

# 破壞力學의 基礎와

## 破壞制御에 의 應用(II)

劉憲一 · 沢木洋三

<國民大 工大 · 東北大學 工學部>

### 4. 破壞力學의 應用

#### 1. 疲勞龜裂傳播와 設計應力

實際 機械構造物에 의 耐疲勞設計에 對해 破壞力學을 適用하러면 다음과 같은 順序에 따라 行해진다<sup>(8)</sup>.

##### 1) 實驗室的 研究에 의한 基礎데이터

(ㄱ) 實際條件에 맞는 溫度, 荷重速度下에서 의  $K_I$  值

(ㄴ) 實際條件에 맞는 溫度, 環境, 應力反復下에서 疲勞龜裂傳播速度와  $\Delta K$  와의 關係

材料의 破壞는 組成因子에 따라 影響을 받으며 熔接構造에 對해서는 溶着金屬, 熱影響部, 母材등에 對하여 여러가지를 調査할 것.

##### 2) 實際構造物을 想定한 強度計算

(ㄷ) 처음부터 存在한 것으로 보이는 缺陷의 크기, 方向 및 모양

이것은 非破壞檢査로 調査할 수 있다. 例를 들어 어떤 種類의 非破壞檢査(X線, 超音波등)로 缺陷이 보이지 않는 경우에는 檢出感度의 最大值크기의 缺陷이 存在하는 것으로 본다.

(ㄹ) 缺陷部에 作用하는 應力의 解析

(ㅁ) 缺陷部에서의 應力擴大係數의 表示式 具體的인 것으로 다음 例를 들기로 한다<sup>(8)</sup>.

★ 지름 20 in, 두께 1 in 의 壓力容器를 7079-T6 Al로 製作하였다. 이 容器의 內壓는 0~3 Ksia 의 應力反復을 받고 있다. 材料의 降伏應力  $\sigma_s$ ,

는 65 Ksi 이다. 室溫에서의 壽命을 구하라.

(ㄱ) 材料의  $K_I$  值는 室溫에서  $35 \text{ Ksi} \sqrt{\text{in}}$  로 구해졌다.

(ㄴ) 疲勞龜裂傳播速度는 그림과 같이 解析되었다.

(ㄷ) 應力의 最大는 圓周方向에 作用하는 후 우프 應力  $\sigma$  로

$$\sigma = PD/2t$$

$P$ : 內壓,  $D$ : 圓筒의 지름,  $t$ : 두께

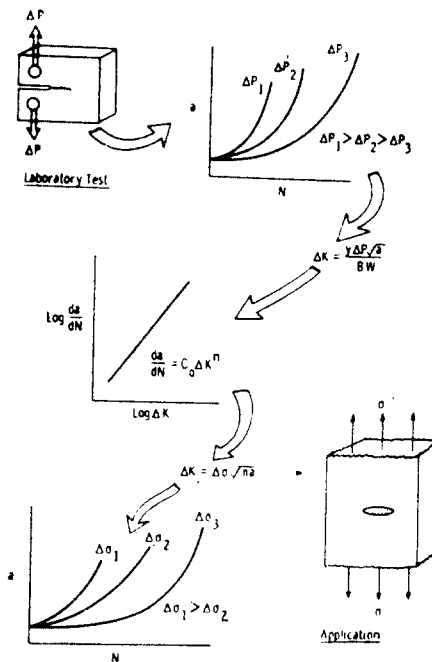


그림 27 耐疲勞破壞設計에 破壞力學을 利用한 圖式解說<sup>(2)</sup>

윗식에  $P=3 \text{ Ksi}$ ,  $D=20 \text{ in}$ ,  $t=1 \text{ in}$  을代入하면  $\sigma=30 \text{ Ksi}$  가 된다.

(ㄷ) 應力擴大係數의 表示式

가장 危險한 形態의 缺陷은 그림(8)과 같은 경우이다.

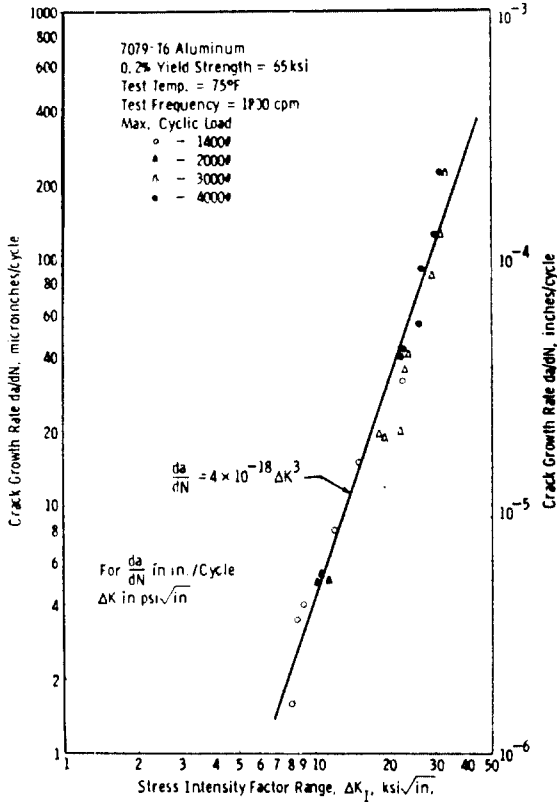


그림 28 7079-T6 Al의 應力擴大係數와 龜裂成長速度와의 關係(8)

