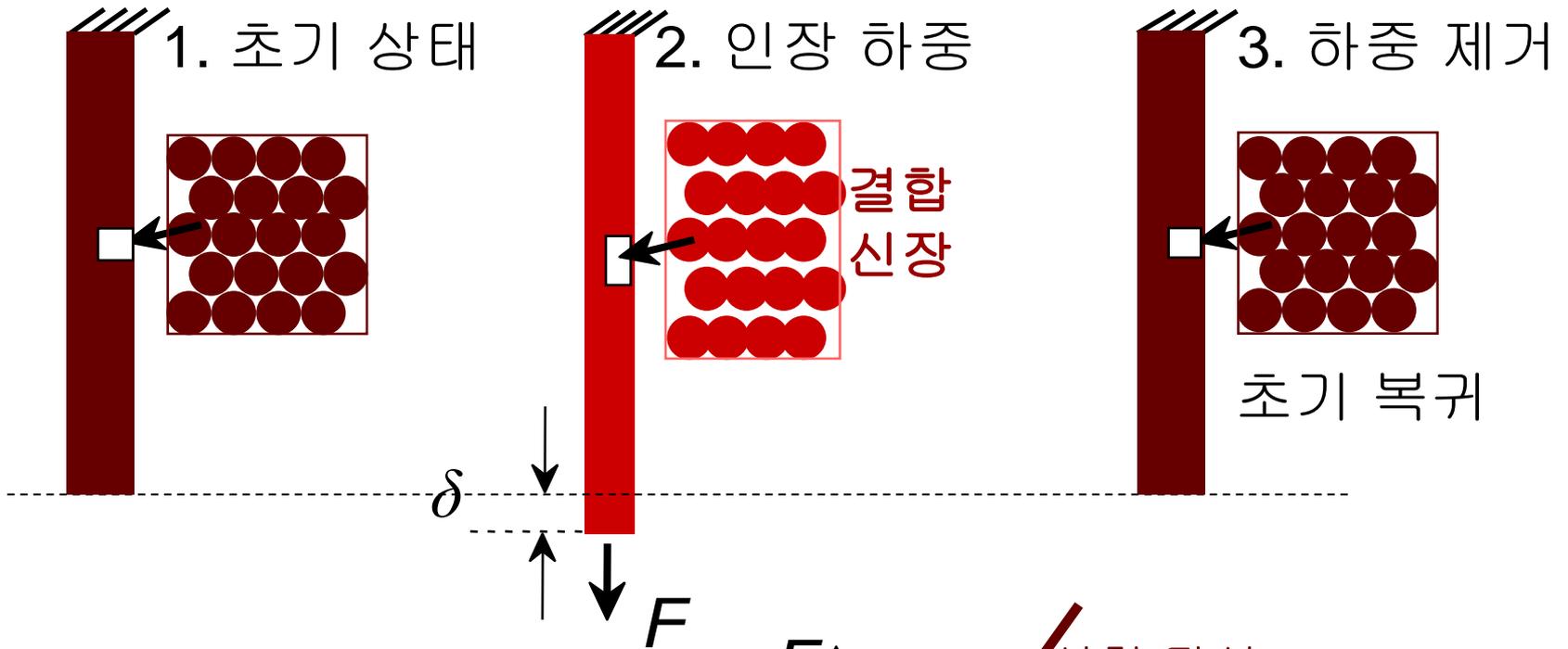


# Chapter 8: 금속의 기계적 성질 (Mechanical Properties of Metals)

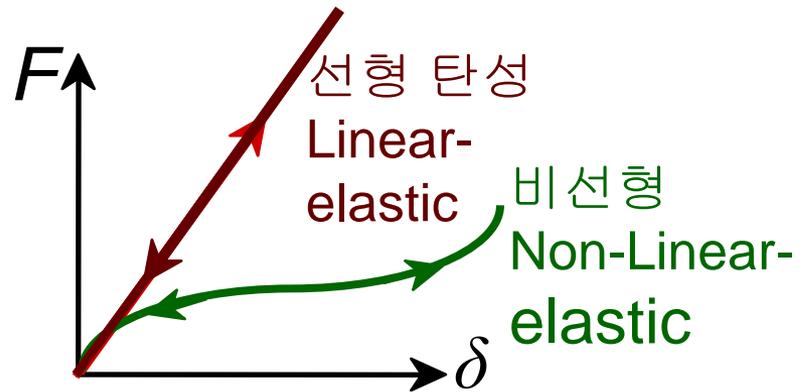
## 학습목표

- 응력(**Stress**)과 변형률 (**strain**)의 정의와 관련 법칙
- 탄성 변형 (**Elastic behavior**) 및 소성 변형 (**Plastic behavior**)의 이해
- 경도(**Hardness**), 연성(**ductility**) 등의 기계적 성질

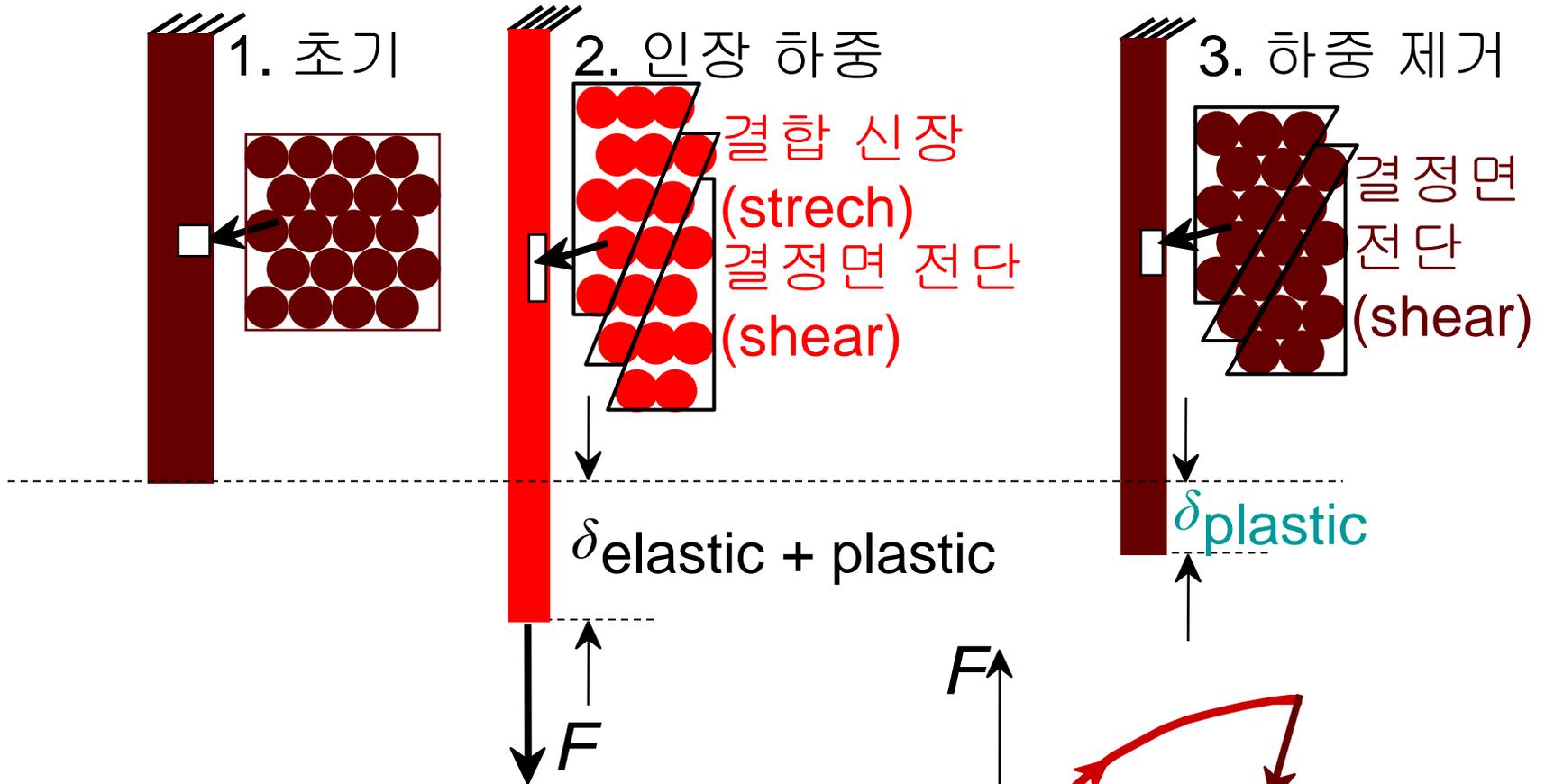
# 탄성 변형 (Elastic Deformation)



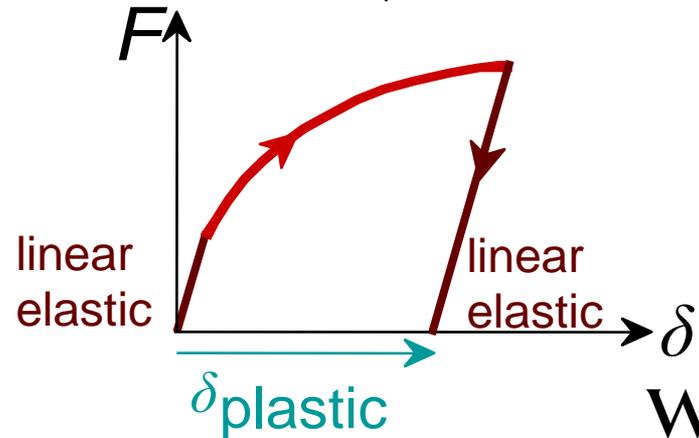
탄성 (Elastic)은  
가역적(reversible)이다!



