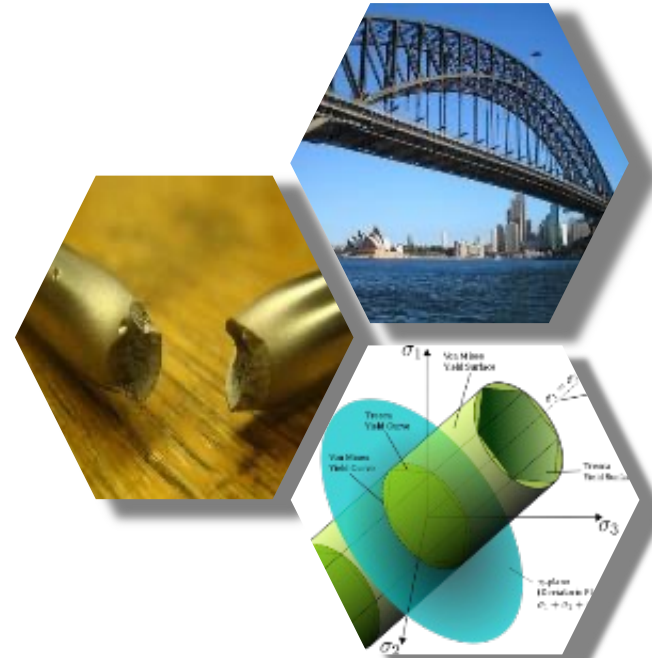


제2장 재료 시험



Chapter 1 요약

- 재료역학: 외부에서의 힘에 의해서 변형을 공부하는 학문
- 재료의 파손 (Failure)
 - 소성변형 (Plastic deformation)
 - 취성파괴 (Brittle fracture)
 - 연성파괴 (Ductile fracture)
 - 피로 (Fatigue)
 - 크리프 (Creep)
 - 열충격 (Thermal shock)
 - 좌굴 (Buckling)
 - 마모 (Wear)
 - 부식 (Corrosion)

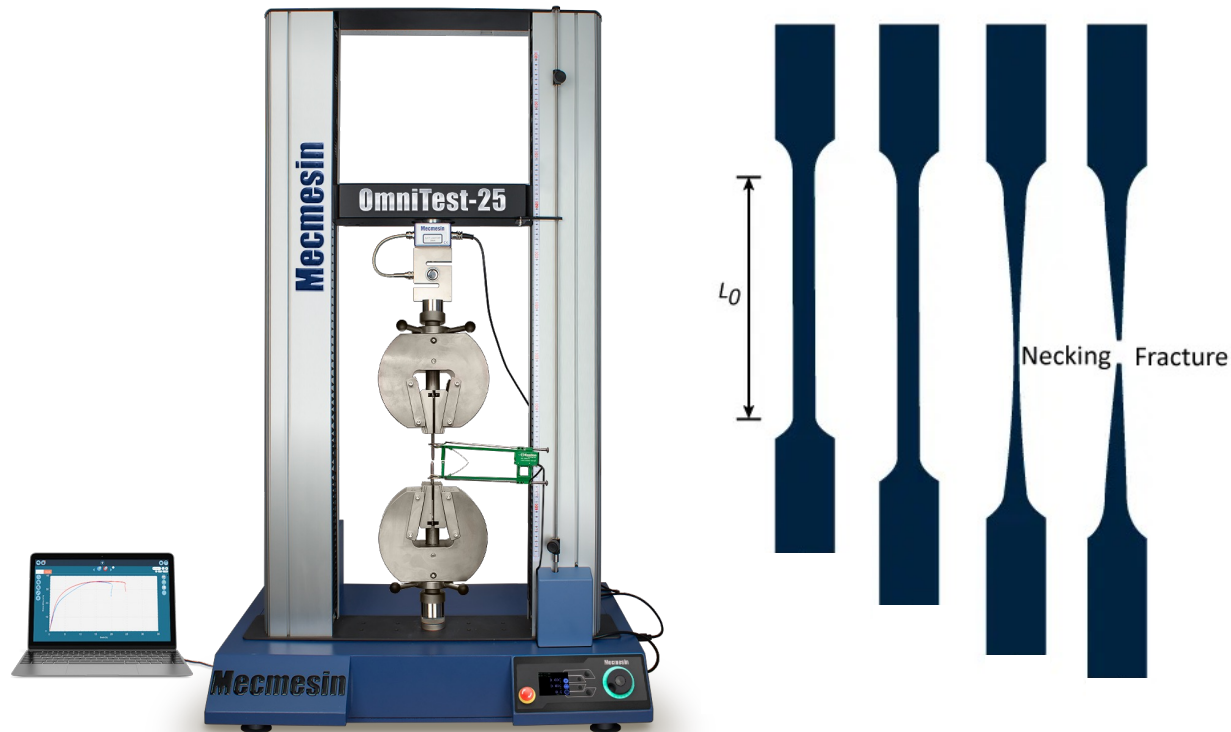
재료시험

○ 재료의 역학적 거동이란?

- ✓ ‘힘’이 가해졌을 때 어떠한 ‘변형’을 보이는가를 설명하는 것
- ✓ 재료가 다양한 용도에 적합하게 사용 → **일관적인 형태의 개념**이 반드시 정립!
- ✓ 실제로 재료는 주어진 상황에 따라 매우 복잡한 거동을 보이지만,
- ✓ 단순화 작업을 통해서 기본적인 설계에 적용할 수 있도록 만들어 가는 과정이 진행
- ✓ 가장 널리 사용되는 방법은 **힘과 변형의 관계를 방정식으로 표시.**

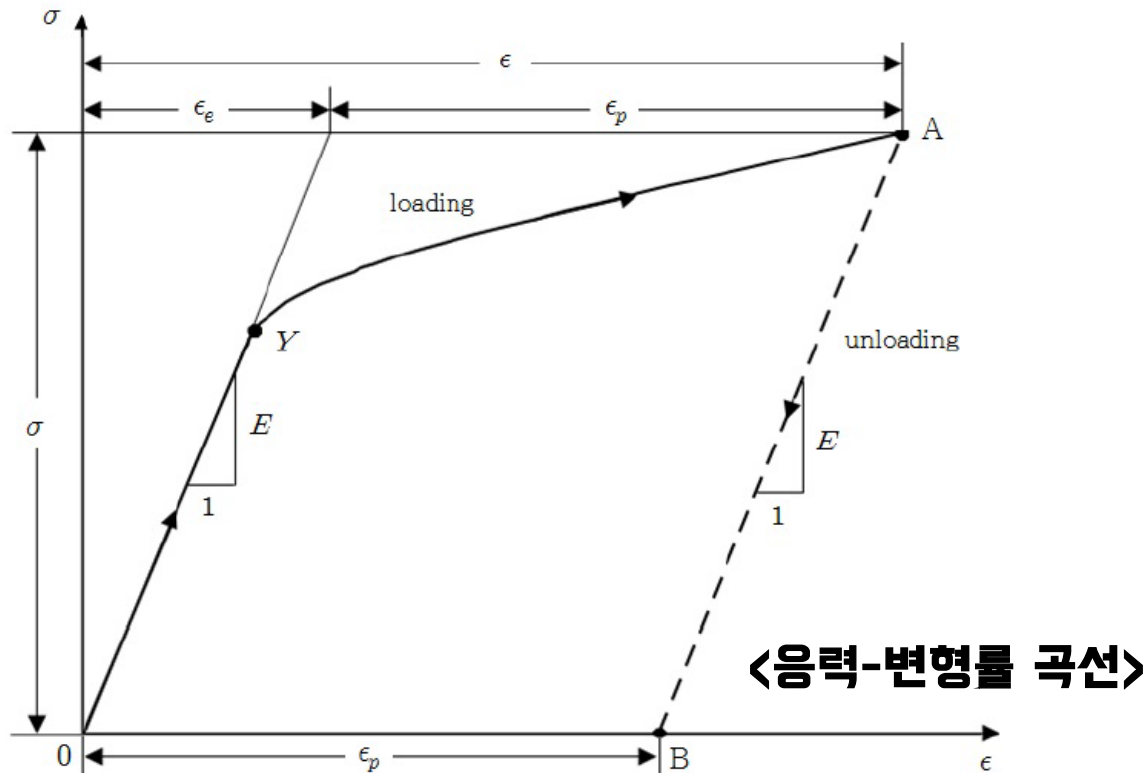
인장시험 (Tension test)

- ✓ 재료의 역학적 거동에 대한 정보를 얻기 위하여 가장 널리 쓰이는 방법
- ✓ 매우 간단하면서도 필요한 재료의 성질을 쉽게 얻을 수 있는 장점
- ✓ 인장 시험을 수행하는 방법은 시험하고자 하는 재료는 시험규격에 따라 원통형이나 막대 형태의 평판으로 가공하여 시편 (specimen)으로 사용



인장시험 - 응력과 변형률

- ✓ 시험의 과정은 시편의 양끝에 힘을 가하며 변형을 관찰하는 것
- ✓ 이때 가해진 힘과 변형의 관계를 그래프로 그릴 수 있는데
- ✓ 이를 **힘-변위 선도 (force-displacement curve)**
- ✓ 인장 시험으로 부터 얻어진 힘-변위 선도는 실제로는 **응력-변형률 선도 (stress-strain curve)** 로 대체하여 사용하는 것이 일반적.



인장시험 - 응력과 변형률

$$s(\text{공칭응력}) = \sigma_E = \overset{???}{\sigma} = \frac{P (\text{힘})}{A_0 (\text{초기 단면적})}$$

- ✓ 응력의 단위 (SI 단위계): Pa = N/m^2 또는 Pascal (파스칼)
- ✓ 응력의 단위 (영미 단위계): psi = lb/in²
- ✓ 공칭응력 (engineering stress) 또는 명목응력 (nominal stress)

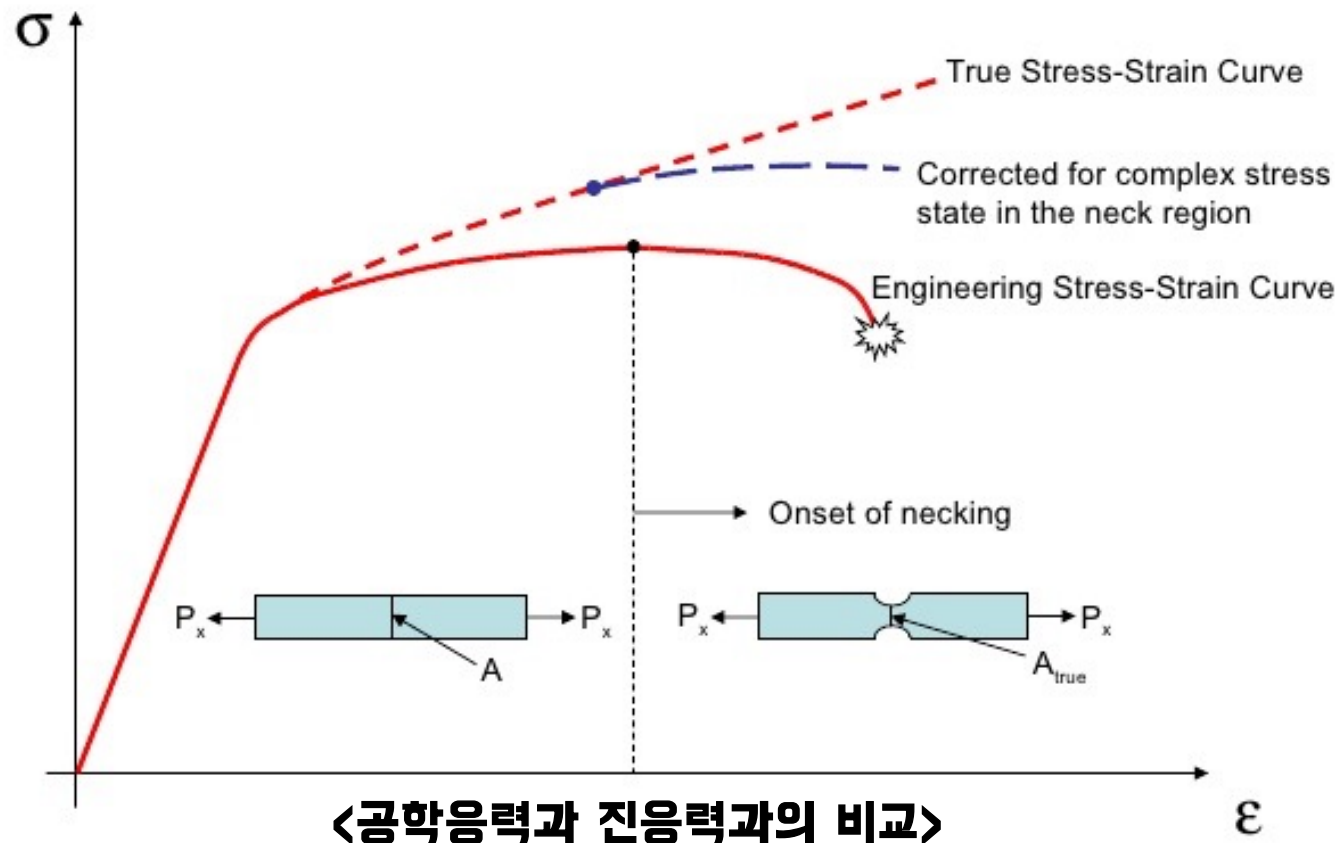
- ✓ 하지만, 인장시험을 수행하는 동안 시편의 길이는 늘어나게 되나 단면적은 '지속적'으로 감소

$$\sigma(\text{진응력}) = \sigma_T = \frac{P (\text{힘})}{A (\text{현재 단면적})}$$

↘ 정확히는 현재 '순간'의 단면적

인장시험 - 응력과 변형률

- ✓ **탄성 변형** 내에서 대부분의 금속에서의 **단면적의 변화는 1% 미만**
- ✓ 공칭응력과 진응력의 차이는 무시할 만큼 작음.
- ✓ 그러나 **소성변형의 영역** → 시편에서의 **단면적의 변화가 심함**
- ✓ 두 응력의 차이가 커지게 되어 더 이상 동일X



인장시험 - 응력과 변형률

$$e(\text{공칭 변형률}) = e_E = \overset{???}{\varepsilon} = \frac{\Delta L (\text{변형 길이양})}{L_0 (\text{초기 길이})} = \frac{L - L_0}{L_0}$$

- ✓ 변형률의 단위는 없음. 때로는 mm/mm나 in/in로 표시
- ✓ 작은 단위를 표시할 때는 10^{-6} 를 위한 μ 를 사용하기도
- ✓ 실제로는, 시편의 길이는 매 순간 변하게 되므로, 순간의 변형률의 증가는 다음과 같이 표시

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L}$$

인장시험 - 응력과 변형률

- ✓ 전체 변형률을 계산하기 위해서 아래와 같이 양변을 적분하고 얻은 결과
- ✓ 진 변형률 (True strain) ε 으로 정의
- ✓ 진 변형률은 \ln 를 사용하기 때문에 대수 변형률 (logarithmic strain)로도 불린다.

$$d\varepsilon = \frac{dL}{L}$$

$$\int d\varepsilon = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L}$$

$$\varepsilon(\text{진 변형률}) = \varepsilon_T = \ln\left(\frac{L}{L_0}\right)$$

인장시험 - 응력과 변형률

$$\varepsilon = \ln \left(\frac{L}{L_0} \right) = \ln \left(\frac{L_0 + \Delta L}{L_0} \right)$$

$$= \ln \left(1 + \frac{\Delta L}{L_0} \right)$$

e

$$\therefore \varepsilon = \ln(1 + e)$$

예제 1.

