

破壞力學의 現況(II)

宋 智 浩

〈漢陽大 工大 機械工學科·工博〉

■ 前號의 破壞力學의 現況(I)에서는, 破壞에 관한 一般의 事項과 破壞力學의 特徵을 筆者나름대로 整理해 보고, 線形破壞力學의 簡單한 概況과 함께 線形破壞力學의 범주(category) 안에서 現在 關心의 對象이 되고 있다고 생각되는 몇가지 主要話題中, 變動荷重下의 疲勞龜裂進展에 관한 研究狀況을 살펴 보았다.

本稿에서는 그 主要話題中의 하나인 表面龜裂問題에 대해 敘述해 볼가 한다.

4.2 表面균열

70年代 初半頃만 하더라도 이 問題에 관한 研究報告數는 매우 限定되어 있었으며, 그 內容도 大概가 應力強度係數評價에 관한 것으로 그 中에는 現在도 널리 利用되는 有益한 結果^{1)~8)}도 多數 包含되고 있었으나, 實驗的인 結果는 初步的인 것^{9)~14)}을 除外하고는 거의 없는 狀況이었다.

그러나 近來의 균열問題에 대한 各種 測定 및

解析技術의 向上에 따라, 最近 數年사이에 表面 균열問題에 관해서도 많은 量의 研究結果가 報告되고 있으며, 그 中에는 實用的으로 매우 有用한 結果도 相當數 包含되어 있다.

以下에서는 表面균열問題를 몇가지 項으로 나누어 說明하고자 하나, 內容中에 Crack과는 若干 ニュ앙스가 다르다고 생각되는 flaw라는 用語가 나온다. 이른바 龜裂에 대해 크랙(crack)으로 統一하자는 論議도 있으나, flaw를 크랙으로 對應시키는 것은 若干 이상한 감이 있으며, 韓·外來語 또는 漢·外來語 表現의 使用은 可及的 避하는 것이 바람직하다는 것과, 한편 龜裂은 「구열」, 「귀열」 등으로 읽힐 염려가 있다는 點等을 考慮하여, 本文에서는 crack, flaw 모두 「균열」로 統一하여 表記하기로 했다.

4.2.1 表面균열의 形態

荷重을 받는 實際의 部品 또는 部材에 發生하는 이른바 自然균열(natural flaw)은, 特殊한

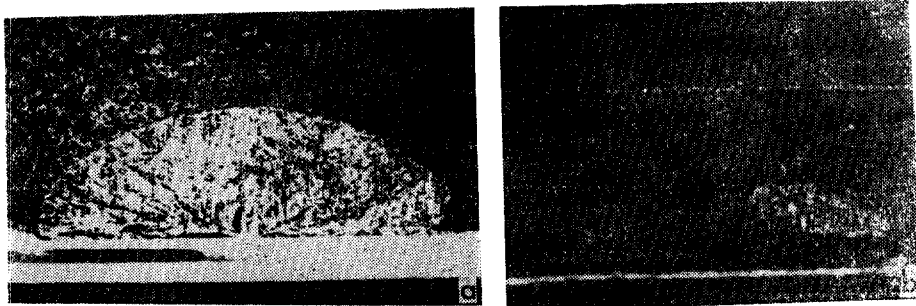


Fig. 1 Natural surface flaw¹⁵⁾.

경우를 除外하고는 균열길이의 測定 혹은 應力強度係數 K의 解析이 比較的 容易한 板두께를 貫通하는 貫通균열(through-thickness crack)의 形態로 보다는, 表面균열(surface flaw) 또는 部分貫通균열(part-through crack)이라 불리우는 三次元 特性을 지닌 균열形態로 나타나는 것이 普通이다.

表面균열은 균열면이 한 表面에만 露出되는 Fig. 1(a)와 같은 경우가 一般의이나, 應力集中部의 形狀等에 따라서는 Fig. 1(b)와 같이 두 表面에 露出되는 경우가 있으며, 이에 대해서는 특히 角隅균열(corner crack)이라 하여 區別하는 것이 普通이다.

Fig. 1(a)와 같은 一般의인 表面균열의 形狀은, 균열크기가 매우 작을 경우에는 거의 半橢圓形이며, 균열이 成長하여 어느程度 커지면若干 差異가 생기는 경우도 있으나^{15), 16)}, 一般의으로 半橢圓形이라 看做하여 거의 問題가 없다.

半橢圓形 表面균열의 幾何學的 形狀比(aspect ratio, 長軸 및 短軸의 半徑比)는 균열의 크기에 따라 變化하는 것이 一般의이고^{9, 15, 17~20)}, 그 變化는 荷重形式에는 물론 材料에 따라서도 다르며^{10, 21)}, 특히 人工缺陷으로부터 表面균열이 發生할 때에는 주어진 初期缺陷의 形狀에 크게 影響을 받으므로^{10, 22)}, 人工缺陷으로부터 表面균열을 發生시켜, 그 進展舉動等을 論할 때에는 初期人工缺陷의 影響에 대해서 充分히 檢討해 둘 必要가 있다.

表面균열의 形狀比는 다음의 4.2.2項에서 알 수 있는 바와 같이 表面균열의 應力強度係數값에 影響을 미치며, 또한 表面균열의 測定은 光學的으로는 表面에 露出되고 있는 表面길이測定을 追해서만 可能하므로, 表面균열의 形狀比 變化에 관한 情報는 表面균열의 研究에서 必須의 이다.

角隅균열의 形狀은, 發生部位附近의 幾何學的 形狀에 크게 影響을 받아, 一般의으로 매우 複雜한 形態가 되나²³⁾, 解析等에는 1/4圓 또는 1/4橢圓, 혹은 橢圓의 어떠한 一部分으로 다루는 경우가 많다^{3, 24, 25)}.

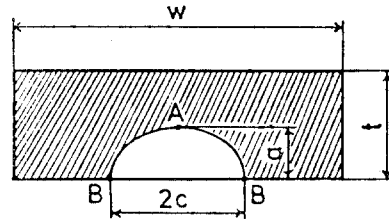


Fig. 2 Semi-elliptical Surface flaw in a finite plate.

4.2.2 表面균열의 應力強度係數

Fig. 2와 같은 半橢圓表面균열은, 試驗片表面 B點에서 平面應力, 內部A點에서 平面變形率, 그 中間點에서는 混合된 應力狀態가 되는, 즉 균열先端曲線의 位置에 따라 應力狀態가 變化하는 三次元特性을 지니므로, 應力強度係數에 관한 嚴密한 解析解는 存在하지 않으며, 따라서 近似解^{1, 3, 4, 6, 7, 27~29)}, 實驗值^{16, 17, 30~33)} 또는 이들 結果를 利用하여 얻은 經驗式^{2, 8, 34)}이 多數 提案되고 있다.