# 소성 변형 (Plastic Deformation)

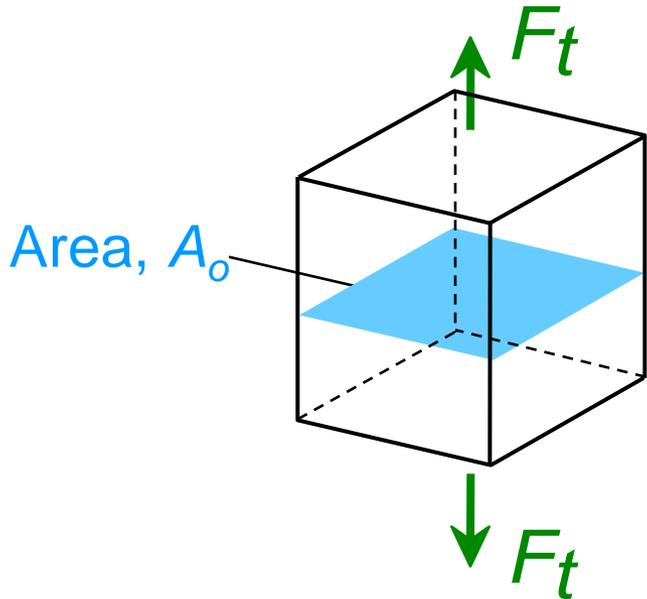


소성 (Plastic)은  
**영구적(permanent)**이다!



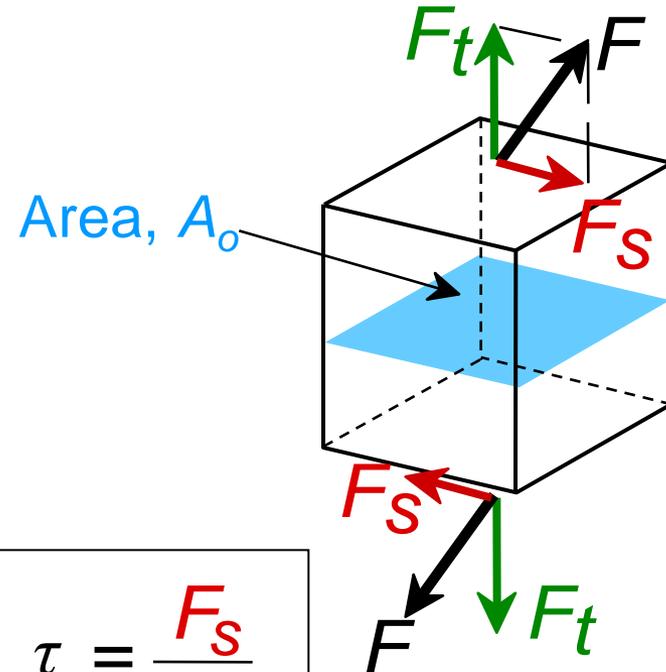
# 공칭 응력 (Engineering Stress)

- 인장 응력 (Tensile stress,  $\sigma$ ):
- 전단 응력 (Shear stress,  $\tau$ ):



$$\sigma = \frac{F_t}{A_o} = \frac{\text{N}}{\text{m}^2}$$

인장 하중 전에  
원래의 단면적



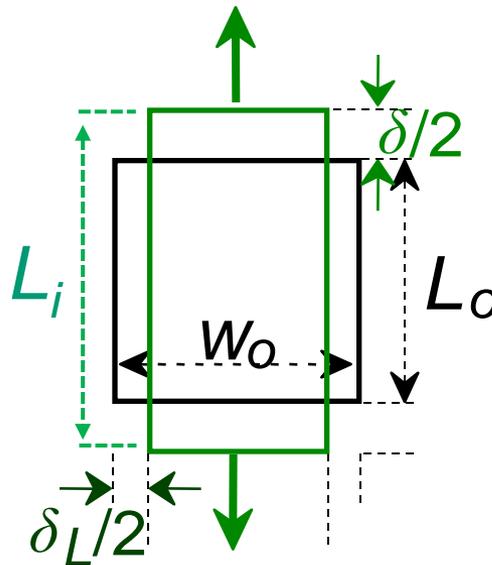
$$\tau = \frac{F_s}{A_o}$$

응력의 단위: 1 MPa = 10<sup>6</sup>N/m<sup>2</sup>

# 공칭 변형률 (Engineering Strain)

- 인장 변형률 (Tensile strain):

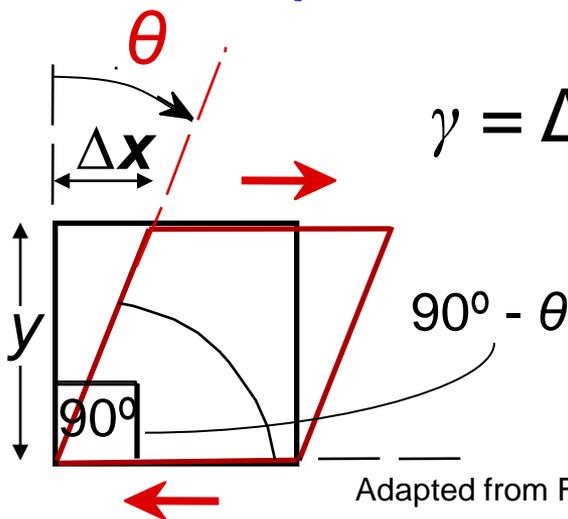
$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{L_i - L_0}{L_0}$$



- 횡 변형률 (Lateral strain):

$$\epsilon_L = -\frac{\delta_L}{W_0}$$

- 전단 변형률 (Shear strain):



$$\gamma = \Delta x / y = \tan \theta$$

변형률은 항상 무차원 (dimensionless)이다.  
 0 dimension; 점  
 1 dimension; 선  
 2 dimension; 면  
 3 dimension; 입방체

Adapted from Fig. 8.1 (a) and (c), Callister & Rethwisch 9e.

# 응력(Stress)-변형 (Strain) 시험

• 인장시험 측정기

• 인장 시료

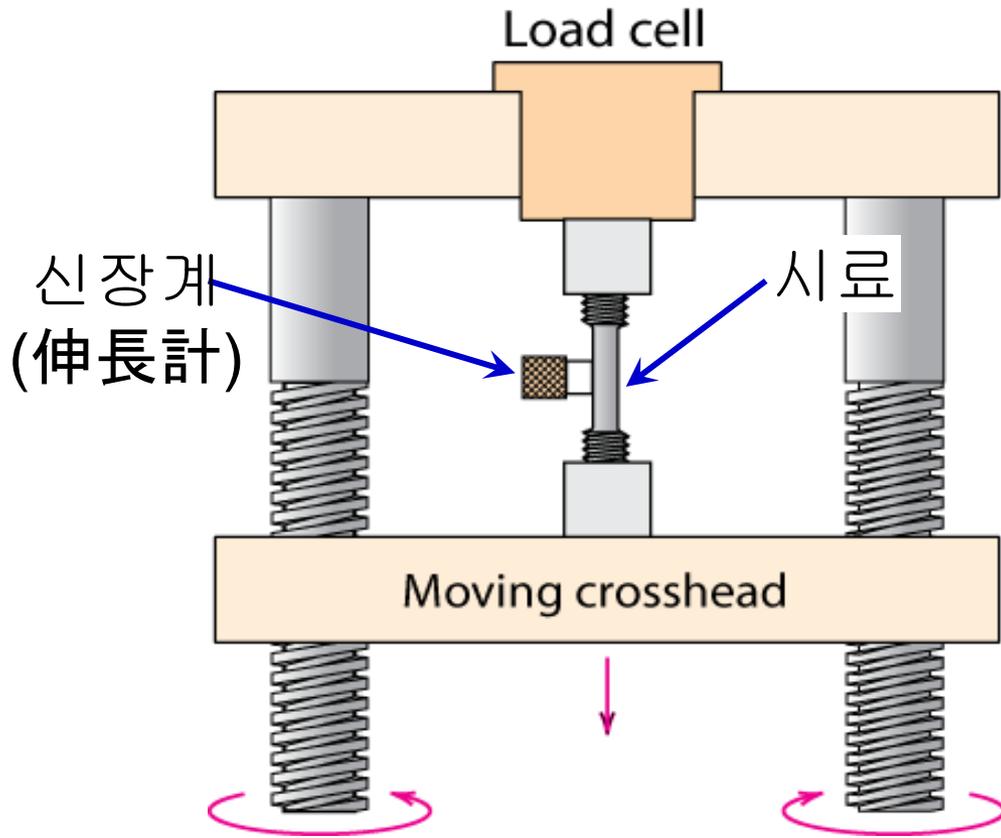


Fig. 8.3, Callister & Rethwisch 9e.

