

構造材料의 破壞 및 機能과 設計 (Ⅲ)

(破壞와 Fractography)

宋 森 弘

〈高麗大學校·機械工學科·工博〉

1. 序 言

本 講座에서는 強度와 밀접한 關係를 가지고 있는 破壞문제에 대하여, 특히 破壞된 破斷面을 中心으로 基礎的인 一般事項을 記述해 보고자 한다. 그 內容으로는 破壞와 Fractograph, 電子顯微鏡과 Replica 法, Shadowing의 有効性, 破壞의 種類와 Fractograph의 一例 및 破斷面形成에 관한 機構등이다.

2. 破壞와 Fractography

물체가 破壞된다고 하는 것은 外力을 가하면 물체가 2개로 나누어진다는 단순한 현상이라고 생각되기 쉽지만, 실제로는 물체가 왜, 이렇게 破壞되는가에 대해서는 알 수 없는 것이 대단히 많다. 固體가 2개로 분리되는 macro 現象은 원자배열이나 凝集力등과 같은 micro 的인 것에 기인하는 복잡한 것들이 있다. 이미 여러분들이 아는 바와같이, 構造物이나 機械의 破壞는 돌이킬 수 없는 사고에 이르기 쉽다. 작은 部品 1개의 파괴라던지, 鋼板의 흠이 원인이 되어 항공기나 선박등의 사고가 생기는 경우가 있다. 금 후에는 原子爐나 核融合反應裝置등이 인류의 에너지源으로서 많이 이용될 가능성이 있지만, 破壞事故가 허용되어서는 안된다.

과학기술의 진보와 더불어, 기계 및 구조물에는 보다 強한 材料가 요구되고, 開發되어가고 있

다. 따라서 충분히 안전하게 設計되어 있다고 생각할 수 있는 構造라 하더라도 材料內部的 缺陷을 起點으로하여 가끔 파괴가 일어남은 부인하지 못할 사실이다.

3. Fractography

재료가 파괴된 破斷面을 관찰하여 파괴의 원인이나 材料가 破壞되는 기구를 탐구하는 방법을 Fractography 라고 한다. 破面解析, 破面 진단 등이라고도 한다. 以前에는 光學顯微鏡에 의하여 破面을 관찰하였지만 최근에는 電子顯微鏡에 의한 방법이 현저하게 발달하고 있으며 따라서 이것은 Electron fractography 라고 일컬어지고 있다. 전자 현미경을 관찰에 사용하면 100 \AA ($1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-4} \mu \text{ m}$) 정도의 分解能力으로써 破面을 관찰할 수 있고, 焦點深度의 관점에서 광학현미경에 비하여 훨씬 우수하기 때문에 전자현미경은 破壞의 micro 적인 機構를 예측하는 유력한 수단이 되고 있다. 이것에는 透過電子顯微鏡과 走査電子顯微鏡이 사용되고 있는데 여기에서는 주로 透過電子顯微鏡의 경우를 記述하겠다.

4. 透過電子顯微鏡(Replica 法)

초산셀룰로오즈를 아세톤에 담그어 軟化된 것을 관찰하려고 하는 破面에 눌러 붙여서 당분간 방치하고, 硬化된 후 떼어내면, 破面의 凹凸을,

초산셀룰로오즈의 表面으로 베껴낼 수 있다.

이 Replica 面은 실제의 破面과는 凹凸이 반대로 되어 있다. 초산셀룰로오즈의 表面에 경사진 쪽의 일정한 방향에서 크롬등의 금속을 얇게 眞空蒸着시킨 후 炭素를 균등하게 蒸着시킨다. 다음에 초산셀룰로오즈를 아세톤으로 용해하면 얇은 막이 남는다. 이것을 그물(金綱)로 건져내서 전자현미경 試料室에 넣고, 試料室을 眞空으로 만든 후, 전자투과시키고, 透過電子顯微鏡사진을 촬영하므로써 Fractograph를 얻을 수 있다.