초기 길이가 L_0 인 봉을 최종길이가 $2L_0$ 가 되도록 잡아 당겼다. 이때 변형률을 공학변형률과 진변형률로 각각 구하시오.

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{2L_0 - L_0}{L_0} = 1 = 1.00$$

$$\varepsilon = \ln \frac{2L_0}{L_0} = \ln 2 = 0.693147 \dots = 0.69 = 6.93 \times 10^{-1}$$

올바른 답안 제출 양식

1. 모두 유효숫자를 맞추는 것 (일반적으로 소수 셋째자리에서 반올림)
2. 과학적 표기법 사용 추천! (공학자의 필수 조건)
3. 단위는 항상 표기
4. 중간/기말에서 올바르게 작성하지 않으면 답 틀린 것으로 간주

예제 2.

초기길이가 10mm인 봉을 20mm로 다음과 같이 세 단계로 당겼다. 이 때 (a) 각 단계의 공학변형률을 구하고 각 단계의 변형률을 더하여 한번에 연신한 것과 비교해 보시오. (b) 위의 문제를 진변형률로 구해보시오

1 단계: 10mm → 12mm 로

2 단계: 12mm → 15mm 로

3 단계: 15mm → 20mm 로

예제 2.

(a) 각 단계의 공학변형률을 구하고 각 단계의 변형률을 더하여 한번에 연신한 것과 비교해 보시오.

$$e_1 = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{2 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0.2 = 0.20$$

$$e_2 = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{3 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 0.25 = 0.25$$

$$e_3 = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{5 \text{ mm}}{15 \text{ mm}} = 0.333333 \dots = 0.33$$

$$e_1 + e_2 + e_3 = 0.783333 \dots = 0.78$$

각 단계의 공학변형률의 합은 한번에 변형한 공학변형률과 다르다
(초기 단면적을 사용하기 때문)

$$e = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{10 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 1 = 1.00$$

예제 2.

(b) 위의 문제를 진변형률로 구해보시오

$$\varepsilon_1 = \ln \frac{12 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0.18232 \dots = 0.18$$

$$\varepsilon_2 = \ln \frac{15 \text{ mm}}{12 \text{ mm}} = 0.22314 \dots = 0.22$$

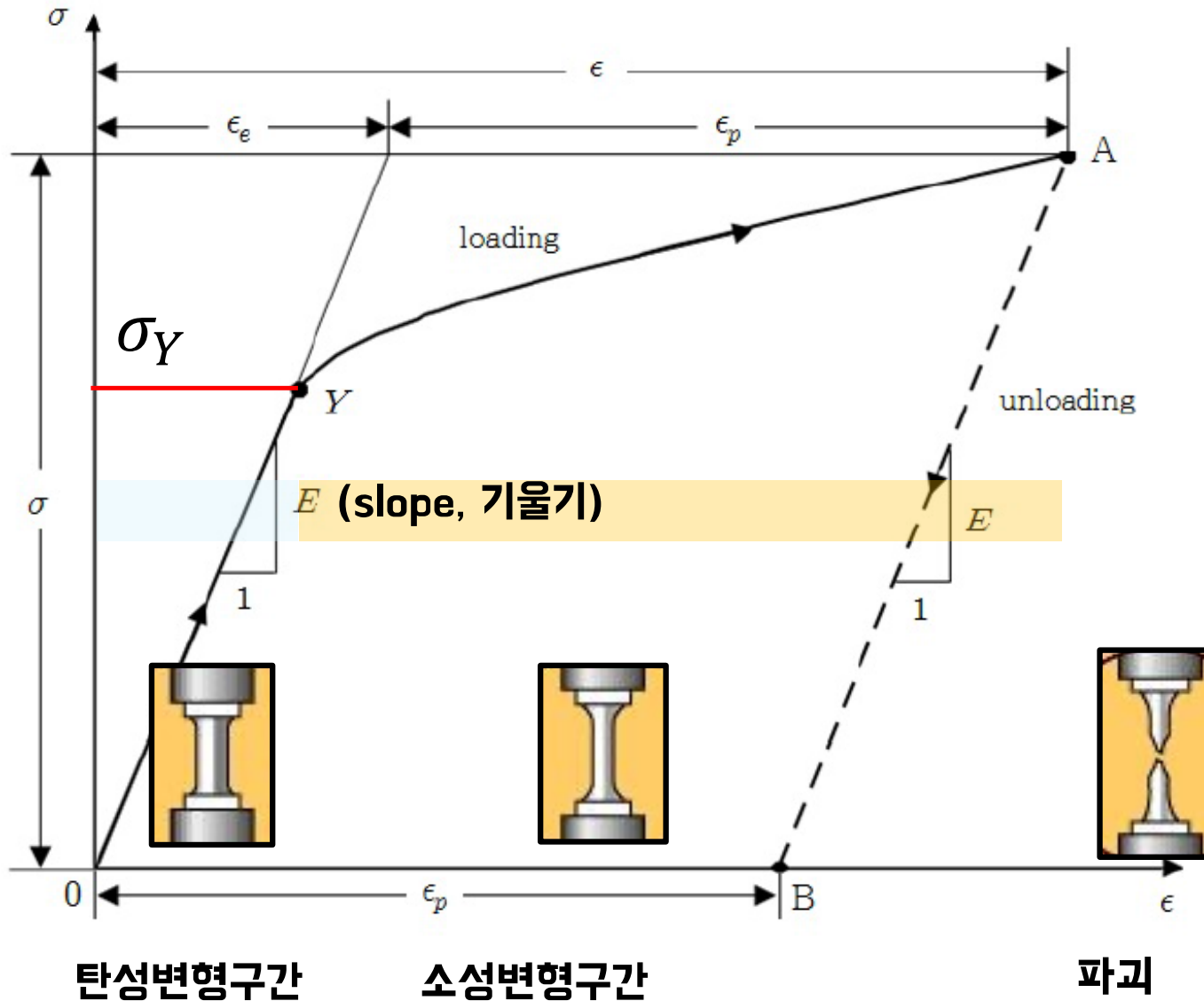
$$\varepsilon_3 = \ln \frac{20 \text{ mm}}{15 \text{ mm}} = 0.28768 \dots = 0.29$$

$$\varepsilon_1 + \varepsilon_2 + \varepsilon_3 = 0.69314 \dots = 0.69$$

$$\varepsilon = \ln \frac{20 \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = 0.69314 \dots = 0.69$$

각 단계의 진변형률의 합은 한번에
변형한 진변형률과 같다

인장시험과 재료의 거동 - 탄성변형, 소성변형, 파괴

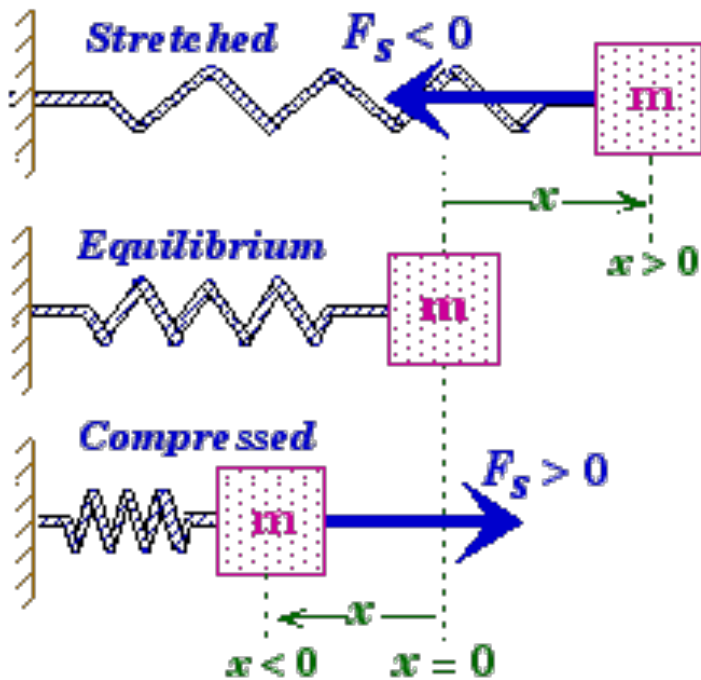


인장시험과 재료의 거동 - 탄성변형, 소성변형

- ✓ **탄성변형**은 재료에 가해진 하중이 제거 → **원래의 형상으로 되돌아가는 변형**
- ✓ **소성변형**에서는 하중이 사라졌을 때에도 원래의 형상으로 돌아가지 못하고 **영구적인 변형**, 에너지적으로 비가역 과정 (irreversible process)으로 취급
- ✓ **강도(strength)**는 재료가 파손되지 않고 하중을 견딜 수 있는 정도를 의미 (일반적으로 항복강도를 통해 예측)
- ✓ **강성도(stiffness)**는 재료가 하중이 작용할 때 변형에 대한 저항의 정도 탄성계수와 직접적으로 연관되어 있으므로 설명하기가 편리, **강성도가 크다는 것은 탄성계수가 큰 값을 가지는 재료임을 의미**

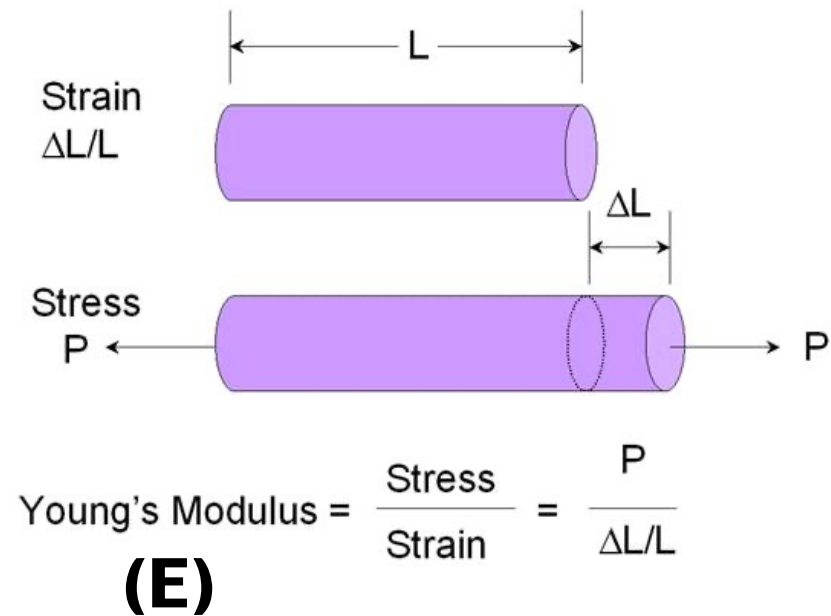
인장시험과 재료의 거동 - 탄성변형

후크의 법칙 (Hooke's law)



$$F = -kx$$

영의 비례상수 (Young's modulus)



$$\sigma = E\varepsilon$$

탄성변형 (Elastic deformation)

- ✓ 영국의 과학자 Hooke (1635-1703)는 스프링 모델을 사용하여 탄성재료에 가해지는 힘과 변형이 비례함을 발견하였고,
- ✓ 역시 영국의 과학자 Young (1773-1829)은 비례상수를 도입하여 널리 알려져 있는 Hooke 법칙 $\sigma = E\varepsilon$ 을 구성하였다. 여기서 응력 σ 와 변형률 ε 이 서로 비례함을 보여주고 있으며 비례상수로서 탄성계수 E 를 취하고 있다.
- ✓ 재료의 변형에 대한 Hooke의 연구에서는 **같은 재료라고 하더라도 그 크기가 달라지면 다시 재료 시험을 수행해야 한다는 단점이 존재하였다.**
- ✓ Young은 **힘과 변형 대신에 응력과 변형률의 관계를 비례식으로 정의하고 비례상수로서 탄성계수를 도입하였다.**

영의 탄성계수 (Young's modulus)

