

2-3장. 열역학 제 1법칙 (The First Law of Thermodynamics)

1 열과 내부 에너지

2 비열과 열량 측정법

3 잠열

4 열역학적 과정에서의 일과 열

5 열역학 제1법칙

6 열역학 제1법칙의 응용

7 열과정에서 에너지 전달 메커니즘




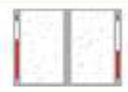

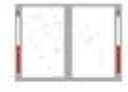




Movies

Thermodynamics

- [Vectors](#)
- [Kinematics](#)
- [Forces](#)
- [Work and Energy](#)
- [Linear Momentum](#)
- [Rotational Mechanics](#)
- [SHM and Waves](#)
- [Thermodynamics](#)

Thermodynamics

Topic	Title/Description	Screen Shot	File Name
Basic Concepts of Thermodynamics	Basic Concepts of Thermodynamics: Internal Energy		TDM03AN1.MOV
	Basic Concepts of Thermodynamics: Thermal Energy		TDM03AN2.MOV
	Basic Concepts of Thermodynamics: Heat		TDM03AN3.MOV
	Basic Concepts of Thermodynamics: Thermal Equilibrium		TDM03AN4.MOV
	Basic Concepts of Thermodynamics: Temperature		TDM03AN5.MOV
	Basic Concepts of Thermodynamics: Heat Capacity		TDM03AN6.MOV
	Basic Concepts of Thermodynamics: Absolute Zero		TDM03AN7.MOV
The First Law of Thermodynamics: Conservation of Energy in Thermal Systems	The Conversion of Work into Thermal Energy		TDM06AN1.MOV

1 열과 내부 에너지

(Heat and Internal Energy)



줄

James Prescott Joule; 1818~1889

영국의 물리학자

내부 에너지 (internal energy):

계의 질량 중심에 대해 정지해 있는 기준계에서 볼 때 미시적 요소(원자와 분자)와 관련된 계의 모든 에너지를 의미함.

- Random translational motion
- Rotational motion
- Vibrational motion

Internal energy also includes potential energy between molecules.

열 (heat): 계와 주위 환경 사이의 온도 차이 때문에 계의 경계를 넘나드는 에너지의 전달을 뜻함.

열이라는 용어는 접촉과 같은 방법에 의해 전달되는 에너지의 양을 표현함.

- 계에 (또는 계가) 한 일은 계와 주위 환경 사이의 에너지 전달 척도인 반면, 역학적 에너지(운동 또는 위치 에너지)는 운동의 결과와 계의 위치에 의존한다.
- 마찬가지로 온도 차이가 있지만 에너지가 전달되지 않을 때에는 열이란 용어를 사용하는 것이 의미가 없다.
열과 일 둘 다 계의 에너지를 변화시키는 방법이다.

열의 단위(Units of Heat)

1 cal: 1g의 물의 온도를 14.5°C에서 15.5°C로 변하게 하는데 필요한 열량.

1 Cal: 음식물의 화학적 에너지를 나타내는 경우.
실제로는 1Cal = 1kcal이다.

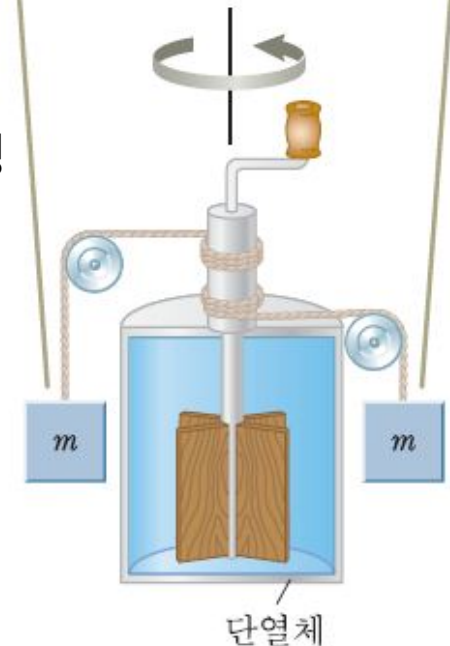
열의 일당량(The Mechanical Equivalent of Heat)

$\Delta E_{\text{int}} = W + T_{\text{MW}}$ 역학적 에너지의 감소와 내부 에너지 증가의 동등성

역학적인 계에 마찰력이 작용하면 역학적 에너지의 일부가 상실된다. 즉, 비보존력이 존재하면 역학적 에너지는 보존되지 않는다. 여러 가지 실험 결과에 의하면 이렇게 상실된 역학적 에너지는 없어지는 것이 아니라, 내부 에너지로 전환된다.

$$1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$$

낙하하는 추가 날개를 회전시켜 물의 온도를 증가시킨다.