5. Replica 像의 Contrast 및 金屬組織과의 對應

5.1 Replica 像의 Contrast

電子線에 의한 일정한 透過能力은 試驗片材料의 두께와 그 密度와의 곱으로 결정된다. 따라서 2段 Replica의 경우에는 試料인 Replica 膜自體의 密度는 同一條件(Carbon 膜)으로 제작되어 있기 때문에 膜의 두께의 차이 만큼 Contrast가 변화하게 된다. 그림 3-1은 알루미늄의 單結晶의 Replica 膜을 a, b와 같이 角度를 주고 동일視野를 촬영한 것이다. 이와 같이 電子線이 투과하는 장소의 膜의 두께차이에 따라서 Contrast가 증감하고 寫眞上에서의 黑化도가 높을 수록 膜이 두껍게 되어 있는 것(그림 중의 흑색부분)을 알 수 있다.

5.2 Shadowing의 有用性

Shadowing을 하는 목적은

① 관찰 하려고 하는 試料表面의 微細한 組織에 Contrast를 주는 것

② 表面의 凹凸의 對應을 확실히 하는 것이다.

Shadowing에 의한 Contrast의 증가는 蒸着物質이 부착한 부분과 부착하지 않는 부분(그림자부분)과의 電子線의 散亂吸收差異에 의한 것이기 때문에, 蒸着物質의 종류에 따라서 Contrast는 증감한다.

매우 치밀한 表面組織의 관찰에서는 蒸着物質을 두껍게 하면, 그 組織의 크기 판정에 오차를

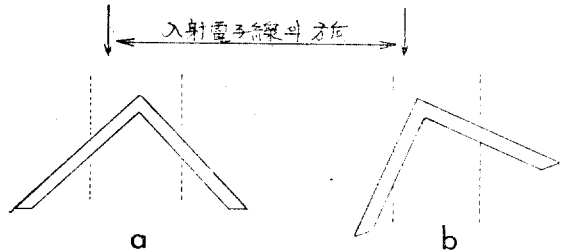
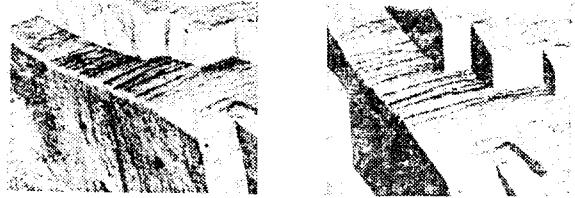


그림 3-1 Replica 膜斷面
(알루미늄單結晶의 Replica)

크게 하는 수가 있기 때문에, Shadowing 시에는 蒸着膜 두께를 가능한 범위내에서 얇게 하지만 Contrast를 증대시키는 것이 중요하다. 膜 두께를 얇게 하더라도 Contrast를 증대시키기 위해서는 散亂能力이 큰 物質, 즉 원자번호가 큰 물질일수록 그 効果는 크게 된다. 일반적으로 크롬을 약 50Å의 두께로 蒸着하고 있다.

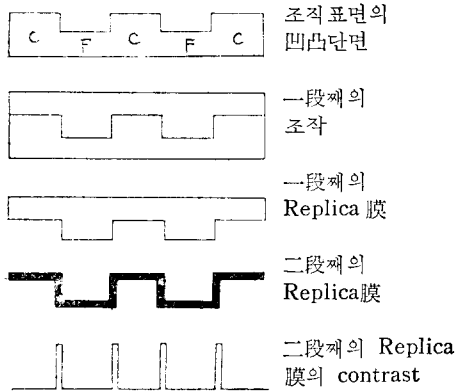
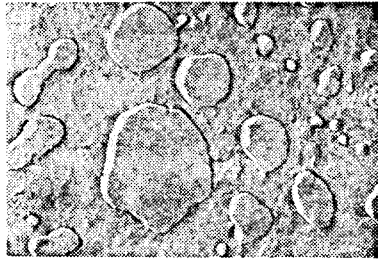
그것과 함께 組織의 크기나 모양, 面의 凹凸度등을 고려해서 관찰하여 가장 적당한 Shadowing 角度를 선정하는 것은 寫眞解讀에 중요한 역할을 하게 된다.

