

# 複合材料의 破壞에 對한 破壞力學的 어프로우치 (II)

— 疲勞試驗 및 龜裂 成長 舉動 解析 —

崔 鎔 湜

< 成均館大 工大 教授 · 工博 >

## 4. 疲勞試驗에 있어서의 問題點

前稿\*에서는 主로 異材結合境界와 關聯된 龜裂의 應力解析과 應力擴大係數解析을 論하고, 複合材料破壞舉動의 破壞力學的인 解析패턴의 概要와 어프로우치의 基礎的인 事項 및 現段階에서의 그 限界點 등을 考察해 보았다. 破壞力學이란, 모든 材料의 破壞舉動을 應力擴大係數 K 나 이에 準하는 量으로 解析코자 하는 領域의 材料強度學的인 力學이므로, 破壞의 기준(criterion)인 應力擴大係數 K가 어떠한 方法으로든지 그 輪廓을 들어내면 當然히 다음 段階의 研究, 즉, 實地의 構造物이나 部材의 設計에의 適用 · 應用이 뒤따라야겠다. 本稿에서는 그 中에서도 于先, 複合材料의 疲勞破壞舉動에의 破壞力學的인 어프로우치를 論해 불가 한다.

均質材에서의 疲勞破壞舉動, 特히 疲勞龜裂의 成長速度에 關係되는 問題는 이미 破壞力學的으로 잘 處理되고 있을 뿐만 아니라, 나아가서는 構造物이나 機械部材의 安全設計와, 非破壞檢査에 依한 缺陷評價(NDE; Non-Destructive Evaluation)에까지도 實用되고 있는 段階에까지 와 있다. 더욱이나, 疲勞龜裂의 成長速度  $\frac{da}{dN}$  (a: 龜裂길이, N: 荷重反復數)이 應力擴大係數變動幅  $\Delta K$ 에 依存한다는 것이 定着되면서부터는, 材料의 破壞靱性值(Fracture Toughness)  $\Delta K_{IC}$ 를, 疲勞試驗에서 얻은  $da/dN-\Delta K$  關係에서

求할려는 方法이 標準規格化되려는 움직임마저도 일고 있다<sup>42)</sup>. 疲勞龜裂成長速度  $da/dN$ 의  $\Delta K$  依存性은 概括的으로 다음과 같이 表示된다.

$$da/dN = f(\Delta K) \quad (8)$$

(8)式의 左邊은 勿論 疲勞試驗에서 얻어지는  $a-N$  曲線에서 求해지는데, 右邊의 函數形은 먼저  $\Delta K$  計算式이 定해진 後에 實驗式등으로 求해지겠다.  $\Delta K$  計算式은 試片의 形態, 龜裂의 位置 · 方向 · 荷重條件 등에 따라 各各 다르고, AS TM E647-78T<sup>42)</sup>에서의 CCT(Center Cracked Tension) 試片에서는 Feddersen의 K表示式<sup>43)</sup>을 쓰도록 規定하고 있다. 즉,

$$\Delta K = \frac{\Delta P}{B} \sqrt{\frac{\pi \alpha}{2W} \sec \frac{\pi \alpha}{2}}, \alpha < 0.95 \quad (9)$$

여기에서  $\Delta P$ 는 疲勞荷重變動幅,  $B$ 는 試片두

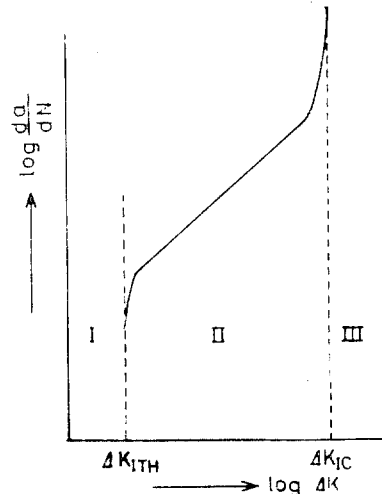


그림 18 균질재료에 대한  $da/dN-\Delta K$  관계.

\* 대한기계학회지 제22권 제1호, pp. 40~52, 1982.2

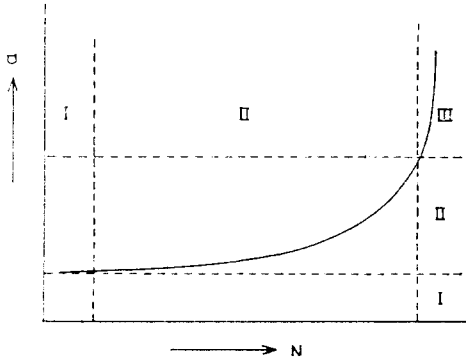


그림 19 균질재료에 대한 피로균열성장 특성 곡선.

개,  $W$ 는 시험편 폭,  $\alpha = \frac{2a}{W}$ ,  $2a$ 는龜裂全長이다.  $K$ 의表示에 관한 것은, G.C. Sih의 Handbook of Stress Intensity Factors<sup>44)</sup>에 廣範圍하게 다루어져 있으므로 參考하면 좋겠다. 이렇게 計算된  $\Delta K$ 와 疲勞試驗에서 얻은  $da/dN$ 을 log-log 座標에 그리면, 一般的으로 그림 18과 같은 모양으로 나타난다. 그림 18에 이르는 疲勞龜裂成長擧動은 그림 19가 되겠다. 그림 18, 19는 한 雙의 原因-結果를 나타내는 것으로, 이들 曲線에서 여러가지의 解析들을 하고 있다. 主要한 解析例들은 다음과 같다.

(1) 영역 I에서는 疲勞龜裂의 成長이 거의 없고( $da/dN \rightarrow 0$ ),  $da/dN=0$ , 즉, 龜裂이 疲勞에 依해서 全然 成長하지 않는다는 意味로,  $\Delta K < \Delta K_{TH}$ ( $\Delta K_{TH}$ 는 Threshold  $\Delta K$  Value)라는 量  $\Delta K_{TH}$ 를, 材料의 固有常數值로 規定할려는 研究도 있다<sup>45)</sup>.

