

# 破壞力學의 基礎와 破壞制御에의 應用 (I)

劉憲一 · 沢木洋三

〈國民大 工大 · 東北大學 工學部〉

## 1. 序 論

金屬材料的 破壞에 대해 옛부터 많은 研究가 행해져 왔다. 그러나 實際의 構造部材에 따라서는 그 破壞가 순간적으로 생기는 경우가 많아서 그 機構를 實驗적으로 파악한다는 것은 어렵다. 그러나 最近 電子顯微鏡의 進歩로 破壞面을 觀察하는 일이 쉬워지고 破壞過程이나 그 微視機構가 더욱 忠實히 밝혀지므로서 electronmicro-fractography라 불리는 學問體系가 形成되기에 이르렀다.

또한 20 數年사이에 비약적인 발전을 한 破壞力學은 龜裂進展에 대한 抵抗이 材料固有의 값으로 표시될 수 없을가 하는 생각에서 體系化되어 fractography가 定性的인 情報를 주고 破壞와 壽命의 豫想은 破壞力學을 基礎로 定量的으로 取扱하게 되었다.

따라서 本 解說에서는 金屬材料的 破壞와 fractography에 대해 說明하고, 破壞力學의 基礎의 概念에 관해서 解說하고, 最後로 하나의 應用으로 破壞事故의 事故例解析(case study)에 대한 概說을 하기로 한다.

## 2. 金屬材料的 破壞와 Fractography

金屬材料的 破壞를 外的條件으로 靜的破壞 및 動的破壞로 大別하며 各各의 特徵과 그 fractog-

raphy를 표시한다.

### 1. 靜的破壞

#### 가) 延性破壞

延性材料를 引張했을 때 破斷까지의 荷重-伸長量曲線을 나타내면 그림 1(a)와 같다. 彈性變形에서는 荷重을 없애면 완전히 원래의 狀態로 되돌아가나 塑性變形을 하면 荷重을 없애도 원래의 狀態로 되돌아가지 않는다. 塑性變形의 代表的인 機構로서 그림 1(b)에 나타난 것과 같이 金屬結晶格子의 特定面의 미끄럼을 들 수 있다.

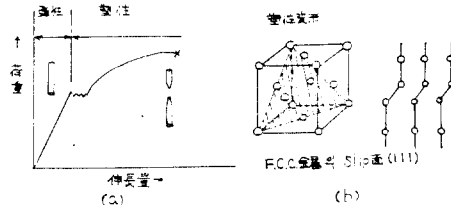


그림 1(a) 延性材料的 荷重-伸長量曲線  
(b) FCC金屬의 Slip面

이와같이 變形이 相當히 생기고 난후(塑性變形) 破壞하는 것을 延性破壞라 한다. 그 微視機構는 그림 2(a)에 표시한 바와 같이 微少空洞의 合體로 되는 粒內破壞이다.

또한 fractography는 그림 2(b)<sup>(1)</sup>에 나타난 바와 같이 等軸의 dimple pattern으로 되어 있다.

이 dimple pattern은 荷重을 거는 방법에 따라 달라지며 예를 들면 그림 3(a)<sup>(1)</sup>와 같이 剪

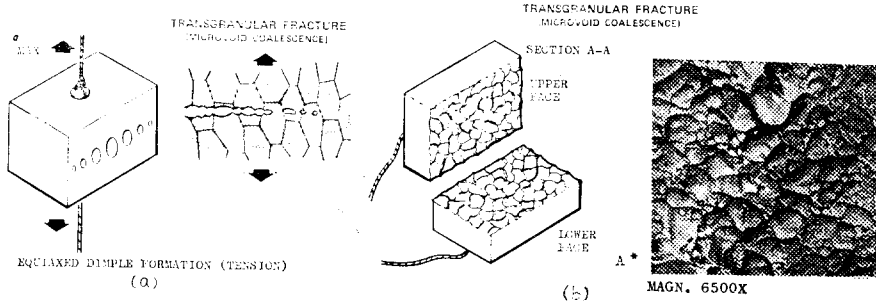


그림 2(a) 引張時 微少空洞에 의한 粒內破壞 (b) 粒內破壞

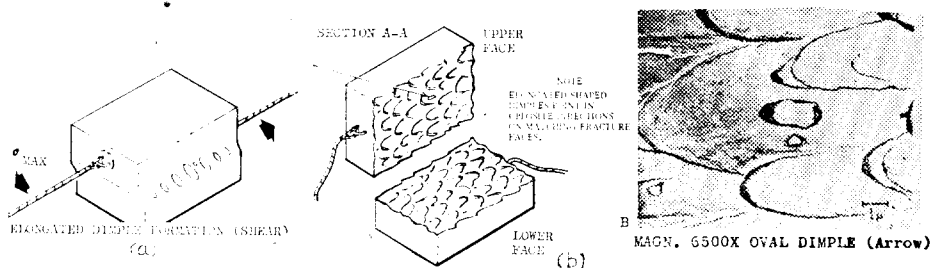


그림 3 剪斷에 의한 破壞

斷荷重의 경우 dimple 은 그림 3(b)와 같이 길게 늘어난 모양이 되며 破面의 上下는 그 方向이 逆으로 된다.

