

거시적 파면(I) : 응력상태와 파손양식

강 정 윤

Macro-Fractography (I) : Stress and Failure Mode

Chung-Yun Kang

1. 입계파괴

기계부품이나 구조물의 파손사고 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.

파괴된 부품의 파면을 육안 혹은 20배 이하의 저배율로 조사하면, 일반적으로 명료한 형상이 관찰된다. 인위적으로 주어진 파괴조건으로 파단된 파면에 대한 자료는 아주 많고, 대부분의 경우 거시적 파면 양상은 부가된 조건에 따라 독특한 양상을 타나낸다. 이제부터는 파괴모드와 거시적 파면 형상과의 상관성에 대해 설명한다. 또한 주로 철강재료를 대상으로, 기계 부품의 파손원인이 그 파면 형태로부터 어떻게 추정되는가에 대해서 설명한다.

철강재료의 파괴에는 연성, 취성의 2개 파손형태가 있고, 그것이 놓인 환경조건, 예를 들면 온도, 응력조건, 부가속도에 의해서 연성, 취성의 형태로 되거나, 양자가 혼합한 형태를 가지기도 한다. 연성파손(전단파손)은 섬유상 파면을 나타내고, 소성변형이 수반되며, 그 파손은 전단응력에 의해서 일어난다. 철강은 상온에서 체심입방격자(BCC)를 형성하고, 전단에 의한 파손은 (110)면에서 일어난다. 한편 취성파괴(벽개파괴)는 거의 소성변형을 생기지 않고, (100)면에서 분리되어 파괴한다. 따라서 파면 위에 결정면은 랜덤한 방향으로 노출되므로, 파면을 회전하거나, 빛을 쬐이면 그림 1과 같이 면이 반짝반짝 빛나는 것이 특징이다.

벽개파면 또는 전단파면 중에서 취성적으로 파괴된 부분의 파면은 그림 2에 나타낸 것처럼 파괴 기점을 중심으로 세브론(chevron) 혹은 등골(herring bone) 모양으로 나타나는 것이 특징이다. 아래 그림과 같이 파단 모양은 파괴 기점을 중심으로 서로 직각으로 교차

하는 곡선 군을 형성한다. 또한 외측에는 약간의 시어 럽도 보인다.

이 2개의 파단 양식은 모두 결정 입내에서 일어나는 파단이지만, 철강에서는 이것 이외에 결정립계에서 일어나는 취성파괴가 있다. 예를 들면, Ni-Mn강의 템퍼링 취성과 같이 결정립계의 결합력이 불순물, 석출물에 의해서 약해져, 파괴가 입계를 따라서 일어난다. 또는 고온에서 크립 파손과 같이 입계가 입내보다도 약하게 되어, 파괴가 그림 2와 같이 입계에서 일어나는 경우가 있다.