(2) 영역 II에서는  $\log da/dN - \log \Delta K$  關係가 거의 傾斜진 直線으로 나타나고, 이 直線의 實驗式으로부터 一般的으로 (8)式으로 表示되는 여러가지 函數型이 發表되고 있다. 그 中에서 가장 普遍的으로 많이 使用되고 있는 Power Law 式은 다음과 같다.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (10)\text{-a}$$

$$\frac{da}{dN} = C \left( \frac{\Delta K}{E} \right)^m \quad (10)\text{-b}$$

여기에서  $C, m$ 은 材料의 常數로 알려져 있고,  $E$ 는 彈性係數이다. 많은 研究者들이 各種材料

에서의  $m$ 과  $C$ 의 값을 求했고, 大體로 金屬材料에서는  $m$ 의 값, 즉, 그림 18의 영역 II에서의 直線의 기울기가, 材料에 따라 2~8 사이의 값이 된다는 點에 一致되어가고 있는 것 같다.<sup>46)</sup>

한편, (10)-b 式의 關係는, 複合材料의 疲勞, 特히 彈性係數가 다른 異材結合材에서의 疲勞龜裂成長速度研究에서 興味를 끄는 關係式이 되겠다. 鋼材와 Al 材의 境遇, 彈性係數의 比는 大略 3:1이고,  $m$ 의 값이 大體로 같은 4 라면, 各材料에서의 疲勞龜裂成長速度는 1:81이 된다는 뜻이다. 이 경우,  $C$ 의 값의 差는 크게 問題가 되지 않으며,  $\Delta K$  表示는 材料와는 無關하다. 영역 II가 (8)式과 같은 函數關係를 갖는다는 事實로부터, 龜裂材料의 安全使用壽命을 算出해서 部材나 構造物의 保守에 實用되기도 하고, NDE에 適用되기도 한다. 또한, 그림 18과 그림 19의 相關關係를 研究해서,  $a-N$  曲線의 類型으로부터  $K$ 의 變動擧動을 찾아내려는 試圖<sup>47), 48)</sup>도 바로 이 영역 II의 函數關係에 바탕을 두고 있다.

(3) 영역 II에서는 疲勞龜裂이 安定成長(Subcritical Growth, Stable Growth)을 하는데 反하여, 영역 III에서는 不安定成長(Unstable Growth)하게 되고, 이어서 全面破斷에 이른다. 즉,  $\Delta K < \Delta K_{IC}$ 에서는  $da/dN$ 이 測定可能한 狀態이나,  $\Delta K \rightarrow \Delta K_{IC}$ , 또는,  $\Delta K = \Delta K_{IC}$ 에서는  $da/dN$ 이 매우 커져서 窮極에는  $da/dN \rightarrow \infty$ 이 된다는 것이다. 이  $\Delta K_{IC}$  값은, 靜的인 意味를 갖는  $K_{IC}$  (Plane Strain Fracture Toughness)와 함께, 定荷重幅疲勞試驗에서 求해지는 動破壞靱性值가 되겠다.  $\Delta K_{IC}$ 가 求해지면 應力比  $R = \frac{K_{min}}{K_{max}}$ 를 紹介시켜 其他의  $K$ 값에 對한 破壞靱性值도 求해지겠는데, 아직까지는 E647의 試驗法이 定着되어 있지 않은 關係로, E399<sup>49)</sup>에 依한  $K_{IC}$ 값으로  $\Delta K_{IC}$ 를 推定하고 있다고 보겠다.  $\Delta K_{IC}$ 값이 定해지면 이에 相當하는  $a_c$ (龜裂길이)가 定해지고, 나아가서는 龜裂材料가, 定해진 疲勞荷重與件下에서 얼마만큼 견디어 낼 것인가 하는 安定使用壽命이 영역 II의 函數關係式에서 求해지겠다. 즉,

$$N_f = N_i + \int_{a_i}^{a_c} \frac{f(\Delta K)}{da} \quad (11)$$

여기에서,  $N_f$ 는 總安全使用荷重反復回數,  $N_i$ 은 計算時點에서의 初期龜裂길이  $a_i$ 를 얻을 때 까지 所要된  $N$ 값이 되겠다.

이와 같은, 均質材에서의 여러 事項들을 바탕으로 하고, 前稿에서의 K解析例들을 參考로 하면서, 複合材料의 疲勞試驗과 疲勞破壞學動解析을 破壞力學的으로 어프로우치하는데는 다음과 같은 問題點들이 있겠다.

(1) 異材結合을 假想的으로 考慮하는 것은 쉬우나, 實在의 異材들을 理論解析에서의 結合境界에 近接되도록 結合하는 技術이 現段階로서는 未熟하고, 더욱이 疲勞試驗과 같은 反復荷重에 견디어 낼 수 있는 結合試片의 製作은 至難事에 屬한다.

(2) 溶接, 融接, 壓接, 爆接, 其他 接合劑를 使用해서의 接合 등, 여러가지의 結合方法으로 異材를 結合시켜, 疲勞試驗에도 견디어 낼 수 있는 結合試驗片을 製作했다고 해도, 破壞力學的인 解析을 爲한 結合境界周邊의 力學的인 條件의 抽出이 어렵고, 理論解析과는 相當한 距離가 있겠다.

(3) 均質材料를 써서 破壞力學的인 疲勞試驗을 하는데는,  $K < K_{Ic}$  또는  $\sigma_{max} \ll \sigma_Y$ 가 되게  $K_{max}$  또는  $P_{max}$ 을 制限하고 있는데<sup>42)</sup>, 複合材料나 結合材料에서는 個個의 素材들의  $K_{Ic}$  또는  $\sigma_Y$  값이 다르기 때문에 疲勞試驗을 破壞力學的으로 有効하게 解析하기 爲한  $K$  또는 荷重設定, 즉, 複合材料의  $K_{Ic}$  또는 降伏點  $\sigma_Y$ 의 設定이 쉽지 않다.

(4) 引張型結合材疲勞試驗片(例컨데 E647의 CCT試驗片 같은 것)을 有効하게 製作했다고 할 때, 또 結合境界가 理想的인 平面(直線)境界가 가깝게 되어 있다고 할 때, 그리고 이 試片에 어떠한 型態의 分布軸荷重이 걸렸다고 할 때, 이 結合材料에 複合法則이나 配分法則이 그대로 適用된다고 보고 各部分의 應力을 計算해도 좋은가? 즉, 固體力學에서 一般的으로 在來式 設計를 爲해 便宜의으로 使用해온 다음과 같은 配分法則이나 複合法則이, 破壞力學的인 疲勞試驗解

析에도 有効할 것인가? (그림 20 參照)

$$P = P_A + P_B$$

$$\sigma_A = \frac{PE_A}{E_A S_A + E_B S_B},$$

$$\sigma_B = \frac{PE_B}{E_A S_A + E_B S_B} \quad (12)$$

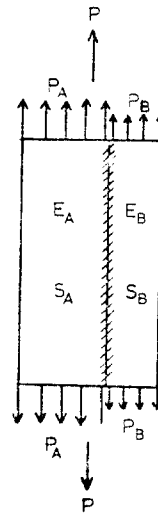


그림 20 複合材料의 하중분포에 대한 재래식 설명.

(5) 結合材試驗片이나 荷重條件들이 다 갖추어져서 疲勞試驗을 했을 때, 어떠한 形態로든 龜裂은 成長하겠는데, 破壞力學的으로 龜裂成長學動을 解析하기 爲하여는  $K$  또는 이에 準하는 量의 定着이 必要하다. 前稿에서 紹介된 K解析例만으로 結合材에서의 疲勞龜裂의 全成長學動을 다 解析할 수가 있겠는가? 特히 關心事가 되는 結合境界 近傍이나 境界上의 龜裂學動을 解析할 수가 있겠는가? 어떤 部分은 解析이 可能하고 어떤 部分은 不可能한가? 不可能한 部分은 어떻게 處理할 것인가?

