

<講 座>

疲勞와 破壞力學(II)

崔 鎔 湜*

3. 疲勞龜裂成長舉動의 解析 (I)

前節에서 龜裂尖端의 應力擴大係數 K 가 實際試片 또는 材料에서 어떻게 表示되는가에 對해서 몇가지 보기를 提示했는데, 이러한 K 값을 求하는 것이 勿論 쉬운 것은 아니며, 表中에서도 나타나 있듯이 “ K 값은 求해져 있다”라고 하고 表式이 提示되어 있지 않는 것 들은 말하자면 數值解析 등으로 特定條件下에서의 K 값이 數值的으로는 求해져 있어 表示 曲線上에 나타나 있다는 뜻이고, 閉鎖型이든 開放型이든 間에 函數式으로의 表記은 아직 이루어져 있지를 않다 하겠다. 이와 같은 K 의 修正係를 가장 詳細히 다룬 文獻은 ASTM STP 381 이나 Sih의 “Handbook of Stress Intensity Factors” 등이 代表的이라 하겠다.

破壞力學으로 疲勞問題를 다룰 때는 언제나 crack의 存在를 前提로 한다. 材料가 疲勞荷重을 받아 破壞에 이르는 過程의 說明은, 一次의으로는 疲勞에 依한 crack의 發生이고, 다음 段階로는 發生한 crack들의 相互連結 또는 成長을 거쳐 最終의으로 破斷에 이르는 順序로 이루어진다고 보기 때문이다. 또한, crack의 存在를 前提로 하더라도 crack尖端의 應力場이 彈性論의으로 解析될 수 있어야 함도 絕對的인 前提가 되고 있다. 모든 疲勞材엔 各種形態의 crack 發生·成長이 觀察되고 있는데, 이들 모든 crack들이다. 破壞力學의으로 다루어 질 수 있는 것은 勿論 아니고, 아직도 K 解析이 되어있지 않은 crack들이 많이 남아 있는 것이다. 例컨대 回轉굽힘 疲勞試驗片에서 觀察되는 各種 形態의 表面疲勞 crack들은 應力解析의 困難 때문에 아직은 이들이 適用시킬 K 의 表式이 없는 實情이라 하겠다. 이들 crack에 對해서는 K 解析 뿐만 아니고, 破壞力學의인 다른 Factor 즉 γ_p 라든가 ϕ 같은 것들도 未解析狀態에 있어 이 分野의 研究가 많이 期待

되고 있는 實情이다. Crack에 對한 研究는, 그것이 破壞의 前提가 되기 때문에 큰 意義를 갖는다고 보겠는데 表面 Crack이 連結 또는 成長해서 試片의 全周를 完全히 一周 했어도 그것만으로는 바로 材料의 破壞에 直結이 되지 않는 것도 이 試驗片의 特色이라 하겠다. 勿論 回轉굽힘 疲勞試驗片外에도 K 解析이 되어있지 않은 경우는 아직도 많으며, K 가 解析되어 있는 경우에 對해서도 正確한 境界條件들을 잘 檢討해 가면서 應用함이 옳을 것이다. 回轉굽힘 疲勞의 경우나 그밖의 例에서와 같이 正確한 K 解析이 이루어져 있지 않더라도 研究者에 따라 “Effective Stress Intensity Factor”라는 것을 쓰는 例도 往往 있는데, 이에는 相當한 檢討와 妥當性提示가 要求되고 있으며, 그 使用可能性與否에 對해서는 論難이 많이 따르는게 常例이기도 하다.

몇가지의 疲勞龜裂解析例를 類型別로 들어보기도 한다.

3.1 引張—引張型疲勞

破壞力學의으로 다루는 大部分의 疲勞가 現在까지로는 이 型의 것이다. 2次元彈性學의인 應力解析이 可能한 型이기도 하나, 實際의으로는 平面應力狀態(Plane Stress Condition)와 平面變形狀態(Plane Strain Condition)라는, 現實의으로 判斷하기가 어려운 假定을 前提로 하는 難點이 따른다. 또한 應力軸과, crack 形態의 Combination이라든가 crack의 個數, crack의 存在位置와 모양 등등, 假想되는 境界條件 모두에 對한 彈性應力解析이 다 이루어져 있는 것도 아니다. 以下 모든 解析例를 理解함에는 위에 말한 여러 境界條件이나 前提條件들을 잘 파악하는 것이 絕對的인 要件이 되겠다.

(1) Frost들의 例¹⁶⁾

Frost는 1950年代에서 60年代에 걸쳐 여러가지 金屬 板材에 對한 彈性疲勞龜裂의 舉動을 一般疲勞의 概念으

* 正會員, 成均館大學校 理工大學

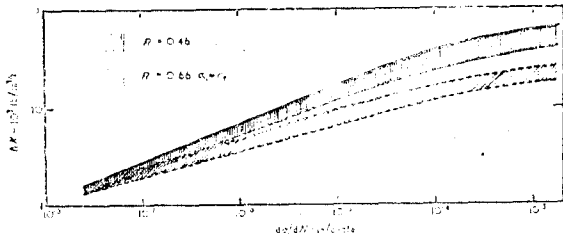


Fig. 1. ΔK vs. da/dN for 7075-T6 aluminum alloy in longitudinal direction.