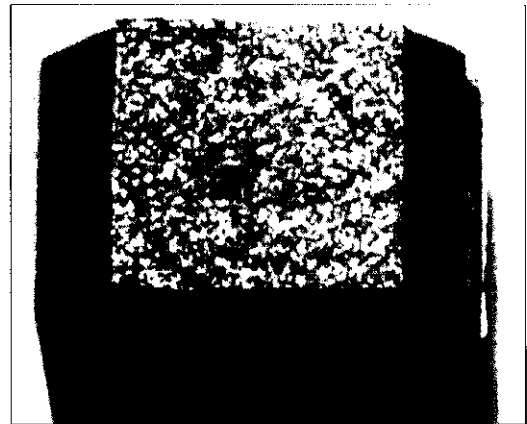


그림 1 취성 파괴된 거시 파면의 특징

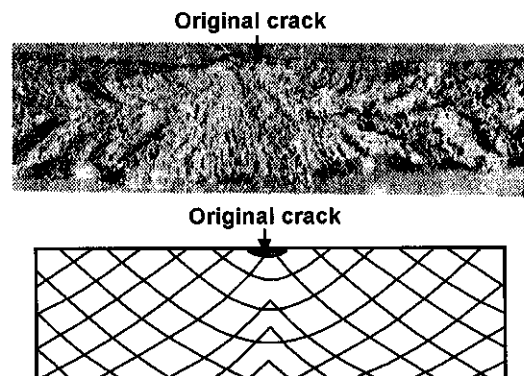


그림 2 보일러 강관의 충격파면과 모식도

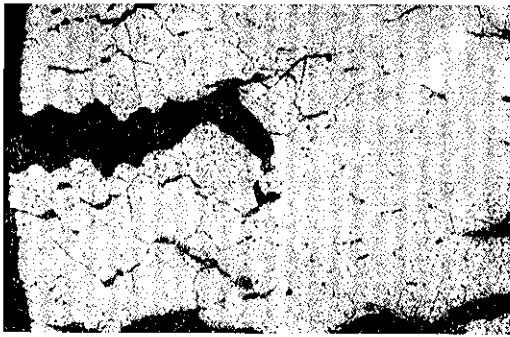


그림 3 고온에서 파괴된 철화처리된 강의 입계균열

2. 응력상태가 파손에 미치는 효과

물체 내에 어떤 한 점에서 응력 상태는 3개의 서로 직각인 벡터로 표시할 수 있다. 이 벡터를 주응력이라고 하고, $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ 으로 나타낸다. 또한 이 부분에 작용하는 최대 전단응력을 주응력 중 최대인 것과 최소인 것과의 차의 1/2에 상당하고, 주응력과 45°의 각도를 이루는 면 위에 생긴다.

설계의 기준으로는 일반적으로 재료의 인장강도, 혹은 항복강도가 채용되지만, 이것들이 반드시 재료의 기본적인 특성이라고는 말할 수 없다. 재료에는 고유의 전단강도와 응집강도가 있고, 이 2개의 강도와 파손을 일으키는 부분에서 주어진 전단응력, 인장응력과의 상호관계에 의해서 그 파손 양식이 정해진다고 생각하는 것이 합리적이다.

일반적으로 기계부품에서는 그림 4와 같이 그 부품의 형상 또는 부하가 걸리는 방향에 따라서 어떤 부분에 최대인장응력과 최대전단응력이 생기지만, 그 상대비는 단순한 응력상황에서 그림에 표시한 것처럼 일정하다. 따라서 재료 고유의 응집강도 (벽개 강도 또는 입계 파

Load type	Stress ratio	Parts
	$\sigma / \tau_{max} = 2 \text{ or } \sqrt{3}^*$	Trust part
	$\sigma / \tau_{max} = 2 \text{ or } \sqrt{3}^*$	Too th of gear
	$\sigma / \tau_{max} = 1$	Shaft
	$\sigma / \tau_{max} = 1$	Bolt, rivet

Maximum shear stress theory : 2
Strain energy theory : $\sqrt{3}$

그림 4 하중의 종류와 주응력(σ)/최대전단응력(τ_{max})비

괴 강도)보다 인장응력이 크면, 그 부분에서 취성파괴가 일어나고, 한편 최대전단응력 쪽이 이것보다 먼저 재료 고유의 전단강도보다도 크게 되면 전단 파괴가 일어날 것이다. 이것을 그림으로 나타내면 그림 5와 같다. 그림에서 종축에 전단응력을 잡고, 횡축에 수직응력을 잡으면, 재료와 고유의 전단강도, 응집강도는 각각 그림 중에 수평직선과 수직선으로 나타낸다. 또한 항복점은 금속재료에 의해 반드시 일정값을 나타낸다고 할 수 없으므로 일정한 폭을 가진 범위로 나타낸다. 응력상태로서 단순인장, 순수 비틀림, 노치 인장을 생각하자. 단순인장에서는 그림 4에 표시한 것처럼 인장응력과 최대전단응력 비는 늘 2 : 1 이고, 순수 비틀림에서는 1 : 1 이다. 또한 노치가 있는 시편의 인장의 경우는 수직 응력이 일반적인 인장의 경우보다 크게 된다고 생각하자. 따라서 이들의 응력비는 그림 5에서 일정 경사를 갖는 직선으로 나타낸다. 이 직선과 먼저 일정한 재료의 강도에 의한 수평선과의 교점에서 항복 혹은 파괴가 일어난다고 생각할 수 있다.