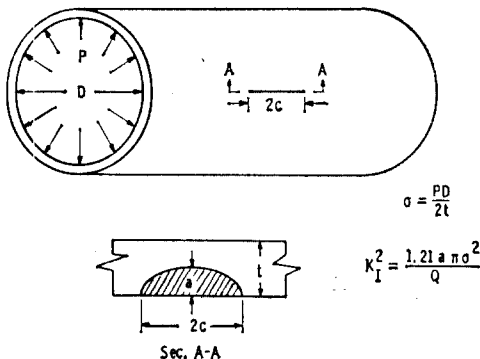


그림 29 例題의 構造物形狀과 欠陷(8)

이 半橢圓表面龜裂의 應力擴大係數는

$$K_1^2 = 1.21 a \pi \sigma^2 / Q \quad (15)$$

$a$ : 龜裂깊이,  $Q$ : 形狀파라미터

形狀파라미터  $Q$ 의 값은 缺陷의 길이  $2c$ , 깊이  $a$  및 負荷應力과 材料의 降伏應力과의 比에 따라 그림 30과 같이 주어진다.

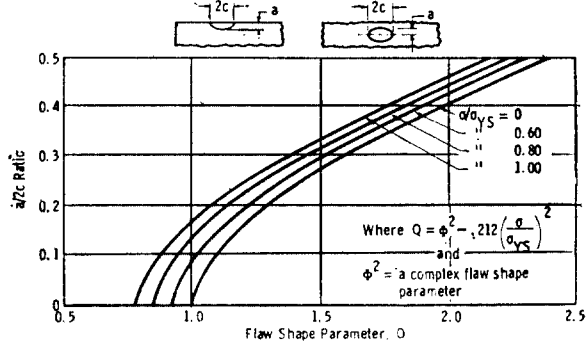


그림 30 {表面 및 内部龜裂에 대한 欠陷의 形狀파라미터曲線(8)}

지금 半橢圓表面龜裂의 表面길이  $2c$ 와 깊이  $a$ 의 比를 4:1로 假定한다.  $a/2c=0.25$  또는  $\sigma/\sigma_y = 30/65 \approx 0.5$  이므로 그림 30 으로부터  $Q$  値는 1.38 이 求해진다.

(ㄹ) 壽命의 計算

먼저 最初의 1 사이클에서 破壞가 일어날 때의 龜裂깊이  $a_{cri}$ 를 求해본다. 이것은 負荷應力  $\sigma$ 일때  $K$  値가  $K_{ic}$ 가 되는  $a$ 로 주어지므로 (15) 式에서

$$a_{cri} = \frac{Q K_{ic}^2}{1.21 \pi \sigma^2} \quad (16)$$

윗식에  $K_{ic}=35 \text{ Ksi} \sqrt{\text{in}}$ ,  $\sigma=30 \text{ Ksi}$ ,  $Q=1.38$  를代入하면  $a_{cri}=0.5 \text{ in}$  가 된다.  $a/2c=0.25$ 로 假定했으므로  $2c=2 \text{ in}$ 가 된다. 즉 表面길이 2in, 깊이 0.5 in의 龜裂이 있으면 이것은 最初의 1 사이클에서 破壞된다.

다음은 任意의 龜裂  $a_i$ 의 경우 破壞될 때까지의 사이클數  $N$ , 즉 壽命을 求해본다. 疲勞龜裂 傳播速度는 그림 28과 같이  $\Delta K$ 에 대해 兩對數紙上에서 直線으로 나타내므로

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta K)^n \quad (17)$$

$C_0$ ,  $n$ 는 材料와 試驗條件에 의한 定數. 또  $\Delta K$ 는 (15)式으로부터

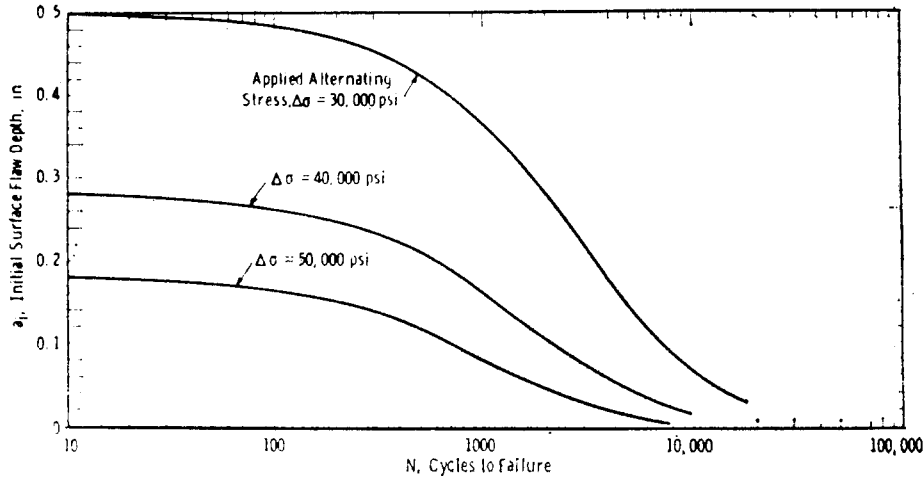


그림 31 例題에 대한 사이클數-壽命<sup>(8)</sup>

$$\Delta K = \Delta \sigma \sqrt{\frac{1.21\pi}{Q} a} = \Delta \sigma \sqrt{M a},$$

$$M = 1.21\pi/Q$$

이므로 (17)식은

$$\frac{da}{dN} = C_0 (\Delta \sigma \sqrt{M a})^n \quad (17)'$$

最初에 存在한 龜裂  $a_i$  가  $a_{cri}$  으로 되면\* 破壞되므로 (17)' 式을  $a_i$  부터  $a_{cri}$  까지 積分하여 壽命  $N$  을 구한다.

