

Chapter 7. Mechanical Properties of Solids

(고체의 기계적 성질 or 물성)

: relationship between deformation & force

대표적인 기계적 성질:

strength (강도), hardness (경도)

ductility (연성), stiffness (강성도) 등

표준시험 수립기관

국제: ISO (International Organization for Standardization)

한국: KS (Korean Standards)

미국: ASTM (American Society for Testing & Materials)

Concepts of Stress (응력) and Strain (변형률)

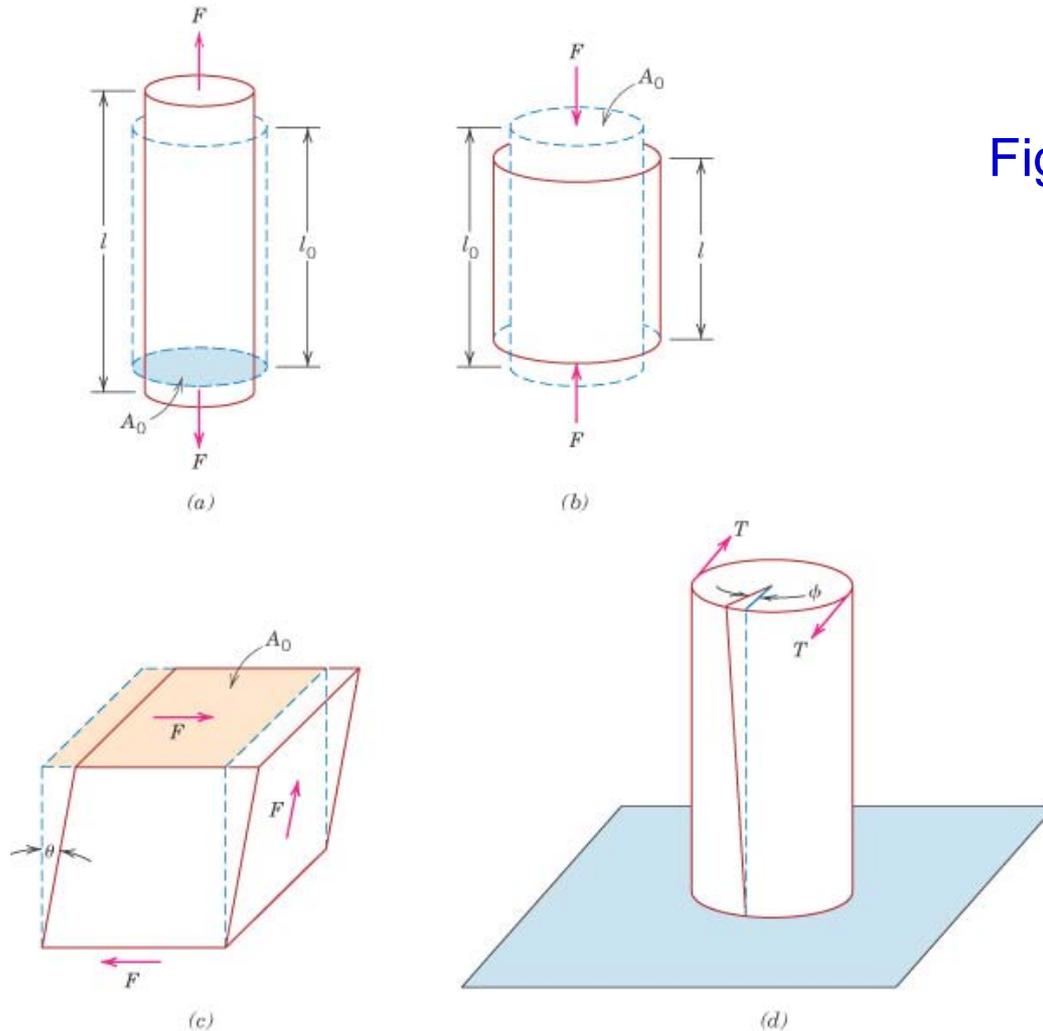


Fig. 7.1 다양한 기계적 시험:

(a) tensile test
(인장시험)

(b) compression test
(압축시험)

(c) shear test
(전단시험)

(d) torsional test
(비틀림시험).

- **Tensile tests** (or **tension tests**)

Stress (응력)

$$\sigma = \frac{F}{A_0}$$

↗ 힘, 하중

↘ 초기 단면적

: engineering stress (공학 응력)
or nominal stress (공칭 응력, 명목 응력)

단위: MPa (1 MPa = 10⁶ N/m²)
or psi (lb_f/in², 1 MPa = 145 psi)

Strain (변형률)

$$\varepsilon = \frac{l_i - l_0}{l_0} = \frac{\Delta l}{l_0}$$

↗ 변화된 길이

↘ 초기 길이

: engineering strain (공학 변형률)
or nominal strain (공칭 변형률, 명목 변형률)

단위: 무차원

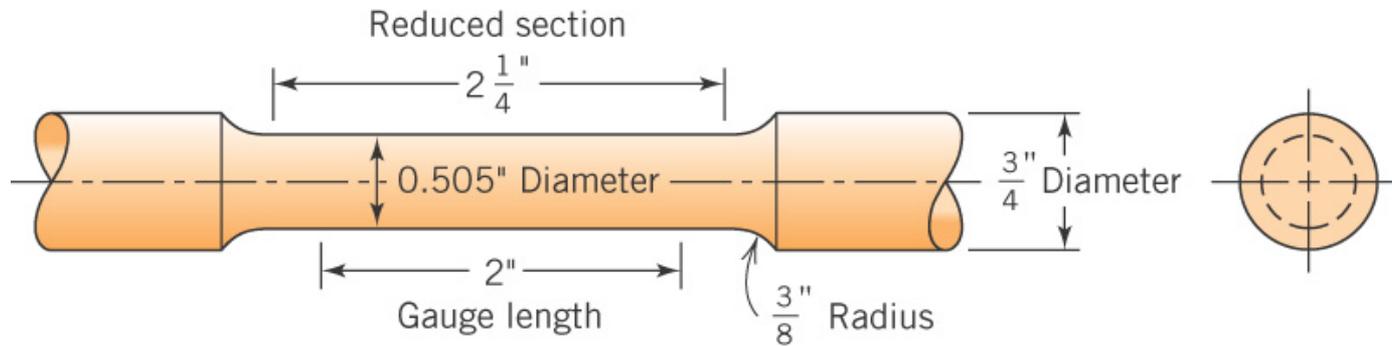


Fig. 7.2 금속재료의 표준 인장 시편.

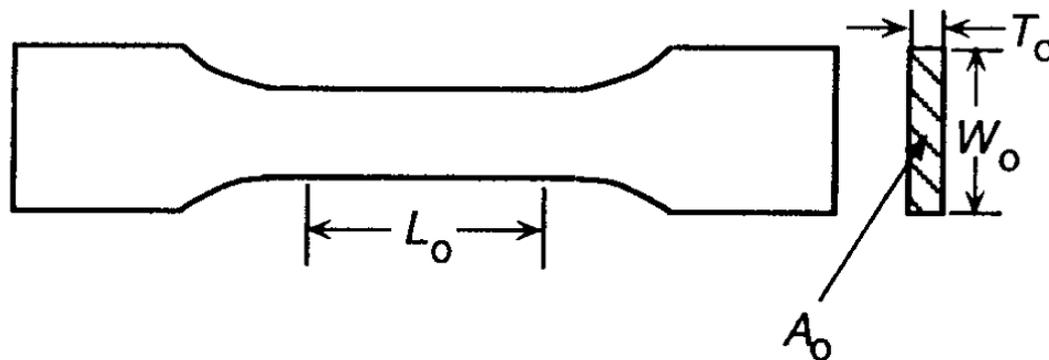


Fig. (참고) 고분자재료의 표준 인장 시편.

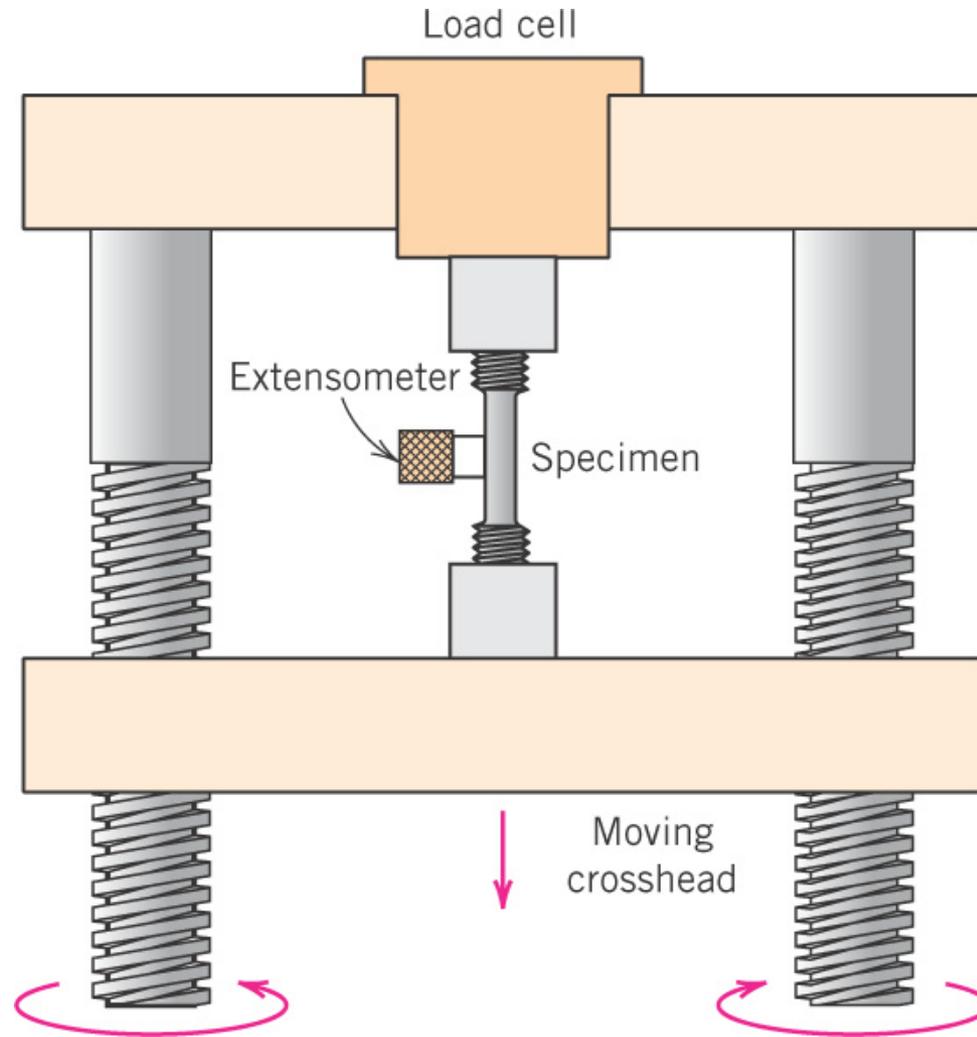


Fig. 7.3 인장 시험용 측정기기.

