

## 2-2장. 온도 (Temperature)

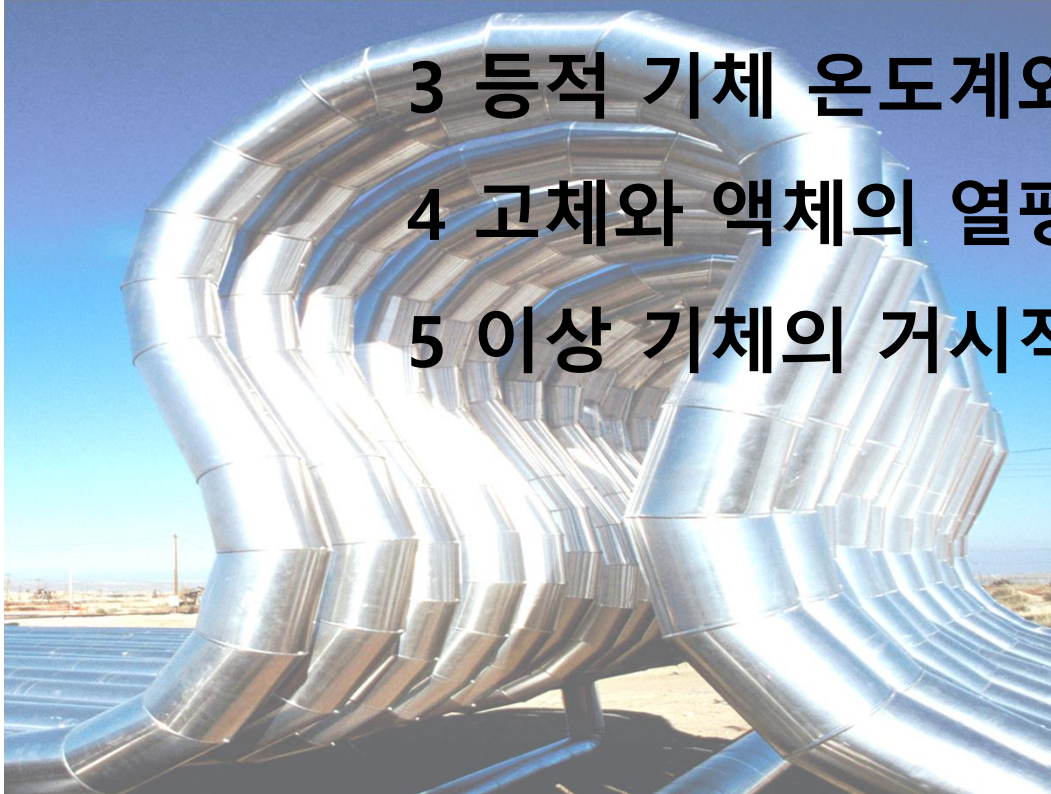
1 온도와 열역학 제 0법칙

2 온도계와 섭씨 온도 눈금

3 등적 기체 온도계와 절대 온도 눈금

4 고체와 액체의 열팽창

5 이상 기체의 거시적 기술



대학물리학 9판 : Ch19, Ch20, Ch21, Ch22



대학물리학 10판 : Ch18, Ch19, Ch20, Ch21

# Thermodynamics

- **Thermodynamics** involves situations in which **the temperature or state of a system changes due to energy transfers**.
- Thermodynamics is very successful in explaining **the bulk properties of matter**.
- Also successful in explaining the correlation between these properties and the mechanics of **atoms and molecules**.
- Historically, the development of thermodynamics paralleled the development of **atomic theory**.
- Thermodynamics also addresses practical questions:
  - How a refrigerator is able to cool its contents
  - What types of transformations occur in a power plant
  - What happens to the kinetic energy of an object as it comes to a rest
- To describe **thermal phenomena**, careful definitions are needed:
  - **Temperature**
  - **Heat**
  - **Internal energy**
- Thermal phenomena involving particular substances is important.
- **Ideal gases on a macroscopic scale** can be described .
  - Concerned with relationships among such things as **pressure, volume, and temperature**
  - The study of gases on a microscopic scale will be done in a later chapter.

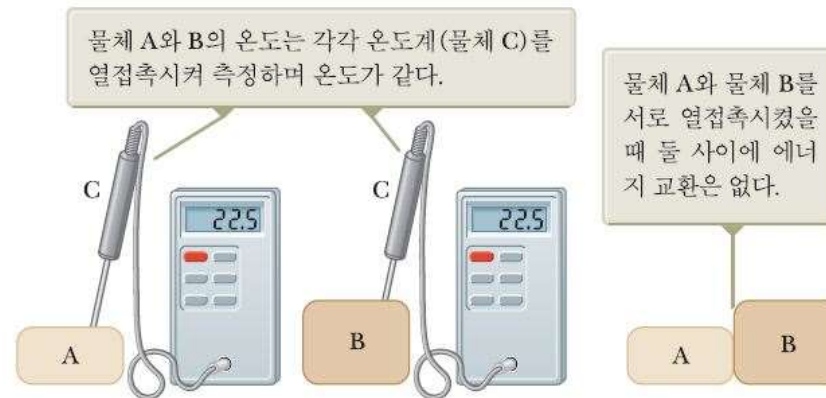
# 1 온도와 열역학 제 0법칙

(Temperature and the Zeroth Law of Thermodynamics)

**온도(Temperature):** 어떤 물체를 만질 때 느끼게 되는 뜨겁고 차가운 정도.  
사람의 감각은 실제 온도를 제대로 반영하지 못한다.

**열접촉(thermal contact):** 두 물체 사이에 에너지가 온도 차이에 의해 교환될 수 있는 상태.

**열평형(thermal equilibrium):** 열접촉 상태에 놓인 두 물체 사이에 열(heat)이나 전자기 복사(electromagnetic radiation)에 의한 에너지 교환이 없는 상태.



## 열역학 제 0법칙(zeroth law of thermodynamics)

만약 두 물체 A와 B가 제3의 물체  $C_{(\text{ex. thermometer})}$ 와 각각 열평형 상태에 있으면,  
A와 B는 서로 열평형 상태에 있다. no energy exchanged