$$\int_0^N dN = \int_{a_i}^{a_{cri}} \frac{da}{C_0 (\Delta \sigma \sqrt{M a})^n}$$

$$N = \frac{2}{(n-2)C_0 M^{n/2} \Delta \sigma^n} \left\{ \frac{1}{a_i^{(n-2)/2}} - \frac{1}{a_{cri}^{(n-2)/2}} \right\}, \quad n \neq 2$$

$$N = \frac{1}{C_0 M (\Delta \sigma)^2} \ln \frac{a_{cri}}{a_i}, \quad n = 2 \quad (18)$$

이 경우  $Q=1.38$  에서  $M=2.7$

$$n=3.0$$

$$C_0 = 4 \times 10^{-13}$$

이므로 (18)式으로부터 여러가지  $a_i$  에 대한 壽命이 計算된다.

다음과 같은 事實을 結論지을 수 있다.

\* 嚴密하게 말한다면 疲勞의 最終急速破壞는  $K_c$  值와는 달리 疲勞破壞靱性  $K_{fc}$  值로 規定되므로  $a_{cri}$  는  $K_{fc}$  에 대한 값을 취해야만 되나 여기서 簡單하게  $K_c \approx K_{fc}$  라고 생각하여  $K_c$  에 대한  $a_{cri}$  값을 사용하기로 한다.

첫째 : 만약 非破壞檢査로부터 0.4 in × 0.1 in 의 龜裂이 確認되었다면  $\Delta \sigma = 30,000$  psi 의 曲線과  $a_i = 0.1$  의 交點으로 이 容器의 壽命은 7,000 사이클이 된다.

둘째 : 만약 設計應力에 대해 安全係數를 1.3 라면 最大應力은  $30,000 \times 1.3 = 40,000$  psi 이 되므로 壽命은 2,000 사이클이 된다.

셋째 : 7,000 사이클을 作動의 絕對條件으로 하고 安全係數로 1.3 을 취하면  $\Delta \sigma = 40,000$  psi 와  $N = 7,000$  사이클의 交點으로부터  $a_i = 0.03$  이 된다. 따라서 最初에 存在하는 龜裂은 0.12 × 0.03 in 以下라야만 한다.

## 2. Case study

우리들周邊에 現存하는 機械, 構造物의 대부분은 安全하게 稼動하고 있으며 信賴性이 實證되어 있는 것처럼 보인다. 그러나 작으나마 가끔 發生하는 不意의 破損事故를 보면 設計, 材料, 製造法 및 使用條件에 關係 무언가 知識이 不充分한 것을 볼 수 있다. 이런 破壞例는 實驗室에서 再現시키는 것은 不可能하고 破壞例를 바탕으로 그 事故의 詳細한 解析을 한다는 것은 아주 貴重한 研究分野로 되어 있다.

특히 最近 10年間 急速하게 發展한 破壞力學이 破壞事故에 適用하게 되어 지금은 美國을 中心으로 ccse study 로 알려지게 되었다. 다음은 몇가지 case study 의 例를 들기로 한다.

7) 壓力容器的 case study<sup>(9)</sup>

1965年英國에서 플랜트出荷에 앞서 行해진 靜水壓試驗中 爆發한 암모니아壓力 容器에 대하여 研究한 case study를 紹介한다. 爆發事故의 모양이 그림에 나타나 있다.

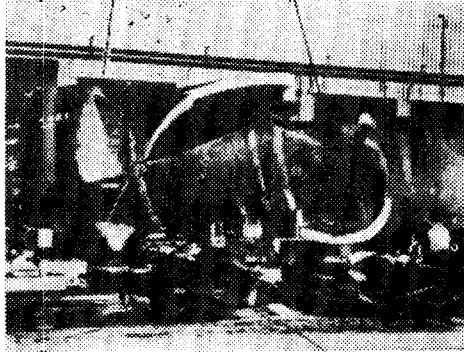


그림 32 破壞된 容器

이 容器는 그림<sup>(9)</sup>에 나타난 바와 같이 壓延鋼板을 지름 1.7m로 꾸부려 加工하여 軸方向에서

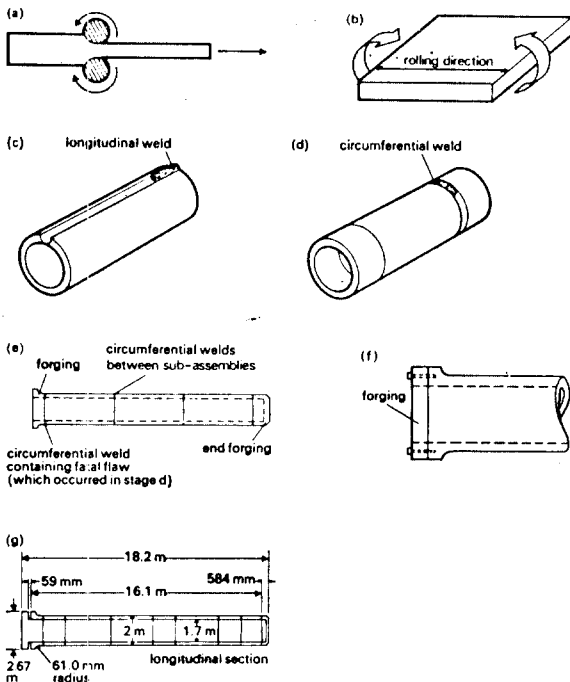


그림 33 容器를 만들기 위한 製作工程<sup>(9)</sup>

- a) 鋼板壓延 b) 鋼板을 適切한 曲率로 굽힘
- c) 굽힌 鋼板을 熔接한 圓筒
- d) 中間組立品으로 熔接한 圓筒
- e) 中間組立品을 熔接
- f) 鐵板을 보울트로 조임 g) 完成된 容器

熔接한 圓筒을 圓周方向으로 熔接하여 길이 16.1m로 하고 鍛造鐵板을 潛派熔接한 것이다.