예로써, 그림 3-2에는 粒狀 Cementite의 試料에 Shadowing 한 경우와 하지 않는 경우와를 비교하였다. Shadowing을 하지 않는 왼쪽사진에서는 粒狀 Cementite의 윤곽밖에 볼수 없다. 이 試料에서는 종래의 선입관이 따라서 Cementite와 Ferrite의 구별은 가능하지만 실제로 어느쪽이 凸面이고 凹面인지를 아는 것은 불가능하다.

이것에 비해서 Shadowing을 한 오른쪽의 사진에서는 반달모양의 그림자에서 凹凸의 판단이 확실히 가능할 뿐만아니라 미세구조(작은 凹凸)도 선명하게 관찰할 수 있다.

이와같은 이유로서 組織관찰에서 Shadowing은 빼놓을 수 없는 수단인 것을 알 수 있다(그림중에서 C는 Cementite, F는 Ferrite).

shadowing을 하지 않는 경우



shadowing을 한 경우

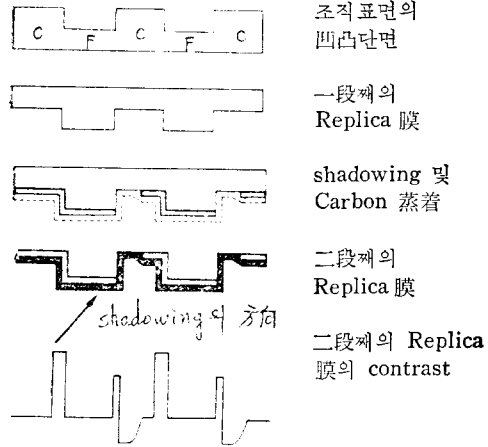
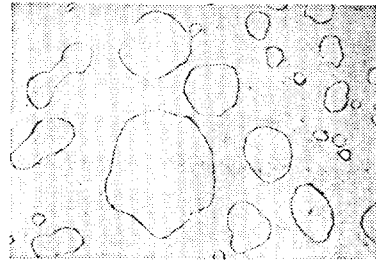


그림 3-2 Shadowing을 하였을 경우와 하지 않았을 경우의 Replica像의 比較(粒狀 Cementite)

金屬表面組織
斷面

Replica 膜의 斷面
shadowing은 照射
方向(左側)에서
실시한 것으로서 하
얀부분은 크롬(shad-
owing부분), 검은
부분은 Carbon膜을
나타낸다.

寫眞實例
shadowing은
照射方向,
左側으로 부터
실시한 것이므로
하얀 부분과 검은
부분의 contrast를 서로 비
교하여 주세요.

