice 등의 簡便法에 의한 값  $\Delta J^R$ 를 Fig. 5(b)에서는 Merkle과 Corten의 軸力의 影響을 考慮하고 있는 값  $\Delta J^{M.C}$ 를 使用하고 있다. 그림中에는  $\Delta K$ 에 의해 整理한 小規模降伏條件下의 試驗結果도 함께 表示하여 比較할 수 있도록 했다. 本 試驗材料 5083-0 알루미늄합금의 경우, 균

열進展速度는  $\Delta K$ 가 支配的인 小規模降伏條件下에서는 應力比 R의 影響을 받아, 특히 低速度領域에서 그 影響이 顯著하게 나타나나, 彈塑性領域에서의 J積分整理에서는 最大荷重이 낮은  $p_{max}=1t$ 의 경우 應力比의 影響은 거의 나타나지 않고 있다. 最大荷重이 높은  $p_{max}=2t$ 의 경우에는 얻어진 試驗結果의 範圍가 比較的 限定되어 있는 것 외에 試驗結果가 垂直線에 羅列하는 傾向이 있어, 應力比의 影響은 確實하지가 않으나, 進展速度는  $p_{max}=1t$ 의 경우에 比較 全體적으로 높다.

進展速度에 대한 Rice 등의 簡便法에 의한  $\Delta J^R$ 의 整理와 Merkle과 Corten의  $\Delta J^{M.C}$ 에 의한 整理를 比較해 보면,  $\Delta J^{M.C}$ 에 의한 整理結果가 거의 小規模降伏條件下의  $da/dN$ 와  $\Delta K$ 關係의 延長線에 位置하는데 比較,  $\Delta J^R$ 에 의한 整理結果는 全體적으로 進展速度가 높은 쪽으로 치우쳐, J積分값에 關하여 過小評價가 되고 있다. 이러한 傾向은 進展速度를 균열단합現象을 考慮한 有效應力強度係數幅  $\Delta K_{eff}$  및 有效되풀이 J積分幅으로 整理한 Fig. 6에서도 마찬가지로 나타나며, 또한 Fig. 6에서 보는 바와 같이  $\Delta J_{eff}^{M.C}$ 에 의한 整理의 경우가  $\Delta J_{eff}^{R}$ 의 경우보다 흩어짐이 커, 疲勞균열進展速度評價에 있어서도 軸力의 影響을 考慮하고 있는 Merkle과 Corten의 J積分값 算出方法을 使用하는 것이 바람직하다는 것을 알 수가 있다. 따라서 以下에서는 Merkle과 Corten의 J積分값에 의한 結果만을 對象으로 論하기로 하고, 되풀이 J積分  $\Delta J^{M.C}$ 도 添字를 省略하여 簡便히  $\Delta J$ 로 表示하여 使用하기로 한다.

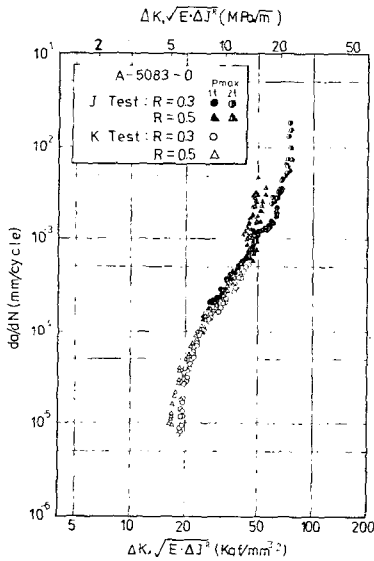


Fig. 5(a)  $da/dN$  as a function of  $\Delta K$  or  $\sqrt{E \cdot \Delta J^R}$