製作後 650°C에서 6時間의 應力除去어닐링을 했다. 破壞는 內壓이 거의 稼動壓에 도달했을 때 일어났으며 損傷은 軸方向 1/3以內에서 이루어졌기 때문에 이 case study는 다음 세가지點을 目的으로 했다.

- (1) 部品을 바꾸면 補修가 可能한가
- (2) 破壞原因의 究明
- (3) 現在 稼動中인 同種壓力容器的 修正必要性有無

破損된 狀態를 展開圖로 나타내면 아래와 같다.<sup>(9)</sup>

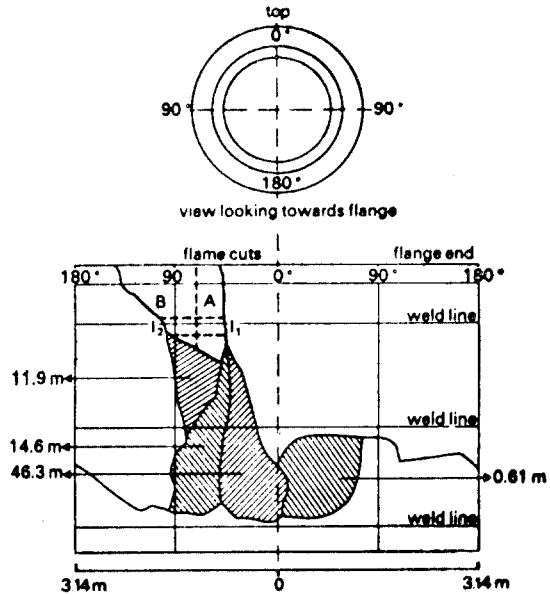


그림 34 容器內의 破壞經路圖: 斜線친 部分의 조각은 表示된 距離까지 날아갔다.

破面을 詳細히 觀察한 結果 破壞의 起點은 윗 그림에서  $I_1$ 으로 表示된 場所 즉 熔接部의 鍛造材側의 熱影響部에 처음부터 存在한 작은 內部龜裂임이 밝혀졌다. 그림 35<sup>(9)</sup>에 나타난 바와 같이 起點이 된 龜裂形狀은 不規則한 모양이지만 計算上 지름 8m의 圓形으로 假定했다.

이 龜裂에 대한 應力擴大係數는 다음과 같이 주어진다.

$$K = \phi \sigma \sqrt{\pi a_{eff}} \quad (4-1)$$

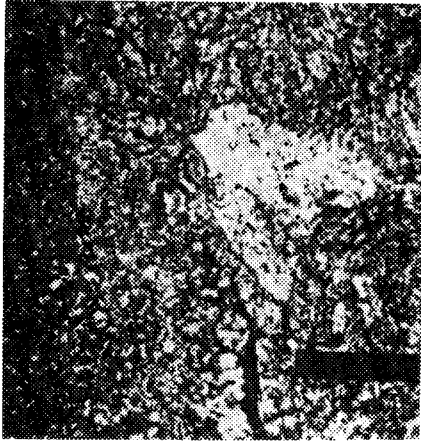


그림 35 起點  $I_1$ 의平坦한 패짓<sup>(9)</sup>

$$\phi = \frac{2}{\pi} \text{(圓形龜裂)}$$

$a_{\text{eff}}$ 는有效龜裂길이로 實際의 龜裂길이  $a$ 에다 龜裂先端에서의 塑性域을 고려하여 다음式으로 표시한다.

$$a_{\text{eff}} = a \left[ 1 + (\pi\sigma/4\sigma_y)^2 \right] \quad (4-2)$$

따라서 (4-1)式에 주어진  $K$ 值가 材料의  $K_{IC}$ 에 도달하면 破壞가 일어난다고 생각되므로 破壞가 일어난 場所의 材料의  $K_{IC}$ 을 測定하면 (4-1)式으로부터 破壞가 일어났을 때의 應力이 計算된다.

$$\sigma = \frac{4\sigma_y}{\pi} \left\{ \left[ 1 + \frac{\pi^3 K_{IC}^2}{16\sigma_y^2 a} \right]^{1/2} - 1 \right\} / 2 \quad (4-3)$$

따라서  $K_{IC}$ 의 測定을 했다.

表 1 破壞力學파라미터值<sup>(9)</sup>

$K_{IC}$	187kg/mm <sup>3/2</sup>
$\phi$	$\frac{2}{\pi}$
$a$	$4 \times 10^{-3}$ m
$\sigma_y$ (鍛造材)	78kg/mm <sup>2</sup>
$\sigma_y$ (母材)	40kg/mm <sup>2</sup>

윗값을 (4-3)式에 代入하면  $\sigma = 68\text{kg/mm}^2$ 가 된다. 壓力容器的 應力으로는 후우프應力과 殘留應力の 합이다.

$$\sigma = PR/t + \sigma_{YB} \quad (4-4)$$

$P$ 는 壓力,  $R$ 은 容器的 반지름,  $t$ 는 鋼板의 두께,  $\sigma_{YB}$ 는 殘留應力으로 이 경우 熔接部의 殘留

應力이 完全히 除去되지 않는 것으로 보고 應力除去어닐링溫度에서 母材의 降伏應力을 취하기로 한다.  $\sigma = 68\text{kg/mm}^2$ 라면 윗式에서 破壞가 일어날 때의 壓力  $P$ 는  $4.6\text{kg/mm}^2$ 가 얻어진다.