예제 19.1 힘들게 체중 줄이는 방법

어떤 학생이 2 000(식품) Cal의 저녁을 먹는다. 이 학생이 같은 양의 일을 하기 위하여 체육관에서 질량 50.0 kg의 역기를 들어 올린다고 하자. 2 000 Cal의 에너지를 소모하기 위하여 역기를 몇 번 들어야 하는가? 매번 역기를 2.00 m 높이로 들어 올리며, 바닥에 역기를 내릴 때는 일을 하지 않는다고 가정한다.

풀이 $\Delta U_{\text{total}} = W_{\text{total}} \quad \Delta U = mgh$

$$\Delta U_{\text{total}} = nmgh$$

$$nmgh = W_{\text{total}}$$

$$n = \frac{W_{\text{total}}}{mgh}$$

$$\begin{aligned} n &= \frac{2000 \text{ Cal}}{(50.0 \text{ kg})(9.80 \text{ m/s}^2)(2.00 \text{ m})} \left(\frac{1.00 \times 10^3 \text{ cal}}{\text{Calorie}} \right) \left(\frac{4.186 \text{ J}}{1 \text{ cal}} \right) \\ &= \boxed{8.54 \times 10^3 \text{ times}} \end{aligned}$$

2 비열과 열량 측정법

(Specific Heat and Calorimetry)

주어진 물질의 양을 일정한 온도만큼 올리는 데 필요한 열 에너지의 양은 물질에 따라 다르다.

열용량(heat capacity) C :

물질의 온도를 1°C 올리는 데 필요한 열 에너지의 양

$$Q = C\Delta T$$

비열(specific heat) c :

단위 질량당의 열용량

$$c \equiv \frac{Q}{m\Delta T}$$

$$\therefore Q = mc\Delta T$$

물 질	비열 c (J/kg · °C)	물 질	비열 c (J/kg · °C)
단원자 고체		다른 고체	
알루미늄	900	황동(놋쇠)	380
베릴륨	1,830	유 리	837
카드뮴	230	얼음(-5°C)	2,090
구 리	387	대리석	860
게르마늄	322	나 무	1,700
금	129	액체	
철	448	에틸 알코올	2,400
납	128	수 은	140
규 소	703	물(15°C)	4,186
은	234	기체	
		수증기(100°C)	2,010

Examples

potato in microwave: bicycle pump:

$$\Delta E_{\text{int}} = T_{\text{ER}} = mc\Delta T \quad \Delta E_{\text{int}} = W = mc\Delta T$$

Some Specific Heat Values

TABLE 20.1 *Specific Heats of Some Substances at 25°C and Atmospheric Pressure*

Substance	Specific Heat (J/kg · °C)	Substance	Specific Heat (J/kg · °C)
<i>Elemental solids</i>		<i>Other solids</i>	
Aluminum	900	Brass	380
Beryllium	1 830	Glass	837
Cadmium	230	Ice (−5°C)	2 090
Copper	387	Marble	860
Germanium	322	Wood	1 700
Gold	129	<i>Liquids</i>	
Iron	448	Alcohol (ethyl)	2 400
Lead	128	Mercury	140
Silicon	703	Water (15°C)	4 186
Silver	234	<i>Gas</i>	
		Steam (100°C)	2 010

Note: To convert values to units of cal/g · °C, divide by 4 186.

Internal Energy Revisited

The change in internal energy of a system can be identified with $m c \Delta t$.

- If we ignore any thermal expansion or contraction of the system.

Then $\Delta E_{\text{int}} = Q$

The internal energy of a system can be changed by transferring energy into the system by any mechanism.

- This also indicates temperature is related to the energy of the molecules of a system.

Specific Heat Varies With Temperature

Technically, the specific heat varies with temperature.

The corrected equation is $Q = m \int_{T_i}^{T_f} c dT$.

However, if the temperature intervals are not too large, the variation can be ignored and c can be treated as a constant.

- For example, for water there is only about a 1% variation between 0° and 100°C.
- These variations will be neglected unless otherwise stated.

열량 측정법(Calorimetry)

for measuring specific heat involves heating a material
측정하고자 하는 물체를 어떤 온도 T_x 로 가열
하여, 질량과 온도($T_w < T_x$)를 알고 있는 물이
담겨 있는 용기 속에 넣어서 열평형에 도달시
킨 후 온도를 측정한다.