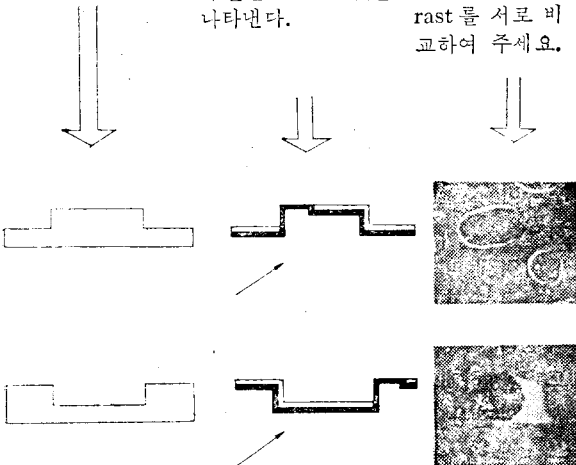


그림 3-3 金屬組織과 Replica像

金屬表面組織斷面

Replica 膜斷面

寫眞實例

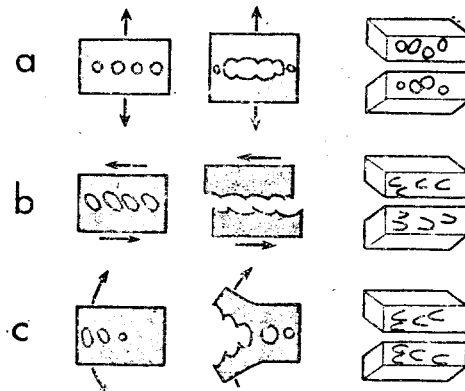


그림 3-4 組織과 Replica像 一例
(結晶粒界의 홈 Crack 등)

5.3 金屬表面組織과 Shadowing을 하였을 때 의 Replica像과의 對應

그림 3-3 과 그림 3-4 에 金屬表面組織과 Sha-
dowing을 한 Replica像과의 對應에 대한 몇개

의 실패를 표시한다.

6. 破面과 Fractograph의 一例

일반적으로 破面은 대단히 複雜한 모양을 하고 있기 때문에 Fractograph를 정확히 解讀하기 위해서는 經驗과 숙련을 요한다.

透過電子顯微鏡의 分解能力은 100Å 정도이고 관찰할 수 있는 범위는 100μm 정도이다.

한편 破壞는 大別해서 粒內破壞와 粒界破壞로 나눌 수 있고 粒內破壞에는 다시 延性破壞, 脆性破壞, 疲勞破壞등으로 나눌 수 있다. 또한 粒界破壞도 大別하면 粒內破壞와 마찬가지로 延性破壞, 脆性破壞, 疲勞破壞등으로 나눌 수 있겠다.

6-1 粒內破壞와 Fractograph

6-1-1 延性破壞와 Fractograph

延性破壞는 微小空洞(micro void)의 合體에 의한것과 슬립(Slip)에 의한 것으로 나눌 수 있다. 특히 micro void coalescence(微小空洞合體)에 의한 破壞에 대하여 記述하면 다음과 같다. 즉 이 경우의 破面의 特徵은 多數의 작은 窩로 만들어지는 소위 dimple이라고 부르는 形態를 갖는다(사진 1 참조).

이러한 形態는 工業用 金屬材料의 延性破壞에



사진 1 延鋼材料 破面에 대한 Fractograph의 一例

서는 일반적으로 나타나는 樣相으로서 材料의 조성변형에 따라서 材料中の 析出物, 介在物의 微粒子 등이 核이 되어 微小空洞이 多數 形成되어 이것들이 合體된 후 破壞에 이르기 때문에 破面に 窩 즉 dimple이라는 形態가 形成된다. 그림 3-5에 dimple 形成機構를 나타낸다.