이 값은 實際 破壞가 일어날 때의 壓力  $3.6\text{kg/mm}^2$ 과 거의 같은 값이며 熔接部에 存在한 작은 龜裂端의 應力擴大係數가 材料의  $K_{IC}$ 에 같아져서 破壞가 일어난 것으로 본다.

또한 이 種類의 壓力容器材料의  $K_{IC}$ 치고는 너무도 낮은 값이었으므로 破壞部分의 材料에 대한 Sharpy 試驗을 해보았다. 이때 一部는  $650^\circ\text{C}$ 에서 6時間의 어닐링을 다시킨 것과 破壞된 그대로의 材料에 대해 兩者를 比較한 結果가 그림<sup>(9)</sup>에 나타나 있다.

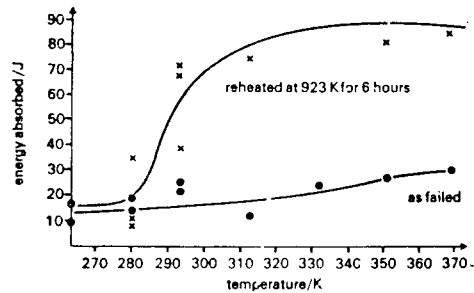


그림 36 破壞된 容器的 熔接金屬에 대한 Sharpy 試驗結果<sup>(9)</sup>

그림에서 알 수 있는 바와 같이 破壞材는  $650^\circ\text{C}$ 로 6時間어닐링을 한것에 비해 靱性이 현저히 떨어지고 이 部分은 所定溫度의 應力除去어닐링을 받지 못했으므로 重大한 損傷을 가져온 것으로 본다.

그렇지만 이 損傷은 容器的 한쪽만이 일어났고 나머지 部分은 損傷을 받지 않음이 확실해져서 部品을 바꾸면서 補修를 했다. 1968年에서부터 實用供給되어 지금도 通常의 稼動狀態에 있다.

#### ㄴ) 橋梁의 case study<sup>(10)</sup>

1967年 美國 West Virginia 洲에 있는 Ohio 江의 Point Pleasant 橋가 12月 15日 氣溫  $0^\circ\text{C}$ 에서 突然 落下하여 46名의 死亡者를 내는 大慘事가 일어났다. 1920年代에 만들어진 大型橋梁의 代表的인 것으로 破壞前의 寫眞은 다음과 같다.

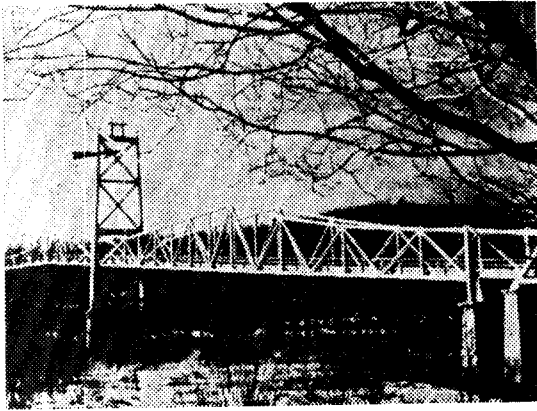


그림 37 Point Pleasant 橋

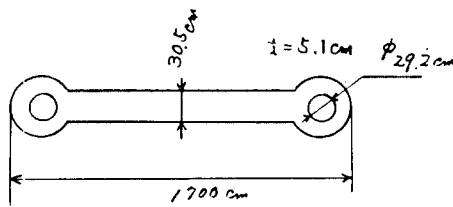


그림 38 Eye-bar.

當時의 Suspension bridge 는 그림 38 과 같은 Eye-bar 를 pin 으로 連結한 連鎖로 懸垂되어 있었다.

이 Eye-bar 의 材料는 SAE 1060 鋼(0.61C, 0.65Mn, 0.03S,  $\sigma_{yp}=60\text{kg/mm}^2$ )로 設計應力은  $31\text{kg/mm}^2$  였다. 위의 寫眞에서 破斷部의 部分의 Eye-bar 가 破壞했다.

破斷된 Eye-bar 의 寫眞<sup>(10)</sup>이 아래에 나타나 있다.

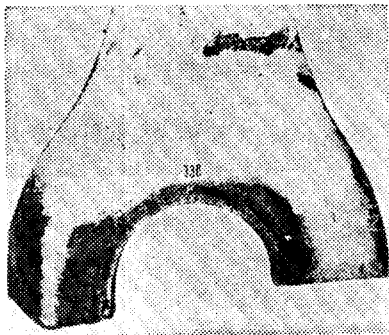


그림 39 破斷된 Eye-bar.

