

파괴기구와 미시적 파면 : 연성파면

강 정 윤

Fracture Mechanism and Micro-Practography : Ductile Fractured Surface

Kang Chung Yun

1. 서 론

금속재료에 부가되는 하중이 증가함에 따라서 재료 내부에 비교적 미세한 규모의 변화가 생기고 파괴에 도달한다. 따라서 기계부품이나 구조물의 파손 사고 시에 우선 조사하여야 할 것은 파면 상태이다. 파면에는 그 파손 발생의 초기부터 최종 파단에 이르기까지의 모든 경과가 나타나 있고, 경험을 통하여 파면으로부터 파괴의 흐름을 읽을 수 있다.

이와 같은 파괴 원인이나 파괴기구를 파면으로부터 검토하려는 시도는 이미 1722년부터 프랑스 과학자 Reaumur에 의해서 이루어져 왔으며, 그 결과 파면이 파괴 원인과 밀접한 관계가 있다는 것이 밝혀졌다. 그 후 Martens 등에 의해서 연구가 계속 진행되어, 영국의 Sorby가 금속현미경을 발명함에 따라서, 결국에는 Metallography(조직학)라는 새로운 학문 영역이 생기고 발전되어 왔다. 그러나 파면 관찰 연구 자체는 금속 조직학의 발전보다 늦어졌지만, 기술자 사이에서는 계속 수행하여 왔고, 실제 기계 구조물의 파손원인을 규명하는 실마리로서 연구되어 왔다. 더욱이 1950년경부터 주사식 전자현미경(Scanning Electron Microscopy, SEM)에 의한 파면의 정밀한 관찰이 시작되면서 파면학(Fractography)이라는 학술어가 생기고, 피로파면, 취성파면의 미시적 관찰이 활발히 진행되어 왔다.

quasi-cleavage fracture 파괴기구에 따라서 형성된 파면의 양상이 차이가 나므로, 파면 양상을 분석을 통하여 어떤 파괴기구에 의해 파손되었는지 단서를 얻을 수 있거나, 파괴기구를 직접 확인할 수도 있다. 미소영역에서 파괴까지 진행되는 변화과정 균열의 발생, 전파 과정을 미세적 파괴기구라고 하고, 미시적 파면 형태를 조사하는 학문을 미시적 Fractography라고 한다. 미시적 파면 양식(mode)은 크게 입내 파괴(transgranular fracture)와 입계 파괴(intergranular fracture)로 분류

된다. 입내 파괴에는 연성파괴(dimple fracture), 벽개 파괴(cleavage fracture), 의벽개파괴(quasi-cleavage fracture), 피로파괴(fatigue fracture) 등이 있으며, 파면 양상도 각각 구별 가능하다. 입계 파괴에는 연성적 입계 파괴와 취성적 입계 파괴로 분류할 수 있다.

반면에 25배 이하의 파면 형태를 조사하는 경우를 거시적 Fractography라고 한다. 파괴된 부품의 파면을 육안 혹은 20배 이하의 저배율로 조사하면, 일반적으로 명료한 형상이 관찰된다. 인위적으로 설정한 조건에서 파괴한 파면에 대한 자료가 대단히 많다. 이들 자료를 분석하여 보면, 대부분의 경우 거시적 파면 양상은 부가된 응력 및 환경조건에 따라 독특한 양상을 나타내는 것이 특징이다.

이 강의에서는 파손, 고장 원인을 분석하는 데에 있어서 가장 중요한 단서가 되는 파면을 해석하는 데에 필요한 기초지식에 대하여 연재하고자 한다.