또 같은 引張이라도 그림 4(a)<sup>(1)</sup>처럼 試片의 端面가까이에서 荷重이 걸리는 경우 fractography는 그림 4(b)<sup>(1)</sup>처럼 길게 늘어난 dimple이

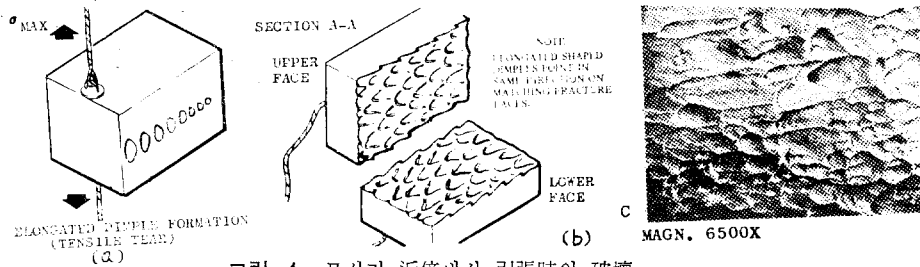


그림 4 모서리 近傍에서 引張時의 破壞

되나 對應되는 上下의 破面은 그 方向이 같다.

ㄱ) 脆性破壞

脆性材의 荷重-伸長量曲線은 그림 5와 같다

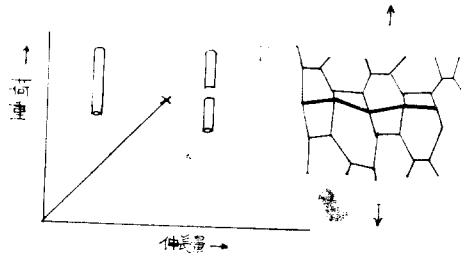


그림 5 脆性材料의 荷重-伸長量曲線

이 경우 破壞에 앞서 생기는 塑性變形은 거의 볼 수 없다. 微視的으로는 延性破壞와 마찬가지로 粒內破壞이지만 그림 6에 나타난 바와 같이 原子의 配列에 따라 정해지는 特定의 劈開面에서 原子가 分離하므로 結晶粒마다 方向이 조금씩 다른 facet라 불리우는 平坦한 破面이 된다.

實際로는 同一結晶粒內에서도 單一劈開面으로 破斷하는 경우는 드물고 平行한 몇개의 劈開面으로 생기기 때문에 劈開面의 境界에는 段이 생긴다(cleavage step). 그림 7<sup>(1)</sup>과 같이 破壞의

破壊力學의 基礎와 破壞制御에의 應用 (I) ㉔



그림 6 BCC 金屬의 劈開面

進行方向에 따라 작은 段들이 合流하여 큰 段이 이루어진다. 이것은 河川의 支流, 本流의 모양과 유사하므로 river pattern라 한다. 하나의 結晶粒에서 다음 結晶粒으로 破壞가 進行할 때 結晶粒마다 原子의 配列이 다르므로 이 river pattern도 약간 다른 모양을 갖게 된다. 예를 들면 그림 7과 같이 여러 原子面의 角度가 다른 粒界에서는 river pattern이 대략 連續된 것

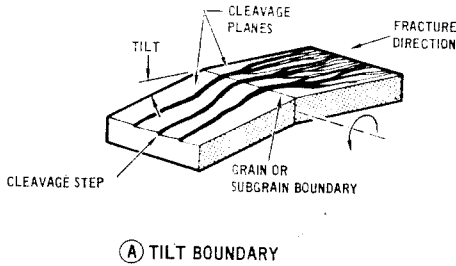


그림 7 亞結晶粒子和 粒界의 影響을 나타낸 劈開 破壞



그림 8 劈開破壞 (A) 劈開段, (B) river pattern, (C) Tilt 粒界, (D) Twist 粒界, 가는 화살은 破壞方向을 나타냄<sup>(1)</sup>

로 나타나지만(그림 8:C) 그림 9와 같이 原子面이 비틀린 粒界에서는 連續된 것으로는 나타나지 않는다(그림 8:D).

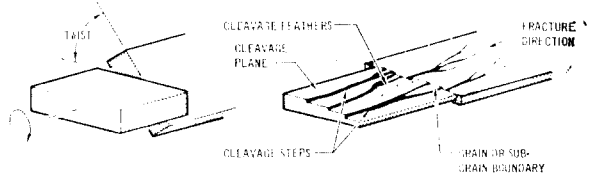
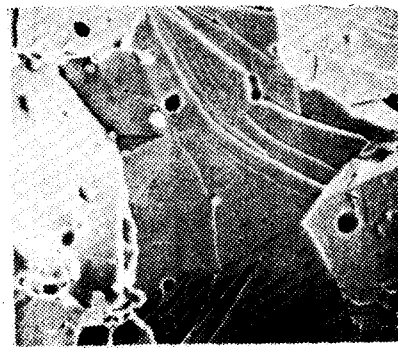


그림 9 Twist 粒界



S11611 SEM 1000X

그림 10 劈開破壞時 굵은 화살이 twist 粒界를 나타내고 가는 화살은 破壞方向을 나타냄<sup>(1)</sup>

또 그림 11과 같이 劈開段사이에 가는 것 털 모양이 보인다. 이것을 cleavage feather라 한다.