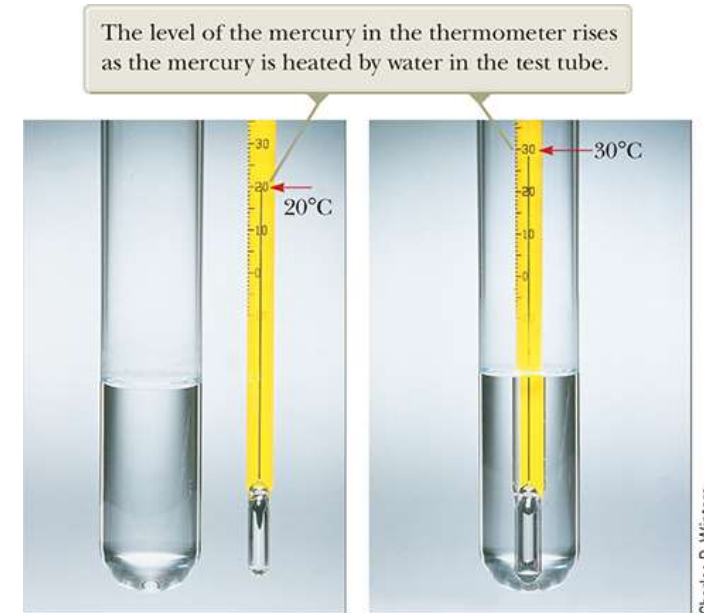
## 2 온도계와 섭씨 온도 눈금

### (Thermometers and the Celsius Temperature Scale)

모든 온도계는 온도에 따라 변하는 몇 가지 물리적인 성질을 이용하여 온도를 측정한다.

온도에 따라서 변하는 물리적인 성질들

- |                      |   |              |
|----------------------|---|--------------|
| (1) 액체의 부피           | → | 알코올 온도계, 체온계 |
| (2) 고체의 길이           | → | 바이메탈         |
| (3) 부피가 일정할 때 기체의 압력 |   |              |
| (4) 압력이 일정할 때 기체의 부피 |   |              |
| (5) 도체의 전기 저항        |   |              |
| (6) 물체의 색깔 등         | → | 열전대          |



### 섭씨 온도(Celsius temperature):

물의 어는 점을 0°C로, 끓는 점을 100°C로 정의. 높이 차이를 100등분

### 화씨 온도(Fahrenheit temperature):

물의 어는 점을 32°C로, 끓는 점을 212°C로 정의. 높이 차이를 180등분

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^\circ F$$



### 3 등적 기체 온도계와 절대 온도 눈금

(The Constant-Volume Gas Thermometer and the Absolute Temperature Scale)

등적 기체 온도계: 일정한 부피를 갖는 기체의 압력이 온도에 따라 변하는 물리적 성질을 이용한 온도계

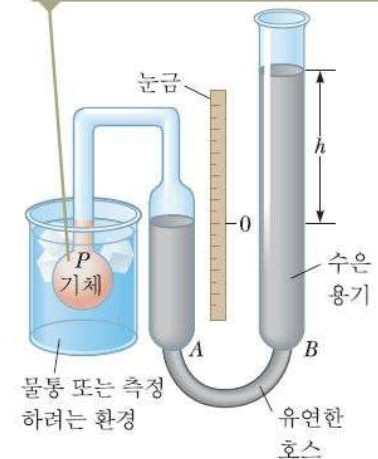
기체의 압력이 낮고, 각각의 기체의 액화점보다 충분히 높은 온도에서 측정하는 한, 측정 결과는 기체의 종류에 크게 의존하지 않는다.

모든 기체는  $-273.15^{\circ}\text{C}$ 일 때 압력이 영이 된다.

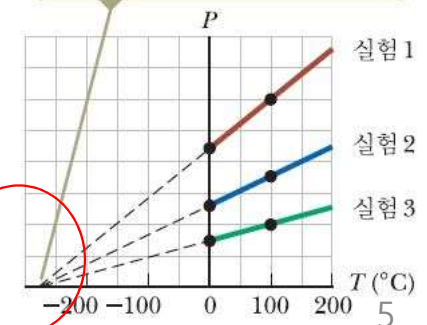
$-273.15^{\circ}\text{C}$ : 절대 영도(absolute zero)

$$T_C = T - 273.15$$

플라스크 안의 기체의 부피는 수은주 B를 올리거나 내려서 수은주 A의 높이를 동일하게 유지함으로써 일정하게 유지된다.



