

# 材料的 疲勞 및 破壞制御

川 崎 正

<東北大學 工學部>

(國民大 工大; 劉憲一 譯)

다음 글은 본學會 1982年度 定期總會 및 秋季學術大會(82.11.20)에서 特別講演한 內容을 要約하여 번역한 것임,

## 1. 序 論

복잡한 大型構造物의 工學的 設計의 目的은 效率的, 經濟的 및 安全하게 그 機能을 遂行하는 構造物을 만드는데 있으나 많은 構造物이 豫告 없이 破斷하여 많은 生命과 莫大한 財産上의 損失을 가져오고 있다.

二次大戰中 5,000 隻의 船舶中 200 隻이 甚한 被害를 입었고 被害船舶中 10 隻以上이 脆性破壤로 完全히 두동강이났다. 大戰後 脆性破壤에 대한 研究에도 不拘하고 船舶破斷은 아직도 사라지지 않고 있다. 脆性破壤로 因한 大型回轉機械의 몇가지 事故가 50 年代에 일어났다.

50 年 中盤에 世界最初의 젯트機인 Comet 機가 北아프리카의 上空에서 破損되었고 그 原因은 胴體의 구멍에서 發生한 매우 작은 疲勞龜裂에 있음이 밝혀졌다.

1967 年 12 月 15 日에 Ohio 江의 다리가 豫告 없이 부서져 46 名의 人命被害가 있었다. 初期缺陷은 應力腐食갈라짐(SCC)에서 發生하였고 安全設計에 SCC에 대한 格別한 注意가 이루어졌다.

1980 年 3 月 27 日에 노르웨이의 試錐船인 Alexander Kielland 의 다섯기둥 중 한 기둥이 부러지고 20 分後 試錐船이 沈沒하여 212 名의

乘船者中 123 名이 목숨을 잃었다. 破斷原因은 熔接部의 腐蝕疲勞임이 밝혀졌다.

이런 事故例로부터 構造物의 完全한 破斷防止는 不可能함을 알 수 있다. 그러나 破壞力學概念을 利用하므로써 破斷을 制御할 수 있다. 材料의 破壞制御性質의 知識으로 缺陷을 갖는 構造物에 대해 檢査期間을 實質的으로 豫見하게 된다.

## 2. 破壞靱性値와 疲勞破壞靱性値

龜裂은 疲勞, 應力腐蝕 및 靜의 疲勞로 成長하고  $K$  値가  $K_c$  의 臨界値를 가질 때 不安定한 龜裂成長이 發生한다. 靜의 荷重에서 얻어지는  $K_{IC}$  를 破壞靱性値라 하며 破壞制御의 基本的 材料性質이 된다.

不安定한 龜裂成長條件은 龜裂先端에 發生하는 微少塑性域의 性質에 따라 敏感하게 影響을 받기 때문에 疲勞荷重에서의 應力擴大係數는 靜의 荷重의 것과는 다르다.

高張力鋼의 試片을 準備하여 室溫에서 注意깊게 疲勞의 豫龜裂을 넣었다. 龜裂先端이 豫龜裂로 發生된 塑性域內에 있으면  $K_I$  은 一定치 않고  $K_{IC}$  로부터  $K_{fc}$  로 減少했다. 疲勞龜裂이 일단 塑性域밖으로 나가면  $K_I$  이  $K_{fc}$  에 到達하면 疲勞破斷이 發生하였다.

3 個의 豫龜裂試片으로  $-180^\circ\text{C}$  에서 疲勞試驗을 하였는데 其中 2 個는 龜裂이 塑性域밖으로

充分히 나오고난 다음 實驗을 中止하여 같은 溫度에서 破壞靱性試驗을 하여  $K_{Ic}$ (平面스트레인 破壞靱性)을 얻었다.  $K_{Ic}$ 는 豫龜裂溫度와는 無關하다. 나머지 한個는 破壞까지 疲勞試驗을 하여  $K_{fc}$ (疲勞破壞靱性)을 얻었으며 疲勞破壞靱性は  $K_{Ic}$ 와는 다른 破壞制御性質의 하나이다.