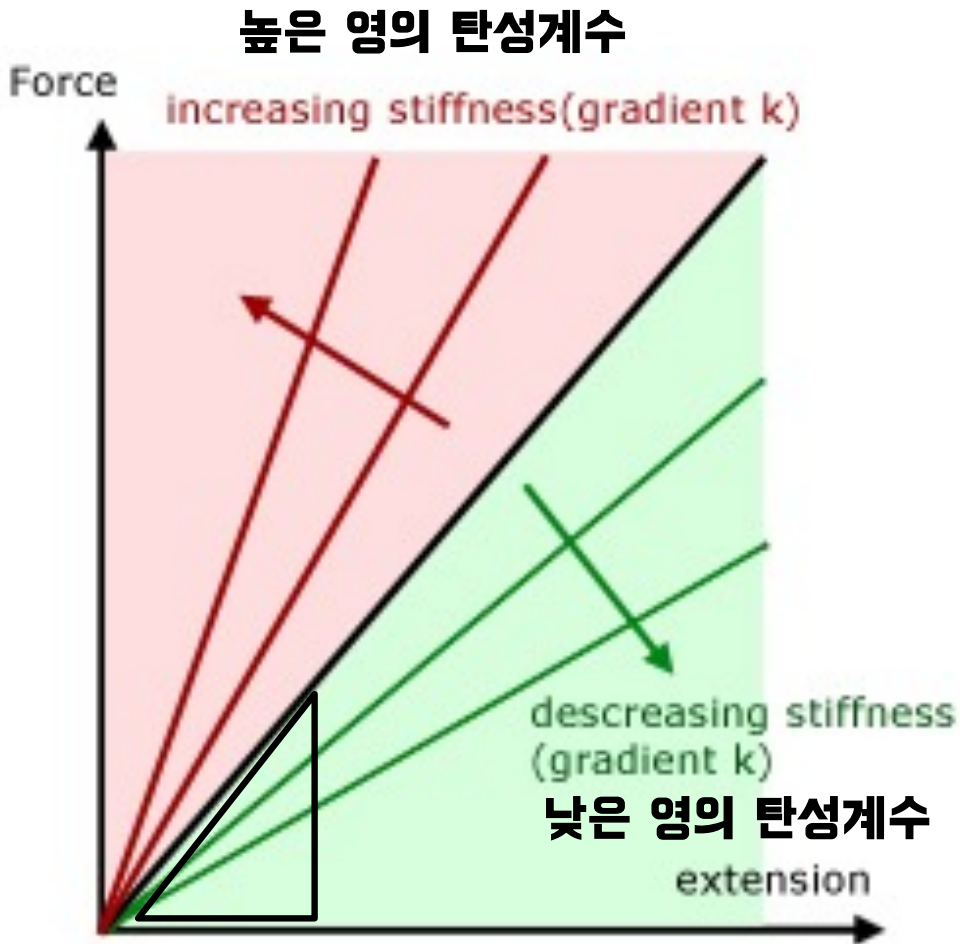
Young's modulus

$$y = \frac{F/A}{\Delta L/L_0}$$

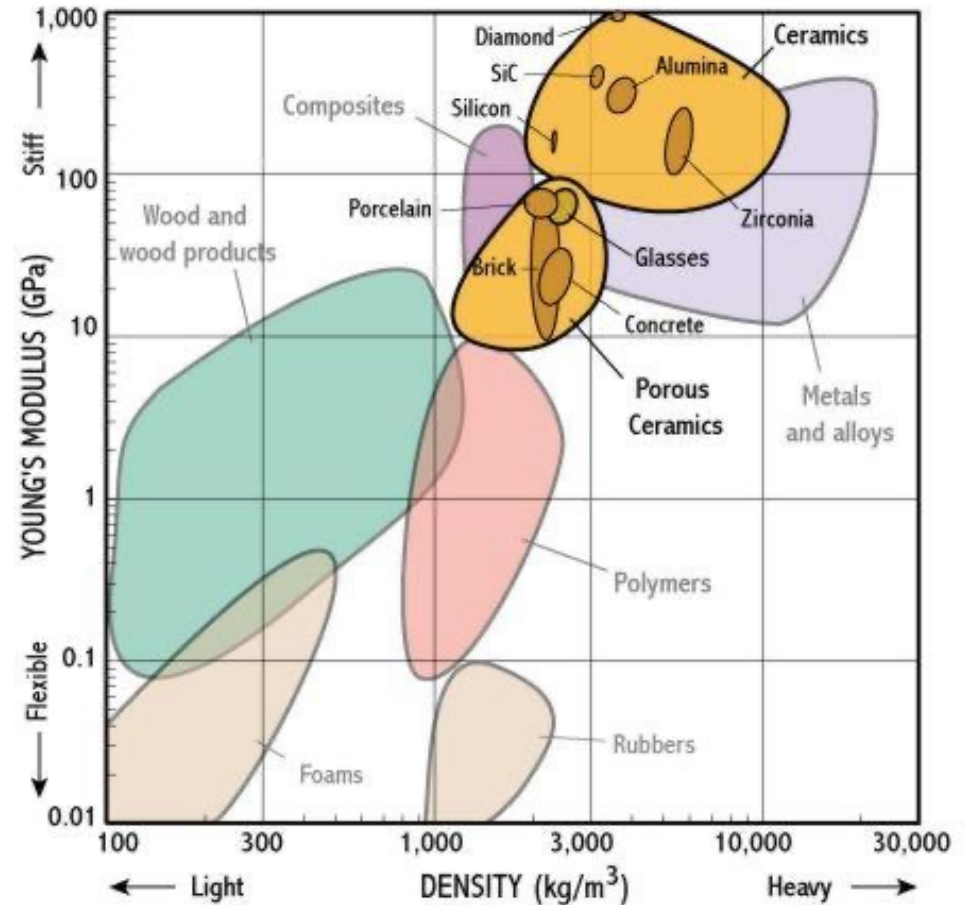
Measure of **stiffness**

Material	Young's modulus (GPa)
Rubber (small strain)	0.01-0.1
wood	1-10
bone	9-16
concrete	20
steel	200

영의 탄성계수 (Young's modulus)



참고자료



각 그래프의 일직선상의 기울기가 영의 탄성계수를 의미함.

영의 탄성계수와 물질의 밀도와의 관계



소성변형 (Plastic deformation)

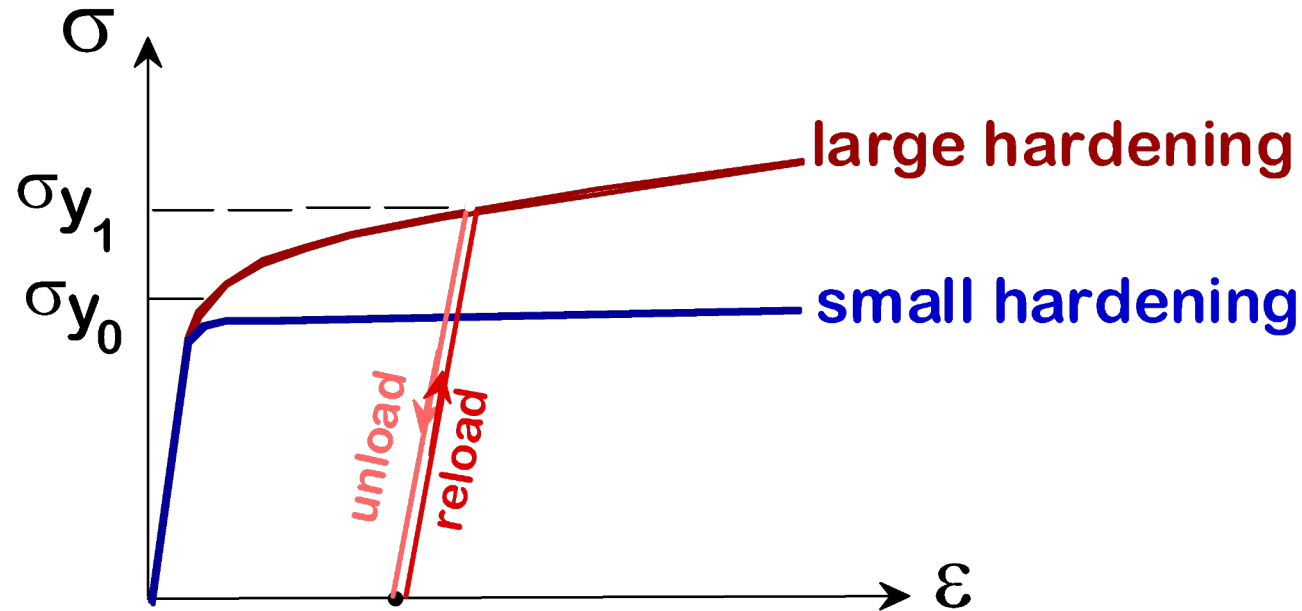
- ✓ 소성변형은 하중이 사라졌을 때에도 원래의 형상으로 돌아가지 못하고 **영구적인 변형**을 갖게 되는 변형의 구간을 말하며, 에너지적으로 비가역 과정(irreversible process)으로 취급한다.
- ✓ 일반적인 재료에서는 응력이 작용 함에 따라 탄성변형을 일으키고 일정한 응력 값을 넘어서면 소성변형이 시작 되는데 이러한 **임계 응력 값을 해당 재료의 항복강도 (yield strength, σ_Y)** 라고 한다.

소성변형 (Plastic deformation)

- ✓ 재료가 탄성 한계내에 있으며 변형이 매우 작을 경우에는 공학변형률과 진변형률의 차이가 무시할 정도
- ✓ 대부분의 금속에서는 탄성변형시의 변형률이 0.005를 넘지 않으므로 두 변형률의 차이는 무시 가능
- ✓ 그러나 소성변형이 본격적으로 시작 → 두 응력의 차이는 더 이상 간과 할 수 없음
- ✓ 가해지는 응력이 **항복강도 (yield strength)**를 넘어서게 되면 변형을 위해서 더 큰 값의 응력이 필요로 하게 되는 것을 볼 수 있는데 이러한 현상을 **가공경화 (work hardening) 또는 변형경화(strain hardening)**라고 함.

가공경화 (Work hardening)

- ✓ 소성변형에 의한 응력의 증가



Curve fit to the stress-strain response:

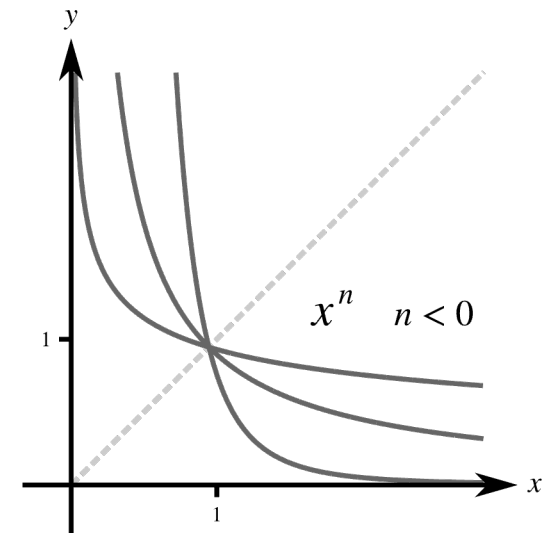
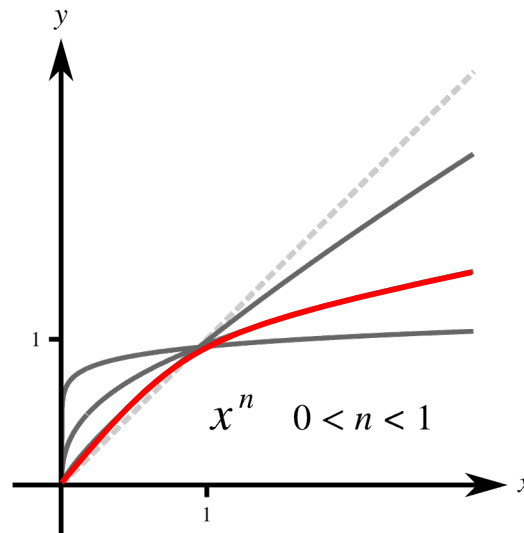
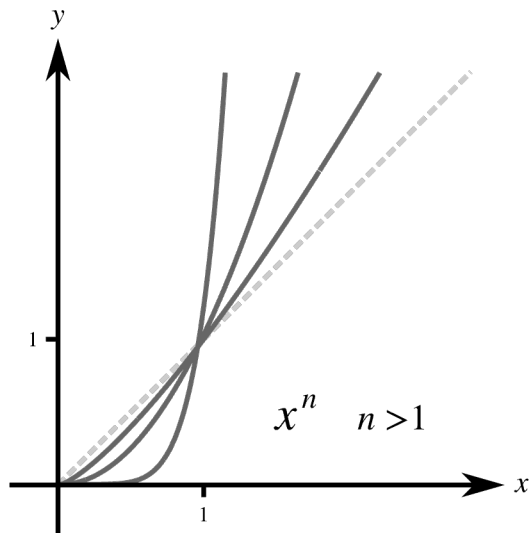
$$\sigma_T = C(\epsilon_T)^n$$

진응력 σ_T 소성강도 계수 C 진변형률 ϵ_T 가공경화 지수 n

$n=0.15$ (some steels)
to $n=0.5$ (some copper)

가공경화 (Work hardening)

✓ 소성변형 그래프를 $y = x^n$ 로 가정



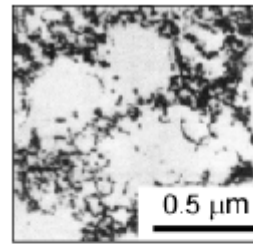
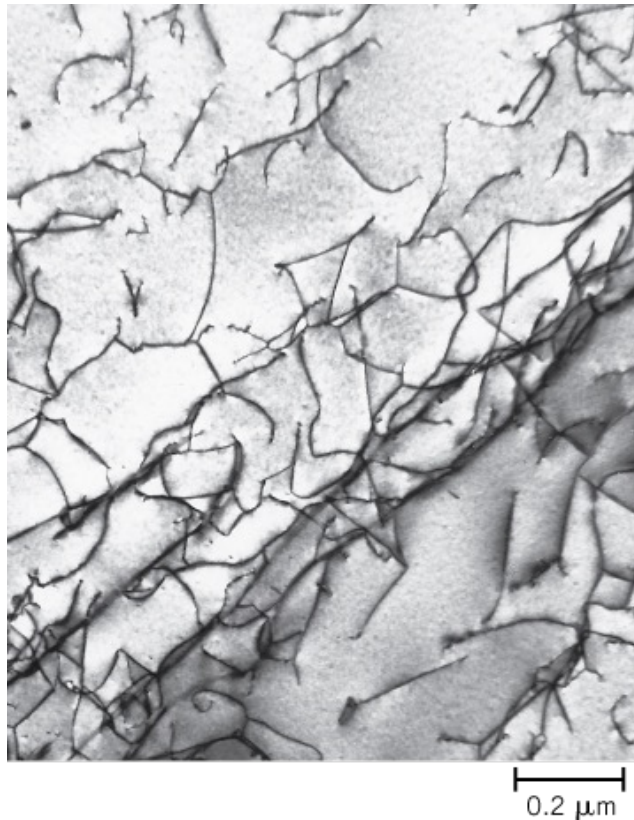
Curve fit to the stress-strain response:

$$\sigma_T = C(\epsilon_T)^n$$

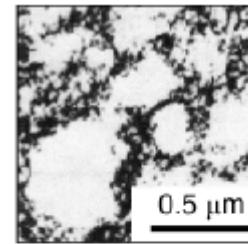
진응력 \rightarrow σ_T (pink box)
 소성강도 계수 \rightarrow C (green box)
 진변형률 \rightarrow ϵ_T (green box)
 가공경화 지수 \rightarrow n (black text)
 $n=0.15$ (some steels)
 to $n=0.5$ (some copper)

가공경화 (Work hardening)

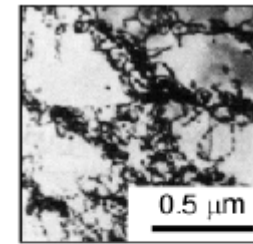
- ✓ 어닐링된 소재의 경우 전위밀도가 $10^4 \sim 10^6 \text{ mm}^{-2}$ 수준
- ✓ 냉간가공된 소재는 일반적으로 $\sim 10^{11} \text{ mm}^{-2}$ 수준



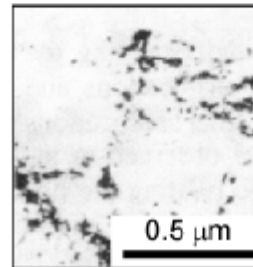
$\lambda = 0.50 \mu\text{m}$



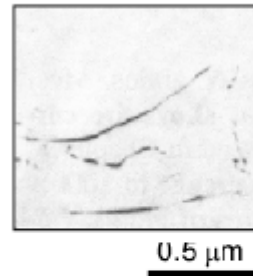
$\lambda = 0.34 \mu\text{m}$



$\lambda = 0.33 \mu\text{m}$



$\lambda = 0.68 \mu\text{m}$
 $\rho = 0.55 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$