(6) 異材結合材에 依한 疲勞試驗片의 製作이 어렵다면, 破壞力學的인 龜裂學動解析이 可能하고, 異材結合境界의 境界條件이 力學的으로 滿足될 수 있는, 다른 種類의 試驗片을 쓰는 疲勞試驗, 즉 시뮬레이션시험(Simulation Test)의 可能性은 있을까?

複合材料나 結合材料의 破壞力學的인 疲勞試驗은, 以上과 같은 難點 때문에, 實驗報告나 研究報告가 그리 많지 않다.

複合材料의 疲勞試驗結果를 살피기 以前에, 前稿에서의 여러  $K$ 變動學動解析例에 바탕을 둔  $a-N$  曲線의 豫想 프로필을 考察해보기로 하자. 勿論 이러한 考察은, 疲勞龜裂의 成長學動이, 적어도 均質材에서는 應力擴大係數  $K$ , 特히  $K_I$  ( $\Delta K_I$ )에 依存한다는 實證에 따르는 것이고, 따라서, 이를 複合材料의 疲勞龜裂成長學動에까지 擴大適用시켜보자는 意圖에서 우러난 것이다. 結果的으로, 實際의 疲勞試驗에서 얻는 疲勞龜裂成長學動이 이 考察에서의 類型과 어떻게 類似한가, 또는, 다른가에, 複合材料의 疲勞破壞學動解析에 破壞力學을 어프로우치시킬 수 있는 根擧를 찾아보자는 目的을 두고 있다 하겠다.  $K$ 의 變動學動은, Erdogan, et al. 과 Isida의 解析例(그림 9 등)에 따르기로 한다.

(1) 異材結合境界上, 또는 境界에 平行하게 龜裂이 있고, 疲勞荷重軸에 이들이 垂直일 때.

이 境遇는 Fig. 2(前稿)의 a), b), c), d)의 境遇에 該當되겠는데,  $K$ 는 均質材에서와 똑같이 定義된다고 되어 있다. 즉,  $K = \sigma \sqrt{\pi a} \cdot F(a/W)$ . 勿論  $F(a/W)$ 은 一樣增加函數이니, 定應力幅疲勞에서는  $K$ 는  $a$  또는  $a/W$ 의 增加에 따라 增加하는 學動을 나타낼 것이다. 즉,

$$dK/da > 0 \quad (13)$$

$a$ 는 一般的으로  $\Delta\sigma = \text{일정일}$  때에는  $N$ 에 關한 增加函數로 나타나므로 (13)式은

$$dK/dN > 0 \quad (14)$$

로도 쓸 수가 있겠다. 또한,  $a$ 가  $N$ 의 增加函數이기 때문에 (13), (14)式의 條件이면 當然히

$$da/dN > 0 \quad (15)$$

이러한 關係를 圖式的으로 나타내면 그림 21 과 같이 될 것이다.

이와 같은  $K-a$ ,  $K-N$ 關係에서  $a-N$ 關係를 解析하는 例는 참고문헌 [47], [48]등을 參考하면 좋겠다. 勿論 이 境遇엔  $da/dN - \Delta K$ 關係를 均質材에서와 똑 같이 다룰 수가 있을 것이다.

(2) 龜裂이 異材結合境界에 垂直으로 接近해서 境界에 到達할 때-이때 荷重軸은 龜裂에 垂直.

龜裂先端이 結合境界에 到達하기 前까지는, 應

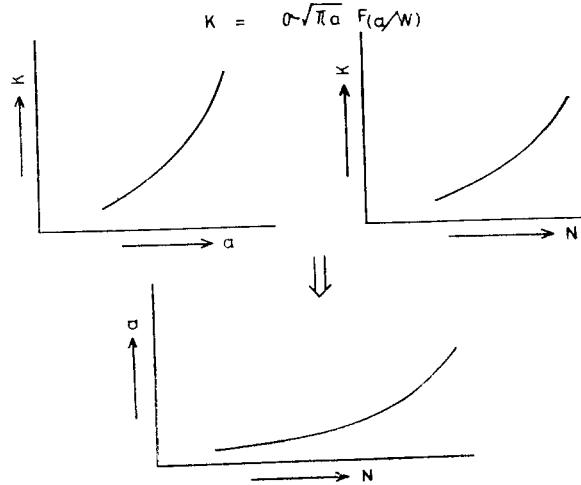


그림 21 SIF  $K$  변화 및 피로균열 성장거동.

力擴大係數  $K$ 는 一旦 均質材에서와 같이 定義된다고 했으므로, (그림 2의 e)와 h)의 경우)

$$K = \sigma \sqrt{\pi a} F(a/W_A), \quad W_A: \text{龜裂쪽의 板幅} \quad (16)$$

여기에서  $F(a/W_A)$ 의 變動學動은 그림 9(前稿)와 같다. 다만, 結合兩素材의  $E$ 가 같을 경우엔  $F(a/W_A) = 1$ (半無限板에서)이 된다.

그림 9의  $F$ 의 變動學動을  $K$ 의 變動學動으로 바꾸어 보면 그림 22와 같은 說明圖로 나타낼

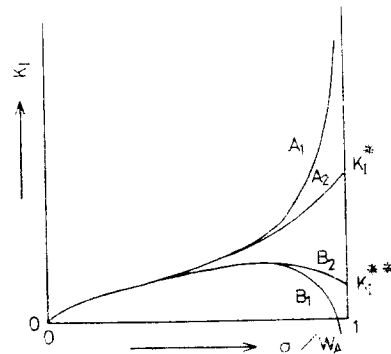


그림 22 이재결합제에서의 피로균열 성장특성.

수 있을 것이다. 즉,  $a/W_A$ 의 極히 작은 領域을 除外하면 龜裂이 比較的 작은 때는  $K_I$  값은 작은 比率로 漸增加하나, 龜裂길이 漸次 커져서, 異材結合境界에 이르기 얼마 앞까지  $dK_I/da > 0$ 로 學動하다가 다음의 두갈래로 變動한다.

A)  $E_B/E_A > 1$  일 때  $K_I$ 은 急增.

B)  $E_B/E_A < 1$  일 때  $K_I$  은  $dK_I/da=0$  를 거쳐  $dK_I/da < 0$  로  $K_I$  이 減少. 이러한  $K$  變動舉動에 對應하는 疲勞龜裂成長曲線은 그림 23 과 같이

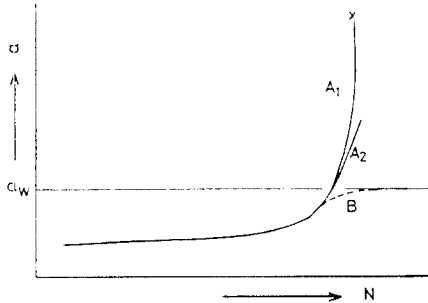


그림 23 이재결합재에서의  $K$  변화에 의한  $a-N$  곡선

나타날 것이 豫想된다. 興味の 對象이 되는 것은 그림 23의 B 곡線이다. 一般의 定荷重幅疲勞試驗에서는 A 곡線과 같은 類型으로 나타남은 이미 周知되고 있는 것이나, B 곡線과 같은 類型의  $a-N$  곡線은 잘 알아보기 힘드는 것이 되겠다. B 곡線이 갖는 意義는 다음과 같다.