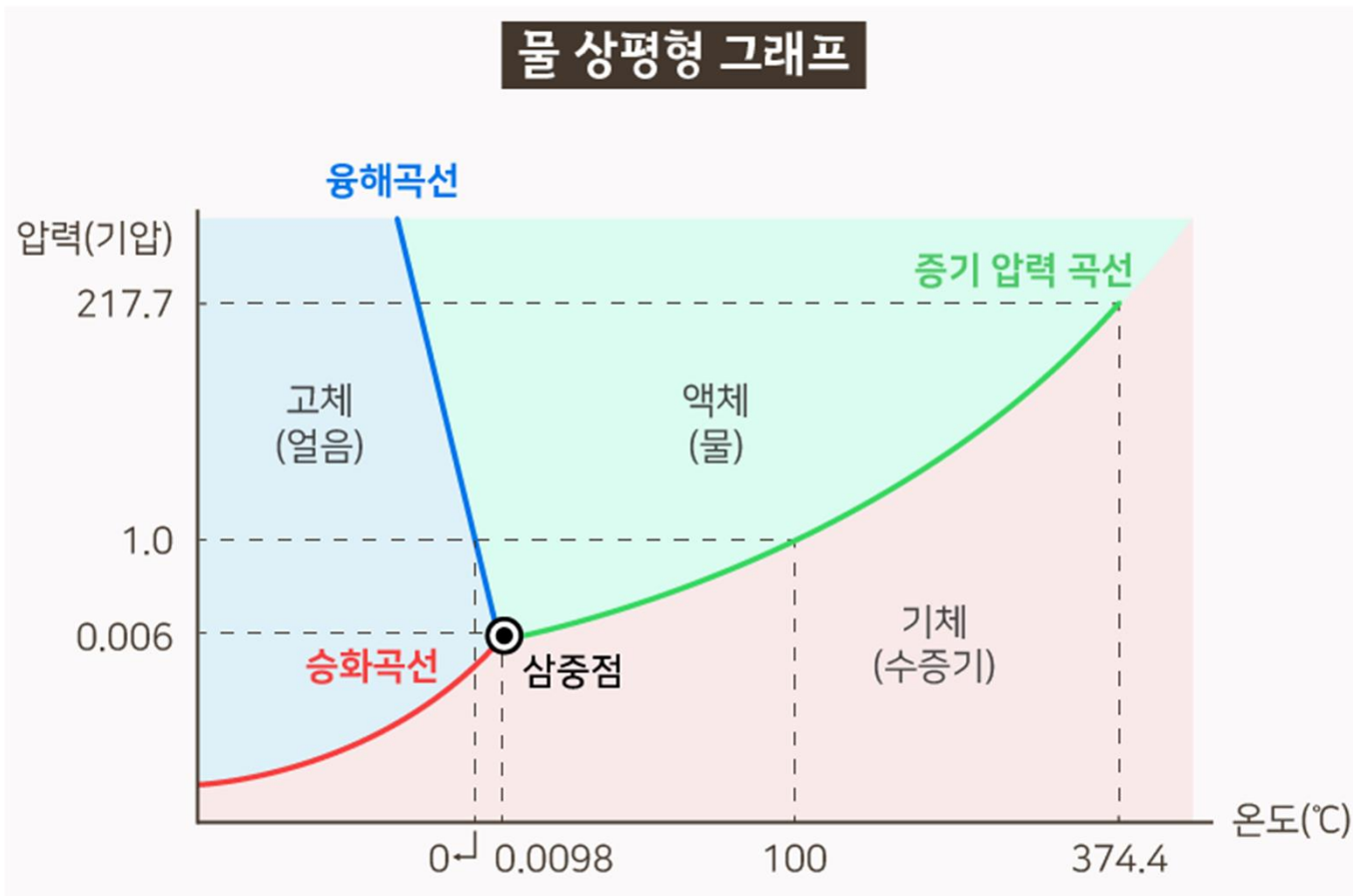
세 직선의 연장선이  $-273.15^{\circ}\text{C}$ 에서 압력이 영이 된다.



various gases

## 물의 삼중점(triple point of water);

물이 특정한 온도, 압력에서 기체, 액체, 고체의 평형 상태로 공존하는 지점으로 이 삼중점은  $0.01^{\circ}\text{C}$ 의 온도와  $4.58\text{mmHg}$ 의 압력일 때 나타난다.



Ice point temperatures

- $0^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K} = 32^{\circ}\text{ F}$

Steam point temperatures

- $100^{\circ}\text{C} = 373.15\text{ K} = 212^{\circ}\text{ F}$

## 물의 삼중점(triple point of water);

물이 특정한 온도, 압력에서 기체, 액체, 고체의 평형 상태로 공존하는 지점으로 이 삼중점은  $0.01^{\circ}\text{C}$ 의 온도와  $4.58\text{mmHg}$ 의 압력일 때 나타난다.

## 절대 온도 눈금(Kelvin scale);

절대 온도의 SI 단위인 켈빈(K)을 사용하며, 절대 영도와 물의 삼중점 사이의  $1/273.16$ 로 정의하였다.

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32^{\circ}\text{F}$$

$$T_C = \frac{5}{9}(T_F - 32^{\circ}\text{F})$$

$$\Delta T_C = \Delta T = \frac{5}{9}\Delta T_F$$

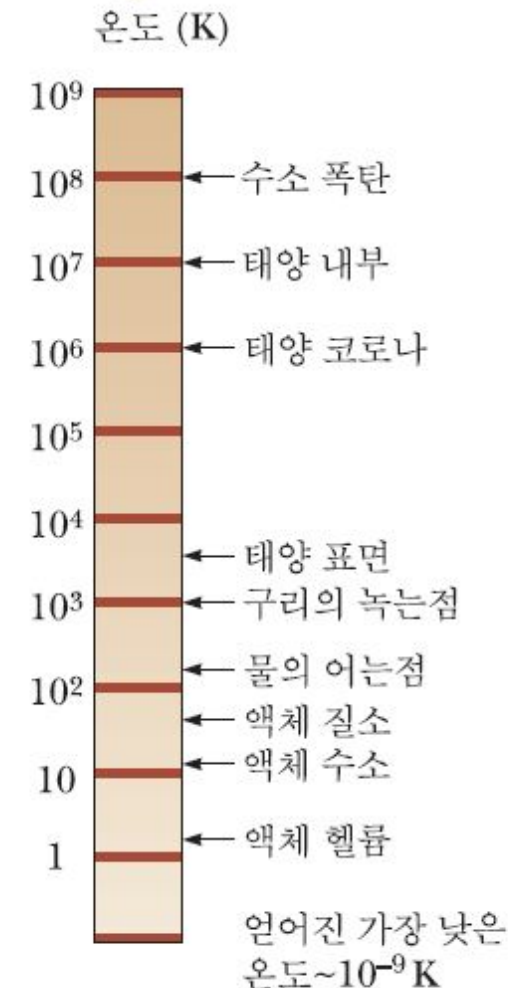
Ice point temperatures

- $0^{\circ}\text{C} = 273.15\text{ K} = 32^{\circ}\text{F}$

Steam point temperatures

- $100^{\circ}\text{C} = 373.15\text{ K} = 212^{\circ}\text{F}$

온도 눈금이 로그 눈금으로 되어 있다.