(Taken from H.W. Hayden, W.G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*, p. 2, John Wiley and Sons, New York, 1965.)

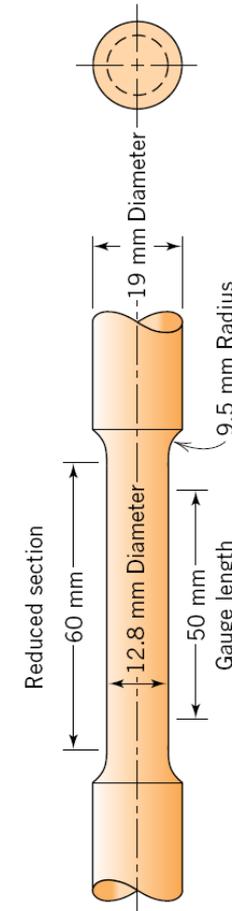
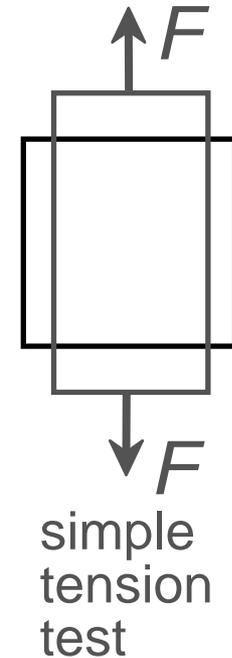
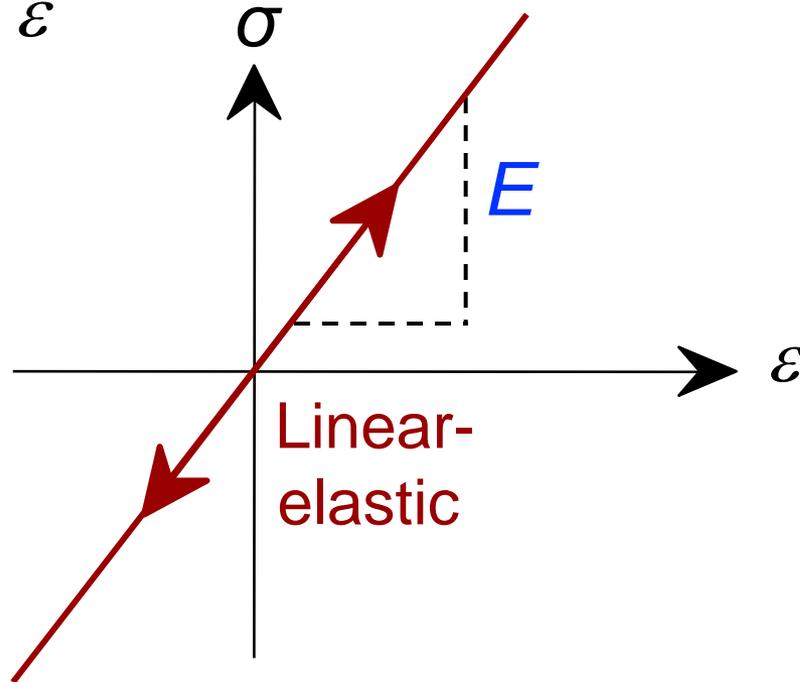


Fig. 8.2, Callister & Rethwisch 9e.

# 선형 탄성 변형 (Linear Elastic Deformation)

- 탄성 계수 (Modulus of Elasticity,  $E$ ):  
영(Young)의 계수라고 알려짐, 응력과 변형을 사이의 비례 상수
- 훅의 법칙 (Hooke's Law):

$$\sigma = E \varepsilon$$



탄성 변형: 응력( $\sigma$ )과 변형률( $\varepsilon$ )이 선형 비례

# 프아송 비 (Poisson's ratio, $\nu$ )

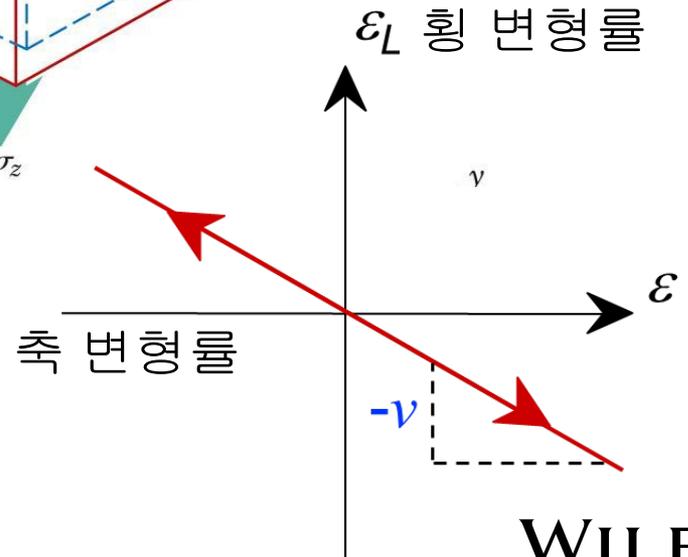
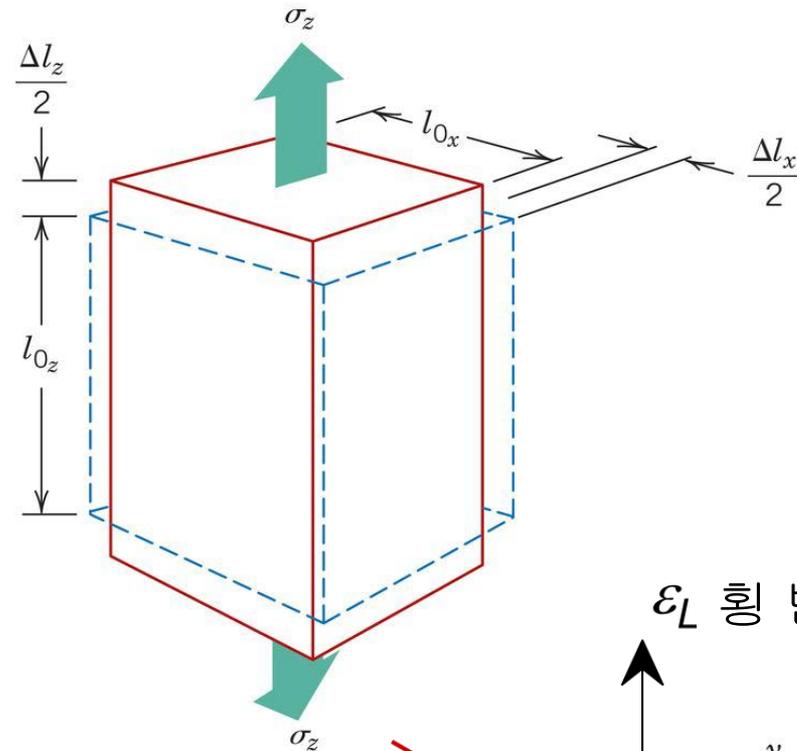
- Poisson's ratio,  $\nu$ :

$$\nu = - \frac{\epsilon_L}{\epsilon} = \frac{\Delta l_x / l_{0x}}{\Delta l_z / l_{0z}}$$

