

構造材料의 破壞 및 機能과 設計(IV)

(脆性破壞와 設計強度)

宋 森 弘

〈高麗大·機械工學科·工博〉

1. 머리말

본講座에서는 脆性破壞의 事故와 그 原因, 材料의 強度와 構造設計, 材料의 理想強度와 缺陷 크랙의 變形과 破壞靱性の 개요, 彈性破壞力學의 概要 등을 기술하겠다.

2. 脆性破壞事故와 그 原因

사용중인 機械 및 構造物에 破壞 및 破損이 發生하는 일은 이미 잘 알려져 있다. 特히 어떠한 事前 예고도 없이 機械 및 構造物에 돌연히 發生하는 脆性破壞는 物的 및 人的인 被害가 큰 重大한 破壞事故로 확대되어 버린다. 19世紀 이후, 機械 및 構造物에 사용하는 鐵鋼部材를 잇는 方法에는 리벳이음, 용접등이 많이 사용되어 왔으며 이와같은 接合技術은 급속히 발달하였다.

따라서 多方面에서 機械 및 構造物이 大型化 또는 複雜化됨과 동시에 破壞에 의한 사고는 매우 많이 發生되고 있다. 다음은 19世紀 이후 現在까지 일어난 중요한 脆性破壞를 종합정리한 것이다. 즉

- 1919년, 보스톤(미국)에서 糖寒탱크破壞
- 1925년, 폰가시(미국)에서 오일탱크 破壞
- 1940~1945년, 제 2 차大戰 도중 標準船(미국)의 破損, 破壞사고

- 1943년 뉴욕(미국)에서 GE社의 球形水素탱크 破裂
 - 1944년, 글리브란드(미국)에서 가스壓力 용기 破壞
 - 1947년, 소련에서 5개의 오일탱크 破壞
 - 1952년, 휘티(영국)에서 ESSO社 原油탱크 破壞
 - 1952~1955년, 미국 NASA의 로켓트 모우터 케이스 破壞
 - 1954년, 월드콘콜드號 北大西洋上에서의 두동강이 破壞
 - 1967년, 일본 川崎에서 熱交換器 破壞
 - 1971년, 미공군 F111戰鬪폭격기 윙 피봇 破壞
- 이상과 같은 破壞는 物的 및 人的인 損害가 매우 크기때문에 社會의 큰 관심을 불러 일으켰고 이와같은 事故의 原因을 후에 調査해본 결과 接合部分 등의 應力集中에서 發生한 크랙 혹은 불안정한 용접에 의하여 發生한 缺陷이 그 原因이 되기도 하고 또 종래의 設計強度 基準에서는 당연히 허용되는 低應力下에서의 破壞였다는 것이 밝혀졌다. 따라서 이러한 結果는 당시의 設計者들이 脆性破壞에 대한 認識이 달라지게 되었다. 이와더불어 제 2 차대전후 工業技術은 한층더 發達하게 되었고 기계 및 구조물은 大型化, 輕量化가 요구됨에 따라 材料의 側面에서는 높은 引張度를 갖는 高強度材料가 開發 實用化되게 되었다.

一般的으로 高强度鋼材料에 있어서는 어떤 缺陷 혹은 크랙이 존재하면 低引張强度材料에 比較하여 顯著하게 낮은 應力에서도 破壞를 일으키는 경향이 있다. 또한 機械 및 構造物이 大型化됨에 따라서 製造過程中에 發生한 缺陷 또는 加동중에 材料疲勞라던지, 環境의 영향을 받아서 發生한 크랙이라던지 材料가 本質적으로 가지고 있는 缺陷이 존재확율이 높은것은 말할 필요도 없겠다.

이렇게 생각하여 보면 機械 및 構造物에서는 材料중에 존재하는 缺陷 또는 發生한 크랙이 原因이 되는 低應力破壞의 防止는 設計의 관점에서나, 使用上的 관점에서나, 어느側面에서도 매우 심각한 문제이다.

從來의 設計基準으로서는 材料의 引張强度, 降伏强度, 혹은 缺陷에 의한 應力集中效果 등을 基礎로하고 있는 反面에 脆性破壞의 重要한 支配因子인 材料중에 존재하는 결함 및 발생이 예상되는 크랙에 대한 고려는 아예 생각도 못하는 실정이다. 즉 이미 存在하는 결함 및 크랙을 인정한 후에 설계를 하는 것도 앞으로의 흥미있는 과제가 될 것이다.

