

연재강의 : 파면해석

거시적 파면(III) : 피로 파괴(1)

강 정 윤

Fracture Mechanism and Macro-Practography

- Fatigue Fracture(1) -

Chung-Yun Kang

1. 피로에 의한 파손

1.1 피로파괴의 개요

실제 기계부품 사용 중에 파괴의 70%는 재료의 피로에 의한 것으로 알려져 있다. 피로파괴는 비교적 장기간에 걸쳐서 서서히 진행되는 파괴이고, 부하가 반복됨에 따라서 균열이 진행되고, 정체되기도 하므로, 특징적인 파면이 나타난다. 즉 그림 29와 같이 최대전단응력에 의해 금속재료 중의 전위가 슬립에 의해 이동하는 것을 시작으로 하여, 점차 슬립이 중첩하고 전위가 축적되어, 전위의 이동이 곤란하게 되면 결국 미세 균열이 발생한다.

일단 균열이 생기면, 이 균열은 그림 30에서 보여주

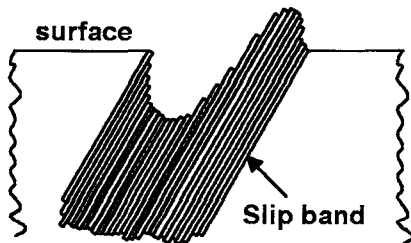


그림 29 피로 과정에서 슬립의 중첩에 의해 생긴 균열

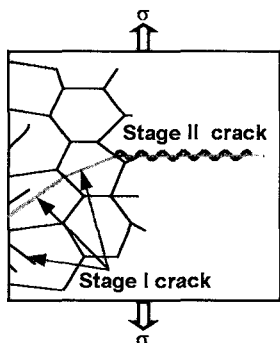


그림 30 피로과정에서 균열의 생성과 성장의 모식도

는 것과 같이 최대인장응력에 의해서 직각 방향으로 확대 진행한다. 따라서 피로파면은 일반적으로 2개의 영역으로 나누어진다. 즉 피로균열 전파영역과 최종 과부하에 의한 파괴 영역으로 나누어진다. 최종 과부하에 의한 파괴 영역은 균열의 성장으로 온전하게 남아있는 부분이 면적이 적어, 부여된 반복하중을 견딜 수 없기 때문에, 대부분 급속하게 파괴가 일어나고, 소성변형을 거의 수반되지 않는 것이 특징이다.

따라서 피로하중에 의해서 파괴된 부품의 가장 큰 특징은 각 영역에서 큰 소성변형을 나타내지 않는 것이다.

우선 일정한 반복 하중이 부과된 경우에 피로균열 성장 과정을 살펴보면 다음과 같다. 그림 31은 피로균열의 성장 양상과 하중 사이클의 관계를 나타낸 것이다. 대부분의 경우 응력은 항복강도보다 낮은 응력이 부과 되는 것이 일반적이다. 그러나 균열의 기점에 큰 응력 집중 현상에 의해서 각 사이클 마다 국소적인 소성변형을 일어나는 것으로 생각되고 있다. 각각의 사이클에 따라서 스트라이에이션이 나타나지만, 각 사이클에서 균열의 전파거리는 아주 작기 때문에 스트라이에이션은 해상도가 아주 높은 고배율에서만 관찰되므로 거시적 파면 양상이라고 볼 수 없다. 그림 32는 피로하중에서