metals:  $\nu \sim 0.33$

ceramics:  $\nu \sim 0.25$

polymers:  $\nu \sim 0.40$

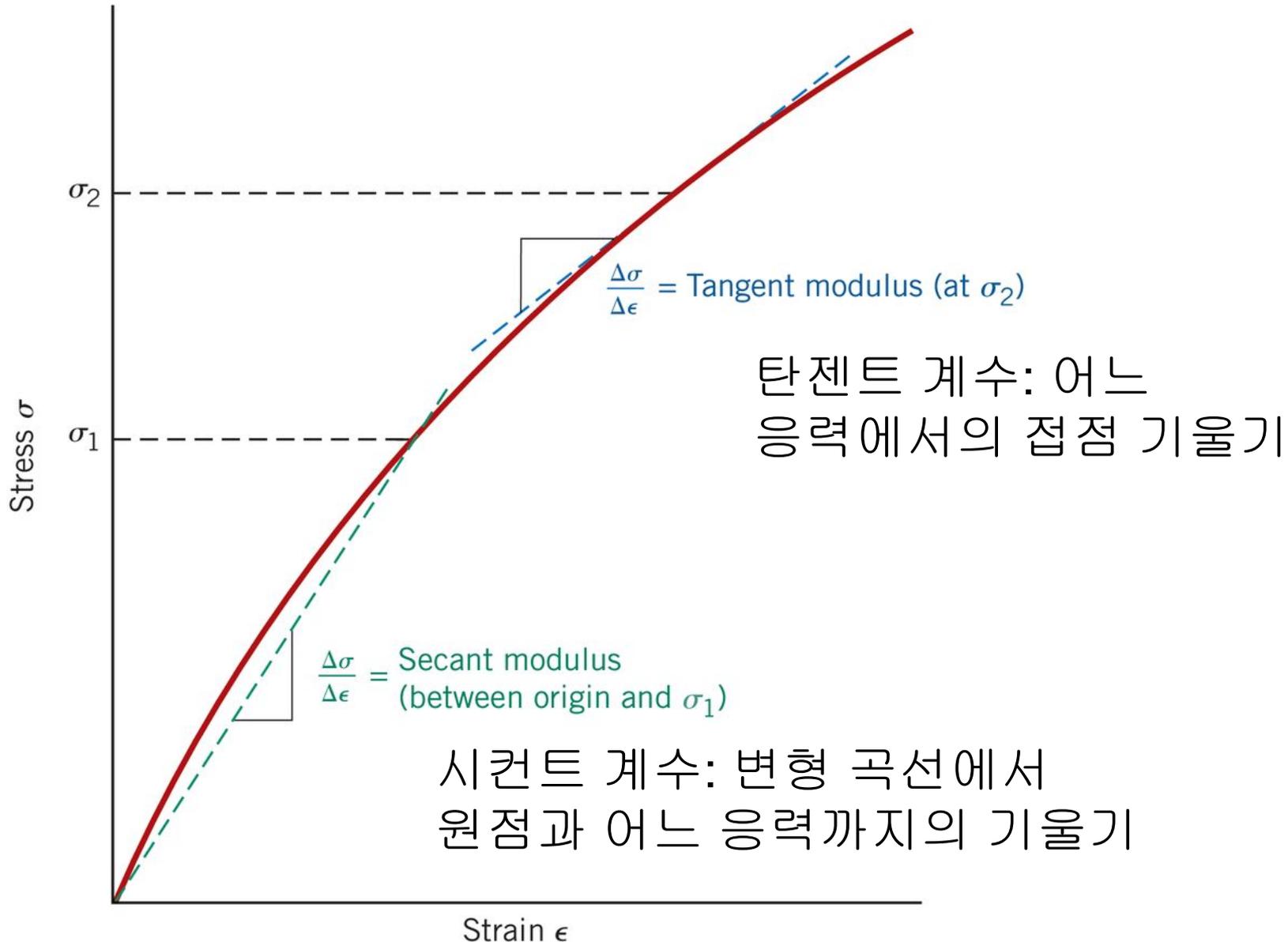


단위:

$E$ : [GPa] or [psi]

$\nu$ : 무차원 (dimensionless)

# 비선형 탄성 변형



# Mechanical Properties

- (탄성 계수에 비례) 응력 변형 곡선의 기울기는 금속의 결합 강도에 영향을 받는다.

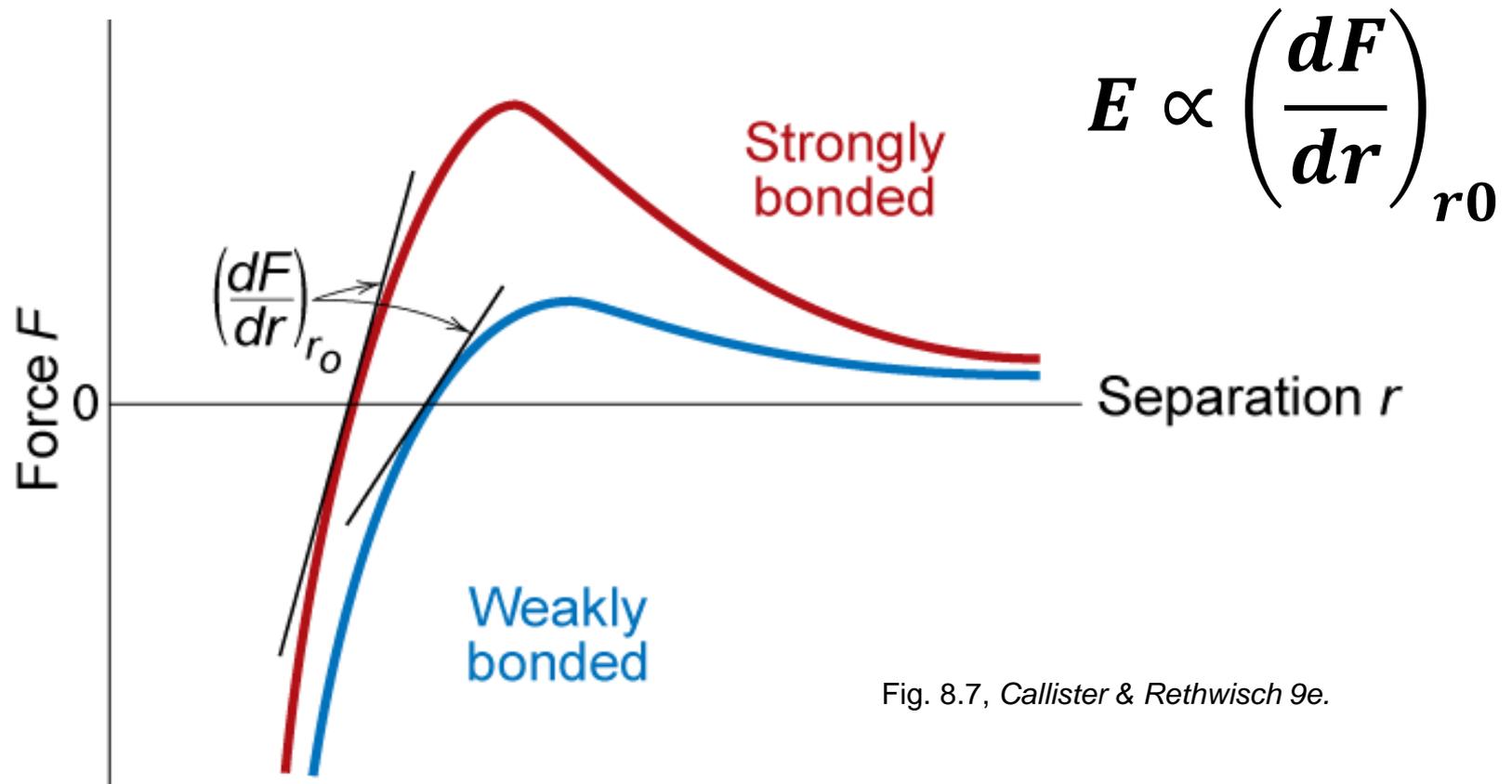
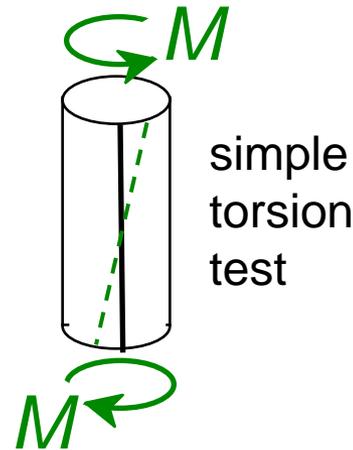
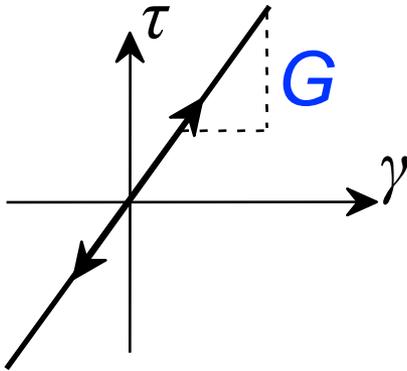


Fig. 8.7, Callister & Rethwisch 9e.

# Other Elastic Properties

- 탄성 전단 계수 (Elastic Shear modulus,  $G$ ):