## 4 고체와 액체의 열팽창

### (Thermal Expansion of Solids and Liquids)

**열팽창(thermal expansion):** 온도를 높이면 부피가 증가하는 현상.  
물체를 구성하고 있는 원자나 분자 간의 평균 거리의 변화 때문에 발생한다.  
열팽창 정도가 처음 크기에 비하여 충분히 작은 경우 열팽창에 의한 길이 변화는 근사적으로 온도 변화에 비례한다.



**평균 선팽창 계수 (average coefficient of linear expansion)  $\alpha$**

$$\alpha \equiv \frac{\Delta L / L_i}{\Delta T} \quad \text{units : } (^{\circ}\text{C})^{-1}$$

$$\Delta L = \alpha L_i \Delta T \quad \text{또는} \quad L_f - L_i = \alpha L_i (T_f - T_i)$$

**평균 부피 팽창 계수 (average coefficient of volume expansion)  $\beta$**

$$\Delta V = \beta V_i \Delta T$$

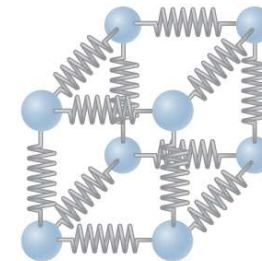
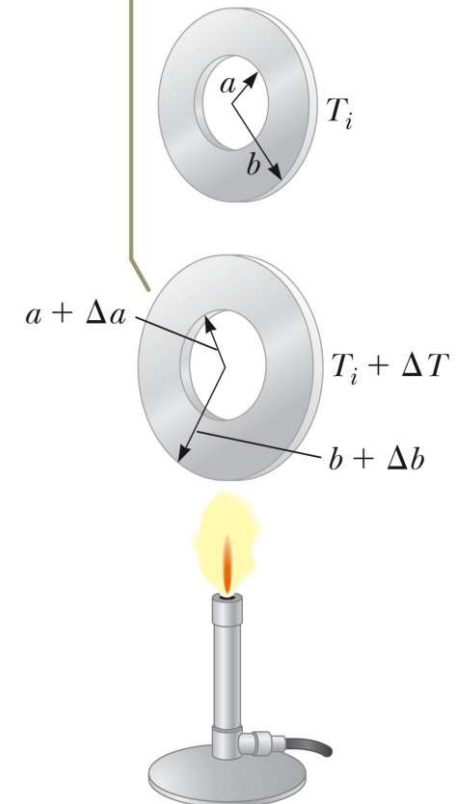
- For a solid,  $\beta = 3\alpha$ 
  - This assumes the material is isotropic, the same in all directions.
- For a liquid or gas,  $\beta$  is given in the table

### Area Expansion

The change in area is proportional to the original area and to the change in temperature:

- $\Delta A = 2\alpha A_i \Delta T$

As the washer is heated, all dimensions increase, including the radius of the hole.





Without these joints in separate sections of roadway or bridges, the surface would buckle due to thermal expansion on very hot days or crack due to contraction on very cold days.



(a) 다리

The long, vertical joint is filled with a soft material that allows the wall to expand and contract as the temperature of the bricks changes.



© Cengage

b

(b) 벽에서의 열팽창 이음매

## Some Coefficients

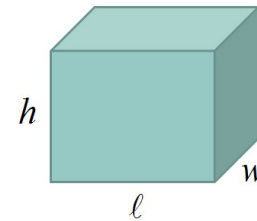
**TABLE 19.1** *Average Expansion Coefficients  
for Some Materials Near Room Temperature*

Material (Solids)	Average Linear Expansion Coefficient ( $\alpha$ )( $^{\circ}\text{C}$ ) $^{-1}$	Material (Liquids and Gases)	Average Volume Expansion Coefficient ( $\beta$ )( $^{\circ}\text{C}$ ) $^{-1}$
Aluminum	$24 \times 10^{-6}$	Acetone	$1.5 \times 10^{-4}$
Brass and bronze	$19 \times 10^{-6}$	Alcohol, ethyl	$1.12 \times 10^{-4}$
Concrete	$12 \times 10^{-6}$	Benzene	$1.24 \times 10^{-4}$
Copper	$17 \times 10^{-6}$	Gasoline	$9.6 \times 10^{-4}$
Glass (ordinary)	$9 \times 10^{-6}$	Glycerin	$4.85 \times 10^{-4}$
Glass (Pyrex)	$3.2 \times 10^{-6}$	Mercury	$1.82 \times 10^{-4}$
Invar (Ni–Fe alloy)	$0.9 \times 10^{-6}$	Turpentine	$9.0 \times 10^{-4}$
Lead	$29 \times 10^{-6}$	Air <sup>a</sup> at 0 $^{\circ}\text{C}$	$3.67 \times 10^{-3}$
Steel	$11 \times 10^{-6}$	Helium <sup>a</sup>	$3.665 \times 10^{-3}$

<sup>a</sup>Gases do not have a specific value for the volume expansion coefficient because the amount of expansion depends on the type of process through which the gas is taken. The values given here assume the gas undergoes an expansion at constant pressure.