表面균열에 대한 應力強度係數 評價法으로서 最初의 것이며, 簡便하다는 理由로 現在도 많이 利用되고 있는 것에 Irwin의 近似解¹⁾가 있다. 그 近似解에 의하면, 均一한 引張應力을 받는 Fig. 2의 表面균열에 대한 應力強度係數 K_I 은, $a \leq c$ 일 경우 균열의 內部點A에서 언제나 그 最大值를 가지며, 그 값은 다음과 같이 表示된다.

$$K_I = 1.095\sigma \sqrt{\pi a/Q} \quad (1)$$

여기서 σ 는 負荷된 引張力이며, Q 는 表面균열의 形狀과 균열先端의 塑性域을 考慮한 다음과 같은 값이다.

$$Q = \phi^2 - 0.212 \left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}} \right)^2 \quad (2)$$

ϕ 는 다음式으로 定義되는 第2種完全橢圓積分(the complete elliptical integral of the second kind)이며, σ_{ys} 는 材料의 降伏應力이다.

$$\phi = \int_0^{\pi/2} \left\{ \sin^2 \phi + \left(\frac{a}{c} \right)^2 \cos^2 \phi \right\}^{\frac{1}{2}} d\phi \quad (3)$$

式(1)中の 係數 1.095는 有限板의 自由表面의 影響을 考慮하는 값이다. Irwin의 近似解에는 여러가지 缺點이 있으므로^{35, 36)}, 有限板에 半橢圓表面균열이 存在할 경우의 應力強度係數 K_I 에

□ 解 說

대해서는 다음과 같은 形式으로 나타내고, 그 最大值는 균열의 形狀比가 $\frac{a}{c} < 1$ 일 경우에는 內部點 A에, $\frac{a}{c} \geq 1$ 일 경우에는 表面點 B에 存在한다고 생각하는 것이 通例이다. 參考로 指摘해 두면, $\frac{a}{c}$ 의 값에 따라서는 應力強度係數의 最大值가 A와 B의 中間點에서 일어난다는 報告²⁷⁾도 있다.

$$K_I = M\sigma\sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (4)$$

여기서 Q는 式(2)와는 달리

$$Q = \phi^2 \quad (5)$$

을 나타내며, 이 경우의 Q를 彈性形狀係數(elastic shape factor)라 한다. M은 修正係數(magnification factor)로서, 다음과 같은 몇개의 補正係數(correction factor)로 나눌 수가 있다.

$$M = M_s \cdot M_f \cdot M_w \cdot M_p \quad (6)$$

여기서 M_s 는 균열前面表面(front surface), 즉 균열이 板과 交差하는 自由表面의 影響을 考慮하는 係數이며, M_f 는 균열前方의 自由表面의 存在를 考慮하는, 즉 貫通균열에서의 有限幅에 대한 修正係數에 對應하는, 後面表面(back surface) 補正係數, M_w 는 有限幅 w의 影響을 考慮하는 側表面(side boundaries) 또는 有限幅(finite-width) 補正係數이며, M_p 는 균열先端의 塑性域(crack tip plasticity)에 대한 補正係數이다. 塑性域 補正係數 M_p 의 評價에 관한 報告도 二, 三 있으나^{5, 18)}, 高週波이數疲勞(high-cycle fatigue)에서의 균열進展의 경우와 같이, M_p 가 거의 1이 될 때에는

$$M = M_s \cdot M_f \cdot M_w \equiv M_e \quad (7)$$

가 되며, 이때의 修正係數 M_e 를 특히 彈性修正係數(elastic magnification factor)라 한다.

表面균열이 굽힘荷重을 받는 경우에는 彈性修正係數 M_e 를 M_B 로 나타내는 것이 慣習이며, 應力強度係數는 다음과 같이 表示된다.

$$K_I = M_B \cdot \sigma_B \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (8)$$

여기서 σ_B 는 最大公稱 굽힘應力이다.

表面균열에 대한 應力強度係數는 補正係數 M_s , M_f , M_w 또는 M_e 혹은 M_B 의 評價를 통해 얻어 지게 되며, 各 補正係數의 評價에 關係서는 形

狀比 $\frac{a}{c}$ 를 parameter로 하여 圖表로 나타낸 結果가 많다.

그중 引用頻度가 높은 것으로서는 Shah-Kobayashi⁷⁾ 그리고 Rice-Levy⁶⁾의 結果等이다.

圖示의 結果는, 形狀比가 連續적으로 變化하는 一般의인 경우, 內插(interpolation)하여 使用하지 않으면 안된다는 等의 不便한 點이 많아 各 補正係數에 關係 報告된 많은 結果를 綜合하여, 使用하기 便利한 式形式으로 K_I 을 評價하는 經驗式이 多數 提案되고 있으며, 이에 關한 最近의 Newman의 解說³⁴⁾이 매우 有用하리라 생각된다. 均一한 引張應力을 받는 表面균열에 대한 經驗式中 主要한 것을 列擧해 보면 다음과 같다.

○ Paris-Sih의 式²⁾

$$M_e = \left[1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{c} \right) \sqrt{\frac{2t}{\pi a} \tan \left(\frac{\pi a}{2t} \right)} \right] \quad (9)$$

有效範圍: $\frac{a}{c} \leq 1, \frac{a}{t} \leq 0.75$

○ Anderson-Holms-Orange의 式³⁴⁾

$$M_e = \left[1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{c} \right) \sqrt{\frac{2tQ}{\pi a} \tan \left(\frac{\pi a}{2tQ} \right)} \right] \quad (10)$$

有效範圍는 $\frac{a}{c} \leq 1, \frac{a}{t} \leq 1$ 이며, 式中の Q는 式(5)의 彈性形狀係數이다.

○ Newman의 式⁸⁾

$$M_e = \left[M_s + \left(\sqrt{Q \frac{c}{a}} - M_s \right) \left(\frac{a}{t} \right)^p \sqrt{\text{Secant} \left[\frac{\pi c}{w} \cdot \frac{a}{t} \right]} \right] \quad (11)$$

여기서

$$p = 2 + 8 \left(\frac{a}{c} \right)^3 \quad (12)$$

이며, Q는 다음과 같은 近似值(誤差 0.25%)를 使用할 수가 있다.