E5460 TEM 9300X

그림 11 Cleavage feather. 화살은 破壞始發點을 나타냄<sup>(1)</sup>

이것 외에 脆性破壞의 特徵으로 그림 12와 같이 tongue이 있다.

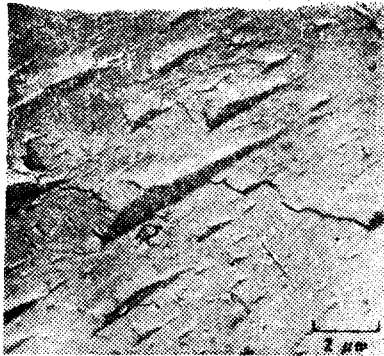


그림 12 회살은劈開破壞로 생긴 tongue 을 나타냄<sup>(1)</sup>

2. 動的破壞

가) 疲勞破壞

2.1에서 表示한 靜的破壞를 이끄는 荷重보다 낮은 荷重이라도 이것을 負荷, 除荷하면서 반복하면 그림 13 처럼 어떤 定해진 사이클數에서 破壞가 일어난다. 이것을 疲勞破壞라 한다.

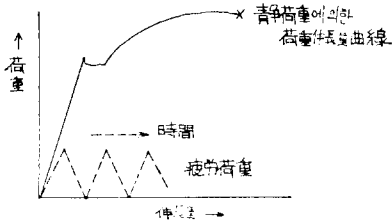


그림 13 疲勞荷重사이클

이경우 fractography 의 特徵으로 그림 14 와 같은 striation 을 들 수 있다.

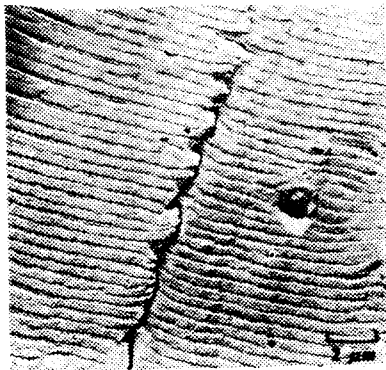


그림 14 龜裂傳播時 形成되는 疲勞 striation.<sup>(1)</sup>

Striation 의 形成은 그림 15 에 模式的으로 나타낸 것처럼 荷重의 負荷사이클때의 開口, 除荷사이클때의 龜裂의 閉口와 關連이 있다.

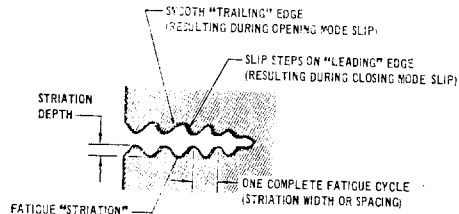


그림 15 疲勞 striation 의 模式圖<sup>(1)</sup>

龜裂先端에서는 幾何學的不連續때문에 밖에서 가해진 應力보다 應力集中으로 말미암아 훨씬 높은 應力狀態가 이루어진다. 따라서 龜裂先端에서는 塑性變形이 생기는 領域이 있다(塑性域). 이 塑性變形의 程度는 材料에 따라 다르므로 striation 의 形態도 材料에 따라 다르고 延性材인 경우 延性 striation(그림 16(a)) 또 脆性材인 경우 脆性 striation(그림 16(b))라 불리우는 形態를 나타낸다.

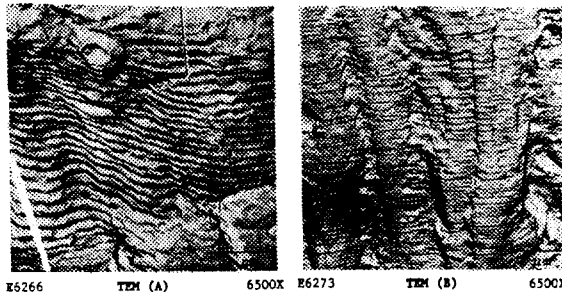


그림 16 (a) 室溫에서 形成된 延性 striation<sup>(1)</sup>  
(b) 어닐링된 302 스테인레스鋼의 800°F(427°C)에서 形成된 脆性 striation 회살은 龜裂傳播方向을 나타냄<sup>(1)</sup>

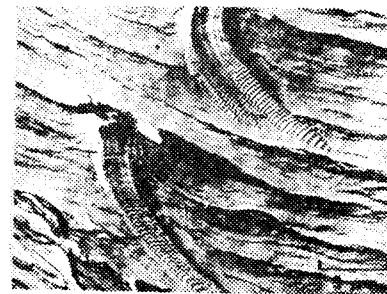


그림 17 疲勞破壞面의 tire track<sup>(1)</sup>.