$\rho = 0.55 \times 10^9 \text{ cm}^{-2}$

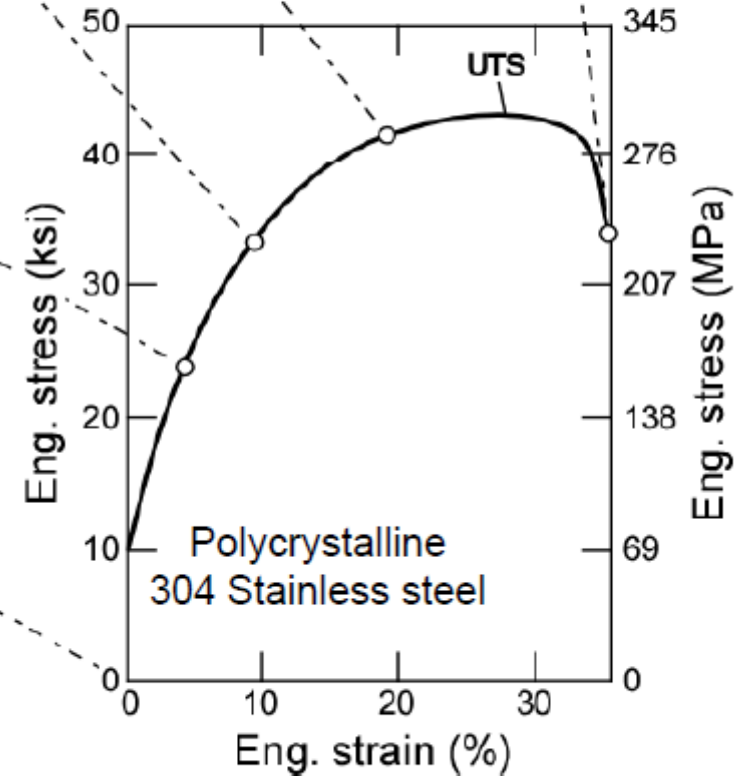


Figure adapted from J.R. Foulds, A.M. Ermi, and J. Moteff, *Materials Science and Engineering*, 45 (1980)

예제

1) 소성가공지수(C)가 550 MPa 이고, 가공경화지수(n)이 0.22인 소재가 있다. 진변형률이 0.85일때 유동응력을 계산하라.

$$\sigma_T = C \varepsilon_T^n = 550 \text{ MPa} \times 0.85^{0.22} = 530.68260 \dots = 530.68 \text{ MPa} = 5.31 \times 10^2 \text{ MPa}$$

2) 소성가공지수(C)가 850 MPa 이고, 가공경화지수(n)이 0.30인 인장시편이 있다. 이 시편의 길이는 100 mm 인데 변형 후 157 mm 가 되었다. 변형 후 유동응력을 구하라.

$$\sigma_T = C \varepsilon_T^n = 850 \text{ MPa} \times \varepsilon^{0.30} = 850 \text{ MPa} \times 0.451075 \dots^{0.30} = 669.41236 \dots$$

$$\varepsilon = \ln \frac{157 \text{ mm}}{100 \text{ mm}} = 0.451075 \dots$$

$$= 669.41 \text{ MPa}$$

$$= 6.69 \times 10^2 \text{ MPa}$$

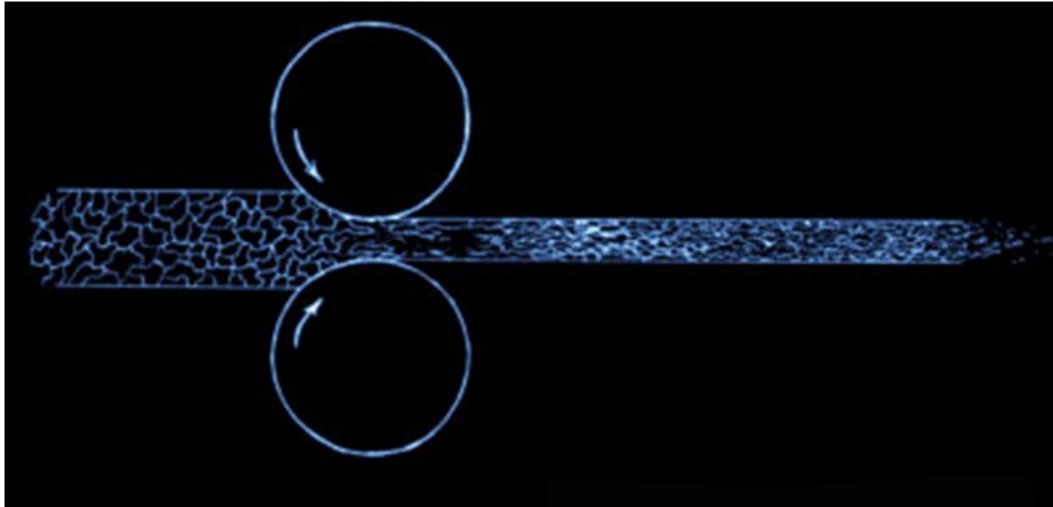
$$= \cancel{0.67 \times 10^3 \text{ MPa}}$$

3) 1개의 시편을 가지고 2번의 시험을 수행하였다. 첫 번째 실험에서는 진변형률이 0.35일 때 유동응력이 217MPa 이었고, 2번째에서는 진변형률 0.68일 때 유동응력이 259 MPa이었다. 이 때 소성가공지수 C와 가공경화지수 n은 각각 얼마인가?

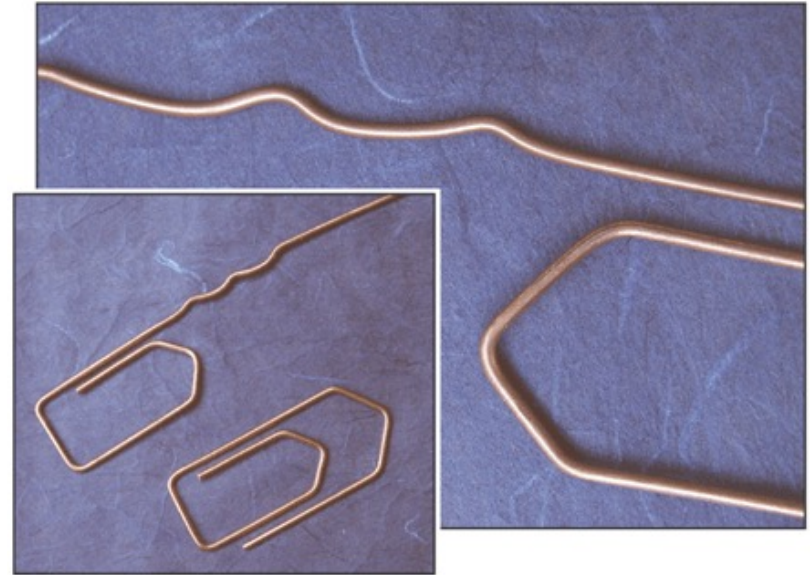
$$217 \text{ MPa} = C \varepsilon_{T1}^n = C \times 0.35^n \longrightarrow \log 217 \text{ MPa} = \log C + n \log 0.35$$

$$259 \text{ MPa} = C \varepsilon_{T2}^n = C \times 0.68^n \longrightarrow \log 259 \text{ MPa} = \log C + n \log 0.68$$

가공경화 및 변형경화의 예시들

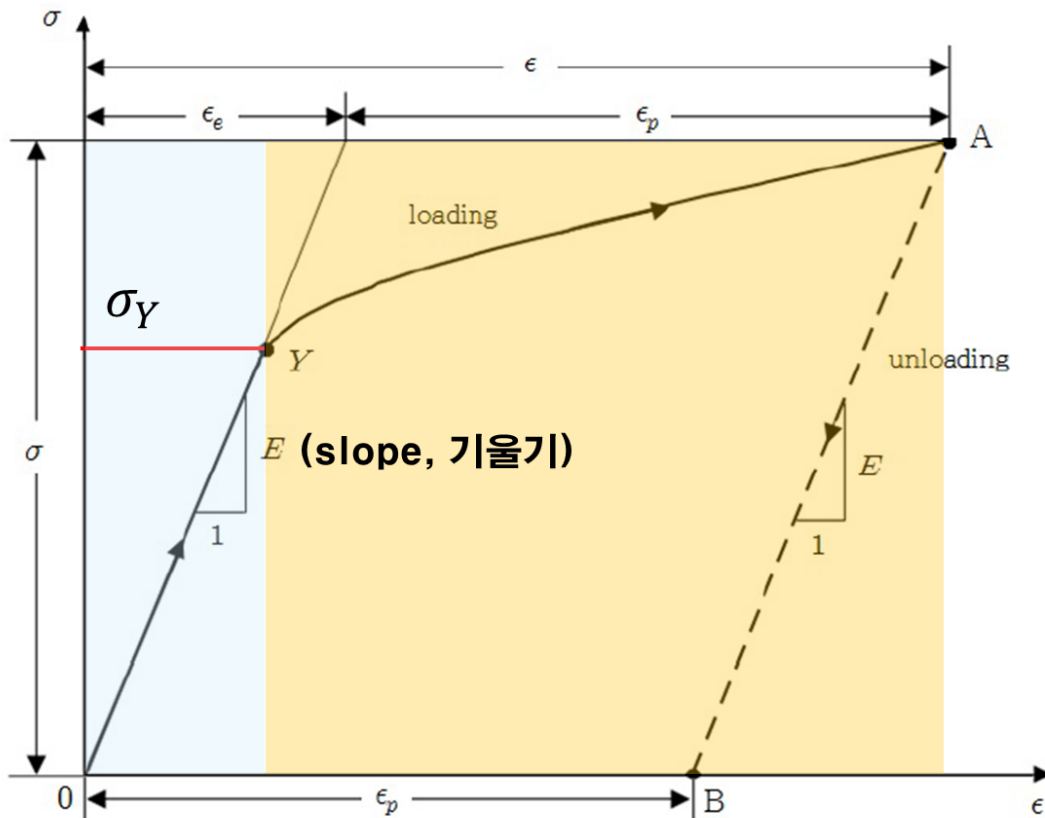


AI 롤링공정 (rolling process)를 통해서 인장 강도를 27 MPa에서 127 MPa로 증가시켰음. 내부의 미세구조가 변화됨.



한 번 구부러진 클립은 다시 그 부분을 구부리기 어려움. 변형경화에 의해서 국소적으로 인장강도의 증가 되었기 때문.

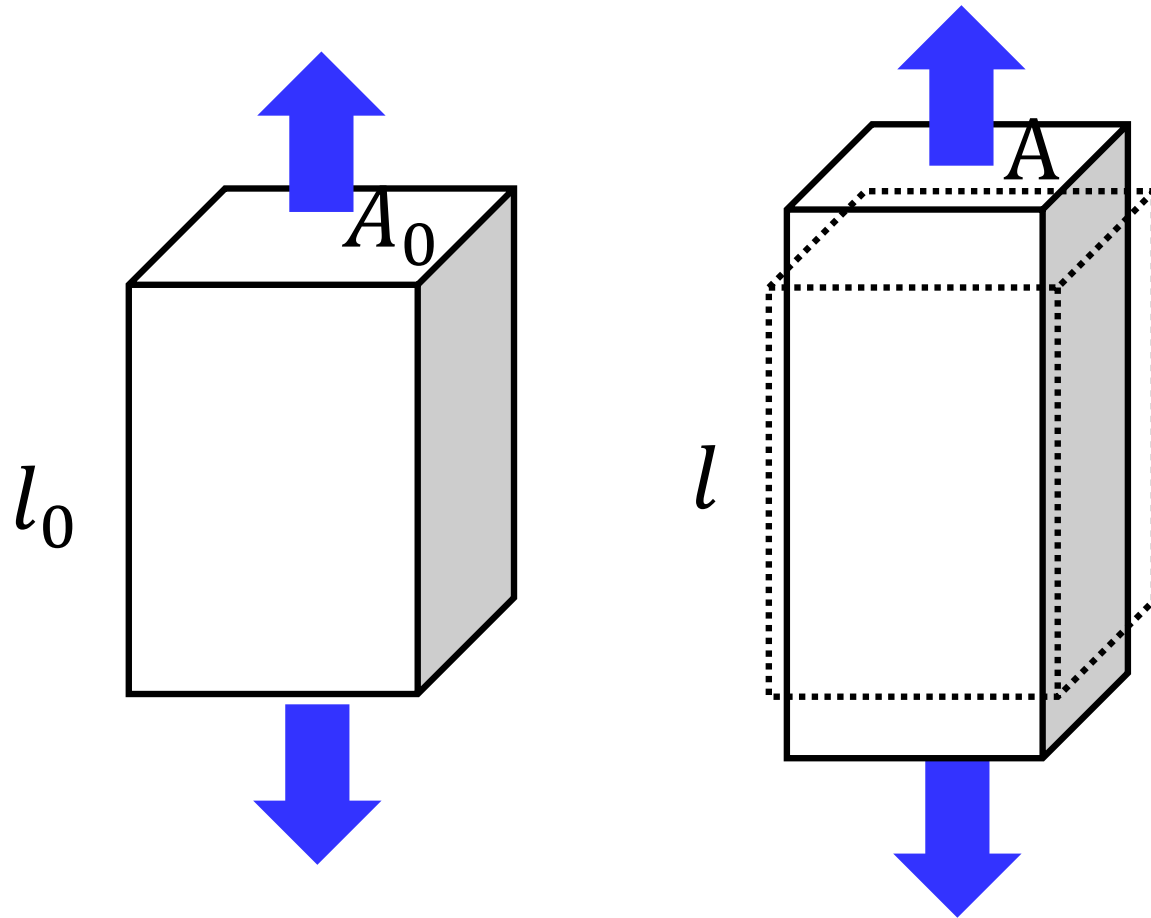
소성변형 - 전체변형률



$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_p$$

- ✓ 만일 A 지점에서 하중을 제거하면 시편은 A-B의 경로에 따라 복귀하게 되나 원래의 상태로 가지 못하고
- ✓ 0-B 만큼의 영구변형 또는 소성변형이 생기게 된다.
- ✓ 그러므로, 전체 변형률 ϵ 은 탄성 변형률 ϵ_e 와 소성 변형률 ϵ_p 의 합이다.