왼쪽은 Shear lip 라 불리는 延性破壞의 흔적이 보인다. 오른쪽은 거의 脆性破壞이다. 따라서 이 部分의 破面을 觀察해본 즉 모퉁이 部分에 龜裂이 있었음을 確認했다. 그림 40<sup>(10)</sup>에 나타난

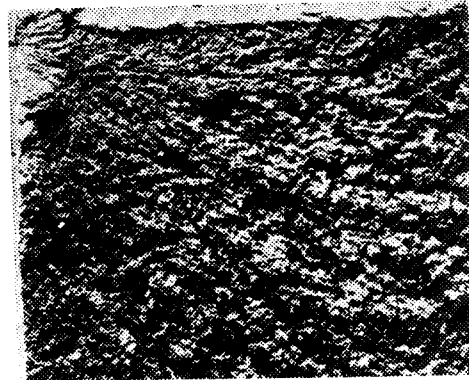


그림 40 破面모퉁이에 있는 부채꼴龜裂<sup>(10)</sup>

바와 같이 그 크기는 길이  $a=3.1\text{mm}$ , 表面에서의 길이  $2c=7.1\text{mm}$  였다.

이같은 부채꼴의 半橢圓龜裂에 대한  $K$  는 다음 式으로 주어진다.

$$K=1.1\sigma\sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

$$Q=\phi^2-0.212\left(\frac{\sigma}{\sigma_{ys}}\right)^2: \text{缺陷形狀係數}$$

여기서 設計應力  $35\text{kg/mm}^2$  의 負荷應力下에서  $K$  值를 計算해 본다.  $a/2c=3.05/7.11=0.429^*$ , 또  $0^\circ\text{C}$  에서 降伏應力은 不明하므로 室溫에서 값  $57\text{kg/mm}^2$  을 취하면  $\sigma/\sigma_{ys}=35/57=0.614$  로부터  $Q=2.06$  이 되므로

$$K=1.1\times 35\sqrt{\frac{\pi\times 3.05}{2.06}}=83.03\text{kgmm}^{-3/2}$$

한편  $0^\circ\text{C}$  에서의  $K_{Ic}$  을 測定한 즉  $K_{Ic}=153\text{kgmm}^{-3/2}$  가 얻어졌다. 위 式에서 計算된  $K$  值는 實測된  $K_{Ic}$  보다 작으나 Eye 部分에서는 應力集中이 있으므로 實際로는 設計應力보다 높은 값이 걸렸으리라고 생각된다. 가령 應力集中으로 말미암아  $\sigma$  가  $\sigma_{ys}$  에 도달되어 있었다면  $Q=1.93$  으로부터

$$K=1.1\times 57\sqrt{\frac{\pi\times 3.05}{1.93}}=139.7\text{kgmm}^{-3/2}$$

이 되어  $K_{Ic}$  에 가까운 값이 된다.

또 龜裂은  $7.11\times 3.05\text{mm}$  의 것이 單獨이 아니고 그 바로 아래에도 이것보다 약간 작은 龜

\* 이 경우  $\phi$  의 값  $\phi=\int_0^{\pi/2}\left(1-\frac{c^2-a^2}{c^2}\sin^2\phi\right)^{1/2}d\phi$  는 1.463 이된다.

열이 있었다. 만약에  $a/2c=3.05/14=0.22$  라면  $\phi=1.172$ 로부터  $Q=1.37-0.212(35/57)^2=1.29$ 가 된다.

$$K=1.1 \times 35 \sqrt{\frac{\pi \times 3.05}{1.29}} = 104.9 \text{ kgmm}^{-3/2}$$

또  $\sigma=\sigma_{ys}$  이면  $Q=1.37-0.212=1.16$  이므로

$$K=1.1 \times 57 \sqrt{\frac{\pi \times 3.05}{1.16}} = 180.2 \text{ kgmm}^{-3/2}$$

ㄷ) 船體의 case study

美國의 戰時標準船 T-2 tanker 의 하나는 Boston 港에서 繫船中 突然 破壞됐다.

事故當時의 氣溫은 約 35°F 로 特別한 衝擊을 받지 않았다. 이 破壞의 起點은 甲板에 熔接된 choke 의 隅肉熔接止端部로부터 일어났다.

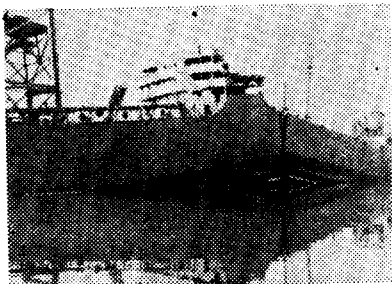


그림 41 船舶의 脆性破壞<sup>(11)</sup>

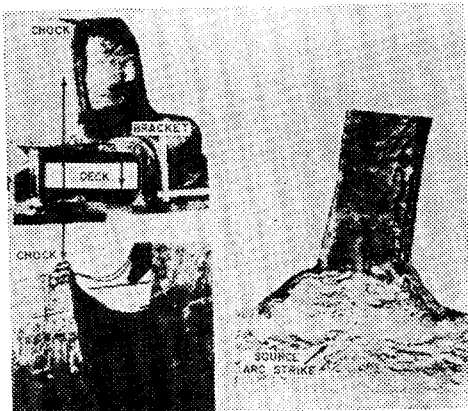


그림 42 T-2 tanker 의 破壞. 破壞起點은 오른쪽 밑에 그림에 나타나 있는 甲板에 위치한 arc strike 였다<sup>(12)</sup>.

이 部分을 詳細히 調査한 結果 止端部近傍의 arc strike 部에 3.2×6.4mm 程度의 龜裂이 發生된 것이 확실해졌다.