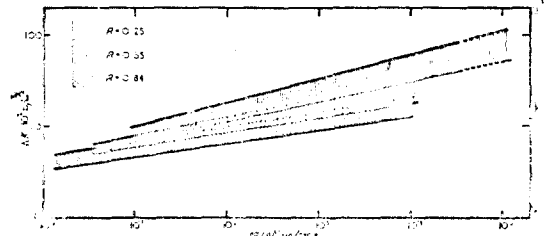


Fig. 2. ΔK vs. da/dN for cold-rolled mild steel in longitudinal direction.

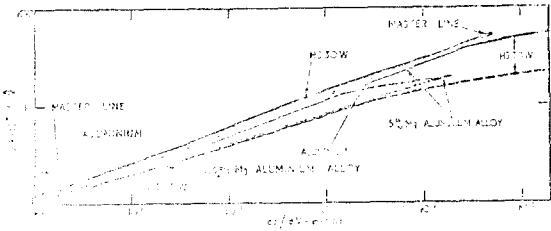


Fig. 3. Comparison of crack growth curves for different strength aluminum alloys.

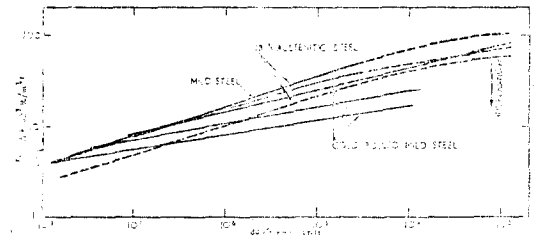


Fig. 4. Comparison of crack growth curves for steel.

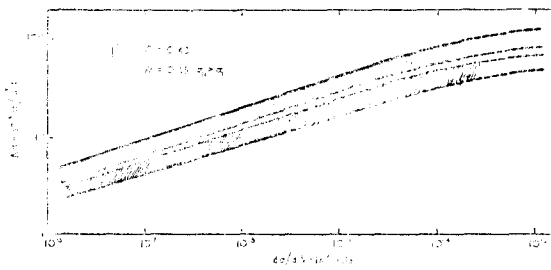


Fig. 5. ΔK vs. da/dN for 18/8 austenitic steel in longitudinal direction.

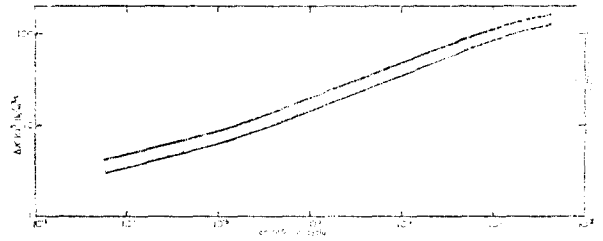


Fig. 6. ΔK vs. da/dN for 5 percent titanium alloy in longitudinal direction.

로 研究한 것을 이 論文에서 破壞力學的으로 再整理 하였다. 疲勞試驗은 $\sigma_m > \sigma_a$, $\sigma_{max} = \sigma_m + \sigma_a < \sigma_y$ 라는 條件이었고, slit는 中央 또는 single edge로 했으며, 疲勞龜裂의 成長擧動觀察은 0.8W 程度이 었다. Slit 材의 疲勞壽命이 疲勞龜裂 (slit 端部에서 發生한)의 安定成長速度 da/dN 에 依存할 것이라는 觀點에 서서 主로 da/dN 의 表式化에 研究의 全力을 傾注하였는데, 이들이 以前에 一般疲勞概念下에서 얻은 表式은 da/dN 이 crack 길이 a 와 應力振幅 σ_a 에 다 같이 依存하고, 材料常數 A 를 介示시켜 (11)式과 같은 것이었다.

$$da/dN = A \sigma_a^3 a \quad (11)$$

여기서 材料常數 A 는 平均應力 σ_m 에 依存할 수도 있고 그렇지 않을수도 있다고 했었다. 즉 (11)式은 저들 나름대로는 적절한 假定을 붙여 理論的으로 誘導했다는 것이, 뒤에 Srawley 들¹⁷⁾에 依해서 그 虛構性이 밝혀졌고, 또한 本人들도 本論文에서 그 잘못을 是認하고 새로운 方向 즉 破壞力學的인 手法으로 再解析하게 된

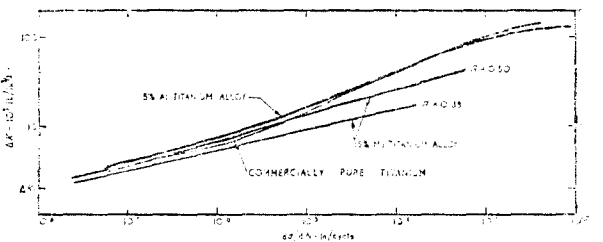


Fig. 7. Comparison of crack growth curves for titanium and titanium alloys.

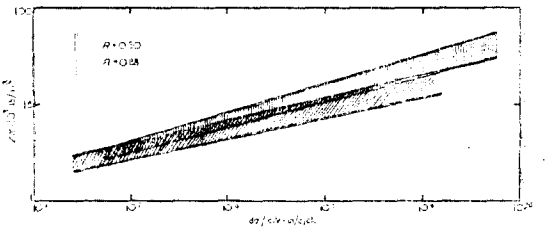


Fig. 8. ΔK vs. da/dN for 15 percent Ni-titanium alloy in longitudinal direction.