$$\tau = G \gamma$$

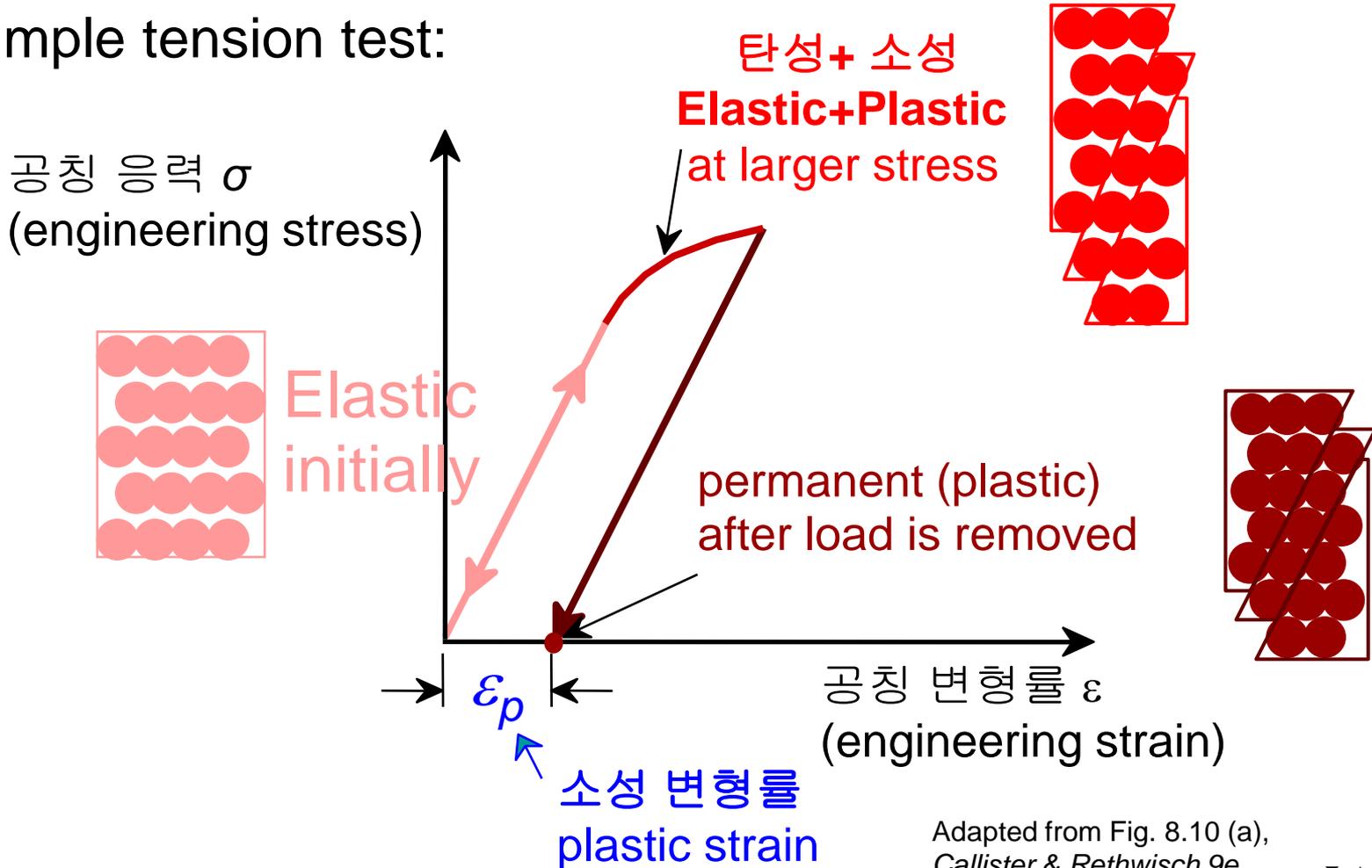


$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)}$$

# 소성 변형 (Plastic Deformation)

(at lower temperatures, i.e.  $T < T_{melt}/3$ )

- Simple tension test:

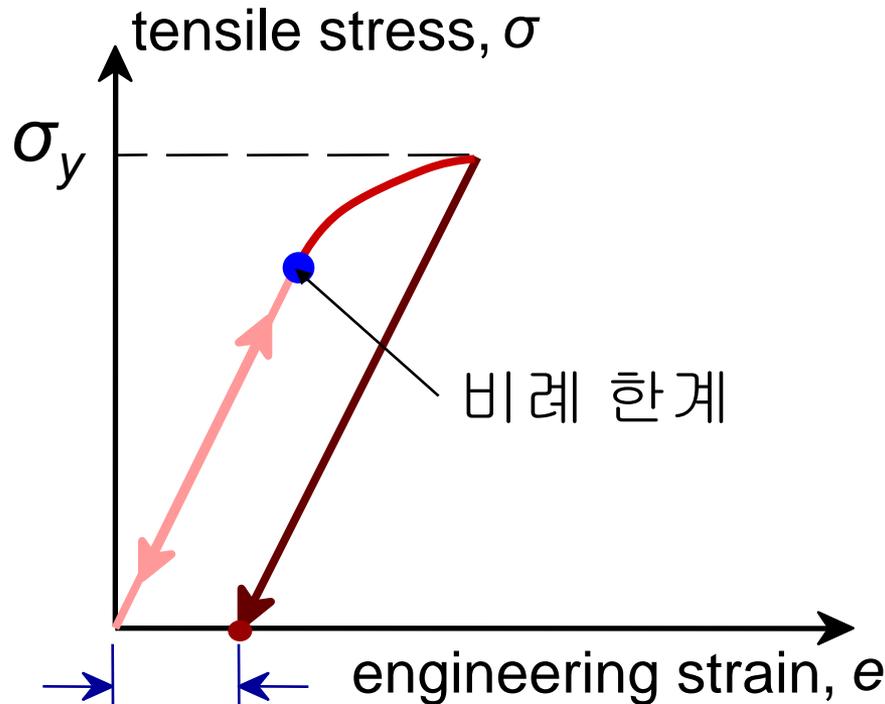


Adapted from Fig. 8.10 (a),  
Callister & Rethwisch 9e.

# 항복 강도 (Yield Strength, $\sigma_y$ )

- 항복 (yielding) 현상: 확실하게 소성변형이 시작되는 현상 .

when  $\varepsilon_p = 0.002$



$\sigma_y =$  항복 강도  
(yield strength)

Note: for 2 mm sample

$$\varepsilon = 0.002 = \Delta z / z$$

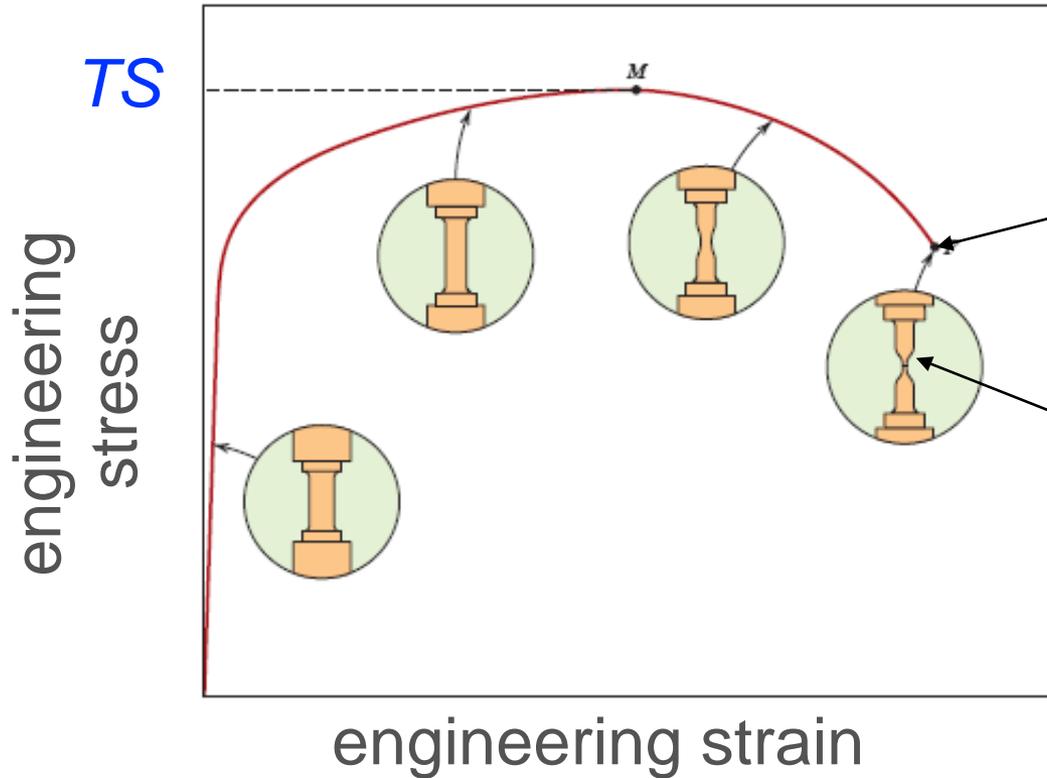
$$\therefore \Delta z = 0.004 \text{ mm}$$

$$\varepsilon_p = 0.002$$

Adapted from Fig. 8.10 (a),  
Callister & Rethwisch 9e.

# 인장 강도 (Tensile Strength, TS)

- 공칭 응력 - 변형 곡선의 최대 응력.



Adapted from Fig. 8.11,  
Callister & Rethwisch 9e.