따라서  $2c=6.4\text{mm}$ ,  $a=1.6\text{mm}$  의 半橢圓龜裂에 대한 應力擴大係數를 計算해 본다. 船體에

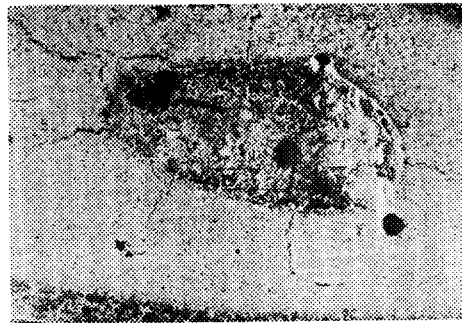


그림 43 Arc strike 와 關係가 있는 1/8~1/4in 의 龜裂. NDT 溫度보다 낮은 溫度에서 높은 殘留應力場속이던 破壞를 일으키기에 充分한 작은 缺陷이 이 例題에서는 強調되고 있다.<sup>(12)</sup>

걸리는 應力레벨은 正確하지는 不明이지만 繫船時 甲板에는 約 8.5kg/mm<sup>2</sup> 程度의 應力이 作用한 것으로 보인다.

$$K=1.1\sigma\sqrt{\frac{\pi a}{Q}}$$

에서  $a/2c=0.25$ ,  $\sigma/\sigma_{yp}=8.5/21=0.4$ 로부터  $Q=1.25$

$$K=1.1 \times 8.5 \times \sqrt{\frac{\pi \times 1.6}{1.25}} = 18.8 \text{ kgmm}^{-3/2}$$

材料의  $K_{Ic}$ 는 不明하나 破片에서 취해진 Sharpy 試驗結果 35°F에서의 衝擊에너지  $C_v$ 는 8.5ft-lb 였다. 이것으로부터  $K_{Ic}$ 을 推定하는 式( $K_{Ic}=\sqrt{5C_v E}$ )으로부터  $K_{Ic}=34.6\text{Ksi} \sqrt{\text{in}}=122\text{kgmm}^{-3/2}$ 가 된다. 그러므로 몇개의 龜裂이 連結되거나 熔接部에서의  $K_{Ic}$ 가 局部的으로 低下한 것이 破壞의 原因이었다고 推定된다.

3. Case study로부터 본 設計應力

航空機, 熔接 및 架構物, 壓力容器 및 回轉體, 船舶 및 材料등에 대한 case study 의 資料集이 最近 AMMRC(Army Materials and Mechanics Research Center)에서 “Case studies in fracture mechanics”라 하여 整理되었다.<sup>(9)</sup>

Rich 와 Rosenfield<sup>(13)</sup>는 이 資料들을 바탕으로 設計應力에 대한 檢討를 했다. 이것은 英國의 CEGB(Central Electricity Generating Board)에서 提案된 破壞線圖法(fracture envelope approach)을 이용한 것으로 COD 크라이테리언을

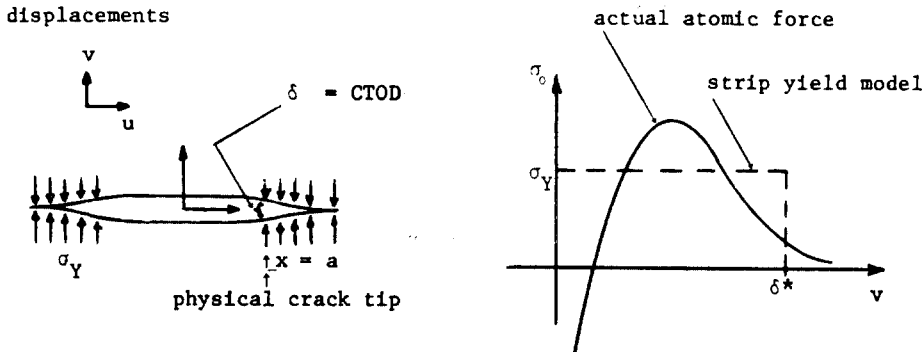


그림 44 Strip yield model<sup>(13)</sup>.

採用하고 있다.

龜裂端의 限界 COD, CTOD= $\delta_c$ 는 平面스트레인 및 平面應力下에서의 strip yield model로부터 推定된다. 中央龜裂을 가진 板材에 應力  $\sigma$ 를 걸었을 때 COD는 다음式으로 주어진다.

$$\delta = \left( \frac{8\sigma_y a}{\pi E} \right) \alpha \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right) \right\}$$

여기서  $\alpha=1$  平面應力

$\alpha=1-\nu^2$  平面스트레인

( $\nu$ : 프와송比)

한편 그림에 나타난 strip yield model에 의하면 龜裂端의  $\delta$ 의 限界值  $\delta_c$ 와 龜裂生成에너지  $2\gamma_s$  사이에는 다음과 같은 關係式이 유도된다\*.

$$2\gamma_s = \int_0^{\infty} \sigma_0 dV \simeq \sigma_y \delta_c$$

線型破壞力學에 의하면 mode I에 대한 龜裂生成에너지  $2\gamma_s$ 는 다음式처럼 표시된다.

$$2\gamma_s = \frac{\alpha}{E} K_{Ic}^2$$

따라서 龜裂端에서의 龜裂生成에너지가 龜裂近傍에서의 延性程度에 依存하지 않는다면

$$2\gamma_s = 2\gamma_s$$

이 成立되고

$$\sigma_y \delta_c = \frac{\alpha}{E} K_{Ic}^2$$

$$(8\sigma_y^2 a / \pi E) \alpha \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \alpha}{2\sigma_y} \right) \right\} = \left( \frac{\alpha}{E} \right) K_{Ic}^2$$

$$\therefore K_{Ic} = \sigma_y \sqrt{a} \left[ \frac{8}{\pi} \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \alpha}{2\sigma_y} \right) \right\} \right]^{1/2}$$

\* 그러나  $\delta_c$ 는 原子의 尺度에 비해 큰값이며 또 原子結合力的 分布範圍는 그림에 나타난 曲線을 따라 變化하므로 이式과 같은 置換은 妥當치 않다 (黃堀, 川崎, 澤木: 機械の研究, 31 (1979), 899)

한편 中央龜裂을 갖는 無限板에서는 平面應力으로부터 平面스트레인의 範圍에 대해

$$K_I = \sigma \sqrt{\pi a}$$

로 표시되므로 위 2式으로부터

$$K_I / K_{Ic} = (\sigma / \sigma_y) \left[ \left( \frac{8}{\pi^2} \right) \ln \left\{ \sec \left( \frac{\pi \sigma}{2\sigma_y} \right) \right\} \right]^{-1/2}$$

가 얻어진다.