## ➤ 팽창계수의 관계

물체가 등방성을 가질 때

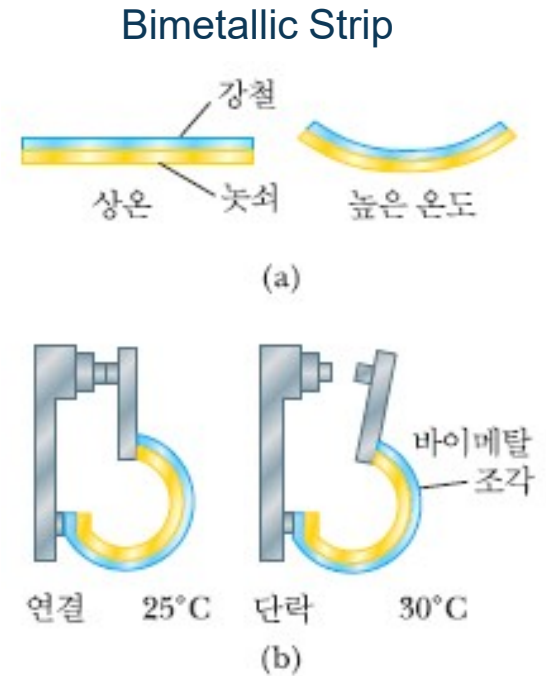


$$\begin{aligned} V_i + \Delta V &= (\ell + \Delta\ell)(w + \Delta w)(h + \Delta h) \\ &= (\ell + \alpha\ell\Delta T)(w + \alpha w\Delta T)(h + \alpha h\Delta T) \\ &= \ell wh(1 + \alpha\Delta T)^3 \\ &= V_i[1 + 3\alpha\Delta T + 3(\alpha\Delta T)^2 + (\alpha\Delta T)^3] \end{aligned}$$

$$\frac{\Delta V}{V_i} = 3\alpha\Delta T + 3(\cancel{\alpha\Delta T})^2 + (\cancel{\alpha\Delta T})^3$$

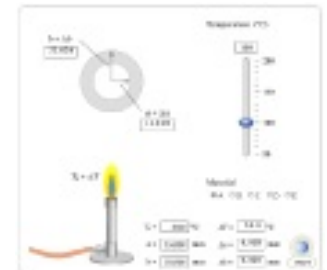
$$\therefore \frac{\Delta V}{V_i} = 3\alpha\Delta T \rightarrow \Delta V = (3\alpha)V_i\Delta T$$

$$\therefore \beta = 3\alpha$$



## 19.8: Thermal Expansion of a Metal Washer

In this animation, you can experiment with the thermal expansion of a homogeneous metal washer. As the washer is heated, all dimensions increase (expansion exaggerated).



## 예제 19.2 기차 선로의 팽창

0.0°C에서 길이가 30.000m인 강철로 된 기차 선로가 있다.

(A) 온도가 40.0°C일 때 길이를 구하라.

(B) 0.0°C에서 선로의 양 끝이 단단하게 고정되어 있어 팽창이 억제되어 있다고 가정해 보자. 40.0°C로 온도가 상승하였을 때 선로가 받는 열적 변형력을 구하라.

풀이

$$(A) \Delta L = \alpha L_i \Delta T$$

$$= [11 \times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}] (30.000 \text{ m}) (40.0^{\circ}C)$$

$$= 0.013 \text{ m}$$

$$L_f = 30.000 \text{ m} + 0.013 \text{ m} = 30.013 \text{ m}$$

$$(B) \text{인장 변형력} = \frac{F}{A} = Y \frac{\Delta L}{L_i}$$

$$\frac{F}{A} = (20 \times 10^{10} \text{ N} / \text{m}^2) \left( \frac{0.013 \text{ m}}{30.000 \text{ m}} \right)$$

$$= 8.7 \times 10^7 \text{ N} / \text{m}^2$$



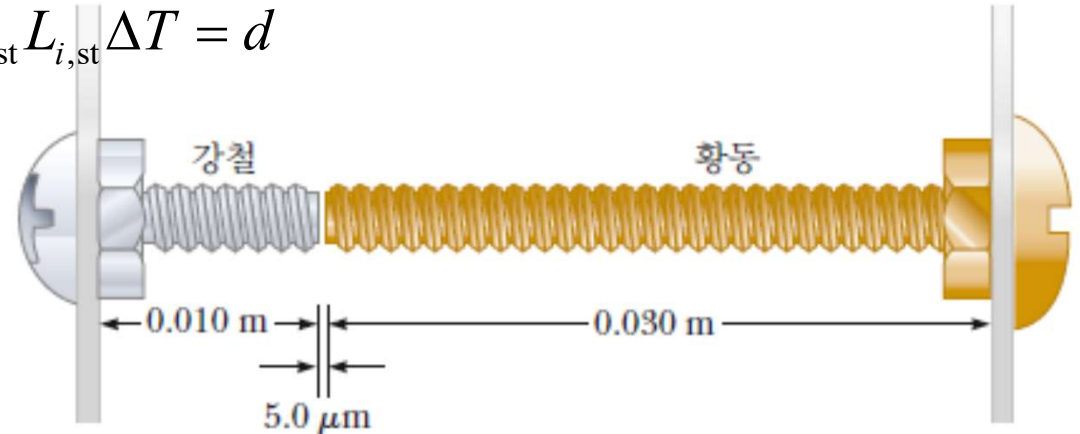
### 예제 18.3 열팽창에 의한 전기합선

어떤 전자 기기가 잘못 설계되어 그림 19.10과 같이 서로 다른 쪽에 달려 있는 볼트가 안쪽에서 거의 맞닿게 되었다. 강철 볼트와 황동 볼트는 각기 다른 전위에 놓여 있어 서로 닿을 경우, 단락(합선) 회로가 형성되어 기기가 손상을 입게 된다(전위에 대해서는 25장에서 알아보기로 한다). 27°C일 때 두 볼트 사이의 간격이 5.0 mm였다면, 두 볼트가 접촉하게 되는 온도는 몇 도인가? 두 벽 사이의 거리는 온도에 영향을 받지 않는다고 가정한다.