2. 파괴기구와 미시적 파면

2.1 슬립(Slip)과 벽개(Cleavage)

대부분의 재료는 그림 1과 같이 항복강도 이하의 응

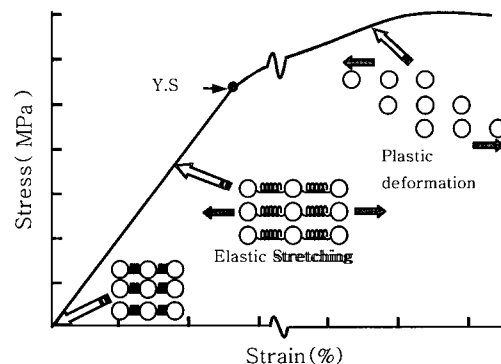


그림 1 Stress-Strain curve와 변형에 따른 원자 배열의 변화

력을 부가하게 되면 완전 탄성적인 변형거동을 하지만, 항복강도보다 큰 응력을 부가하면 소성변형(plastic strain)을 하고, 최후에 파괴된다. 어떤 주어진 하중에 의해서 생성된 소성변형의 크기는 주로 부여한 하중에 의해서 생긴 전단응력(shear stress)의 크기에 따라 변화하는 반면, 파괴조건은 주로 부과된 인장응력의 크기에 따라 변화하게 된다. 따라서 어떤 주어진 하중에 의해서 생긴 재료 내의 응력 상태를 알아야 할 필요가 있다.

예를 들어 그림 2와 같이 봉상의 단결정에 축방향으로 힘 P를 가하면, 특정한 기하학적인 결정면과 특정한 방향으로 전단응력 τ 가 생기게 되어, 이 물체는 전단변형이 발생한다. 특정한 결정면을 슬립면(slip plane)이라고 하고, 가장 조밀한 원자적층(atomic packing)면에 해당된다. 이 면은 가장 매끈한 면을 가지며, 인접면간 거리가 멀기 때문에 전위가 쉽게 움직인다.

여기서 봉의 단면적을 A_0 라고 하고, 그 면의 법선과 축방향과 이루는 각도를 ϕ 라고 하면, 슬립면 A'의 면적은 $A/\cos\phi$ 이다. 슬립은 이 면의 1개의 방향 즉 축방향과 각도 θ 인 방향으로 일어난다. 따라서 슬립면에 분해된 축방향 힘 P의 분력(전단력 PS)은 $P \cdot \cos\theta$ 이다. 따라서 분해전단응력(resolved shear stress) τ 는 (1)식으로 주어진다.

$$\tau = \frac{F}{A_0} \cos \phi \cos \theta \quad (1)$$

슬립면에 분해전단응력이 임계분해전단응력(critical resolved shear stress)에 달하면 그림 3과 같이 특정 원자면에 따라 슬립이 시작되어(b, c) 변형이 일어나고, 결국 (d)와 같이 파괴에 이른다. 또한 슬립은 그림 4의 (b)와 같이 여러 곳에서 발생하여 카드를 펼친 모양으로 변형된다. (c)는 실제로 슬립 변형한 Zn 단결정의 외관을 나타낸 것으로 여러 결정면에서 슬립이 일

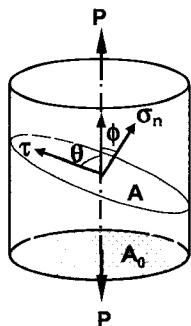


그림 2 축방향으로 하중 P가 가해진 경우, 분해 전단응력(τ)과 분해수직응력(σ_n)