破壞力學의 基礎와 破壞制御에의 應用 (I) ◎

또 疲勞破壞의 特有한 形態로 tire track 이 있다.

3. 環境에 依한 破壞

ㄱ) 遲延破壞

一定한 靜的引張荷重을 負荷했을 때 그 순간에는 破壞하지 않으나 어느 時間이 지나면 突然 破壞하는 경우가 있는데 이것을 遲延破壞(delayed fracture)라 한다.

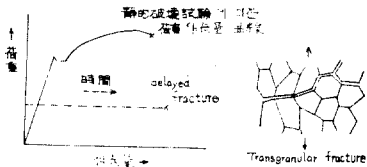


그림 18 遲延破壞

高強度鋼이 水素雰圍氣中이거나 鋼이 水素에 의해 일어나는 水素脆化와 腐蝕性環境中에서 일어나는 應力腐蝕갈라짐(stress corrosion cracking)이었다. 이것의 fractography의 特徵은 粒界갈라짐이다.



E17731 TEM 2200X

그림 19 應力腐蝕갈라짐<sup>(2)</sup>

3. 破壞力學의 理論

1. 破壞力學의 基本概念

構造部材에는 溶接缺陷, 非金屬介在物 등과 같은 潛在的 龜裂이 存在하거나 使用中疲勞에 의한 龜裂이 發生하는 일이 있다. 이런 龜裂이

다음의 點檢, 補修의 機會까지 現저히 進展하지 않으면 部材의 安全은 確保되었다고 생각할 수 있다. (이런 設計思想이 fail-safe 設計라 한다.)

따라서 龜裂進展에 대한 抵抗이 材料固有의 값으로 나타낼 수 있거나 또 最終急速破壞를 이룰 때의 限界龜裂길이 計算에 의해 구할 수 있다면 安全設計面에서 信賴性이 높은 設計를 할 수 있다. 이런 생각에서 破壞力學이라는 概念이 생겨났다.

ㄱ) Griffith의 理論<sup>(2)</sup>

中央에 길이  $2c$ 의 龜裂을 가진 平板彈性體에 負荷應力  $\sigma$ 를 인 狀態에서 兩端을 剛性的으로 支持하여 變位를 一定하게 유지한다. 이런 狀態에서 龜裂이 傳播하는 條件을 求해 본다.

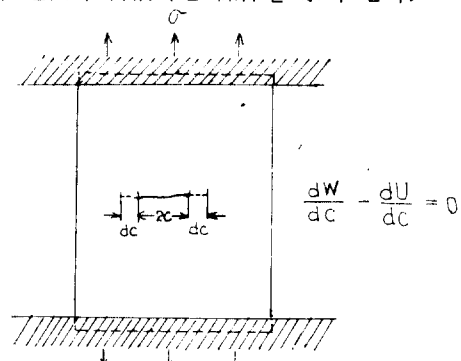


그림 20 兩端은 剛性的인 支持를 한 龜裂을 가진 平板彈性體

지금  $\sigma$ 의 應力이 걸려 變位  $\epsilon$ 가 생겨 이 平板에는 彈性變形에너지가 저장된다. 이 彈性變形에너지를 消費하므로써(解放한다) 龜裂이  $dc$ 만큼 進展하였다고 하자 이런 狀態에서 새로운 表面이 形成되고 그만큼의 表面에너지가 增加하게 된다. 따라서 龜裂이 一定應力  $\sigma$ 下에서 傳播가 開始하는 경우에는 彈性變形에너지의 減少量(解放量)  $dU$ 와 表面에너지의 增加量  $dW$ 가 平衡되어야 한다. 그러므로 破壞의 에너지條件은 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{dW}{dc} - \frac{dU}{dc} = 0 \quad (1)$$

表面에너지는 龜裂이 左右로  $dc$ 씩 擴大된다면  $4dc$ 의 새로운 龜裂面이 만들어지므로 單位

◎ 解 說

面積當의 材料固有의 表面에너지를  $\gamma_s$  라면

$$dW = 4\gamma_s dc \quad (2)$$

한편 彈性變形에너지의 解放量  $dU$  는 다음과 같이 생각한다. 平板은 彈性體이므로 應力과 變形率의 關係는 그림 21에 나타난 바와 같이 原點을 지나는 直線으로 表示된다. (Hooke's law)

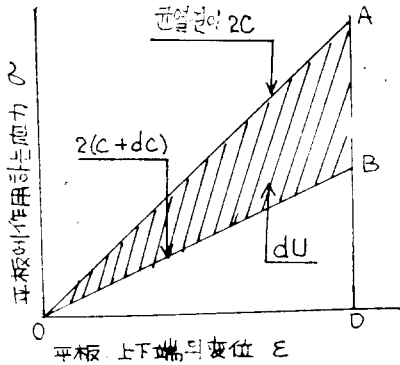


그림 21 彈性變形에너지의 變化

龜裂길이  $2c$ 의 平板에 應力  $\sigma$ 를 걸어 變位가  $D$ 에 도달했을 때 兩端을 固定하였다면 이 平板에 저장된 彈性變形에너지  $U_{2c}$ 는

$$U_{2c} = \int_0^D \sigma d\epsilon = \Delta OAD$$

이다.