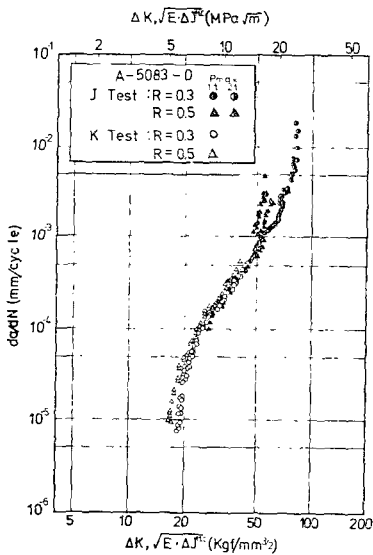


Fig. 5(b)  $da/dN$  as a function of  $\Delta K$  or  $\sqrt{E \cdot \Delta J^{M.C}}$

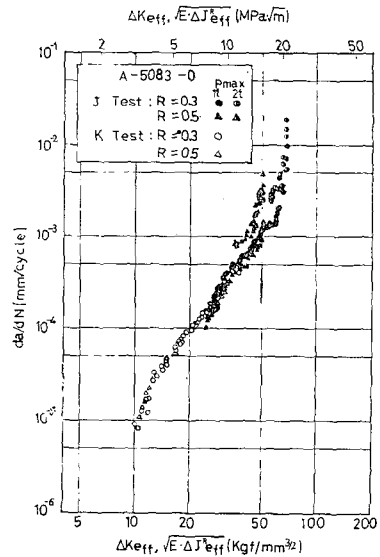


Fig. 6(a)  $da/dN$  as a function of  $\Delta K_{eff}$  or  $\sqrt{E \cdot \Delta J_{eff}^{M.C}}$

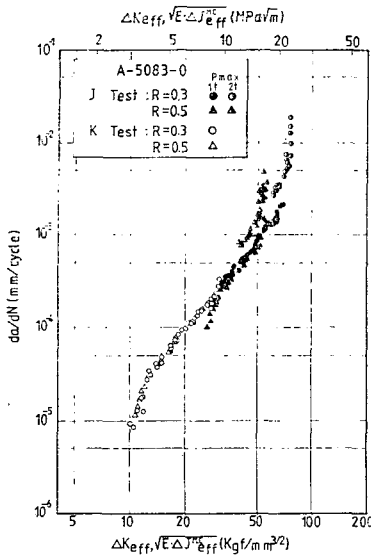


Fig. 6(b)  $da/dN$  as a function of  $\Delta K_{eff}$  or  $\sqrt{E} \cdot \Delta J_{eff}^c$

Fig. 6(b)로부터 알 수 있듯이, 本試驗材料 5083-0 알루미늄합금의 경우에도, 筆者들이 이미 報告해 온 他材料의 경우<sup>17,18)</sup>와 마찬가지로 均열단립現象을 考慮하면,  $\Delta K$ 의 整理에서는 나타나던 應力比  $R$ 의 影響이 없어져, 小規模降伏條件下的 均열進展速度는 有効應力強度係數幅  $\Delta K_{eff}$ 에 의해 거의 一義적으로 決定되며, 또한 이 小規模降伏條件下的  $da/dN$ 와  $\Delta K_{eff}$ 의 關係를 나타내는 直線의 延長線에  $\Delta J_{eff}$ 에 의한 彈塑性領域에서의 進展速度結果가 應力比에 關係없이 連續되어 彈塑性領域에서의 疲勞均열進展速度가 荷重振幅一定條件下에서도 一次的으로는 有効되풀이  $J$ 積分幅에 의해 支配되고 있다고 할 수가 있다. 그러나 最大荷重이 높은  $p_{max}=2t$ 의 경우, 進展速度가 全體적으로 높고 또한 試驗結果가 垂直으로 羅列되는 傾向은 均열단립現象을 考慮한 경우에도 그대로 남아, 有効되풀이  $J$ 積分幅  $\Delta J_{eff}$  만으로는 進展速度를 完全히 나타낼 수 없다는 것을 알 수가 있다. 다만 最大荷重이 높은 경우에도 均열단립現象을 考慮하므로써 試驗結果의 흠어짐은 매우 減少된다.