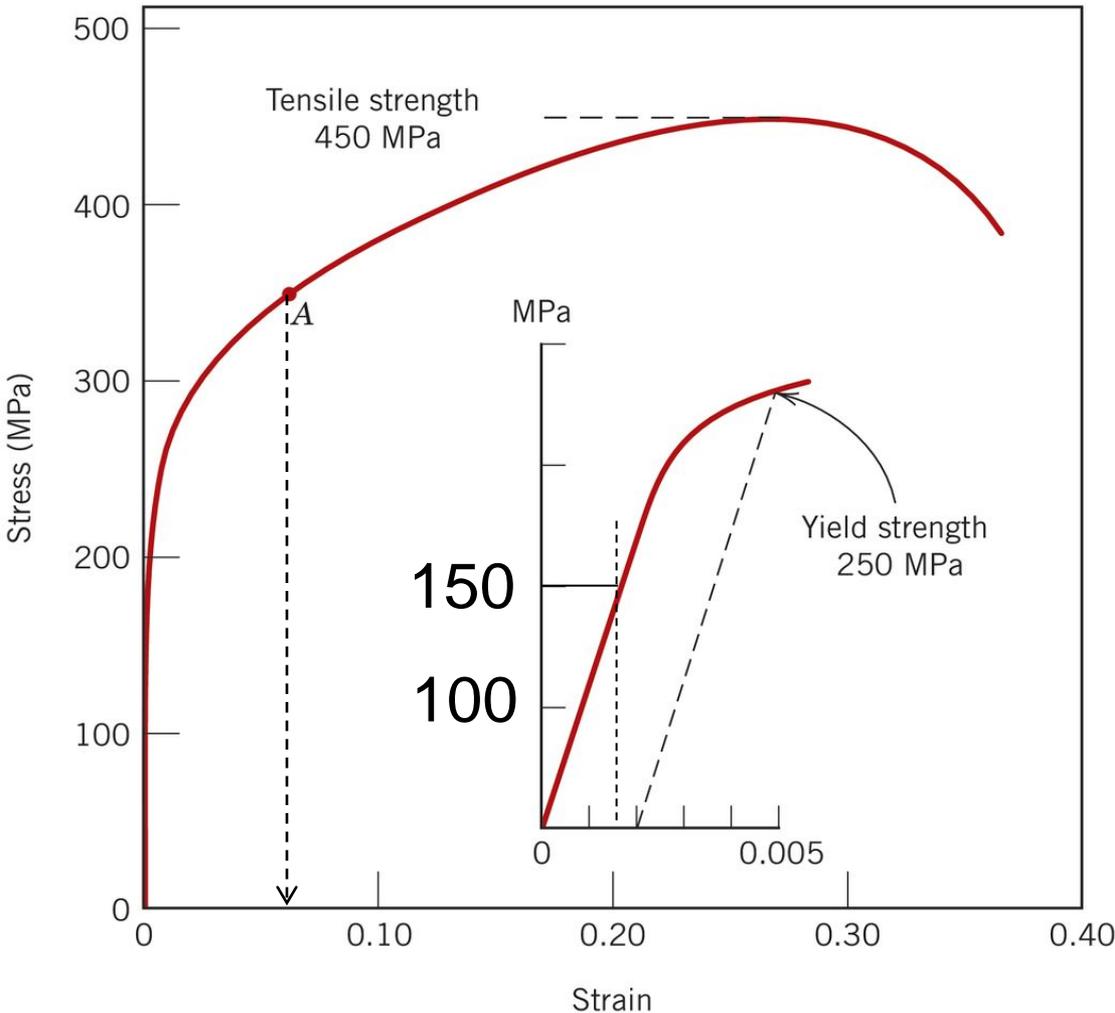
$F$  = 파괴 강도  
재료 설계에서  
고려 사항 X

넉킹 (Necking)  
- 변형이 한  
부분에 집중

- **Metals**: 인장강도 이후 넉킹이 시작된다.

# 인장 강도 (TS) 예제 8.3

황동 인장 시편의 인장 응력-변형률 곡선에서 다음 값을 결정하라.



- 탄성계수
- 항복강도
- 초기지름 12.8mm일 때 최대하중
- 시편의 초기길이 250mm이고, 350MPa의 인장 응력시 길이 변화

# 인장 강도 (TS) 예제 8.3

황동 인장 시편의 인장 응력-변형률 곡선에서 다음 값을 결정하라.

a. 탄성계수

$$E = \frac{(150 - 0)MPa}{(0.0016 - 0)} = 93.8GPa$$

b. 항복강도: 250MPa at 0.002 strain

c. 초기지름 12.8mm일 때 최대하중

$$F = \sigma A_0 = \sigma(\pi r^2) = 450 \times \frac{10^6 N}{m^2} \times (6.4 \times 10^{-3} m)^2 \times \pi = 57900 N$$

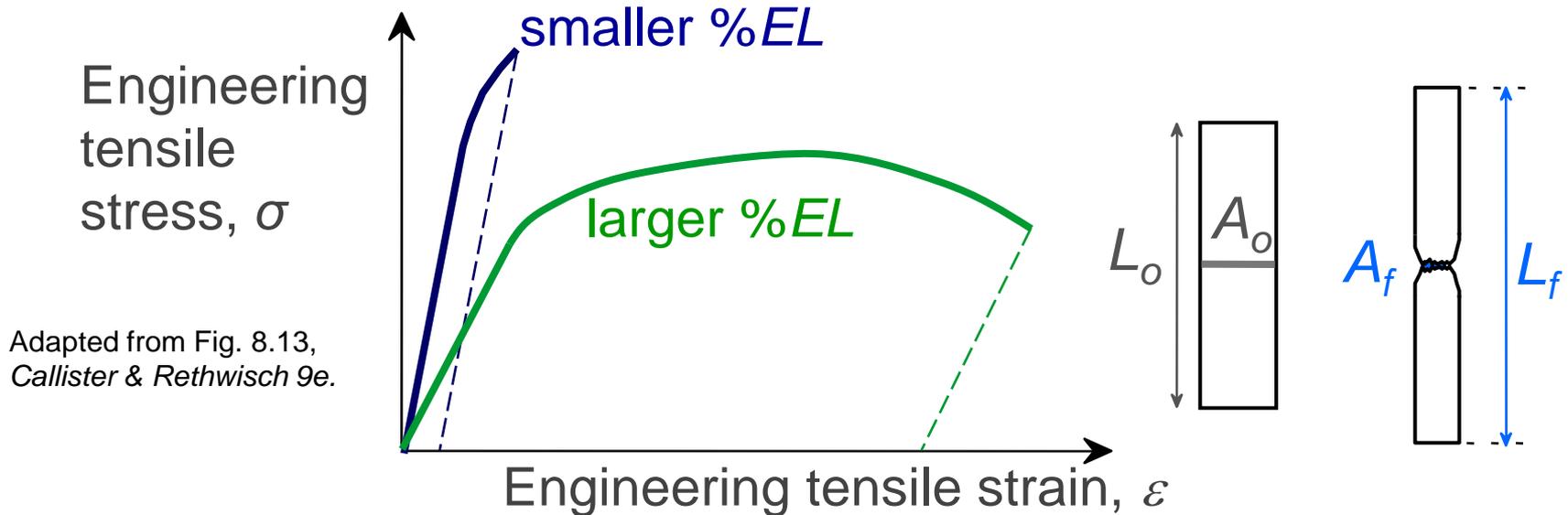
d. 시편의 초기길이 250mm이고, 350MPa의 인장 응력시 길이 변화

$$\epsilon = \frac{\delta}{L_0} = \frac{\delta}{250mm} = 0.06 \quad \delta = 15 mm$$

# 연성 (Ductility)

- 파괴가 일어날 때까지의 소성변형:

$$\%EL = \frac{L_f - L_o}{L_o} \times 100$$

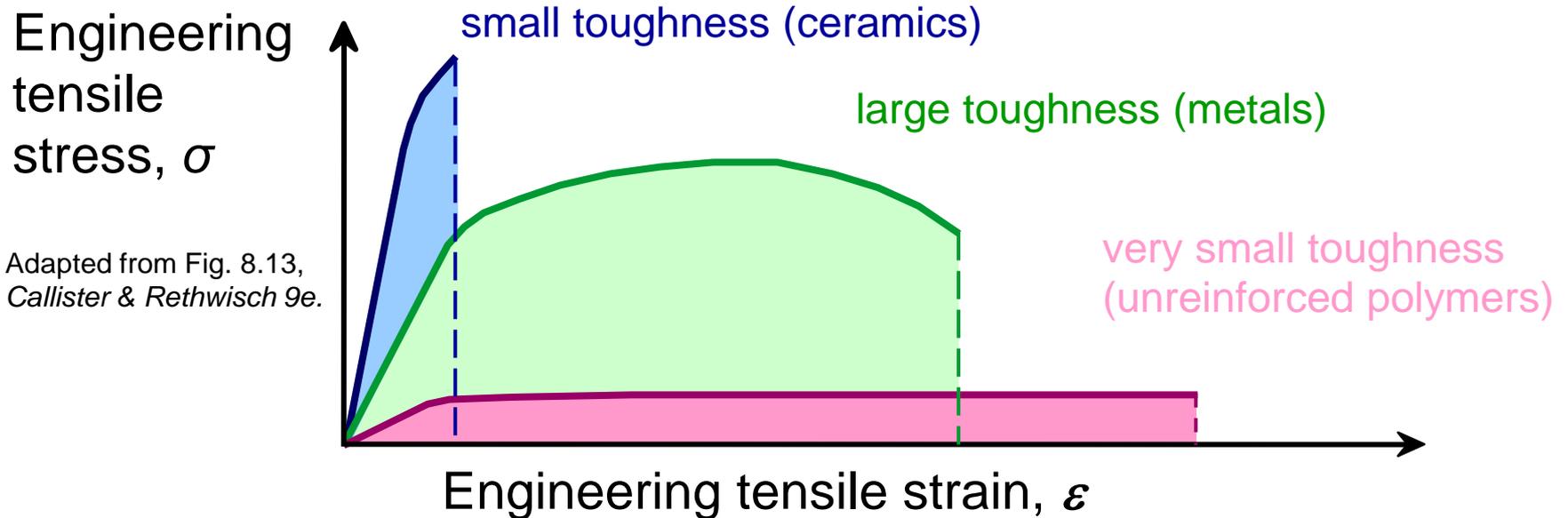


- 단면적 감소의 연성값:

$$\%RA = \frac{A_o - A_f}{A_o} \times 100$$

# 단단함, 인성 (Toughness)

- 물질의 취성 파괴에 대한 저항도
- 물질의 단위 체적을 파괴하기 필요한 에너지
- 대략적으로 응력 - 변형 곡선의 아래 면적에 해당.