龜裂길이 가 긴 試片일수록 一定荷重下에서의 伸長量은 크므로(板幅은 같다) 길이가  $2(c+dc)$ 의 龜裂을 가진 試片쪽이  $2c$ 의 龜裂을 가진 試片보다 變形量이 커서 變形하기 쉽다. 따라서 이때의  $\sigma$ - $\epsilon$  直線은  $OA$ 보다 밑의  $OB$ 로 表示된다. 따라서 龜裂이 左右로  $dc$ 만큼 擴大된 狀態의 平板에 저장되는 彈性變形에너지  $U_{2(c+dc)}$ 는

$$U_{2(c+dc)} = \int_0^D \sigma d\epsilon = \Delta OBD$$

이다. 그러므로 龜裂擴大에 따라 試片에 저장되는 에너지는  $\Delta OAB$ 만큼 減少된다. 이 에너지가  $dU$ 로 彈性變形에너지의 解放量이다.

이 彈性變形에너지는 彈性論에 의한 計算을 하면

$$U = \sigma^2 \pi c^2 / E$$

$E$ : 縱彈性係數

이며

$$\frac{dU}{dc} = 2\sigma^2 \pi c / E \quad (3)$$

에 따라 (1) 式은

$$2\gamma_s - \frac{\sigma^2 \pi c}{E} = 0 \quad (4)$$

이 되므로 破壞強度  $\sigma$ 는

$$\sigma = \sqrt{(2E\gamma_s) / \pi c} \quad (5)$$

으로 表示된다. 三次元的 龜裂, 例를 들면 반지름  $c$ 인 圓板狀 龜裂(penny shaped crack)에서는

$$\sigma = \sqrt{(2E\gamma_s) / \pi(1-\nu^2)c} \quad (6)$$

이 된다.

이상은 龜裂을 가진 彈性體의 破壞強度에 대해 말했으나 이 理論으로 求한 破壞強度는 많은 경우 實測值보다 아주 낮은 것으로 이 생각으로는 破壞強度를 說明할 수는 없다.

以後 Orowan<sup>(3)</sup>과 Irwin<sup>(4)</sup>은 1948년에 塑性變形을 포함하는 경우 이 變形이 破面의 얇은層에 局限되어 있다면 (5)式의  $\gamma_s$ 에 塑性表面일  $\gamma_p$ 을 加한 것을 사용하여 破壞應力  $\sigma$ 는

$$\sigma = \sqrt{2E(\gamma_s + \gamma_p) / \pi c} \quad (7)$$

으로 표시했다(Griffith-Orowan-Irwin의 式).

말하자면 龜裂이 單位길이만큼 擴大하는 경우 새로운 表面을 만드는데 필요한 에너지뿐만 아니라 龜裂先端近傍의 塑性域內에서 하여진 塑性일( $2\gamma_p$ )도 (1)式의 第2項, 彈性變形에너지가 負擔하지 않으면 안된다. 事實上 脆性的이라고 생각되는 破面도 X線등으로 상세히 살펴보면 塑性變形層의 存在를 인정하게 되는 것이 많다. 一般的으로  $\gamma_s$ 는  $10^3 \text{ erg/cm}^2$ 의 order이지만  $\gamma_p$ 는 일반적으로  $\gamma_s$ 보다 훨씬 큰 값을 갖는다. 그후 1957년에 와서 Irwin<sup>(5)</sup>은 (7)式이 應力擴大係數로 표시되는 것을 주장했다.

ㄴ) 應力擴大係數(stress intensity factor)

지금 그림 22와 같이 龜裂을 가진 要素에  $y$ 軸方向으로  $\sigma$ 의 應力이 作用하고 있다.