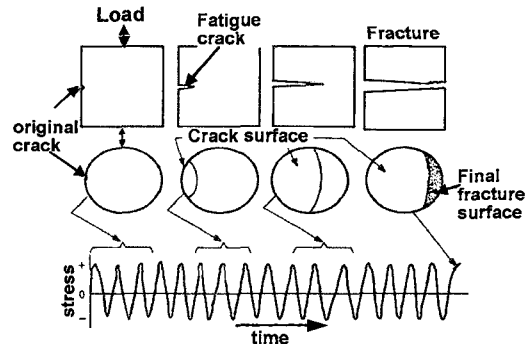


그림 31 피로시험 시 피로균열의 위치와 사이클 수와의 관계

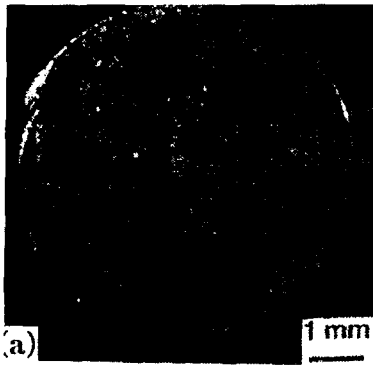


그림 32 일정 하중과 일정 사이클로 피로시험에 의한 파괴된 파면

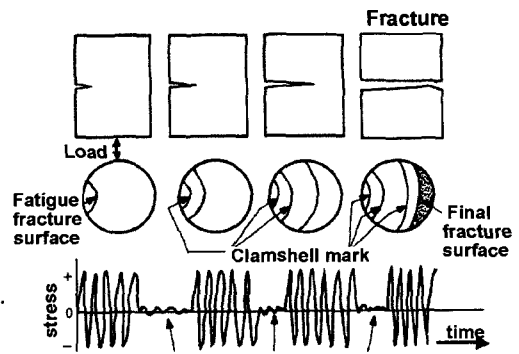


그림 34 피로 시험 시 조개껍질 모양(Clamshell mark) 파면의 형성과정의 모식도

파괴된 파면을 나타낸 것이다. 이들 시험은 일정한 최고 하중에서 일정한 사이클로 계속하여 파괴에 이르기까지 시험한 것이다. 균열의 성장 영역과 최종적으로 과부하에 의해 분리된 영역과 구별이 명확하지 않다.

그러나 대부분의 피로파괴에서는 피로에 의해 파괴된 것으로 생각할 수 있는 그림 33과 같은 파면 양상인 비치마크(beach mark)를 나타낸다. 이러한 파면은 외관 모양을 근거로 비치마크, 조개껍질 마크(clamshell mark or pattern), 굴껍질 마크, 물결마크 등 다양한 명칭으로 불리고 있다. 앞으로는 이러한 파면 모양을 조개껍질 모양이라고 표현한다. 이러한 파면은 파괴된 표면이 피로과정 중에 국부적으로 계속 변화하였다는 것을 시사한다. 피로과정 중에 파면의 형상 변화는 균열 성장속도나 표면산화의 차이와 같은 요인에 의해서 일어난다.

이러한 조개껍질 파면의 마크의 형성과정을 파악하기 위하여, 그림 34와 같이 인장-압축 하중을 반복하여 원통형의 시편에 부가하는 경우를 생각하자. 그리고 시편 한쪽에서만 균열이 형성되고, 반대쪽으로 향하여 균열이 진행한다고 가정하자. 우선 균열이 어느 정도 진행된 후에 하중을 정지하고, 표면을 산화시킨 후, 다시

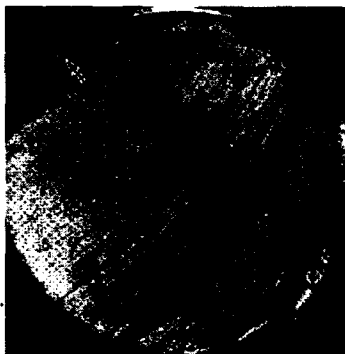


그림 33 피로파면에서 나타나는 전형적인 비치마크(Beach mark)

하중을 반복 부가하여, 균열을 전진시키고, 다음에 하중을 정지시킨다. 이런 경우, 새로운 표면은 산화하기 시작하고, 앞에 형성된 균열 표면은 더욱 산화되어 두꺼운 산화피막을 형성한다. 이러한 과정을 그림 34와 같이 파괴가 일어날 때까지 계속한다. 최종적인 과부하에 의한 파면은 과부하 상태를 나타내는 반면, 피로균열이 성장한 표면 부분은 산화물 두께 차이 때문에 조개껍질 모양을 나타낸다. 따라서 조개껍질 모양은 파괴하기 까지 연속적으로 이동하는 것이 아니고, 간헐적으로 성장하는 균열 형성에 의해서 좌우된다. 즉 반복하중의 진폭이 변동하고, 간헐적으로 정지되는 경우에는 피로과정에 대응하는 표면의 마모상태도 변화하므로, 조개껍질 모양이 형성된다. 균열이 진행하여 부재의 단면이 작게 되면, 균열의 생성은 빠르게 되고, 이 때문에 조개껍질 모양의 밀도도 낮게 되고, 한층 명료하게 나타내게 된다.