動荷重에서의 破壞靱性は 靜荷重보다 훨씬 낮다.  $K_{fc}$ 와  $K_{Ic}$ 의 差異가 荷重速度에 起因한 것인가를 檢討하기 위해 0.05 Hz의 低周波數에서 疲勞試驗을 했다. 破壞靱性は 破斷反復數  $N_f$ 가 增加함에 따라  $K_{Ic}$ 로부터  $K_{fc}$ 로 減少했다.  $N_f$ 가  $10^3$ 을 超過하면 疲勞破壞靱性は 一定值  $K_{Ic}$ 을 갖는다. 疲勞荷重에서의 破壞靱性の 減少는 荷重速度의 增加에 있는것이 아니고 荷重反復에 起因한다.

高張力鋼에서는  $-150^{\circ}\text{C}$ 에서 遷移溫度가 存在하고 遷移溫度以下에서는  $K_{fc}$ 는  $K_{Ic}$ 의 半이다. 5.5% Ni鋼에서도 遷移溫度가 觀察되었으나 顯著하지 않았고 오오스테나이트 不銹鋼에서는 遷移溫度가 나타나지 않았다.

### 3. $K_{fc}$ 決定

破壞制御分野에서 低廉하면서도 迅速한  $K_{fc}$  決定方法이 要求되어왔으며 圓棒의 圓周部에 만들어진 노치部에서는 쉽게 平面스트레인 條件이 이루어지기 때문에 回轉疲勞試驗은 바람직한 方法이다.

굽힘모우멘트  $M$ 을 받는 圓周上에 노치를 갖는 圓棒의 應力擴大係數는 龜裂閉鎖가 없다면 다음과 같이 計算된다.

$$K_I = \sigma_{net} \sqrt{\pi c} / \sqrt{0.8 + 7.12(c/r_1)} \quad (1)$$

여기서  $c$ 는 龜裂깊이,  $r_1$ 는 그림 1에서 表示된 것처럼 ligament의 반지름이며  $\sigma_{net}$ 는 굽힘應力으로  $4M/\pi r_1^3$ 이다.

閉鎖部分을 變數  $\delta$ 로 表示하면 壓縮部分의 龜裂은 完全히 接觸되므로  $\delta$ 는 1이되고  $\delta=0$ 인 경우는 龜裂에서 전혀 接觸이 없다. 中立軸  $n$ 의 位置는 다음과 같다.

$$n = \int y(dA_1 + \delta dA_2) / \int dA_1 + \delta dA_2 \quad (2)$$

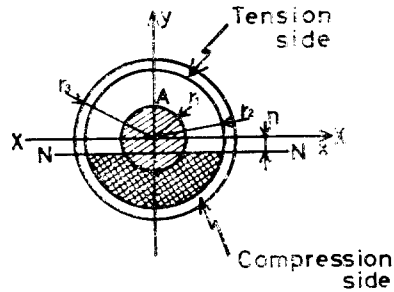


그림 1

$dA_1$ 과  $dA_2$ 는 그림 1에 表示된 微小面積이다. 關聯斷面의 慣性모우멘트  $I$ 는

$$I = \int y^2(dA_1 - \delta dA_2) \quad (3)$$

이고 斷面의 應力은 다음과 같이 計算된다.

$$\sigma_{net} = M(r_1 + n) / I \quad (4)$$

式(4)를 式(1)에 代入하면

$$K_I = \frac{M}{I} (r_1 + n) \sqrt{\pi c} / \sqrt{0.8 + 7.12(c/r_1)} \quad (5)$$

$r_1$ 이 주어지면  $K_I$ 의 計算되고 그림 2에  $\delta$ 의 函數로  $K_I$ 이 表示되어 있다.