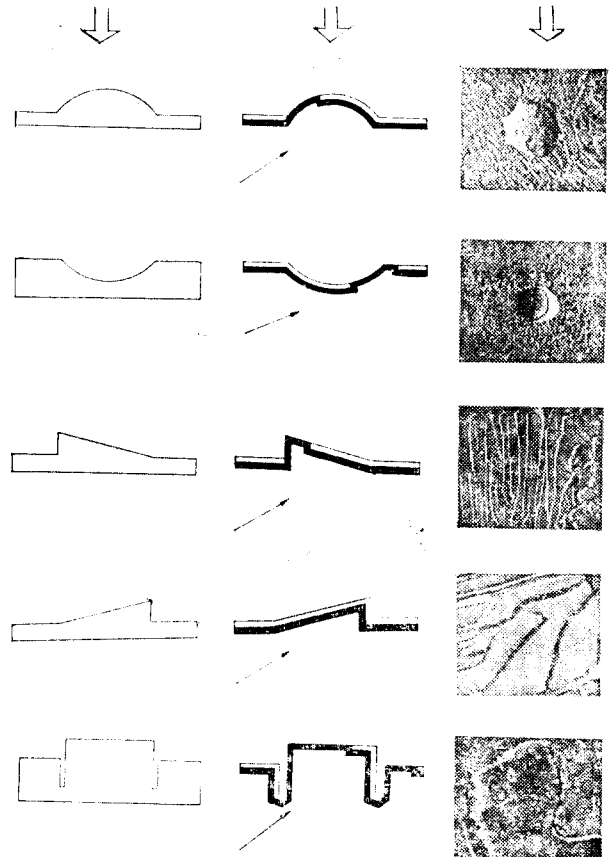


그림 3-4 Dimple의 形成機構(Beachem)

- (a) 均一引張—等軸 dimple
- (b) 剪斷—伸張形 dimple
- (c) 不均一引張—伸張形 dimple

dimple에는 여러 種類가 있고 주어지는 應力에 따라서 大別하면 가로, 세로 길이가 거의 같은 等軸 dimple과 포물선 모양의 伸張形 dimple 등으로 나눌 수 있다. 剪斷破面과 引張破面의 差異는 對應하는 兩破面의 dimple 方向이 反對方向인가 同一方向인가에 따라 알 수 있고, 따라서 한쪽 破面만으로는 區別할 수 없다. 引張型인 破面에서는 dimple 形態를 보면 크랙傳播方向을

알수 있다.

6-1-2 취성破壊와 Fractograph

이것은 壁開破壞(cleavage fracture)와 擬壁開破壞(quasi cleavage fracture)로 나누는 것이 일반적이다.

(a) 壁開破壞(cleavage fracture : 사진 2 참조)

cleavage facet 라고 부르는 破面單位上에 cleavage 段 또는 river pattern 이라고 부르는 形態를 갖고 있는것이 특징이다. 때로는 Tongue 라고 부르는 形態가 관찰될 때도 있다.



사진 2 壁開破壞의 一例

이 경우의 破壞는 거의 塑性變形을 동반하지 않고 cleavage 面이라고 부르는 特定한 結晶面에서 分離破壞되기 때문에 破面은 結晶粒정도의 크기를 가지는 소위 facet 로 구성되고 또 대개의 경우, 破壞는 하나의 cleavage 面에서 일어나지 않고 여러개가 모여서 일어나며 소위 表面에는 cleavage 段이 생긴다. 이때 이러한 모양을 만드는데 소비되는 소위 形成 Energy 관계가 있으므로, River pattern 은 크랙이 전파됨에 따라서 이러한 cleavage 段이 합쳐지면서 만들어진다. 따라서 이와같은 결과로부터 크랙의 전파 方向을 탐지할 수 있다.

또한 이와같은 River pattern 은 facet 의 端 端 結晶粒界로부터 시작될 때가 많고 이것은 하나의 크랙이 結晶粒에서부터 結晶粒으로 傳播해

서 破壞됨을 말해주고 있다.

(b) 擬壁開破壞(quasi cleavage fracture)

담금질 鋳鋼의 취성破面은 facet 狀이고, 따라서 River pattern 과 tongue 가 관찰되는 점은 cleavage 破壞와 마찬가지로 그 組織이 微細하고 cleavage 面을 확인하기 어렵다는 관점에서 quasi cleavage fracture 라고 부르고 있다(사진 3 참조).



사진 3 擬壁開破壞(quasi cleavage fracture)의 一例

quasi cleavage fracture 중에는 River가 facet 中央部分에서 주변으로 향하고 있는 것도 있으며 따라서 이것은 多數의 微小크랙이 合體되어 破壞한 것임을 나타낸다. 이 경우 facet 의 주변에는 tear ridge 라고 부르는 능선이 존재하는 수도 있다.

6-1-3 疲勞破壞와 Fractograph

反復應力이 작용한 疲勞破斷面에는 소위 Striation 이라고 부르는 特徵이 나타나고 이것은 1 cycle 마다 形成되는 줄무늬 모양의 形態를 갖는다(사진 4 참조).