Fig. 7은 均열열림比(crack opening ratio)  $U (= \frac{p_{max} - p_{op}}{p_{max} - p_{min}}$ ,  $p_{op}$ : 均열열림點荷重, Fig. 2 參照)의 有効應力強度係數幅  $\Delta K_{eff}$  또는 有効되풀이  $J$ 積分幅  $\sqrt{E} \cdot \Delta J_{eff}$ 에 따르는 變化를 나타낸 것이다. 小規模降伏條件下的  $U$ 가  $\Delta K_{eff}$  依存性을 보여  $\Delta K_{eff}$ 가 낮은 경우의 0.6附近的 값으로부터  $\Delta K_{eff}$ 가 높은 경우의

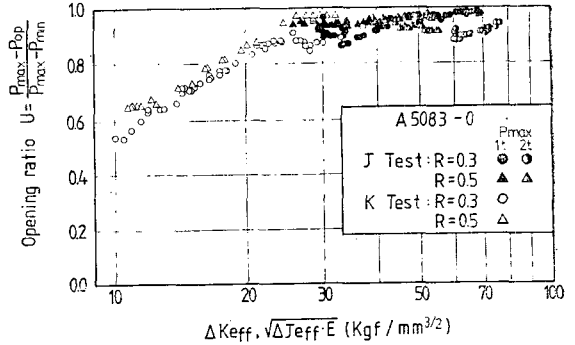


Fig. 7 Variation of crack opening ratio  $U$  with  $\Delta K_{eff}$  or  $\sqrt{E} \cdot \Delta J_{eff}$

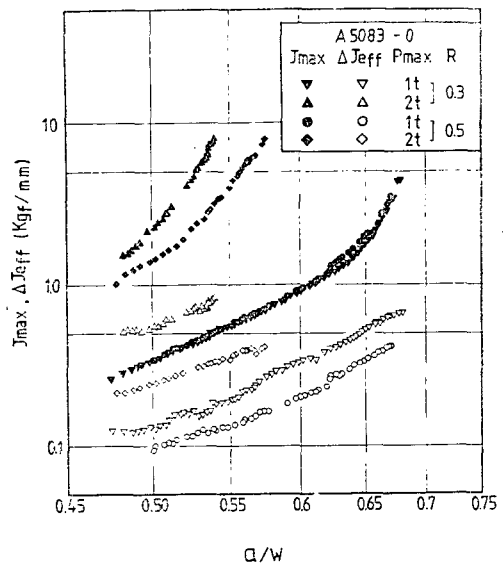


Fig. 8 Variation of  $J_{max}$  and  $\Delta J_{eff}$  with crack length fraction  $a/W$

0.9附近的 값까지 比較的 넓은 範圍에 걸쳐 變化하는데 比較, 彈塑性條件下에서는  $U$ 는  $\Delta J_{eff}$ , 應力比  $R$ , 最大荷重  $p_{max}$ 에 거의 關係없이 0.9 이상의 높은 값이 되어, 小規模降伏條件下에 比較 全體적으로 均열단립現象이 顯著하지 않음을 알 수가 있다.

Fig. 8은 荷重이 되풀이됨에 따라 累積되는 一方向 疲勞變形을 安藤과 小倉의 方法<sup>12)</sup>에 따라  $J_{max}$ 의 變形으로 評價하여, 그  $J_{max}$ 의 均열길이에 따르는 變化를 나타낸 것으로, 그림중에는  $\Delta J_{eff}$ 의 舉動도 함께 表示하고 있다. 均열길이에 따르는  $\Delta J_{eff}$ 의 變化가 荷重의 크기에 關係없이 全體적으로 緩慢한 데 比較,  $J_{max}$ 의 變化는 最大荷重이 높은  $p_{max}=2t$ 의 경우에는 처음부터 크며, 最大荷重이 낮은  $p_{max}=1t$ 의 경우에는 均열이 어느程度 길어진 後 急激해 지고 있다.  $J_{max}$ 의  $\Delta J_{eff}$ 에 대한 依存性에 관해서는 最大荷重의 크기에 따라