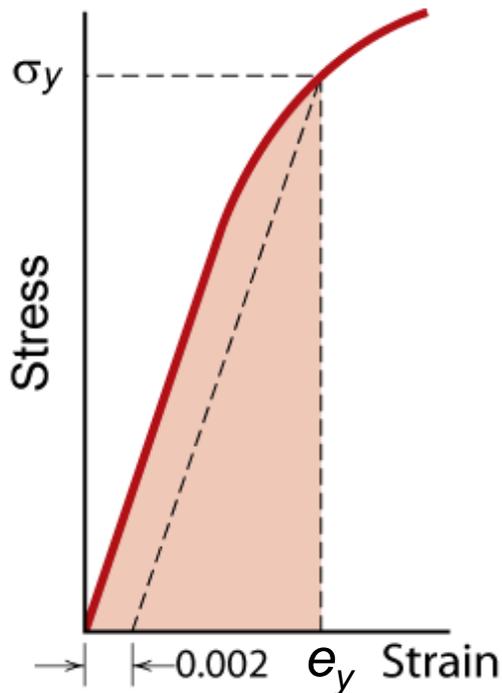


취성 파괴 (Brittle fracture): 탄성 에너지 (elastic energy)

연성 파괴 (Ductile fracture): elastic + plastic energy

# 탄력 (Resilience, $U_r$ )

- 탄성 변형에 따른 에너지를 저장하는 물질의 능력
- 하중 제거 시 에너지의 회복력



$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon$$

선형 탄성을 가정하면,

$$U_r \cong \frac{1}{2} \sigma_y e_y$$

Fig. 8.15, Callister & Rethwisch 9e.

# 탄성 변형 회복 (Elastic Strain Recovery)

P 243

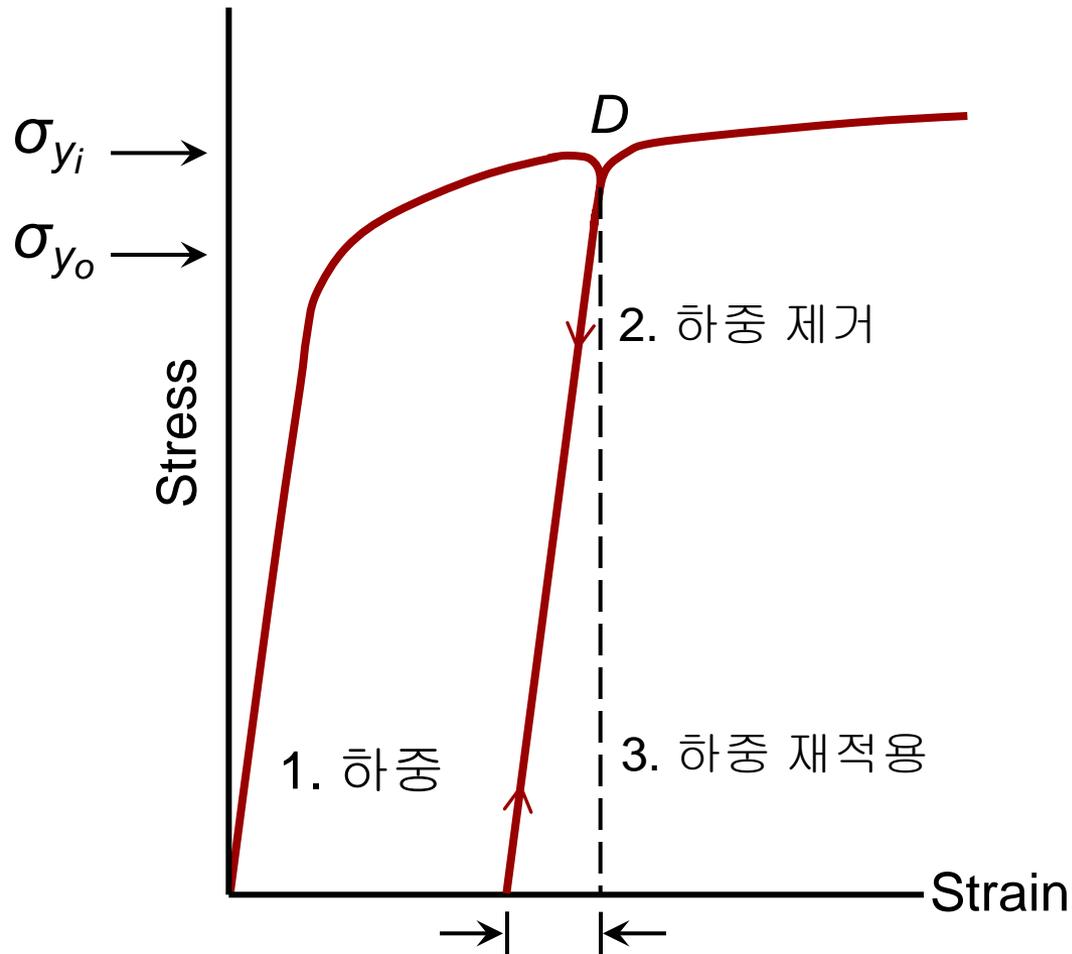


Fig. 8.17, Callister & Rethwisch 9e.

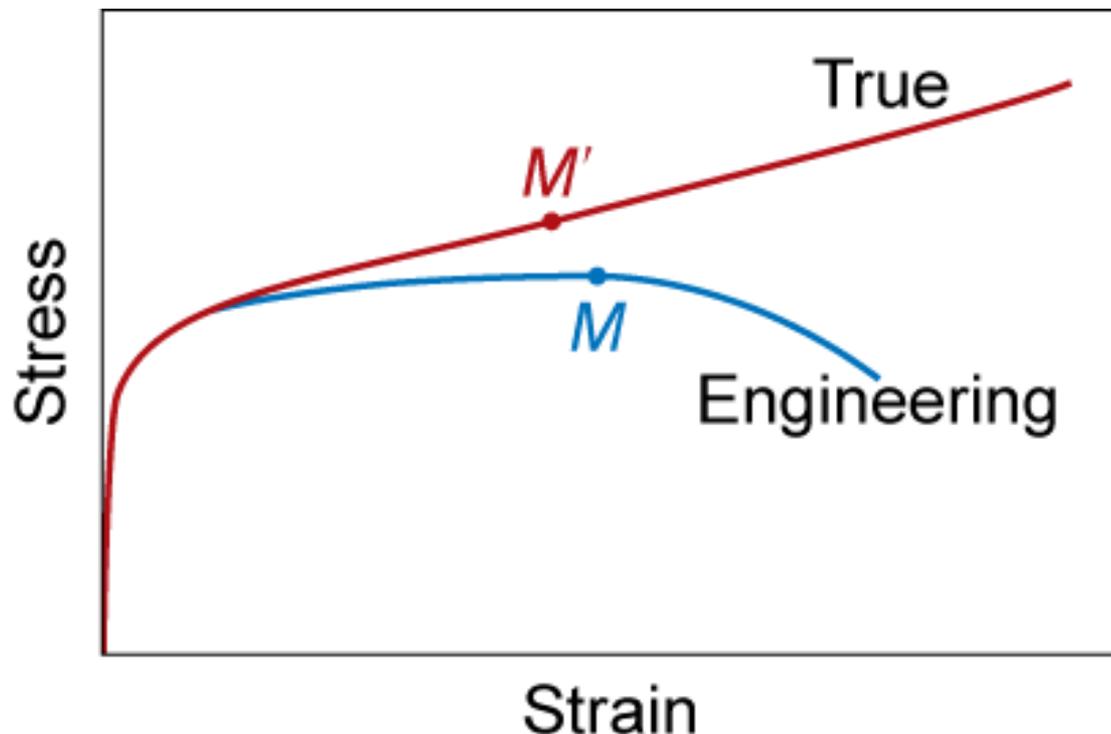
탄성 변형 회복  
Elastic strain recovery

# 진응력 및 진변형 (True Stress & Strain)

최대 인장 강도 이후 단면적이 변하기 때문에 실제로는 강도가 증가한다.

