

構造材料의 破壞 및 機能과 設計(V)

—延性破壞와 機構—

宋 森 弘

〈高麗大機械工學科·工博〉

1. 머 리 말

본 講座(V)에서는 特히 延性破壞의 概要와 그 機構에 대하여 記述하여 보겠다. 記述하는 內容은 延性破壞의 形式, 延性破壞에 대한 力學的인 條件, 延性破壞와 微視構造, 力學的인 特性和 金屬組織學的 因子와의 關係 및 延性破壞에 대한 理論的인 취급의 일에등이며, 이들에 대한 概要를 可能한 범위내에서 서술식으로 記述하겠다. 본 강좌는 학회지 內容을 보다 쉽게 하자는 편집방법에 따라 매우 기초적인 것만을 다루었다.

2. 延性破壞와 脆性破壞

材料의 內部나 表面에 있는 결함에서 크랙이 급속히 성장하여 순간적으로 破壞하는것이 脆性破壞의 特徵이다. 한편, 破壞할때까지의 永久變形이 많은 延性破壞에서의 크랙은 급속히 成長하지 않는다. 결함이나 크랙이 성장할 때에 방출되는 彈性에너지 이상의 에너지가 變形때문에 소비되므로 이것은 外力의 增加에 의하여 보충할 필요가 있다. 同一材料에서도 粗度, 環境, 壓力등의 조건에 의해 脆性破壞되는 것도 있고 延性破壞되는 것도 있다.

3. 延性破壞의 形式

그림 1(a)와 같은 延성이 높은 單結晶을 인장시켜 보면 結晶이 미끄러져 그림 1(b)와 같이 슬립面의 수가 增加하여 延성이 증가하지만 이

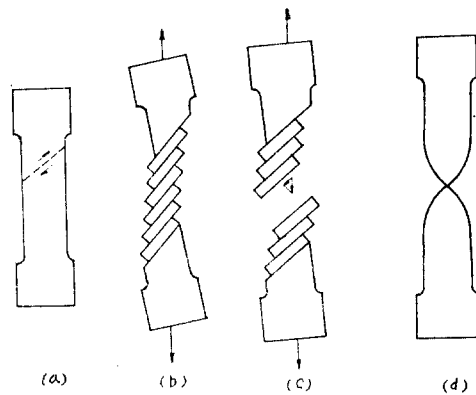


그림 1. 單結晶의 슬립變形과 破壞

것만으로는 破壞가 일어나지 않는다. 슬립面에서 分離되던가(그림 1(c)), 變形이 계속되어 斷面積이 0으로 되어 分離하던가(그림 1(d))하여 破壞되는 경우가 생각된다. 그러나 一般材料는 內部에 결함이 발생함에 따라서 이것과는 다른 形態로 破壞되는 것이 보통이다. 2~3의 예를 들어 본다.

(a) 延鋼동근棒의 引張破壞

試驗片 一部에 necking 現象을 일으키고, 그 후는 necking 部分에서 주로 變形되고 結果적으

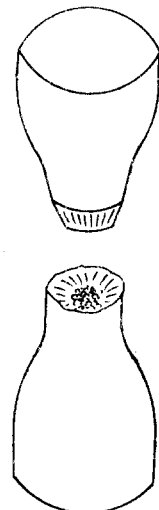


그림 2. Cup and cone type의 破壞

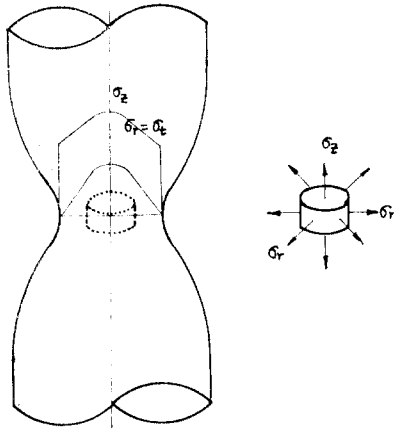


그림 3. 引張試驗片의 necking 部分의 應力分布

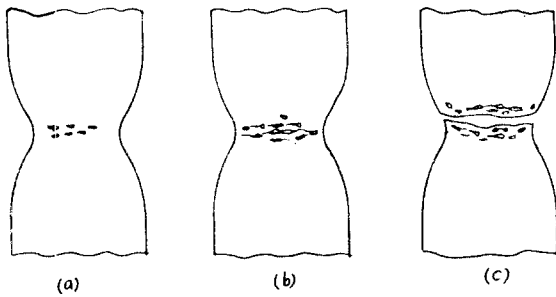


그림 4. Cup and cone 破壞의 과정
(a) 空洞(Void)의 발생. (b) Void의 成長과 合體
(c) 周邊部의 剪斷破壞

로는 Cup and cone type 이라는 모양으로 破壞된다(그림 2).