Fig 4

것이다. 再解析의 要旨는 大略 다음과 같다.

A. Central crack(길이 $2a$)의 有限巾(巾 W)의 修正式은 Dixon¹⁸⁾의 表式을 썼다. 즉

$$K_I = \sigma(\pi a)^{1/2} \{1 - (2a/W)^2\}^{1/2} \quad (12)$$

B. Single Edge Crack(길이 a)의 有限巾(巾 W)의 修正式은 다음 表式¹⁹⁾을 썼다. 즉

$$K_I = 1.1 \sigma(\pi a)^{1/2} \quad (13)$$

C. 모든 材料의 試片에 對해서 Stress Ratio $R = (\sigma_m - \sigma_a) / (\sigma_m + \sigma_a)$ 의 값은 0.25~0.90의 範圍로 했다.

D. 모든 實驗에서 $\sigma_{max} \leq 0.5\sigma_Y$ 로 했고, $\sigma_{max} = P_{max} / W \cdot t$, t : 板厚이다.

E. 間或 $\sigma_{max} > 0.5\sigma_Y$ 또는 $\sigma_N = \frac{P}{(W-2a) \cdot t}$ or $\sigma_N = \frac{P}{(W-a) \cdot t}$ 가 $\sigma_N \approx \sigma_Y$ 가 되는 實驗의 것도 K 로 整理해 보았다.

F. Crack Growth Rate da/dN 의 表式은 (11)式 代身에 (14)式²⁰⁾을 썼다. 여기서 $\Delta K = K_{max} - K_{min}$, B 는 材料常數, m 은 常數指數(材料에 따른)이다.

$$da/dN = B(\Delta K)^m \quad (14)$$

G. 試驗材料로는 Mild Steel, 18/8 Austenitic Stainless Steel, Al 및 Al-Alloys, Cu 및 Cu-Alloys, Ti 및 Ti-Alloys 등을 썼고, 試片 크기는 $W=10$ in, $t \approx 0.1$ in 이었다.

H. da/dN 舉動調查實驗에서는 指數值 m 의 追跡에 力點을 두었는데, 이를 위한 $da/dN - \Delta K$ 關係의 一部는 Fig. 4와 같고, 이 關係에서 얻어진 m 值의 最小値는 2.5, 最大値는 6.4이었다. Mild Steel에서는 3.3, Cold Rolled Mild Steel에서는 4.2~6.4, Stainless Steel에서는 3.1~3.2, Al 또는 Al-Alloys에서는 2.6~4.8, Cu 또는 Cu-Alloys에서는 3.7~4.7, Ti 또는 Ti-Alloys에서는 3.5~4.4로 나타났다. 이 結果들은 Paris와 Erdogan의 研究²¹⁾以後 活發해진 破壞力學的인 疲勞龜裂成長舉動解析에 關한 諸報告들에서 얻은 $m=2\sim 4$ 를 더욱 擴大시켰다.

I. 最小成長速度觀察에서는 몇 가지의 試片에 對해서 $1\sim 32A^\circ/\text{cycle}$ 을 얻었고, 各試驗片에 對한 超低速度 $da/dN=10^{-6}\text{in}/\text{cycle}$ 에 對應하는 Crack-tip Stress Intensity Factor Range ΔK 의 값은, Steel類에서는 比較的 높은 $7.9\sim 16.4 \times 10^3$ lb/in^{3/2}, Cu 및 Cu-Alloys에서는 이보다 若干 낮은 $5.9\sim 9.0 \times 10^3$ lb/in^{3/2}, Al 및 Al-Alloys에서 가장 낮은 $2.6\sim 5.9 \times 10^3$ lb/in^{3/2}으로 나타났다.

J. 著者들은 結論에서 da/dN 의 解析이 從前의 破壞力學

以前에 使用했던 $\sigma_a^3 \cdot a$ 보다 破壞力學的인 parameter인 ΔK 에 依해서 더 有效하게 이루어짐을 確認하고 있다.

Frost들은 이 論文에서 負荷時의 Crack-tip Plastic Zone 을 다루어 彈性論的으로 解析한 Dixon의 K_I 表式 (12)式의 効用性を 確認하고 있다. 즉 Srawley 등²²⁾의 Crack-tip Plastic Zone Size (Plane Stress Condition) r_P 의 近似式

$$r_P = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_I}{\sigma_Y} \right)^2 \quad (15)$$

에서 r_P 의 값이, Plane Strain Condition 일 때는 이의 1/3크기 밖에 안되고, r_P 가 crack 半 길이 a 보다 작기 때문에 實斷面最大公稱應力 σ_N (既出)이 $0.8\sigma_Y$ 를 超過하지 않아 塑性域이 彈性應力場에 미치는 影響은 微弱하다고 했다.

