

파괴기구와 미시적 파면(II) : 취성파면

강정운

Fracture Mechanism and Micro-Practography : Brittle Fractured Surface

Kang Chung Yun

1. 벽개 파괴의 파면

벽개 파면은 원자면에 따라서 파괴되므로 매끈하다. 실제 단결정의 경우, 저배율에서는 거울 면과 같이 아주 매끈하다. 또한 벽개파괴에 의해서 파괴된 다결정 시료는 현미경의 빛 때문에 밝은 작은 면의 집합체(cut cluster)로 보인다. 그러나 단결정에서 벽개 균열은 여러 곳에서 발생하므로 같은 모양의 벽개면이 여러 평행한 면에서 균열이 전파된다. 이들 균열이 서로 만나는 경우, 균열이 서로 연결되어 최후에 파괴된다. 그림 1은 인접면 상에 이동하는 2개의 벽개균열이 서로 만나 연결되는 과정을 나타낸 것이다. (a), (b)는 벽개 균열이 성장하는 과정이고, (c)는 다른 벽개 면에 의해서 서로 합쳐지는 경우이고, (d)는 tear에 의해 합쳐지는 것을 나타낸 것이다. 그림 2의 (a)는 Fe-Si 단결정의 벽개 파면을 Ni 도금한 후, 단면을 관찰한 광학현미경 사진으로, 각각의 1차 벽개 균열(수평)이 2차 벽개(수직)에 의해서 연결된 것을 알 수 있다. (b)는 -196°C에서 충격파괴한 연강을 TEM으로 관찰한 벽개 파면으로서, 1차 벽개면에(100)면에 따라서 2차 벽개가 발생하여 연결됨으로써 벽개균열이 계단을 이루는 것을 알 수 있다.

특히 2차 벽개에 의해 연결되는 경우, 직선적인 계단의 모양을 이루는 것이 특징이다.

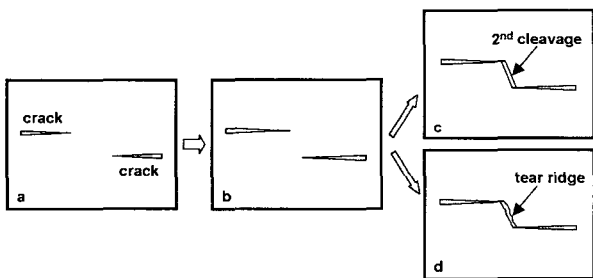


그림 1 벽개균열의 합체에 의한 파괴 모식도 (a) 평행한 면에서 벽개균열 발생, (b) 벽개균열 성장 (c) 2차 벽개면에 의한 합체 (d) tear에 의한 합체

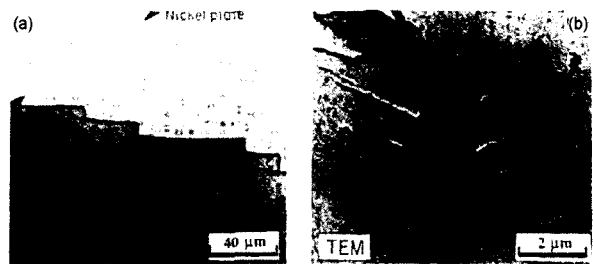


그림 2 Fe-Si 단결정의 벽개 파면에서 2차 벽개(수직 방향)에 의한 계단 형상. (a) 파면을 Ni도금 후 단면 관찰 광학현미경사진, (b) TEM 사진

그림 3의 (a)는 Fe-3%Si 단결정의 벽개 파괴한 단면의 광학현미경 사진으로, 서로 다른 벽개 면에서 성장한 균열이 연결될 때 굴곡되어 있음을 나타내고 있다. 이것은 약간의 소성변형이 있었음을 의미한다. (b)는 벽개파괴의 전형적인 파면인 리버패턴(river pattern)이고, 벽개 단 사이에 기지가 당겨 찢어진 상태(tear)로서 연결되어 있다.