- **Compression tests**

인장시험과 동등, 변형률의 부호만 반대 (Fig. 7.1 (b))

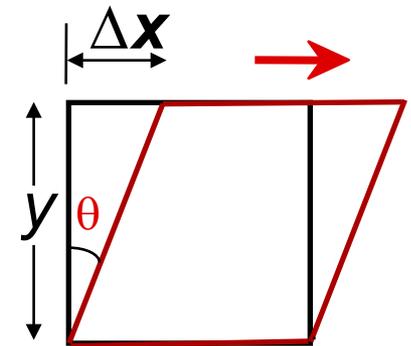
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{인장방향: +} \\ \text{압축방향: -} \end{array} \right. \quad \text{변형률: } \frac{\Delta l}{l_0} \sim \text{음수}$$

- **Shear tests** (Fig. 7.1 (c) 참조)

$$\tau = \frac{F}{A_0} \quad \begin{array}{l} \text{면} \nearrow \text{에 접선방향으로 부과된 힘 or 하중} \\ \text{: shear stress (전단 응력)} \\ \text{단위: MPa or psi} \end{array}$$

$$\gamma = \tan \theta \quad \begin{array}{l} \text{: shear strain (전단 변형률)} \\ \text{단위: 무차원} \end{array}$$

단위 두께당 변위 ($\Delta x/y$)



Stress-Strain Behavior

$$\sigma = E\varepsilon \quad : \text{Hooke's law}$$



elastic modulus (or Young's modulus)
(탄성 계수, 영 탄성률, 영률)

재료에 따른 E 의 대략적인 범위:

For **metals**, 45 GPa for Mg
407 GPa for W

For **ceramics**, 70~500 GPa

For **polymers**, 0.007~4 GPa

Table 7.1 Room-Temperature Elastic and Shear Moduli, and Poisson's Ratio for Various Materials

<i>Material</i>	<i>Modulus of Elasticity</i>		<i>Shear Modulus</i>		<i>Poisson's Ratio</i>
	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	<i>GPa</i>	<i>10⁶ psi</i>	
<i>Metal Alloys</i>					
Tungsten	407	59	160	23.2	0.28
Steel	207	30	83	12.0	0.30
Nickel	207	30	76	11.0	0.31
Titanium	107	15.5	45	6.5	0.34
Copper	110	16	46	6.7	0.34
Brass	97	14	37	5.4	0.34
Aluminum	69	10	25	3.6	0.33
Magnesium	45	6.5	17	2.5	0.35
<i>Ceramic Materials</i>					
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	393	57	—	—	0.22
Silicon carbide (SiC)	345	50	—	—	0.17
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	304	44	—	—	0.30
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	260	38	—	—	—
Magnesium oxide (MgO)	225	33	—	—	0.18
Zirconia (ZrO ₂) ^a	205	30	—	—	0.31
Mullite (3Al ₂ O ₃ ·2SiO ₂)	145	21	—	—	0.24
Glass-ceramic (Pyroceram)	120	17	—	—	0.25
Fused silica (SiO ₂)	73	11	—	—	0.17
Soda-lime glass	69	10	—	—	0.23
<i>Polymers^b</i>					
Phenol-formaldehyde	2.76–4.83	0.40–0.70	—	—	—
Poly(vinyl chloride) (PVC)	2.41–4.14	0.35–0.60	—	—	0.38
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	2.76–4.14	0.40–0.60	—	—	0.33
Polystyrene (PS)	2.28–3.28	0.33–0.48	—	—	0.33
Poly(methyl methacrylate)(PMMA)	2.24–3.24	0.33–0.47	—	—	0.37–0.44
Polycarbonate (PC)	2.38	0.35	—	—	0.36
Nylon 6,6	1.59–3.79	0.23–0.55	—	—	0.39
Polypropylene (PP)	1.14–1.55	0.17–0.23	—	—	0.40
Polyethylene—high density (HDPE)	1.08	0.16	—	—	0.46
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	0.40–0.55	0.058–0.080	—	—	0.46
Polyethylene—low density (LDPE)	0.17–0.28	0.025–0.041	—	—	0.33–0.40

^a Partially stabilized with 3 mol% Y₂O₃.

^b **Source:** *Modern Plastics Encyclopedia '96*. Copyright 1995. The McGraw-Hill Companies. Reprinted with permission.

- **Elastic deformation** (탄성 변형)

- **Reversible** (가역 변환)

- **Linear** behavior (예: 이상적인 금속)

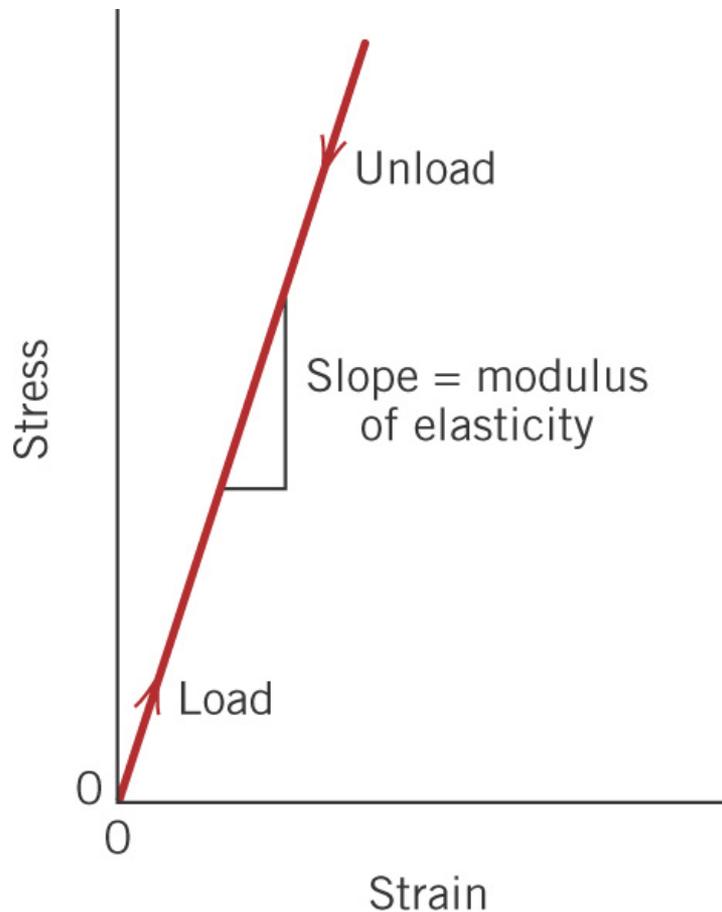


Fig. 7.5 선형 탄성 거동을 보여주는 응력-변형을 그래프.

- Nonlinear elastic behavior (비선형 탄성 거동)

→ 예: 주철(cast iron), 콘크리트, polymers

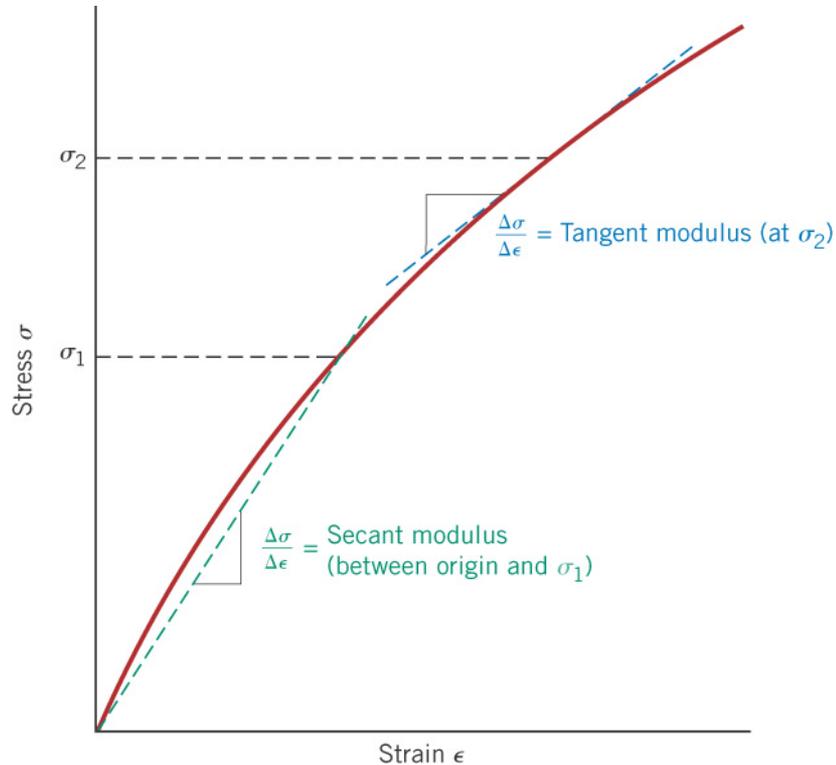


Fig. 7.6 비선형 탄성 거동을 보여주는 응력-변형률 그래프.

- Effect of temperature ~ 일반적으로 온도 증가에 따라 탄성률은 감소

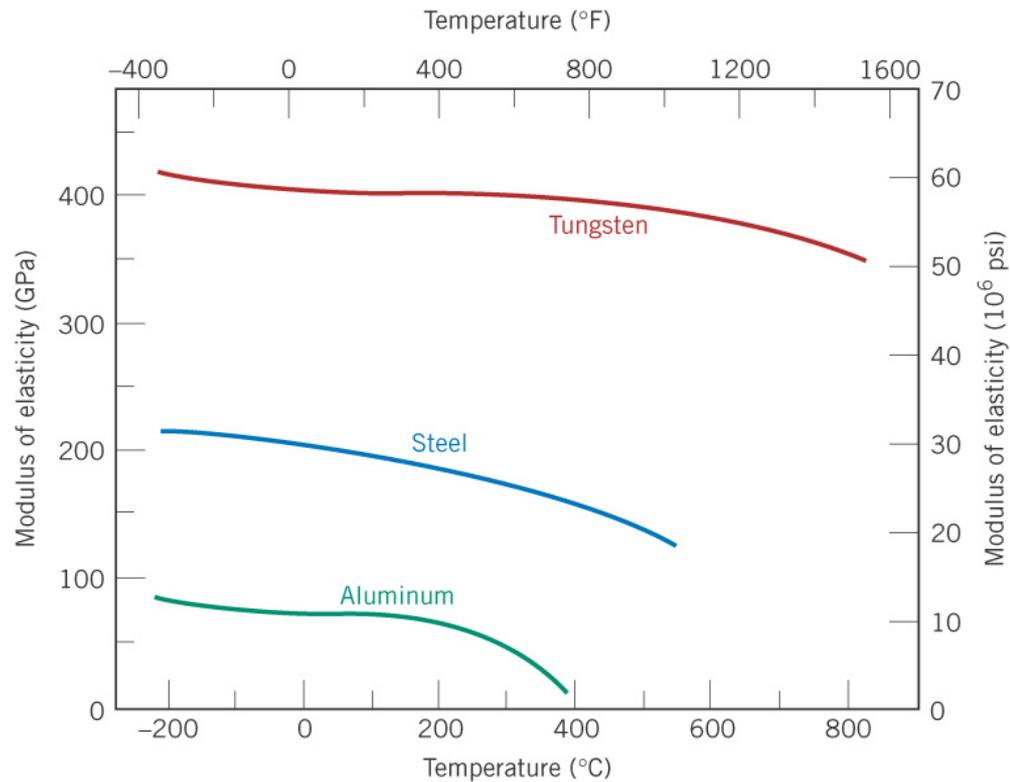


Fig. 7.8 온도에 따른 elastic modulus (탄성률)의 변화.

* Shear stress-strain behavior (전단응력-변형률 거동)

$$\tau = G\gamma$$

G : shear modulus (전단 탄성률)

Anelasticity (의탄성)

~시간에 의존하는 탄성 거동
(time-dependent elastic behavior)

응력 제거 후 변형 회복하는데 시간이 걸림

→ 금속 재료의 경우 의탄성 성분은 작아 무시 가능하나
고분자 재료의 경우 이 성분도 매우 중요함.

→ Polymer의 경우 “viscoelastic behavior (점탄성 거동)”
이라 칭함.

Ex. 7.1) Elongation (신장) 계산

305 mm Cu in tension with a stress of 276 MPa.

Elastic deformation (탄성변형)이라면 elongation 은 ?

즉, Δl ?