→ 열량계(calorimeter)

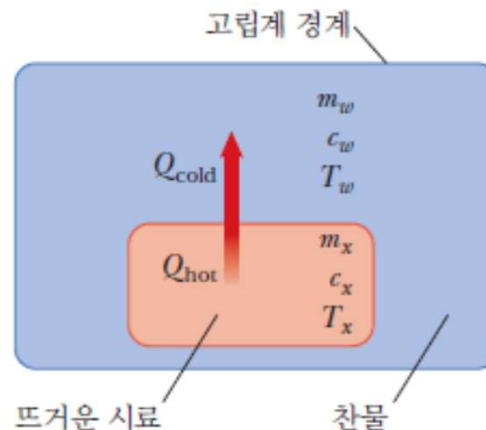
The system of the sample and the water is isolated.
Conservation of energy requires that the amount of energy
that leaves the sample equals the amount of energy that
enters the water

✓ 고체의 비열 측정

$$Q_{cold} = -Q_{hot}$$

$$m_w c_w (T_f - T_w) = -m_x c_x (T_f - T_x)$$

$$c_x = \frac{m_w c_w (T_f - T_w)}{m_x (T_x - T_f)}$$



물 질	비열 c	
	$\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$	$\text{cal/g} \cdot ^\circ\text{C}$
다른 고체		
황 동(놋쇠)	380	0.092
유 리	837	0.200
얼음(-5°C)	2090	0.50
대리석	860	0.21
나 무	1700	0.41
액체		
에틸알코올	2400	0.58
수 은	140	0.033
물(15°C)	4186	1.00
기체		
수증기(100°C)	2010	0.48

< Sign Conventions>

If the temperature increases:

- Q and ΔT are positive
- Energy transfers into the system

If the temperature decreases:

- Q and ΔT are negative
- Energy transfers out of the system

The negative sign in the calorimetry equation
is critical for consistency with the sign
convention.

Calorimetry

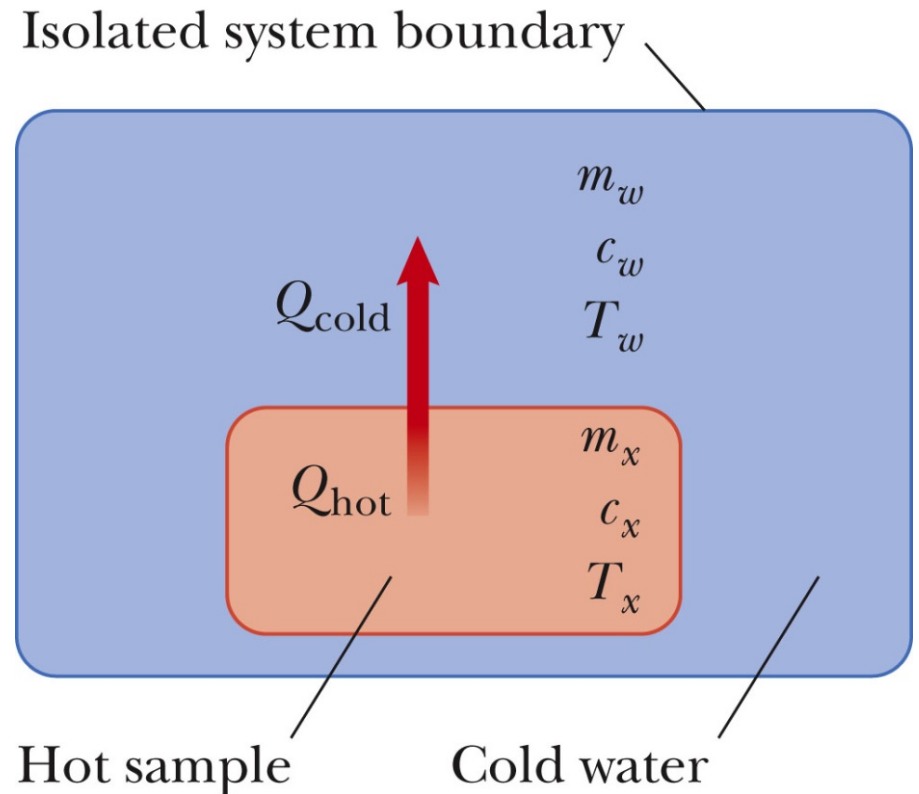
T_f is the final temperature after the system comes to equilibrium.

The subscript w represent values for water and x represents the values for the sample whose specific heat is to be determined.

Since each $Q = mc\Delta T$, the calorimetry equation can be expressed as

$$m_w c_w (T_f - T_w) = -m_x c_x (T_f - T_x)$$

- This can be solved for the unknown specific heat.
- Technically, the mass of the container should be included, but if $m_w \gg m_{\text{container}}$ it can be neglected.



$$Q_{\text{cold}} = -Q_{\text{hot}}$$

$$c_x = \frac{m_w c_w (T_f - T_w)}{m_x (T_x - T_f)}$$

예제 19.2 카우보이 놀이

한 카우보이가 은 총알을 200 m/s의 속력으로 술집의 소나무 벽에 쏘았다. 충격에 의하여 생기는 내부 에너지 모두 총알에 남아 있다고 한다면 총알의 온도는 얼마나 변하는가?