樣相이 달라, 最大荷重이 낮은  $p_{max}=1t$ 의 경우에는  $\Delta J_{eff}$ 의 大小에 關係없이  $J_{max}$ 는 그 크기 및 變化가 거의 同一한 데 비해, 最大荷重이 높은  $p_{max}=2t$ 의 경우에는  $\Delta J_{eff}$ 가 큰 應力比  $R=0.3$ 의  $J_{max}$ 가  $R=0.5$ 의  $J_{max}$ 보다 크기 및 變化가 커, 이른 바 되풀이 크리이프(cyclic creep)現象이 顯著하게 나타나고 있다. 특히 Fig. 8의  $J_{max}$ 의 擧動과 Fig. 6(b)의  $\Delta J_{eff}=(\Delta J_{eff}^{*})$ 에 의한 進展速度結果를 比較해 보면,  $J_{max}$ 의 變化가 急激한  $J_{max} \geq 1.0 \text{ kgf/mm}$ 의 範圍의 結果가  $\Delta J_{eff}$ 에 의한 進展速度整理에서 垂直으로 羅列되는 傾向이 있음을 알 수가 있다.

여기서,  $J_{max}$ 가 增加하면 예를 들어 疲勞破壞靱性  $J_{fc}$ 와 같은 材料의 破壞抵抗이 低下되어 균열進展速度가 加速된다고 생각하여, 새로운  $\Delta J_{eff} / (1 - \frac{J_{max}}{c})$ 와 같은 parameter를 導入하여 彈塑性條件下的 試驗結果를 再整理하면 Fig. 9와 같이 된다. 여기서 材料定數  $C$

는 試驗結果에 알맞도록  $c=12 \text{ kgf/mm}$ ( $J$ 積分次元)로 잡고 있다. 試驗結果는 應力比, 最大荷重의 크기에 關係없이 約 2倍 程度의 速度範圍內에서 하나의 直線關係를 이루고 있다. 이로부터 荷重制御下에서 一方向疲勞變形이 顯著하게 增加하는 경우에도, 이를  $J_{max}$ 의 形態로 考慮하면 彈塑性條件下的 進展速度를  $J$ 積分 概念에 의해 어느程度 一義的으로 評價할 수 있다는 것을 알 수가 있다.

彈塑性條件下的 疲勞균열進展速度는

$$\left. \begin{aligned} \frac{da}{dN} &= 3.82 \times 10^{-3} \left( \frac{\Delta J_{eff}}{1 - \frac{J_{max}}{12}} \right)^{1.41} \\ &= 1.40 \times 10^{-8} \left( \sqrt{\frac{\Delta J_{eff}}{1 - \frac{J_{max}}{12}} \cdot E} \right)^{2.82} \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

와 같이 表示되어, 指數 1.41( $\Delta K_{eff}$ 換算指數 2.82)은 小規模降伏條件下的  $da/dN \geq 10^{-4} \text{ mm/cycle}$ 의 速度範圍에 대한 指數( $\Delta K_{eff}$ 에 관하여 2.2) 보다는 若干 큰 傾向이 있으나, 鋼系統 材料의 彈塑性條件下的 均열進展速度에 대해 지금까지 報告되고 있는  $1.2 \sim 1.77^{3-5, 8, 9, 11, 12, 19-23}$ 에 比較해서는 거의 中間값이 되고 있다.

### 5. 考 察

#### 5.1. 되풀이 J積分 評價法

Fig. 5 및 Fig. 6에서 指摘한 바와 같이, Rice 등의 簡便法<sup>14)</sup>에 의한 되풀이 J積分값 評價는 過小評價가 되는 傾向이 있다.