소성변형 - 비압축 과정 (Incompressible process)



비압축과정

$$V = V_0$$

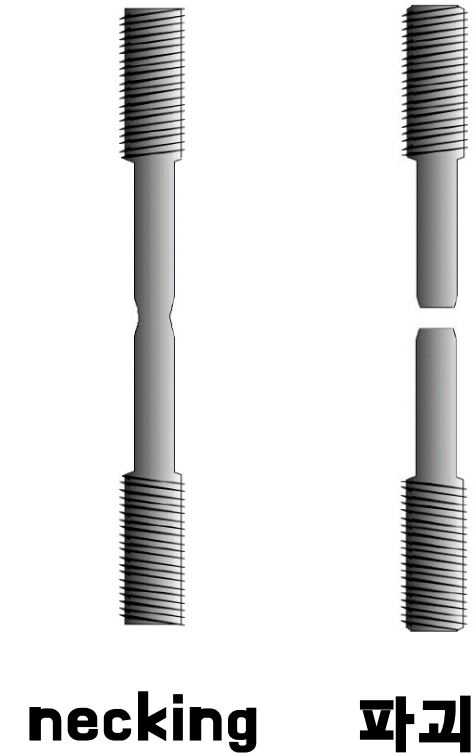
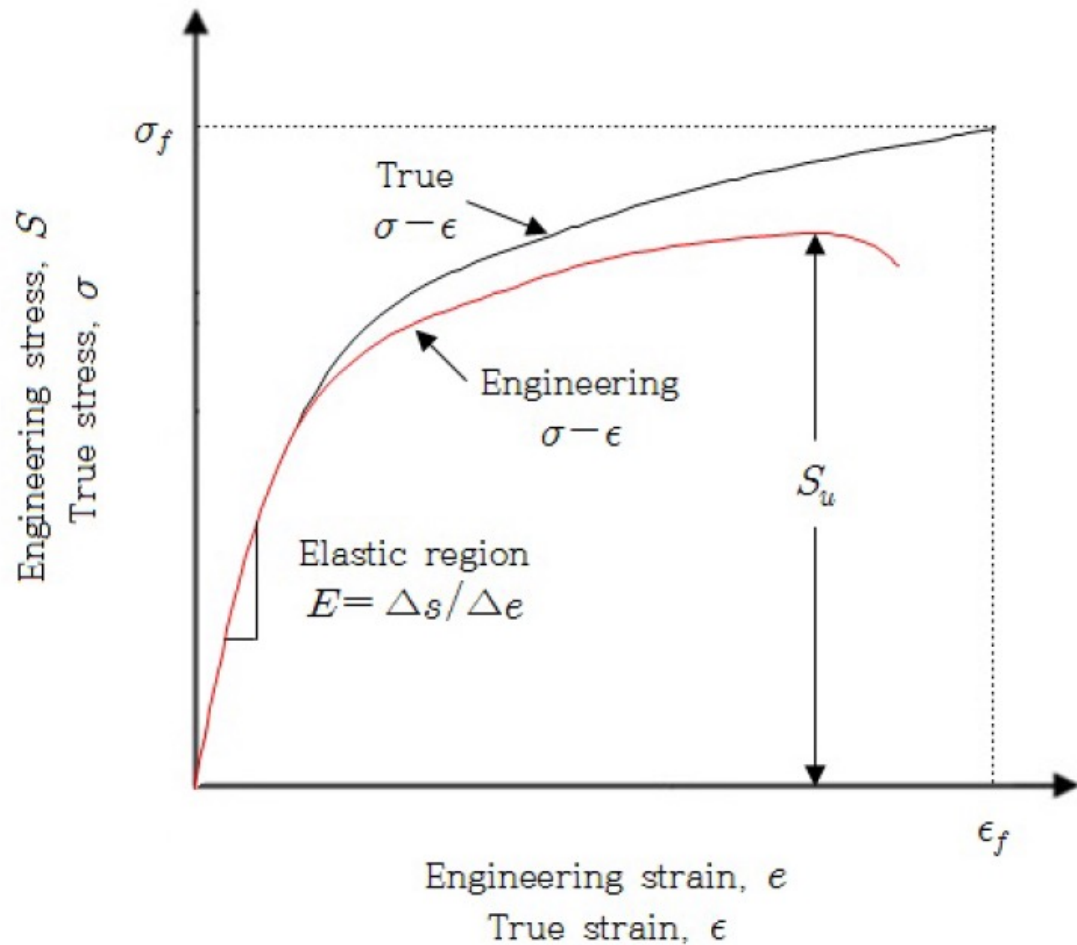
$$Al = A_0 l_0$$

$$\therefore \frac{A_0}{A} = \frac{l}{l_0}$$

$$S = \frac{P}{A_0} \quad \sigma = \frac{P}{A}$$

$$\therefore \sigma = S \frac{A_0}{A} = S \frac{l}{l_0}$$

최대강도 (Ultimate strength)



- ✓ 재료의 항복점을 지나서 인장이 계속되면 시편에서 작용하는 응력은 결국 **최대 강도(ultimate strength, S_u)**에 도달하게 되고, 이때 **necking** 현상이 발생한다.

최대강도 및 파괴강도

- ✓ 재료의 **최대 강도 S_u** 는 다음과 같이 정의된다.

$$S_u = \frac{P_{max}}{A_0}$$

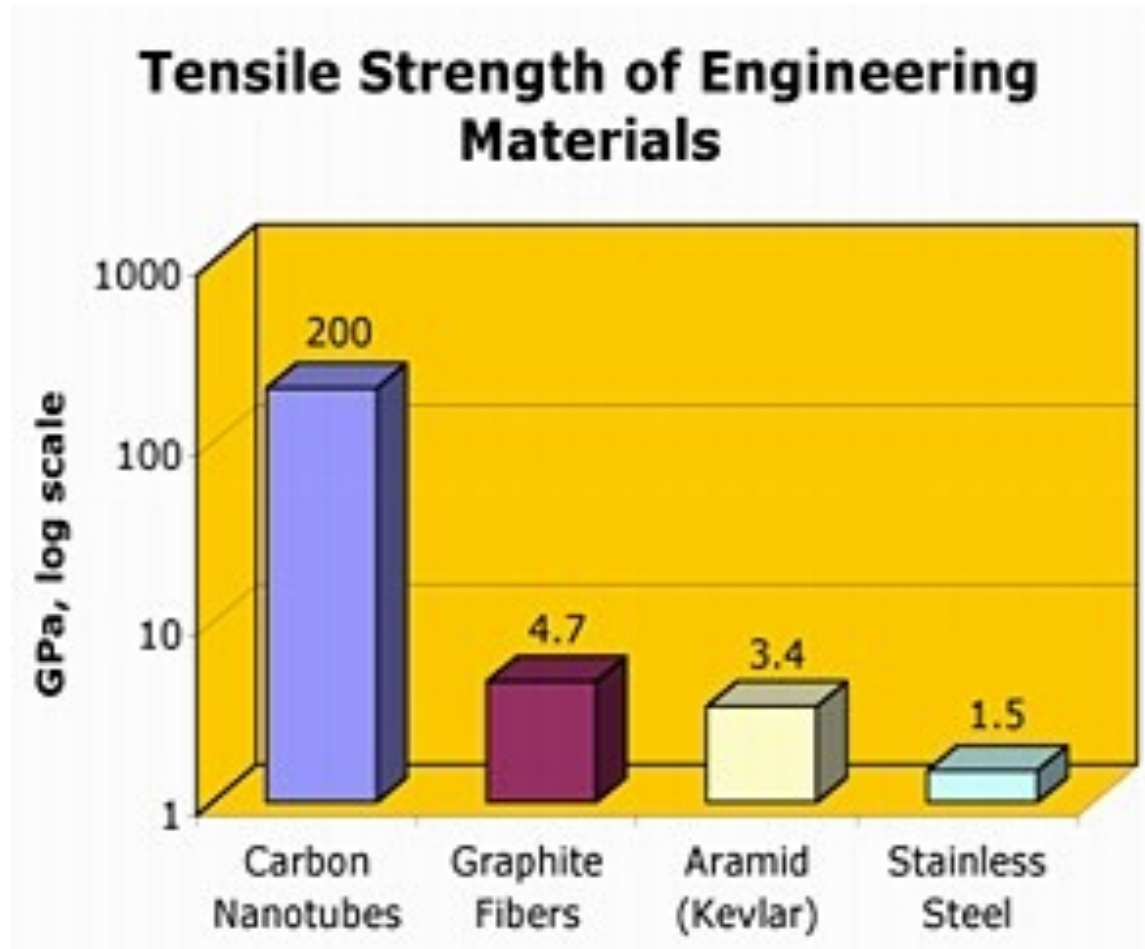
- ✓ 여기서 P_{max} 는 최대하중이다. 최대 하중 P_{max} 가 작용하는
- ✓ 지점을 지나서도 하중이 가해지면 시편은 결국 파괴되며, 이때의 응력을 **파괴강도 (fracture strength, σ_f)** 라고 하며 다음과 같이 정의된다.

$$\sigma_f = \frac{P_f}{A_f}$$

- ✓ 여기서 P_f 는 파괴하중(fracture load)이며, A_f 는 파괴시의 단면적이다.



물질의 최대강도 비교



강철보다 인장강도가 100배 이상 우수한 탄소나노튜브는 현재 알려진 가장 강도가 강한 물질임.

파괴변형률과 진변형률

- ✓ 파괴 변형률 ϵ_f 는 파괴 당시의 진변형률이며 다음과 같이 주어진다.

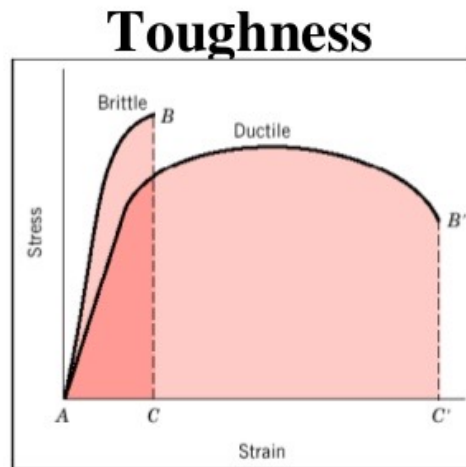
$$\epsilon_f = \ln \frac{A_0}{A_f} = \ln \frac{1}{1 - RA}$$

- ✓ RA는 다음과 같이 정의되는 **단면적 감소율**이다.

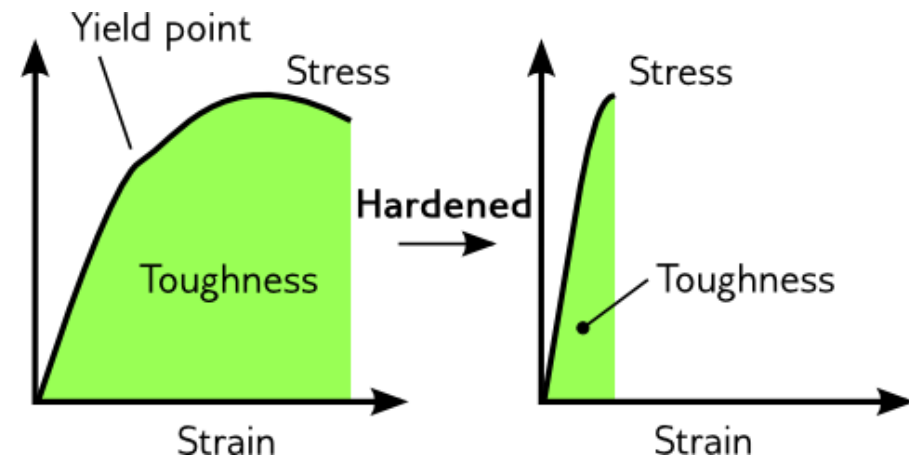
$$RA = \frac{A_0 - A_f}{A_0}$$

인성 (Toughness)

- ✓ 재료가 **파괴에 대항하는 능력을 에너지**로 나타낸 것을 파괴인성 (fracture toughness)라고 한다.
- ✓ 이것은 인장시험에서 얻을 수 있는 항복강도나 파괴강도와는 다른 개념의 물리량이다.
- ✓ 즉, 강도는 응력을 기반으로 하고 있음에 반하여 인성은 에너지의 개념이다.
- ✓ 아래의 그림과 같은 **응력-변형률 곡선에서의 파괴되는 순간까지의 면적**

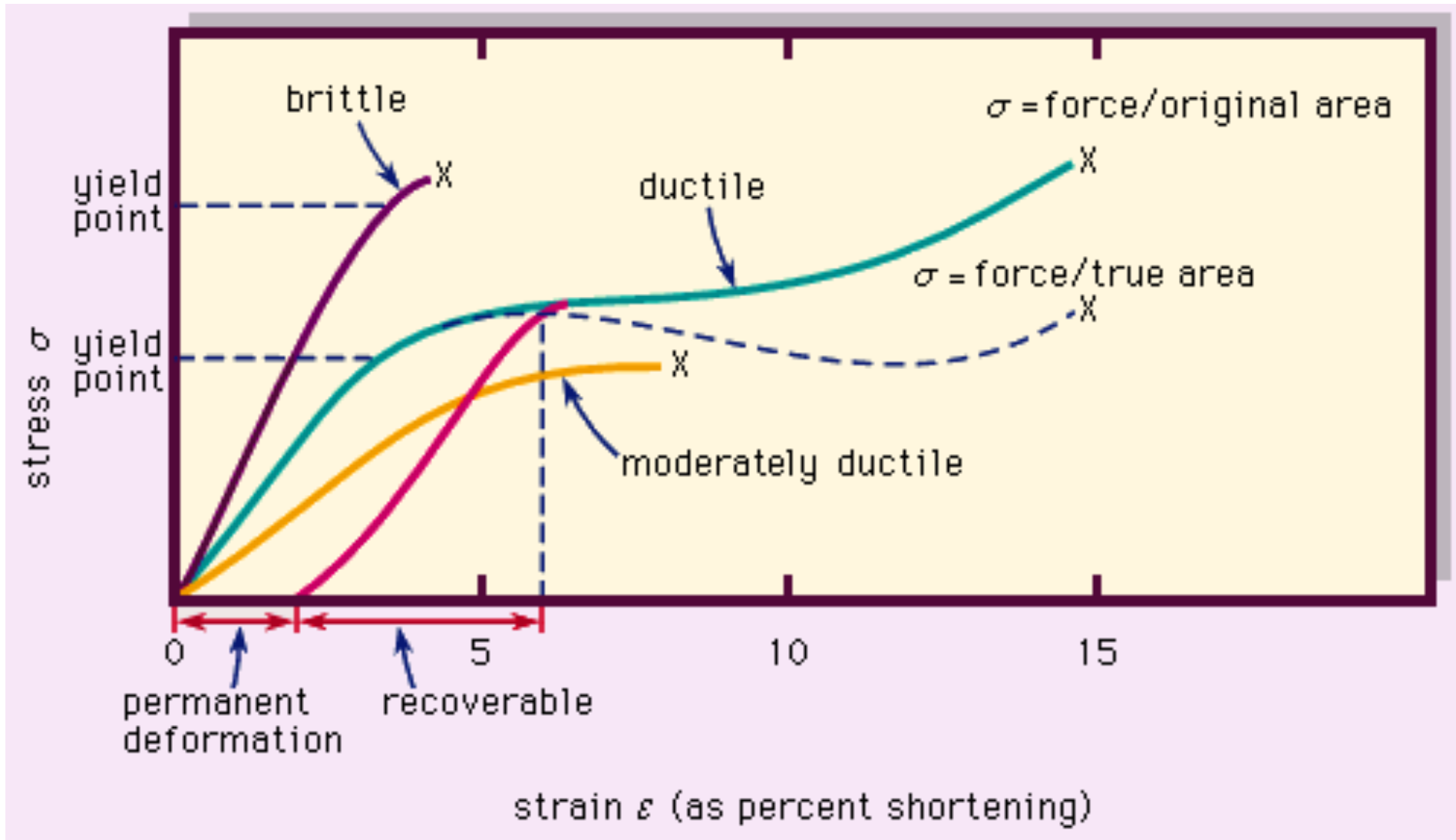


Toughness = the ability to absorb energy up to fracture
= the total area under the strain-stress curve up to fracture