따라서 최근에는 從來의 設計强度基準에 材料중에 존재하는 결함 혹은 발생이 예상되는 크랙을 고려한 새로운 設計基準이 요구되게 되었고, 이와관련해서 工學的인 문제를 고려하여 提案된 것이 破壞力學이라는 새로운 학문이며 이 학문은 脆性破壞와도 밀접한 관계를 가지고 있다.

3. 材料의 强度와 構造設計

構造라든가 機械部品등이 破壞되지 않도록 設計하는 手段으로서, 許容應力과 安全率을 主로 생각하게 된다. 材料의 引張强度 σ_B 라든지 降伏應力 σ_Y 와 關連시켜서, 許容應力 σ_a 를 결정하고 구조가 받는 應力을 許容應力 以下로 두는 것을 생각할 수 있다. 즉 許容應力은

$$\sigma_a = \sigma_B / S_B, \quad \sigma_a = \sigma_Y / S_Y \dots \dots \dots (1)$$

로 표시할 수 있으며 S_B, S_Y 를 안전률이라 한다, 材料의 種類, 荷重의 種類, 과거의 경험등을 기

초로하여 安全率의 값은 정해지게 된다.

高强度材料의 開發의 진행이 가속화되고 構造物도 대형화되며 또한 용접이 자주 사용됨에 따라서 許容應力을 降伏應力보다 매우 낮게 잡아서 設計한 경우 충분히 安全하다고 생각되는 구조재료라 할지라도, 내부에 缺陷이 있다든가 할 경우에는 그것이 소위 脆性破壞의 사고를 일으킬 경우가 있다. 특히, 溶接船, 大形壓力容器, 大形發電機, 터빈등에서 이와 같은 種類의 破壞가 현저하게 나타나고 있다.

缺陷을 가진 材料의 脆性破壞는, 安全率이 나타내는 바와 같이 구조의 일부분 應力이 일정한 값이 되면 破壞한다고 하는 생각에는 차후 충분히 검토의 여지가 있다고 본다. 따라서 破斷面의 發生에 의한 表面 Energy 를 생각하는 熱力學的인 不安定問題와 관련해서 1920년 Griffith 는 파괴이론을 발표하게 되었으며, 소위 破壞力學이라는 分野가 1960년대부터 급속히 진보하고 있다. 이 分野에서는 Rocket Engine 의 破壞가 유리관의 破壞때문에 일어난다는 50년전의 研究에 의해 설명되고 있다고 해도 과언은 아니다.

4. 材料의 理想强度와 缺陷(彈性 energy 와 表面 energy)

고체는 원자끼리 또는 분자끼리 결합력에 의해서 응집되어 있어서, 외부로부터 힘을 받으면 변형한다. 그림 1(a)와 같은 結晶의 2次元 model에 外力을 加했을때, 原子面간의 거리와 結合 Energy 및 結合力的 關係는 (b), (c)와 같이 된다. σ_{th} 以上の 힘으로 引張시키면 원자면은 분리되어, 結晶은 破壞된다. 結合力이 (c)의 점선과 같이 근사하게 되어

$$\sigma = \sigma_{th} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x \dots \dots \dots (2)$$

로 나타낼 수 있다. 따라서 破壞에 소요되는 일은 다음과 같다.

$$\int_0^{\frac{\lambda}{2}} \sigma_{th} \sin \frac{2\pi}{\lambda} x dx = \lambda \frac{\sigma_{th}}{\pi} \dots \dots \dots (3)$$

이다. 이 일은 破壞의 結果로서 새로운 表面을 형

성하기 위한 Energy로 변화한 것으로서 생각할 수 있다. 단위면적마다의 표면 Energy를 γ 라고 하면 표면은 2매가 되기때문에

$$\lambda \cdot \sigma_{th} / \pi = 2\gamma \dots\dots\dots (4)$$

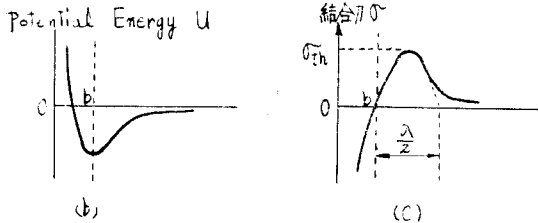
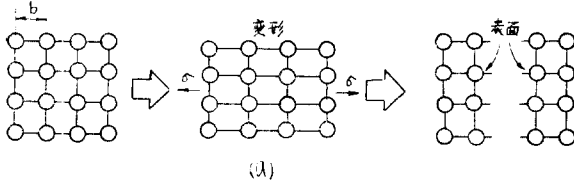