벽개파괴는 특정의 결정면(벽개면)에 따라서 균열이 전파하는 파괴이지만, 공업재료는 다결정체이고, 개재물, 석출물 등과 같은 제 2상이 존재하므로, 균열이 하나의 벽개면에서 생성되지 않고, 여러 개의 벽개면에서 형성되어 불연속적으로 전파하고 서로 합체한다. 따라서 공업재료에서는 평탄한 면이 아니고, 그림 4과 같이



그림 3 Fe-Si 합금의 벽개 파단한 단면(a)과 극연강의 벽개파면(b)

여러 개의 벽개면이 형성되고, 벽개면과 벽개면 사이에 높이 차가 있으므로, 계단 모양이 된다. 벽개의 모양이 강의 흐름과 같아서 이 파면을 리버패턴(river pattern)이라고 한다. 또한 균열의 전파과정에서 벽개면이 입계 혹은 아입계와 만나는 경우, 그림 5(a)와 같이 양 결정립이 기울어지는 경우와 (b)와 같이 비틀리는 경우가 있다. 기울어지는 경우는 그림과 같이 벽개단이 그대로 전파되지만, 비틀리는 경우는 새로운 많은 작은 스텝이 형성된다. 후자에 대하여 실제 관찰한 벽개파면을 그림 6에 나타낸 것으로, 리버패턴을 형성하는 작은 스텝들은 입계로부터 형성된다. 그 기구는 다음과 같이 설명할 수 있다. 일반적으로 입계에서는 결정 방위가 변화하므로, 당연히 균열이 전파하는 벽개면도 그 방위가 변화하므로, 그림 7(a)의 사선부와 같이 큰 스텝이 입계에서 형성되어야 하지만, 큰 스텝을 한번에 만드는 것은 역학적으로 불가능하다. 그러나 (b)와 같이 미소한 스텝을 여러 개를 형성하여, 거시적으로는 비틀림

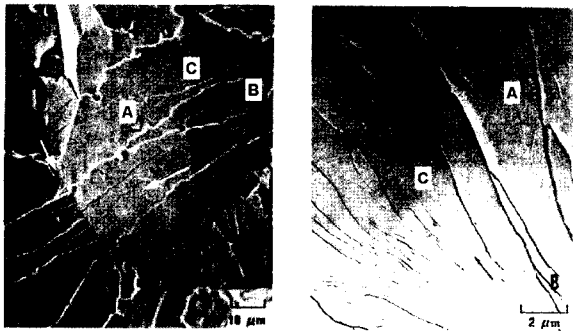


그림 4 전형적인 벽개파면 (a) SEM, (b) TEM. A:벽개단(Cleavage Step), B:리버패턴(River pattern), C:Tilt boundary, D:Twist boundary