따라서 조개껍질 모양은 균열의 기점을 파악할 수 있는 기준이 된다. 그러나 피로 균열이 아무 장애가 없이 전파하여 간다면, 아마 조개껍질 모양은 나타나지 않을 것이다. 이것은 앞의 그림 31에 나타내는 것처럼 피로 시험을 파괴에 도달할 때까지 중단시키지 않고 연속하여 실시하는 경우에 나타난다. 즉, 실험실에서 실시하는 피로시험과 같이 일정한 사인(sin)곡선 형태의 반복 하중에서는 출현하지 않는다. 한편, 실제 사용 중 파손에서는 이와 같은 정상 부하와 더불어, 가끔 간헐적으로 높은 충격적인 부하가 걸리므로, 이것에 의해서 균열이 진행하여 조개껍질 모양이 출현한다.

2.2 응력의 영향

피로파면 형상에 미치는 하중(응력)의 영향을 살펴보자. 그림 35는 인장-인장, 인장-압축, 일방향 굽힘, 반전 굽힘, 회전 굽힘과 같은 하중의 종류와 응력의 크기에 따라 나타나는 파면 형태를 모식적으로 그린 것이

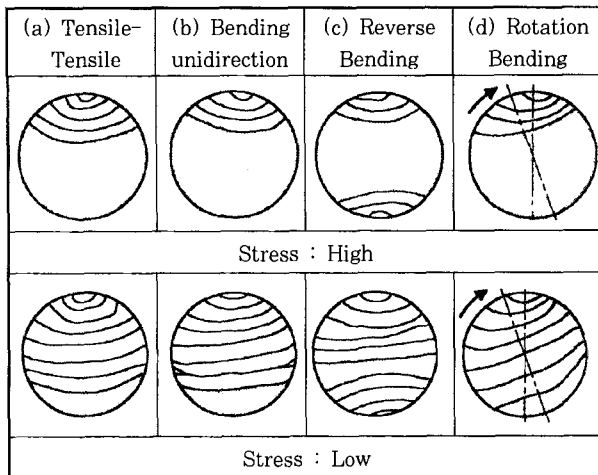


그림 35 피로파면 형상에 미치는 하중 종류와 크기의 영향

다. 여기서 점으로 표시된 부분은 최종 단계에서 급속하게 파괴된 영역이다. 응력이 비교적 낮은 경우는 균열이 과부하에 의해 최종적인 파괴 영역까지 전파하기 위해서 많은 사이클이 필요하다

따라서 조개껍질 모양의 파면이 점유하는 영역의 상대적 양은 많게 된다. 그림 35(a)에 나타난 것처럼 넓고, 최종 과부하에 의한 파면은 좁게 된다. 역으로 응력이 크면, 균열은 최종 파괴가 일어날 때까지 그다지 넓게 전파되지 못하여, 오히려 최종 과부하에 의한 파면의 상대비가 높을 것이다.

일방향으로 굽힘 응력이 반복되면, 그림 35(b)와 같이 이전의 인장과 동일한 파면 양상(a)을 나타낼 것이다.



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

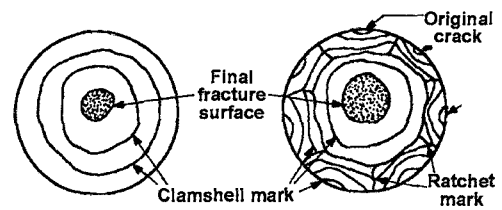


그림 36 회전굽힘 하중에 의한 피로 파면의 모식도. (a) 내부 균열이 동시에 발생한 경우, (b) 표면에 여러 개의 균열이 발생하여 생긴 라체트 마크(ratchet mark)

그러나 시료에 반대쪽에서도 동시에 굽힘 응력이 걸리면, 균열은 아마 그림 35(c)와 같이 양측에서 동시에 발생한다. 또한 낮은 응력에서는 대부분 조개껍질 모양의 파면이 대부분 차지할 것이다.

단순 회전 굽힘에서는 회전 시 어떤 시기에 표면의 어떤 지점에 종축 방향의 인장력이 걸린다. 만약 피로 균열이 하나만 생긴다면, 파면의 외관은 그림과 같이 된다.

그러나 피로파괴는 균열이 여러 곳에서 동시에 발생하여 주변으로부터 전파될지도 모른다. 이러한 경우에 나타나는 파면의 형태를 그림 36(a)에 나타낸다. 피로 균열이 축방향 여러 곳에서 발생하면, 피로균열이 다른 레벨에서 마주치고, 이것들이 하나로 결합하는 형태로 파괴가 일어난다. 이 경우 그림 36(b)와 같이 라체트 마크(ratchet mark)라는 파여진 모양이 남는다.