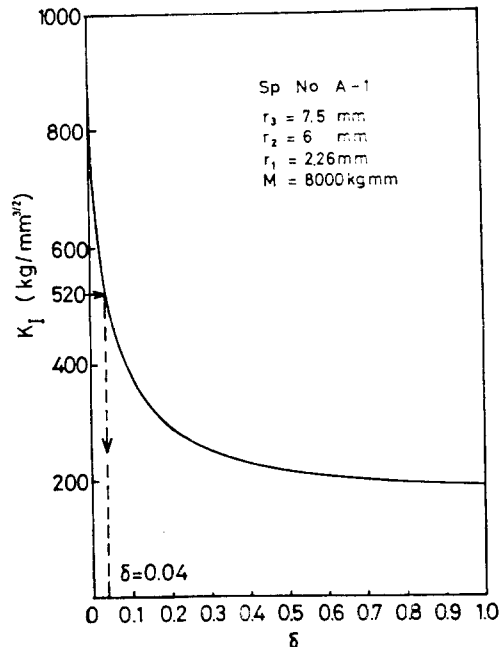


그림 2

더욱 精密한 試驗結果에 의하면  $\delta$ 는  $r_1/r_2$ 의 函數로 表示되고 試片크기에 따라 變하나 溫度나 材料에는 無關하다. 應力擴大係數를 求하는 이 方法은 下限界應力擴大係數  $K_{Ih}$ 에도 適用된다.

#### 4. 應力腐蝕갈라짐에 대한 下限界應力擴大係數

侵攻의 環境에서는 高張力鋼은 降伏強度 以下の 靜荷重에서 應力腐蝕갈라짐에 依한 脆性破壞가 일어난다. SCC는 機械的 化學的反應이고 龜裂先端의 高應力地域에서 發生한다. 重要因子는  $K_{Isc}$ (應力腐蝕갈라짐에 대한 下限界應力擴大係數)이며  $K_{Isc}$ 는 龜裂成長이 없는 環境-材料系에서의 平面스트레인 應力擴大係數이다.

$K_{Isc}$ 의 決定方法은 定荷重에서의 외괄보法和 定變位에서의 WOL法이 있다. SCC의 標準試驗方法이 아직 確立되어있지 않으며 그 理由는 龜裂停止와 龜裂潛伏이 顯著한 影響을 주기 때문이다.

SCC Round-Robin 試驗結果에 대한 推計的 解析에 의하면 初期  $K$ 가 낮고 試驗時間이 길수록  $K_{Isc}$  값은 낮아진다.  $K_{Isc}$  값은 試驗狀態에 依存한다. 外괄보法은 주어진 環境에서 짧은 潛伏期間을 가진 材料의  $K_{Isc}$ 를 決定하는데 合理的이다. 鋼의 경우 降伏強度가 150 ksi 以上에서  $K_{Isc}$ 는 顯著히 떨어진다.

#### 5. 腐蝕疲勞

疲勞龜裂成長速度는 機械化學的 反應의 協同作用에 依해 여러 環境에서 加速된다.

腐蝕疲勞의 加速機構를 檢討하기 위해 腐蝕疲勞龜裂成長速度가 溫度와 周波數에 대한 效果를 測定하기 위해 高張力鋼을 使用하였다. 蒸溜水內에서의 疲勞龜裂成長速度에 대한 代表的인 諸元이 그림 3과 그림 4에 圖示되어 있다. 應力擴大係數幅  $\Delta K$ 의 函數로 蒸溜水에서의 龜裂成長速度는 2個領域으로 區分되고 各領域에서의 龜裂成長速度는 다음과 같다.

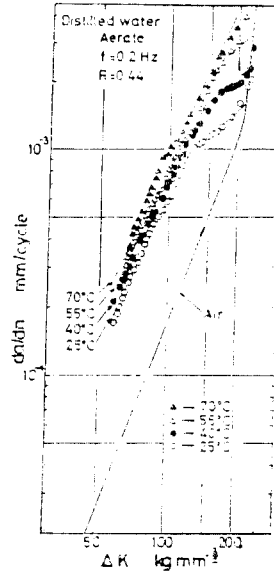


그림 3

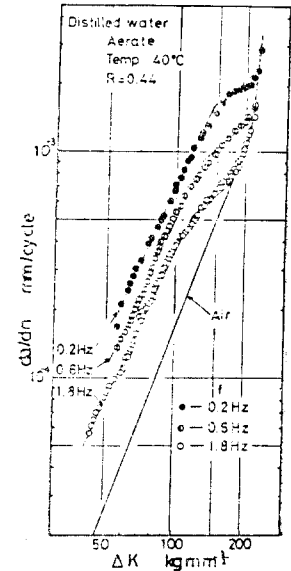


그림 4

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_E = C_E (\Delta K)^{n_E} \quad (6)$$