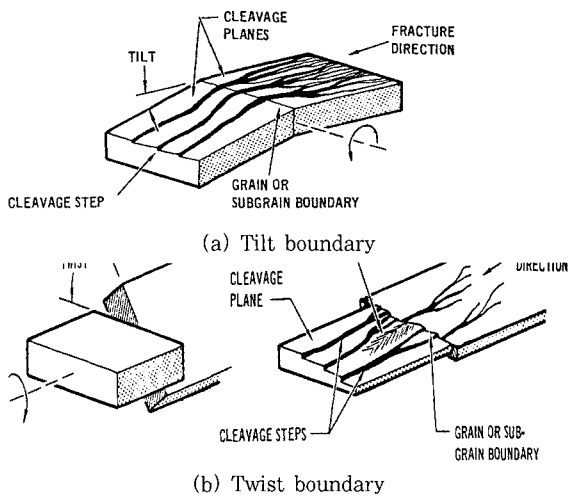


그림 5 벽개 균열 전파에 미치는 아결정 및 결정입계의 영향

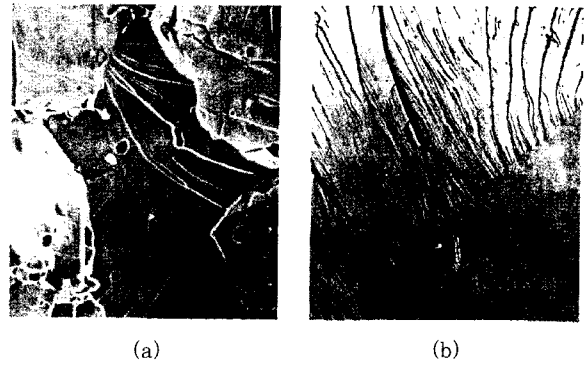


그림 6 Tilt boundary에서 벽개 균열 전파 (a) SEM, (b) TEM

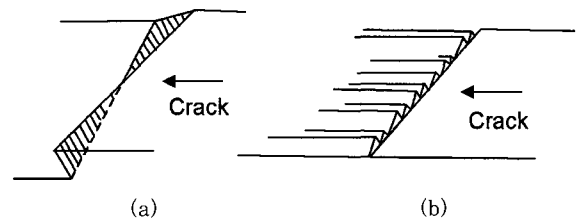


그림 7 Tilt boundary에서 벽개 균열 전파 기구 (a) 한번에 전파, (b) 여러 단계로 전파

없는 것처럼 입계를 지나간다. 형성된 작은 스텝은 여분의 면들을 형성하여야 하므로, 균열 전파속도에 방해가 된다. 스텝의 간격이 등간격이 아니므로, 균열 전파속도는 불균일 하게 되고, 스텝이 적은 곳에서는 빠르고, 스텝이 많은 곳에서는 느리다. 따라서 스텝이 큰 곳에서는 빠르므로 점점 확대되고, 역으로 작은 곳에서는 축소하여 간다. 결국 균열이 전파하는 과정에서 파괴에 요하는 면적이 적게 되므로 균열이 전파하는 데에 에너지 소비가 적어지므로 벽개 단들이 결합되어 최종적으로 하나의 평면으로 된다. 이와 같은 기구는 강과 지류와 유사하다는 의미에서 리버 패턴(River pattern)이라고 한다. 결국 균열 전파 방향은 하류 방향이다.

체심입방 및 육방조밀격자 금속에서는 변형 쌍정(transformation twin)이 존재하거나, 변형 중에 쌍정이 형성되는 경우가 있다. 균열이 성장할 때 쌍정과 만나게 되면, 쌍정과 기지와의 분리로 균열 방향이 변화하는 경우가 있다. 그림 8(a)은 Fe-Si 단결정에서 기계적 쌍정을 갖는 벽개 파괴 시편의 단면 사진이고, (b)는 Fe-25%Cr합금에서 [100] 방향에 따라 벽개균열의 전파와 쌍정 구역에서 파면양상을 나타낸 것이다. 이것으로부터 쌍정과 벽개균열이 상호작용을 하고 있음을 알 수 있다.

대부분의 BCC금속, 특히 페라이트강 벽개파면에서는 그림 9과 같이 용기한 형상이 자주 관찰되는 데, 이것을 텅(Tongue)이라고 한다. 이것은 변형쌍정의 방향에 따라 짧은 거리로 균열이 전파되기 때문에 형성된다. 한편 쌍정과 벽개면과의 상호작용은 간혹 헤링본(herringbone) 패턴이라는 그림 10에 표시한 것과 같

은 파면을 만드는 경우도 있다. 이것은 기본면 {100} 위의 벽개는 미드립(midrib)이라고 부르는 입계의 양측에서 쌍정 계면의 {112} 위에 벽개로 변화한 것이다.

2. 혼합기구와 의벽개 파괴

대부분 공업재료에서 파괴는 우선 벽개에 의해서 일어나고, 다음에 보이드 합체에 의해서 일어날 것이다. 그림 11은 철강재료에서 나타나는 혼합기구에 의해 파괴된 파면을 나타낸 것이다. (a)는 압연한 0.4%탄소강의 파면이고, (b)는 0.08%C의 저탄소강을 0°C에서 인장시험한 파면을 나타낸 것이다. 모든 연성파괴의 덩플과 취성파괴의 백개 파면이 혼재하고 있고, 벽개는 소단위로 독립된 것이 특징이다. (a)에서 변형을 일으킨 부분은 구별이 어렵지만, 벽개성이 약한 영역(rosette)을 가진 파면이 존재한다. 이와 같은 영역을 티어리지(tear ridge)라고 칭한다. 이와 같이 실제로는 벽개이지만, 티어 혹은 덩플이 동시에 수반하는 파괴를 의벽개 파괴라고 한다.

그림 12는 의벽개 파괴기구의 모식도를 나타낸 것이다. 거의 동일한 면에서 발생한 3개의 균열이 성장하여 결합하고, 연성파괴에 의해서 티어리지가 형성되어 파괴된다.