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{c} \leq 1 \text{에 대해 } Q &= 1 + 1.47 \left(\frac{a}{c} \right)^{1.64} \\ \frac{a}{c} > 1 \text{에 대해 } Q &= 1 + 1.47 \left(\frac{c}{a} \right)^{1.64} \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

前面表面 補正係數 M_s 에 대해서는

$0.02 \leq \frac{a}{c} < 1$ 일 때

$$\left. \begin{aligned} M_s &= 1.13 - 0.1 \left(\frac{a}{c} \right) \\ \frac{a}{c} > 1 \text{ 일 때} \\ M_s &= \sqrt{\frac{c}{a}} \left(1 + 0.03 \frac{c}{a} \right) \end{aligned} \right\} (14)$$

$\frac{a}{c} < 0.02$ 에 대해서는 單一모서리균열 (single-edge crack) 板에 대한 다음과 같은 修正係數를 使用한다.

$$M_s = 1.12 - 0.23 \left(\frac{a}{t} \right) + 10.55 \left(\frac{a}{t} \right)^2 - 21.71 \left(\frac{a}{t} \right)^3 + 30.38 \left(\frac{a}{t} \right)^4 \quad (15)$$

○ Newman-Raju의 式³⁴⁾

$$M_s = \left[M_s + \left(\sqrt{Q \frac{c}{a}} - M_s \right) \left(\frac{a}{t} \right)^p + \sqrt{Q \frac{c}{a}} (M' - 1) \left(\frac{a}{t} \right)^{2p} \right] M_w \quad (16)$$

여기서 $p = \sqrt{\pi}$ (17)

이며 Q 는 式(13)으로 주어지며, M_s , M' 및 M_w 는 各各 다음과 같은 값이다.

$0.03 \leq \frac{a}{c} < 1$ 에 대해

$$\left. \begin{aligned} M_s &= 1.13 - 0.1 \left(\frac{a}{c} \right) \\ \frac{a}{c} > 1 \text{ 에 대해} \\ M_s &= \sqrt{\frac{c}{a}} \left(1 + 0.03 \frac{c}{a} \right) \end{aligned} \right\} (18)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{a}{c} \leq 1 \text{ 의 경우 } M' &= \sqrt{\frac{\pi}{4}} \\ \frac{a}{c} > 1 \text{ 의 경우 } M' &= 1 + \frac{c}{a} \left(\sqrt{\frac{\pi}{4}} - 1 \right) \end{aligned} \right\} (19)$$

$$M_w = \sqrt{\text{Secant} \left[\frac{\pi c}{w} \sqrt{\frac{a}{t}} \right]} \quad (20)$$

$\frac{a}{c} < 0.03$ 일 경우에는 M_s 로서 式(15)를 使用한다.

위의 式中, Paris-Sih의 式 및 Anderson-Holms-Orange의 式에는 有限幅補正係數 M_w 가 包含되어 있지 않다. 光彈性實驗結果³²⁾에 의하면, $\frac{2c}{w}$ 가 0.43에서 0.81로 變化할 경우 內部點A에서의 應力強度係數값의 增加는, $\frac{a}{t} = 0.19$ 일 경우 4%, $\frac{a}{t} = 0.36$ 일 경우 10%程度로서 M_w 의 影響은 그다지 크지 않다고도 생각할 수 있으므로, 위 두式도 경우에 따라서는 實用的으로 充分할 可能性이 있다. 有限幅補正係數 M_w 로서는, Newman의 式(11)에서의

$$M_w = \sqrt{\text{Secant} \left[\frac{\pi c}{w} \cdot \frac{a}{t} \right]}$$

및 Newman-Raju의 式(20) 외에

$$M_w = \left[1 - \frac{2c}{w} \cdot \frac{a}{t} \right]^{-1} \quad (21)$$

와 같이 斷面積補正 (area correction)으로 代置하는 경우도 있으나, 이 경우는 一般的으로 過大評價가 되는 傾向이 있다³²⁾.

굽힘荷重에 대한 彈性修正係數 M_B 에 관해서는 近似解等에 의한 結果가 매우 적어, 現在 特記할 만한 經驗式은 없다.

以上の 經驗式을 包含하여, 理論的 近似解 또는 三次元有限要素法等에 의한 表面균열에 대한 應力強度係數 評價는 終局的으로는 實驗的 檢證을 거칠 必要가 있으며, 그 檢證方法으로서는 三次元光彈性균열解析法 또는 適當한 破壞力學的 試驗을 들 수가 있을 것이다.

三次元光彈性 均열解析法이 檢證方法 또는 應力強度係數에 대한 直接的 評價方法으로서 매우 有用하다고 생각이 되나, 光彈性材料에 表面균열을 作成하는 作業이, 그다지 容易하지 않다는 것과 어느程度 工學的으로 有益한 結果를 얻기 위해서는 相當한 數의 試驗片을 準備하여 各 形狀比 $\frac{a}{c}$ 에 대해 $\frac{a}{t}$ 및 $\frac{c}{w}$ 를 變化시키면서 일일이 實驗을 施行하지 않으면 안된다는 등의 難點이 있어, 研究結果는 매우 限定되어 있는 것이 實情이다^{16, 30-33)}. 어떠한 特定的 近似解 또는 經驗式이 光彈性解析結果와 잘 一致한다는 報告도 있기는 하나, 斷片的인 경우가 많다^{31, 32)}. 最近은 두께가 50μ 程度의 teflon膜을 使用하여 接着法에 의해 表面균열을 作成하는 試圖가 이루어지고 있으며, 이 方法을 利用하여 얻은 光彈性解析結果로부터 經驗式을 提案하고 있는 報告도 있다³³⁾.

破壞力學試驗의 方法으로서는 表面균열材의 破壞靱性試驗結果를 利用하는 方法과 疲勞균열進展試驗結果를 利用하는 方法이 있다.

破壞靱性試驗結果를 利用하는 方法은 提案된 應力強度係數 評價法에 따라 破壞靱性值 K_{IC} 를 計算하여, 그 값이 parameter $\frac{a}{c}$ 및 $\frac{a}{t}$ 에 關係없이 一定한 가의 如否를 檢討하는 것으로, 現

在表面균열材에 대해 얻어진 系統的인 破壞靱性實驗結果가 그다지 많지 않아, epoxy材料에 대한 F.W. Smith의 結果가 많이 引用되나^{27,34)} 알루미늄合金, 鋼 또는 티타늄合金에 대한 結果를 利用한 報告^{1,3,5,8,33,35)}도 있다. 얻어진 結果에는 흩어짐(scatter)이 있게 마련이므로, 結局은 計算된 K_{Ic} 의 分散(variance) 또는 標準偏差가 提案된 應力強度係數 評價法의 妥當性에 대한 하나의 判定基準이 될 것이며, 이러한 基準 아래 各種 評價法을 比較하여, 三次元有限要素法에 의한 Raju-Newman의 解²⁹⁾, Smith의 近似解³⁾ 또는 Newman-Raju의 經驗式 式(16)이 良好하다는 結果³⁴⁾도 있으나, 他 評價法에 비해 顯著的한 差異는 認定되지 않는다.