그림 1. 2차원 結晶 모델의 破壞

가 된다. x 가 적을 때에는 식 (2)는 $\sigma = 2\pi\sigma_{th}x/\lambda$ 로 되며, 따라서 Hook's law이 성립되고

$$\sigma = \sigma_{th} \frac{2\pi}{\lambda} x = E \frac{x}{b} \dots\dots\dots (5)$$

로 된다. 식 (4), (5)를 조합하면

$$\sigma_{th} = (E\gamma/b)^{1/2} \dots\dots\dots (6)$$

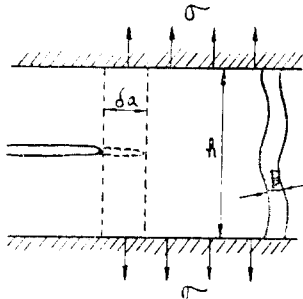


그림 2. 彈性 energy와 表面 energy

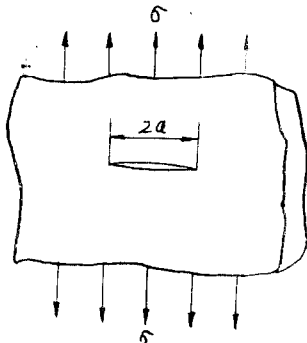


그림 3. Griffith의 문제, 크랙을 가진 板의 破壞

가 일어난다.

보통재료에서 表面 Energy는 $\gamma \approx 0.1Eb$ 정도이기때문에, 材料의 理想強度는 $0.1E$ 정도이다. 거의 缺陷을 갖지 않은 金屬 및 유리섬유에서는 이 정도의 強度를 나타낸다. (유리섬유의 強度는 350 kg/mm^2 , 鐵 whisker의 強度는 1500 kg/mm^2 에 달한다.)

그러나, 一般 工業材料의 強度는 理想強度의 $1/10 \sim 1/100$ 정도이다. 材料의 缺陷을 생각하여 이 모순을 최초로 해명한 것은 Griffith이다.

Griffith의 理論은 다음과 같다. 그림 (2)와 같은 半無限 Crack을 가진 板(두께 B)을 引張하여 上下端을 고정시킨다. Crack이 있는 부분의 應力은 Zero로서, Crack이 없는 부분의 應力은 σ 라 한다. 가상적으로 Crack이 δ_0 만큼 進전한 상태를 생각하면, Crack이 進전한 부분의 應力은 σ 에서 Zero로 되고 이 부분의 Strain-energy $\delta_e = \left(\frac{\sigma^2}{2E}\right) Bh \cdot \delta_0$ 가 物체로부터 喪失하게 된다. 이 Energy는 Crack이 進전할때 表面 Energy $\delta_s = 2\gamma Bh \cdot \delta_0$ 로서 소모되는 것이된다. 따라서

$$\delta_e \geq \delta_s \dots\dots\dots (7)$$

인 경우에는 Crack은 홀로 進전하여 板이 破壞된다. Griffith가 실제로 생각한 것은 그림 3과 같은 길이 $2a$ 의 Crack을 가지고, 應力 σ 로 引張되는 板의 破壞問題를 생각해 보자. 이 경우에 식 (7)으로부터

$$\frac{2\pi\sigma^2 a}{E} \geq 4\gamma \text{ 혹은 } \sigma \geq \sqrt{\frac{2E\gamma}{\pi a}} \dots\dots\dots (8)$$

로 될때 破壞한다. 이것은 Crack이 클수록 破壞가 일어나기 쉽다는 것을 의미한다. 유리봉을 引張했을때의 強度를 그림 4에 표시한다. 가는 棒일수록 表面의 缺陷이 적기때문에 破壞되기가 어렵다.

5. Crack의 變形과 破壞靱性

彈性體 속에 있는 Crack은 應力이 加해지면 變形하며, Crack 선단에는 큰 應力集中이 생긴다. 彈性學에 의하면 그림 5와 같이 Crack 선단에서 x 만큼 떨어진 곳의 應力은