풀이

$$\Delta L_{br} + \Delta L_{st} = \alpha_{br} L_{i,br} \Delta T + \alpha_{st} L_{i,st} \Delta T = d$$

$$\Delta T = \frac{d}{\alpha_{br} L_{i,br} + \alpha_{st} L_{i,st}}$$



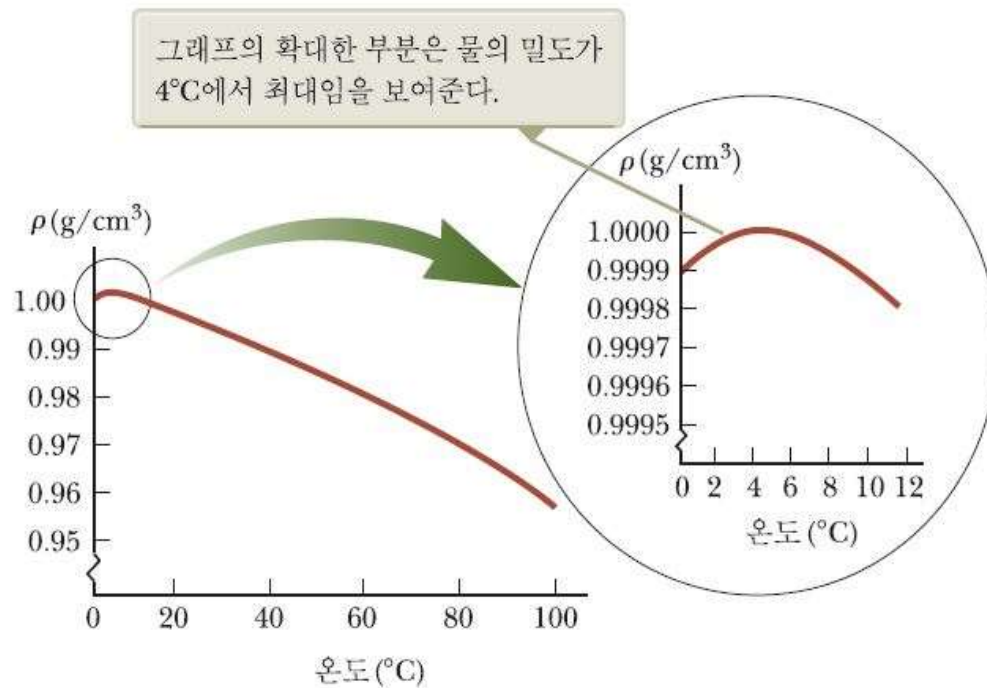
$$\Delta T = \frac{5.0 \times 10^{-6} \text{ m}}{\left[ 19 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right] (0.030 \text{ m}) + \left[ 11 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right] (0.010 \text{ m})} = 7.4 \text{°C}$$

$$\Delta T = 27 \text{°C} + 7.4 \text{°C} = \boxed{34 \text{°C}}$$



## ◆ 물의 비정상적인 성질 (The Unusual Behavior of Water)

액체는 일반적으로 온도가 높아지면 부피가 증가하며 액체의 평균 부피 팽창 계수는 보통 고체보다 10배 정도 크다.