따라서 CT-試片을 使用하여 彈塑性疲勞균열進展速度를 J積分 概念에 의해 評價하려 할 경우에는, 되풀이 J積分값 算出은 未균열殘存斷面(ligament)의 軸力의 影響을 考慮하고 있는 式(2)와 같은 Merkle과 Corten의 評價式 또는 이를 더욱 簡單하게 한, 즉 式(2)의 括弧안의 第1項만을 採用하는 Clarke와 Landes의 評價式<sup>24)</sup>을 使用하는 것이 바람직하다. Clarke와 Landes의 評價法은 計算이 簡便하여 ASTM  $J_{IC}$ 試驗法<sup>25)</sup>에도 使用되고 있으나,  $a/W < 0.5$ 範圍에서 Merkle과 Corten의 式에 비해 若干 正確도가 低下되는 傾向도 指摘되고 있어<sup>24)</sup> 本研究에서는 後者의 方法을 使用했다. 그러나 두 方法의 差異는 매우 작은 것이 普通이다.

#### 5.2. 彈塑性領域에서의 應力比의 影響

一般的으로 小規模降伏條件하의 疲勞균열進展速度는 Fig. 5에서 보는 바와 같이,  $\Delta K$ 의 整理에서는 應力比의 影響을 받으며, 그 影響은 進展速度가 낮은 領域에서 顯著하고 進展速度가 增加할수록 작아지는 것이 普

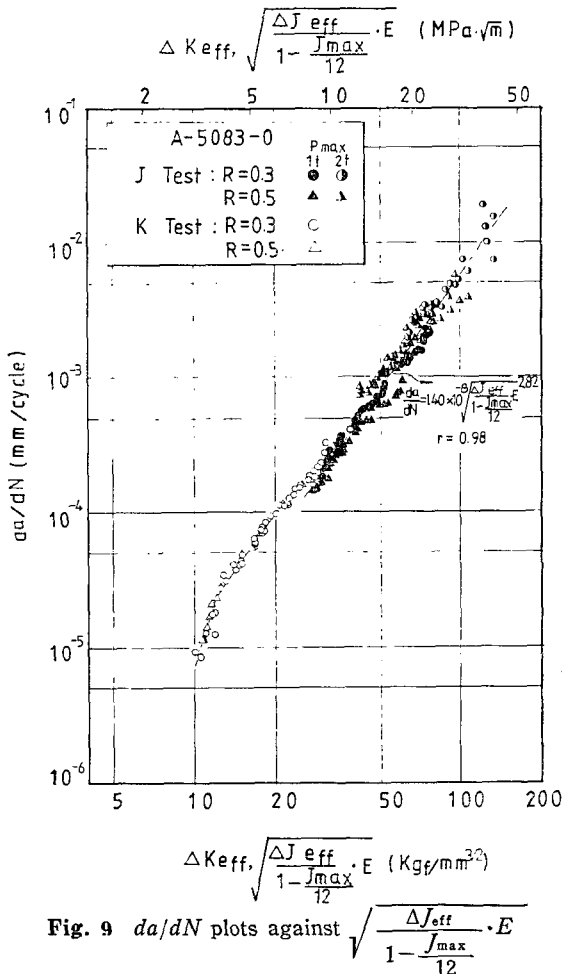


Fig. 9  $da/dN$  plots against  $\sqrt{\frac{\Delta J_{eff}}{1 - \frac{J_{max}}{12}} \cdot E}$