疲勞表面균열 進展試驗結果를 利用하는 方法은, 表面균열의 進展舉動과 貫通균열의 進展舉動이 一致한다는 假定 아래 表面균열의 進展速度로부터 對應하는 應力強度係數값을 逆算하여, 提案된 評價法과 比較 檢討하는 것으로, 이 方法을 使用한 例¹⁷⁾도 있기는 하나, 表面균열과 貫通균열의 進展舉動이 本質的으로 一致해야 한다는 物理的 根據, 그리고 破壞力學의 現況(I)에서 論한 바와 같은 貫通균열의 進展舉動에 관한 基本的인 여러 特性이 完全히 究明되지 않은 限, 이 方法에는 많은 疑問이 있다. 위에서 論하는 바와 같이, 實際로 表面균열의 進展舉動이 貫通균열의 進展舉動과 一致하지 않는 경우도 많다.

지금까지의 內容으로부터 알 수 있는 바와 같이, 表面균열에 대한 應力強度係數값은 그 評價過程에 있어서나, 評價의 妥當性 檢討過程에 있어서나 本質的으로 近似的이다. 表面균열의 應力強度係數에 관해서는 더욱 研究가 必要하다는 것은 물론이나, 破壞力學의 特性을 勘案할 때 筆者의 私見으로서, 現在까지 提案된 評價法을 實用的 側面에서 어떻게 利用하느냐 하는 方法論이 現時點에서는 더욱 重要하지 않나 생각이 된다. 다만 굽힘荷重을 받는 表面균열의 應力強度係數 評價에 관해서는 위에서 指摘한 바와 같이 그 結果가 매우 적어, F.W. Smith³⁾의 解, Rice-Levy⁶⁾ 또는 Shah-Kobayashi⁷⁾의

解가 많이 利用되나, 光彈性實驗結果와는 誤差가 크다는 報告¹⁶⁾도 있어, 今後의 많은 研究成果가 期待된다.

한편 구석균열의 應力強度係數에 관한 研究는 이 2, 3年 매우 活潑하여 많은 結果가 報告되고 있어 注目되나, 現在는 初期段階라 생각이 되며 紙面上的 關係도 있어, 여기서는 文獻^{3,22-25,37-39)}만을 紹介하여 그 內容에 관해서는 割愛하기로 하자.

4.2.3 表面균열의 破壞靱性 및 疲勞荷重下의 進展舉動

表面균열의 破壞特性에 관한 研究는, 前項의 內容으로부터 알 수 있는 바와 같이 그 前提條件이 되는 應力強度係數에 대한 評價法이 完全히는 確立되어 있지 않다는 것과 實驗上으로는 表面균열의 作成과 그 크기의 測定이 容易하지 않다는 등의 理由에 의해, 現在도 매우 限定된 狀態에 있다. 그러나 破壞靱性試驗은, 다음의 疲勞荷重下의 進展試驗等에 비해 實驗上으로는 모든 면에서 簡便하며, 應力強度係數 評價法에 대한 實驗的 檢證手段으로서도 가장 簡單한 方法이므로, 그 試驗結果가 일찍부터 比較的 많이 報告되어 왔다. 鋼, 알루미늄合金, 티타늄合金에 관한 破壞靱性值가 報告되고 있으며^{1,3,5,8,11,13,33,35)}, 균열의 形狀과 크기의 測定이 容易한 透明材인 epoxy 또는 PMMA (polymethylmethacrylate)를 使用한 試驗結果^{27,14,40)}도 있으나, 넓은 範圍의 $\frac{a}{c}$ 및 $\frac{a}{l}$ 의 값에 대해 얻어진 系統的인 結果는 매우 적다. 表面균열材의 破壞靱性을 比較할 수 있는 結果도 若干 있기는 하나^{8,41)}, 表面균열材에 대한 破壞靱性試驗法이 現在는 確立되어 있지 않아, 直接的인 比較에는 問題가 있다. 表面균열材의 破壞靱性試驗에 관해서는 Orange의 提案⁴²⁾이 있으며, J-積分을 利用하는 方法도 試圖되고 있다⁴¹⁾. 試驗結果의 相互間 比較等이 可能的인 標準的인 表面균열破壞靱性試驗法 規格化가 期待된다.

疲勞荷重下의 表面균열의 進展舉動은 實際의 重要性이 매우 높은 問題의 하나이나, 疲勞荷重下에서 時時刻刻 變化하는 表面균열의 形狀과

균열의 形狀과 균열 最先端의 位置 즉 균열깊이의 檢出이 어렵다는 實驗上의 理由에 의해, 이에 관한 研究結果는 現在도 매우 적다.

表面균열의 檢出 및 測定方法으로서는 光學的 compliance的, 音響의 方法 등이 있으며, 몇가지 方法을 併用하여 使用하는 경우도 있다.

光學的 方法에는, 表面균열의 길이 $2c$ 를 移動顯微鏡 등으로 直接測定하거나 replica를 採取하는 方法과 大氣中의 酸化 또는 熱處理에 의해, 혹은 變動荷重을 負荷하여 균열의 흔적을 着色하거나 beach mark로 남기는 方法이 있다. 着色法 또는 beach mark法은 균열이 比較的 큰 경우에 使用이 可能하므로, 얻어지는 data量에 制限이 있게 마련이며, 따라서 이로 부터 算出되는 進展速度는 比較的 긴 進展區間에 대한 平均値일 경우가 많게 된다. 또한 負荷-停止 혹은 荷重變動이 되풀이되므로, 細心한 注意가 없을 경우 얻어진 結果에 履歷影響이 混在될 可能性도 많다. 光學的 方法으로서, 균열길이 $2c$ 를 試驗을 中斷함이 없이 連續的으로 直接測定하여, 미리 豫備試驗 등을 通해 얻어진 表面균열의 形狀比에 관한 結果로부터 균열길이 a 를 評價하는 方法이 좋은 것이나, 光學的 測定法의 本質的인 缺點은 免치 못한다.

Compliance測定을 通한 表面균열의 檢出 및 測定은, 그 測定方法을 適當히 改善함으로써 균열의 幾何學的 形狀에 관한 情報은 물론, 균열 닫힘現象에 관한 情報도 試驗을 中斷함이 없이 連續的으로 얻을 수 있으며, 所要裝置도 比較的 簡單하여 安價라는 利點이 있으나¹⁶⁾, 균열에 관한 情報이 平均的이라는 것과 S/N比等의 向上에 限界가 있어 극히 微小한 表面균열의 測定은 어렵다는 問題가 있다.