necking 部分에서는 그림 3과 같이 반지름方向, 円周方向의 引張應力을 일으켜 이 材料는 3方向으로 引張된다. 이때문에 材料內의 介在物

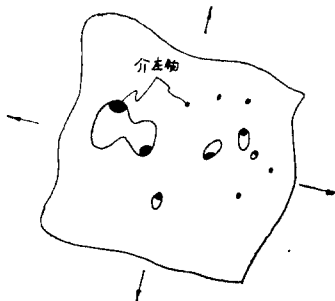


그림 5. 介在物로부터 發生하는 空洞(Void)의 形態

이나 結晶에서 다수의 空洞(Void)을 일으켜 變形과 동시에 성장하여 그 數가 增加하므로 necking의 中心部分에서는 Void가 合體하고 결국 큰 크랙이 發生된다. 表面 근처에서는 반지름方向 應力이 작으므로 軸과 45°의 方向으로 슬립變形하기 쉬운 剪斷變形에 의하여 破壞된다. 이것이 破斷面에 나타나는 Cup and cone type의 破壞를 가능케 하는 과정이다(그림 4).

Fractograph에 의하면 試驗片의 중심부에서는 凹形의 dimple이 관찰되고 剪斷部에서는 流動되어 半凹形이 된 dimple이 관찰된다. dimple 内部에는 金屬間化合物로 생각되는 介在物이 관찰되는 수가 많고 이것이 Void를 發生시키는 原因으로 보는 경우가 많다.

Void가 發生하는 과정은 그림 5와 같이 생각되고 있으며 顯微鏡觀察에 의하면 軸方向으로 늘어난 大形의 Void가 多數 관찰된다.

(b) 폴리에틸렌棒的 引張

同一延性破壞라 하더라도 高分子破壞의 모양은 金屬材料와는 다르다. 폴리에틸렌에도 necking 現象(局部收縮)이 일어날 수 있지만 일단 發生한 necking은 그 단면 지름이 necking을 일으키지 않았을 때의 지름과 비교하여 보면 거의 차이가 없고 길이만이 늘어나서 破壞하는 形態로 된다. 이것은 高分子의 鏈이 直線上으로 늘어나서 破壞하기 때문이라 생각할 수 있다.

4. 延性破壞에 대한 力學的인 研究

이 方面의 研究는 現在 發展되고 있는 分野로서 塑性變形에 의하여 空洞(Void)이 介在物에서 發生, 成長, 合體하는 과정이 연구되어 있다.

(a) Void의 成長

完全 塑性體 内部에 軸方向으로 긴 凹形의 구멍 또는 楕圓孔을 생각하고 여기에 軸方向 應力 σ_2 와 반지름方向 應力 σ_r 이 작용하는 그림 6과 같은 model을 생각한다. 軸方向의 스트레인 增加에 따라서 구멍지름의 구멍 간격이 크게 되면 破壞는 일어난다. 이러한 結果는 그림 7과 같이

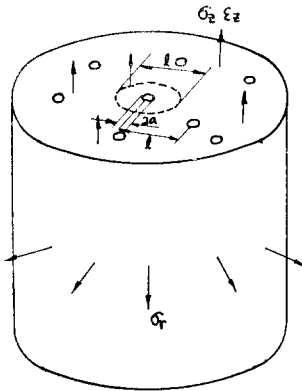


그림 6. Void의 model

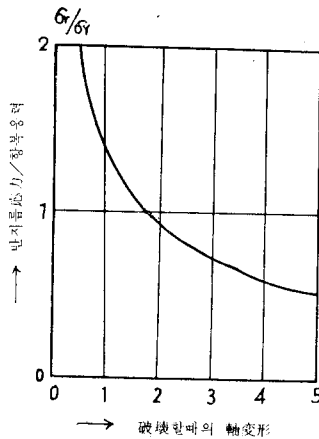


그림 7. 반지름方向 應力과 破壞變形

요약할 수 있다. 즉 necking 에 반지름方向 σ_r 가 引張應力로 작용하면 구멍지름의 成長이 촉진된다.

(b) Void의 合體

그림 8과 같이 完全塑性體속에 角柱形의 Void 가 並列로 된 model을 생각한다.