풀이

$$\Delta K + \Delta E_{\text{int}} = 0$$

$$\Delta E_{\text{int}} = mc\Delta T$$

$$\left(0 - \frac{1}{2}mv^2\right) + mc\Delta T = 0$$

$$\Delta T = \frac{\frac{1}{2}mv^2}{mc} = \frac{v^2}{2c} = \frac{(200 \text{ m/s})^2}{2(234 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})} = \boxed{85.5^\circ\text{C}}$$

문제

만약 카우보이가 은 총알이 떨어져 납 총알을 벽에 같은 속력으로 쏘았다고 하자. 총알의 온도 변화는 더 큰가, 작은가?

풀이

$$\Delta T = \frac{v^2}{2c} = \frac{(200 \text{ m/s})^2}{2(128 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})} = 156^\circ\text{C}$$

예제 19.3 금속 덩어리 식히기

0.050 0 kg의 금속 덩어리를 200.0 8 °C 로 가열하였다가 처음 온도가 20.0 8 °C 인 0.400 kg의 물 열량계 속에 담갔다. 이 혼합계의 나중 평형 온도는 22.4 8 °C 이다. 금속 덩어리의 비열을 구하라.

풀이

$$c_x = \frac{m_w c_w (T_f - T_w)}{m_x (T_x - T_f)}$$

$$c_x = \frac{(0.400 \text{ kg})(4186 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(22.4^\circ\text{C} - 20.0^\circ\text{C})}{(0.050 \dots 0 \text{ kg})(200.0^\circ\text{C} - 22.4^\circ\text{C})} = \boxed{453 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C}}$$

문제 어떤 물질의 비열을 알기 위하여 실험실에서 이와 같은 방법으로 실험을 한다고 가정하자. 비열 c_x 의 전반적인 불확정도를 줄이기 원한다. 이 예제의 주어진 데이터 중에서 불확정도를 줄이기 위한 가장 효과적인 방법으로 어느 값을 바꾸면 되는가?

답 실험적 불확정도는 물의 온도차가 2.4 라는 것이다. 불확정도의 전파 규칙으로부터 8%의 불확정도를 가지므로 가장 좋은 방법은 물의 양을 줄이는 것이다.

$$\frac{0.1^\circ\text{C}}{2.4^\circ\text{C}} = 0.04 = 4\%$$

$$\Rightarrow \text{uncertainty in difference} = 4\% + 4\% = 8\%$$

물질	비열 c (J/kg · °C)
구리	387
저마늄	322
금	129
철	448
납	128
규소	703

3 잠열 (숨은 열) (Latent Heat)

상변화(phase change):

물질의 물리적 상이 한 상태에서 다른 상태로 바뀌는 변화

잠열(latent heat):

단위 질량당 물질의 상을 바꾸기 위해서 필요한 에너지

$$L \equiv \frac{Q}{\Delta m}, \quad Q = L \Delta m \quad \Delta m = m_f - m_i$$

융해열(latent heat of fusion) L_f :

고체에서 액체로 상변화를 일으키는 데 필요한 잠열

기화열(latent heat of vaporization) L_v :

액체에서 기체로 상변화를 일으키는 데 필요한 잠열



Phase Changes

A **phase change** is when a substance changes from one form to another.

- Two common phase changes are
 - Solid to liquid (melting)
 - Liquid to gas (boiling)

During a phase change, there is no change in temperature of the substance.

- For example, in boiling the increase in internal energy is represented by the breaking of the bonds between molecules, giving the molecules of the gas a higher intermolecular potential energy.

Latent Heat

The *latent heat of fusion* is used when the phase change is from solid to liquid.

The *latent heat of vaporization* is used when the phase change is from liquid to gas.

If energy is enters the system:

- This will result in melting or vaporization
- The amount of the higher-phase material will increase
- Δm and Q are positive

If energy is extracted from the system:

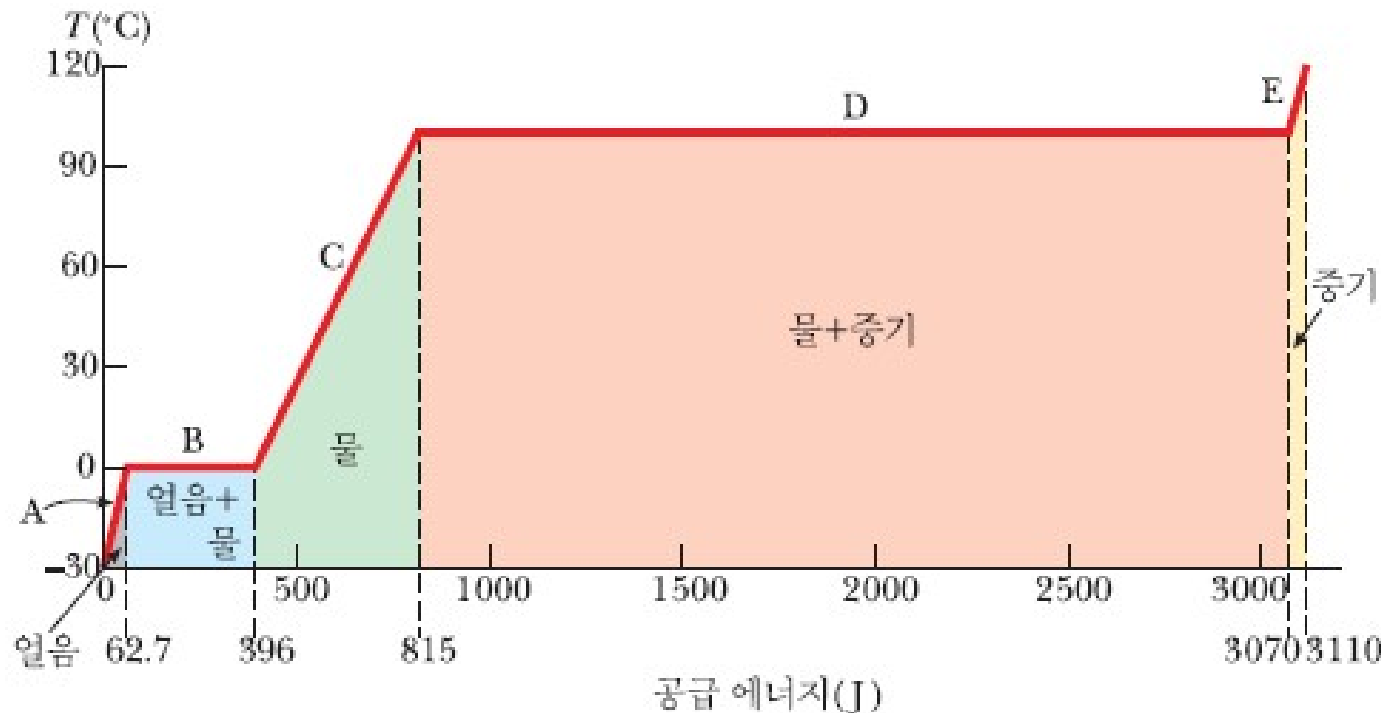
- This will result in freezing or condensation
- The amount of the higher-phase material will decrease
- Δm and Q are negative

Sample Latent Heat Values

TABLE 20.2 *Latent Heats of Fusion and Vaporization*

Substance	Melting Point (°C)	Latent Heat of Fusion (J/kg)	Boiling Point (°C)	Latent Heat of Vaporization (J/kg)
Helium	−269.65	5.23×10^3	−268.93	2.09×10^4
Oxygen	−218.79	1.38×10^4	−182.97	2.13×10^5
Nitrogen	−209.97	2.55×10^4	−195.81	2.01×10^5
Ethyl alcohol	−114	1.04×10^5	78	8.54×10^5
Water	0.00	3.33×10^5	100.00	2.26×10^6
Sulfur	119	3.81×10^4	444.60	3.26×10^5
Lead	327.3	2.45×10^4	1 750	8.70×10^5
Aluminum	660	3.97×10^5	2 450	1.14×10^7
Silver	960.80	8.82×10^4	2 193	2.33×10^6
Gold	1 063.00	6.44×10^4	2 660	1.58×10^6
Copper	1 083	1.34×10^5	1 187	5.06×10^6

-30.0°C에서 1.00g의 얼음덩이를 120.0°C의 수증기로 변환시키는 데 필요한 열 에너지



$$\text{A구간: } Q_A = m_i c_i \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(2090 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(30.0^\circ\text{C}) = 62.7 \text{ J}$$