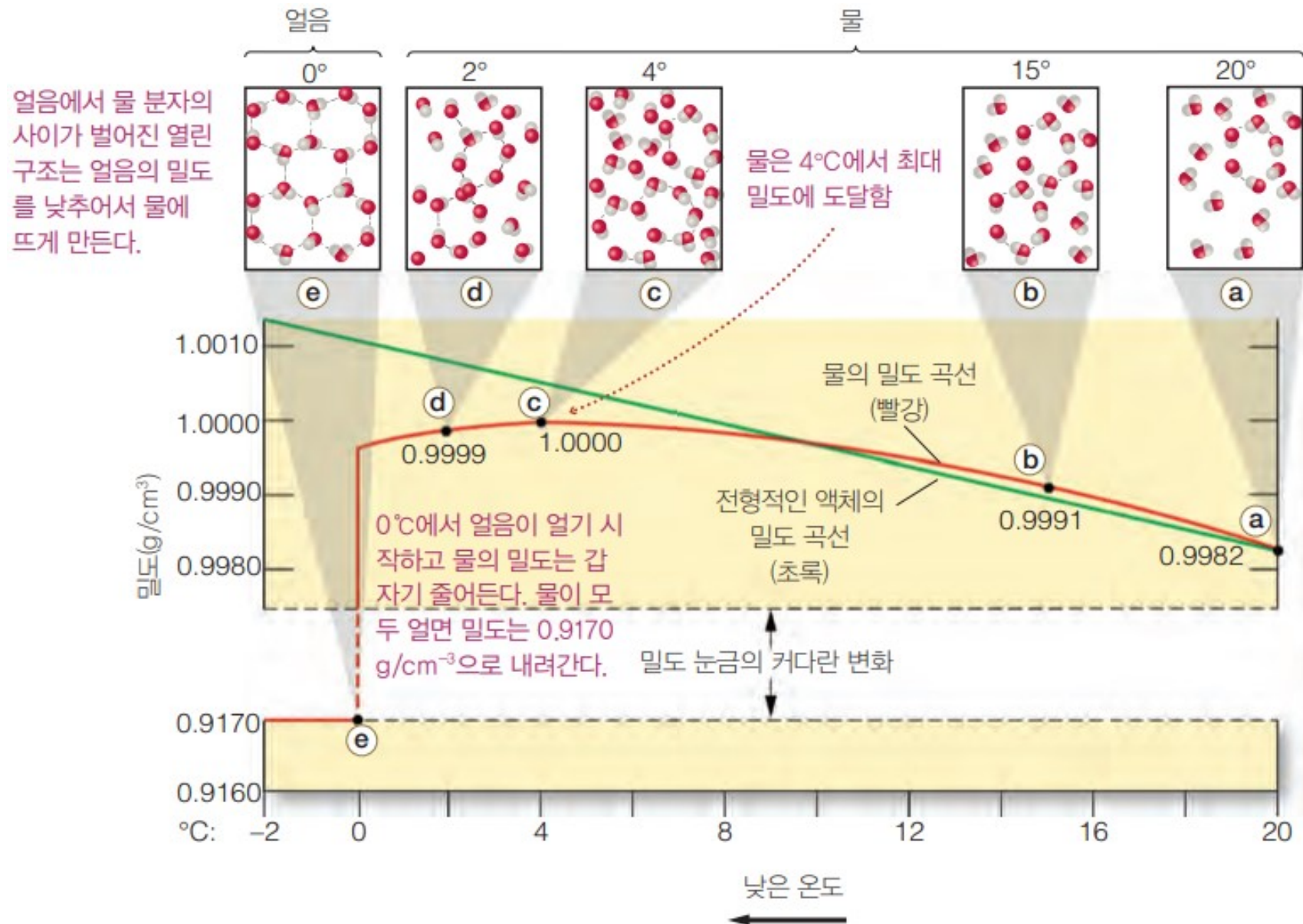


온도가 0°C에서 4°C로 증가할 때, 물은 수축하여 밀도가 증가한다. 4°C 이상에서는, 물은 온도가 올라감에 따라 부피가 팽창하며 밀도가 낮아진다. 그러므로 물의 밀도는 4°C일 때 최댓값인 1.000g/cm<sup>3</sup>에 다다르게 된다.

연못의 물이 표면부터 어는 이유를 설명할 수 있다.



# 온도와 얼음의 형성의 함수 인 물의 밀도



# 온도에 따른 물의 부피 및 밀도 변화

## ▶ 0°C 이하의 얼음

• 온도가 높아질수록 부피 증가(밀도 감소) → 온도 증가에 따라 분자 운동이 활발해져 분자 간 거리가 멀어짐

## ▶ 0°C

• 얼음에서 물로 상태 변화하면서 부피 감소(밀도 증가) → 수소 결합의 일부가 끊어지면서 빈 공간이 감소하여 부피가 감소함

## ▶ 0 ~ 4°C

• 수소 결합이 끊어지면서 부피 감소(밀도 증가) → 온도 증가에 따른 부피 증가보다는 수소 결합이 끊어지면서 생기는 부피 감소 효과가 더 큼

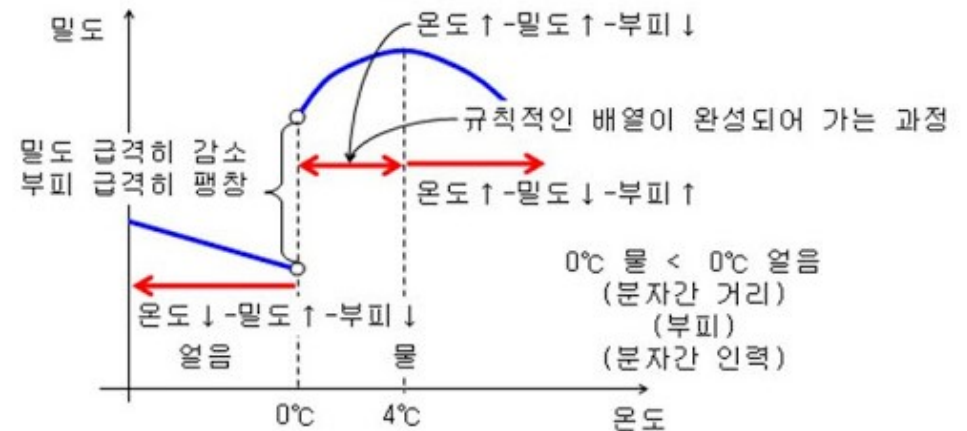
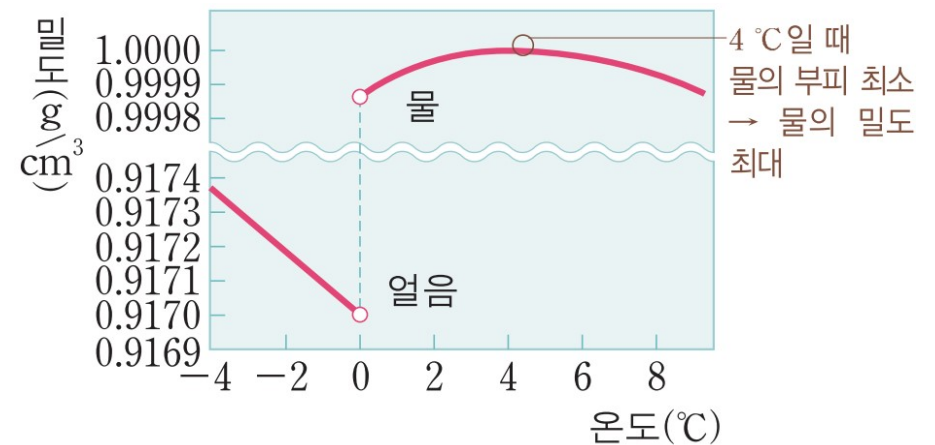
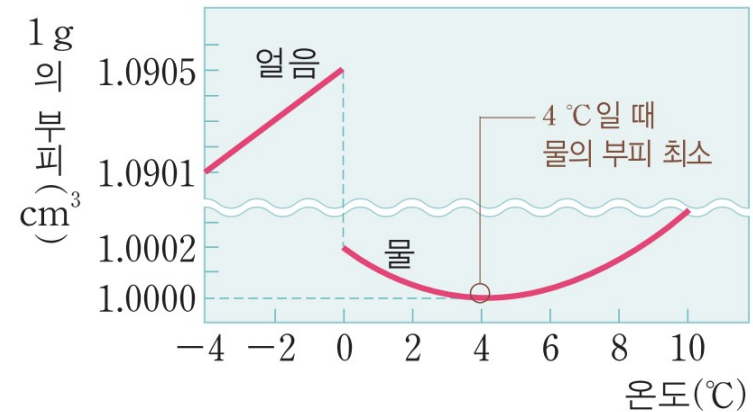
## ▶ 4°C 이상