$C_E$ 와  $n_E$ 는 溫度와 應力周波數에 依存하는 變數이고  $E$ 는 環境을 말한다. 그림 3과 4의 實같은 空氣中에서의 龜裂成長速度이고 다음과 線이 表示된다.

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_{air} = C (\Delta K)^n \quad (7)$$

龜裂先端의 治性表面에 吸收된 水素가 擴散에 依해 鐵格子에 侵透하여 機械的 應力度에 附加되는 內部應力  $\sigma_i$ 가 發生한다면 有效應力擴大係數幅  $K_{eff}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta K_{eff} &= \Delta K \left( \frac{\sigma + \sigma_i}{\sigma} \right) = \Delta K \alpha \\ &= \Delta K (1 + \beta) \end{aligned} \quad (8)$$

式(7)에 式(8)을 代入하면

$$\left(\frac{da}{dN}\right)_E = C (\Delta K_{eff})^n = C \alpha^n (\Delta K)^n \quad (9)$$

$\sigma_i$ 을 計算하기 위해 體心立方格子의 사이에 水素가 格子間原子로 占有된다면 水素의 mol當 行해지는 量은  $(3\mu/2V_{Fe})\bar{V}_H^2$ 이다.  $\mu$ 는 鐵의 體積彈性係數,  $\bar{V}_H$ 는 水素의 mol體積,  $V_{Fe}$ 는 鐵의 mol體積이다.  $N_H$ 原子가 鐵格子속에서 占有되었을 때 行해지는 量은

◆ 解 說

$$U = \frac{3\mu\bar{V}_H^2}{2V_{Fe}} \cdot \frac{N_H}{N_A} = \frac{3\mu\bar{V}_H^2}{2V_{Fe}} \cdot C_H \quad (10)$$

$H_A$ 는 아보가드로數이고  $C_H$ 는 水素濃度이다.  $U$ 는 内部應力  $\sigma_i$ 에 의해 發生된 變形에너지와 같아야 한다. 따라서

$$\frac{\sigma_i^2}{\mu} = \frac{3\mu\bar{V}_H^2}{2V_{Fe}} C_H$$

이때

$$\sigma_i^2 = \frac{3}{2} \mu^2 \frac{\bar{V}_H^2}{V_{Fe}} C_H \quad (11)$$

$\alpha$ 鐵內의 水素의 擴散係數를  $D$ 라 하고 疲勞荷重의 한 사이클 동안의 濃度  $C_H$ 는  $\sqrt{D(1/f)}$ 에 比例하므로

$$\sigma_i^2 \propto \sqrt{D(1/f)} \quad (12)$$

따라서

$$\sigma_i^4 \propto D^2/f \alpha(D_0/f) \exp(-Q/RT) \quad (13)$$

$D_0$ 와  $Q$ 는 擴散常數와 擴散에 대한 活性化에너지를 나타낸다.

内部應力  $\sigma_i$ 는 그림 3과 4의 諸元으로부터 算出되고  $(\sigma_i)^4$ 는  $1/T$ 에 대해 그림 5에 表示된다. 直線의 기울기로부터  $Q=6600$  cal/mol이 얻어진다. 그림 6은  $\sigma_i^2$ 와 周波數  $f$ 에 關係圖示되고 直線의 기울기는  $1/2$ 에 매우 가깝고 式

(12)가 滿足된다.