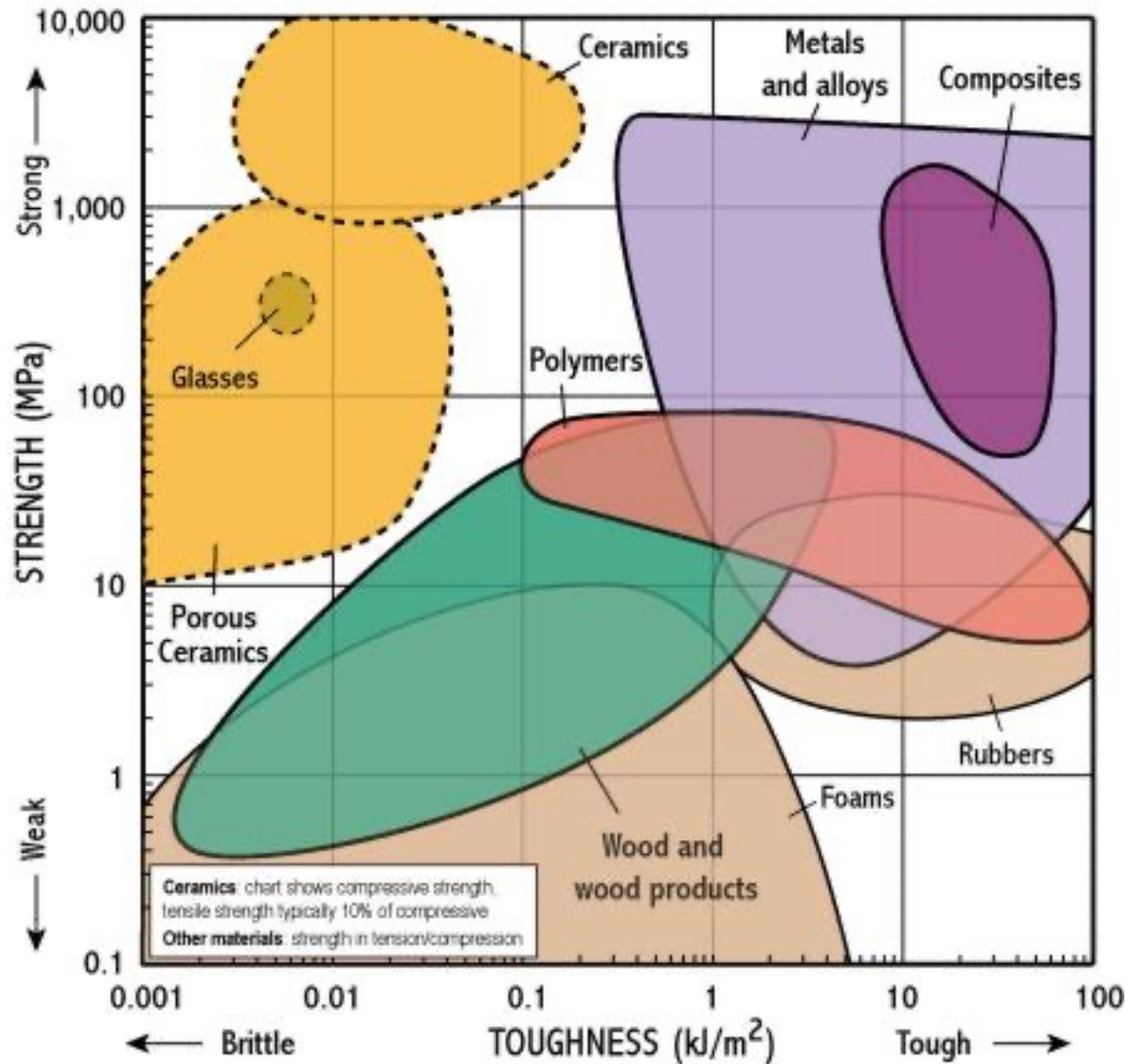


경화를 하게 되면 오히려 인성은 떨어질 수 있음.

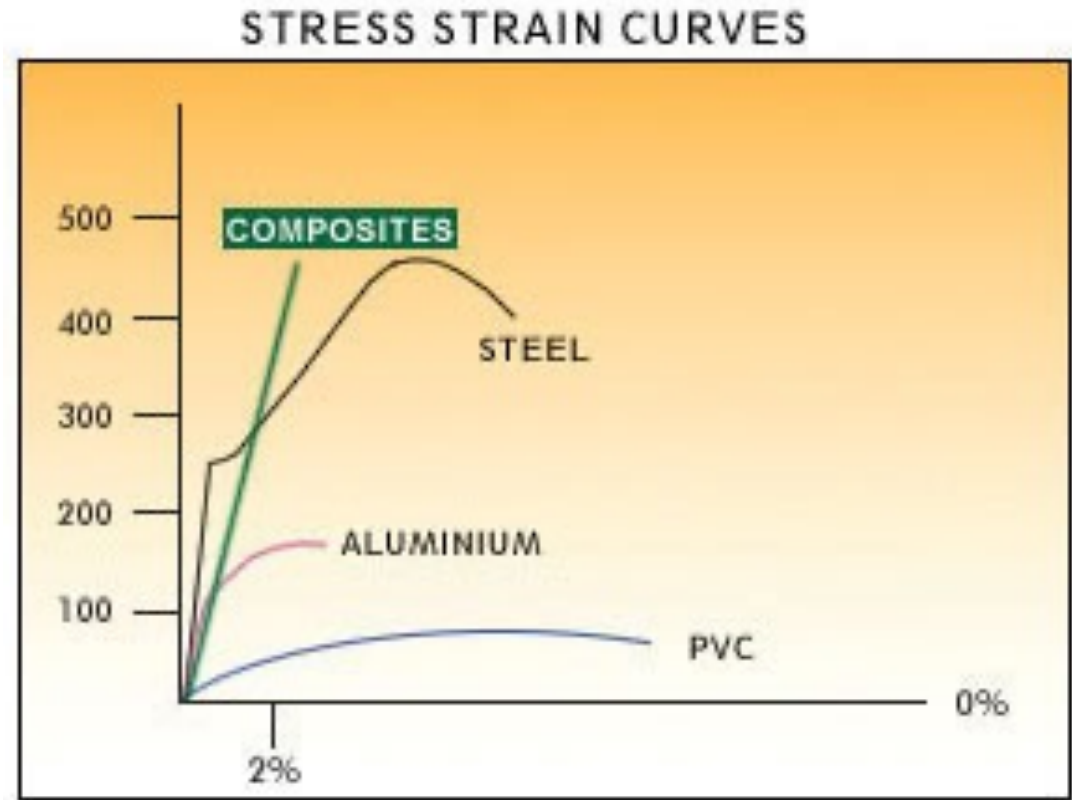
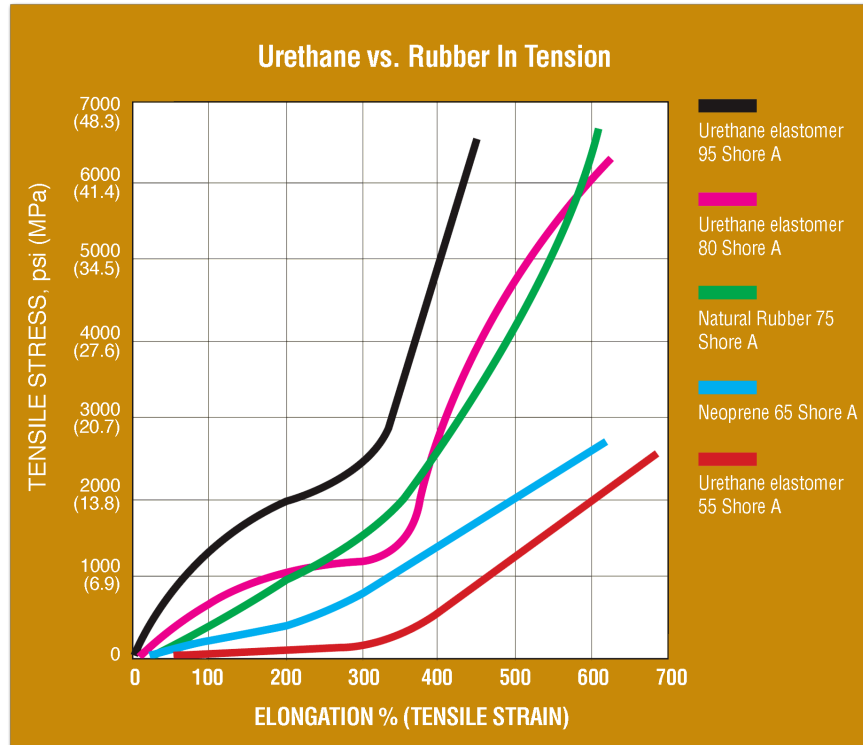
여러가지 물질의 응력변형곡선



강도 (Strength) 와 인성 (Toughness)



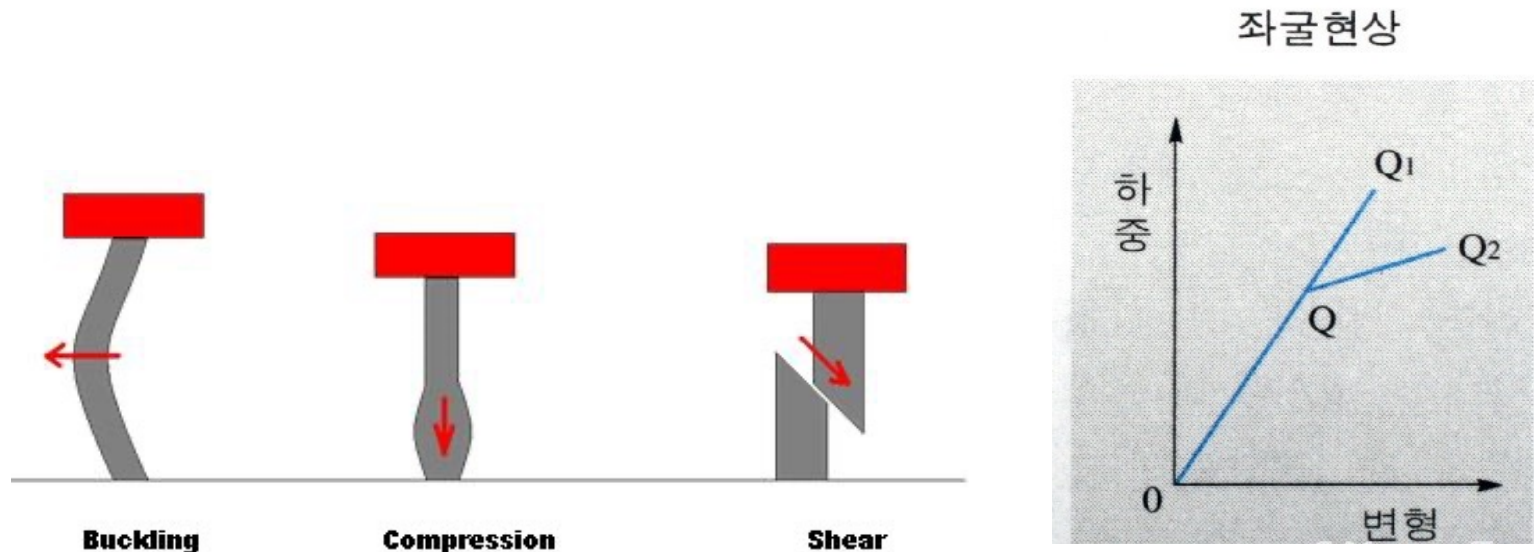
여러가지 물질의 응력변형곡선



고무(rubber)와 같은 탄성이 우수한 물질의 경우, 작은 응력에도 큰 변형량을 나타내며, 상대적으로 작은 소성변형을 일으킨다. 복합재료 (composite)는 기존의 특성을 넘어서거나 보완하는 방향으로 제작되어, 우수한 응력-변화곡선을 나타낸다.

압축시험 (Compression test)

- ✓ 압축시험(compression test)은 인장시험과 거의 유사한 방법으로 수행되며 단지 하중의 방향이 다를 뿐이다.
- ✓ 인장시험에서와 달리 압축시험에서는 좌굴(buckling)에 주의해야 하는데 이는 **시편의 길이와 지름의 비 L/D** 에 따라 다른 양상을 보이게 된다.
- ✓ 일단 좌굴 (파손)이 발생하면 실험을 더 이상 진행시킬 수 없게 됨으로 **적절한 길이와 직경에 따르는 하중**을 미리 염두에 두어야 한다.



길이에 따른 압축시험의 차이

- ✓ 만일 길이와 지름의 비가 너무 작은 경우에는 **시편이 바닥과 닿는 부분에서의 마찰로 인해서 변형이 제한되나**
- ✓ 시편의 길이 방향의 **중간지점에서는 계속해서 변형이 되고 있으므로 마치 술통 (barrel)같은 모양으로 변하게 된다.**
- ✓ 이러한 부적절한 현상을 피하기 위해서는 **재료와 시편의 길이와 지름 비를 적절하게 선택해야 한다.**

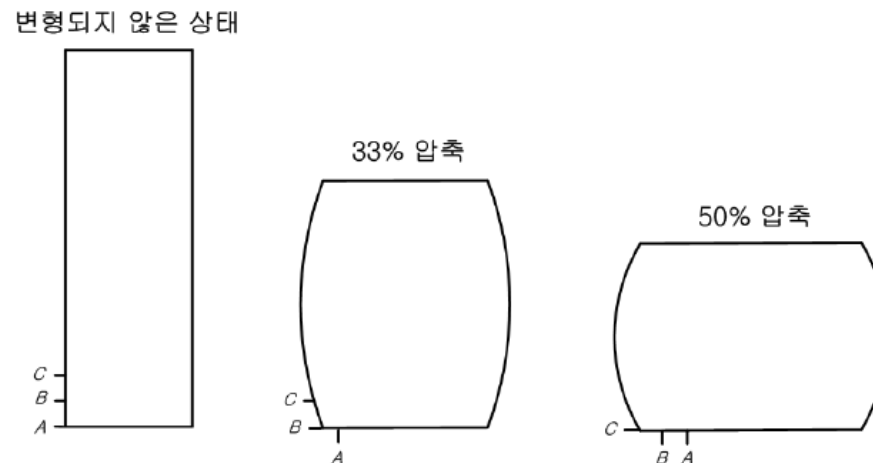


그림 2.6 시편 하중 면에 마찰계수가 1.00일 때 몸통팽창(barreling):
변형이 증가함에 따라 원래 시편 측면의 A, B 및 C점은 하중 면이 이동

압축시험 시편

- ✓ 압축시험시편으로는 보통 짧은 원주상의 시험편이 쓰이며 직경을 (d_0), 단면적 (A_0) 및 길이(h_0)라 할 때, 단면마찰과 굽힘, 휘어짐 등을 **고려하여** $\frac{h_0}{d_0} = 1 \sim 2$

또는 $\frac{\sqrt{A_0}}{h_0} = 1$ 정도가 쓰인다.