- True stress  $\sigma_T = F/A_i$
- True strain  $\epsilon_T = \ln(\ell_i/\ell_o)$

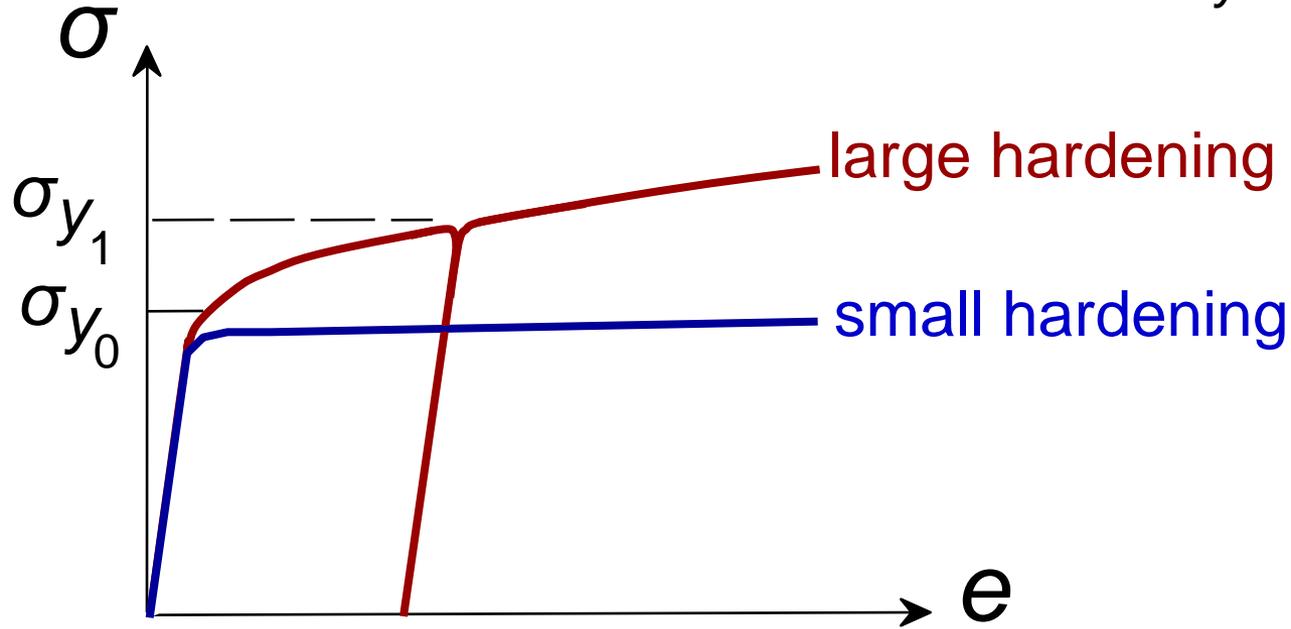
$$\sigma_T = \sigma(1 + \epsilon)$$
$$\epsilon_T = \ln(1 + \epsilon)$$



Adapted from Fig. 8.16,  
*Callister & Rethwisch 9e.*

# 경화 (Hardening)

- 소성 변형 시작~ 네킹 전까지 변형으로 항복 강도  $\sigma_y$  가 증가함.



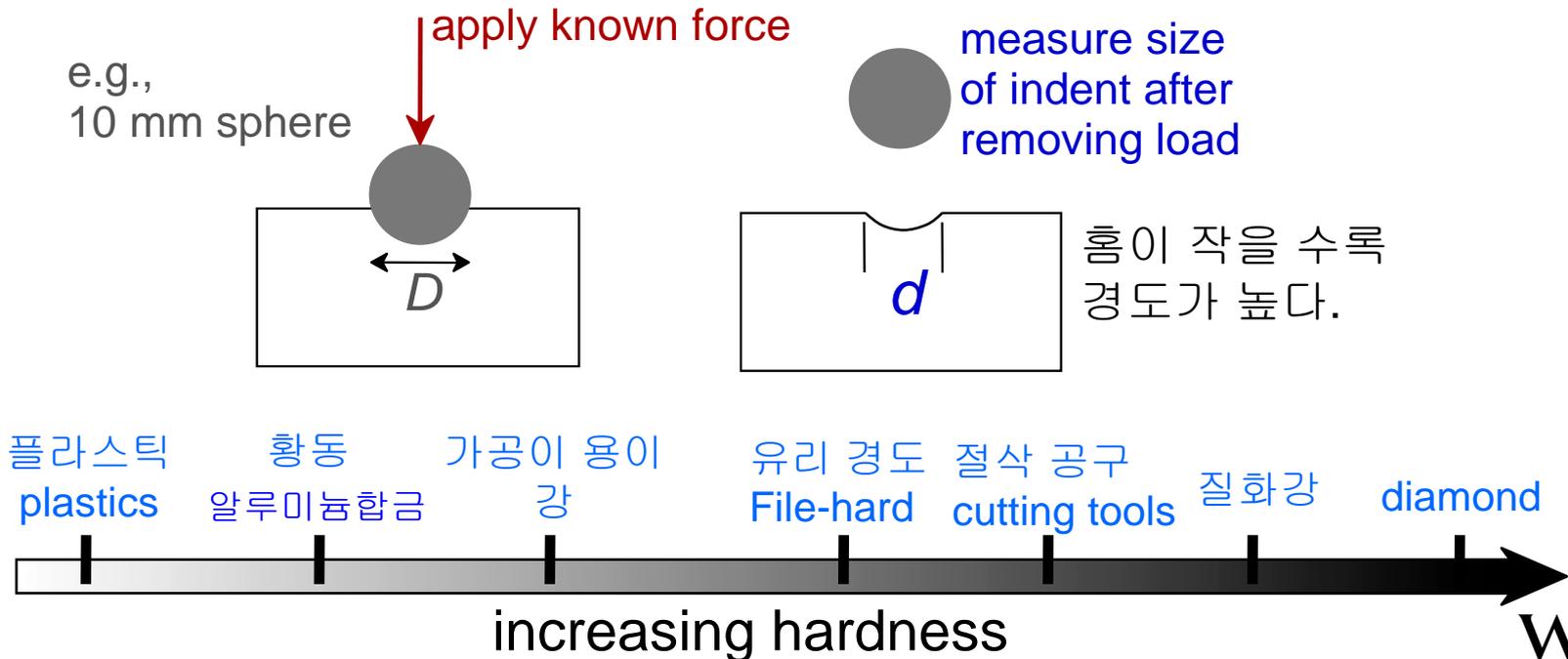
- 진응력-진변형률 곡선의 표현식 (표 8.4 참조) :

$$\sigma_T = K(\varepsilon_T)^n$$

→ “true” stress ( $F/A$ )
 ← “true” strain:  $\ln(l/l_0)$ 
← 경화 지수 hardening exponent:  
 $n = 0.15$  (some steels)  
 to  $n = 0.5$  (some coppers)

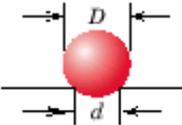
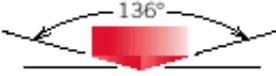
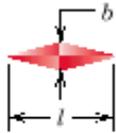
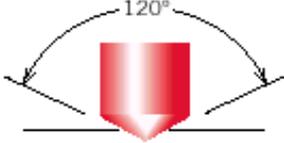
# 경도 (Hardness)

- 표면의 국부적 소성변형에 대한 저항성.
- 경도가 높을 수록:
  - 소성 변형 및 압축 균열에 대한 저항성이 좋다.
  - 마모성이 좋다.
  - 측정법: 로크웰, 브리넬, 누프 및 비커스 미세 경도



# Hardness: Measurement

Table 8.5 Hardness Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number <sup>a</sup>
		Side View	Top View		
Brinell	10-mm sphere of steel or tungsten carbide			$P$	$HB = \frac{2P}{\pi D[D - \sqrt{D^2 - d^2}]}$
Vickers microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microhardness	Diamond pyramid			$P$	$HK = 14.2P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> <li>Diamond cone</li> <li><math>\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}</math> in. diameter steel spheres</li> </ul>	 	 	<ul style="list-style-type: none"> <li>60 kg</li> <li>100 kg</li> <li>150 kg</li> </ul> } Rockwell <ul style="list-style-type: none"> <li>15 kg</li> <li>30 kg</li> <li>45 kg</li> </ul> } Superficial Rockwell	

<sup>a</sup> For the hardness formulas given,  $P$  (the applied load) is in kg, while  $D$ ,  $d$ ,  $d_1$ , and  $l$  are all in mm.

**Source:** Adapted from H. W. Hayden, W. G. Moffatt, and J. Wulff, *The Structure and Properties of Materials*, Vol. III, *Mechanical Behavior*. Copyright © 1965 by John Wiley & Sons, New York. Reprinted by permission of John Wiley & Sons, Inc.

# Summary

- **응력(Stress) and 변형(strain).**
- **탄성 변형 (Elastic behavior):**  
가역적이며 응력-변형의 선형 관계가 일반적이다.  
변형을 최소화하기 위해 큰 탄성계수( $E$  or  $G$ )을 갖는 물질 요구.
- **소성 변형 (Plastic behavior):**  
영구 변형이고 인장 (압축) 응력이 항복 응력  $\sigma_y$ 에 도달할 때부터 시작 된다.
- **인성 (Toughness), 연성 (Ductility), 경도 (Hardness), 탄력 (Resilience)**