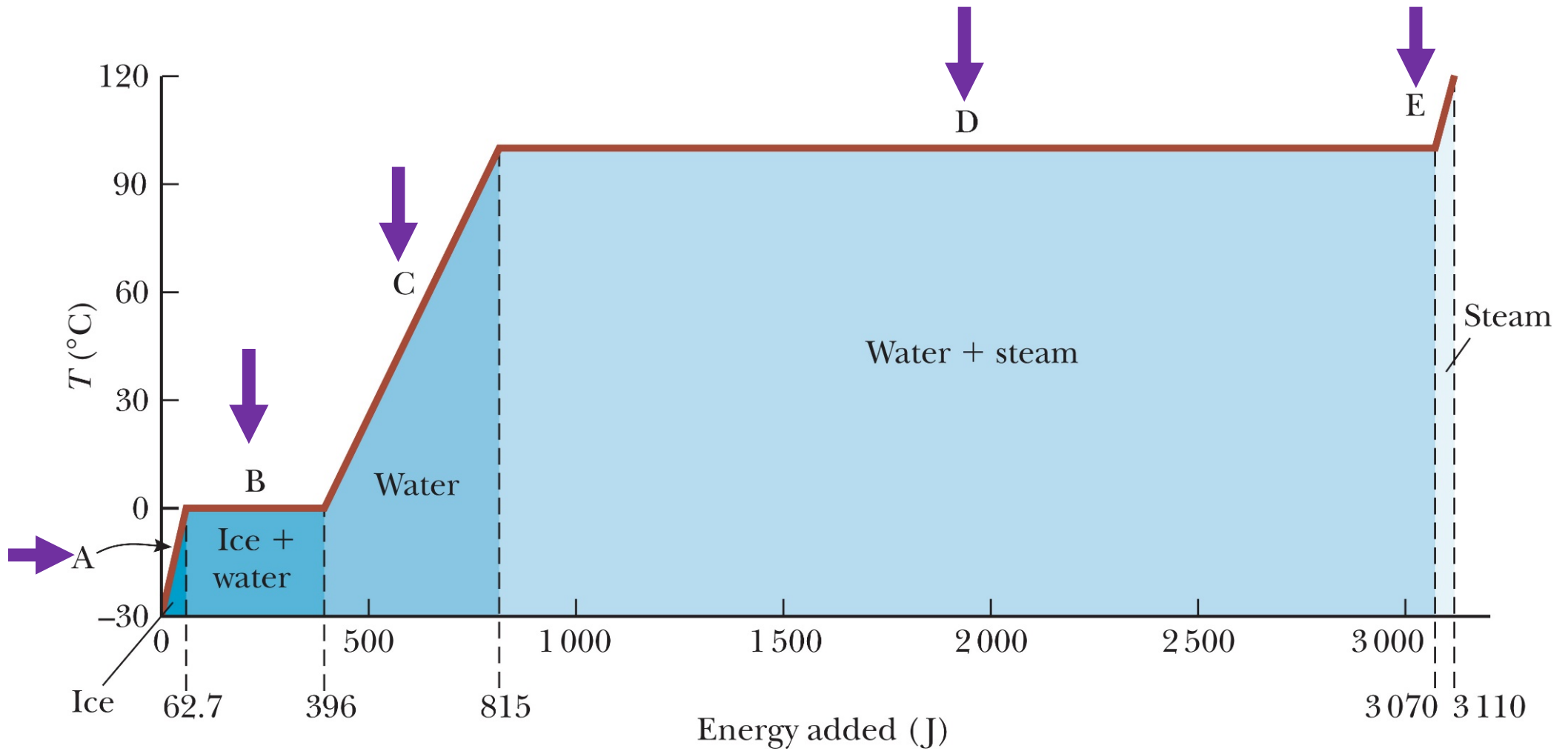
$$\text{B구간: } Q_B = L_f \Delta m_w = L_f m_i = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(3.33 \times 10^5 \text{ J/kg}) = 333 \text{ J}$$

$$\text{C구간: } Q_C = m_w c_w \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(4.19 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(100.0^\circ\text{C}) = 419 \text{ J}$$

$$\text{D구간: } Q_D = L_v \Delta m_s = L_v m_w = (2.26 \times 10^6 \text{ J/kg})(1.00 \times 10^{-3} \text{ kg}) = 2.26 \times 10^3 \text{ J}$$

$$\text{E구간: } Q_E = m_s c_s \Delta T = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(2.01 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(20.0^\circ\text{C}) = 40.2 \text{ J}$$

The temperature is increasing from 100° C to 120° C



$$Q_{\text{total}} = 62.7 \text{ J} + 333 \text{ J} + 419 \text{ J} + 2.26 \times 10^3 \text{ J} + 40.2 \text{ J} = 3.11 \times 10^3 \text{ J}$$

예제 19.4 수증기의 응축

100g의 유리 용기에 담겨 있는 200g의 물을 20.0°C에서 50.0°C까지 데우는 데 필요한 130°C에서의 증기 질량을 구하라.

풀이 (1) $Q_{cold} = -Q_{hot}$

$$Q_{hot} = Q_1 + Q_2 + Q_3 \\ = -m_s [6.03 \times 10^4 + 2.26 \times 10^6 + 2.09 \times 10^5]$$

130°C의 수증기 → 100°C의 수증기

$$Q_1 = m_s c_s \Delta T = m_s (2.01 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(-30.0^\circ\text{C}) \\ = -m_s (6.03 \times 10^4 \text{ J/Kg})$$

(2) $Q_{hot} = -m_s (2.53 \times 10^6 \text{ J/kg})$

20.0°C의 물과 유리 → 50°C

$$Q_{cold} = (0.200)(4.19 \times 10^3)(30.0)\text{J} \\ + (0.100)(837)(30.0)\text{J}$$