균열에 의한 音響의 減衰現象을 利用하는 測定法^{13, 43)}은, Compliance測定法과 類似한 點이 많으나, 試驗片의 標點距離가 길며, 裝置가 複雜하고 비싼 反面, 測定感度는 그다지 期待못한다는 缺點이 있다. 現在로서는 Compliance法과 光學的 方法을 適當히 併用하여 使用하는 것이 無難할 것이다.

疲勞荷重下의 表面균열의 進展試驗에서 또한

나의 重要한 問題는 균열發生方法이다. 人工的 缺陷없이 疲勞荷重下에서 自然發生 시키는 경우도 있으나^{44, 45, 36)}, 이 경우 發生까지에 長時間을 要하게 되며, 發生位置가 不確定的이며, 形態가 다른 表面균열이 多數 發生하여 連結 合體하는 過程을 거칠 可能性도 크므로, 測定이 어렵게 되며 또한 이러한 現象들은 얻어진 結果에 흠여짐의 原因이 되기도 한다. 따라서 特別한 경우를 除外하고는 適當한 人工缺陷을 使用하는 것이 바람직한 것이며, 人工缺陷은 可及的 작게 그리고 再現性이 높은 形態를 그르며, 人工缺陷의 影響은 事前에 充分히 調査해 둘 必要가 있다. 人工缺陷의 作成은 機械加工, 放電加工等 여러가지 方法이 可能할 것이다^{42, 46)}.

疲勞荷重下에서 自然發生한 表面균열의 進展舉動에 관한 研究는 現在 二, 三있으며^{44, 45, 36)}, 其中 Pearson의 研究⁴⁴⁾는 超微小表面균열(길이 가 0.006~0.5mm)을 對象으로 하고 있다는 點에서 매우 價値가 높다.

Fig. 3은 그 結果의 一例로서, 進展速度가

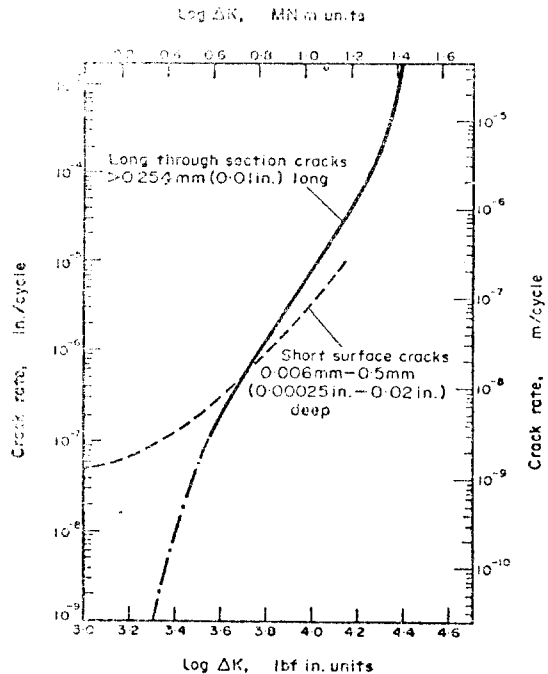


Fig. 3 Fatigue crack propagation curve for very short, natural surface crack⁴⁴⁾.

□ 解 說

$\frac{da}{dN} < 10^{-5}$ mm/cycle 領域에서는 表面균열의 進展速度가 貫通균열에 비해 빠르며, $\frac{da}{dN} > 10^{-5}$ mm/cycle의 範圍에서는 反對로 表面균열의 進展速度가 느리다는 것을 나타내고 있어, 매우 興味가 있다.

Lankford의 研究⁴⁵⁾도 0.1mm以下の 超微小 表面균열을 對象으로 하고 있으나, 形狀에 관한 情報가 缺如되어 있으며, 進展速度算出도 變則的이어서 얻어진 結論에는 若干 疑問이 있다.

宋의 研究³⁶⁾는 Compliance測定法을 使用하여 균열깊이 및 균열단함現象을 同時에 測定하고 있으며, 균열깊이가 0.5mm以上の 表面균열의 應力集中 影響域에서의 進展舉動을 主로 對象으로 하고 있다.

人工缺陷을 使用하여 얻은 比較的 큰 表面균열에 대해 그 進展舉動을 貫通균열과 比較한 研究結果도 現在는 그다지 많지 않다. 壓力容器用 合金鋼에 대한 Sullivan과 Crooker의 研究⁴⁷⁾ 또는 高張力鋼 및 熔接構造用鋼에 대한 北川와 高橋의 研究²¹⁾에서는 表面균열의 進展速度와 貫通균열의 進展速度가 거의 一致한다는 結論이다 (Fig. 4). Ni基合金 Inconel718에 대한 Coles等의 研究⁴⁸⁾도 類似한 結果를 얻고 있으나, 그 結果는 高溫霧圈氣에서 純斷面應力이 比較的 높은 경우에 대한 것이다. 한편 渡邊等³⁸⁾은 熔接用構造用鋼에 대해, threshold部分을 包含한 全速

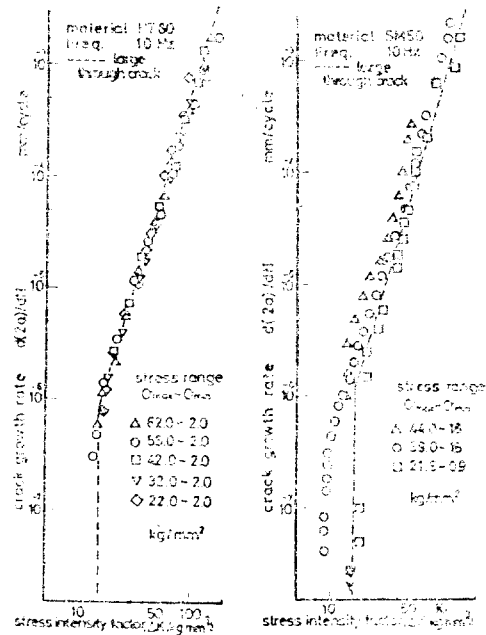


Fig. 4 Surface crack growth rate data²¹⁾.

度領域에서 表面균열의 進展速度가 貫通균열에 비해 느리다는 報告를 하고 있다.

Fig. 5는 알루미늄合金에 대한 平面굽힘試驗에서 beach mark法과 Compliance法을 併用하여, 表面균열의 進展速度를 균열단함現象을 考慮한 有效應力強度係數幅 ΔK_{eff} 로 整理하고 있는 小寺澤와 南坂의 結果¹⁹⁾이다.