따라서 주어진 應力에 대해 다음式

$$(\beta\sigma)^4 \alpha(D_0/f) \exp(-Q/RT)$$

이 成立되고

$$\beta = K(1/f)^{1/4} \exp(-Q/4RT) \quad (14)$$

$k$ 는  $\Delta K$ 와  $D_0$ 에 의해 定해지는 常數이다.

加速係數  $m$ 을 다음과 같이 定義하면

$$m = \frac{\left(\frac{da}{dN}\right)_E}{\left(\frac{da}{dN}\right)_{air}} = \alpha^n = (1+\beta)^n \quad (15)$$

式(14)를 式(15)에 代入하면

$$m = [1+k(1/f)^{1/4} \exp(-Q/4RT)]^n \quad (16)$$

$m$ 은 溫度, 周波數 및  $\Delta K$ 에 依存한다. 여러가지 鋼과 環境에 대한 加速係數를 볼것 같으면  $m$ 值는 10을 넘지않고 있다.

腐蝕疲勞의 破壞制御에서 또 하나의 重要因子는 下限界應力擴大係數幅인  $\Delta K_{th}$ 이다. 周波數가 높으면 環境이 龜裂成長速度에 아무런 影響이 없고  $\Delta K_{th}$ 의 正確한 값은 낮은 周波數에서 얻어지므로 長時長이 要求된다. 蒸溜水中에서 構造用 鋼의  $\Delta K_{th}$ 는 室溫空氣中的  $\Delta K_{th}$ 의 約 2倍이다.

疲勞荷重의 경우 應力擴大係數가  $K_{Isc}$ 을 超過하면 SCC가 腐蝕疲勞에 添加되어 龜裂成長速度가 아주 커진다.  $K_{Isc}$ 以上的 腐蝕疲勞에서는 1 mm/min의 크기로 龜裂이 成長한다. 따라서  $K_{Isc}$ 은  $K_{Isc}$ 以上的 腐蝕疲勞에서 重要한 破壞制御因子가 된다.

6. 結 論

構造物에서 龜裂狀缺陷은 荷重이 作用할 때 나타나고 溫和한 環境도 매우 侵攻的이 된다. 破壞의 3段階인 (1)이미 存在하고 있는 缺陷에서 龜裂發生, (2)應力과 環境으로 龜裂成長, (3)最終龜裂成長에서 不安定破斷等 各段階에서의 材料의 破壞制御性質에 대한 知識이 必要하다.  $\Delta K_{th}$ ,  $K_{Isc}$ ,  $da/dN$ ,  $m$ ,  $K_{Ic}$ ,  $K_{Ic}$ ,  $K_{Ia}$ ,  $FTT$  因子들에 대한 계속적인 研究가 要求된다. 따라서 다음과 같은 問題에 대한 보다 廣範圍한 研究가 要求되고 있다.

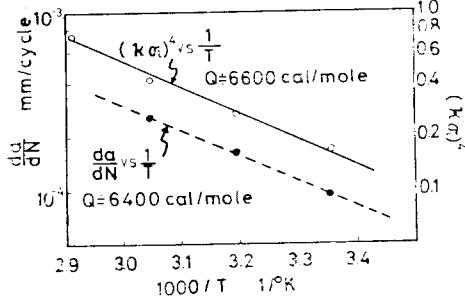


그림 5

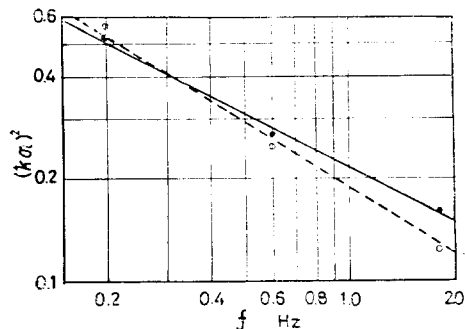


그림 6

- (1)  $\Delta K_{th}$  을 簡便하고 迅速하게 求하는 方法
- (2)  $K_{Isc}$  을 正確히 求하기 위한 迅速한 外挿法
- (3) 環境에 依한 基本的인 龜裂成長加速機構

參 考 文 獻

- (1) S.T. Rolfe and J.M. Barsom; Fracture and Fatigue Control in Structures. Prentice-Hall (1977)
- (2) G. M. Boyed; Fracture V, Edited by H. Liebowitz. Academic Press (1969)
- (3) S. Yukawa, D.T. Timo and A. Rubio; Fracture V, ibid.
- (4) T. Bishop; Metal Progress, May(1955), 79
- (5) J.A. Bennett and H. Mindlin; J. Testing and Evaluation Vol. 1 (1973), 152.
- (6) The Alexander L. Kielland Accident, MIT Sea Grant College Program (1981) June.
- (7) "Standard Method of Test for Plain Strain Fracture Toughness of Metallic Materials" ASTM. E399-74, Part 10, ASTM Annual Standard.
- (8) R.K. Viswanadham and J.D. Venables; Met. Trans. 8A (1977), 187
- (9) 川崎正, 澤木洋三, 中西征二, 横堀武夫; 第22回 材料強度國內總合シンポジウム論文集(1977), 129
- (10) 澤木洋三, 川崎正, 中西征二, 横堀武夫; 日本材料強度學會誌 15(1980), 173
- (11) A.K. Shoemaker and S.T. Rolfe; Engineering Fracture Mechanics 2(1971), 319.
- (12) V.T. Troshchenko, A. V. Prokopenko and V.V. Pokrovsky; Fatigue of Eng. Mat. and Structures, Vol. 1(1979), 247.
- (13) T. Kawasaki, S. Nakanishi, Y. Sawaki, K. Hatanaka and T. Yokobori; Engineering Fracture Mech., 7(1975), 465.
- (14) T. Kawasaki and Y. Sawaki; unpublished data.
- (15) P.K. Ponlose, D.L. Jones and H. Liebowitz; Engineering Fracture Mech., 8(1976), 293.
- (16) Y. Sawaki, N. Aoyama, Y. Abe, T. Ohshima and T. Kawasaki; Proceedings 1982 Joint Conf. Experimental Mech., Hawaii (1982), 555
- (17) D.O. Harris; Trans. ASME. J. of Basic Eng., (1967), 49.
- (18) S.R. Novak and S.T. Rolfe; J. of Materials (1969) No. 3, 4.
- (19) Rept. of SCC Round-Robin Test; Japan Soc. for Promotion of Science, Committee 129(1980).
- (20) M.H. Peterson, B.F. Brown, R.L. Newbegin and R.E. Groover; Corrosion, 23(1967), 142.
- (21) 遠藤吉郎, 駒井謙次郎; 金屬の腐食疲勞と強度設計, 養賢堂(1982)
- (22) Proceedings of Internal Corrosion Conference NACE-2 (1972).
- (23) 川崎正, 澤木洋三, 劉憲一, 堀口正一, 中村均; 第26回 材料研究連合會講演會論文集(1982), 127.
- (24) J. O'M. Bockris, W. Beek, M.A. Genshaw, P.K. Subramanyan and F.S. Williams; Act. Met., 19(1971), 1209
- (25) 神林隆; 東北大學大學院修士論文 (1978).
- (26) J.T. Ryder and J.P. Gallagher; J. Testing and Evaluation, 2(1974), 180.
- (27) J.P. Gallagher; J. of Metals, 6 (1971), 941.
- (28) J.P. Gallagher, J.T. Ryder and J.C. Hadley; International Conf. Mech. Behav. of Materials (Kyoto) Vol. 3 (1972), 328.
- (29) T.W. Crooker and E.A. Lange; Trans. ASME, D-91 (1969) 670.
- (30) 深浦健三, 足立和夫, 泉久司, 川邊秀昭; 第26回 材料研究連合講演會 論文集 (1982), 129.
- (31) J.M. Barsom and S.R. Novak; Rept. National Cooperative Highway Research Program, Washington (1974)
- (32) R.P. Wei and J.D. Landes; Materials Research and Standards, 9(1969) July, 25.
- (33) I.M. Austen and E.F. Walker; Proceedings of Conference on the Influence of Environment on fatigue, London, (1977), 1.