軸方向應力 σ_z 와 橫方向(반지름方向 또는 円周方向)의 應力 σ_r 에 의해 Void 사이의 物體가 necking을 일으켜 Void가 合體한다고 생각하고 있다.

5. 延性破壞와 微視構造

일반적으로 材料는 強度部材로서 사용되는 일

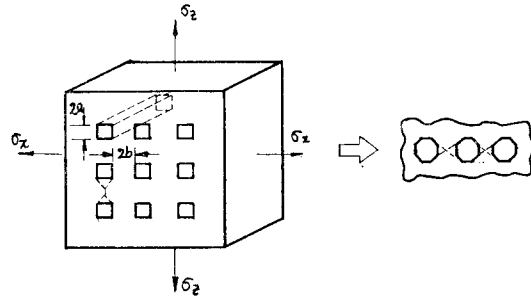


그림 8. Void의 合體에 대한 Model

이 많고, 따라서 材料의 力學的인 性質을 파악하는 것은 중요한 일이지만 材料가 巨視的으로도, 微視的으로도 같은 構造를 갖고 있으면 微視的인 觀點에서의 力學的인 舉動도 같을 것이 기대되지만 實用材料의 대부분은 많은 적던 여러가지의 不均一한 微視的인 構造로 만들어져 있다. 따라서 그러한 材料에 대해서는 力學的인 舉動도 微視的인 構造의 不均一性에 영향을 받아 不均一하고 그 때문에 材料의 巨視的인 力學的 特性도 微視的인 力學的인 舉動이 綜合된 것으로 생각해야 한다.

한편 材料의 力學的인 舉動은 材料가 가지는 內的인 要因과 材料에 가해지는 外的인 要因과의 相互作用에 의해 결정된다. 前者의 要因으로서 是 材料의 巨視的 및 微視的인 構造가, 혹은 後者의 要因으로서 是 負荷條件, 環境 등이 열거된다. 그래서 이들이 相互作用下에서 材料는 變形, 破壞 등의 力學的인 舉動을 나타낸다.

따라서 材料의 力學的인 舉動은 變形, 크랙 成長, 크랙傳播의 3가지 過程으로 大別할 수 있고, 각 과정에 있어서의 材料의 力學的인 舉動은 그 시점에서의 內的인 要因과 外的인 要因과의 相互作用에 의하여 결정된다.

延性破壞의 연구는 1949년경에 Tipper가 연강의 인장시험을 실시하여 最終破斷에 이르기 이전의 시험편의 內部觀察을 한 것이 처음으로 되어 있다. 그 후 계속적으로 實驗的인 檢討가 가해진 결과 현재에는 다음에 설명하는 과정이 연성 파괴의 基本的인 過程으로서 거의 인정받고 있다. 즉,

(1) 몇개의 組織的인 因子로부터의 Void의

成長

- (2) Void의 成長
- (3) Void의 連結에 의한 크랙의 發生
- (4) 크랙 傳播

그러나 이들 과정의 細部사항에 대한 實驗的인 檢討의 結果는 아직도 미흡한 점이 많고 따라서 統一的인 見解가 얻어지지 않는 것이 현재의 實情이다.

6. 延性破壞의 微視的인 機構에 관한 研究

延性破壞의 基本的인 과정으로서 앞절에서 표시한 4가지의 과정이 거의 인정되어 있고, 破斷面에서 관찰되는 延性破壞 特有的인 dimple pattern도 Void가 合體한 결과 형성된 것이라고 생각된다.

그러나 다음에 설명하는 것과 같이 그 세부에 대해서는 서로 모순된 결과가 보고되어 있고 또 統一的인 見解가 얻어지지 않는 것이 현실적이다.

먼저 Void의 發生因子로서 非金屬介在物, 析出物, 第2相粒子, 潜在空洞, 結晶粒界, 슬립集中力등이 보고되어 있다. 이들중에서 비교적 관찰에 많은 것은 앞의 3개이지만 高張力鋼에서는 破斷直前に 대하여도 含有되어 있는 炭化物粒子에서 Void가 形成되지 않는다는 보고나, 破斷面に 形成되어 있는 dimple중에서 작은 것의 대부분은 非金屬介在物, 析出物, 第2相粒子를 포함하지 않는 경우가 많으므로 Void의 生成에는 그들의 粒子가 필요하지 않다는 보고도 있다.

Void의 發生機構에 대하여는 非金屬介在物, 析出物, 第2相粒子의 주위에 dislocation이 集積되어 그 때문에 應力集中效果에 의해 이들 粒子 자신의 크랙 또는 母相과의 境界에서 분리되어 Void가 生成하는 것이라고 말하고 있다.