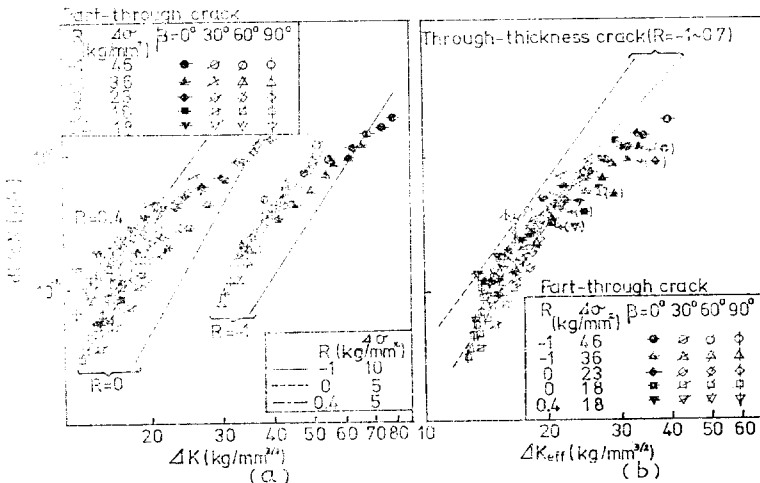


Fig. 5 Surface crack growth rate in terms of ΔK and ΔK_{eff} ¹⁹⁾.

ΔK 의 整理(Fig. 5(a))에 있어서는 應力比($R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$)가 $R=0.1$ 일 경우에는 表面균열은 貫通균열과 거의 비슷한 速度로 進展하며, $R=0$ 및 $R=-1$ 에서는 表面균열이 貫通균열보다 빠른 速度로 進展하나, ΔK_{eff} 의 整理(Fig. 5(b))에 있어서는, 應力比 R 에 關係없이 表面균열의 進展速度는 貫通균열 進展速度의 흩어짐幅(scatter band)의 下部에 一致하고 있어, 疲勞表面균열의 進展速度 評價에 대한 有效應力強度係數概念의 有用性和 함께, 本質적으로는, 表面균열이 貫通균열과 거의 비슷한 速度로 進展하거나 또는 平均적으로 느린 速度로 進展할 可能性을 示唆하고 있다.

有益한 示唆도 많이 얻어지고는 있으나, 疲勞表面균열의 進展舉動에 關係서는 現在 未知한 部分이 많으며, 貫通균열의 進展速度와의 關係도 그다지 明確하지가 않아, 이러한 問題를 包含하여, 表面균열의 破壞舉動에 關係서는 今後의 多角的인 많은 研究가 必要하다.

4.2.4 應力集中影響下의 表面균열

表面균열의 問題中에서도 實用的 側面에서 가장 重要한 問題는 表面균열이 物體의 幾何學의 不連續部 즉 應力集中이 일어나는 部位와 連關되는 경우일 것이며, 그 中에서도 應力集中領域에서의 疲勞表面균열의 進展舉動일 것이다. 이러한 경우의 基本問題의 하나는 應力集中影響下에 있는 表面균열에 대한 應力強度係數 評價로서, 이를 위해서는 應力集中의 影響, 具體적으로는 應力分布形態(stress geometry)의 影響이 加味된 修正係數 M 을 구할 必要가 있다. 現在 이에 관한 研究가 少數이기는 하나 發表되고 있어⁴⁵⁻⁵²⁾, 모두 매우 有益한 示唆를 주나, 그 對象 및 範圍가 限定되어 있어 一般的인 경우에 簡單히 擴張하여 實用的으로도 便利하게 應用할 수 있는 程度는 아니며, 또한 檢討의 餘地도 많이 남아 있다. 균열길이 a 에 따라 균열形狀比 $\frac{a}{c}$ 가 連續적으로 變化하는 一般的인 경우에 대해, 各種 應力分布形態의 影響이 考慮된 修正係數를 各各의 균열形狀比 $\frac{a}{c}$ 및 균열길이 a 또는 $\frac{a}{t}$ 에 대해 近似的 또는 實驗적으로 推定하

여, 實用的인 誤差內에서 便利한 形態로 얻는다고 하는 것은, 表面균열의 本質적인 解析上的의 困難性 그리고 4.2.2項에서의 現況 등을 勘案할 때, 當分間은 期待하기 어렵다 생각된다. 이러한 狀況아래서는, 應力集中의 影響下에 있는 表面균열에 대한 應力強度係數를, Maddox의 提案¹⁸⁾과 같이, 應力集中修正係數(stress concentration magnification factor) M_k 를 導入하여 다음과 같은 形式으로 表示하고

$$K_I = M_e \cdot M_k \cdot \sigma \sqrt{\frac{\pi a}{Q}} \quad (22)$$

이 應力集中修正係數 M_k 를, 解析이 比較的 簡單한 貫通균열의 경우로부터 推測評價하는 方法이 實用的 見地에서 매우 有用하다 생각이 된다. 이러한 方法論의 有用성은, 圓孔으로부터 發生하는 貫通균열 및 表面균열의 應力強度係數를 評價한 Shah의 研究⁴⁹⁾에서도 어느 程度 찾아 볼 수가 있다. Fig. 6은, Shah의 圖示의 結果로부터 必要한 部分을 筆者가 整理하여, 이른바 應力集中補正係數 M_k (Shah의 結果에서는 M_k 라는 記號는 使用하고 있지 않다)에 대해 貫通균열의 경우와 表面균열의 경우를 比較한 것으로, 表面균열의 경우(그림中的 PTC)가 若干 작은 傾向이 있으나 最高 6%內에서 거의 一致하고 있다. 應力分布의 形態에 따라서는 좀 더 큰 差異가 생기는 경우가 없지는 않다⁴⁹⁾.

表面균열의 應力強度係數 評價에 있어서 이러한 方法論을 使用하여, 應力集中影響域에서의 疲勞表面균열의 進展舉動을 直接 論한 例로는 比較的 큰 균열에 대한 Maddox의 研究¹⁸⁾와 比較的 微小한 균열에 대한 宋의 研究³⁶⁾가 있다.

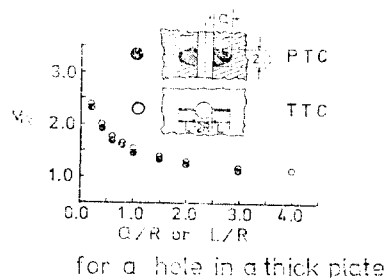


Fig. 6 Stress concentration magnification factor M_k (from data by Shah⁴⁹⁾).

□ 解 說

Maddox의 結果는 홀어짐이 크기는 하나, 表面균열의 進展速度가 貫通균열의 進展速度와 거의 一致하여, 北川等과 같은 結論(Fig. 4)이 되고 있으며, 宋의 研究는 ΔK 및 ΔK_{eff} 의 整理에서, 進展速度가 比較的 큰 $\frac{da}{dN} > 10^{-4} \text{mm/cycle}$ 領域에서 表面균열의 進展速度가 貫通균열에 비해 느리다는 結果를 얻고 있어, Pearson의 結果(Fig. 3) 또는 小寺澤等の 結果(Fig. 5)와 定性的으로 一致하고 있다. 다만 이들 結果에는 應力集中이 均열進展舉動에 미치는 또 하나의 影響, 이른바 應力分布의 履歷의인 影響에 관해서는 明確한 示唆가 없어, 이것 또한 今後의 課題로 留될 것이다.

