

# 構造物 構成要素의 疲勞龜裂傳播 舉動에 관한 考察

鄭 錫 柱

서울産業大學 機械設計學科 教授



●1936年 4月 16日生  
●固體力學에서 應力解析 및 材料舉動特性을 專攻하였으며, 特히 梵鐘 應力解析 및 音響 등에 많은 關心을 가지고 있다.

## 1. 머리말

疲勞龜裂傳播曲線을 決定하는 것은 破壞力學的 設計接近方法 中 必須的인 部分이다. 그 동안 이 部分에 對한 막대한 量의 研究가 계속되어 왔음에도 불구하고 疲勞龜裂傳播特徵을 豫見하는데는 다소 正確性이 缺如되어 있다. 이러한 疲勞龜裂傳播의 問題는 龜裂傳播率과 應力擴大係數간의 關係를 表現함으로써, 疲勞에 있어서의 破壞力學利用을 考慮한다.

構造物 構成要素의 피로수명은 疲勞龜裂을 發生시키는데 要求되는 사이클과 크랙이 傳播하는데 要求되는 사이클의 乘으로 決定된다. 따라서 構造物 構成要素의 피로수명은 세가지 連續的인 段階 즉, 疲勞龜裂發生, 疲勞龜裂傳播, 그리고 破壞로 構成된다고 생각할 수 있다. 여기서 破壞段階란 構造物 構成要素의 수명에 있어서 마지막 狀態를 나타내는 段階를 말한다. 疲勞龜裂發生과 疲勞龜裂傳播의 程度는 어떠한 外部條件을 適用시켰는가에 따라 다르게 된다. 다시 말해서 이러한 條件은 構造物 構成要素의 피로수명에 큰 影響을 끼친다. 가령, 應力集中 또는 初期缺陷을 內包하고 있는 構造物 構成要素는 주로 그 構成要素의 疲勞龜裂傳播特徵으로 檢討될 수 있다. 結局, 反復荷重狀態의 構造物 構成要素의 수명은 위의 세 단계에서 評價되고 각 段階에서 사이클 舉動을 철저히 이해할 때 비로소 決定되는 것이다.

## 2. 크랙成長과 應力擴大係數

만일, 2개의 다른 크랙이 같은 應力條件 즉, 같은 應力擴大係數條件을 갖는다면, 그 크랙들은 같은 方法으로 舉動하며 똑같은 成長率을 나타낼 것이다. 그리고 사이클 당 疲勞龜裂傳播率  $da/dN$ 은 應力擴大係數範圍  $\Delta k$ 에 의하여 決定된다. 즉,

$$\begin{aligned} da/dN &= f(\Delta k) = f\{(\delta_{\max} - \delta_{\min})\sqrt{\pi a}\} \\ &= f\{2\delta_a\sqrt{\pi a}\} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서  $\delta_{\max}$ 와  $\delta_{\min}$ 은 사이클 중의 最大, 最小 應力이며,  $\delta_a$ 는 應力振幅이다(그림 1 참조).

Paris<sup>(1)</sup>와 Paris, Gomez 그리고 Anderson<sup>(2)</sup>이 最初로 사이클 당 疲勞龜裂傳播率  $da/dN$ 은 應力擴大係數範圍  $\Delta k$ 에 대하여 決定된다는 것을 지적했다. 이러한 關係를 實驗하게 되면 그림 2와 같은 S-字形 크랙成長曲線이 나타나게 된다. 이 曲線은 그림에서 보여주는 바와 같이 3區域으로 나눌 수 있는데 이는 앞서

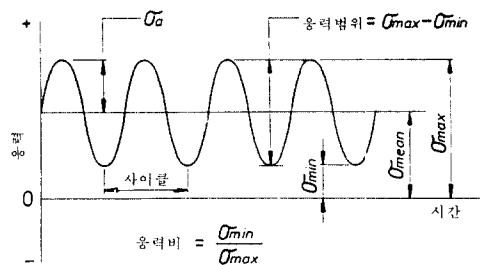
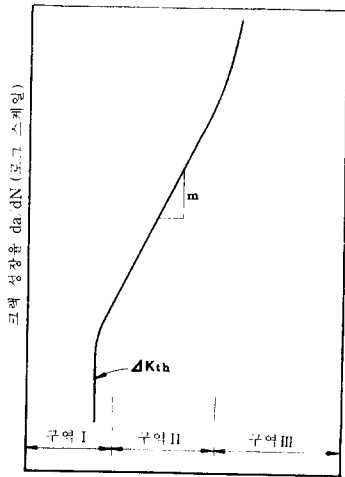


그림 1 사이클 하중조건



응력확대계수폭 (로그 스케일)  $\Delta K$

그림 2 응력확대계수폭에 대한 크랙 성장률

及한 3가지 連續的인 段階를 나타내는 것이다. 區域 I 은 크랙成長이 전혀없는 範圍의 應力擴大係數幅  $\Delta K_{th}$ 를 包含하는데, 이러한  $\Delta K_{th}$ 를 實驗的으로 糾明하기란 어렵다. 區域 II 는 實際 疲勞龜裂傳播의 舉動을 나타내는 區域이고 區域 III 은 大部分의 疲勞狀況에서 別로 重要하게 다루어지고 있지 않다. 그림 2의 樣相은 항공기와 핵에너지 설비의 安全設計를 위하여 電子顯微鏡寫眞에 의한 破壞解析과 함께 가장 많이 利用되어 왔다. 또한 크랙成長舉動은 材料의 選擇과 標準設計에 있어서도 중요한 역할을 한다. 한편 式 (1)은 다음과 같은 指數函數로서 쓸 수 있다.

$$da/dN = C(\Delta K)^n \quad (2)$$

여기서,  $C$ 와  $n$ 은 材料常數이다. 그러나  $da/dN$ 과  $\Delta K$ 의 로그 그래프는 直線으로 式 (2)는 實質的이 못된다. 事實上的 實驗데이터는 S字 模樣의 曲線이며 여러가지 경사의 線으로 나타난다<sup>(3)</sup>.

疲勞龜裂成長舉動에 대한 應力比( $R = K_{min}/K_{max} = \delta_{min}/\delta_{max}$ )의 影響은 그림 3에 나타낸 바와 같이 應力比  $R$ 값이 增加함에 따라 S字 形 曲線이 左則上方으로 移動함으로써 크랙成長比가 全區域에서 增加하는 경향을 보인다. 그러나 區域 II 에서의 增加는 작고, 區域 III 에서

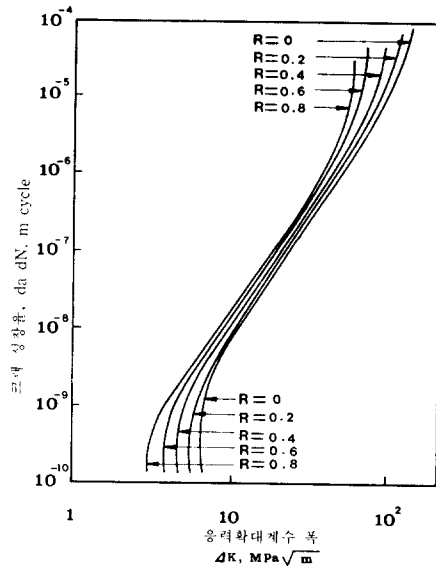


그림 3 응력비에 따른 크랙성장률

는 破壞靱性值 즉 臨界應力擴大係數  $K_c$  또는 平面變形率 破壞靱性值  $K_{Ic}$ 에 지배된다. 區域 II 와 III 에서 應力比 影響을 나타내는 式으로는 다음과 같은 Forman의 方程式<sup>(4)</sup>이 널리 利用되고 있다.

$$da/dN = \frac{C(\Delta K)^n}{(1-R)K_{cr} - \Delta K} \quad (3)$$

여기서,  $K_{cr}$ 는 疲勞試驗時 急速破壞가 일어날 때의 應力擴大係數  $K_I$ 의 臨界값이다.

이러한 Forman式은 크랙선단에서 應力擴大係數의 最大값  $K_{max}$ 이 材料의 破壞靱性值에 到達하면 크랙成長速度는 무한히 커진다는 것과 應力比  $R$ 의 影響을 考慮한 式 (2)의 修正式이다. 그러나 式(3)은 應力地  $R < 0$ 인 경우 즉 應力이 壓縮인 경우 問題가 제기된다. 크랙은 壓縮狀態에서의 應力을 높이는 因子가 아니며, 또한 應力擴大係數  $K$ 는 무의미 해진다.

疲勞龜裂傳播率과 應力擴大係數와의 關係는 應力擴大係數는 여러가지 다른 設計幾何學에 대하여도 計算될 수 있기 때문에 有用하다. 이것은 각기 다른 幾何學의 試片들로부터 얻은 크랙傳播데이터를 살펴보면 같은 曲線의 樣相으로 나타난다.

### 3. 크랙傳播에 影響을 끼치는 因子

疲勞龜裂傳播는 無數한 數의 파라미터에 影響을 받는다. 特히, 環境의 影響이 가장 현저하다. 그러나 一般的으로 疲勞傳播舉動에 대한 實驗은 環境條件을 考慮한 狀態에서 實行되지 못하고 있으며, 實驗데이터를 살펴보면 그래프 상에서 흩어진 점들로서 나타남을 볼 수 있는데 이것은 實際 위의 事實의 狀態에서 實驗이 행해지기 때문이다.

그동안 크랙成長率에 環境이 미치는 影響은 많은 研究者들의 研究對象이 되어 왔으며 정상 습공기 상온에서의 疲勞龜裂傳播率은 眞空狀態에서 보다도 큰 것으로 나타났다<sup>(5,6)</sup>. Hartman<sup>(7)</sup>에 의하면 濕空氣의 影響은 酸素보다도 오히려 물 蒸氣때문이라고 주장했고, 또한 乾燥아르곤 및 乾燥酸素에서 크랙成長率은 매우 낮다고 주장하였다.

環境이 疲勞龜裂傳播率에 미치는 影響에 대한 의견은 一致된 것이 없다. 그러나, 이러한 影響은 확실히 腐蝕作用과 時間에 의한 結果라 할 수 있다.

크랙傳播에 影響을 끼치는 여러 因子 가운데 다음 因子들은 크랙成長率을 豫見하는데 考慮되어야 한다.

- (1) 두께
- (2) 生産有形
- (3) 熱處理
- (4) 冷却變形
- (5) 溫度
- (6) 製造者
- (7) 1회 生産마다의 偏差
- (8) 環境과 빈도수

이 중 (6) 製造者, (7) 1회 生産마다의 偏差 (8) 環境과 빈도수 등은 破壞力學的 接近方法에 있어서 설명하기 어려운 因子이다.

#### (1) 두께의 影響

材料두께의 影響은 주로 破壞모드遷移前에 存在하는 것으로 나타난다<sup>(8)</sup>. 크랙이 成長할때 塑性域의 크기는 增加하며 最終에는 平面應力

狀態가 된다. 이것은 疲勞크랙이 하나의 剪斷 또는 두개의 剪斷으로 變化하는 것 때문이다. 일부 試驗데이터를 살펴보면 疲勞成長率은 두께가 두꺼운 板에서 다소 큰 것으로 나타난다. 두께가 두꺼운 板에서의 遷移는 보다 큰 塑性域을 必要로 하며 보다 큰 크랙길이에서 發生할 것이다. 즉 같은 應力擴大係數에서 平面變形率狀態에서 보다도 平面應力狀態에서 크랙成長은 늦다. 매우 두꺼운 斷面에서의 크랙傳播는 좀 더 많은 問題를 갖는데 이 크랙은 1/4타원형 코너 크랙 또는 반 타원형 表面 흠일 수 있다. 응력세기는 이러한 흠을 따라 變하며 그 最大值는 흠의 模樣에 달려 있다. 크랙成長率이 응력세기에 의하여 決定된다고 假定하는 것은 크랙成長率은 흠의 앞을 따라 變化한다고 할 수 있는 것이다.

#### (2) 生産有形의 影響

크랙傳播의 性質은 板材, 壓出材 또는 鍛造材 等에 따라 다르다. 이와 같이 生産有形에 따라 크랙傳播의 性質은 變化한다. Van Leeuwen<sup>(9)</sup>은 鍛造 알루미늄 合金의 疲勞龜裂傳播에 對해서 研究하였다.

#### (3) 熱處理

疲勞龜裂成長은 熱處理에 따라 큰 影響을 받을 수 있으며, 合金마다 그 影響은 差異가 있다<sup>(10)</sup>. 應力腐蝕抵抗等を 向上시키기 위하여 設計된 熱處理는 반드시 疲勞에 좋은 것은 아니다. 따라서 어떠한 性質들을 向上시키기 위하여 熱處理할 때는 疲勞龜裂成長率도 檢討하는 것이 좋다.

#### (4) 變形

構造物에 여러가지 材料를 應用할 경우에는 굽힘 또는 굽힘 및 引張에 의한 變形을 考慮해야 한다. 이러한 變形은 加工硬化와 時効硬化에 影響을 끼치기 때문에 또한 延性에도 影響을 끼친다. 따라서 疲勞龜裂傳播率에도 影響을 끼치는 것으로 豫想할 수 있다.

#### (5) 溫도의 影響

거의 모든 材料는 溫度에 따라 그 性質이 달라진다. 마찬가지로 溫度는 疲勞龜裂傳播率에

도 影響을 끼친다<sup>(11)</sup>. 적당히 낮은 溫度는 크랙傳播性質에 좋은 影響을 끼칠 수도 있다<sup>(12)</sup>.

그 外的 製造者, 1회 生産마다의 偏差, 環境과 빈도수 등의 因子는 크랙成長을 豫見하는데 가장 어려운 因子이다.

#### 4. 맺음말

破壞安全設計를 하기 위하여 破壞力學原則을 成功的으로 適用시키기 위해서는 주로 믿을 수 있는 크랙成長을 豫測하는데 달려있다. 一定크기의 疲勞荷重을 받는 構造物 構成要素의 경우 安全係數로 빈도수와 環境의 影響을 설명할 수 있다면 경험적인 데이터를 바탕으로 하여 그 疲勞舉動은 상당히 쉽게 豫想될 수 있다.

그러나 構造物 構成要素가 變化크기의 疲勞荷重을 받는다면, 크랙成長豫測을 위한 데이터를 마련하는데는 무엇보다도 그러한 變化크기의 疲勞荷重狀態의 適用모델이 확실히 必要하며, 일어날 수 있는 여러가지 상황들을 統合할 수 있는 모델에 입각하여야 한다. 그리고 이러한 모든 모델은 결점을 지니고 있으며, 相互作用效果에 대한 설명을 하는데와 모든 節次上的 결점은 다음과 같다.

- (1) 荷重 빈도수와 環境의 影響은 임의의 安全係數로만 설명될 수 있을 따름이다.
- (2) 製造節次, 1회 生産마다의 偏差, 金屬의 影響, 그리고 實驗技術의 結果에 따라 원래의 데이터에는 커다란 차이가 있다.
- (3) 基本 데이터가 없다. 一般的으로 적당한 두께, 판넬의 幅, 그리고 機械條件에 대한 데이터는 쓸모없는 것들이 많다.
- (4) 모든 節次는 荷重스펙트럼에 대한 상당한 知識이 있어야만 해결될 수 있도록 假定되고 있다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Paris, P.C., 1962, "The Growth of Fatigue Cracks due to Variations in Load", Ph. D. Thesis, Lehigh University.
- (2) Paris, P.C., Gomez, M.P. and Anderson, W.

- E., 1961, "A Rational Analytic Theory of Fatigue", The Trend in Engineering, Vol. 13, pp. 9~14.
- (3) Wilhem, D.P., 1967, "Investigation of Cyclic Crack Growth Transitional Behavior", ASTM STP 415, pp. 363~383.
- (4) Forman, R.G., Kearney, V.E. and Engle, R. M., 1967, "Numerical Analysis of Crack Propagation in Cyclic-Loaded Structures", Trans. ASME, J. Basic, Vol. 89, No. 3, p. 459.
- (5) Bradshaw, F.J. and Wheeler, C., 1969, "Effect of Environment and Frequency on Fatigue Cracks in Al Alloys", Int. J Fract Mech, Vol. 5, pp. 255~268.
- (6) Meyn, D.A., 1968, "The Nature of Fatigue Crack Propagation in Air and Vacuum for 2024 Al", ASM Trans, Vol. 61, pp. 52~61.
- (7) Hartman, A., 1965, "On the Effect of Oxygen and Water Vapour on the Propagation of Fatigue Cracks in an Al Alloy", Int. J. Fract. Mech., Vol. 1, pp. 167~188.
- (8) Broek, D and Schijve, J., 1966, "Fatigue Crack Growth; Effect of Sheet Thickness", Aircraft Engineering, Vol. 38, No. 11, p. 31.
- (9) Van Leeuwen, H.P. and Schra, L., 1969, "Heat Treatment Studies of Al Alloy 7079 Forgings", Nat. Aerospace Inst. Amsterdam TR 69058.
- (10) Donaldsen, D.R. and Anderson, W.E., 1960, "Crack Propagation Behavior of Some Airframe Materials", Cranfield Symposium, Vol. 2, pp. 375~441.
- (11) James, C.A. and Schwenk, E.B., 1971, "Fatigue Crack Growth in 304 Stainless Steel at Elevated Temperature", Met. Trans, Vol. 2, pp. 491~503.
- (12) Broek, D., 1972, "Residual Strength and Fatigue Crack Growth in Two Al Alloy Sheets at Temperatures down to  $-75^{\circ}\text{C}$ ", NLR Report TR72096.