Frost들은 더 나아가, 龜裂成長에 必要한 臨界應力 設定에 關한 從前의 研究結果들을 破壞力學的으로 다시 修正整理해서 臨界應力(critical stress)이란 概念代身에 臨界應力擴大係數(Critical Stress Intensity Factor)라는 概念으로 表記했다. 즉, 疲勞壽命에 連結되는 荷重 反復回數 N 과 $\sigma_a^3 \cdot a$ 와의 關係(바로 이 關係에서 (11)式이 誘導되었음) 代身에 (13)式으로 表式되는 $\Delta K - N$ 關係로 다시 整理해서 여기에서 疲勞龜裂의 成長이 시작되는 ΔK 의 臨界值 ΔK_c 의 값을 材料마다 찾아 내었다. 使用式으로도 알 수 있듯이, 試片은 Single Edge Crack을 갖는 板材였고 荷重은 crack에 直角인 等分布引張(一般疲勞概念에서 行한 引張一壓縮疲勞試驗 結果도 部分的으로 整理되어 있는데, 이에 對해선 論議의 餘地가 많음) 荷重(一定荷重幅)이 었다. 이들은 ΔK_c 值의 精度로서 $\sigma_m/\sigma_a < 1$, 즉, $R > 0$ 에 對해서는 $\pm 10\%$ 以內라 했고, 引張一壓縮型의 疲勞, 즉, $R = -1$ 의 경우는 引張分에 對해서만 (13)式의 ΔK 表示를 했는데, 이 경우의 ΔK_c 의 誤差는 $\pm 20\%$ 以內라 했다. 또한 이들은 ΔK_c 값으로 龜裂材의 “疲勞限度”라고 보았는데, 從來의 $S - N$ curve에서 求한 “疲勞限度”와는 次元面에서도 다르거니와 나름대로의 全然 새로운 觀點이라 하겠다. 다만 이러한 “疲勞限度”의 새로운 概念에 對해서는 論議의 餘地가 많고 後述하기로 한다. 臨界應力擴大係數 ΔK_c 에 關한 이들의 研究의 概要는 다음과 같다.

A. 調査對象材料로는 Mild Steel, Low Alloy Steel, 18/8 Austenitic Steel, Ni-Cr Alloy Steel, Al, Cu, Ti, Cu-Al Alloy, Monel, P-Bronze, Brass 60/40, Inconel, High Strength Ni-Cr Alloy Steel

等이었다.

B. 應力比 R 의 값은 $0 \sim 0.75$ 으로, 部分的으로는 $R = -1$ 의 경우도 있다.

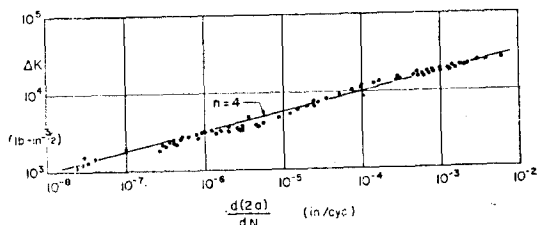
C. ΔK_c 의 값은 crack 길이 $0.02 \sim 0.20$ in 에 對한 것으로 잡았으며, 이 경우 ΔK_c 값은 $(0.93 \sim 7.2) \times 10^3$ lb/in^{3/2} 의 分布로 나타났다.

D. $0.02 \sim 0.20$ in crack 길이에 對한 ΔK_c 값이 Steel (Mild Steel, Low Alloy Steel 등)에서 比較的 크게 나타나서 $2.3 \sim 6.0 \times 10^3$ lb/in^{3/2}, Ni 또는 Monel 등에서 이와 비슷하고 Al에서 가장 작게 $1.3 \sim 3.7 \times 10^3$ lb/in^{3/2} 程度의 分布로 나타났다.

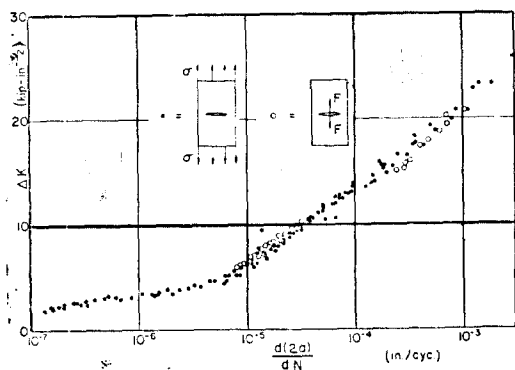
E. 같은 材料에 對해서는, $R = -1$ 과 $R = 0$ 에 對한 ΔK_c 의 값은 特異하게 나타나고, 大體로 R 가 작아질수록 ΔK_c 는 커지는 傾向을 보이고 있다.

$R = -1$ 에 對해서는 既述했는데, $R = 0$ 즉 $\sigma_a = \sigma_m > 0$ 의 경우에 對해서는 論難의 餘地가 많다. 즉 兩쪽 모두 壓縮時의 crack closure 問題는 아주 微妙하고 이에 對해서는 後述하기로 한다.