이 경우 龜裂先端近傍에서  $y$ 軸方向의 應力分布은 彈性論에 따라 다음과 같이 表示된다.

$$\sigma_y = \sqrt{\frac{c}{2r}} \sigma \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (8)$$

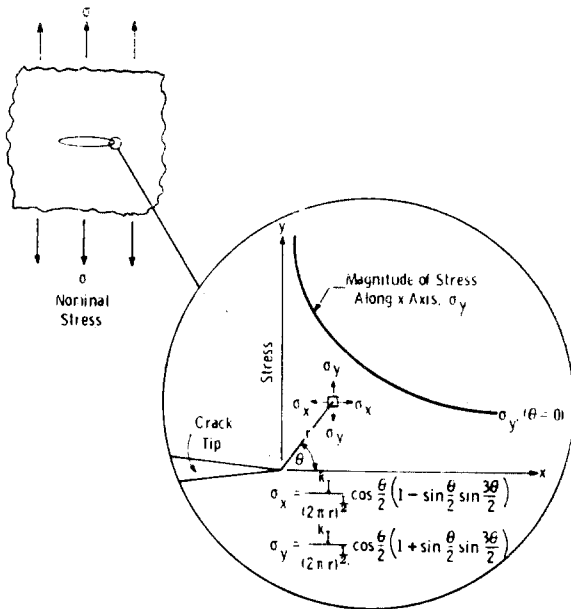


그림 22 龜裂先端近傍에서의 彈性應力分布

윗 식은 다음과 같이 쓴다.

$$\sigma_y = \frac{\sqrt{\pi c}}{\sqrt{2\pi}} \sigma \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right)$$

여기서

$$\sqrt{\pi c} \cdot \sigma = K \quad (9)$$

으로 놓으면 (8)식은

$$\sigma_y = \frac{K}{\sqrt{2\pi r}} \cos \frac{\theta}{2} \left( 1 + \sin \frac{\theta}{2} \cdot \sin \frac{3\theta}{2} \right) \quad (10)$$

으로 쓸 수 있다. (9)식의  $K$ 을 應力擴大係數라 한다. (10)식으로부터 알 수 있는 바와 같이 龜裂先端的 어떤位置( $r, \theta$ 에 의해 決定)의 應力은  $K$ 만에 依存하고 있다. 다시 말하면 龜裂先端近傍의 應力分布는 本質적으로 같으며 그 크기만은  $K$ 에 따라 다르다. 길이가 다른 2개의 龜裂을 비교할 때  $K$ 值가 같으면 龜裂先端近傍의 應力狀態는 같다고 할 수 있다.

(9)식으로부터  $\pi c \sigma^2 = K^2$ 이므로 Griffith의 식인 (4)식은

$$2\gamma_s - \frac{K^2}{E} = 0 \quad (11)$$

으로 되고 破壞에 대한 限界條件은  $K$ 를 사용한 (11)식으로 표시한다.  $E$  및  $\gamma_s$ 는 材料에 따라 決定되는 定數이므로  $K$ 가 이 식을 滿足시키는

값(限界值)이 되었을 때 破壞가 일어난다. 이 限界의  $K$ 를  $K_c$ 라 적고 破壞靱性(fracture toughness)이라 한다. 즉 다른 形狀과 치수의 龜裂이라도 그  $K$ 值가 같은 限界值에 도달하면 破壞가 일어난다.

이미 이야기한 Griffith의 식인 (5)식은 塑性變形을 갖지 않는 경우의 에너지條件式이지만 이것을 힘의 형태로 表現하면 塑性變形을 갖는 一般의 경우에도 有效하게 利用할 수 있으므로 Irwin<sup>(6)</sup>(1952)은 (11)식의 第2項을 龜裂의 單位길이 增加마다의 힘으로 解析하여 이것을  $G$ 로 나타내어 龜裂擴大力(crack extension force)이라 했다.

$$\left. \begin{aligned} G &= \frac{K^2}{E} \quad \text{plane stress} \\ G &= \frac{K^2}{(1-\nu^2)E} \quad \text{plane strain} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

어떤 경우이건 (11)식을 滿足하면 破壞가 일어난다. 破壞가 일어나는데 필요한 龜裂先端的 應力은 材料에 依存하므로  $K_c$ 는 龜裂 또는 龜裂狀缺陷을 갖는 材料의 破壞에 대한 抵抗을 나타낸다.

實際로는 荷重을 거는 方法과 試片이 有限幅이므로 一般적으로 應力擴大係數는 無限幅의 解에다 補正係數  $\alpha$ 를 곱한 다음과 같은 식으로 표시한다.

$$K = \alpha \sqrt{\pi c} \cdot \sigma \quad (13)$$

여기서  $\alpha$ 는 試驗片, 龜裂의 幾何學的 形狀, 荷重의 거는 方法 등에 의한 係數이다. 荷重을 거는 方法, 試驗片, 龜裂의 幾何學的 形狀 등을 어떻게 변화시켜도 破壞할 때의  $K_c$ 值는 材料에 따라 定해지는 一定值를 나타낸다. 따라서  $K_{Ic}$ 가 구해지면 許容應力과 許容缺陷치수등이 計算으로 구해진다.

지금까지는 材料의  $K_c$ 值는 實驗에 의해 決定하고 있다. 그림은  $K_c$ 를 구하기 위해 使用되고 있는 代表的인 試片形狀을 나타내고 있다.