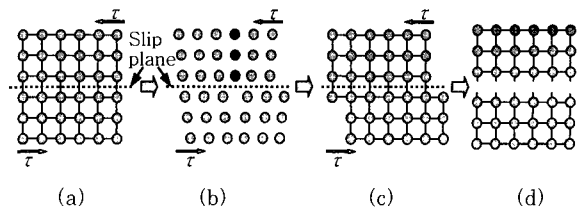


그림 3 원자론적으로 본 전단응력에 의한 slip변형과 파괴. (a)-(c) 슬립과정, (d) 파괴

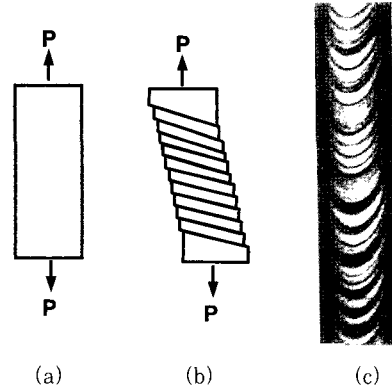


그림 4 단결정의 소성변형 (a) 변형 없음, (b) 슬립을 나타내는 변형 (c) 슬립 변형한 Zn 단결정

어난 것을 알 수 있다. 슬립이 일어나는 면과 방향은 재료의 결정구조에 따라서 좌우된다. 즉 일반적으로 결정학적으로 조밀한 원자면과 방향에서 일어난다. 예를 들면 FCC금속은 4개의 {111}면에서 3개의 $\langle 110 \rangle$ 방향으로 일어나며, BCC금속은 3개의 {110}면에서 4개의 $\langle 111 \rangle$ 방향으로 일어나며, HCP금속은 하나의 {0001}면에서 3개의 $\langle 11\bar{2}0 \rangle$ 방향으로 발생한다.

조밀육방결정에서는 분해전단응력을 0이 되도록 결정의 방향을 맞출 수 있다. 그림 5와 같이 슬립면이 힘 P의 방향과 수직이면, 별도의 슬립면이 없으므로 슬립이 일어날 수 없다. 그러나 이 때문에 임계전단응력은 아주 높다. 또 하나의 가능성은 어떤 면에 대하여 분해수직응력이 원래 각 면에서 원자들이 결합하고 있는 응력(이론격자강도)보다 크게 되면, 이들 면이 분리하는 벽개(cleavage)가 발생한다. 임의의 면에 수직응력(σ_n)은 (2)식으로 주어진다. 따라서 어떤 면에 대한 임계수직응력을 넘을 때에 벽개파괴가 발생한다.

$$\sigma_n = \frac{F}{A_0} \sin \phi \cos \theta \quad (2)$$

조밀육방격자를 갖는 Zn의 단결정을 그림 5에 표시하는 것처럼 응력축의 수직방향으로 슬립면(0001)을 두고 인장하는 경우에는 슬립이 일어나지 않고, 그 대

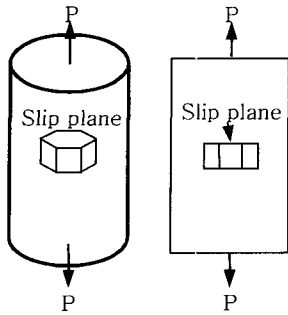


그림 5 조밀육방 단결정 금속에서 응력축의 수직 방향으로 슬립면을 둔 모양

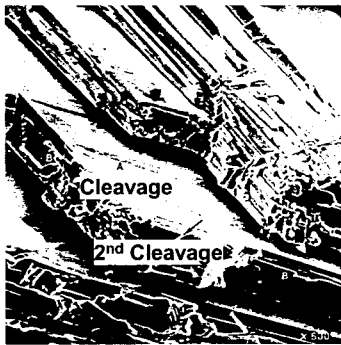


그림 6 조밀육방격자인 단결정 Zn의 벽(cleavage) 파면

신에 슬립면에서 벽개가 일어나며, 파면은 그림 6과 같이 거울처럼 비교적 매끈하고, 단층 모양과 같은 것이 특징이다. 이와 같은 벽개는 슬립계가 많은 FCC금속에서는 일어나지 않는다.

단결정은 오직 1개의 슬립계에서만 전단변형을 하지만, 다결정은 각 결정립이 서로 다른 결정방위를 가지고 있기 때문에, 전단응력을 받게 되면, 서로 다른 방향으로 슬립이 일어난다. 각 결정립이 서로 다른 변형하게 되면, 각 결정립 사이의 결합력을 유지하기 위하여, 입계에서 아주 복잡한 변형을 하게 된다. 입계 주위에서 임의의 변형을 일으킬 수 없다면, 입계에 보이드가 생성되며, 다결정 재료는 작은 변형에서도 파괴될 수 있다. 임의의 변형을 일으키기 위해서는 5개의 독립된 슬립계가 작용하여야 한다.