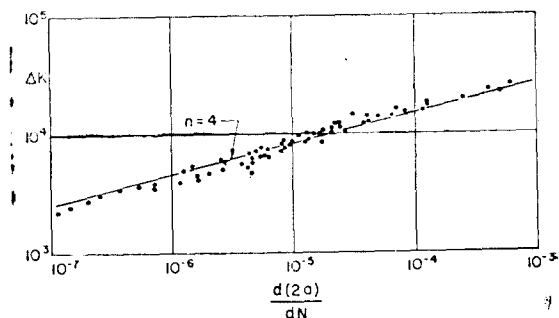
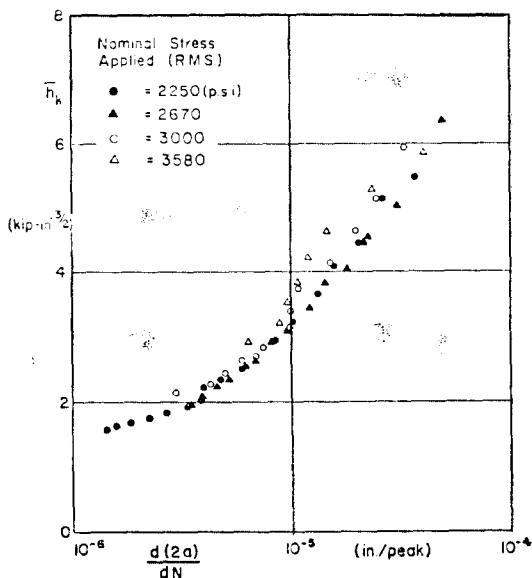
以上으로 Frost 들의 論文紹介를 마치겠는데, 全體의 으로 볼 때, 이들이 이 論文에서 모든 疲勞龜裂成長舉動을 (11)式 대신 (14)式에 바탕을 두고 解析함으로써 破壞力學的인 疲勞研究로 轉向했다고 말 할 수 있다. 다만



The trend of a broad range of 7075-T6 aluminum alloy data under sinusoidal loading ($\gamma \approx 0.5$).



Correlation of crack growth rates in 7075-T6 aluminum alloy under sinusoidal loading.



The trend of 2024-T3 aluminum alloy data.

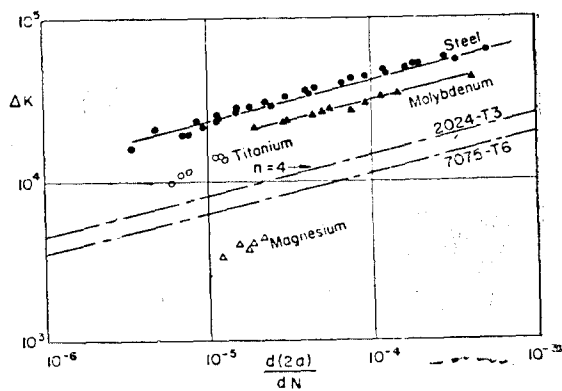


Fig 5

이들이 再整理한 여러 疲勞試驗 Data가 破壞力學以前的 疲勞試驗 Data이었다는 點, 그 中에는 嚴密한 彈性解析에 疑問이 될수 있는 $R=-1, R=0$ 그 밖에 $0 < R < 1$ 이라해도 比較的 R 가 크고, 또는 $\sigma_{max} \approx \sigma_y$ 등에 屬하는 疲勞試驗 Data(이 論文의 Table 1, 2, 3 및 Fig. 1-17)였다는 點들이 많이 論難되어 그 discussion의 要旨가 함께 記載되어 있는 것이다. Frost 들은 이 研究以後 繼續 破壞力學的인 疲勞學動研究들을 報告²³⁾하고 있다.

(2) Paris²⁴⁾의 研究

著者들은 彈性疲勞龜裂의 成長學動解析에 처음으로 破壞力學的인 手法를 導入해서 發表 함으로서 “疲勞와 破壞力學” 研究分野에 盡期的인 Moment를 構築한 後, 破壞力學的인 疲勞研究를 더 깊이, 더 多角度로 擴張하는 試圖를 本論文에서 紹介하고 있다. 論文의 줄거리는, 龜裂材의 應力解析에서부터 시작해서 Sine 波荷重疲勞, Random 荷重疲勞, 龜裂成長法則에 이어 龜裂成長過程에서의 Damage의 蓄積, 龜裂成長의 Work-Rate Model을 다루고, 몇가지의 Random 荷重疲勞에서의 龜裂成長學動을 比較하고 結論을 내렸으며, 마지막으로 討論內容을 添付시켜 놓았다. 連續體理論을 바탕으로 하면서 問題點을 다음 두가지로 縮小시켰다. 즉

- A. 選定된 疲勞履歷(荷重-時間 關係)에 따라, 龜裂材의 龜裂成長學動에 미치는 試片形狀의 影響.
- B. 疲勞龜裂成長學動에 미치는 各各 다른 疲勞履歷型의 影響.

有限幅板材에 Center Crack (길이 2a)이 있을 때의 K 의 式으론(修正函數는 別途考慮),

$$K = \sigma \sqrt{a} \tag{16}$$

Center Crack에 內力(Wedge Force)이 作用할 때의 K 式으론

$$K = \frac{F}{\pi \sqrt{a}} \tag{17}$$

을 썼고, 여기서 F 는 板材單位두께當의 Wedge Force이다. 兩式 모두 疲勞解析用이기 때문에 有限幅의 修正은 省略하고 있다. 疲勞解析用의 K 의 概念式으론

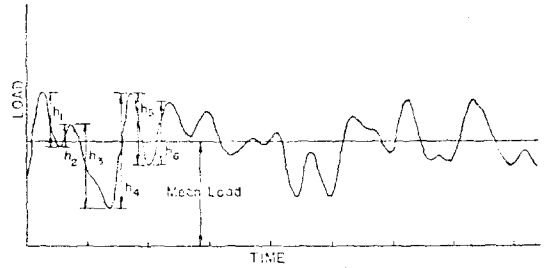
$$K = P \cdot f(a) \dots \dots \dots \text{定荷重(定荷重幅)} \tag{18}$$

$$K(t) = P(t) \cdot f(a) \dots \dots \dots \text{Sinusoidal or Random Loading} \tag{19}$$