通이다. 이것은 균열先端에 形成되는 塑性域이 커질수록 塑性變形에 의한 應力緩和效果가 커지기 때문으로, 따라서 大規模降伏 또는 全面降伏條件下에서는 應力比의 影響은 거의 나타나지 않는 것이 一般의이며, 本研究의 Fig. 5의  $p_{max}=1t$ 의 結果 또는 지금까지 報告되고 있는 應力比가 連續적으로 變化하는 變位制御下の 研究結果<sup>3,4,11)</sup>가 이를 뒷받침하고 있다. 또한 以上과 같은 應力比의 影響은 Fig. 6에서 보는 바와 같이 均열 단립現象을 考慮하므로써 消失되는 것이 普通이다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 最大荷重이 높은  $p_{max}=2t$ 의 試驗結果에는 一見應力比의 影響이 나타나고 있다고도 할 수가 있어, 위의 所論과는 相反되는 形態가 되고 있으나, 이러한 試驗結果의 傾向은 均열 단립現象을 考慮한 Fig. 6의 경우에도 그대로 나타나나  $J_{max}$ 를 考慮한 Fig. 9에서는 거의 消失되는 것으로 보아, 應力比의 影響이라기 보다는 높은 最大荷重에 의한 一方向疲勞變形의 影響으로 생각하는 것이 合理的인 것이다. 따라서 大規模降伏條件下的 均열進展速度에 대해서는 應力比의 影響은 나타나지 않는 것으로 생각하여 좋으나, 대신 最大荷重의 影響, 嚴密하게는 一方向疲勞變形의 影響을 考慮할 必要가 있다.

### 5.3. 一方向 疲勞變形이 進展速度에 미치는 影響

Fig. 6 및 Fig. 8에서 若干 言及한 바와 같이, 最大荷重이 比較的 낮아 一方向疲勞變形이 顯著하지 않은 경우에는 彈塑性領域에서의 均열 進展速度는 均열 단립現象을 考慮한 有効되풀이  $J$ 積分幅  $\Delta J_{eff}$ 에 의해 잘 整理되며, 이 경우의 均열進展速度和 有効되풀이  $J$ 積分幅의 關係는 거의 小規模降伏條件下的 關係의 延長線에 있으나 最大荷重이 높아 一方向 疲勞變形이 顯著하게 되면 具體적으로는  $J_{max}$ 의 크기 및 均열길이에 따르는 變化가 急激해 지면, 試驗結果는 高進展速度쪽으로 偏在하게 되며 홀어짐도 커진다. 이와 같은 이른바  $\Delta J_{eff}$ 의 有用範圍에 관해서는 CT-試片의 殘存斷面이 全面降伏하는 塑性崩壞(plastic collapse)荷重이 限界荷重이 된다는 星出들의 檢討結果<sup>23)</sup>가 있다. 塑性崩壞荷重  $p_{rs}$ 는 便宜上 材料를 完全彈塑性體라 假定하면 簡單한 材料力學計算으로부터 다음과 같이 얻어진다.<sup>15)</sup>

$$p_{rs} = \left[ -\left(1 + \frac{a}{W}\right) + \left\{ 2 + 2\left(\frac{a}{W}\right)^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \right] \sigma_s \cdot B \cdot W \quad (5)$$

여기서  $\sigma_s$ 는 材料의 降伏應力이다. 本 試驗片에 있어서 最大荷重이  $p_{max}=1t$  및  $2t$ 일 경우 塑性崩壞荷重에 到達하는 均열길이는 各各  $a/W=0.60$  및  $0.45$ 가 된다.