- ✓ 시험편 단면을 축에 **정확히 수직으로** 하고 **마찰저항을 줄이기 위해 매우 평활한 마무리 가공이 필요하다.** $\frac{h_0}{d_0}$ 가 다르면 그 **응력-변형선도가 다르므로 h_0/d_0 를 일정하게 해야만 동일 재료에 대해서 대개 일정한 응력-변형선도를 얻는다.**

압축시험 시편

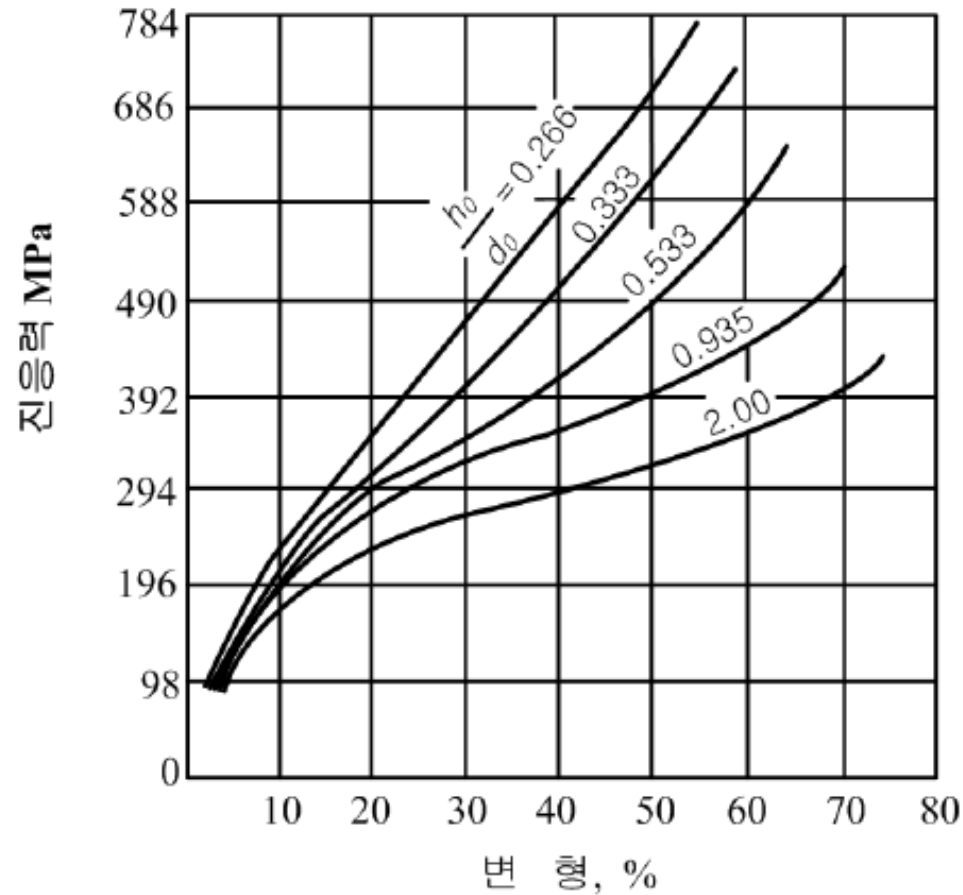
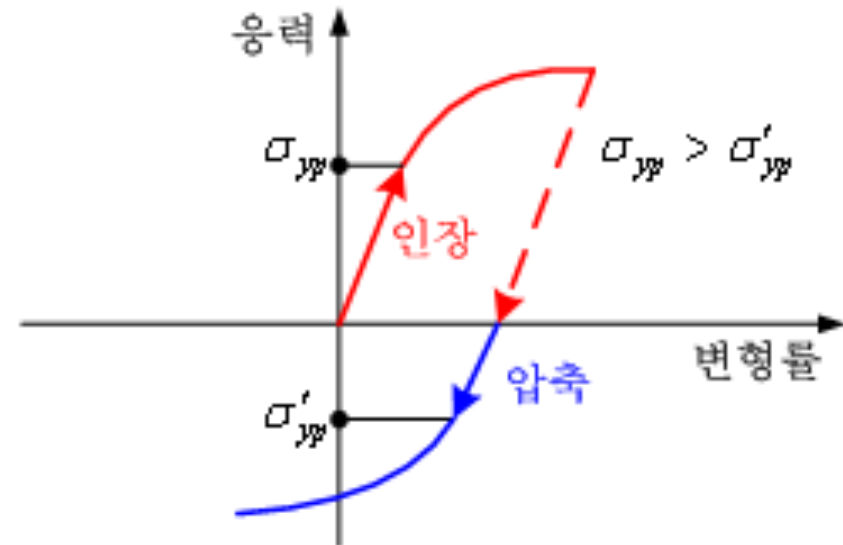


그림 2.7 직경과 길이비(h_0/d_0)에 따른 동의 압축응력

Bauschinger 효과

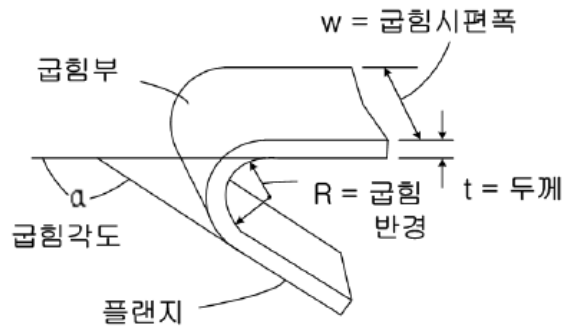
- ✓ 재료를 **인장**하여 **항복점까지 가져가면 소성변형이 시작되게** 되며 **가해지는 힘을 제거하면 소성변형을 제외한 부분으로 되돌아간다.**
- ✓ 이때 다시 재료를 **압축**하기 시작하면 **그에 따른 항복점에 도달하게 되는데 이때는 인장에 의한 항복강도보다 낮은 값을 갖는다.**
- ✓ 즉, 동일한 재료라고 하여도 **인장과 압축에 따라서 항복강도의 값이 달라지는 현상**이 생기는데 **인장에 비해서 압축에서의 항복강도가 낮은 값을 갖게** 되며
- ✓ **Bauschinger 효과(Bauschinger effect)**라고 한다.



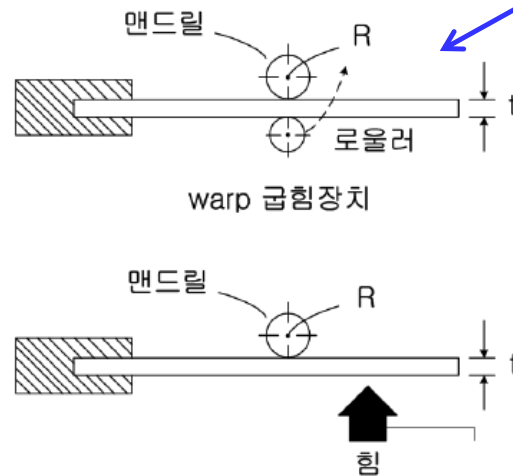
재료의 인장과 압축을 통한 히스테리시스 루프

굽힘시험 (Bending test)

- ✓ 굽힘시험(bending test)은 재료의 **연성 또는 강도를 결정**하기 위하여 시행하며 이 시험은 대개 대(strip), 박판(sheet) 또는 후판(plate)등에 적용하나 인발, 압출봉, 각봉과 용접재 등에도 응용된다.
- ✓ 또한 파괴되기까지 소성변형이 극히 미미하게 일어나는 **취성재료에 대한 강도를 측정하기에 매우 편리**하다.



(a) 굽힘시험에 사용되는 용어



(b) warp 굽힘장치

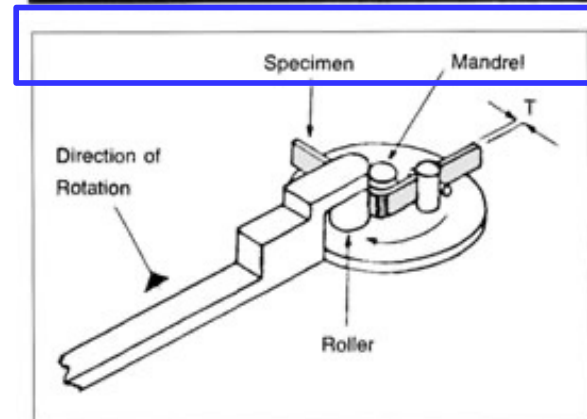
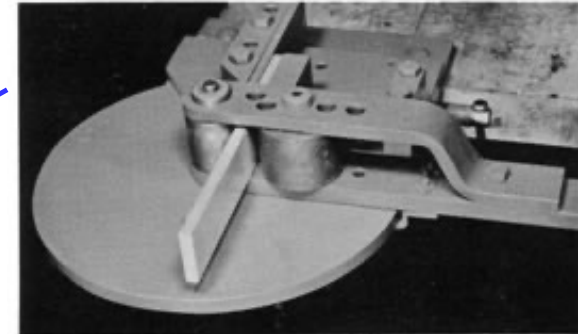


그림 2.9

최소굽힘반경 (Minimum bending radii)

Material	Material Condition	
	Soft	Hard
Aluminum alloys	0	6 <i>t</i>
Beryllium copper	0	4 <i>t</i>
Brass, low leaded	0	2 <i>t</i>
Magnesium	5 <i>t</i>	13 <i>t</i>
Steels		
austenitic stainless	0.5 <i>t</i>	6 <i>t</i>
low carbon, low alloy, and HSLA	0.5 <i>t</i>	4 <i>t</i>
Titanium	0.7 <i>t</i>	3 <i>t</i>
Titanium alloys	2.6 <i>t</i>	4 <i>t</i>

굽힘시험 (Bending test)

- ✓ 3점굽힘시험은 양단 지지 상태에서 보의 중앙에서 하중 P 가 작용하는 형태로 수행한다. 간단한 재료역학의 원리를 사용하면 최대 굽힘 모멘트 M_{max} 는 보의 중간지점에서 발생하며 그 크기는 다음과 같다.

$$M_{max} = \frac{P}{2} \times \frac{L}{2} = \frac{PL}{4}$$

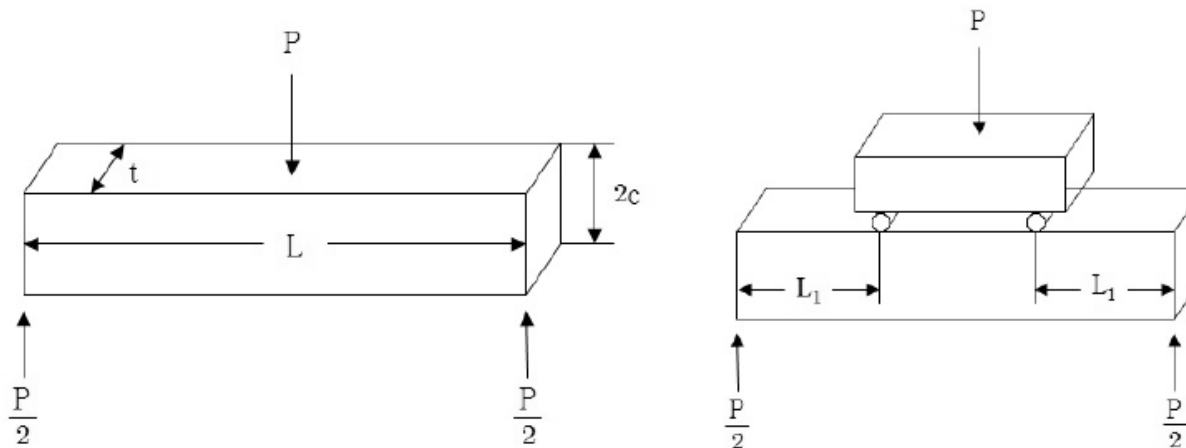


그림 2.12 (a) 3점 굽힘시험장치, (b) 4점 굽힘시험장치

굽힘시험 (Bending test)

- ✓ 보의 외면에서 작용하는 수직응력 σ 는 다음과 같다.

$$\sigma = \frac{Mc}{I}$$

- ✓ 너비 (b), 높이 (h)인 사각형 단면에 대한 관성 모멘트는
- ✓ $I = bh^3/12$ 이므로 위의 식으로부터 수직 응력은 다음과 같이 계산되며 이를 굽힘 강도(flexural strength)라고 한다.

$$\sigma_b = \frac{3PL}{8bc^2}$$

- ✓ 여기서 유의할 점은 굽힘시험에서 얻어진 재료의 강도는 인장 시험에서 구한 값과 다를 수가 있다는 점이다.



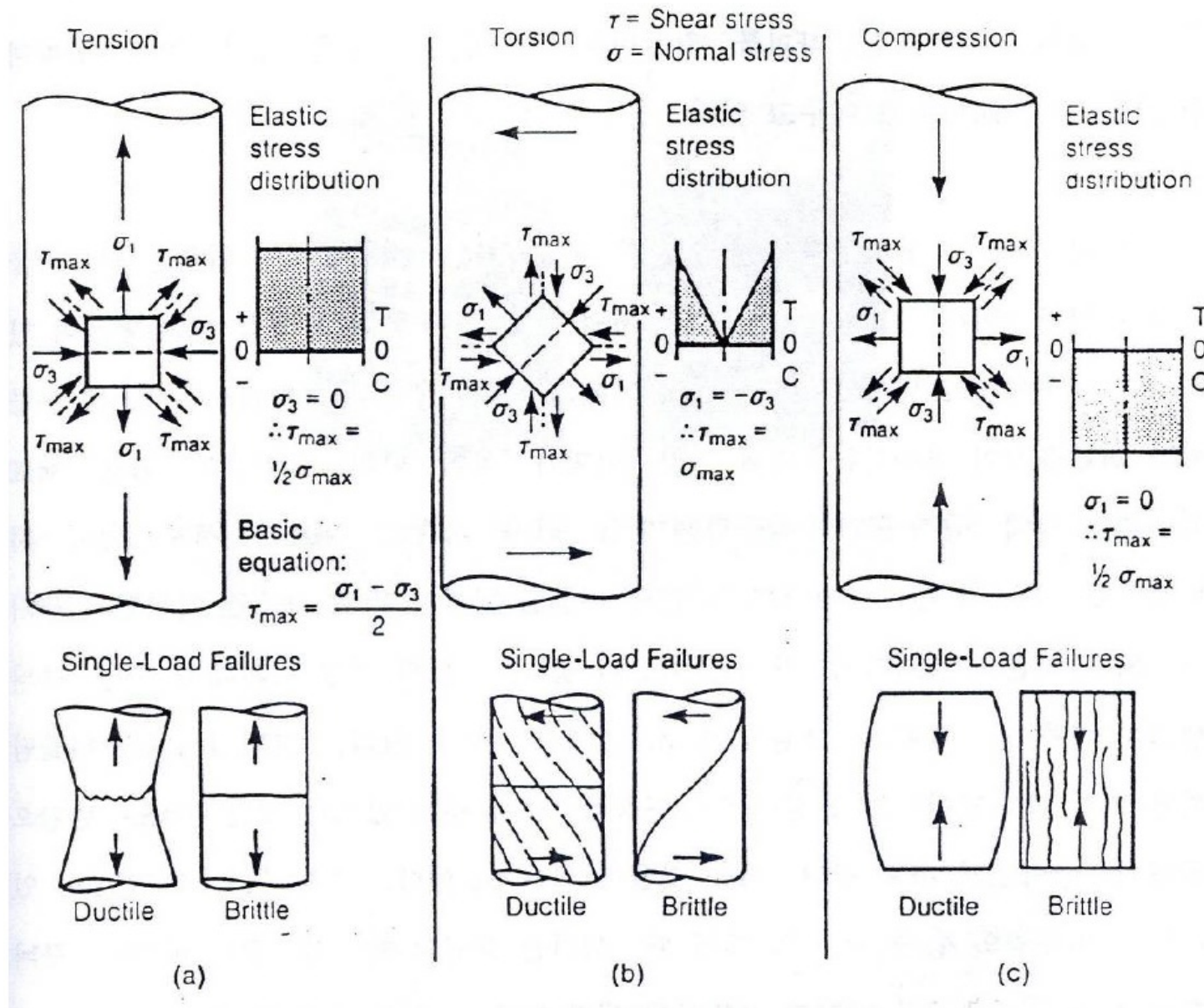
비틀림 시험 (Torsion test)

- ✓ 비틀림 시험(torsion test)을 통해서도 재료의 역학적 성질에 대한 유익한 자료를 다수 얻을 수 있다. 가장 널리 사용되는 방법은 시편의 양끝을 잡고 비틀림을 주는 것이다.
- ✓ 비틀림 시험이 인장시험에 비해서 좋은 점은 인장 시험때에 발생하는 necking 현상이 일어나지 않는다는 점인데, necking이 일어나는 부분에서는 복잡한 응력의 상태가 존재하므로 해석하기가 쉽지 않기 때문이다.

$$\tau = \frac{Tr}{J}$$

- ✓ 여기서 r 은 시편에 사용된 봉의 반지름, J 는 극관성 모멘트(polar moment of inertia), T 는 비틀림 하중이다.