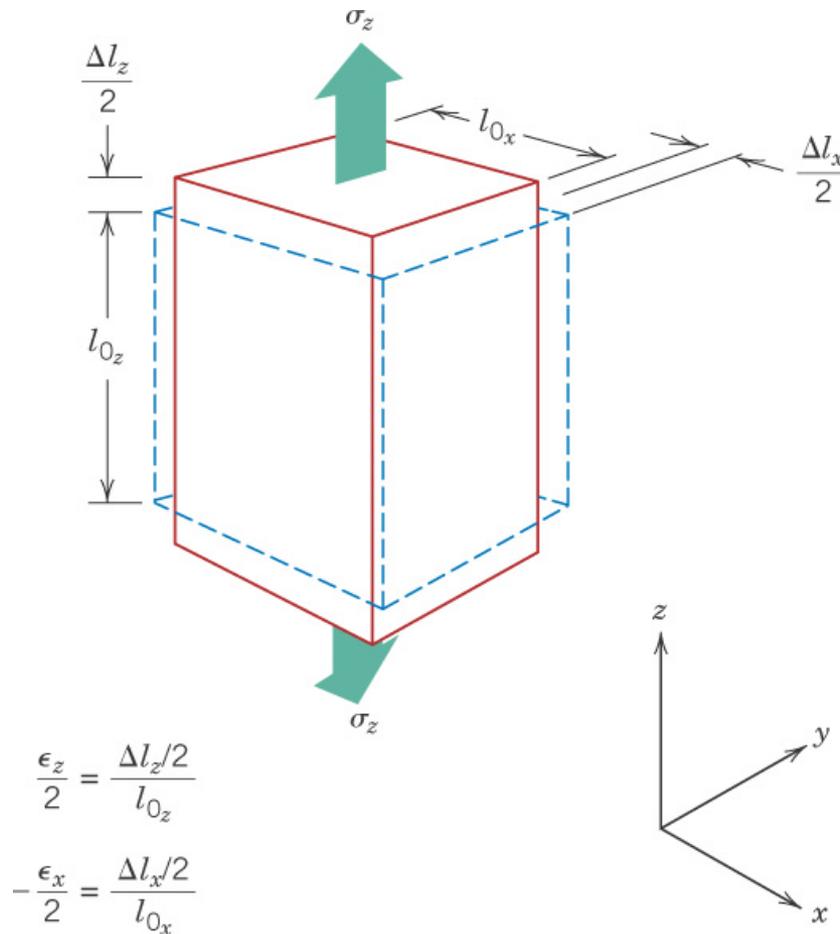
$$\sigma = E\varepsilon = E \frac{\Delta l}{l_0}$$

$$\therefore \Delta l = \frac{\sigma l_0}{E}$$

data from Table 7.1

$$\therefore \Delta l = \frac{(276 \text{ MPa})(305 \text{ mm})}{110 \times 10^3 \text{ MPa}} = \underline{0.77 \text{ mm}}$$

Elastic Properties



$$\epsilon: \text{변형률} \left(\frac{\Delta l}{l_0} \right)$$

Fig. 7.9 인장응력에 따른 축 (z) 방향 신장과 횡 (x, y) 방향 수축.

Poisson's ratio ~ the ratio of the lateral to axial strains

$$\nu = -\frac{\varepsilon_x}{\varepsilon_z} = -\frac{\varepsilon_y}{\varepsilon_z}$$

For theoretical isotropic materials, $\nu = 0.25$
(이론적 등방성 물질)

For incompressible materials, $\nu = 0.50$
(비압축성 물질)

For metals & alloys, $\nu = 0.25 \sim 0.35$

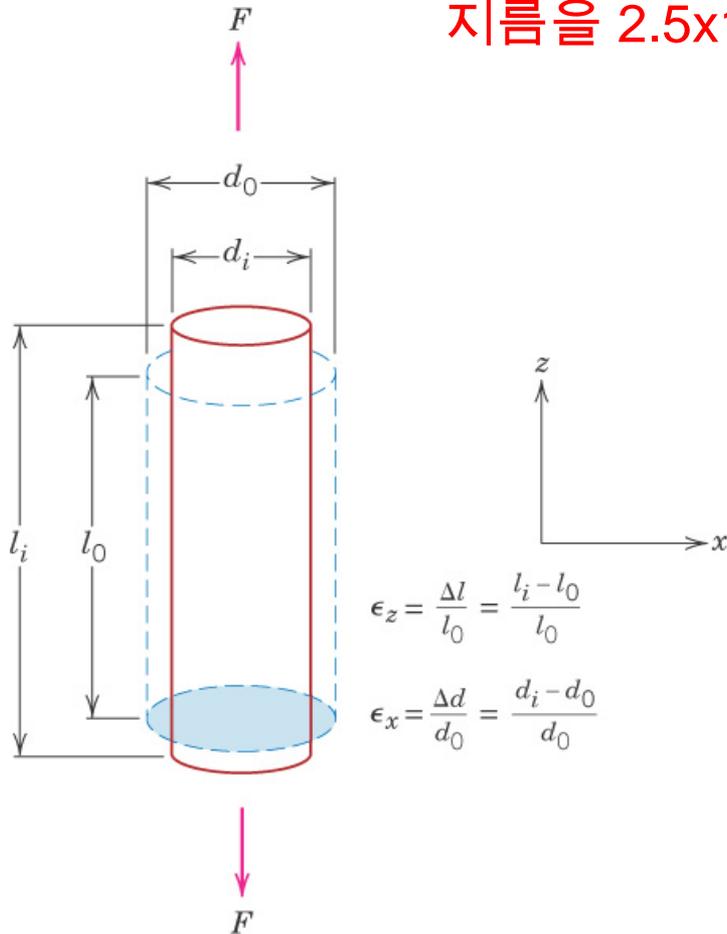
등방성 물질의 경우 E, G, ν 사이의 관계식:

$$E = 2G(1 + \nu)$$

\therefore 일반적인 재료의 많은 경우, $E = 2.5 \sim 3G$ 의 관계를 지님

Ex. 7.2) Load (하중) 계산

지름 10 mm인 원통형 brass rod에 하중을 가해 인장
 지름을 2.5×10^{-3} mm 변화시키는데 필요한 F 는 ?



$$\epsilon_x = \frac{\Delta d}{d_0} = \frac{-2.5 \times 10^{-3} \text{ mm}}{10 \text{ mm}} = -2.5 \times 10^{-4}$$

$$\epsilon_z = \frac{-\epsilon_x}{\nu} = \frac{2.5 \times 10^{-4}}{0.34} = 7.35 \times 10^{-4}$$

data from Table 7.1

$$\sigma = E \epsilon_z = (97 \times 10^3 \text{ MPa})(7.35 \times 10^{-4}) = 71.3 \text{ MPa}$$

$$\therefore \underline{F} = \sigma A_0 = \sigma \left(\frac{d_0}{2} \right)^2 \pi = \dots = \underline{5600 \text{ N}}$$

Mechanical Behavior - Metals

Tensile Properties

대부분의 금속: 탄성 변형은 $\varepsilon = 0.005$ 정도까지만 일어남
이후의 변형은 소성 변형(plastic deformation)
소성 변형 영역에서는 Hooke's law 적용 안됨.

- **Yielding** (항복) ~ 소성 변형이 시작되는 현상

Yield strength (항복 강도), σ_y ~ 소성 변형이 시작되는 응력

σ_y for low-strength Al: 35 MPa

σ_y for high-strength steel: 1400 MPa

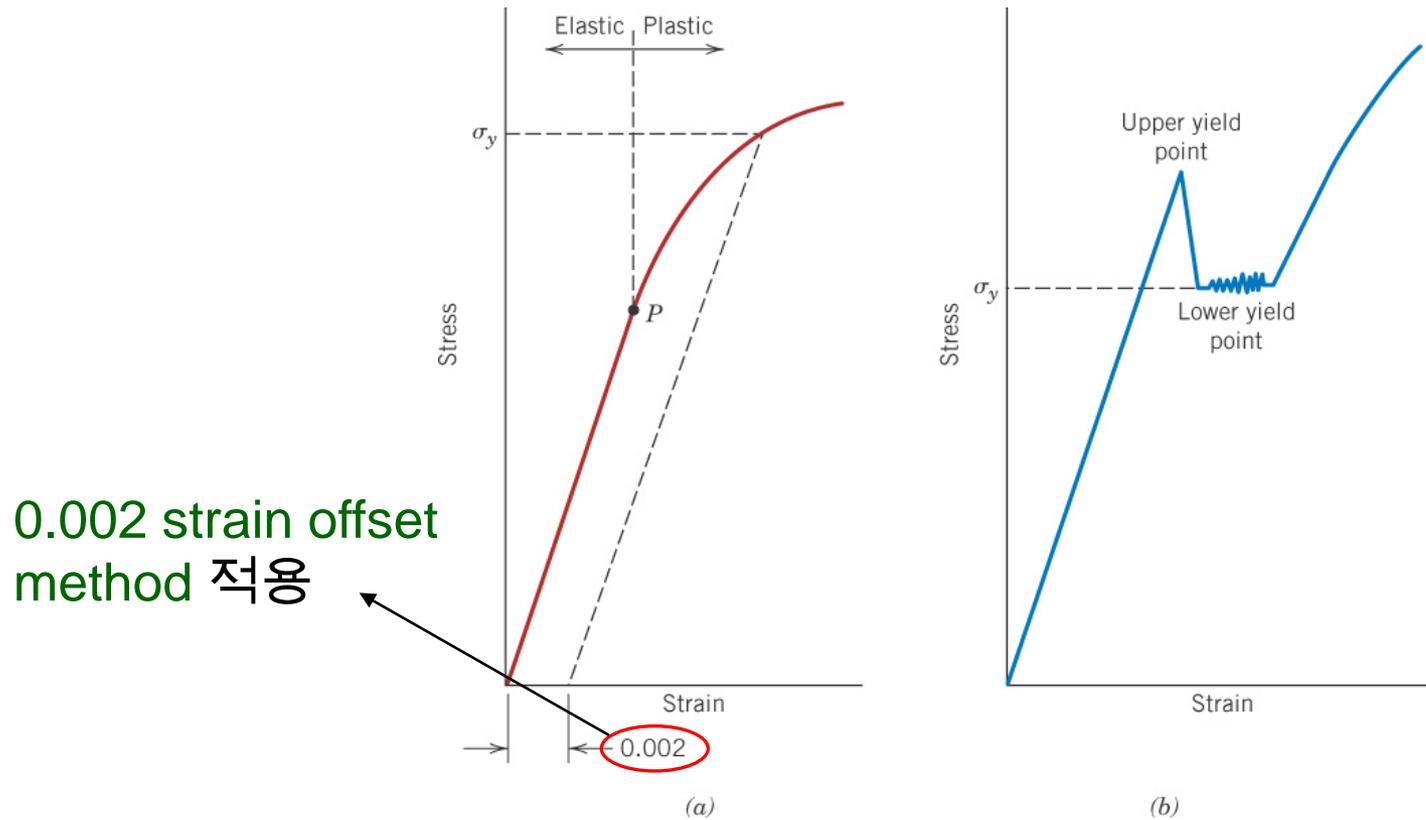
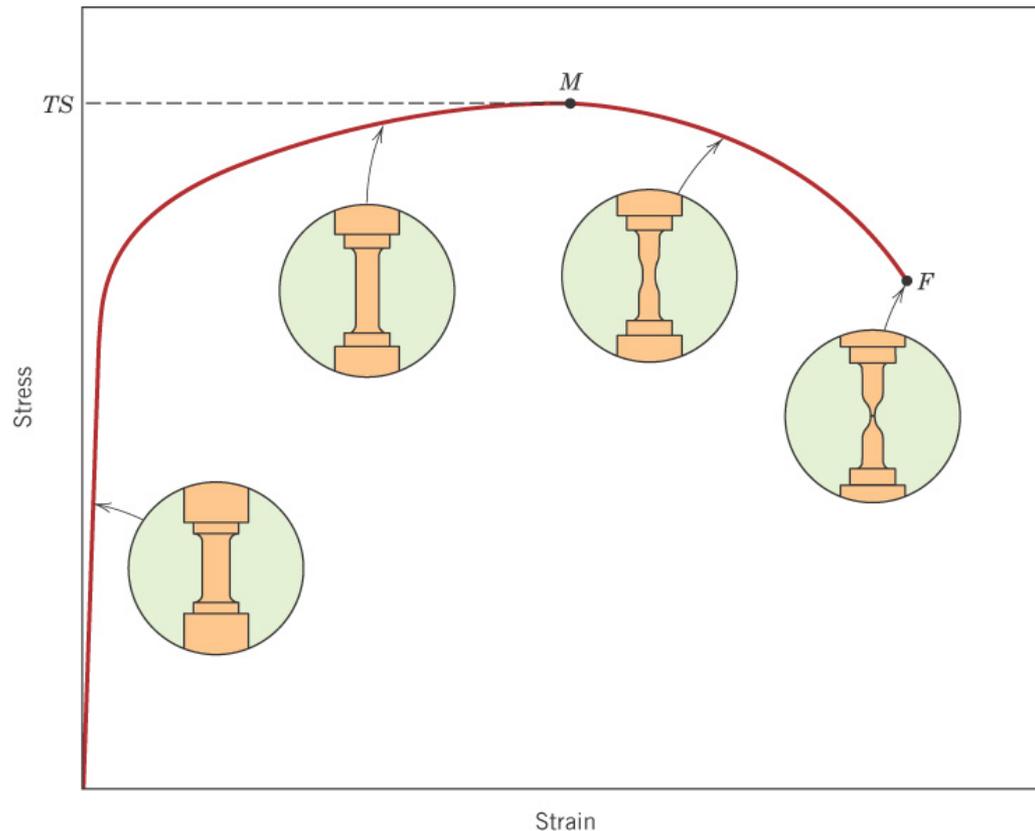


Fig. 7.10 (a) 금속의 전형적인 응력-변형률 거동(탄성 변형, 소성 변형, 비례한계점 P, 항복강도를 보여줌), (b) 일부 강(steel)에서 나타나는 응력-변형률 거동(항복점 현상을 보여줌).