육방결정구조(HCP)를 갖는 금속을 제외한 대부분 금속은 5개의 슬립계를 가지고 있다. 따라서 Be, Mg, Ti, Zn 등과 같은 HCP 금속의 경우, 단결정에서는 파괴되기 전까지 크게 변형할 수 있지만, 다결정에서는 슬립계가 적어 연성이 대단히 나쁘다.

슬립과 벽개는 서로 경합한다. 결정에 하중을 부가하는 경우, 외력이 증가함에 따라서 슬립기구 상의 전단응력이 증가하고, 벽개면 상의 수직응력(σ_n)도 증가한다. 이때 슬립과 벽개의 어느 것이 먼저 일어나는 가는 것은 어떤 응력이 먼저 입계값에 달하는가에 따라서 좌

우된다. 또한 τ 와 σ_n 의 임계값은 온도와 스트레인 속도에 따라서 좌우되기도 한다.

2.2 연성 파괴

단결정 금속이 슬립에 의해서 소성변형 하여 파괴되는 경우, 그림 7과 같이 교차 슬립에 의해서 변형되고, 결국 넥킹(necking)에 의해서 파괴된다.

한편 다결정의 일반적인 연성 파괴는 각 결정립이 서로 다른 결정방위를 갖기 때문에, 각 결정립마다 서로 다른 방향으로 슬립이 일어난다. 공업재료에서는 기지보다 강도가 높은 석출물, 개재물과 같은 제 2상이 존재하고, 입계 전위 등과 같은 불연속 부분이 존재한다. 따라서 그림 8과 같이 석출물, 개재물과 같은 제 2상은 소성변형을 일으키지 않지만, 연질인 기지는 슬립에 의해 소성변형을 일으킴으로써 입자의 경계에서 미세 보이드가 생성되고, 서로 합체하여 균열을 형성한다. 결국 이 균열이 성장하여 파괴된다.

이러한 보이드의 합체에 의해서 파괴되는 연성 파괴 기구의 파면 양상은 그림 9와 같은 컵(cup) 모양을 하

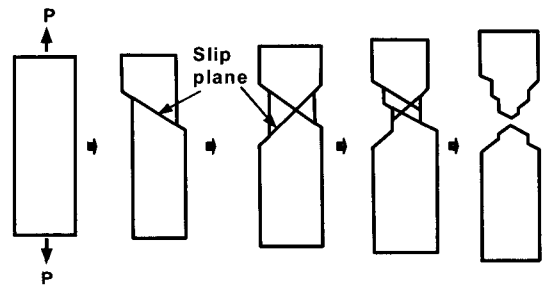


그림 7 슬립에 의한 단결정의 파괴 모식도

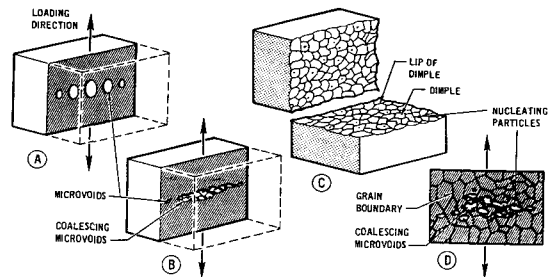


그림 8 미세 보이드 합체에 의한 딴플(dimple) 형성

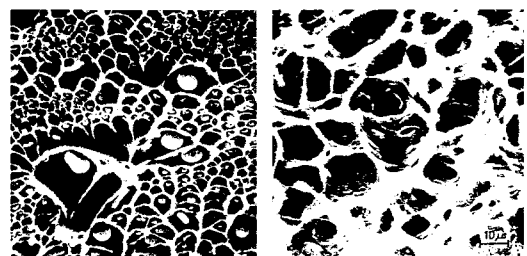


그림 9 딴플 형상(등축딴플(equiaxed dimple))

는 것이 특징이다. 이러한 파면을 딩플(Dimple)이라고 한다.