Striation 을 大別하면 延性 Striation 과 취성 Striation 으로 나눌 수 있다. 일반적으로 많이 관찰되는게 前者인 경우다. 이것은 소위 軸方向과 直角方向에 存在하며 macro 的인 관점에서 보면 평탄하나 micro 적인 관점에서 보면 凹凸 및 슬립線이 관찰되고 따라서 塑性變形을 받았

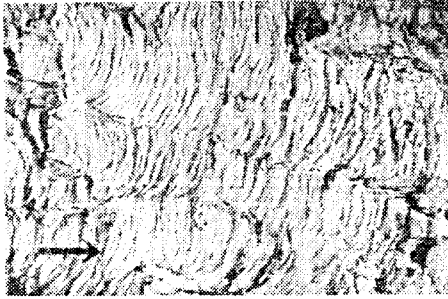


사진 4 軟鋼의 破面에 관찰되는 Striation 의 一例
→는 傳播方向

음을 나타내고 있다.

Striation 은 일반적으로 크랙이 傳播方向으로 凸의 느속한 曲線으로 形成되어 있는 경우가 많다. 따라서 이 모양을 分析하여 크랙 傳播方向을 탐지한다. 이것은 析出物, 結晶粒界 등에서 交叉될때문에 크랙先端이 둔화되고, 傳播가 늦어지기 때문이라고 말하고 있다. 따라서 應力이 反復될과 동시에 1 cycle 마다 하나의 Striation 이 形成되고 각 Striation 의 간격은 1 cycle 에 대한 크랙傳播速度를 나타낸다. 그래서 Striation 은 疲勞破壞를 일으킨 荷重值 등에 대한 定量的인 解析이 可能하기 때문에 疲勞破壞는 물론이고 fractograph 에 있어서도 가장 중요한 특징의 하나라고 말하고 있다.

취성 Striation 은 硬한 材料에서 腐蝕성이 농후한 분위기 중에서 나타나기 쉽고 破面은 cleavage 面에 따라 생기고 塑性變形은 별로 동반하지 않는다. 이 경우의 形成機構는 延性 Striation 과 흡사하나 應力이 작은 경우는 그 틈새도 적어서 크랙은 cleavage 面에 따라서 취성적으로 傳播하고 應力이 커지면 多小의 塑性變形이 일어나서 크랙先端이 둔화되며 크랙傳播는 정지되고, 따라서 Striation 이 形成된다고 생각된다. 疲勞破面에는 이러한 Striation 이외에 延性 Striation 과 유사한 것이 있으나 應力 cycle 과는 對應되지 않는 불규칙한 Striation 狀의 形態가 나타난다. 또한 실제로 事故를 일으킨 破斷面에는 Striation 이 명확하지 않는 경우도 많다. Striation 과는 별도로 비틀림 應力下에서의 破斷面의 一例를 사진 5 에 제시한다.

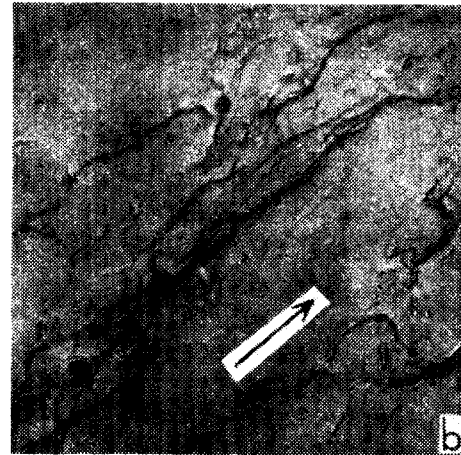
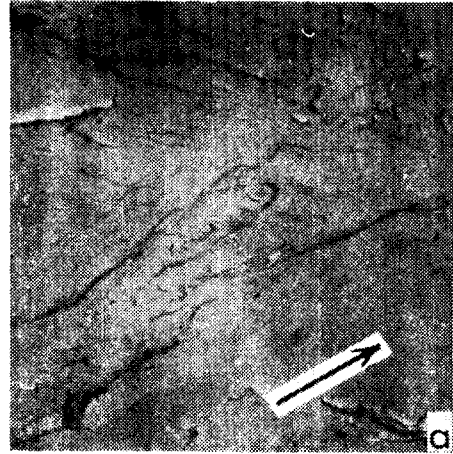


사진 5 軟鋼 : 담금질 材料에서 관찰되는 疲勞破面 (비틀림應力이 反復되었다)
→方向은 軸方向을 표시한다.