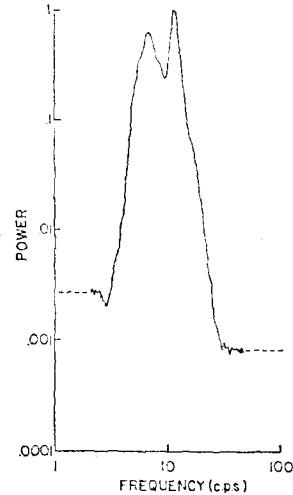
을 使用했다. 疲勞龜裂成長速度式으로는

$$d(2a)/dN = C \cdot (4K)^n \tag{20}$$

을 썼고, (20)式은 Frost 들의 (14)式과 그 모양이 같다. 試片材料엔 主로 Al-Alloys (7075-T6, 2024-T3



A typical random load-time history.



A typical power spectrum of a random load.

Fig 6

등)을 擇했고, Ti, Mo, Mg, Steel 등에 對한 것도 整理하고 있다. $d(2a)/dN = \Delta K$ 關係는 Fig. 5에 示했고, 이 中 Radom Cycle의 解析例는 Fig. 6에 紹介했다. Random Loading Fatigue에서의 龜裂成長學動은 電子顯微鏡으로 Striation을 觀察研究한 것을 引用하고 있는데 그寫眞들은 여기에서는 省略한다. 이들의 研究를 要約하면 다음과 같다.

- A. 疲勞龜裂의 成長過程은 連續的인 過程이라 볼수 있고, 따라서 龜裂의 成長速度를 解析함에 있어서 龜裂 길이를 靜的(論文에선 quasi-stationary)으로 取扱해도 無妨하다고 보았다.
- B. 龜裂材의 彈性應力解析과 이로부터 얻어지는 “破壞力學”的인 parameter인 應力擴大係數가 疲勞龜裂成長速度解析엔 效果的이라고 보았다.
- C. Sine 波荷重의 疲勞에서는, 여러가지 種類가 다른 材料 全般에 걸쳐서, 疲勞龜裂成長速度에 關한 實驗 Data들이 大體로 다음 關係를 滿足시킨다고 보았다.

$$d(2a)/dN=C(ΔK)^4 \quad (21)$$

D. “疲勞 damage 의 蓄積”의 Model 은 龜裂尖端에 形成되는 塑性域에서의 全般的인 性質이 充分히 把握된 然後에야 그 妥當性, 加能性等이 浮刻될 것이며, 現時點에선 하나의 試圖에 不過하다고 보았다. 또한 Work Rate 의 Model 도 Random 荷重疲勞에서의 龜裂成長 速度解析에의 하나의 試圖이고, 여기에서는 그 妥當性을 積極的으로 主張하지는 않았으며, 다만 앞으로의 많은 實驗 Data 들이 뒷받침해 줄 것을 期待하고 있다.

Paris 들의 論文 紹介는 이 程度로 마치고 있으나, 앞서 말 한바와 같이 破壞力學의 彈性疲勞 즉 疲勞龜裂을 解析하는 길을 더 놓은 것이 바로 이들이기 때문에, 또한 이들이 그 뒤에도 繼續 疲勞龜裂— 破壞力學 關係 研究에 많은 研究報告들을 내어놓고 있다.

破壞力學의 疲勞問題를 다룸에는 반드시 疲勞材의 彈性應力解析이 先行되어야 하기 때문에 아직까지는 疲勞試驗方法이 限定되어 있다고 보아야겠다. 즉 在來式의 모든 疲勞試驗法에 對해서 다 充分한 應力解析이 이루어지고 있는 것은 아니기 때문에, 주로 손쉬운 方法인 引張—引張型 疲勞試驗法을 모두가 慣用하고 있는 것이다. 그러나 引張—引張型이라 할지라도 應力比의 策定이나 疲勞波型의 設定如何에 따라서는 다른 問題를 誘發시킬 수도 있어, 以上 2編의 論文外에 Crack Closure 에 관한 Elber 의 論文^{25, 26)}을 參考로 들어둔다. 즉 Elber 는 引張疲勞下에서도 龜裂이 닫힐 수 있다는 것을 COD (Crack Opening Displacement) Gage 로 測定함으로써, 壓縮時에 生각되는 Closed Crack 狀態에서는 龜裂成長은 期待할 수 없다고 했다.

3.2 壓縮疲勞

純粹한 壓縮荷重만일 때는 前稿의 (1), (2)式 等에서 應力擴大係數 K 가 $K < 0$ 가 될것이나, 이에 對한 應力解析이나 K 解釋의 例는 아직 찾아볼수 없다. 壓縮狀態에서 龜裂의 形態가 어떻게 될가? 하는데에 關한 定說이 없는 때문인 것으로 알고 있다. 이미 說明²⁷⁾되어 있는 바와 같이 破壞力學에서 다루는 Crack 의 形態는 K_I , K_{II} , K_{III} Mode 인데, 壓縮時의 Crack Model 은 아직 이 中 어느 것에도 屬하지 않을 뿐 아니라 別途의 Model 이 定立된 것도 아니다. 다만 壓縮外에 다른 荷重例컨대 剪斷荷重 같은 것이 共存할 때의 K_I 解析은 試圖 되고 있다.