제 2상에 의한 보이드의 형성과정은 2가지 형태가 있다. 그림 10에 나타낸 것과 같이 강도가 높은 입자와 연성인 기지와의 계면에서 분리에 의해 형성하여 성장하거나, 그림 11과 같이 입자가 파괴되어 보이드가 형성되고 성장하기도 한다. 이와 같은 보이드의 형성과정은 소성변형의 초기 단계에서 미세조직을 관찰하면 확인할 수 있다. 그림 12는 Al합금 A7079를 인장시험한 결과로서, (a)는 입자와 계면이 분리되어 공공의 형성되는 것을, (b)는 입자가 파괴되어 공공(백색)이 형성되는 것을 볼 수 있다.

보이드 합체는 그림 13과 같이 양쪽 보이드 주위의 기지가 교차슬립을 일으키고, 결국 넥킹에 의해서 파괴

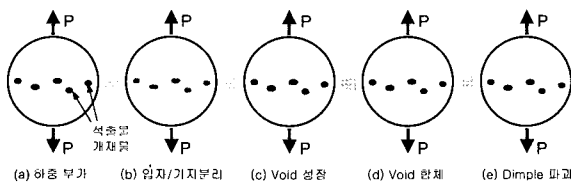


그림 10 입자와 기지의 분리에 의한 보이드의 생성과 성장의 모식도

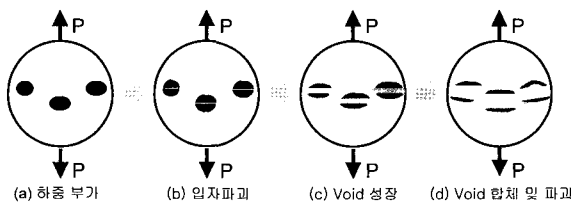


그림 11 입자파괴에 의한 보이드의 형성과 성장의 모식도

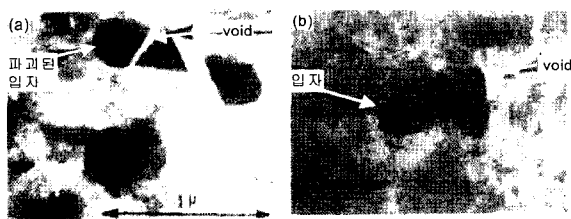


그림 12 입자파괴(a)와 입자/기지 분리에 의한 보이드 생성을 나타내는 미세조직(Al합금 7079)

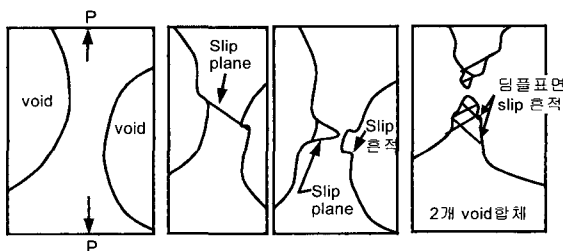


그림 13 보이드 합체에 의한 파괴의 모식도

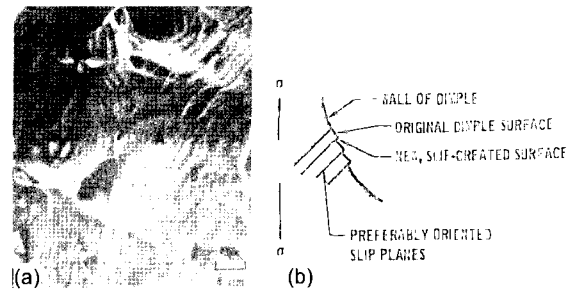


그림 14 큰 딩플 벽에 나타나는 변형(slip) 흔적(a)과 슬립에 의한 형성 과정 모식도(b)

되므로 발생한다. 그림 14는 보이드의 합체 과정에서 기지가 슬립에 의해 소성변형 하는 동안에 생긴 슬립선의 흔적으로서, 보이드 내의 자유표면에 나타는 경우이다. 그러나 이러한 양상이 관찰되는 경우가 아주 드물다. 한편, 실제 파면에서 딩플 내에 입자가 존재하는 경우도 있지만, 대체로 파괴 도중에 떨어져 나가므로 파면 내에 비어 있는 경우가 많다.