6-2 粒界破壞와 Fractograph

6-2-1 延性破壞와 Fractograph

粒界破壞中에서 延性破壞는 微小空洞이 形成되고 그것이 合體되어 最終破壞를 일으키는 것으로서 粒狀의 破面上에 dimple 이 관찰된다. 예로써 열처리한 軟鋼材料에서 관찰되는 粒狀의 破斷面의 일부를 사진 6 에 소개한다.

6-2-2 취성 파괴와 Fractograph

粒界破壞中에서 제일 많이 관찰되는 것으로써

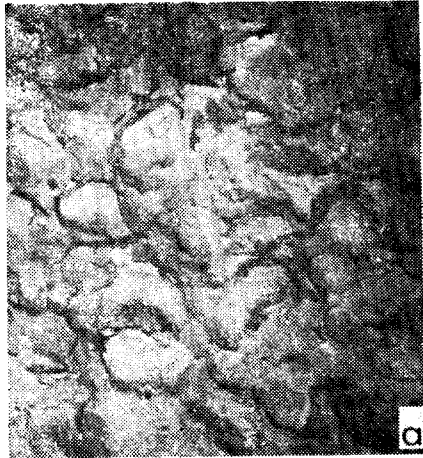


사진 6 結晶粒과 밀접한 관계를 가진 粒狀의 破斷面과 dimple의 一例

析出 또는 다른 原因때문에 粒界에서 분리 파괴된 것이다. 破面은 粒狀으로서 各粒의 表面은 평탄하고 무늬가 거의 없는 경우가 많다. 이러한 특징을 가진 破面은 뒤늦음 破壞(應力腐蝕, 수소취성화), 크리이프破壞(Creep fracture), 텀퍼링취성, 담금질크랙, 研削크랙 등의 경우에 많이 관찰된다(사진 7 참조).

6-2-3 疲勞破壞와 Fractograph

結晶粒界를 따라서 크랙이 傳播하는 경우로써 粒狀破面上에 粒內의 경우와 흡사한 Striation이나 또는 Striation 狀의 形態가 관찰된다. 또는 硬度 Level이 높을수록 疲勞破面의 특징은 대체적으로 사진 7 과 거의 동일한 形態의 破面을 갖는다.

이상은 電子顯微鏡으로 관찰한 破面 및 그 특

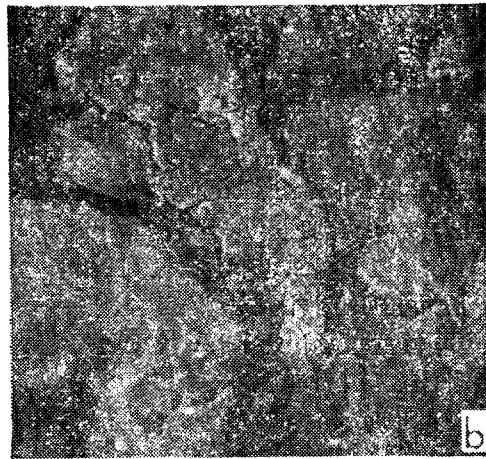


사진 7 粒狀취성파단면의 一例(a, b).

징에 대하여 또는 그 破壞機構에 對應하는 基本的인 事項들에 대하여 일반적인 概要를 기술하였는데, 破斷面의 形態에는 이외에도 여러 種類가 있다.