• 온도가 높아질수록 부피 증가(밀도 감소) → 온도 증가에 따라 분자 운동이 활발해져 분자 간 거리가 멀어짐



## < 얼음과 물의 밀도 차이에 의한 현상 >

• 겨울철에 호수나 강물이 얼어서 생긴 얼음이 표면에 떠 있기 때문에 얼음 밑의 물이 얼지 않고 액체 상태로 존재하여 수중 생태계가 유지됨



## 5 이상 기체의 거시적 기술

(Macroscopic Description of an Ideal Gas)

### 이상 기체(ideal gas) 모형:

1. 기체의 분자 수가 많고 분자 사이의 거리는 분자의 크기보다 훨씬 크다.
2. 각 분자들은 뉴턴의 운동 법칙을 따르지만 분자들은 무작위로 움직인다.
3. 탄성 충돌이 일어나는 동안 분자 사이에는 근거리 힘만 작용한다.
4. 분자들은 용기의 벽과 탄성 충돌을 한다.
5. 여기서 생각하는 기체는 순수한 단일 물질이다.

곧, 모든 분자들이 동일하다.

가벼운 기체가 아주 낮은 압력 하에 있는(혹은 낮은 밀도) 경우 이상 기체로서 근사할 수 있다.

몰(mole): 주어진 부피에 들어 있는 기체의 양을 나타내는 단위

1몰의 물질은 아보가드로수(Avogadro's number)  $N_A = 6.022 \times 10^{23}$  만큼의 구성 물질(원자나 분자)을 갖고 있다는 것을 의미한다.

$$n = \frac{m}{M} \quad (M: \text{물질의 분자량})$$

- $M$  is the molar mass of the substance.
  - Can be obtained from the periodic table
  - Is the atomic mass expressed in grams/mole
    - Example: He has mass of 4.00 u so  $M = 4.00 \text{ g/mol}$
- $m$  is the mass of the sample.
- $n$  is the number of moles.

고립된 기체 계에서,



기체의 온도가 일정할 때 압력은 부피에 반비례한다(보일(Boyle)의 법칙).

$$P_1 V_1 = P_2 V_2$$

기체의 압력이 일정할 때 부피는 온도에 정비례한다(샤를(Charle)의 법칙).

$$\frac{V_1}{T_1} = \frac{V_2}{T_2}$$

기체의 부피가 일정할 때 압력은 온도에 정비례한다(게이-뤼삭(Gay-Lussac)의 법칙).

$$\frac{P_1}{T_1} = \frac{P_2}{T_2}$$



## 이상 기체의 상태 방정식

ideal gas law

$$PV = nRT$$

P, V, T : 이상기체의 열역학 변수(Thermodynamic variable)

$$R = 8.314 J / mol \cdot K \quad (\text{기체 상수})$$

$$R = 0.08206 L \cdot atm / mol \cdot K$$

1 mole of any gas at atmospheric pressure and at 0° C is 22.4 L

이상 기체의 상태 방정식을 약간 변형하면,

$$PV = nRT = \frac{N}{N_A} RT$$

$$PV = Nk_B T$$

$$k_B = \frac{R}{N_A} = 1.38 \times 10^{-23} J / K \quad (\text{볼츠만 상수})$$

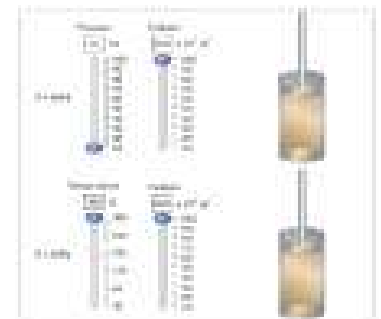
샴페인 병을 흔든다음 마개를 열었을 때의 모습.  
액체가 입구로 부터 뿜어져 나온다.



병의 마개를 열면  
압력은 낮아지고,  
액체 부피가 팽창하  
여 액체를 뿜어낸다.

### 19.12: Characteristics of an Ideal Gas

In this animation, an ideal gas is confined to a cylinder whose volume can be varied by means of a movable piston. Explore the top scenario where pressure and volume are variable for a constant T, and the bottom situation where pressure is constant and you can adjust T and volume.



### 예제 18.4 스프레이 캔 데우기

스프레이 캔에 기체가 들어 있다. 캔 내부의 압력은 대기압의 두 배(202 kPa)이고, 부피는 125.00 cm<sup>3</sup>이며 온도는 22 °C이다. 이 캔을 불 속에 던져 넣는다. (주의: 이 실험은 매우 위험하므로 실제로 하지는 말라.) 캔 내부 기체의 온도가 195 °C에 도달할 때, 캔 내부의 압력을 구하라. 캔의 부피 변화는 무시한다.

풀이

$$PV = nRT \Rightarrow \frac{PV}{T} = nR$$

$$\frac{P_i V_i}{T_i} = \frac{P_f V_f}{T_f} \Rightarrow \frac{P_i}{T_i} = \frac{P_f}{T_f}$$

$$P_f = \left( \frac{T_f}{T_i} \right) P_i = \left( \frac{468 \text{ K}}{295 \text{ K}} \right) (202 \text{ kPa}) = \boxed{320 \text{ kPa}}$$

문제

온도가 올라감에 따라 열팽창으로 인한 강철 스프레이 캔의 부피 변화를 포함한다고 가정해 보자. 이것이 나중 압력에 대한 답을 크게 변화시키는가?

풀이

$$\begin{aligned} \Delta V &= \beta V_i \Delta T = 3\alpha V_i \Delta T \\ &= 3 \left[ 11 \times 10^{-6} (\text{°C})^{-1} \right] (125.00 \text{ cm}^3) (173 \text{ °C}) = 0.71 \text{ cm}^3 \end{aligned}$$

$$P_f = \left( \frac{T_f}{T_i} \right) \left( \frac{V_i}{V_f} \right) P_i \quad \frac{V_i}{V_f} = \frac{125.00 \text{ cm}^3}{(125.00 \text{ cm}^3 + 0.71 \text{ cm}^3)} = 0.994 = 99.4\%$$