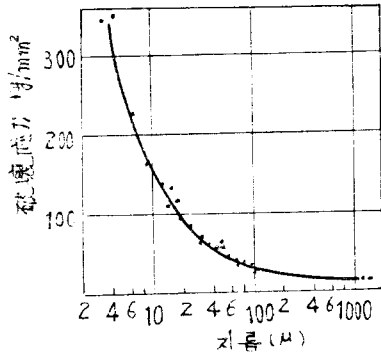


그림 4. 유리棒的 強度

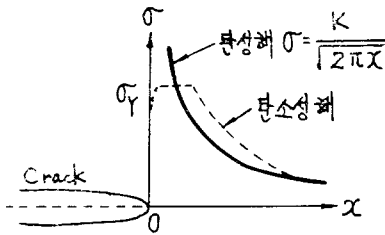


그림 5. Crack 先端의 應力

$$\sigma = k / \sqrt{2\pi x} \dots\dots\dots (9)$$

로 된다. k 는 荷重이라든지 Crack 의 길이에 관계되지만 Crack 선단 應力의 크기 정도를 나타내는 量으로써, 應力擴大係數라 불리어진다. 이 式에 의하면, Crack 선단의 應力은 무한대가 되지만, 실제 材料에서는 降伏이 일어나서 Crack

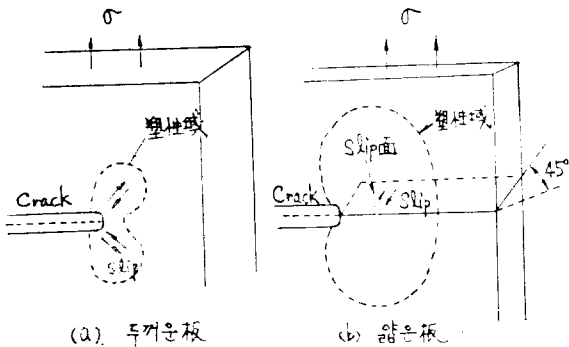


그림 6. 크랙 先端의 塑性領域

선단에는 塑性變形이 생긴다. 그림 6(a)와 같은 剪斷應力이 크면 Crack 은 Crack 과 45° 방향으로 Slip 된다. Crack 은 塑性變形을 同伴하면서 進展하기 때문에, 材料가 이상적인 形으로 분리

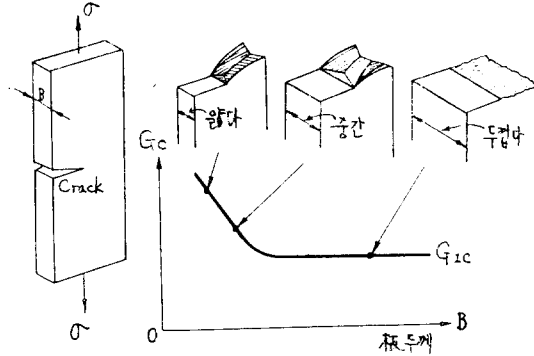


그림 7. 板두께와 破壞靱性值

한다고 생각할 때의 表面 Energy 보다는 훨씬 큰 Energy 가 소비된다. 단위길이 마다의 Crack 이 進展할때 소비되는 Energy 를 破壞靱性이라 말하고 흔히 G_c 라는 기호로써 나타낸다. (판 단위 두께에 대하여). G_c 가 클 수록 Crack 이 進展하기 위해서는 큰 Energy 가 필요하다.

板이 얇은 경우에는 약간 사정이 달라지게 된다. 이 경우에는 그림 (b)와 같이 두께방향으로 Slip 이 일어나기 쉽기 때문에 塑性領域은 더욱 크게되어, G_c 의 값도 크게된다. 그림 7에 板두께가 서로 다른 경우의 破壞形態와 破壞靱性值 G_c 와의 關係를 표시한다. 어느정도 이상으로板이 두껍게 되면 G_c 는 일정하게 되어 이것을 G_{1c} 로 쓴다.

6. 彈性破壞力學

板이 두껍고, 또한, 脆性材料인 경우에는 Crack 선단의 塑性領域은 작기때문에 그림6과 같이 선단에서 약간 떨어진 장소의 應力은 처음부터 塑性領域을 생각하지 않는 소위 彈性體의 경우와 별로 차이가 없다. 그림 3에서 Crack 이 進展할 때 여분의 Energy 는, 塑性變形이 없는 彈性體의 Strain-energy 와 동일하다고 생각해도 좋다. 그림 5와 같은 彈性的인 應力分布를 가진 Crack 이 δ_c 만큼 進展할때 여분의 Energy 는

$$\delta_c = G \cdot \delta_c = [(1-\nu^2)/E] K^2 \delta_c \dots\dots\dots (10)$$

로 구해진다. G 는, 지금 생각하고 있는 Crack 이, 단위길이 (단위 두께에 대해서) 만큼 進展할 때 彈性體로부터 余분의 Energy 로써, Energy