어느쪽의 기구를 택할 것인가는 粒子 자신의 크랙에 대한 強度, 境界의 接着力, dislocation의 舉動등에 의하여 좌우된다고 생각되지만 이점에 관한 金屬組織學的 및 力學的인 條件에 관한 檢討는 별로 없다.

Void의 成長을 관찰한 일례로서 內部를 酸化시킨 銅을 사용한 실험에서는 SiO_2 粒子와 母相

과의 境界에서 분리되어 생긴 Void는 주로 引張軸方向으로 늘어나고 그 成長은 큰 變形이 集中한 Band에 의한 것이라고 기술하고 있다. 다른 材料를 사용하여 Void 發生을 관찰한 예는 적으나 다음과 같은 機構가 考慮되고 있다.

- (1) Void의 成長合體
- (2) Void 사이에 Internal necking
- (3) Void 사이의 剪斷크랙에 의한 연결

등이다. 한편 Mg 合金을 사용한 실험에 대하여 Void의 成長 및 合體는 破斷 以前에 관찰되지 않는다는 보고도 있다.

이와같은 相反되는 見解는 巨視的인 內部크랙 문제에 대하여도 마찬가지이다.

7. 巨視的인 力學的特性과 金屬組織學的인 因子와의 關係

金屬材料의 巨視的인 力學的特性에 대하여는 종래부터 多方面에서 檢討되고 있으며 특히 Ferrite+Pearlite 鋼에 대하여는 Gensamer, Irvine, Pickering, Gladman 등에 의한 실험식이 제안되어 있다.

그러나 이들 실험식은 단순히 材料의 成分, 結晶粒의 지름등과 巨視的인 力學的特性과의 사이에 數學的인 對應關係를 구한 것이므로 그 精度는 높지 않다.

한편, 材料의 力學的特性에 영향을 주는 組織的인 因子에 대한 實驗的인 檢討가 폭넓게 다루어지고 있다. 일례로서, 材料中에 存在하는 非金屬介在物, 析出物, 第2相粒子등의 異相粒子는 材料의 伸延特性에 큰 영향을 주고, 破斷延성과 이들 異相粒의 含有量의 關係를 조사보고 하고 있다. 또한 鐵에 대해서 Spitzig, 齋藤, 角田 등이, 銅에 대해서는 Zwilsky, Edelson 등이, 실리콘 늪에 대하여는 Keder가, 銀에 대하여는 Johnston이 각각 實驗結果를 보고하고 있다. 共通的으로 破斷延성과 異相粒子의 體積含有率과의 對應關係는 어느 材料에서도 偏差가 존재한다. 이러한 異相粒子의 문제는 異相粒子의 크기, 모양, 種類, 分布狀態 또는 觀察方法등을 고려해야 한다.

이와같이 종래의 研究結果를 전망하여 보면 異相粒子的 體積含有率뿐만이 아니라 그외의 因子 또는 破壞機構의 檢討도 필요하다.

8. 延性破壞에 관한 理論的인 取扱

종래 시도되고 있던 延性破壞의 理論的인 취급의 대부분은 주로 Void의 연결 과정에 착안하고 있고 어느것이냐 破斷延性과 異相粒子的 體積含有率과의 關係를 구하고 있다.

Gurland는 材料內에서 近接하는 2개의 球形의 非金屬介在物에서 發生한 Void가 單軸引張應力下에서 成長하고 그들의 間격 L과 Void 길이 b와의 比가 一定한 값으로 되었을때 破斷된다고 하고 다음식을 유도하였다.

$$\epsilon_f = \frac{1}{2} \ln \left\{ 1 + \frac{K_2^2}{K_1} \left(\frac{2}{3} \frac{1+2f}{f} e^{-\frac{\epsilon_f}{2}} - 2 \right)^2 \right\}$$

여기에서

ϵ_f : 破斷延性

K_1 : 變形集中에 관한 상수

K_2 : 상수 (=b/L)

f: 非金屬介在物의 體積含有率이다.

이러한 연구는 K_2 값에 物理的인 意味를 붙이지 않았는데, Thomason은 b/L이 一定한 값에 달하면 破壞하는데 이 값에 대한 物理的인 意味를 檢討했다. 즉 슬립伸長理論을 應用하여 Void 사이의 材料가 局部的으로 Necking을 일으켜 不安定破壞에 도달한다고 해석했다. 이 理論에서는 橫方向 및 靜水壓應力도 考慮되고 있지만 이들의 값을 0으로 가정하면 破斷延性は 다음식으로 표시된다. 즉

$$\epsilon_f = \frac{1}{2} \ln \frac{1 - \sqrt{f}}{\sqrt{f}}$$

여기에서 f는 Void의 初期體積率이다. 이 상과같이 Void에 대한 연구는 多樣하나 研究者에 의해 破壞條件에 대한 思考方式이 다름을 알수 있다.