수증기 → 100°C의 물

$$Q_2 = -m_s (2.26 \times 10^6 \text{ J/kg})$$

(3) $Q_{cold} = 2.77 \times 10^4 \text{ J}$

100°C의 물 → 50°C의 물

$$Q_3 = m_s c_w \Delta T = m_s (4.19 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot ^\circ\text{C})(-50.0^\circ\text{C}) \\ = -m_s (2.09 \times 10^5 \text{ J/Kg})$$

$$2.77 \times 10^4 \text{ J} = -[-m_s (2.53 \times 10^6 \text{ J/kg})]$$

$$\therefore m_s = 1.09 \times 10^{-2} \text{ kg} = 10.9 \text{ g}$$

4 열역학적 과정에서의 일과 열 (Work and Heat in Thermodynamic Processes)

✓ 계의 상태 변수(state variable) :

계의 상태는 압력, 부피, 온도 및 내부 에너지와 같은 변수(State variables) 들로 기술된다.
Pressure, temperature, volume, internal energy
 계의 상태를 기술하는 데 필요한 거시적인 변수의 수는 그 계의 성질에 따라 다르다.

✓ 준정적 상태(quasistatically state) :

아주 천천히 압축해서 모든 순간에 열역학적인 평형 상태를 유지하는 상태

transfer variables : **Heat and work**

Transfer variable can be **positive or negative**, depending on whether energy is entering or leaving the system.

✓ 기체에 한 일(Work) :

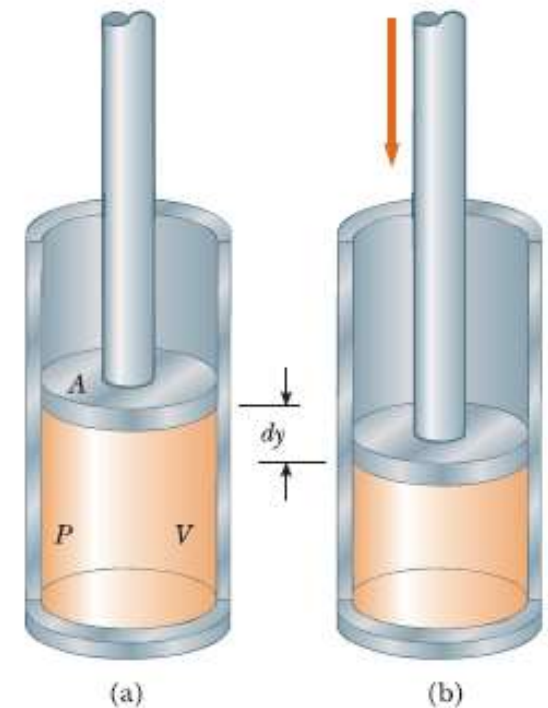
$$dW = \mathbf{F} \cdot d\mathbf{r} = -F\mathbf{j} \cdot dy\mathbf{j} = -Fdy = -PA dy$$

$$dW = -PdV$$

기체에 한 일 ▶ $W = -\int_{v_i}^{v_f} PdV$

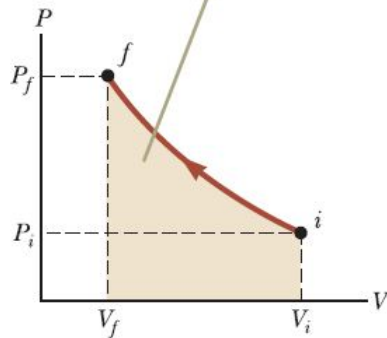
Interpreting $dW = -P dV$

- If the gas is compressed, dV is negative and the work done on the gas is positive.
- If the gas expands, dV is positive and the work done on the gas is negative.
- If the volume remains constant, the work done is zero.



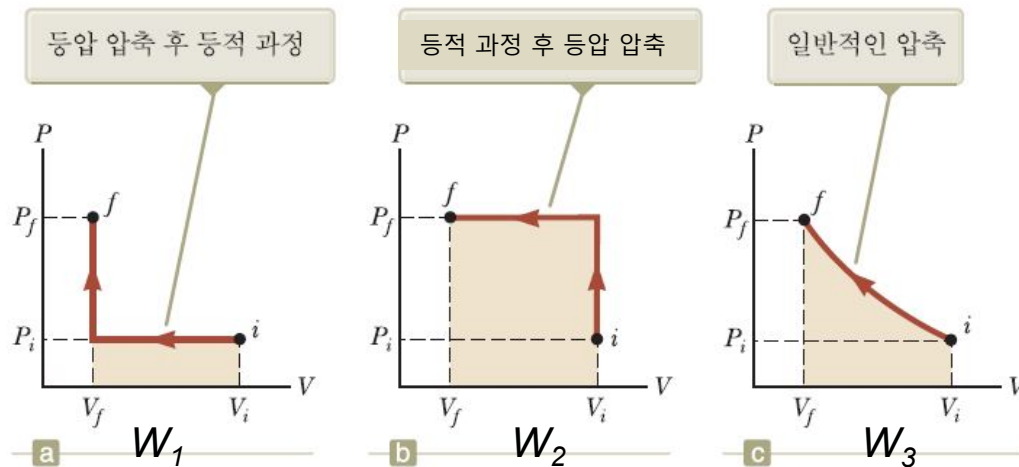
PV Diagrams

기체에 한 일은 PV 곡선 아래 넓이의 음의 값과 같다. 여기서 부피는 감소하므로 넓이는 음이어서, 양(+)의 일을 하게 된다.