A) 龜裂길이  $a/W_A$  가 작을 때는  $a-N$  곡線은 다른 境遇(一般的으로  $K_I$  增加  $-dK_I/dN > 0$ ) 때와 거의 같은 漸增樣相을 나타낸다.

B) 龜裂길이  $a$  가 어느 程度 커져서  $a/W_A$  가 어느 값에 이르면,  $da/dN$  은 增加에서 減少로 變化하고,  $a-N$  곡線은  $d^2a/dN^2 > 0$  에서  $d^2a/dN^2 < 0$  로 바뀐다.

C)  $a \rightarrow a_w (a_w/W_A=1)$  로 龜裂先端이 異材結合境界에 接近해 감에 따라  $da/dN$ , 즉, 龜裂成長速度는 현저히 低下해서  $da/dN \rightarrow 0$  이 되고,  $a = a_w$  이  $a-N$  곡線의 漸近線이 된다. [참고문헌 47, 48 參照] 疲勞龜裂成長의 實相(均質·等厚板材에서의 例들)으로 미루어 보더라도, 길이  $a$  의 減少, 즉, 成長速度  $da/dN < 0$  의 現象은 實現될 수 없는 것이므로, 위의 漸近線이 存在한다는 概念은 充分히 合理的인 것이라 하겠다.

D)  $a \rightarrow a_w$ , 즉,  $a \leq a_w$  에 머무는 限, 또, 荷重變動幅  $\Delta P$  에 變化가 없는 限,  $\Delta K \leq \frac{\Delta P}{W \cdot t} \sqrt{\pi a_w}$  가 되고,  $\Delta K < \Delta K_{IC}$  가 되어 脆性破壞는 일어나지 않게 된다.

(3) 龜裂이 異材結合境界에 垂直으로 接近해 가서, 그 先端이 境界에 到達했을 때 —— 荷重軸은 龜裂에 垂直.

$a/W_A=1$  에서의  $K$  解析은 現段階에서는 되어 있지 않으므로, 境界에 到達한 龜裂이 어떤 舉動을 나타낼 것인가는, 적어도  $K$  와 結付시켜서는 論議할 수가 없다. 그러나  $a/W_A < 1$  에서  $a/W_A \rightarrow 1$  일 때의  $K$  의 變動舉動으로부터  $a/W_A=1$  일 때의 龜裂舉動을 推定할 수는 있을 것이다.

A)  $K_I$  이 그림 22의 A 곡線과 같이 舉動할 때, 즉,  $E_A/E_B > 1$  일 때엔,  $K_I^*(a/W_A=1$  에서의  $K_I$  의 推定值)이  $K_I^* < K_{IC}$  이면 龜裂은  $E_B$  材料속으로 繼續 成長해 갈 것이고,  $K_I^* \geq K_{IC}$  이면 龜裂이 境界에 到達하기 以前이나 境界에 到達했을 때 全面破斷을 일으키게 되겠다. 이 경우의  $K$  變動舉動과  $a-N$  곡線은 그림 22의  $A_2$ ,  $A_1$  또는 그림 23의  $A_2, A_1$  와 같이 나타났겠다.

B) 그림 22의 B 곡線과 같이  $K_I$  이 變動하고, 따라서  $a-N$  곡線이 그림 23의 點線(B 곡線)과 같이 될 때, 즉,  $E_A/E_B < 1$  일 때엔,  $K_I^{**}(a/W_A=1$  에서의  $K_I$  의 推定值)은  $K_I^{**} \leq K_{ITH}$  가 될 것이고, 따라서 龜裂의 停滯가 境界에서 豫想된다. 즉, 크랙어레스트 舉動이 豫想된다. 龜裂이 境界에서 停滯하다가 그 뒤 어떻게 舉動할 것인가에 對해서는, 現段階의  $K$  解析(複合材料에 對한)으로서는 무어라고 推定하기가 어렵다.

以上으로, 複合材料試驗片으로 疲勞試驗을 함에 있어서의 諸問題點들을 學論해 보았는데, 主로  $K$  變動과 結合境界와 關聯된  $a-N$  關係와의 相關關係를 다루어 보았다. 破壞力學的인 疲勞試驗에서는  $a-N$  關係와  $K$  와의 相關關係가 論議의 가장 큰 對象이 되지만, 특히 複合材料와 같은 異材結合境界를 갖는 境遇엔,  $K$  舉動과 關聯시켜서 觀察·研究해야 할 對象이 몇가지가 더 있게 된다. 例를 들면 다음과 같다.

(1) 疲勞龜裂成長經路(Crack Path) 均質材에서는, DCB 試驗片과 같은 몇몇 例外를 除外하고는, 疲勞龜裂이 荷重軸에 直角方向으로 成長함이 巨視的으로는 確認되고 있다. 즉, 그 方向이 龜裂尖端 周圍에는 가장  $K$  값이 크기 때문이

라 하겠다.

그러나 異材結合境界를 갖는 複合材料에서는, 異材境界와 關聯된 龜裂先端的 應力擴大係數  $K$ 의 變動舉動이 多樣하기 때문에 疲勞龜裂의 成長經路도 均質材에서와 같이 單純하지만은 아닐 것이 充分히 豫想된다.

(2) 疲勞龜裂의 分岐(Bifurcation or Branching)

均質材料에서는 거의 볼 수 없는 疲勞龜裂의 成長舉動이나,  $K$ 變動이 多様な 複合材料에서는 龜裂尖端의 前方에서 2方向이나, 또는, 그 以上の  $\theta$ 의 方向에서,  $K$ 값이 비슷하게 나타날 可能性을 排除할 수가 없고, 또한, 微視的이 아닌 巨視的으로도, 力學的인 解析이 困難한 複雜한 組織이 實在 異材境界周邊엔 存在할 것이기 때문에, 充分히 豫想될 수 있는 龜裂成長舉動이라 하겠다.

(3) 疲勞龜裂의 屈折·反射(Refraction and Reflection of Fatigue Cracks at the Interface)

應力擴大係數  $K$ 의 解析이 定着되지 않고 있는 複合材料에서의 異材結合境界와 그 周邊은, 結合時에 發生할 最小限의 組織의 混亂과 더불어, 實地의 疲勞試驗에서는 全혀 未知의 領域이라 하겠고, Williams<sup>1)</sup>나 Erdogan<sup>13)</sup> 등이 豫測했는 疲勞龜裂의 屈折·反射 등의 特異舉動이 豫測한 그대로, 또는 若干 修正되어 觀察될 素地도 充分히 있다고 보겠다.  $E_A$ 材料中の 龜裂이 어떤 經路로 異材結合境界에 接近해서 到達하든, 境界에서  $E_B$ 材料 속으로 成長해 감이 없이 反射나 屈折을 하게 된다면, 이는 破壞豫防을 爲한 材料의 設計에 劃期的인 계기가 될 것임이 分明하다 하겠다. 이러한 舉動은 特히 그림 2(前稿)의 e), g), h)에서  $E_A/E_B < 1$  (e))와  $E_B/A_A < 1$  (g), h))일 때에 期待해 볼 만 하겠다.