4. 2-3, 4. 2-4를 通해 疲勞表面균열의 進展速度에 관한 研究結果를 概觀해 보면, 進展速度가 작은 範圍($\frac{da}{dN} < 10^{-5} \text{mm/cycle}$)를 除外하면 (Fig. 3, 4參照), 表面균열의 進展速度는 貫通균열의 進展速度와 거의 비슷하거나, 작은 傾向이 있음을 알 수가 있다. 各 研究에서의 應力強度係數 評價法 및 實驗方法이 다르다는 點을 생각해 볼 때, 이러한 傾向은, 表面균열에 대한 應力強度係數를 適當한 經驗式等에 의해 評價하고, 均열進展速度法則으로서는 試驗이 容易한 標準의인 貫通균열에 대한 結果를 使用하면, 比較的 높은 速度領域에 대해서는 表面균열의 進展速度에 관해 安定側의 評價가 可能할 지도 모른다는 實用的 價値가 높은 不法論을 示唆하고 있어 興味가 있다. 實際로 이러한 方法論을 試圖하고 있는 例가 最近 二, 三發表되고 있어 53~55) 注目된다.

以上 表面균열에 관한 研究의 全體的 概況內容으로부터 알 수 있는 바와같이, 實用的으로 重要한, 未解決 問題가 山積되어 있는 것이 實情이다. 表面균열에 관한 研究는 특히나 方法論의 確立 즉 破壞力學의 本質이 그 核心이 아닌가 하는 것이 筆者의 愚見이다.

多軸荷重下에서의 破壞, 高溫高壓下의 破壞에 관해서도 本號에서 叙述할 豫定이었으나, 紙面關係上 不可能했다.

다음호에서는, 可能하면 이 問題에 關해서도 若干이나마 다루고, J-積分을 비롯한 彈塑性領

域에서의 破壞力學狀況을 主로 살펴볼까 한다.

參 考 文 獻

- 1) G.R. Irwin, Crack-Extension Force for a Part-Through Crack in a Plate, J. of Appl. Mech., Trans of ASME, E, Vol. 81, pp. 651-654, 1962.
- 2) P.C. Paris and G.C. Sih, Stress Analysis of Cracks, ASTM STP 381, pp. 30~83, 1965.
- 3) F.W. Smith, Stress Intensity Factors for a Semi-Elliptical Surface Flaw, Structural Development Research Memorandum, No. 17, Boeing, 1966.
- 4) F.W. Smith, A.F. Emery and A.S. Kobayashi, Stress Intensity Factors for Semicircular Cracks, Part 2-Semi-Infinite Solid, J. of Appl. Mech., Trans. of ASME, E, Vol. 89, pp. 953~959, 1967.
- 5) A.S. Kobayashi and W.L. Moss, Stress Intensity Magnification Factors for Surface-Flawed Tension Plate and Notched Round Tension Bar, 2nd International Conference on Fracture, Brighton, UK, pp. 31~45, 1969.
- 6) J.R. Rice and L. Levy, The Part-Through Surface Crack in an Elastic Plate, J. of Appl. Mech., Trans. of ASME, E, Vol. 94, pp. 185~194, 1972.
- 7) R.C. Shah and A.S. Kobayashi, Stress Intensity Factor for an Elliptical Crack Approaching the Surface of a Plate in Bending, ASTM STP 513, pp. 3~21, 1972.
- 8) J.C. Newman, Jr., Fracture Analysis of Surface and Through-Cracked Sheets and Plates, Engng. Fract. Mech., Vol. 5, pp. 667~689, 1973.
- 9) B. Mukherjee, L.E. Culver and B.J. Burns, Growth of Part-Through and Through-Thickness Fatigue Crack in Sheet Glassy Plastics, Experimental Mechanics, Vol. 9, pp. 90~96, 1969.
- 10) D.L. Corn, A study of Cracking Techniques for Obtaining Partial Thickness Cracks of Pre-Selected Depths and Shapes, Engng.

- Fract. Mech., Vol. 3, pp. 45~52, 1971.
- 11) L.R. Hall and R.C. Shah, On Plane Strain Cyclic Flaw Growth Rates, Engng. Fract. Mech., Vol. 3, pp. 169~189, 1971.
 - 12) P.H. Francis, D.L. Davidson and R.G. Forman, An Experimental Investigation into the Mechanics of Deep Semielliptical Surface Cracks in Mode I Loading, Engng. Fract. Mech., Vol. 4, pp. 617~635, 1972.
 - 13) O. Buck, C.L. Ho and H.L. Marcus, Plasticity Effects in Crack Propagation, Engng. Fract. Mech., Vol. 5, pp. 23~34, 1973.
 - 14) R.W. Derby, Experimentally Determined Shape Factors for Deep Part-Through Cracks in a Thick-Walled Pressure Vessel, ASTM STP 536, pp. 482~491, 1973.
 - 15) 宋智浩, 朴榮祖, Notch材疲労斗 Kikukawa-Compliance法(第1報, 基礎的 検討), 大韓機械學會論文集, 第2卷, 第1號, pp. 10~18, 1978.
 - 16) G.R. Marrs and C.W. Smith, A Study of Local Stresses Near Surface Flaws in Bending Fields, ASTM STP 513, pp. 22~36, 1972.
 - 17) A.F. Grandt, Jr. and G.M. Sinclair, Stress Intensity Factors for Surface Cracks in Bending, ASTM STP 513, pp. 37~58, 1972.
 - 18) A.J. Maddox, An Analysis of Fatigue Cracks in Fillet Welded Joints, Int. J. of Fracture, Vol. 11, pp. 221~243, 1975.
 - 19) 小寺澤, 南坂, 繰返し曲げによる非貫通疲労き裂の進展, 材料, Vol. 26, pp. 955~961, 1977.
 - 20) 百武, 谷川, ポリカーボネートの疲労き裂傳ば特性 日本機械學會論文集, 第45卷, pp. 1160~1165, 1979.
 - 21) 北川, 高橋, 微小な疲労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), 第45卷, pp. 1289~1303, 1979.
 - 22) E. Sommer, L. Hodulak and H. Kordisch, Growth Characteristics of Part-Through Cracks in Thick-Walled Plates and Tubes, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J, Vol. 99, pp. 106~111, 1977.
 - 23) C.W. Smith, W.H. Peters and M.I. Jolles, Stress Intensity Factors for Reactor Vessel Nozzle Cracks, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J, Vol. 100, pp. 141~149, 1978.
 - 24) M.A. Mohamed and J. Schroeder, Stress Intensity Factor Solution for Crotch-Corner Cracks of Tee-Intersections of Cylindrical Shells, Int. J. of Fracture, Vol. 4, pp. 605~621, 1978.
 - 25) A.S. Kobayashi, A.F. Emery, W.J. Love and A. Antipas, A Procedure for Estimating the Stress Intensity Factor of a Flattened Surface Crack at a Nozzle Corner, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J, Vol. 101, pp. 181~183, 1979.
 - 26) T.E. Kullgren and F.W. Smith, Part-Elliptical Cracks Emanating from Open and Loaded Holes in Plates, J. of Engng. Materials and Technology, Trans. of ASME, H, Vol. 101, pp. 12-17, 1979.
 - 27) F.W. Smith and D.R. Sorensen, The Semi-Elliptical Surface Crack-A Solution by the Alternating Method, Int. J. of Fracture, Vol. 12, pp. 47~57, 1976.
 - 28) 小寺澤, 南坂, 半だ圓表面き裂を有する板が曲げを受ける場合の應力擴大係數について, 材料, Vol. 26, pp. 915~921, 1977.
 - 29) I.S. Raju and J.C. Newman, Jr., Stress-Intensity Factors for a Wide Range of Semi-Elliptical Surface Cracks in Finite-Thickness Plates, Engng. Fract. Mech., Vol. 11, pp. 817~829, 1979.
 - 30) M.A. Schroedl and C.W. Smith, Local Stresses near Deep Surface Flaws under Cylindrical Bending Fields, ASTM STP 536, pp. 45~63, 1973.
 - 31) M.A. Schroedl, J.J. McGowan and C.W. Smith, Determination of Stress-Intensity Factors from Photoelastic Data with Applications to Surface-Flaw Problems, Experimental Mechanics, Vol. 14, pp. 392~399, 1974.
 - 32) M. Jolles, J.J. McGowan and C.W. Smith, Experimental Determination of Side Boundary Effects on Stress Intensity Factors in Surface Flaws, J. of Engng. Materials and Technology, Trans. of ASME, H, Vol. 97, pp. 45~