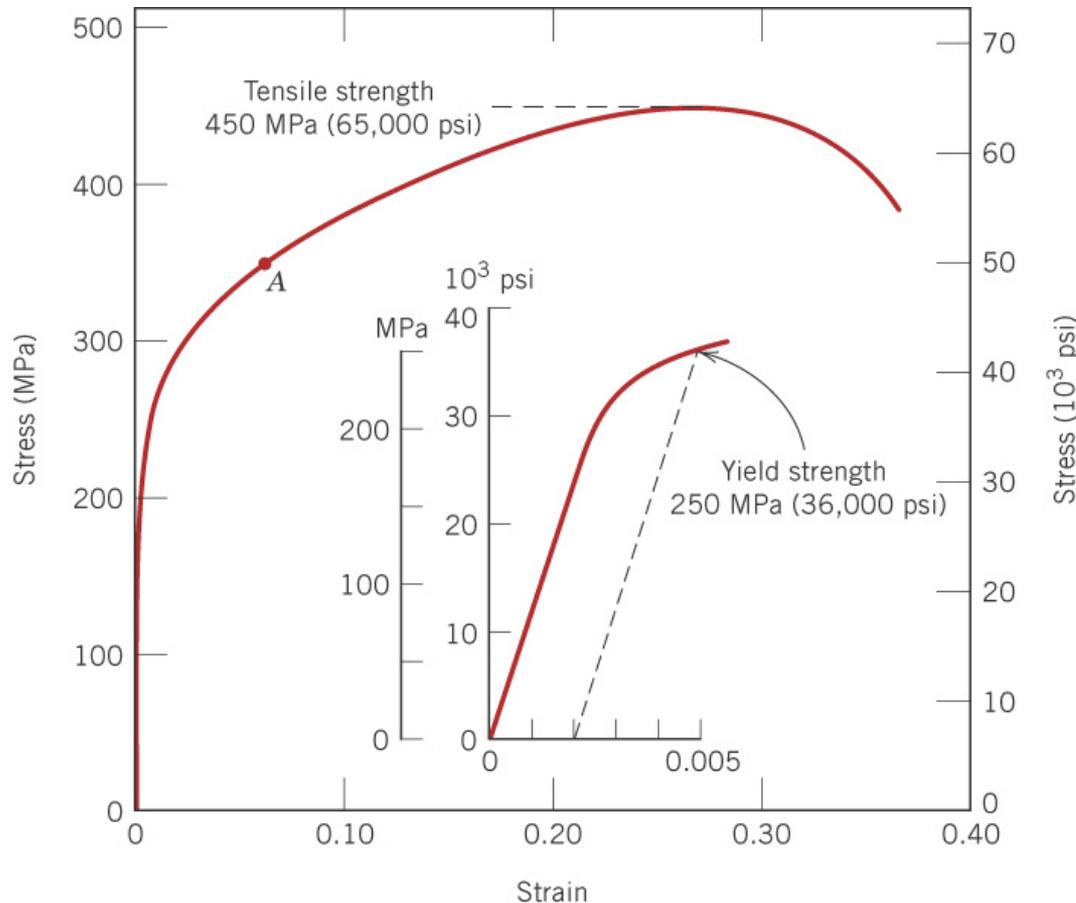
- **Tensile strength (TS):** 인장 강도



TS for Al: 50 MPa
TS for steel: 3000 MPa

Fig. 7.11 파괴점 F까지 나타낸 응력-변형을 거동 (인장 강도 TS는 점 M으로 표시됨).

Ex. 7.3) 황동 시편의 인장 응력-변형률 그래프로부터 기계적 성질 계산



- (a) Elastic modulus (탄성 계수), E
- (b) σ_y at 0.002 strain offset (0.002 strain offset법을 적용한 항복강도), σ_y
- (c) 지름 12.8 mm인 원통형 시편이 견딜 수 있는 최대 하중, F
- (d) 길이 250 mm인 시편에 345 MPa의 인장응력을 가할 때 길이 변화, Δl

~ 각자 해 볼 것 .

- **Ductility** (연성)

~ 파괴 때까지의 degree of plastic deformation (소성 변형의 정도)

ductile (연성) \leftrightarrow brittle (취성)

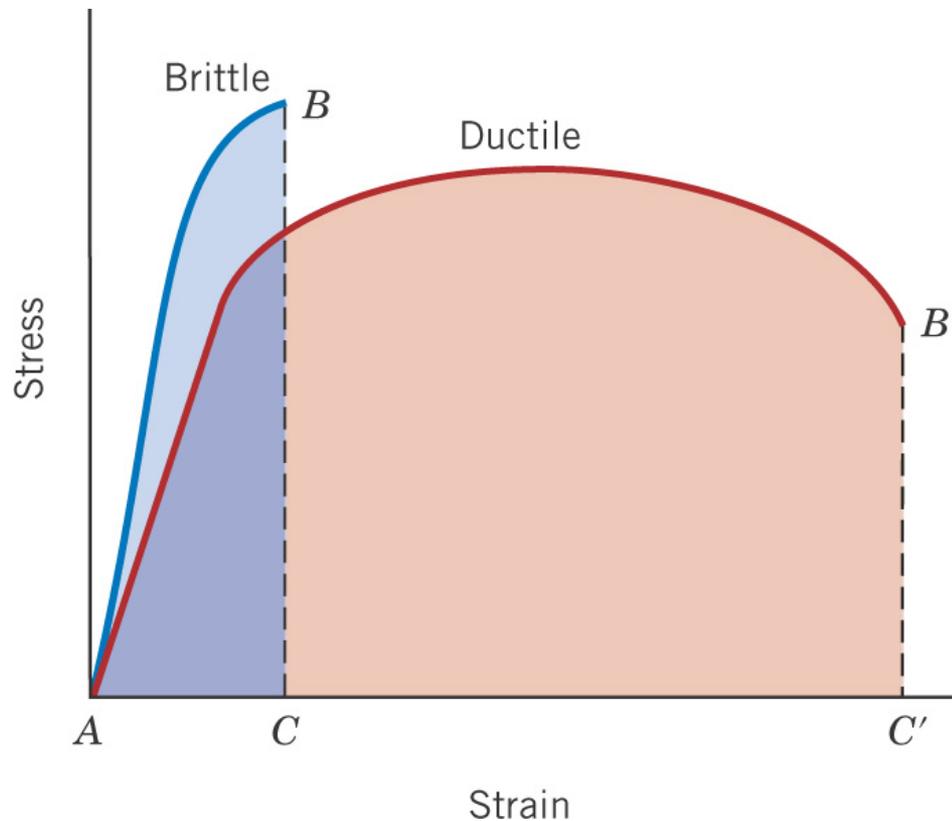


Fig. 7.13 취성재료 및 연성재료의 파괴시까지의 인장 응력-변형을 거동에 대한 개략도.

* Percent elongation (신장 백분율)

~ 파괴 시의 소성 변형률을 백분율로 정량화한 것

$$\%EL = \left(\frac{l_f - l_0}{l_0} \right) \times 100$$

* Percent reduction in area (단면적 감소 백분율)

~ 파괴 시의 단면 감소율을 백분율로 정량화한 것

$$\%RA = \left(\frac{A_0 - A_f}{A_0} \right) \times 100$$

Table 7.2 Room-Temperature Mechanical Properties (in Tension) for Various Materials

Material	Yield Strength		Tensile Strength		Ductility, %EL [in 50 mm (2 in.)] ^a
	MPa	ksi	MPa	ksi	
<i>Metal Alloys^b</i>					
Molybdenum	565	82	655	95	35
Titanium	450	65	520	75	25
Steel (1020)	180	26	380	55	25
Nickel	138	20	480	70	40
Iron	130	19	262	38	45
Brass (70 Cu–30 Zn)	75	11	300	44	68
Copper	69	10	200	29	45
Aluminum	35	5	90	13	40
<i>Ceramic Materials^c</i>					
Zirconia (ZrO ₂) ^d	—	—	800–1500	115–215	—
Silicon nitride (Si ₃ N ₄)	—	—	250–1000	35–145	—
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	—	—	275–700	40–100	—
Silicon carbide (SiC)	—	—	100–820	15–120	—
Glass–ceramic (Pyroceram)	—	—	247	36	—
Mullite (3Al ₂ O ₃ –2SiO ₂)	—	—	185	27	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	—	—	110–245	16–36	—
Fused silica (SiO ₂)	—	—	110	16	—
Magnesium oxide (MgO) ^e	—	—	105	15	—
Soda–lime glass	—	—	69	10	—
<i>Polymers</i>					
Nylon 6,6	44.8–82.8	6.5–12	75.9–94.5	11.0–13.7	15–300
Polycarbonate (PC)	62.1	9.0	62.8–72.4	9.1–10.5	110–150
Poly(ethylene terephthalate) (PET)	59.3	8.6	48.3–72.4	7.0–10.5	30–300
Poly(methyl methacrylate) (PMMA)	53.8–73.1	7.8–10.6	48.3–72.4	7.0–10.5	2.0–5.5
Poly(vinyl chloride) (PVC)	40.7–44.8	5.9–6.5	40.7–51.7	5.9–7.5	40–80
Phenol-formaldehyde	—	—	34.5–62.1	5.0–9.0	1.5–2.0
Polystyrene (PS)	25.0–69.0	3.63–10.0	35.9–51.7	5.2–7.5	1.2–2.5
Polypropylene (PP)	31.0–37.2	4.5–5.4	31.0–41.4	4.5–6.0	100–600
Polyethylene—high density (HDPE)	26.2–33.1	3.8–4.8	22.1–31.0	3.2–4.5	10–1200
Polytetrafluoroethylene (PTFE)	13.8–15.2	2.0–2.2	20.7–34.5	3.0–5.0	200–400
Polyethylene—low density (LDPE)	9.0–14.5	1.3–2.1	8.3–31.4	1.2–4.55	100–650

^a For polymers, percent elongation at break.

^b Property values are for metal alloys in an annealed state.

^c The tensile strength of ceramic materials is taken as flexural strength (Section 7.10).

^d Partially stabilized with 3 mol% Y₂O₃.

^e Sintered and containing approximately 5% porosity.

- Effect of temperature (온도 증가에 따른 기계적 성질 변화)

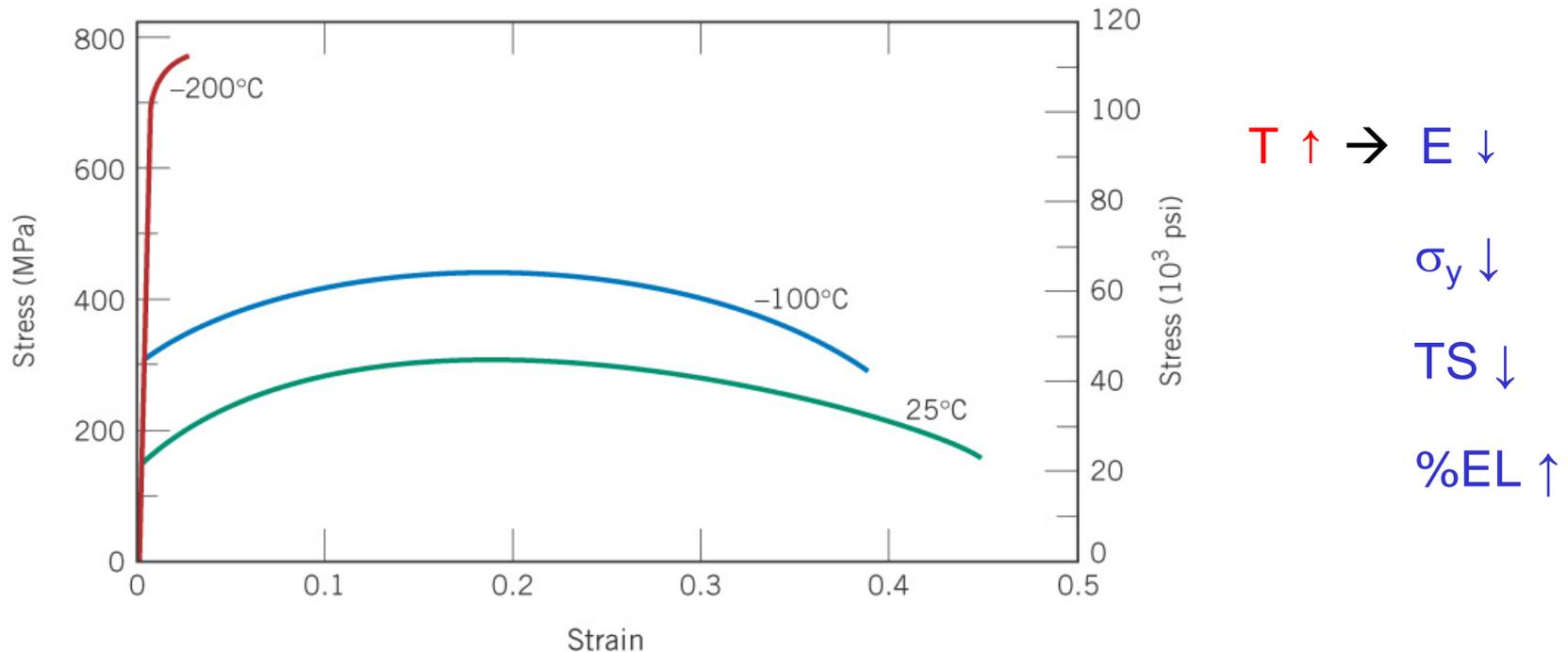


Fig. 7.14 온도에 따른 철의 파괴 시까지의 응력-변형률 거동.

- Resilience (탄력)

~ 탄성 변형시 에너지 흡수력과 하중 제거시의 회복력의 척도

Modulus of resilience (탄력 계수), U_r

: 항복점까지 응력을 상승시키는데
요구되는 단위체적당 변형률 에너지

$$U_r = \int_0^{\epsilon_y} \sigma d\epsilon = \frac{1}{2} \sigma_y \epsilon_y = \frac{\sigma_y^2}{2E}$$

↑ 선형 탄성
↑ $\epsilon_y = \frac{\sigma_y}{E}$

∴ U_r 이 높은 재료($\sigma_y \uparrow$ & $E \downarrow$)
→ 스프링 재료에 이용

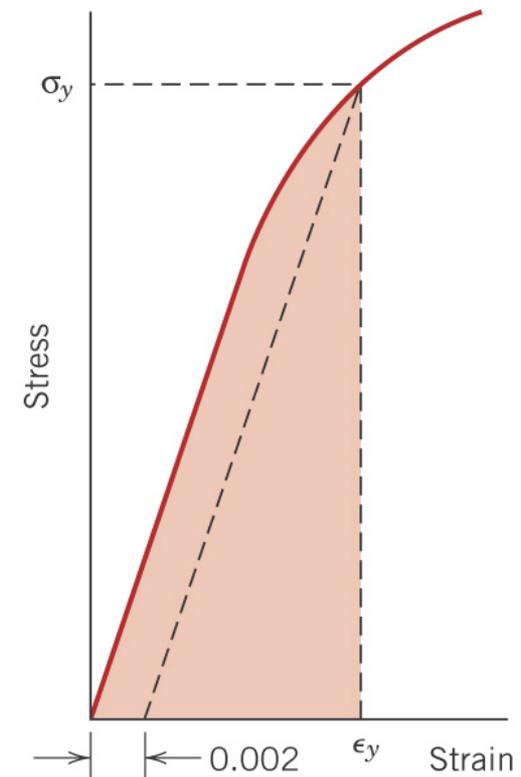


Fig. 7.15 탄력 계수의 결정 방법(색칠한 부분).

- **Toughness** (강인성, 인성, 질김성)

~ 파괴 때까지의 (재료의) 에너지 흡수력

* 평가방법:

1) σ - ϵ 곡선의 파괴 때까지의
밀면적 (Fig. 7.13)

2) impact test (충격시험)로
부터 평가

취성(brittle) 재료는 연성(ductile)
재료보다 강인성이 작음

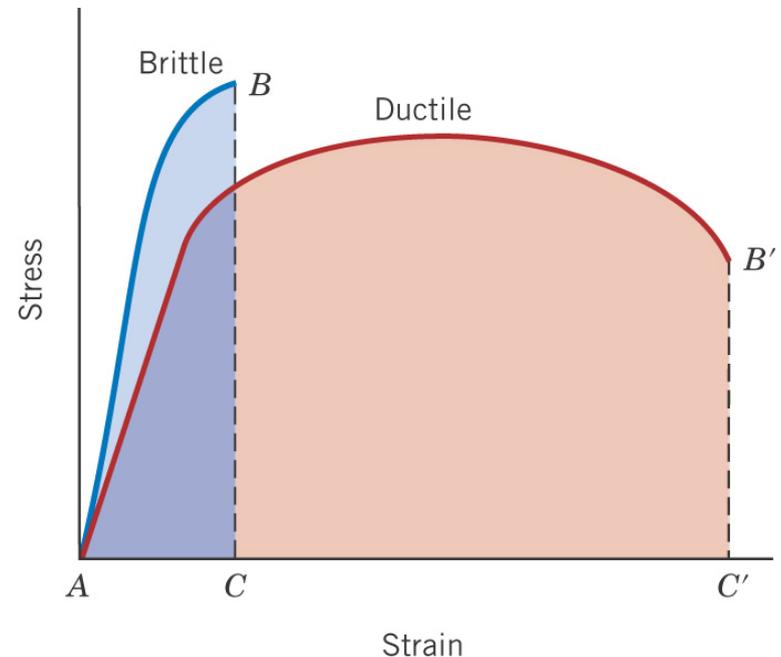


Fig. 7.13 연성 재료와 취성 재료의 강인성(색칠한 부분).

True Stress and Strain (진응력과 진변형률)

True stress:

$$\sigma_T = \frac{F}{A_i} \leftarrow \text{instantaneous cross-sectional area (순간 단면적)}$$

True strain:

$$\varepsilon_T = \ln \frac{l_i}{l_o} \leftarrow \text{instantaneous length (순간 길이)}$$

변형시 V (체적) 변화 없다면 $A_i l_i = A_o l_o$ 이므로

$$\left. \begin{array}{l} \sigma_T = \sigma(1 + \varepsilon) \\ \varepsilon_T = \ln(1 + \varepsilon) \end{array} \right\} \text{necking 현상이 일어나기 전까지 유효}$$

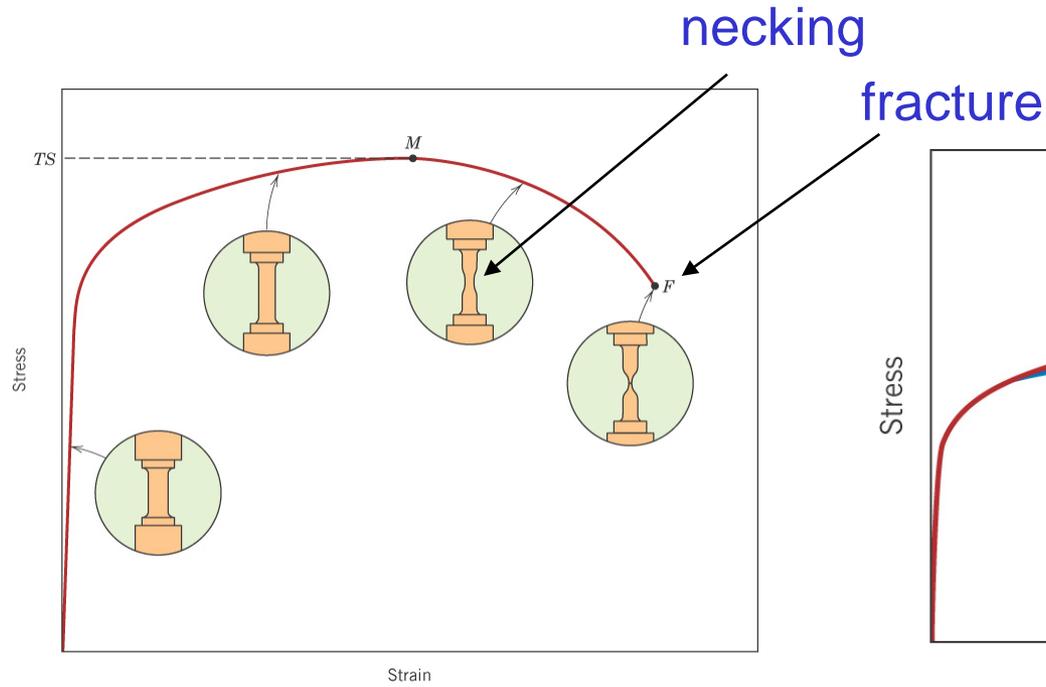


Fig. 7.11 응력-변형률 거동.

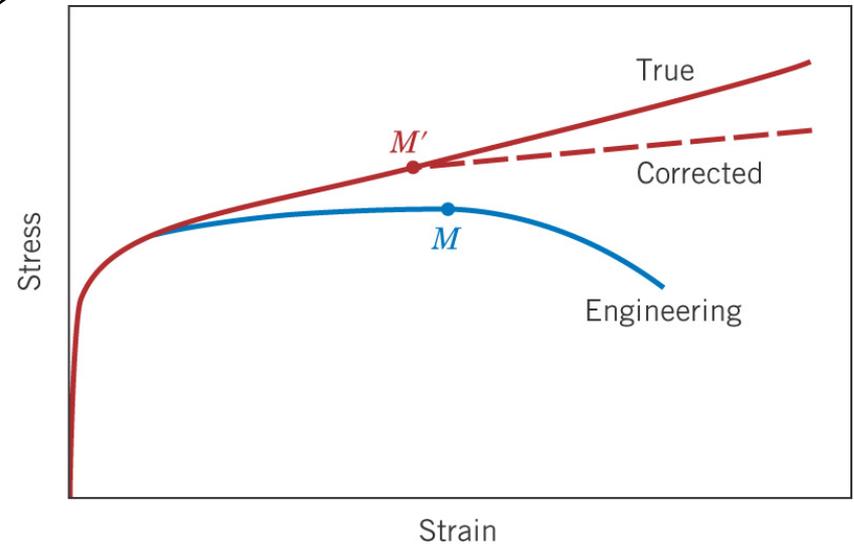
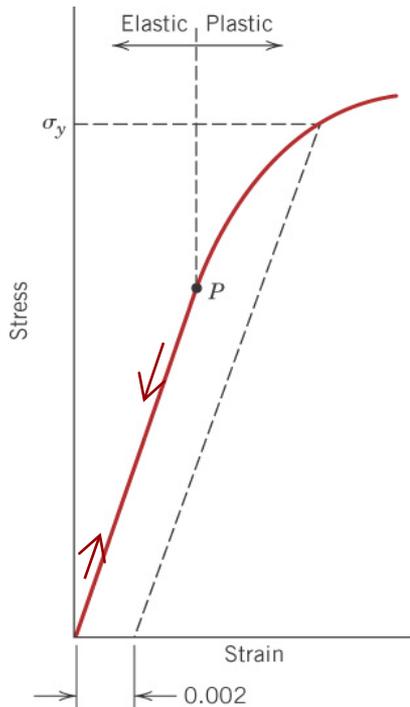


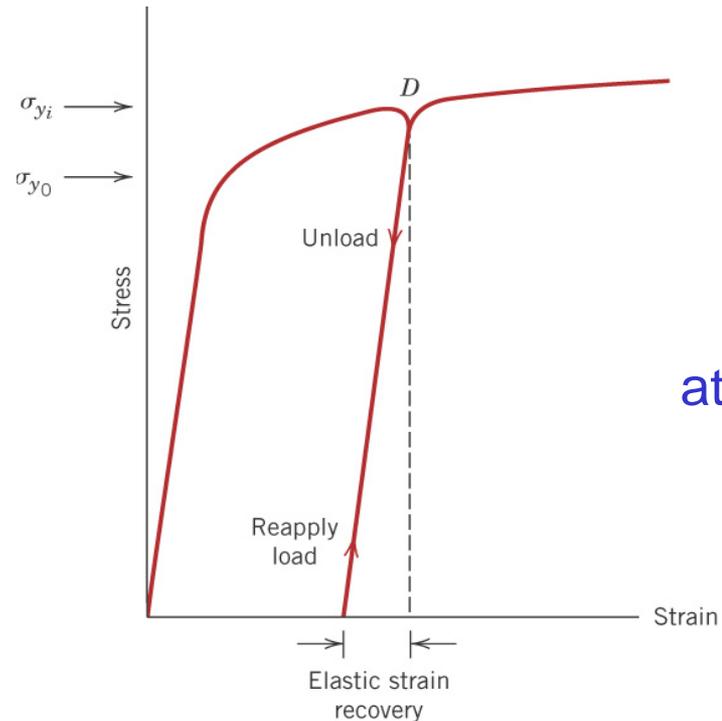
Fig. 7.16 응력-변형률 거동 비교
(공칭 응력-변형률, 진응력-진변형률 및 수정한 진응력-진변형률 그래프).

Ex. 7.4) %RA & σ_T at fracture ? (예제 문제 풀어보기 바람)

Elastic Recovery After Plastic Deformation (소성 변형 후의 탄성 회복)



at $\sigma < \sigma_y$



at $\sigma > \sigma_y$

Fig. 7.10 (a) 항복강도 내에서의 탄성회복.

Fig. 7.17 항복강도 이후에서의 탄성회복.

Mechanical Behavior - Ceramics

Flexural Strength (or bend strength: 굴곡 강도, 굽힘 강도)

Ceramic의 경우, 인장 시험이 어려움

← 시편 제조 어려움, grip 고정 힘들, 시험 시 bending stress 발생

세라믹의 압축 강도는 인장 강도의 10배 정도 ∴ 굴곡 강도 > 인장 강도

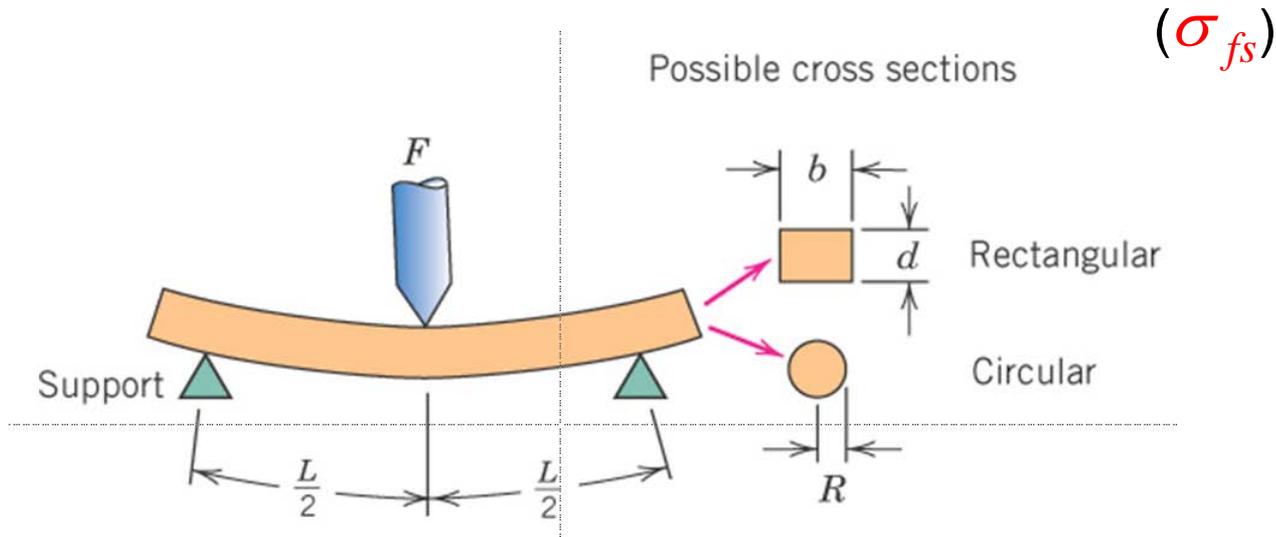


Fig. 7.18 3-point bending test (압축과 인장이 동시에 작용).

Elastic Behavior

Ceramic의 경우, 응력과 변형률 사이에 선형관계를 보임
파괴 시까지 소성 변형을 보이지 않음

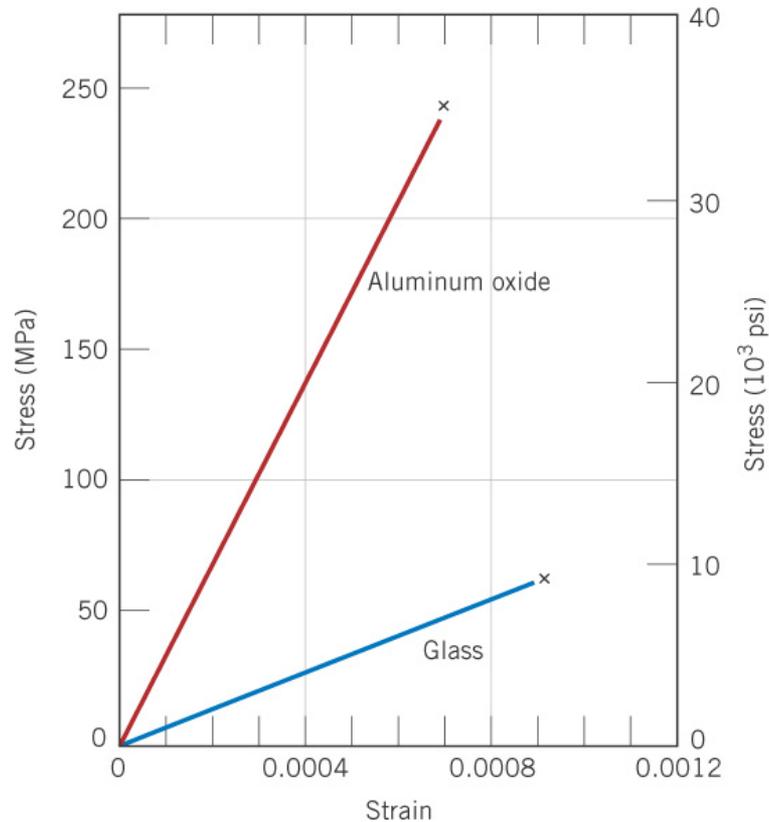


Fig. 7.19 알루미나와 유리의
응력-변형률 거동.

Influence of Porosity (기공의 영향)

세라믹은 분말 형태의 원료로 제조
→ pore or void space가 존재

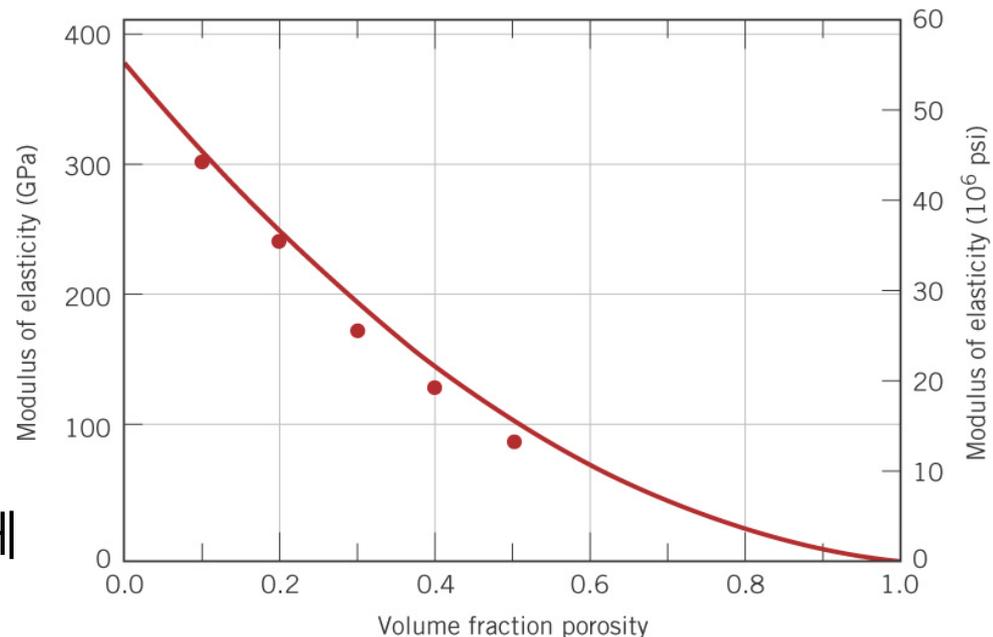
- 기공이 있는 세라믹 재료의 탄성 계수:

$$E = E_0(1 - 1.9P + 0.9P^2)$$

↙
nonporous 재료의 E

P : volume fraction of porosity
(기공의 부피 비율)

Fig. 7.20 알루미나의 탄성 계수에 미치는 기공의 영향.



- 기공이 있는 세라믹 재료의 굴곡 강도:

$$\sigma_{fs} = \sigma_0 \exp(-nP)$$

σ_0, n 는 실험 상수

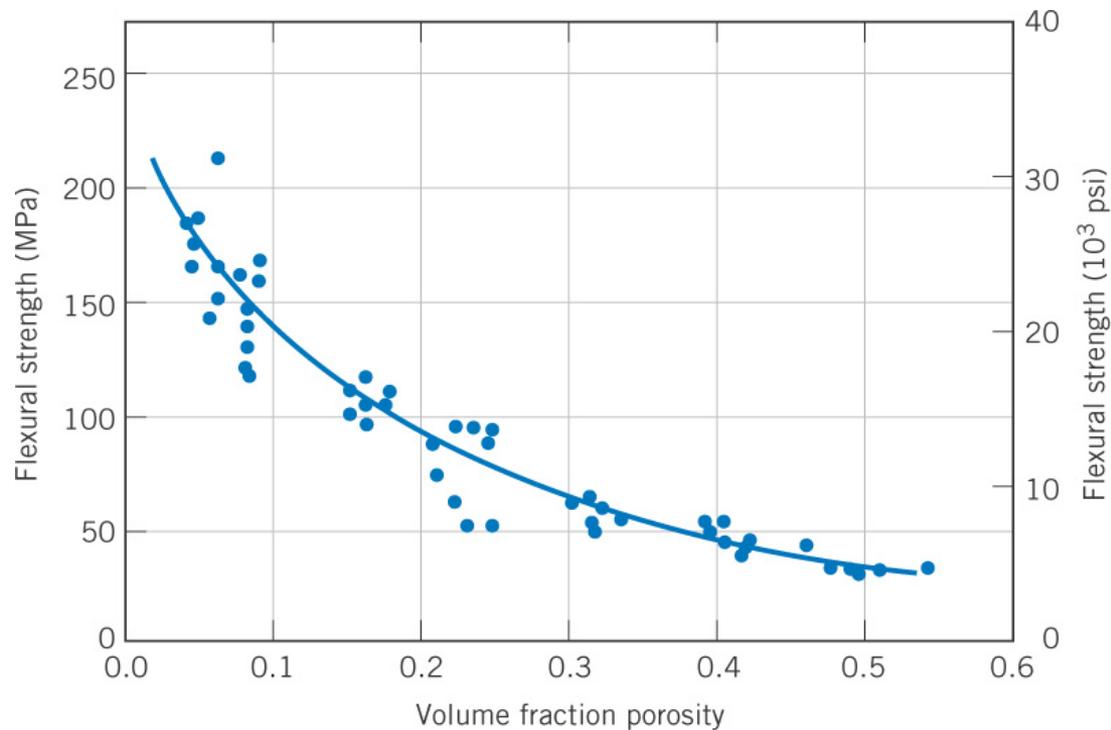
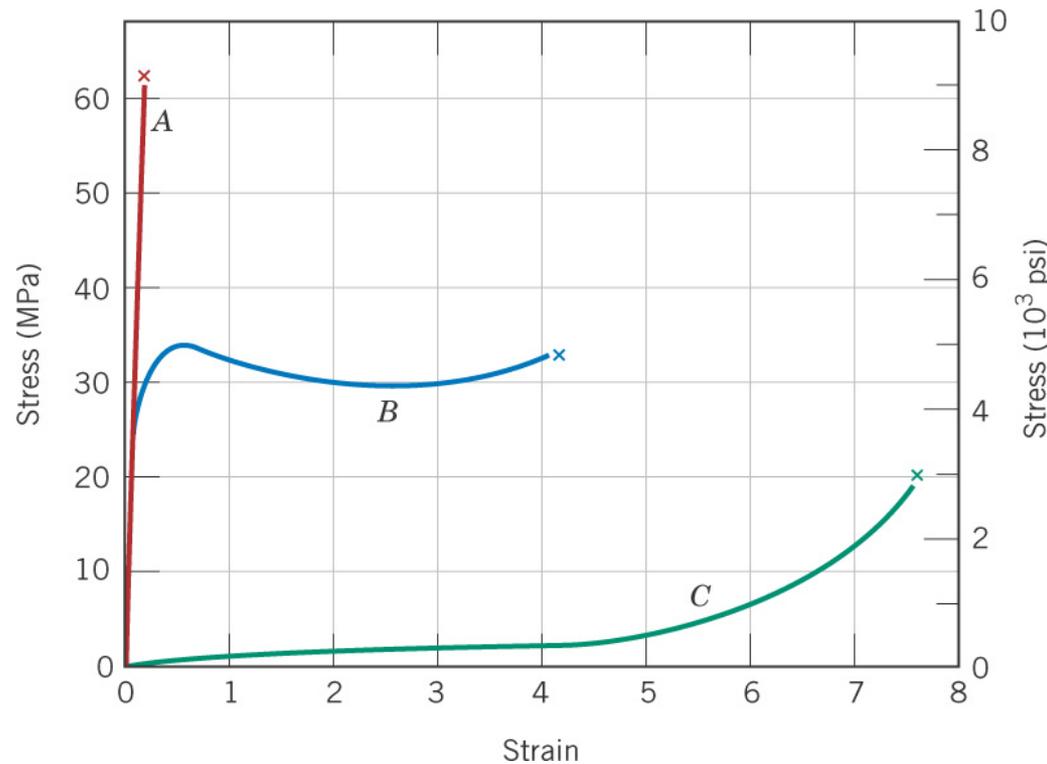


Fig. 7.21 알루미나의 굴곡강도에 미치는 기공의 영향.

Mechanical Behavior - Polymers

Stress-Strain Behavior



- A: brittle polymers**
(취성 고분자)
- B: ductile polymers**
(연성 고분자)
- C: elastomers**
(고무 탄성체)

Fig. 7.22 고분자 재료의 대표적인 응력-변형률 거동.

A: brittle polymers

→ 탄성 변형 과정에서 파괴 일어남

B: ductile polymers

→ 초기에는 탄성 변형, 항복 응력 이후 소성 변형 영역 존재

C: elastomers

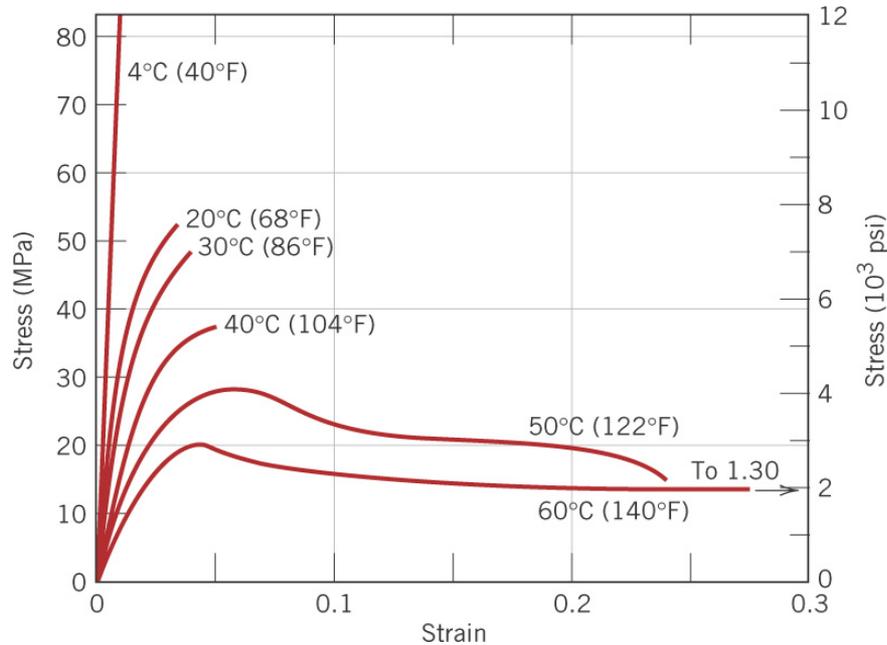
→ 탄성 거동, 나중에는 결정성 영역 생겨 비탄성 거동 보임

TS (인장 강도): 파괴 시의 응력으로 σ_y 보다 높거나 낮을 수 있음
일반적으로 인장 강도를 polymer의 강도로 둠

- **Modulus:** 7 ~ 4000 MPa for polymers
45 ~ 400 GPa for metals
- **TS:** ~ 100 MPa for polymers
~ 4100 MPa for metals
- **Elongation:** 고분자의 경우 100% 이상도 가능
금속의 경우 100% 이상 변형 못함

- Effect of temperature

~ Polymer는 room temp. (상온) 근처의 T 변화에도 민감



$T \uparrow \rightarrow E \downarrow$
 $\sigma_y \downarrow$
 $TS \downarrow$
 $\%EL \uparrow$

Fig. 7.24 PMMA의 응력-변형률 거동에 끼치는 온도의 영향.

- Effect of strain rate (변형률 속도의 영향)

~ 변형률 속도 $\uparrow \rightarrow TS \uparrow$ ($T \downarrow$ 와 유사한 효과를 줌)

Macroscopic Deformation (거시적 변형)

*사슬 구조의 변화: Fig. 8.28

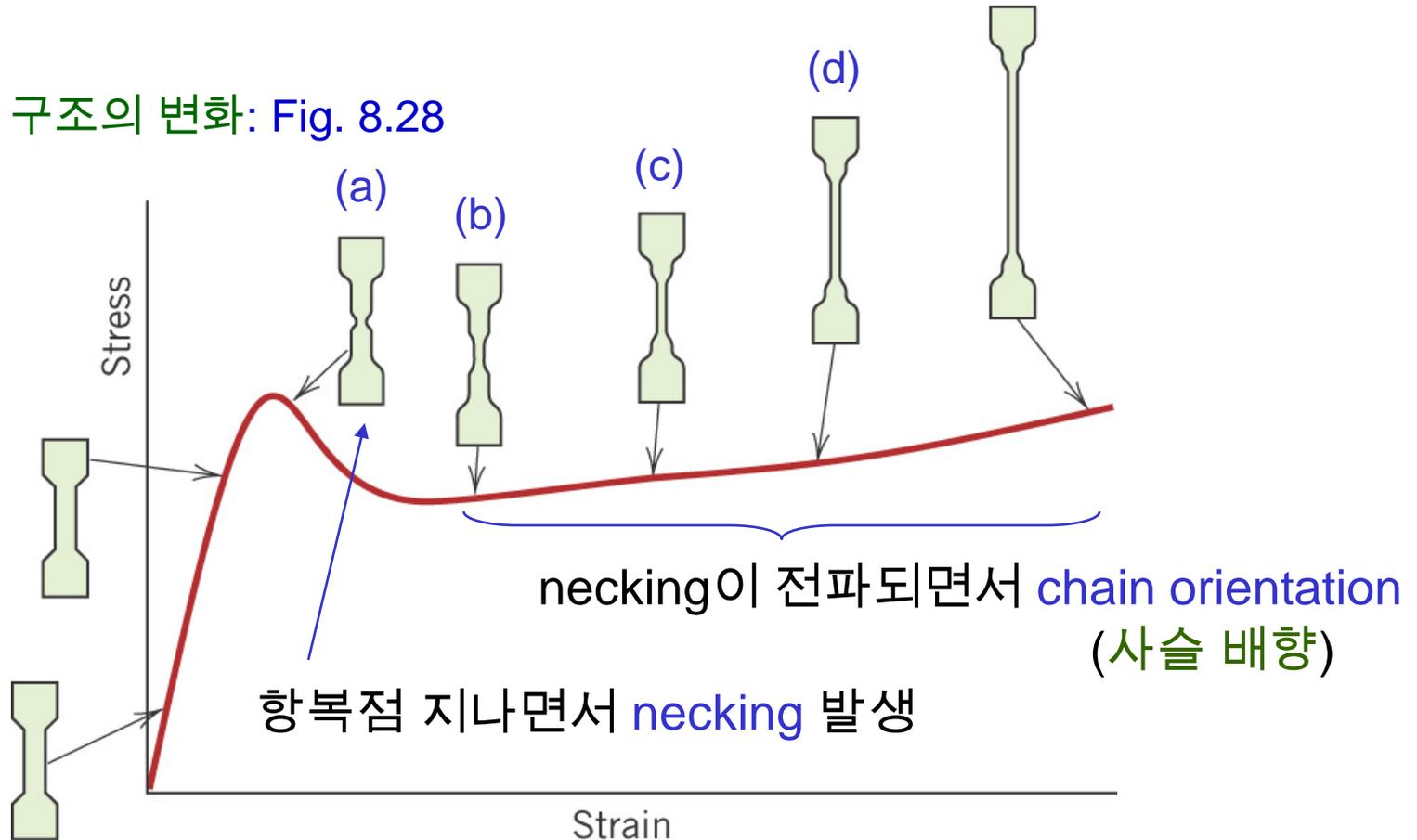


Fig. 7.25 반결정성 고분자의 인장 응력-변형률 그래프.

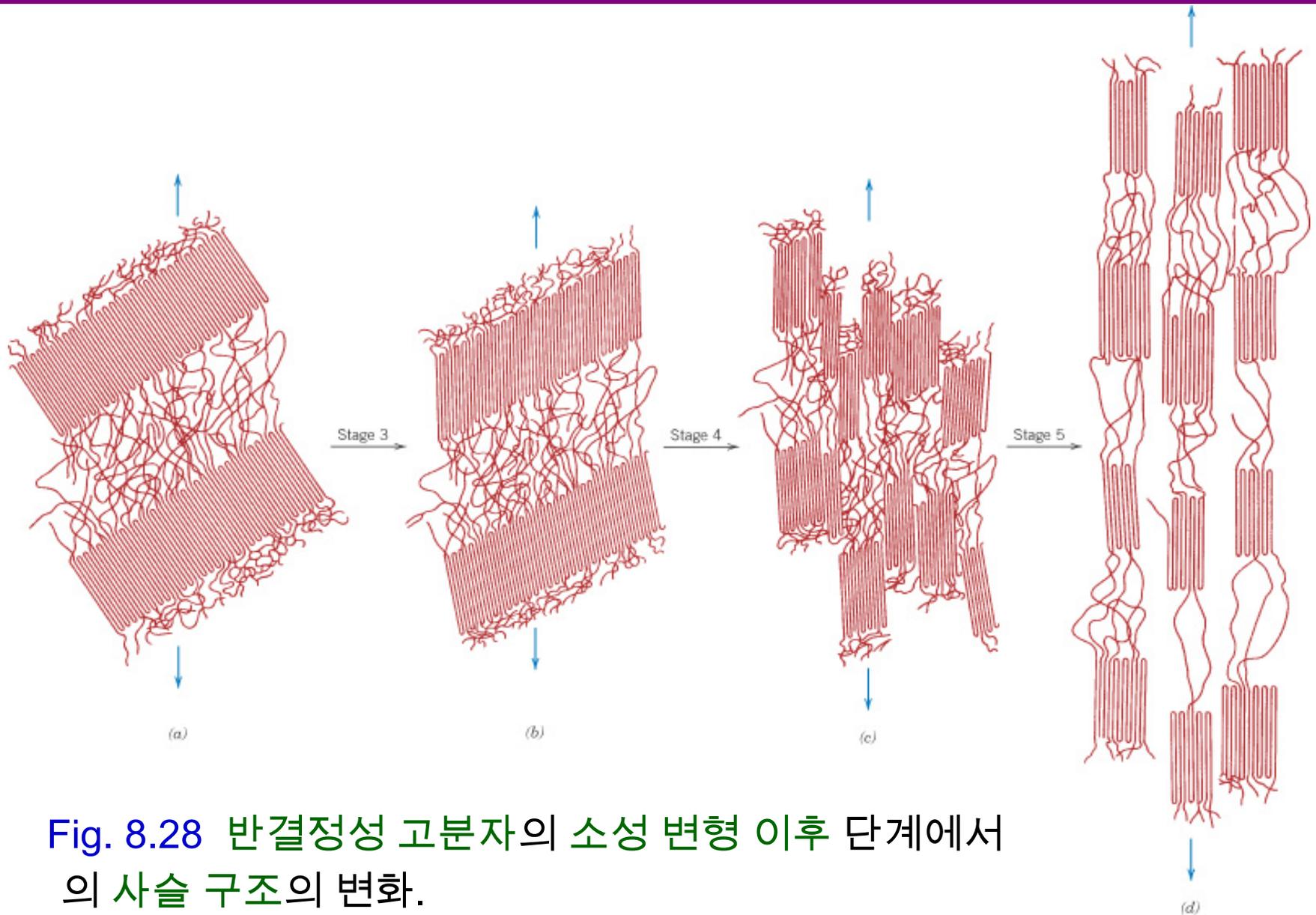


Fig. 8.28 반결정성 고분자의 소성 변형 이후 단계에서의 사슬 구조의 변화.