Fig. 8에서  $J_{max}$ 가 急增하는 均열길이는  $p_{max}=1t$ 일 경우  $\frac{a}{W}=0.62$ 附近이며,  $p_{max}=2t$ 일 경우는 全試驗範圍( $\frac{a}{W}>0.48$ )로 式(5)에 의한 全面降伏荷重到達均열길이와 거의 一致하고 있다. 이로 부터 試驗片이 全面降伏하게 되면 一方向疲勞變形이 急增하게 되고 有効되풀이  $J$ 積分만으로는 彈塑性 疲勞均열 進展速度를 評價할 수 없다는 것을 알 수가 있다. 따라서 有効되풀이  $J$ 積分의 有効限界에 관해서는 星出들의 報告<sup>23)</sup>와 마찬가지로 全面降伏荷重을 限界荷重으로 생각하면 되나, 限界荷重을 넘는 경우에도 Fig. 9에서 보는 바와 같이 一方向疲勞變形을 安藤과 小倉의 方法에 따라  $J_{max}$ 의 形態로 評價하여, 이  $J_{max}$ 의 均열進展速度에 미치는 影響을 本研究에서와 같이 靱性の 低下形式으로 考慮하면 彈塑性 疲勞均열 進展速度를  $J$ 積分 概念에 의해 어느 程度 一義적으로 整理할 수가 있다. 그러나 Fig. 9의 試驗結果를 詳細히 檢討해 보면 式(4)에 의한 整理는  $J_{max}$ 의 작은 範圍에서 若干 過大評價,  $J_{max}$ 의 큰 範圍에서는 若干 過小評價가 되고 있는 傾向도 보여, 今後의 많은 데이터의 蓄積과 함께 一方向疲勞變形의 評價方法을 비롯하여 進展速度에 미치는 그 影響의 考慮方法에 관해서도 系統的인 檢討가 必要하다고 생각된다.

## 6. 結 論

5083-0 알루미늄合金을 使用하여 一定振幅荷重下에서 疲勞均열進展試驗을 全面降伏을 包含하는 넓은 領域에 걸쳐 施行하여,  $J$ 積分에 의한 進展速度評價에 관하여 檢討했다. 얻어진 結果를 要約하면 다음과 같다.

1) CT-試驗片에 대한 되풀이  $J$ 積分 評價에 있어서는 Rice 들의 方法은 過小評價가 되는 傾向이 있으므로 軸力의 影響을 考慮한 算出方法을 使用하는 것이 바람직하다.

2) 塑性變形이 巨視적으로 檢出되나 最大荷重이 比較的 낮아 全面降伏荷重以下일 경우에는 荷重制御條件下에서도 彈塑性 疲勞均열 進展速度는 均열 단립現象을 考慮한 有効되풀이  $J$ 積分에 의해 잘 整理되나, 最大荷重이 높아 全面降伏荷重以上이 되면 一方向疲勞變形이 顯著하게 나타나 되풀이  $J$ 積分만으로는 均열進展速度를 評價할 수가 없다.

3) 試驗片이 全面降伏하는 경우에도 一方向疲勞變形을  $J_{max}$ 의 形態로 評價하여,  $J_{max}$ 의 均열進展速度에 미치는 影響을 靱性の 低下形式으로 考慮하면, 最大荷重이 높은 荷重制御條件下에서도 進展速度의 넓은 範

圖에 걸쳐 彈塑性疲勞균열進展速度를  $J$ 積分에 의해 어느程度 一義的으로 評價할 수가 있다.