딩플의 형상은 작용하는 주응력 방향에 의해 좌우된다. 전술한 그림 8에서 알 수 있는 바와 같이 수직인 응력에 의해서 공공이 형성되고 합체되어 파괴되는 경우는 그림 9와 같이 등축딩플(equiaxed dimple)이 형성된다. 이 경우 표면과 경사지게 관찰하면, 딩플이 변형된 것처럼 보이는 경우도 있다.

한편 전단응력 혹은 티어(tear)응력이 걸리는 경우에는 그림 15와 같이 연신된 딩플이 형성된다. (a)와 같이 전단(shear)응력에 파괴되는 경우에는 연신 딩플이 형성되고, 전단응력 방향과 동일한 방향으로 향하는 것이 특징이다. (b)와 같이 tear응력에 의해 파괴되는 경우에도 연신 딩플이 형성되지만, 딩플의 연신 방향은 균열이 시작되는 방향을 향하고 있고, 상하 파면의 연신 방향은 동일한 방향을 향하는 것이 특징이다. 그림 16은 각각

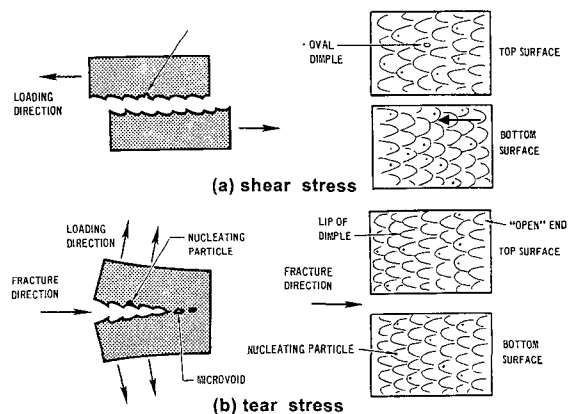


그림 15 티어(tear)와 전단(shear) 응력에 의한 연신 딩플의 형성에 대한 모식도

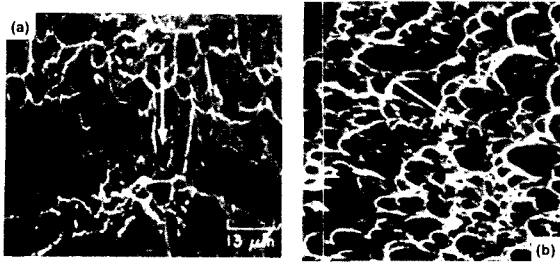


그림 16 티어(a)와 전단(b)에 의해 형성된 뒹플



그림 17 비틀림(twist)에 의해 형성된 뒹플 형상

전단응력(a)과 티어응력(b)에 의해 파괴된 파면의 일예를 나타낸 것이다. 결국, 티어 응력과 전단응력에 의해 형성된 연신 뒹플은 형상이 같지만, 티어 응력에 의해서 형성된 것은 상하 파면의 뒹플 방향이 서로 동일 방향이지만, 전단응력에 의해서 형성된 것은 상하 파면의 뒹플 방향이 반대인 것이 특징이다. 따라서 파면의 전체 형상이 명확하지 않을 때는 상하 샘플의 파면을 관찰하여 뒹플 배향 방향을 알게 되면, 어떤 응력에 의해서 파괴된 것인지를 구별할 수 있다.

또한 비틀림(twist)응력에 의해 연성 파괴가 일어나는 경우에는 전단응력에 해서 형성된 뒹플 양상과 동일하지만, 아주 저배율로 관찰하면, 그림 17과 같이 비틀림 방향을 표시하는 회전 또는 원형의 패턴이 보이는 것이 특징이다. 그림에서 뒹플의 배향은 비틀림과 동일한 시계방향으로 되어 있다.



- 강정윤(姜晶允)
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 접합공학, 계면미세조직제어
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr