

Chapter 17. Thermal Properties of Materials

(재료의 열적 성질)

Heat Capacity (열 용량)

~ Amount of energy to produce a unit temperature rise

$$C = \frac{dQ}{dT}$$

1 mol을 대상으로 하므로 J/mol-K or cal/mol-K의 단위

c.f.) Specific heat (비열) ~ 단위 질량당 열용량
(J/kg-K, cal/g-K, or Btu/lb_m-°F)

C_v ~ heat capacity at constant volume (정적 열용량)

C_p ~ heat capacity at constant pressure (정압 열용량)

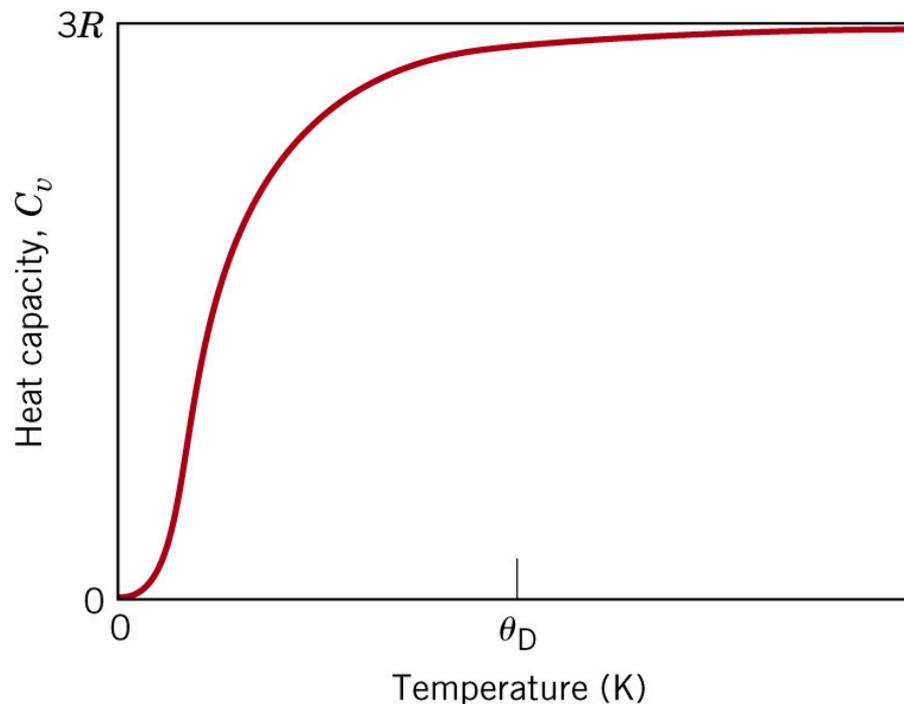
$C_p \geq C_v$ 이지만, 고체와 액체에서는 $C_v = C_p$ 로 둘 수 있음

Temperature Dependence of Heat Capacity (열 용량의 온도 의존성)

~ 일반적으로 열 용량은 온도 증가에 따라 증가

(0K 근처의) 낮은 온도에 대한 관계: $C_v = AT^3$

Debye temperature θ_D 이상의 온도: C_v 는 $3R$ 에 접근



고체 재료의 경우 일반적으로 θ_D 값은 상온 이하이며 C_v 는 25 J/mol-K 의 값을 가짐

Fig. 17.2 C_v 의 온도 의존성.

Table 17.1 Tabulation of the Thermal Properties for a Variety of Materials

<i>Material</i>	c_p (J/kg-K) ^a	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m-K) ^c	L [Ω-W/(K) ² × 10 ⁻⁸]
<i>Metals</i>				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
<i>Ceramics</i>				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex TM) glass	850	3.3	1.4	—
<i>Polymers</i>				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon TM)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

^a To convert to cal/g-K, multiply by 2.39 × 10⁻⁴; to convert to Btu/lb_m-°F, multiply by 2.39 × 10⁻⁴.

^b To convert to (°F)⁻¹, multiply by 0.56.

^c To convert to cal/s-cm-K, multiply by 2.39 × 10⁻³; to convert to Btu/ft-h-°F, multiply by 0.578.

^d Value measured at 100°C.

^e Mean value taken over the temperature range 0–1000°C.

Thermal Expansion (열 팽창)

온도 $T_0 \rightarrow T_f$ 로 변화함에 따라 길이 $l_0 \rightarrow l_f$ 로 변화할 때,

$$\frac{l_f - l_0}{l_0} = \alpha_l (T_f - T_0) \quad \text{or} \quad \frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$$

α_l : linear coefficient of thermal expansion
(선형 열팽창 계수 or 선팽창 계수)

온도 변화에 따른 부피 변화:

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \alpha_v \Delta T \quad \alpha_v : \text{volume coefficient of thermal expansion}$$

(체적 열팽창 계수 or 체팽창 계수)

등방성 재료의 경우: $\alpha_v \approx 3\alpha_l$

- Thermal Expansion from Atomic Perspective

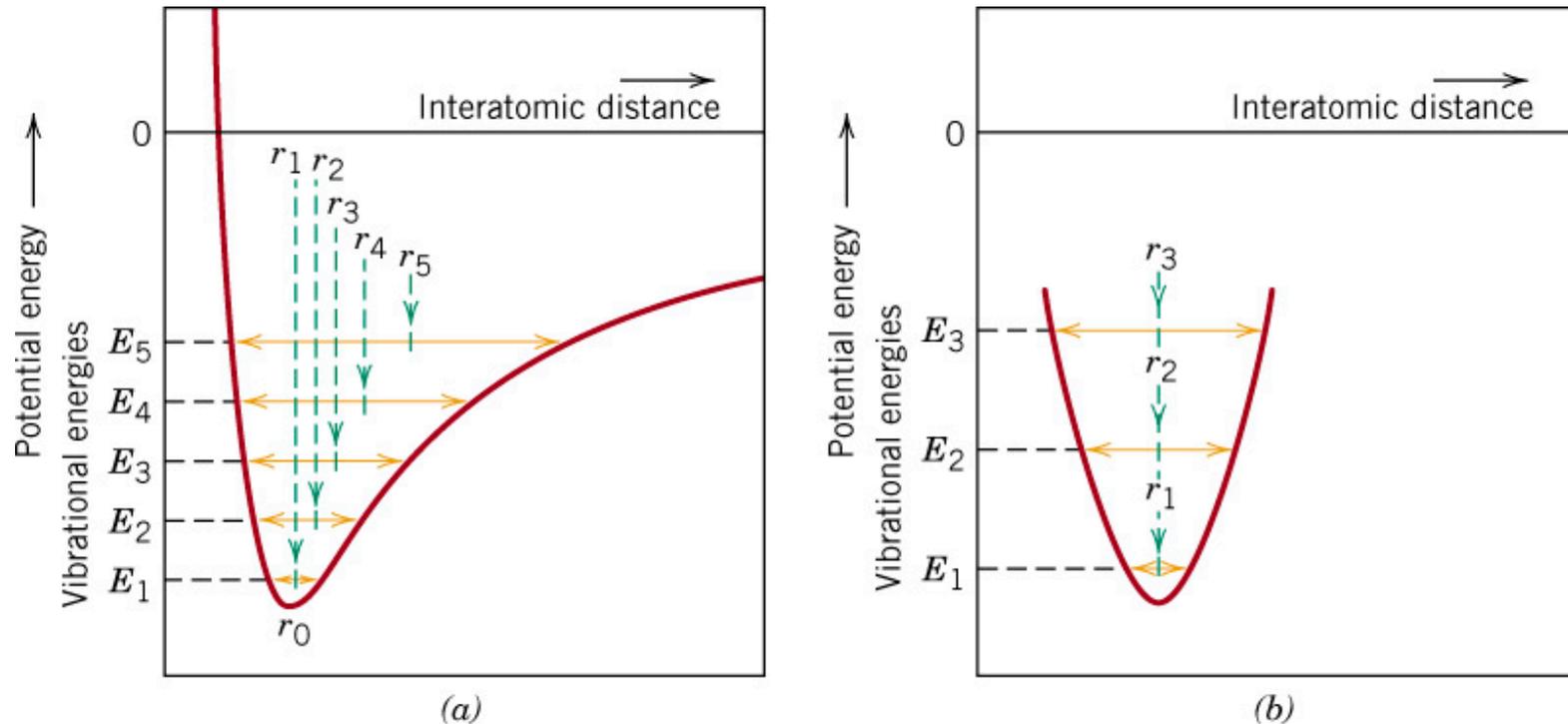


Fig. 17.3 원자간 거리에 따른 위치 에너지 그래프:

- (a) 비대칭 곡선: 온도 증가에 따라 원자간 거리 증가,
- (b) 대칭 곡선: 온도가 증가해도 원자간 거리 일정.

Table 17.1 Tabulation of the Thermal Properties for a Variety of Materials

<i>Material</i>	c_p (J/kg-K) ^a	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m-K) ^c	L [Ω-W/(K) ² × 10 ⁻⁸]
Metals				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
Ceramics				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex TM) glass	850	3.3	1.4	—
Polymers				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon TM)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

^a To convert to cal/g-K, multiply by 2.39 × 10⁻⁴; to convert to Btu/lb_m-°F, multiply by 2.39 × 10⁻⁴.

^b To convert to (°F)⁻¹, multiply by 0.56.

^c To convert to cal/s-cm-K, multiply by 2.39 × 10⁻³; to convert to Btu/ft-h-°F, multiply by 0.578.

^d Value measured at 100°C.

^e Mean value taken over the temperature range 0–1000°C.

Metals

일반적인 금속의 선팽창 계수:

$$5 \times 10^{-6} \sim 25 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$$

Ceramics

강한 원자간 결합 $\rightarrow \alpha_l \downarrow$

세라믹의 선팽창 계수:

$$0.4 \times 10^{-6} \sim 15 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$$

\swarrow
fused silica

Polymers

고분자 재료의 선팽창 계수:

$$50 \times 10^{-6} \sim 400 \times 10^{-6} [1/^\circ\text{C}]$$

Network polymers $\sim \alpha_l \downarrow$

Thermal Expansion: Example

Ex: A copper wire 15 m long is cooled from 40 to -9°C.
How much change in length will it experience?

(Answer) For Cu $\alpha_l = 17.0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}$

Rearranging the equation $\frac{\Delta l}{l_0} = \alpha_l \Delta T$

$$\Delta l = \alpha_l l_0 \Delta T = [17.0 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1}] (15 \text{ m}) [-9 \text{°C} - 40 \text{°C}]$$

$$\Delta l = -0.0125 \text{ m} = -12.5 \text{ mm}$$

Thermal Conductivity (열 전도도)

Thermal conduction

~ 열이 물체 내의 고온 지역에서 저온 지역으로 이동하는 현상

$$q = -k \frac{dT}{dx} \quad \text{-- Fourier's law for steady state heat flux}$$

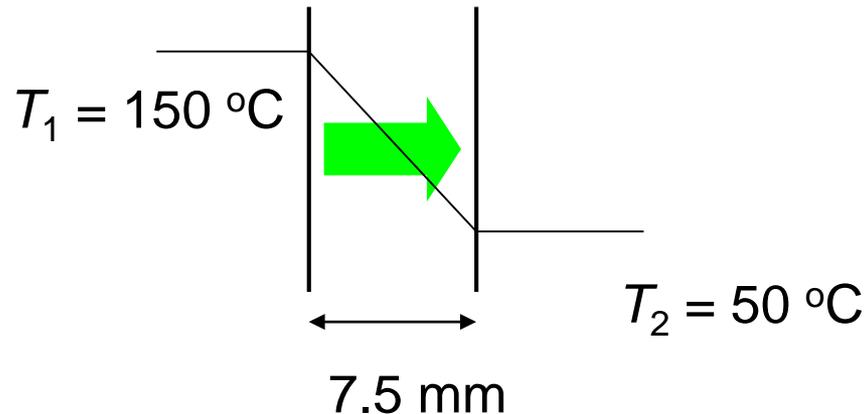
q : heat flux ~ 단위 시간, 단위 면적당 열 흐름

[단위] W/m^2 or $J/s \cdot m^2$

k : thermal conductivity (열전도도)

[단위] $W/m \cdot K$ or $J/s \cdot m \cdot K$

(Ex.) Heat flux through a brass sheet



$$k = 120\text{ W/m-K}$$

$$A = 0.5\text{ m}^2$$

(a) Heat flux, q ?

$$q = -k \frac{\Delta T}{\Delta x} = -(120\text{ W/mK}) \times \left(\frac{(50 - 150)\text{ K}}{7.5 \times 10^{-3}\text{ m}} \right) = 1.60 \times 10^6\text{ W/m}^2$$

(b) Heat loss per hour, dQ/dt ?

$$\frac{dQ}{dt} = qA = (1.6 \times 10^6\text{ J/s m}^2) \times (0.5\text{ m}^2) \times (60\text{ s/min}) \times (60\text{ min/h}) = 2.88 \times 10^9\text{ J/h}$$

Metals

일반적인 금속의 열 전도도:

20 ~ 400 W/m-K

금속의 전기 전도도와 열 전도도와의 관계

→ Wiedermann-Franz law:

$$L = \frac{k}{\sigma T}$$

thermal conductivity

electrical conductivity

상수 (이론치: $2.44 \times 10^{-8} \Omega \cdot \text{W}/\text{K}^2$)

합금 금속의 경우 열전도도 감소

Table 17.1 Tabulation of the Thermal Properties for a Variety of Materials

Material	c_p (J/kg-K) ^a	α_l [(°C) ⁻¹ × 10 ⁻⁶] ^b	k (W/m-K) ^c	L [Ω·W/(K) ² × 10 ⁻⁸]
Metals				
Aluminum	900	23.6	247	2.20
Copper	386	17.0	398	2.25
Gold	128	14.2	315	2.50
Iron	448	11.8	80	2.71
Nickel	443	13.3	90	2.08
Silver	235	19.7	428	2.13
Tungsten	138	4.5	178	3.20
1025 Steel	486	12.0	51.9	—
316 Stainless steel	502	16.0	15.9	—
Brass (70Cu–30Zn)	375	20.0	120	—
Kovar (54Fe–29Ni–17Co)	460	5.1	17	2.80
Invar (64Fe–36Ni)	500	1.6	10	2.75
Super Invar (63Fe–32Ni–5Co)	500	0.72	10	2.68
Ceramics				
Alumina (Al ₂ O ₃)	775	7.6	39	—
Magnesia (MgO)	940	13.5 ^d	37.7	—
Spinel (MgAl ₂ O ₄)	790	7.6 ^d	15.0 ^e	—
Fused silica (SiO ₂)	740	0.4	1.4	—
Soda–lime glass	840	9.0	1.7	—
Borosilicate (Pyrex TM) glass	850	3.3	1.4	—
Polymers				
Polyethylene (high density)	1850	106–198	0.46–0.50	—
Polypropylene	1925	145–180	0.12	—
Polystyrene	1170	90–150	0.13	—
Polytetrafluoroethylene (Teflon TM)	1050	126–216	0.25	—
Phenol-formaldehyde, phenolic	1590–1760	122	0.15	—
Nylon 6,6	1670	144	0.24	—
Polyisoprene	—	220	0.14	—

$$\frac{k}{\sigma T}$$

k : 열 전도도
 σ : 전기 전도도

^a To convert to cal/g-K, multiply by 2.39 × 10⁻⁴; to convert to Btu/lb_m-°F, multiply by 2.39 × 10⁻⁴.

^b To convert to (°F)⁻¹, multiply by 0.56.

^c To convert to cal/s-cm-K, multiply by 2.39 × 10⁻³; to convert to Btu/ft-h-°F, multiply by 0.578.

^d Value measured at 100°C.

^e Mean value taken over the temperature range 0–1000°C.

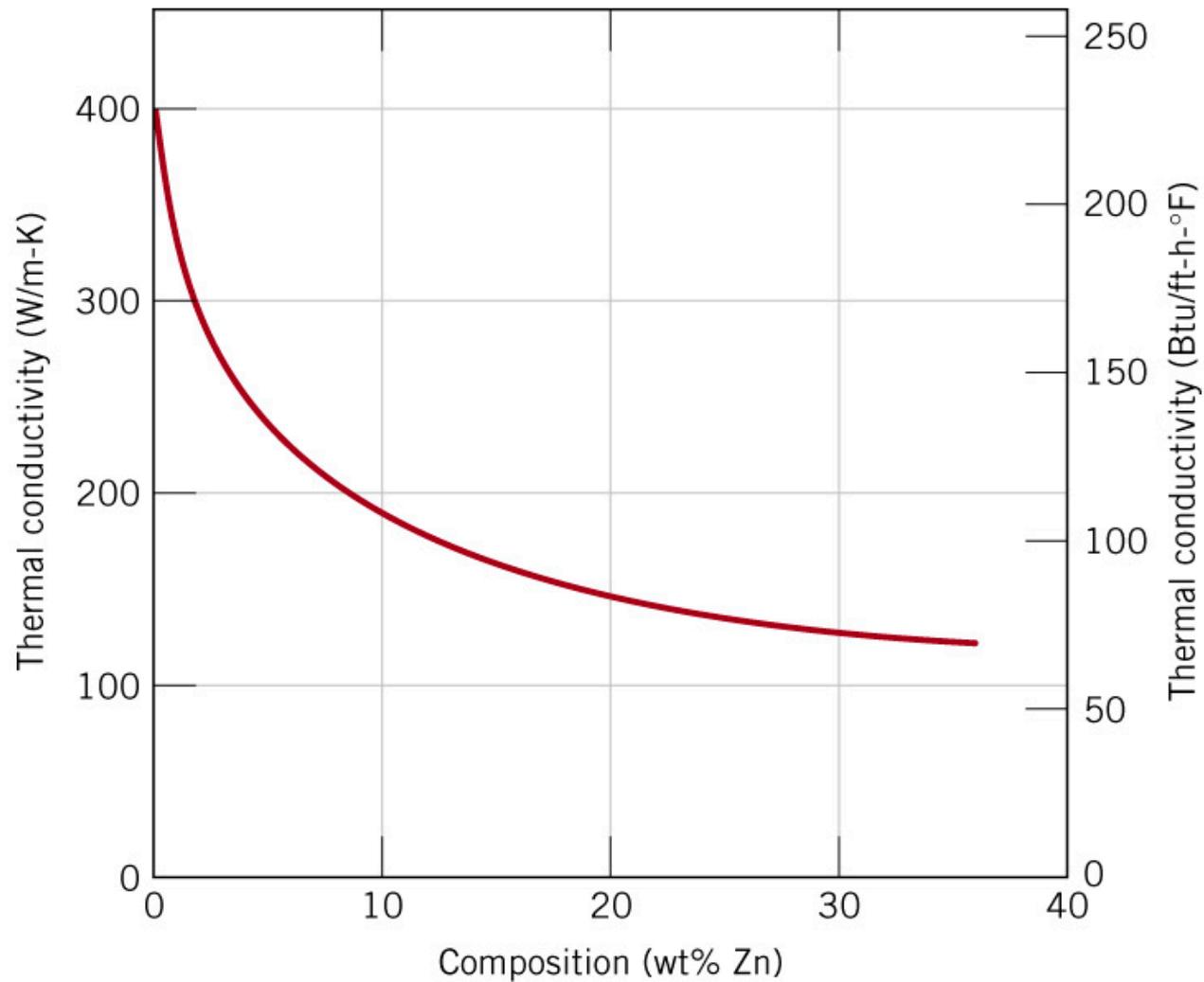


Fig. 17.4 Cu-Zn 합금의 조성에 따른 열 전도도.

Ceramics

~ 자유전자가 적어 thermal insulators

세라믹의 상온에서의 열 전도도:

2 ~ 50 W/m-K

비정질 세라믹의 전도도 < 결정질 세라믹의 전도도

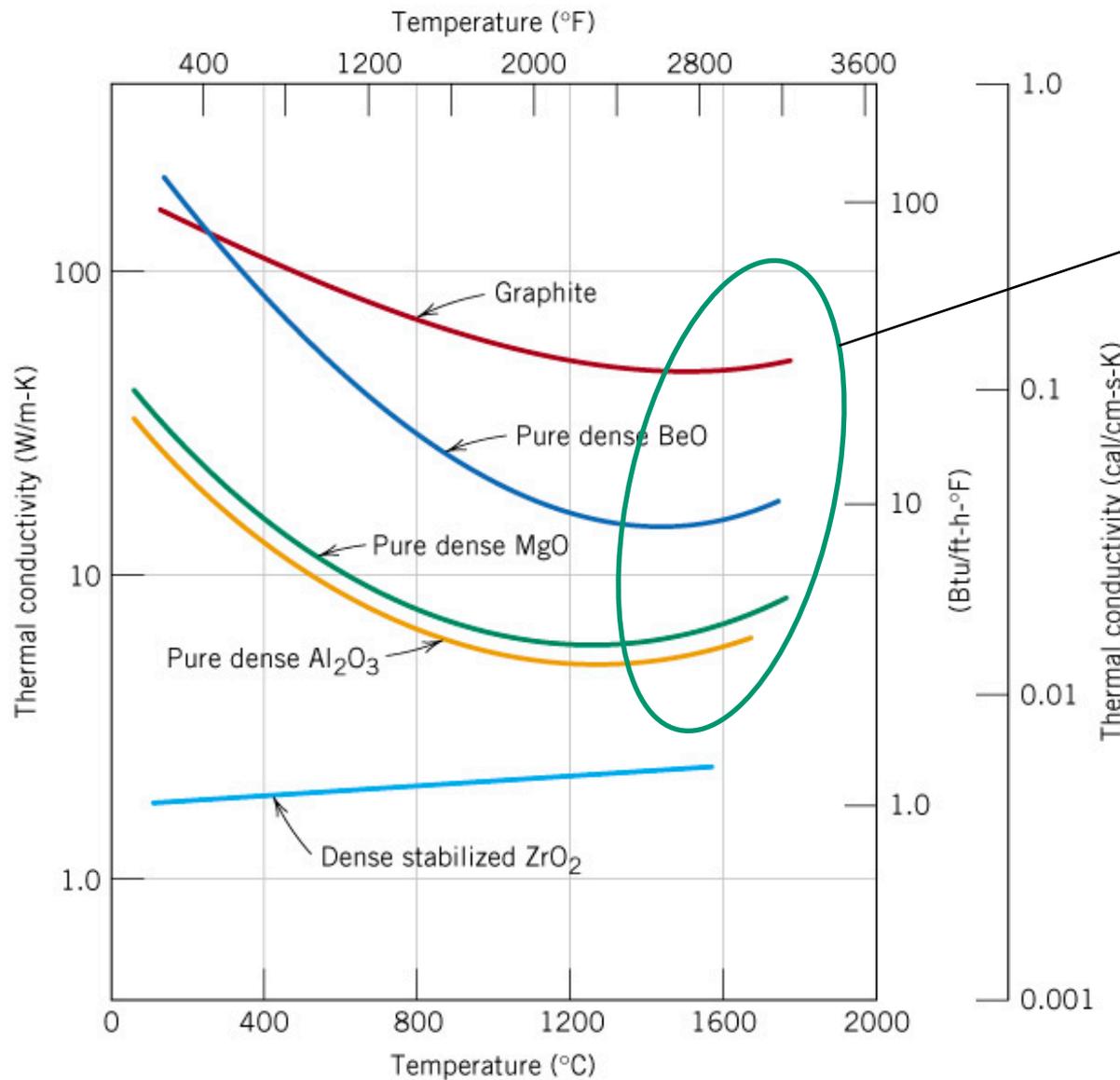
(구조가 무질서하면 에너지 산란이 많음)

온도 ↑ → 열 전도도 ↓

(온도 증가하면 에너지 산란이 많음) --- Fig. 17.5

Porosity (기공) ↑ → 열 전도도 ↓

(공기의 열 전도도(0.02 W/m-K)가 매우 낮음)



고온에서의 증가는 열 복사 (thermal radiation)에 기인

Fig. 17.5 세라믹 재료의 온도에 따른 열 전도도.

Polymers

고분자 재료의 열 전도도:

0.3 W/m-K 정도

고분자 재료는 단열재로 이용

결정성 고분자의 경우 열 전도도가 큼

기공이 있는 경우 단열 효과 향상

→ 발포 폴리스티렌

(foamed polystyrene, “Styrofoam”)

Thermal Stresses (열 응력)

~ Stresses induced in a body as a result of changes in temperature

Stresses from Expansion and Contraction

등방성의 고체 막대가 축방향으로 고정되어 있는 경우
온도 변화에 따라 야기되는 열 응력

Dependence of thermal stress on E , α_l and ΔT

$$\sigma = E\alpha_l(T_0 - T_f) = E\alpha_l\Delta T$$

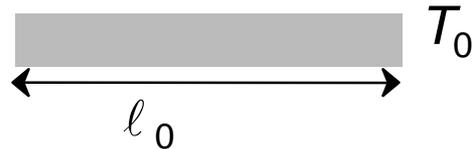
↓ 탄성 계수 ↓ 선 팽창계수

가열 ($T_f > T_0$) 시 팽창이 억제되어 압축 응력 발생

냉각 ($T_f < T_0$) 시 수축이 억제되어 인장 응력 발생

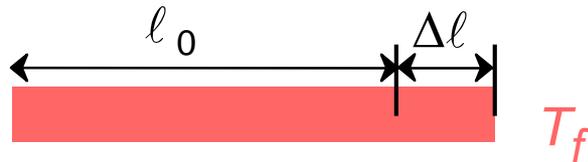
- (Ex. 17.1) A brass rod is stress-free at room temperature (20°C). It is heated up, but prevented from lengthening. At what temperature does the stress reach -172 MPa?

Solution:



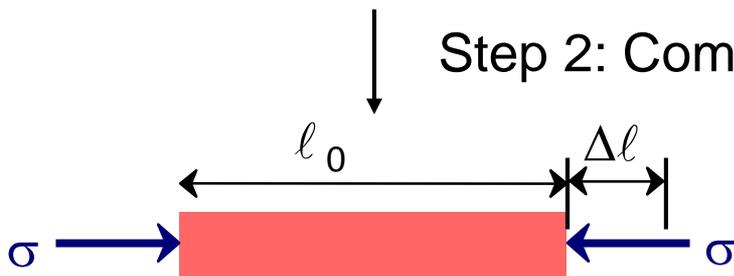
Original conditions

Step 1: Assume unconstrained thermal expansion

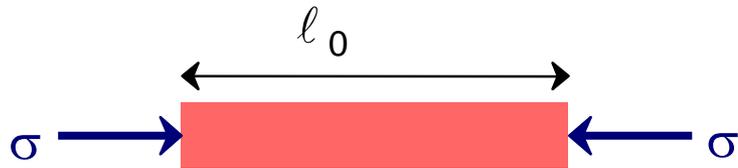


$$\frac{\Delta l}{l_0} = \epsilon_{\text{thermal}} = \alpha_{\square} (T_f - T_0)$$

Step 2: Compress specimen back to original length



$$\epsilon_{\text{compress}} = \frac{-\Delta l}{l_0} = -\epsilon_{\text{thermal}}$$



The thermal stress can be directly calculated as

$$\sigma = E(\varepsilon_{\text{compress}})$$

Noting that $\varepsilon_{\text{compress}} = -\varepsilon_{\text{thermal}}$ and substituting gives

$$\sigma = -E(\varepsilon_{\text{thermal}}) = -E\alpha_{\square}(T_f - T_0) = E\alpha_{\square}(T_0 - T_f)$$

Rearranging and solving for T_f gives

$$T_f = T_0 - \frac{\sigma}{E\alpha_{\square}}$$

Answer: 106°C

20°C (initial temperature T_0)
 100 GPa (Young's modulus E)
 20 x 10⁻⁶/°C (coefficient of thermal expansion α_{\square})
 -172 MPa (since in compression) (stress σ)

Thermal Shock of Brittle Materials (취성 재료의 열 충격)

Ductile metals & polymers

~ 열 응력이 소성 변형에 의해 완화됨

Ceramics

~ 열 응력에 의해 취성 파괴의 가능성 높음
(냉각이 가열보다 열 충격이 큼)

Thermal shock resistance

~ 열 응력에 의한 파괴에 저항할 수 있는 능력

Thermal shock resistance parameter (TSR):

$$TSR \cong \frac{\sigma_f k}{E \alpha_l}$$

σ_f : fracture strength (파괴 강도)

TSR 향상 방법

냉각 or 가열 속도 감소

물체 내의 temperature gradient 완화

열적, 기계적 특성 변화

(즉, σ_f & k ↑, E & α_l ↓)

일반적으로 열 팽창계수 α_l 조절이 비교적 쉬움

(예) 열 충격 강화 유리

Soda-lime glass의 α_l : $9 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Borosilicate glass의 α_l : $3 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

→ Kitchen oven에 적합 (Pyrex)

(Probs.)

17.1, 17.3, 17.7, 17.13, 17.14, 17.26 & 17.27.