同一條件에서 測定된  $K_c$ 值는 이것들의 어느 試片으로 행해져도 같은 값이 된다. 따라서 이것들중 하나의 試片으로  $K_c$ 值가 決定되면 이 값

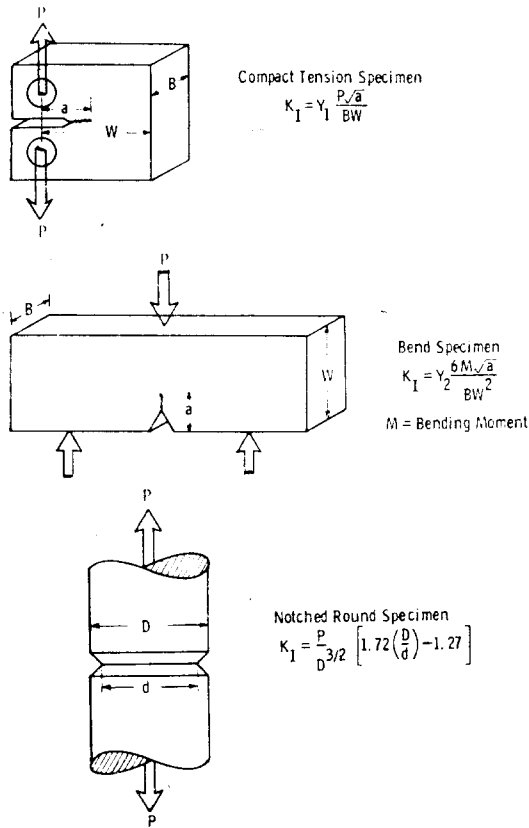


그림 23  $K_{Ic}$  破壞靱성을 測定하는데 使用되고 있는 3개의 試片의 幾何學的形狀

으로 다른 形狀의 試片에 대한 破壞條件도 計算할 수 있다. 또한 任意形狀과 치수를 가진 龜裂에 대해서도  $K$ 의 表示만 알면 그 龜裂을 가진 實際上的 構造物에 대해서도 破壞條件을 規定할 수 있다.

이와 같이 다른 條件(荷重의 거는 方法, 板幅 등)이 달라도 오직 하나의 變數인  $K_c$ 로 破壞條件을 規定할 수 있다는 것이 破壞力學을 設計에 應用할 때 아주 有效하게 된다.

## 2. 疲勞龜裂傳播

疲勞에서도 最終急速破壞(catastrophic fracture)는 應力擴大係數  $K$ 가 어느 限界值에도 달했을 때 생긴다. 이 限界值를 疲勞破壞靱性  $K_{fc}$ 라

한다.<sup>(7)</sup> 龜裂端에서 應力擴大係數가  $K_{fc}$ 에 도달하는데까지의 壽命은 龜裂이 임계 크기 이하에서 임계크기로 도달할 때까지의 成長速度에 의한다.

應力擴大係數는 龜裂端의 局部的 應力分布를 나타내는 파라미터이다. 疲勞龜裂傳播學도 그部分의 應力에 依存하므로 疲勞에 대해서도 應力擴大係數의 概念은 有效하다.

疲勞龜裂傳播速度係數와의 關係를 보기로 하자. 一般的으로 疲勞龜裂 길이와 應力反復數와의 關係, 즉 疲勞龜裂傳播曲線은 그림 24와 같다<sup>(8)</sup>. 이 曲線의 기울기로 나타나는 疲勞龜裂傳播速度  $da/dN$ 는 龜裂길이와 負荷荷重이 클수록 빨라진다.

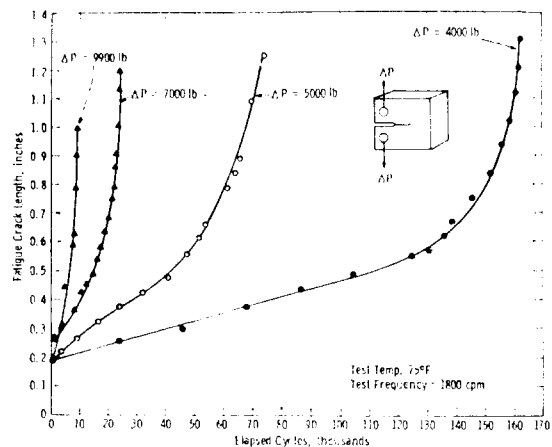


그림 24 Ni-Mo-V 合金鋼의 龜裂成長에 미치는 反復荷重範圍의 影響

$K = \alpha \sqrt{\pi c} \cdot \sigma$ 로 나타나는 應力擴大係數도 負荷應力  $\sigma$ 가 높을수록 또 龜裂길이와 클수록 높은 값이 되므로 疲勞龜裂傳播速度도 應力擴大係數와 관련이 있음을 알 수 있다.

그러나 疲勞의 경우에는 負荷應力  $\sigma$ 가  $\sigma_{max} \sim \sigma_{min}$  사이를 變動하므로 龜裂길이와 같아도  $K$ 值는  $K_{max}(= \alpha \sqrt{\pi c} \cdot \sigma_{max})$ 에서  $K_{min}(= \alpha \sqrt{\pi c} \cdot \sigma_{min})$  사이를 變化한다. 따라서  $\Delta K = K_{max} - K_{min}$ 으로 表示되는 應力擴大係數의 範圍를 사용하여 解析한다.