(4) 疲勞龜裂停滯舉動(Crack Arrest Behavior In Front of or at the Bonded Interface)

앞에서도 이 問題에 言及했는데, 破壞力學的으로는  $K$ , 또는  $\Delta K$ 가  $K \leq K_{TH}$ (SCC에서는  $K \leq K_{SCC}$ ), 또는,  $\Delta K \leq \Delta K_{TH}$ 이 되어  $da/dN \rightarrow 0$ 이 됨을 뜻한다. 이러한 舉動은 그림 2의 e), g),

h)의 경우에 期待될 수 있겠다.  $E_A/E_B < 1$ (龜裂이  $E_A$ 材料中에 있다)일 때, 어쩌면 龜裂先端이 異材結合境界에 이르기 前에, 또는 龜裂이 境界에 닿았을 때에 일어날 可能性이 많겠다. 問題는  $da/dN \rightarrow 0$ 이나  $da/dN = 0$ 의 狀態가 얼마동안 持續되는가 하는 것이 重要한 意味를 갖겠고, 또한  $da/dN = 0$ 의 持續期間이  $E_A/E_B$ 와 어떤 函數關係를 갖는가 하는 것이 밝혀지면, 材料의 破壞防止設計나 保守에 劃期的인 寄與가 되겠다. 萬一에  $da/dN = 0$ 의 狀態가 永久히 持續한다면 完壁한 破壞防止設計도 可能할 것이다.

5. 異材結合材試驗片에 依한 疲勞試驗

異材結合材의 疲勞試驗에서 나타나는 疲勞龜裂成長舉動은, 亦是 龜裂先端이 結合境界의 近傍에 있거나 境界上에 있을 때의 것이 均質材料에서의 舉動과 比較·檢討되어야겠다. 異材結合材를 여기에서는 彈性係數  $E$ 값이 同一(또는 近接)한 異材間의 結合材와,  $E$ 값이 顯著히 다른 異材間의 結合材로 나누어 그 疲勞試驗例을 檢討해 나가기로 하겠다. 또한 前述한 바와 같이 異材結合材에 依한 疲勞試驗 그 自體의 難點으로 말미암아 破壞力學的으로 解析된 異材結合材 疲勞龜裂舉動研究報告가 極히 不振함에 비추어 여기에서는 主로 著者が 發表한 研究報告들을 바탕으로 해서 檢討해 나가기로 하겠다.

(1) 彈性係數가 같은 異材結合板材에서의 疲勞龜裂成長舉動

彈性係數가 같다고 해서 반드시 同種材料만을 말하는 것은 아니고, 各其 다른 鋼類라 할지라도  $E, G$  등은 같다고 보아도 좋다. 彈性係數가 같으면 應力擴大係數  $K$ 解析에 있어서, 적어도 力學的인 條件만은 問題가 되지 않게 된다. 따라서, 이러한 異材結合材의 結合境界에서의 疲勞龜裂舉動이 各素材에서의 舉動과 다르게 나타난다면, 그 原因이 力學的인 것이 아닌 다른 데, 例컨데, 境界層의 材質的(쉽게 力學的인 條件을 抽出할 수 없는 것)인 것에 있는 것인지도 모르겠다. 換言하면, 均質材에서는 疲勞龜裂의 舉動이  $K$ 라

는 力學的인 條件만으로 잘 解析이 되는데, 異材結合材에서의 疲勞龜裂成長學動은, 應力擴大係數  $K$  라는 力學的 因子外에, 複雜한, 그리고 多分히 兩素材의 것과는 다르리라 생각되는, 境界層의 材質的 因子의 影響을 함께 받을 수도 있을 것이다. 이러한 力學的인 因子外의 材質的인 因子의 存在 與否나, 그러한 因子의 性格에 對해서는 아직 研究例가 거의 없는 狀態이다. 이와 같은 觀點에서 볼 때, 彈性係數가 같은 異材結合板材에서의 疲勞龜裂成長學動試驗은, 一般的인 複合材料의 破壞學動을 破壞力學的으로 研究해 나가는 段階에서 꼭 確認해 두어야 할 過程이라 하겠다. Choy, et al.의 研究例를 紹介 하겠다.

이들은 3種의 鋼類를 擇해서, 結合層의 範圍를 最小限으로 줄이고, 또한 異質化를 없애어, 이미 試圖된 力學的인 解析에 近接시켜 보려고, 結合方法으로 第3의 溶接棒을 不要로 하는 전자비임용접(Electron Beam Welding)을 擇해서, 廣幅(250mm)의 異材結合板材疲勞試驗片을 製作해서 疲勞試驗을 廣範圍하게 實施한 結果를 發表했다.<sup>52)</sup> 3種의 鋼으로는, 軟鋼(SPC 3), 高強度鋼(HT 60) 및 스테인레스鋼(SUS 27)을 擇했고, 板두께는 모두 3mm로 했다. 이들의 研究를 要約하면 다음과 같다.

(가) Precrack 이 結合境界에 平行이거나 또는 境界層內에서 境界에 沿해 있을 때, 荷重方向은 龜裂에 垂直.

그림 24는 3種의 鋼類의 素材板에서의  $da/dN-\Delta K$  關係이기도 하고, 同種의 鋼類의 結合板材(例컨데, 軟鋼-軟鋼等)에서의 關係라고 했다[그림 25]. 이 境遇,  $da/dN=C(\Delta K)^m$  關係에서의  $m$ 의 값은 軟鋼(冷間壓延鋼)에서 가장 크고 스테인레스鋼에서 가장 작은 것으로 나타나며, 結合材에서의  $m$  값도 素材板에서의 값과 같다고 되어 있다. 疲勞試驗은  $R=K_{min}/K_{max}=0.333$ 의 引張引張型이라 되어 있다.  $K$ 의 計算式은 均質材에서의 中央貫通龜裂에 對한 Feddersen의 修正式으로 했다. 結局 이러한 境遇엔, 전자비임 溶接에 依한 結合境界의 影響은 通常的인

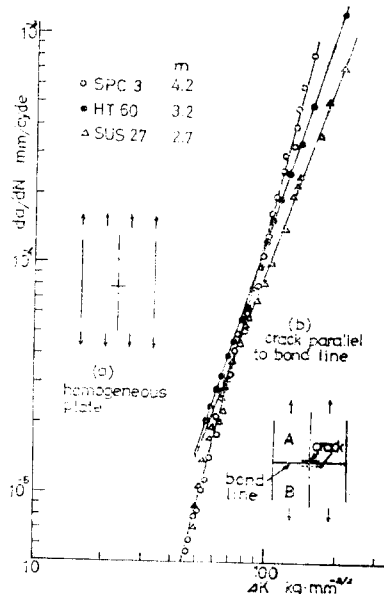


그림 24  $da/dN-\Delta K$  관계

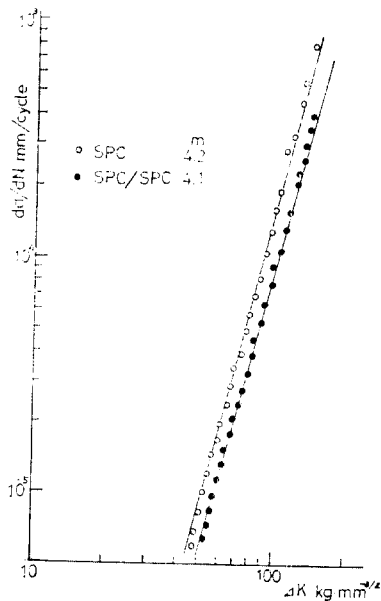


그림 25  $da/dN-\Delta K$  관계—결합경계선을 따른 균열.