그러나 現實的으로는 壓縮荷重下(正確하게는 壓縮荷

重만이라고 생각되는)의 疲勞가 있다고 보고 이에 對한 破壞力學의인 取扱例를 들어보기로 한다.

(1) Hubbard 의 列²⁹⁾

Hubbard 는 光彈性法과 直接測定法을 兼用하면서 壓縮疲勞下의 龜裂成長舉動을 破壞力學의 으로 解析해볼려고 試圖했다. 材料은 高强度 Al-合金인 7075-T6 板材를 썼고 Center Crack 을 넣어 0-壓縮의 Sine 波疲勞를 걸었다. 試片準備過程에서 實驗段階, 整理過程 등을 아주 詳細히 說明하고 있다. 試片板材의 한 쪽 面엔 光彈性實驗用의 表面被膜(Birefringent Coating)을 입혔고, 다른 面은 研摩面으로 해서 移動顯微鏡(Travelling Microscope)으로 龜裂尖端間거리를 읽었다. 光彈性으로 主로 負荷時의 龜裂尖端表面剪斷變形度를 測定했고, 이와 顯微鏡으로 읽은 龜裂成長 Data 와를 土臺로 壓縮疲勞를 破壞力學의 으로 다루어 본 것이다. $1/8$ " 두께의 $1 1/2" \times 1 1/2"$ 의 板材에 $1/2"$ 길이의 Center Slit 를 넣은 試片을 使用하고 있다. 壓縮荷重은 Slit 에 直角으로 걸었다.

論文엔 많은 等色線寫眞을 紹介하고 있으나 여기에선 光彈性實驗部分의 寫眞紹介는 省略한다. 이 實驗에서 얻은 것은 壓縮疲勞荷重下에서 Crack-tip 에 殘留引張應力이 생기고, 이 殘留引張應力으로 陽符號의 K 가 定義되며 또 이 殘留引張應力때문에 龜裂이 成長한다는 것이다. 實地로 K 決定은 Paris 의 Power Law((20式)의 成立을 前提로 하고, 移動顯微鏡으로 測定한 $2a-N$ 曲線에서 求한 $d(2a)/dN$ 舉動을 土臺로 所謂 “有效應力擴大係數”(Effective Stress Intensity Factor)를 算出하는 方式을 取하고 있다. 그 過程을 要約紹介하던 다음과 같다.

A. 移動顯微鏡으로 追跡한 疲勞龜裂의 成長舉動을 Fig. 7 (a)와 같이 圖式化하고, 이로 $2a-N$ 關係 實驗式을 求해서 (22)式을 얻었다.

$$2a=C_2(N)^b \quad (22)$$

B. Paris 의 Power Law 의 成立을 前提로 疲勞龜裂安定 成長速度를 應力擴大係數에 依存한다고 보고 (23)式과 같이 表記했다.

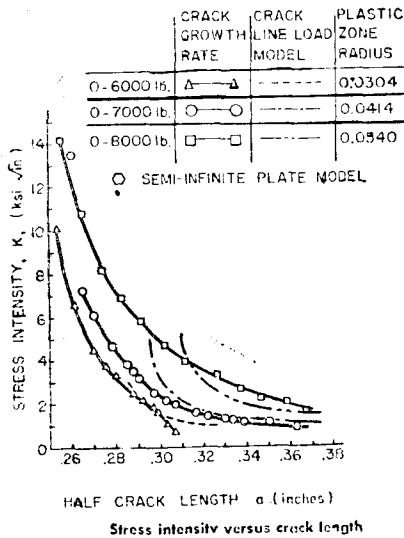
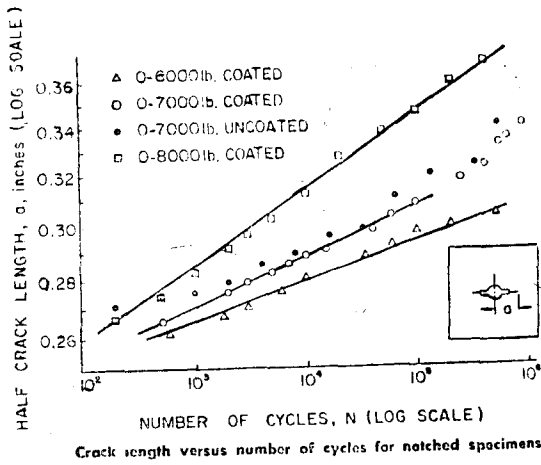
$$d(2a)/dN=C_1AK^n \quad (23)$$

C. (23)式의 $d(2a)/dN$ 은 (22)式을 微分해서 求한다.

D. (22)式과 (23)式을 結附시키면 應力擴大係數 K 는 荷重反復數 N 과 函數關係를 갖는다고 보여짐으로 이를 다음과 같이 表式했다.

$$K_e=C_T(N)^{h_T} \quad (24)$$

여기에서 K_e 는 有效應力擴大係數를 나타내고, C_T ,



h_T 는 다음과 같다.

$$C_T = C_2 h^{1/n} / C_1, \quad h_T = (h-1) / n \quad (25)$$

E. C_T , C_1 , C_2 , h_T , h 와 n 의 값들은 疲勞試驗條件 特別 荷重範圍에서 求했고, 다만 C_1 과 n 의 값은

$$C_1 = 10^{-22}, \quad n = 4$$

와 같이 했다.