參 考 文 獻

- (1) 宋智浩, “破壞力學의 現況(I)”, 大韓機械學會誌, 第20卷, 第6號, p.451, 1980.
- (2) J.R. Rice, “A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks”, J. of Appl. Mech., Trans. of ASME, E, Vol. 35, pp.379~386, 1968.
- (3) N.E. Dowling and J.A. Begley, “Fatigue Crack Growth During Gross Plasticity and the J-Integral”, ASTM STP 590, pp.82~103, 1976.
- (4) N.E. Dowling, “Geometry Effects and the J-Integral Approach to Elastic-Plastic Fatigue Crack Growth”, ASTM STP 601, pp.19~32, 1976.
- (5) N.E. Dowling, “Crack Growth During Low-Cycle Fatigue of Smooth Axial Specimens”, ASTM STP 637, pp.97~121, 1977.
- (6) J.C. Radon, C.M. Branco and L.E. Culver, “Creep in Low Endurance Fatigue of Mild Steel”, Int. J. of Fracture, Vol. 13, pp.595~610, 1977.
- (7) K. Sadananda and P. Shahinian. “A Fracture Mechanics Approach to High Temperature Fatigue Crack Growth in Udimet 700”, Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp.73~86, 1979.
- (8) D.F. Mowbray, “Use of a Compact-Type Strip Specimen for Fatigue Crack Growth Rate Testing in the High-Rate Regime”, ASTM STP 668, pp.736~752, 1979.
- (9) S. Taira, R. Ohtani and T. Komatsu, “Application of J-Integral to High-Temperature Crack Propagation, Part II -Fatigue Crack Propagation”, J. of Engng. Mat. and Tech., Trans. of ASME, H, Vol. 101, pp.162~167, 1979.
- (10) K. Sadananda and P. Shahinian, “Elastic-Plastic Fracture Mechanics for High-Temperature Fatigue Crack Growth”, ASTM STP 700, pp.152~163, 1980.
- (11) 星出, 山田, 田中, “全面降伏狀態における中央き製板の  $J$ 積分評價と疲勞き裂傳ばへの適用”, 材料, Vol. 31, pp.810~816, 1982.
- (12) 安藤, 小倉, “ $J$ -積分によるき裂傳ば速度の評價”, 材料, Vol. 27, pp.767~772, 1978.
- (13) S.J. Garwood, J.N. Robinson and C.E. Turner, “The Measurement of Crack of Crack Growth Resistance Curves (R-Curves) Using the J Integral”, Int. J. of Fracture, Vol. 11, pp.528~530, 1975.
- (14) J.R. Rice, P.C. Paris and J.G. Merkle, “Some Further Results of J-Integral Analysis and Estimates, ASTM STP 536, pp.231~245, 1973.
- (15) J.G. Merkle and H.T. Corten “A J Integral Analysis for the Compact Specimen, Considering Axial Force as Well as Bending Effects”, J. of Press. Vess. Tech., Trans. of ASME, J. Vol. 96, pp.286~292, 1974.
- (16) ASTM Designation: E647-81 Standard Test Method for CONSTANT-LOAD-AMPLITUDE FATIGUE CRACK GROWTH RATES ABOVE  $10^{-8}$ m/CYCLE.
- (17) 宋智浩, 金一鉉, 辛龍承, “2017-T3 알루미늄合金의 疲勞龜裂進展과 龜裂단입現象”, 大韓機械學會論文集, 第4卷, 第2號, pp.47~53, 1980.
- (18) 權世憲, 林昇奎, 朴榮祖, 宋智浩, “高張力鋼의 平面變形率條件下의 疲勞균열進展과 균열단입現象”, 大韓機械學會 1981年度 秋季學術大會論文抄錄集, pp.85~90, 1981.
- (19) 平, 田中, 小川, “彈塑性および全面降伏條件下での疲勞き裂傳ば則”, 材料, Vol. 26, pp.93~98, 1977.
- (20) 田中, 星出, 平, “低炭素鋼の疲勞き裂傳ばに及ばず豫ひずみの影響”, 材料, Vol. 28, pp.497~503, 1979.
- (21) J.S.Huang and R.M.Pelloux, “Low Cycle Fatigue Crack Propagation in Hastelloy-X at 25 and 760°C, Metall. Trans. A, Vol. 11A, pp.899~904, 1980.
- (22) Ö. Vardar, “Fatigue Crack Propagation Beyond General Yield”, J. of Engng. Mat. and Tech., Trans. of ASME, H, Vol. 104, pp.192~199, 1982.
- (23) 星出, 田中, 仲田, 彈性, “彈塑性および全面降伏條件下ごの疲勞き裂傳ば則の實驗的檢討”, 材料, Vol. 31, pp.566~572, 1982.
- (24) G.A. Clarke and J.D. Landes, Evaluation of the J Integral for the Compact Specimen, J. of Testing and Evaluation, Vol. 7, pp.264~269, 1979.
- (25) ASTM Designation: E813-81, Standard Test for  $J_{Ic}$ , A MEASURE OF FRACTURE TOUGHNESS