$da/dN-\Delta K$  關係에는 나타나지 않는다고 했다. 이들은 또한, 疲勞龜裂成長經路가 均質材에서의 巨視的으로 같게 나타남도 밝히고, 그림 26을 發表했다. 結論的으로, 이 경우에는 境界의 影響은 力學的으로나, 材質的으로나 거의 나타나지

않는다고 했다.

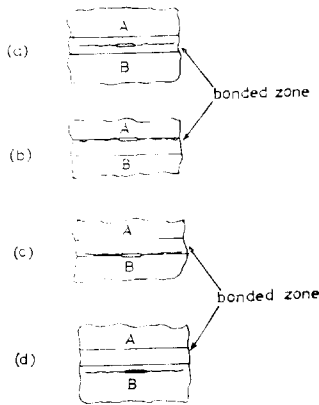


그림 26 피로균열 성장경로

이들은 또 軟鋼과 高强度鋼, 軟鋼과 스테인레스鋼과 전자 비임 용접板材試片에서의 疲勞龜裂舉動을 各素材板에서의 그것과 比較·發表하고 있는데, 그림 27, 28은 이들의  $da/dN-\Delta K$  關係이다.

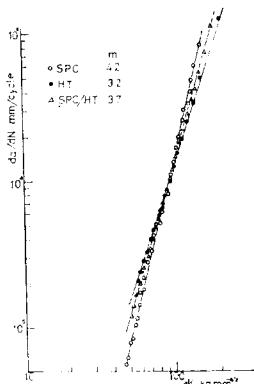


그림 27  $da/dN-\Delta K$  관계—결합경계선을 따른 균열

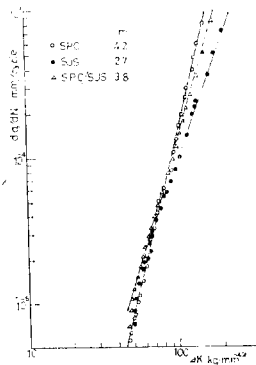


그림 28  $da/dN-\Delta K$  관계—결합경계선을 따른 균열

이 類의 結合試驗片에서는 彈性解析上 問題가 되는  $E, \nu$  등이 같거나, 또는 거의 같은 狀態(實驗으로는 或是 있을 수도 있을 差의 發見이 거의 不可能하다.)이고, 다만,  $\sigma_A$  나  $\sigma_B$  같은 餘他의 機械的인 性質의 差가 있겠다. 이러한 機械的인 性質은, 一般的으로는  $K_{Ic}$  나  $\Delta K_{Ith}$ ,  $\Delta K_{Ic}$ ,  $K_{Isc}$  등의 破壞力學的인 材料常數엔 影響을 끼칠 수 있음이 이미 實驗解析으로 알려져 있다. 그러나 그림 27, 28의  $da/dN-\Delta K$  關係에서는 疲勞龜裂의 安定成長速度의 세기를 나타내는 材料常數  $m$ 의 값들이, 同種結合材에서의 값의 傾向(그림 24, 25)과는 다르게 나타나 있다. 즉, 兩素材에서의  $m$ 의 값과 異材結合材에서  $m$ 의 값이 다르고, 또한, 結合材에서의  $m$ 의 값이 兩素材의 그것들의 中間值를 취한다고 되어 있다. 즉,

$$\left. \begin{aligned} m_{SPC} > m_{SPC/HT} > m_{HT} \\ m_{SPC} > m_{SPC/SUS} > m_{SUS} \end{aligned} \right\} (16)$$

그림 27, 28에서  $SPC/HT$ ,  $SPC/SUS$  記號는, 軟鋼과 高强度鋼 및 軟鋼과 스테인레스鋼의 結合境界에 境界上에 이에 沿해서 龜裂이 있는 경우이고, 荷重軸과 龜裂이 直角임을 나타낸다고 되어 있다. 그림 25의  $SPC/SPC$  記號도 이에 準한다. (16)式의  $m$  값의 傾向에 對해서는 이 方面의 研究報告가 거의 없으므로 그 妥當性에 對한 議論이 提起되지 못하고 있다. 이들은 (16)式의  $m$  값을 얻는데 必要한  $K$ 의 計算을 Feddersen의 式((9)式)에 依存했고, 疲勞龜裂成長速度關係를 (10)式으로 했다. 또한, 이 類의 異材結合材에서의 疲勞龜裂成長經路는 그림 26의 說明圖와 같다고 했고, 蛇行하면서도 巨視的으로는 直進하는 모양이 均質板材에서의 그것과 다를 바가 없다고 했다. 이러한 類의 異材結合材의 境遇는 結合方法이 第3의 材料의 介入이 없는 融接法이었고, 또 氣孔의 發生이나 酸化物質의 生成 등의 諸缺陷의 介入이 거의 許容되지 않는 眞空室內에서의 接合이었기는 하나, 結合層의 幅이 約 1mm(두께 3mm에 對해서) 程度 있었고, 또 그 部分의 두께가 兩素材의 두께에 比해서 若干적이거나 작은 편이었기에, 結合層의 力



學的인 條件이나, 材質的인 條件 등이 正確하게 兩素材의 그것들과 同一하다고는 볼 수 없겠으나, 그렇다고 큰 差異가 있다고도 볼 수 없음을, 著者들은 顯微鏡寫眞의 比較와 비커스 硬度測定으로 立證하고 있다[寫眞과 硬度分布圖는 省略]. 結果的으로는,  $K$ 의 計算을 均質材에서와 같은 Feddersen의 修正式에 依했을 때엔  $da/dN-\Delta K$  關係에 結合境界層의 影響이 若干이나마 나타나는데, 이의 解를 위하여는,  $K$  計算式을 修正하든가,  $da/dN-\Delta K$  關係法則을 (10)a나 (10)b 以外에 다른 法則, 例컨데  $\sigma_r$ 나  $K_{Ic}$  등의 材料常數가 介入하는 法則을 發見하는 方法들이 바람직하겠다.

(나) Precrack 이 結合境界에 垂直이고, 荷重 方向이 結合境界와 一致한 때

그림 29는 軟鋼과 軟鋼(SPC-SPC), 軟鋼과 高強度鋼(SPC-HT) 및 軟鋼과 스테인레스鋼(SPC-SUS)의 結合板材에서의  $a-N$  曲線이다. 어느 경우나 疲勞龜裂은 結合境界를 直角으로 通過했고, 龜裂成長經路를 說明하는 것이 그림 30이다. 疲勞龜裂이 境界前後에서 若干의 異常成長 舉動을 보였다고 해서 特히 그 部分을 抽出·擴大한 것이 그림 31이라 했다. 勿論, 같은 軟鋼 板材 끼리의 結合材는 素材板과, 疲勞龜裂成長 舉動面에서 同一하게 取扱된다고 했다. 前稿에

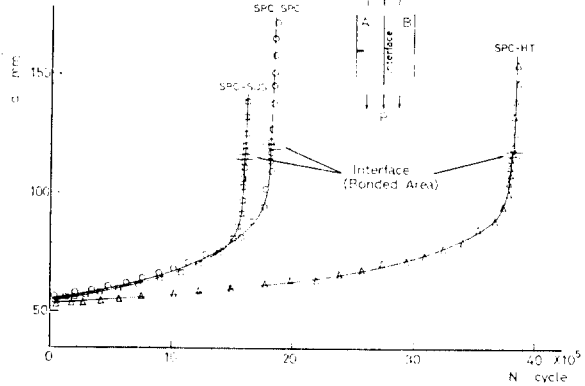


그림 29 이재결합재 시편에서의 피로균열 성장

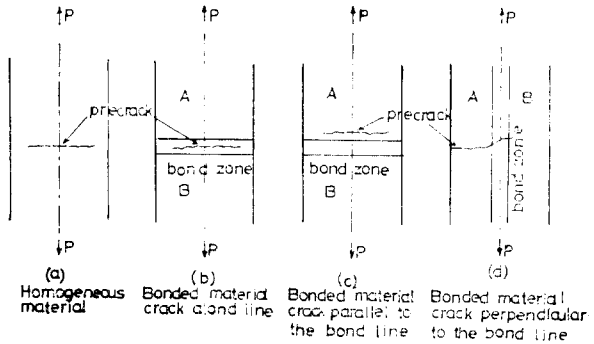


그림 30 피로균열 성장 경로

서의  $K$  解析例로 볼 때엔, 그림 29, 31의 結合材에서는  $E$ 가 같기 때문에  $K$  計算式은 均質材에서의 것과 같이 할 수 있겠다. 그렇게 할 경우는 그림 31에서 볼 수 있는 結合境界와 그前

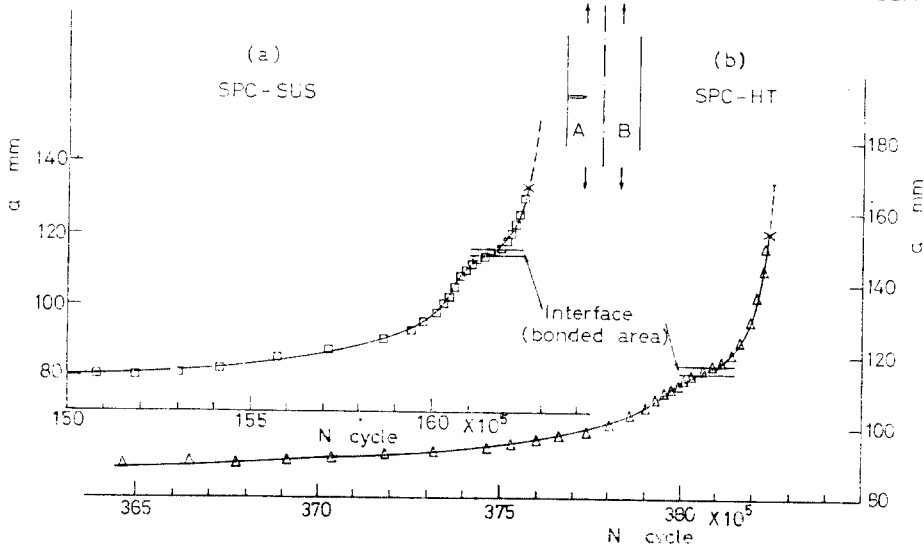


그림 31 전자비임 용접 시험편에서의  $a-N$  곡선

後에서의  $a-N$  舉動이나  $da/dN$ 의 異常舉動의 說明이 어려워진다. 結合境界와 그 近傍에서의 龜裂成長速度의 異常變動은, 흔히 均質材에서 찾을 수 있는  $da/dN-\Delta K$  關係((10)a式)로는 說明되기 어렵다. Choy 等은 이러한  $da/dN$ 의 異常舉動에 着眼해서, 이를 破壞力學으로 解析해 보고자 疲勞試驗에 使用했던 結合材로 DCB 試驗片을 만들어, 컴플라이언스 變化로부터 實驗적으로  $K$ 를 求해서 그림 32와 같은  $K$  變化 舉動을 發表하고, 이러한  $K$  變化를 그림 31의  $da/dN$  舉動解析에 適用해서 그림 33과 같은  $da/dN-\Delta K$  關係를 發表한 바 있다<sup>53)</sup>.

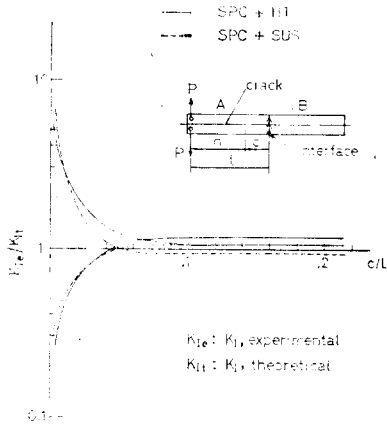


그림 32 결합 경계면 근방에서의 실험  $K_I$ 과 이론  $K_I$ 의 관계

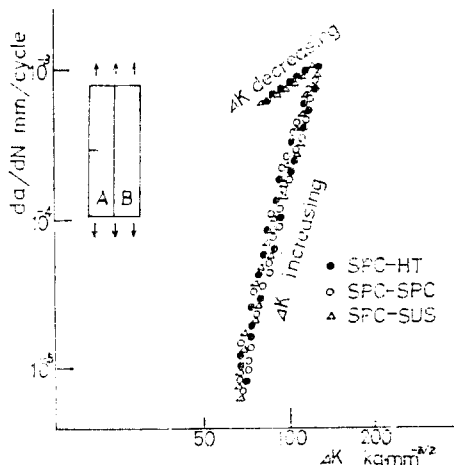


그림 33  $da/dN-\Delta K$  관계(실험에 의해 수정된  $K$  값)