비틀림 시험 (Torsion test)



충격시험 (Impact test)

- ✓ **시험편에 충격을 가해 파단시 흡수에너지의 크고 작음 평가**
- ✓ **재료의 인성과 취성의 정도를 판정하는 시험**
- ✓ **특히 저온취성, 노치취성 및 템퍼취성등의 성질평가에 중요**
- ✓ **공업적으로는 주로 노치 시험편을 사용한 충격굽힘시험(ASTM E23)이 대부분**
- ✓ **이는 Charpy 충격시험법과 Izod충격시험법을 의미하며,**
- ✓ **시험편의 중앙에 노치를 만들고 진자에 무거운 해머를 달아서 시험편에 충격을 가하여 파괴시키는 방법이다.**

충격시험 (Impact test)

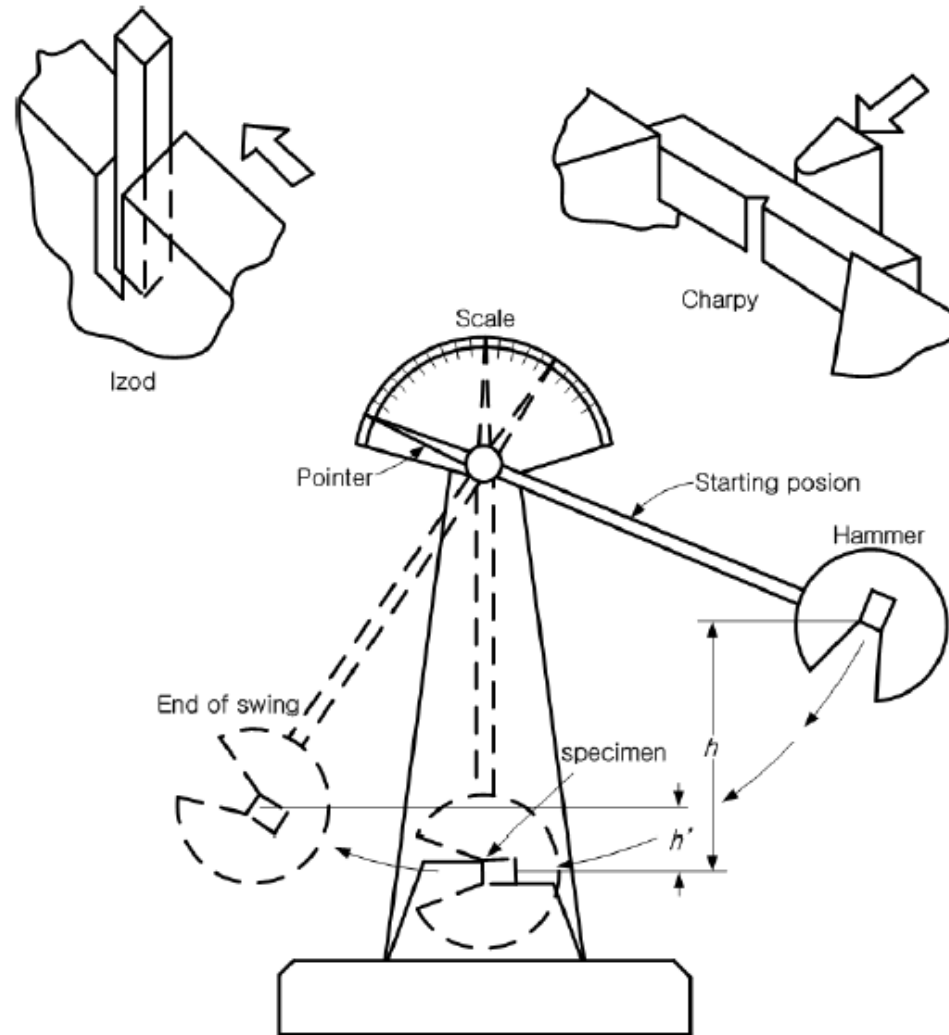


그림 2.13 충격 시험 장치의 개략도

충격시험 (Impact test)

- ✓ 시편에 가해지는 에너지의 크기는 해머가 초기 위치에서 출발하여 시편을 가격하는 순간의 위치 에너지의 차이라고 할 수 있다.
- ✓ 이 에너지로 인하여 시편이 파괴된다.
- ✓ 질량 m 인 해머의 초기 높이와 가격 후의 높이의 차이를 Δh 라고 하고 중력 가속도를 g 라고 하면 Charpy 에너지는 다음과 같이 정의된다.

$$E = mg\Delta h$$

- ✓ 그러므로 Charpy 시험을 통해서 얻은 결과는 파괴시에 재료의 에너지 흡수 능력을 나타내게 되며 이는 곧 재료의 **파괴인성**을 나타낸다.

경도시험 (Hardness test)

- ✓ 경도는 변형에 대한 저항을 의미하는데 금속의 경우에 이 특성은 **영구 또는 소성 변형에 대한 저항**을 측정하는 것이다.
- ✓ **정적 압입시험** : 시험하려는 재료에 구(ball), 다이아몬드 cone, 또는 피라미드형 압입자를 압입시킨다. 면적에 가한 전체시험 힘 또는 압입 깊이의 관계로 경도를 측정한다. Rockwell, Brinell, Knoop, Vickers 및 초음파 경도시험이 여기에 속한다.
- ✓ **동적 경도시험** : 표준질량과 크기를 가진 물체를 시편으로부터 반발되는 높이를 경도로 측정한다. Shore시험이 여기에 속한다.
- ✓ **긫힘시험** : 하나의 재료를 다른 재료에 긫힘으로써 경도를 나타내는데 Mohs 및 줄(file)경도시험이 여기에 속한다.

경도시험 (Hardness test)

- ✓ 로크웰 시험 (Rockwell hardness test)은 **미리 가해진 기준하중에 의하여 생긴 압입 깊이를 초과하여 시험하중에 의하여 가해진 힘으로 120 의 원추형 다이아몬드 압입자가 들어간 추가적인 깊이를 측정하는 역관계에 기초를 둔다.**
- ✓ 기준하중을 가하고 0위치를 설정한다.
- ✓ 시험하중을 일정기간동안 작용하고 제하하며, 이때 작용한 기준하중은 없어진다.
- ✓ 나타난 Rockwell 경도숫자는 0위치로부터 시험하중을 작용한 결과로 생긴 깊이의 차이로 나타낸다.

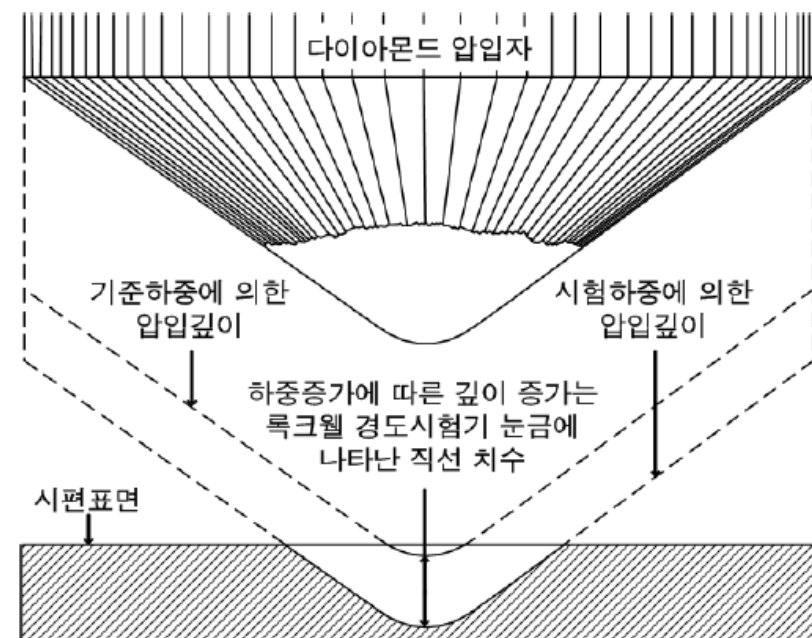
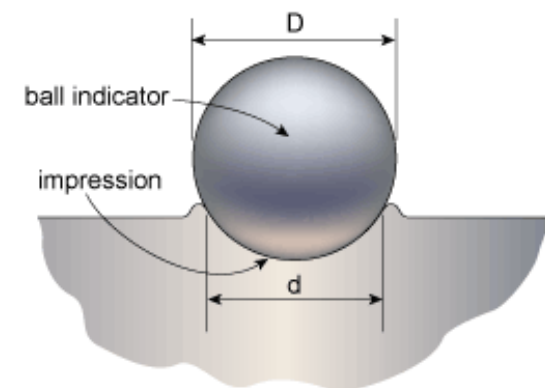


그림 2.16 로크웰 시험의 원리

경도시험 (Hardness test)

- ✓ Brinell 경도시험(Brinell hardness test)은 **광범위한 재료의 경도를 결정하는 단순한 압입시험.**
- ✓ 시험은 대개 **500~3000kgf의 일정한 하중을 일정시간(10~30초)동안 5~10mm 직경의 구(ball)를 시편의 평평한 표면상에 작용 시킨후 구형 압입 흔적의 직경을 측정하여 경도를 평가**
- ✓ 사용되는 표준하중은 500, 1000, 1500, 2000 및 3000 kgf이며 사용되는 시험하중은 주로 압흔의 크기, 시편두께 및 시편표면 등에 의하여 좌우된다. 500kgf 하중은 비교적 연한 금속인 Cu 및 Al 합금에 사용되며 3000kgf 하중은 강 및 주철과 같은 단단한 재료에 사용된다.



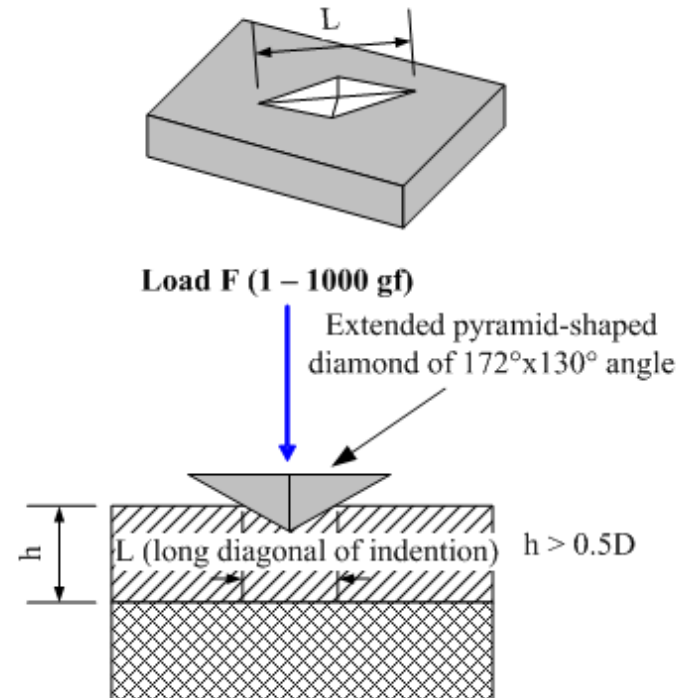
(a) Brinell indentation

미소경도시험 (Micro hardness test)

- ✓ 미소경도시험은 일정한 형태의 다이아몬드 압입자로 시편 표면에 **1~1000gf** 의 미소하중을 가함으로써 미세한 경도를 측정하며 현미경을 사용한다. Knoop와 Vickers 경도시험에서는 경도값은 현미경으로 압흔의 크기를 측정하며 식을 이용하거나 또는 ASTM E384의 표를 이용한다.



Knoop Hardness Test



미소경도시험 (Micro hardness test)

- ✓ Knoop 및 Vickers 미소경도시험을 응용하는 예에는,
 - ✓ 시편이 너무 작아서 일반적인 거시적 경도시험 방법으로는 측정할 수 없는 정밀한 시편
 - ✓ 박판(foil) 또는 선(wire)이 너무 얇거나 가늘어서 일반적인 거시적 경도시험방법으로는 측정할 수 없는 생산품
 - ✓ 침탄 또는 질화처리에서 경도에 의하여 제품생산을 조절하는 시편
 - ✓ 미세성분의 경도측정
 - ✓ 연마에 의한 연소, 탈탄 등과 같은 표면불량 검사를 위한 경도측정
 - ✓ 도금 또는 접착층과 같은 표면층의 경도측정 등이 있다.

마모시험 (Wear test)

- ✓ 2개 이상의 물체가 접촉하면서 상대운동을 할 때, 그 면이 감소되는 현상을 마모 (wear) 또는 마멸이라 한다. 마모에 대한 강도를 내마모성이라고도 하며, 이것은 접촉하는 상대방의 재질 및 표면 상태 등에 따라 영향을 받는다.
- ✓ 기계 부분이 회전 또는 슬라이딩을 할 때 상대적으로 마찰이 생기는데, 직접 마찰이 생기는 경우는 적고 기름, 모래, 산화물들이 그 사이에 개재하는 일이 많다. 그러므로 시험조건을 확실하게 정하는 것이 필요하다. 예를 들면 기차의 레일과 타이어의 마모는 기계적 강도에만 영향을 받고, 분쇄기의 마모는 충격치로 결정된다. 따라서 복잡한 마모현상에 직접 영향을 주는 가장 중요한 조건을 대상으로 시험하는 것이 필요하다.

Chapter 2. 요약

재료시험

1. 인장시험 (Tension test)
2. 압축시험 (Compression test)
3. 굽힘시험 (Bending test)
4. 비틀림시험 (Torsion test)
5. 충격시험 (Impact test)
6. 경도시험 (Hardness test)
7. 마모시험 (Wear test)

응력과 변형률 (Stress and strain)

- ✓ 공칭 응력 (Engineering stress) - 공칭 변형률 (Engineering strain)
- ✓ 진응력 (True stress) - 진 변형률 (True strain)