그림 6은 봉상의 재료에 단순 인장하중이 부가된 경우 재료 내에 작용하는 응력 분포(a)와 형상 변화를 나타낸 것이다. 비교적 경한 재료에서는 그림 5의 (b)와 같이 인장축에 직각으로 파단 되고, 연질재료에서는 (c)와 같이 인장축과 45°를 이루는 전단 파괴가 발생한다.

그림 7은 봉상의 재료에 압축하중이 부가된 경우 재료 내에 작용하는 응력 분포(a)와 형상 변화를 나타낸

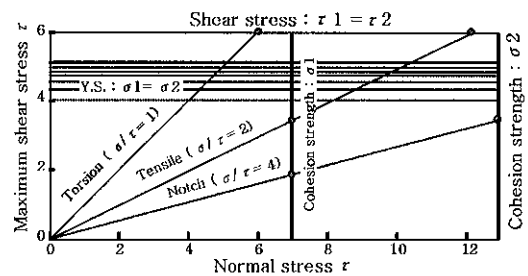


그림 5 재료의 강도와 응력상태가 파손양식에 미치는 영향

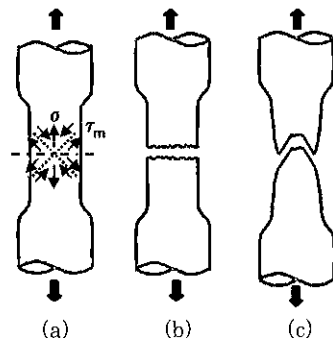


그림 6 단순 인장에서 파괴 양식. (a) 단순 인장 응력 분포 (b) 취성재료 (c) 연성재료

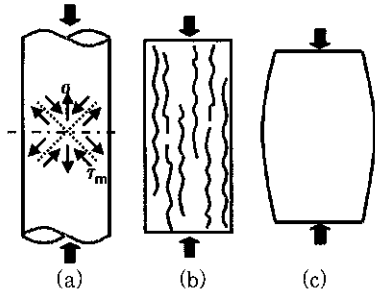


그림 7 단순 압축에서 파괴 양식. (a) 단순 인장 응력 분포 (b) 취성재료 (c) 연성재료

것이다. 경한 재료는 그림 7의 (b)와 같이 내부에 균열이 발생하고, 연질재료는 (c)와 같이 좌굴 현상이 발생한다. 그림 8은 봉상의 재료에 단순 비틀림 하중이 부가된 경우 재료 내에 작용하는 응력 분포(a)와 형상 변화를 나타낸 것이다. 단순 비틀림의 경우는 (a)와 같이 축에 직각 또는 평행한 면 위에서 최대 전단응력이 발생하고, 축과 45°를 이루는 면에 직각으로 인장 응력과 압축응력이 작용한다. 따라서 비교적 취성재료에서는 그림 8의 (b)와 같이 파괴가 재료의 길이 방향과 45°를 이루며 일어나고, 연질재료에서는 (c)와 같이 수직 방향으로 파괴가 일어난다.

이와 같이 파손 양상은 응력 상태와, 재료의 강도와의 상대적인 관계에 의해서 정해지는 것이다. 그림 4의 재질 1의 것과 재질 2의 것을 비틀림, 단순인장, 노치인장을 실시한 경우, 파손 양식이 어떻게 변화하는가를 표 1에 나타낸다.

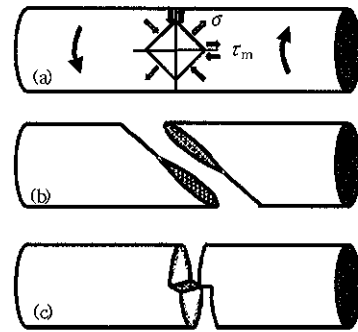


그림 8 단순 비틀림 하중에서 파괴 양식. (a) 단순 인장 응력 분포 (b) 취성재료 (c) 연성재료

표 1 그림 3의 재료 및 조건에서 파손 상황

Load	Material 1			Material 2		
	Yield	Fracture		Yield	Fracture	
		Shear	Cleavage		Shear	Cleavage
Twist	●	●		●	●	
Tensile			●	●	●	
Notch			●			●



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