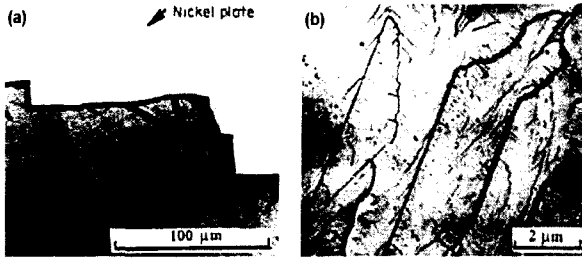


그림 8 벽개균열과 쌍정의 상호작용으로 나타난 파면 양상 (a) 파면의 단면조직 (b) 리버페턴 상에 나타난 쌍정

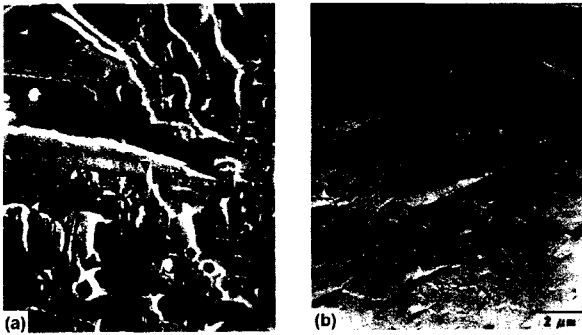


그림 9 백개면에 있는 텅(Tongue)의 형상 (a) SEM, (b) TEM



그림 10 Herringbone 조직

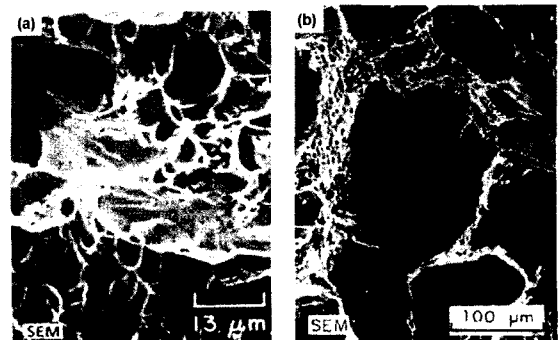


그림 11 벽개와 덩플 혼합 파면 (a) 0.4%C 탄소의 열간압연강의 인장 파면 (b) 0.08%C 저탄소강의 0°C에서 인장 파면

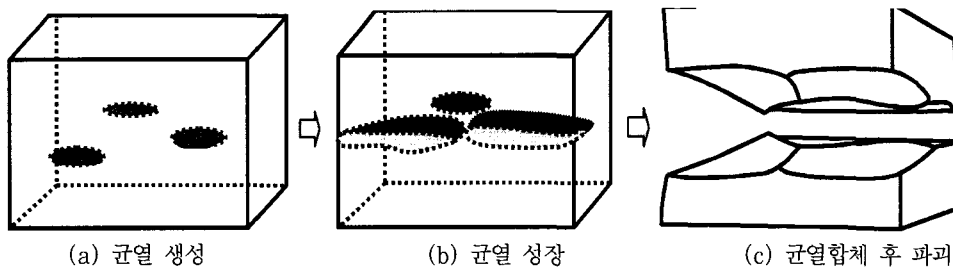


그림 12 거의 동일 결정면에 균열의 합체와 소성변형에 의한 티어리지(tear ridge) 형성

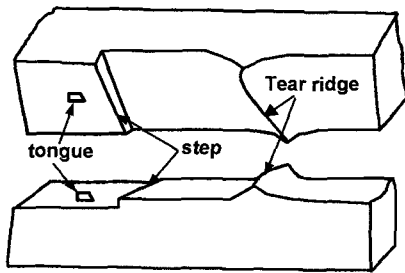


그림 13 의벽개 파괴에 나타나는 파면 양상

그림 13은 의벽개 파괴에서 나타나는 나타내는 파면 형태의 모식도를 나타낸 것이다. 벽개 파면에서 나타나는 스텝과 덩이 형성되고, 최후에 연성파괴 된 티어리지가 형성된다.

의벽개 파괴는 주로 템퍼마르텐사이트(temper martensite) 조직 혹은 베이나이트 조직을 갖는 강에서 많이 나타나고, 그림 14과 같이 벽개파면 단위의 중심에서 균열이 시작되는 것이 특징이다.

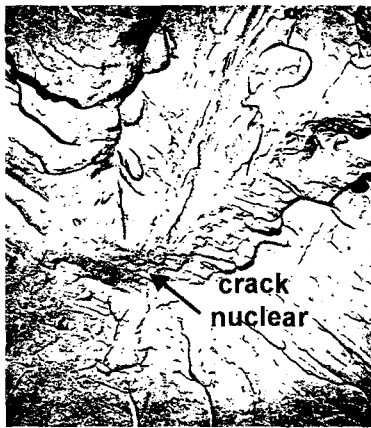


그림 14 의벽개 파면



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