$K_I / K_{Ic}$ 와  $\sigma / \sigma_y$ 의 關係를 윗式으로 나타내면 線型彈性  $K_I = K_{Ic}$ 부터 延性破壞까지 걸치는 線圖가 얻어진다. 그림44<sup>(13)</sup>에다 이 式과 21가지例의 case study의 結果를 합쳐서 나타낸다.

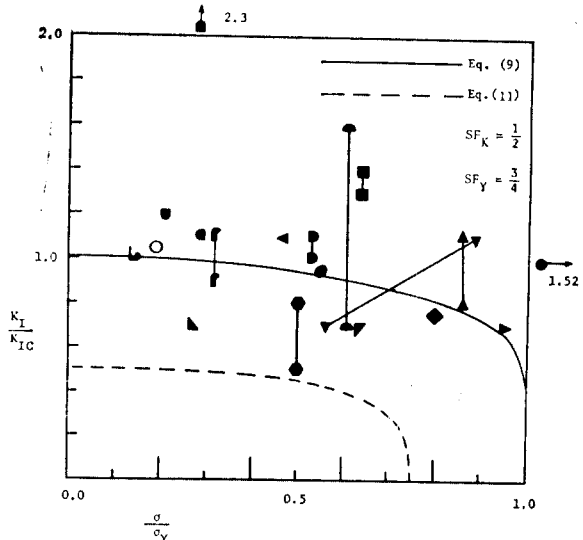


그림 45 Case study 例와 破壞線의 比較<sup>(13)</sup>

그림 45에 나타난 바와 같이 case study의 結果는 理論的으로 유도된 曲線의 주위에 位置하므로 이 式이 거의 妥當한 것처럼 보인다. 그러나 實驗點은 이 曲線보다 밑쪽에 位置한 경우도 相



當히 있으므로 이것만으로 21 가지 破壞 모두를 防止할 수는 없다.

그래서 먼저 이 實驗點들의 下限을 지나는 曲線을 구한다. 理論式에 대한 近似式을 구해보면 다음과 같다.

$$(K_I/K_{IC})^3 + (\sigma/\sigma_y)^3 = 1$$

윗 式에다 降伏應力 및 韌性値에 대한 安全係數  $SF_y$ ,  $SF_k$ 를 곱하면

$$(K_I/SF_k K_{IC})^3 + (\sigma/SF_y \sigma_y)^3 = 1$$

이 된다. 그림에서 破壞線은  $SF_k=1/2$ ,  $SF_y=3/4$ 으로 했을 때 구해진 曲線이다. 이와 같은 높은 安全係數값을 사용한 윗 式은 現時點에서 는 단지 實驗點의 下限値를 나타내는데 지나지 않는다.

이 原因으로서 case study의 結果에 대해 다음과 같이 생각할 수 있다.

1) 解析精度

$K$ 의 解析에 대해 複雜한 實際의 缺陷形狀을 單純化하는 일과 作用應力의 推定에 대한 正確

2) 實驗技術

$K_{IC}$ 에 關한 實驗方法에서 오는 測定値차이 反復荷重下에서 限界  $K$  值(疲勞破壞韌性)  $K_{fc}$ 와 靜的  $K_{IC}$ 의 차이<sup>(14)</sup>

이런 點들이 解決되는 경우 case study에 의한 實驗點과 理論値의 차이가 減少되고  $SF_k$  및  $SF_y$ 의 安全係數가 보다 實際的인 것이 되고 破壞力學的 見地에서 設計應力의 選定法이 確立될 것으로 期待된다.

5. 結 論

構造物의 事故解析과 安全設計에 대한 破壞力學的 應用에 關해 概說했다. 今後 破壞力學的 概念을 고려한 새로운 設計曲線의 開發과 大型 構造物 破壞制御管理法의 開發이 安全設計에 대한 重要課題의 하나라고 생각한다.

參 考 文 獻

- (9) T.P. Rich and D.J. Cartwright: "Case Studies in Fracture Mechanics," (1977), A.M.M.R.C.
- (10) J.A. Bennett and H. Mindlin : J. Test and Evaluation, (1973), 152.
- (11) E.R. Parker : "Brittle Behavior of Eng. Structures" John Willey & Sons., (1957).
- (12) W.S. Pellini and P.P. Puzak : NRL Report 5920 Fracture Analysis Diagram Procedures for the Fracture-Safe Engineering Design of Steel Structures" (1963), U.S. Naval Res. Labo.
- (13) N. Perrone, H. Liebowitz, D. Mulville and W. Pilkey, ed. : "Fracture Mechanics" (1978), Univ. Press of Virginia, 943.
- (14) T. Kawasaki, S. Nakanishi, Y. Sawaki, K. Hatanaka and T. Yokobori : Eng. Fract Mech., 7(1975) 465.