同種材料의 溶接板材를 써서의 疲勞試驗結果 報告例는 더러 있으나, 大概가 別途의 溶接棒을 使用한 溶接試驗片이어서 結合層이 完全히 제 3의 層으로 形成되어 있을 뿐만 아니라, 結合層의 組成이나 形狀 마저 力學으로 處理하기가 어려운 狀態의 것이라 하겠다. Choy 등의 研究에서 的 結合部는 이런 點으로 보아서는 比較的 力學的 解析을 쉽게 해줄 수 있는 것이라고 보아도 되겠다. 그럼에도 지금까지의 均質材에서 的  $K$  計算이 깨끗이 適用되었다고는 볼 수가 없는 點들이 몇 가지 있다. 즉, 그림 27, 28에 나타난  $da/dN=C(\Delta K)^m$  에서의  $m$  값 들의 舉動과, 그림 31에서 的 結合境界 및 그 前後에서 的 疲勞 龜裂成長 舉動이다. 後者의 境遇는 Feddersen 的  $K$  的 式으로  $da/dN=C(\Delta K)^m$  을 나타냈을 때, 그림 34와 같은  $da/dN-\Delta K$  關係 曲線이 되어서, 同種材(SPC-SPC)의 結合境界와 異材間(SPC-HT or SPC-SUS)의 結合境界 附近에서 큰 差異를 나타낸다. 實驗에 依한  $K$  舉動解析(그림 32)에서  $c/l \rightarrow 0$ , 즉, 結合境界附近에서 的  $K_{Ie}/K_{It}$  ( $K_{It}$  는 DCB 理論에 바탕을 둔 計算值,  $K_{Ie}$  는 實驗  $K_I$  值)의 急增(A 材가 HT 또는 SUS)이 急減(A 가 SPC)이 어떤 파라미터에 緣由하는 것인지는 不明이나, 이  $K$  解析을 바탕으로 나타낸 그림 33의  $da/dN-\Delta K$  關係에서도,  $K$  增加 때와 減少 때에 各各 別個의  $m$  값을 나타냈고, 勿論 均質材에서는 想像조차 못한 現象으로 나타났다,

彈性係數가 같은 異材結合材에서 的 疲勞龜裂成長 舉動에 關한 Choy 등의 研究를 綜合해 보면 다음과 같다.

(A) 龜裂과 結合境界와의 位置關係에 關係없이, 疲勞龜裂은 荷重軸에 直角인 方向으로 成長한다. 特히 結合部(層)內에 龜裂이 있을 때엔 疲勞龜裂은 結合層밖으로 나옴이 없이 그 內部를 進行한다.

(B)  $da/dN$  舉動에 있어서는 龜裂이 結合部 上이나 이에 平行으로 있을 때는, 均質材에서와 똑 같이 Paris 的 指數法則(Power Law)이 그대로 適用되고, 다만  $da/dN$  的 세기를 나타내는

$\Delta K$ 의 지수  $m$  값이 兩異種素材에서의 값들의 가운데 오게 된다.

(C) 結合境界에 垂直으로 疲勞龜裂이 成長할 때엔 同種材의 結合境界에서는 均質材에서와 같이  $da/dN$  舉動이 나타난다. 다만, 異材結合境界에서는 龜裂이 어느 材料內에 있느냐에 따라서,  $da/dN$ 의 增加·減少가 一時的으로 나타난다. 이러한  $da/dN$ 의 增加·減少 舉動이  $K$  舉動에 緣由하는 것인지, 아니면 다른 材質의 因子에 緣由하는 것인지는 不明이다.

(D) 結合境界에 直角으로 있는 龜裂이라 할지라도, 龜裂先端이 境界에서 相當한 距離에 있을 동안은, 龜裂材에서와 똑같은 指數法則에 따라 疲勞龜裂은 舉動한다.

以上과 같이 要約되나, 이를 檢討해 보면 다음과 같다.

(A) 國際적으로 參考할 만한 文獻이 거의 없다.

(B) 結合強度를 充分히 갖는 結合方法이 어렵고, 또한 規格化된 것이 없다.

(C) 結合方法을 適當히 選定해도, 結合部の 強度나 力學的條件을 具體적으로 抽出하기가 어려울 것이다.

(D) 破壞力學的으로 다루는 前提가 되는  $K$ 의 計算式이나 그 妥當性에 關한 研究가 드물다.

(E) Choy 등의 研究에서의 結合方法이 電子비임溶接法이어서, 이 研究結果가 다른 一般的인 結合材에 그대로 適用될 수 있을 것인지는 確實치 않다.

(F) 境界層內에서 境界에 沿해서 成長하는 疲勞龜裂이 Paris의 指數法則에 依存한다고 하는 것은 理致에 닿는다고 보나,  $m$  값이 兩素材의  $m$  값의 中間에 오는 것은, 兩素材의 彈性係數以外의 어떤 性質에 緣由하는 것인지?

(G) 結合境界에 直角으로 接近하는 疲勞龜裂의 舉動에서 나타나는 均質材에서의 것과 다른 舉動은, 境界의 어떤 力學的 因子에 緣由하는 것인지?

(H) 結合境界에 直角으로 接近하는 疲勞龜裂의 異常舉動은 어느 地點에서부터 나타나며, 그

地點이 境界의 어떤 性質과 關係가 있는 것인지?

## References

- [42] ASTM Designation: E647-78T, "Tentative Test Method for Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above  $10^{-8}$  m/cycle", 1978
- [43] C.E. Feddersen, "Discussion in Plane-Strain Crack Toughness Testing of Metallic Materials", ASTM STP 410, pp. 77~79, 1966
- [44] G.C. Sih, "Handbook of Stress Intensity Factors—Stress-Intensity Factor Solutions and Formulas for Reference" Inst. Fracture and Solid Mech., Lehigh Univ., USA, 1973
- [45] R.O. Ritchie, et al., "Near-Threshold Fatigue Crack Growth in 2 1/4 Cr-1 Mo Pressure Vessel Steel in Air and Hydrogen," J. Eng. Mat. Tech., Trans. ASME, Vol. 1, pp. 293~299, 1980, 등
- [46] 崔鎔湜, "疲勞와 破壞力學(Ⅰ), (Ⅱ), (Ⅲ), (Ⅴ)", 大韓機械學會誌, Vol. 16, No. 4, 1976, Vol. 17, No. 1, No. 2, No. 4, 1977
- [47] 崔鎔湜, "材料의 疲勞와 破壞力學", 大韓機械學會, 學術講演會抄錄, pp. 1~6, 1976. 4
- [48] 崔鎔湜, "疲勞龜裂成長舉動에 對한 破壞力學的 解析, (4) 一疲勞龜裂成長曲線의 類型——", 成大論文集(自然系), Vol. 25, pp. 45~56, 1978, 등
- [49] ANSI/ASTM E399-78a, "Standard Test Method for Plane-Strain Fracture Toughness of Metallic Materials", 1978
- [50] Y.S. Choy·北川英夫, "複合材料의 疲勞破壞의 基礎的研究(その1)——結合界面をもつ材料의 疲勞き裂の成長——", 日本科學技術連盟, 第6回複合材料シンポジウム報文集, pp. 65~70, 1973年10月, 日本 東京
- [51] Y.S. Choy, et al., "Fatigue Crack Behavior Near The Bonded Interface", Proc. ICM II, pp. 642~650, 1976, Boston, USA
- [52] 崔鎔湜, "金屬異材境界での疲勞破壞の破壞力學的 研究", 東京大學 學位論文, pp. 46~96, 1980.
- [53] 崔鎔湜·梁源鎬, "異材結合界面 近傍에서의 Crack-tip Stress Intensity Factor(1)", 成大科學技術研究, Vol. 3, pp. 43~54, 1975.