□ 解 説

- 51, 1975.
- 33) 渡邊, 久田, 平野, 北川, 三次元き裂問題の光弾性実験による解析(第3報, 半だ圓表面き裂の解析と解析結果の総合的検討), 日本機械學會論文集(A), 第46巻, pp. 396~403, 1980.
- 34) J.C. Newman, Jr., A Review and Assessment of the Stress-Intensity Factors for Surface Cracks, ASTM STP 687, pp. 16~42, 1979.
- 35) W.F. Brown, Jr. und J.E. Srawley, Plane Strain Crack Toughness Testing of High Strength Metallic Materials, ASTM STP 410, pp. 88~126, 1966.
- 36) 宋智浩, Notch材 疲勞斗 Kikukawa-Compliance 法(第Ⅱ報 Notch近傍에서의 表面균열進展速度), 大韓機械學會論文集에 投稿中.
- 37) I.S. Raju and J.C. Newman, Jr., Stress-Intensity Factors for Two Symmetric Corner Cracks, ASTM STP 677, pp. 411~430, 1979.
- 38) C.W. Smith, W.H. Peters and S.F. Gou, Influence of Flaw Geometries on Hole-Crack Stress Intensities, ASTM STP 677, pp. 431~445, 1979.
- 39) M.E. McDermott and R.I. Stephens, Experimental Determination of K_I for Hollow Rectangular Tubes Containing Corner Cracks, ASTM STP 677, pp. 719~733, 1979.
- 40) G. Yagawa, M. Ichimiya and Y. Ando, Theoretical and Experimental Analysis of Semi-Elliptical Surface Cracks Subjected to Thermal Shock, ASTM STP 677, pp. 331~393, 1979.
- 41) S.Y. Zamrik and F.M. Bahgat, A J-Integral Analysis to Fracture Toughness of Plates Containing Surface Cracks, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J, Vol. 97, pp. 284~290, 1975.
- 42) T.W. Orange, Fracture Testing with Surface Crack Specimens, J. of Testing and Evaluation, JTEVA, Vol. 3, pp. 335~342, 1975. 또 는 ASTM STP 632, pp. 193~212, 1977.
- 43) C.L. Ho, O. Buck and H.L. Marcus, Application of Strip Model to Crack Tip Resistance and Crack Closure Phenomena, ASTM STP 536, pp. 5~21, 1973.
- 44) S. Pearson, Initiation of Fatigue Cracks in Commercial Aluminum Alloys and the Subsequent Propagation of Very Short Cracks, Engng. Fract. Mech., Vol. 7, pp. 235~247, 1975.
- 45) J. Lankford, Initiation and Early Growth of Fatigue Cracks in High Strength Steel, Engng. Fract. Mech., Vol. 9, pp. 617~624, 1977.
- 46) B. Wiltshire and J.K. Knott, The Toughness of High-Strength Maraging Steels, Containing Short Cracks, Int. J. of Fracture, Vol. 16, pp. R19~R26, 1980.
- 47) A.M. Sullivan and T.W. Crooker, Analysis of Fatigue-Crack Growth in a High-Strength Steel-Part I: Stress Level and Stress Ratio Effects at Constant Amplitude, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J, Vol. 98, pp. 179~184, 1976.
- 48) A. Coles, R.E. Johnson and H.G. Popp, Utility of Surface-Flawed Tensile Bars in Cyclic Life Studies, J. of Engng. Materials and Technology, Trans. of ASME, H, Vol. 98, pp. 305~315, 1976.
- 49) R.C. Shah, Stress Intensity Factors for Through and Part-Through Cracks Originating at Fastener Holes, ASTM STP 590, pp. 429~459, 1976.
- 50) A.S. Kobayashi, N. Polvanich, A.F. Emery and W.J. Love, Inner and Outer Cracks in Internally Pressurized Cylinders, J. of Pressure Vessel Technology, Trans. of ASME, J, Vol. 99, pp. 83~89, 1977.
- 51) J. Heliot, R.C. Labbens and A. Pellissier-Tanon, Semi-Elliptical Cracks in a Cylinder Subjected to Stress Gradients, ASTM STP 677, pp. 341~364, 1979.
- 52) J.J. McGowan and M. Raymund, Stress Intensity Factor Solutions for Internal Longitudinal Semi-Elliptical Surface Flaws in a Cylinder under Arbitrary Loadings, ASTM STP 677, pp. 365~380, 1979.

<참고문헌 53), 54), 55)는 31페이지에 계속>