그림 24로 나타난 데이터는 疲勞龜裂傳播速



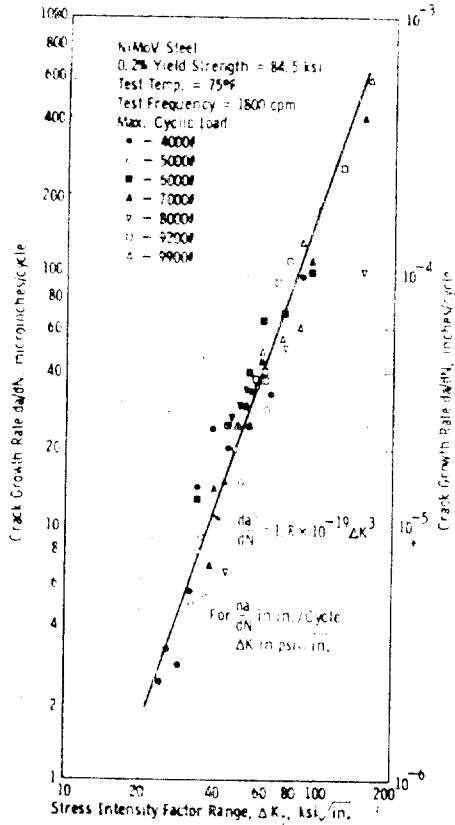


그림 25 Ni-Mo-V 鋼의 應力擴大範圍와 龜裂成長速度

度  $da/dN$ 를 應力擴大係數의 範圍  $\Delta K$ 에 대해 플로트하면 그림 25<sup>(8)</sup>가 된다.

兩對數紙上에서 兩者의 關係는 거의 直線으로 나타나며 疲勞龜裂傳播速度에 대한 應力擴大係數가 制御因子로 된 것을 볼 수 있다.

負荷荷重 및 龜裂길이와 같은 變數가  $\Delta K$ 인 하나의 파라미터로 表示되고 이들 變數들의 어떠한 組合에 대해서도 適用시킬 수가 있음을 알 수 있다.

荷重의 거는 方法이 바뀐 경우를 하나의 例로서 그림 26<sup>(9)</sup>에 표시한다.

中央에 龜裂을 가진 平板에 대해 한쪽은 引張應力  $\sigma$ 을 負荷하고 다른 쪽은 龜裂中央에 荷重을 거는 wedge force의 형태다 應力擴大係數는 前者의 경우

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

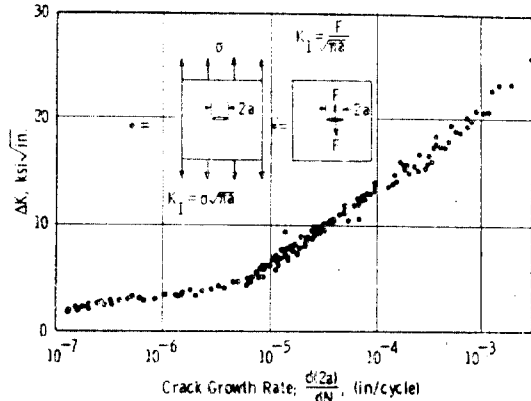


그림 26 2개의 다른 荷重條件下에서 發生되는 疲勞龜裂成長速度에 대한 比較<sup>(8)</sup>

後者の 경우

$$K = F / \sqrt{\pi a}$$

로 나타나며 龜裂이 커짐에 따라 前者는  $K$ 가 增加, 後者は  $K$ 가 減少한다.

그림 26에서 볼 수 있는 바와 같이 荷重을 거는 方法은 아주 다르지만 疲勞龜裂傳播速度는  $\Delta K$ 로 整理하면 아주 같은 曲線이 된다. 따라서 實驗室의 데이터를 바탕으로 實際 機械構造物에 適用이 可能하다고 할 수 있다.

### 참고 문헌

- (1) McDonnell-Douglas Astronautics Co.: "Electron Fractography Handbook" (1976) Metals and Ceramics Information Center ed.
- (2) A.A. Griffith: Phil. Trans. Roy. Soc. 221(1920) 163.
- (3) E. Orowan: Report on Progr. in Physics, 12 (1949)185.
- (4) G.R. Irwin: Fracturing of Metals, ASM (1948) 152.
- (5) G.R. Irwin: "Handbuch der Physik" 6(1958)551.
- (6) G.R. Irwin and J.A. Kies: Weld. J. 31(1952)95.
- (7) T. Yokobori and T. Aizawa: Rep. Res. Inst. Strength and Fracture of Materials, Tohoku Univ., Sendai Japan,6-1(1970)19.
- (8) W.G. Clark Jr.: Experimental Mech., (1971), 421.