F. K_c 는 壓縮荷重時의 應力擴大係數가 아니고, 壓縮疲勞에서 龜裂의 成長을 가져오게하는 殘留引張應力에 對한 有效應力擴大係數로 計算한 것이다.

G. 疲勞에 使用한 壓縮 Cycle은 다음 3種이 었다.

- (i) 0~6000lb, (ii) 0~7000lb, (iii) 0~8000lb
- Hubbard는 이 報告에서 Crack Arrest 條件도 若干

言及하였고, 위의 K_c 計算方法以外에 光彈性解析에서 얻은 殘留應力值로부터 直接應力擴大係數를 計算하는 方法의 可能性에 對해서도 言及을 하고 있으나 具體的으로는 發表하지 않았다. (24)式으로 計算한 K 와 da/dN 과의 關係를 圖表化한 것이 Fig. 7 (b)이다.

이 研究에서 Hubbard가 내린 結論은 다음과 같다.

- A. Irwin의 塑性域直徑의 式 $r_p = \frac{K^2}{2\pi\sigma_Y}$ 은 光彈性應力解析으로 그 妥當性이 證明되었다.
- B. 龜裂尖端의 殘留引張應力場은 塑性域의 크기보다 若干 작고 材料의 降伏強度值의 몇分의 1의 數值크기에 限定된다.
- C. 疲勞龜裂의 成長에 따라서 殘留應力場의 크기는 크게 變化하지 않는다.
- D. 疲勞龜裂의 成長에 따라 成長速度는 계속 減少한다.
- F. 疲勞龜裂의 成長을 主導하는 應力擴大係數는 龜裂成長과 더불어 계속 減少한다.

以上은 Hubbard의 研究報告의 大要인데, 많은 問題點들을 안고는 있지만 하나의 特異한 研究方法의 提示로 받아들여져 興味를 끌고 있다. 이 研究는 破壞力學의 側面에서도 그 意義를 認定받고 있지만 一般의 疲勞 즉 從來의 疲勞概念의 研究者들에게도 깊은 關心을 끌고 있다⁽⁹⁾ 이 研究에서 가장 큰 問題點이라 할 수 있는 것은 反復壓縮時에 생긴다고 하는 殘留引張應力의 問題라 하겠다. 光彈性應力解析을 바탕으로 한 것이긴 하나 結果의으로는 純粹壓縮應力만의 K 解析과는 直結되지 않는다. 다시 말하면 이 研究는 壓縮疲勞를 다루기는 했어도, 內容의으로는 引張과 結付된 疲勞舉動을 다루었다고 보겠다. “계속”

參考文獻

- (16) N.E. Frost, L.P. Pook and K. Denton, "A Fracture Mechanics Analysis of Fatigue Crack Growth Data For Various Materials", Engng. Fracture Mechanics, vol. 3, pp. 109~126, 1971.
- (17) ASTM STP 410, pp. 1~56, 1966.
- (18) J.R. Dixon, "Stress Distribution Around a Crack in a Plate Loaded in Tension: Effect of Finite Width," J.R. Aeronaut. Soc., 64-3, pp. 141~145, 1960.
- (19) ASTM STP 391, pp. 30~83, 1965.

- (20) P.C. Paris, "The Fracture Mechanics Approach To Fatigue", Proc. 10th Sagamore Conf., p. 107, Syracuse Univ. Press, 1965.
- (21) P.C. Paris and F. Erdogan, "A Critical Analysis of Crack Propagation Laws," Trans. ASME, J. Basic Engineering, D-85-4, pp. 528~534, 1963.
- (22) ASTM STP 381~198, 1965.
- (23) L.P. Pook and N.E. Frost, "A Fatigue Crack Growth Theory", Int. J. Fracture, vol. 9, No. 1, pp. 53~61, 1973 등.
- (24) P.C. Paris, "The Fracture Mechanics Approach To Fatigue", Proc. 10th Sagamore Conf. Syracuse Univ. Press, pp. 107~132, 1965.
- (25) Wolf Elber, "Fatigue Crack Closure Under Cyclic Tension", Engng Fracture Mechanics, vol. 2, pp.37~45, 1970.
- (26) Wolf. Elber, "The Significance of Fatigue Crack Closure", in ASTM STP 486, pp. 236~242, 1971.
- (27) 崔鎔混, "破壞力學", 大韓機械學會誌, vol. 13, No. 1, pp. 15~25, 1973.
- (28) S.C. Kim and H. Kitagawa, "A Method of Determination of Mixed Mode Fracture Toughness of Brittle Materials Under Compression", Int. Conf. Fracture Mechanics and Technology, March 21~25, 1977, Hong Kong,
- (29) R.P. Hubbard, "Crack Growth Under Cyclic Compression", Trans, ASME, J. Basic Engineering, D-91-4, pp. 625~631, 1969.
- (30) Bela I. Sandor, "Fundamentals of Cyclic Stress and Strain," The Univ. of Wisconsin Press, p. 137~138, 1972.