Hardness (경도)

~ A measure of material's resistance to localized plastic deformation (e.g., dent or scratch)
(국부적인 소성 변형에 대한 재료의 저항 크기)

측정 방법 다양 & 절대적 방법은 없음

→ 시료 표면을 indenter로 눌러 depth or size of indentation 측정

- Hardness test가 자주 수행되는 이유:
 - Simple & inexpensive
 - Nondestructive
 - 다른 물성도 hardness 결과로부터 평가 가능

Rockwell hardness tests

: 다양한 indenters & loads 조합해 경도 측정

Load 가하여 생긴 penetration depth 차이로 결정

시편 두께는 누름 깊이의 10배 이상 되어야 함

Smooth flat surface에서 측정해야 함

HR로 표시

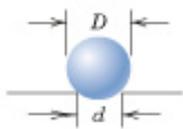
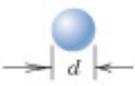
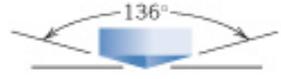
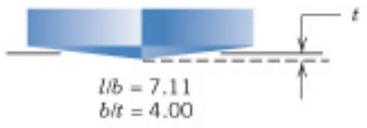
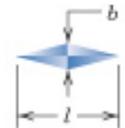
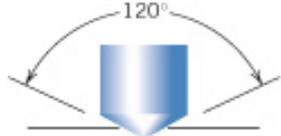
(Table 7.5 다양한 경도시험법) 참조

표시 예:

80HRB → Hardness Rockwell B scale 시험법으로 경도 80

60HR30W → Hardness Rockwell 30W 시험법으로 경도 60

Table 7.5 Hardness-Testing Techniques

Test	Indenter	Shape of Indentation		Load	Formula for Hardness Number ^a
		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 microindentation	Diamond pyramid			P	$HV = 1.854P/d_1^2$
Knoop microindentation	Diamond pyramid			P	$HK = 14.2 P/l^2$
Rockwell and Superficial Rockwell	<ul style="list-style-type: none"> { Diamond cone; { $\frac{1}{16}, \frac{1}{8}, \frac{1}{4}, \frac{1}{2}$, in. diameter { steel spheres 	 	 	<ul style="list-style-type: none"> 60 kg 100 kg 150 kg } Rockwell <ul style="list-style-type: none"> 15 kg 30 kg 45 kg } Superficial Rockwell	

^a 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.

Brinell hardness tests

: Spherical indenter ($d=10\text{mm}$)에 하중 부과해 경도 측정
HB로 표시

Knoop & Vickers microhardness tests

: Small pyramidal diamond indenter에 작은 하중($1-1000\text{g}_f$) 부과해
경도 측정 (특히 Knoop 시험법은 세라믹 같은 취성 재료에 적합)
HK, HV로 표시

Hardness conversion

→ (Fig. 7.30)

Correlation between hardness and tensile strength

→ (Fig. 7.31)

For most steels, $TS(\text{MPa}) = 3.45 \times \text{HB}$

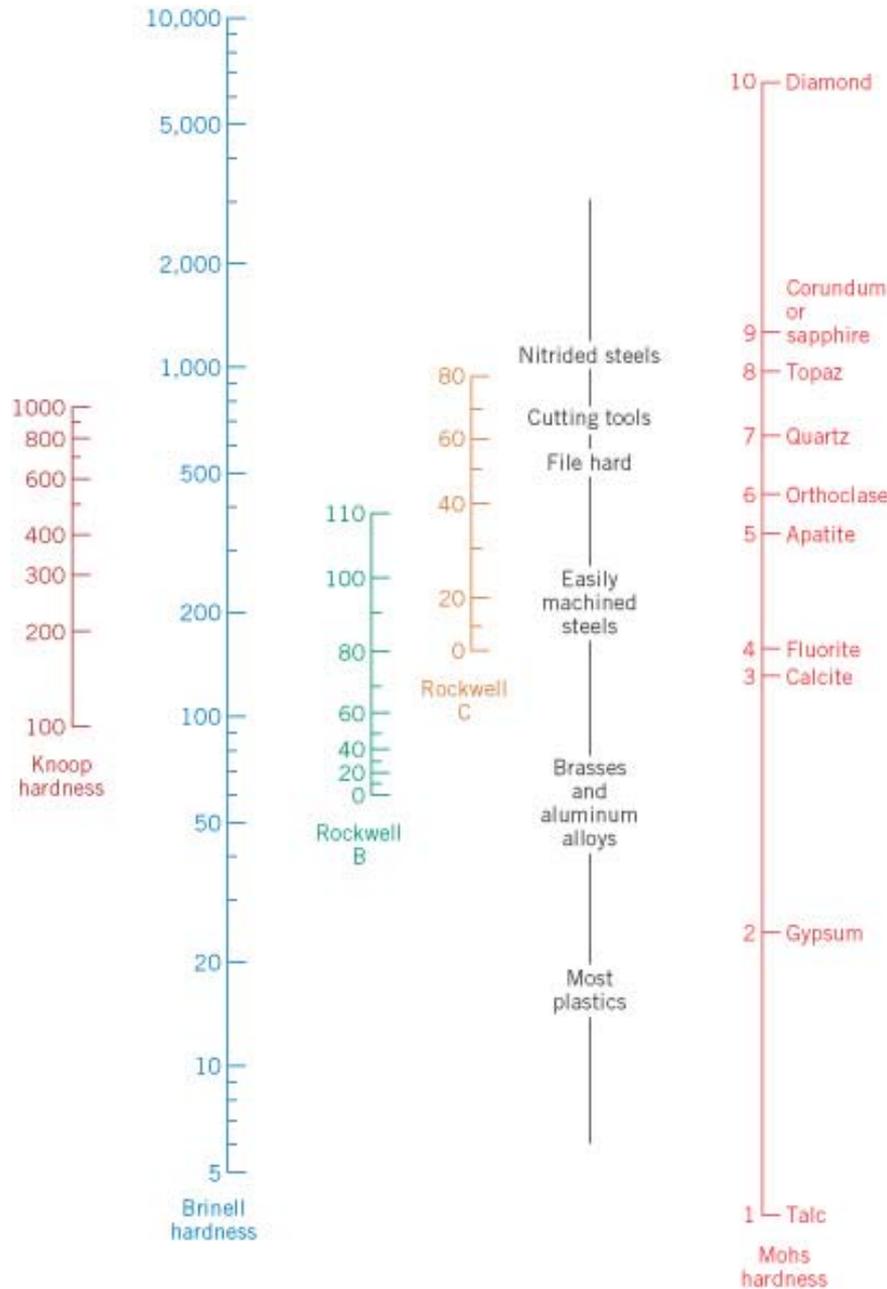


Fig. 7.30 여러가지 경도에 대한 치수 비교.

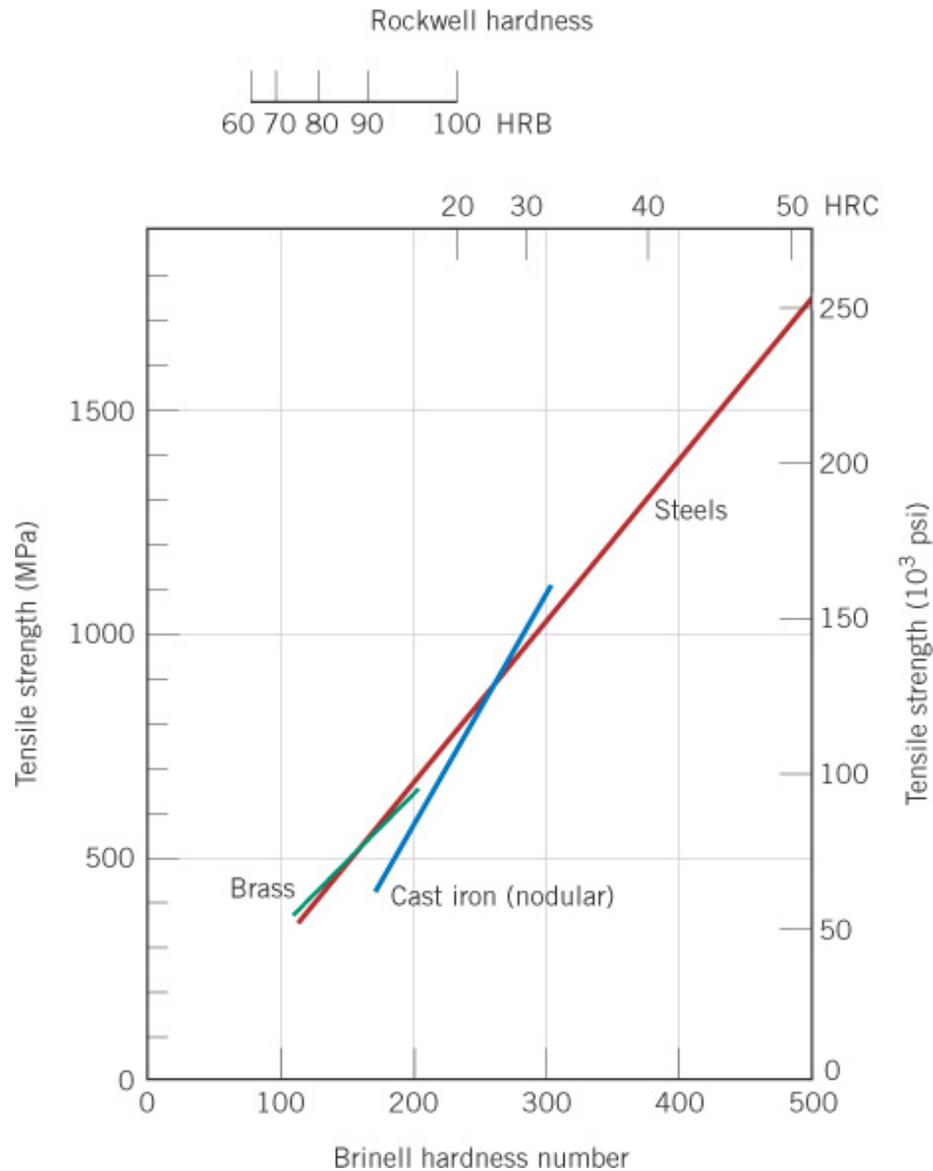


Fig. 7.31 Steel (강), brass (황동), cast iron (주철)에 대한 경도와 인장강도 간의 관계.

Hardness of Ceramic Materials

~ 가장 경도가 높은 재료

Knoop hardness (HK)가 1000 이상인 세라믹이
연마제(abrasives)로 사용

Table 7.7 Approximate Knoop Hardness (100 g load) for Seven Ceramic Materials

<i>Material</i>	<i>Approximate Knoop Hardness</i>
Diamond (carbon)	7000
Boron carbide (B ₄ C)	2800
Silicon carbide (SiC)	2500
Tungsten carbide (WC)	2100
Aluminum oxide (Al ₂ O ₃)	2100
Quartz (SiO ₂)	800
Glass	550

Tear Strength and Hardness of Polymers

(고분자의 인열 강도와 경도)

: Softer than metals and ceramics

포장용 필름의 경우 파열에 견디는 강도인 인열 강도가 중요한 물성
고분자 재료에 대한 경도 시험은 Rockwell tests가 종종 사용됨

Variability of Material Properties (재료 성질의 변이성)

: 측정된 재료의 기계적 성질은 다양한 요인에 의해 변이가 있음

요인 ~ test method, 시편 제조 방법, operator bias, calibration,
재료간의 inhomogeneity, 조성비 차이, ...

Safety Factor (안전 계수)

: 실제 사용시 재료 성질의 불확실성을 고려하여 작업 응력을 설정함

Safety stress
(or working stress) :

$$\sigma_w = \frac{\sigma_y}{N}$$

→ safety factor (1.2~4.0)