9. 延性破壞와 靜水壓

試驗片의 necking 部에 引張應力 方向이나 円周

方向의 引張應力이 發生함에 따라 Void의 成長이나 合體가 촉진되는 것은 延性破壞의 特徵이라고 볼수 있다.

반대로 necking 部에 壓縮應力을 받지름 方向에서 加하면 Void는 눌러 찌그러지는것 같은 힘을 받으므로 成長이나 合體는 일단 방해가 된다.

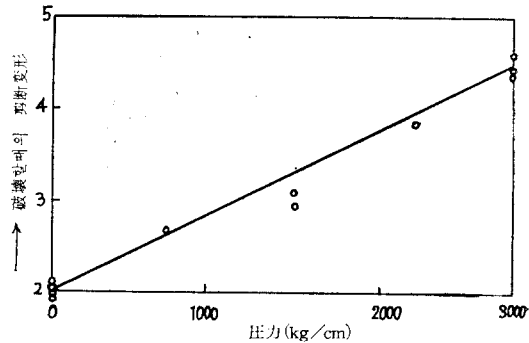


그림 9. 靜水壓과 破斷變形

그림 9는 延鋼을 靜水壓下에서 비틀었을때의 剪斷變形의 增加量을 表示한 것이다. 이 結果는 延性破壞力學이 올바른 方向에 있는 것을 말하고 있다.

10. 脆性破壞와 靜水壓

材料內部나 表面에 크랙이 있는 것이 脆性破壞의 原因이었다. 材料에 靜水壓을 加하면 開口할

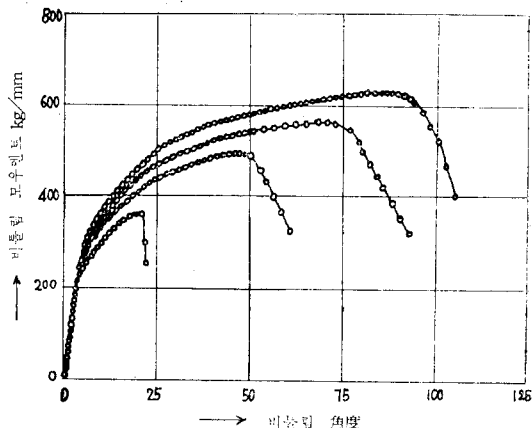


그림 10. 靜水壓과 鑄鐵의 비틀림變形

個別的인 原價를 試算한다.

그리고 가장 有利한 것을 선택하여 最後的인 製造圖面을 作成하고 購入示方書, 製造指示書를 作成하는 일들이 細部設計의 作業이다.

(I)(II)의 參考文獻

1. M. Asimow : Introduction to Design(1962) Prentice Hall.
2. S.A. Gregory : The Design Method(1966) Bu-

tterworth, London.

3. 横山倉三 : 生産工學のブテクトス(1969) 好學社, 東京
4. 白崎文雄 : 製品設計のポイント(1961) 日刊工業新聞社, 東京
5. 山林誠一 : 生産設計入門(1967) 白桃書房, 東京
6. 遠藤健兒外 : 生産設計의 實際(1964) 日刊工業新聞社, 東京
7. 古川 光 : 生産技術に於ける設計活動(1971) 日本設計製圖學會.



—384페이지에서 계속—

리고 하는 크랙을 늘리는 作用을 하므로 보다 큰 힘을 加하지 않으면 破壞하지 않는다.

그림 10은 鑄鐵로 만든 丸棒을 靜水壓下에서 비틀어 破壞할때까지의 moment 와 비틀림角과의 關係를 구한 것이다.

이와같은 靜水壓의 効果는 Ceramic 이나 유리등과 같은 材料에서도 나타나고 있다. 예로서 黑板에 사용하는 분필을 비틀어 보면 크랙은

45° 方向 즉 最大引張應力方向으로 發生하므로 大氣壓下에서의 破斷面은 軸과 45° 기울어지고 있음을 알수 있다.

따라서 一般的으로 靜水壓下에서는 引應力은 減少하고 미끄럼面에 의한 軸과 直角에 가까운 면에서 破壞하고 變形도 대단히 크게 된다.

참고 문헌생략,

—다음호에 계속—