$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P dV$$

→ 기체의 처음 상태로부터 나중 상태까지 일어나는 준정적 과정에서 기체에 한 일은 PV 도표에서 상태와 나중 상태 사이의 곡선 아래의 면적과 크기는 같고 부호는 반대이다.



$$W_1 = -P_i(V_f - V_i)$$

$$W_2 = -P_f(V_f - V_i)$$

$$W_3 = -\int_{V_i}^{V_f} P dV$$

\uparrow
 $P(V)$

→ 기체에 한 일은 두 상태 사이의 경로에 따라 다르다.

일처럼 열 에너지의 전달은 계의 처음과 나중 그리고 중간 상태에 따라 달라진다. 열 에너지와 일은 경로에 따라 다르므로, 열역학적 과정에서의 처음 상태와 나중 상태로만 결정되지는 않는다.

5 열역학 제1 법칙

(The First Law of Thermodynamics)

에너지 보존 법칙의 특수한 경우로서, 계에서 유일하게 내부 에너지의 변화만 일어나며 에너지는 열과 일에 의해서만 전달되는 경우,

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W$$

internal energy changes heat work

units of measure of energy
열역학 제1법칙

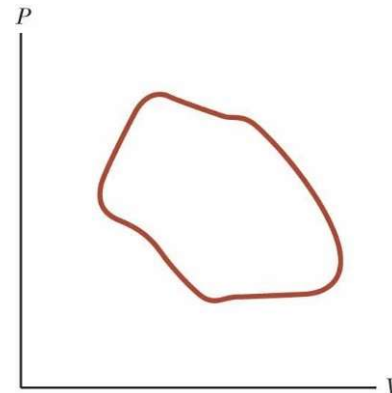
• 주위와 상호 작용이 없는 고립계: $Q = W = 0 \rightarrow \Delta E_{\text{int}} = 0$

The internal energy of an isolated system remains constant.

• 계가 시작한 상태와 끝이 동일한 상태로 돌아오는 순환 과정(cyclic process):

PV diagram

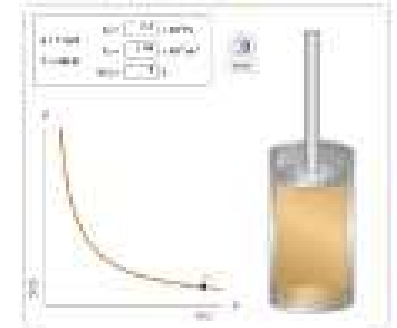
$$\Delta E_{\text{int}} = 0 \rightarrow Q = -W$$



Active Figures

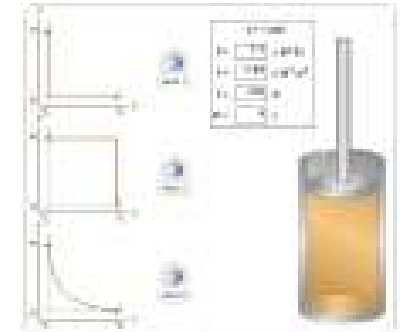
20.4: Work Done on a Gas

In this animation, you can compress the gas in the cylinder and see the resulting graph of work done on the gas. The work done on the gas equals the negative of the area under the PV curve.



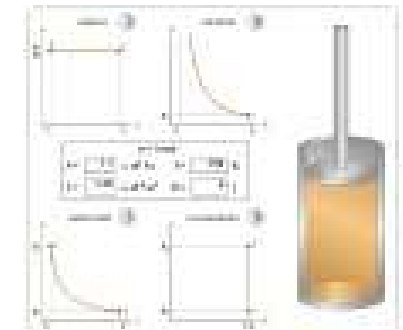
20.5: Work Done on a Gas for Different PV Processes

In this animation, you can choose one of the three paths and see the movement of the piston and of a point on the adjacent PV diagram. The work done on the gas equals the negative of the area under the curve.



20.7: Applications of the First Law of Thermodynamics

Choose one of the four thermodynamic processes in this animation and see the movement of the piston and a point on the adjacent PV diagram.



6 열역학 제1 법칙의 응용

(Some Applications of the First Law of Thermodynamics)

- ▷ 단열 과정(adiabatic process): $Q=0$
No heat exchanged

$$\Delta E_{\text{int}} = W$$

- ▷ 단열 자유 팽창(adiabatic free expansion): $Q=0$ & $W=0$

$$\Delta E_{\text{int}} = 0$$

- ▷ 등압 과정(isobaric process): $\Delta P=0$ Constant pressure

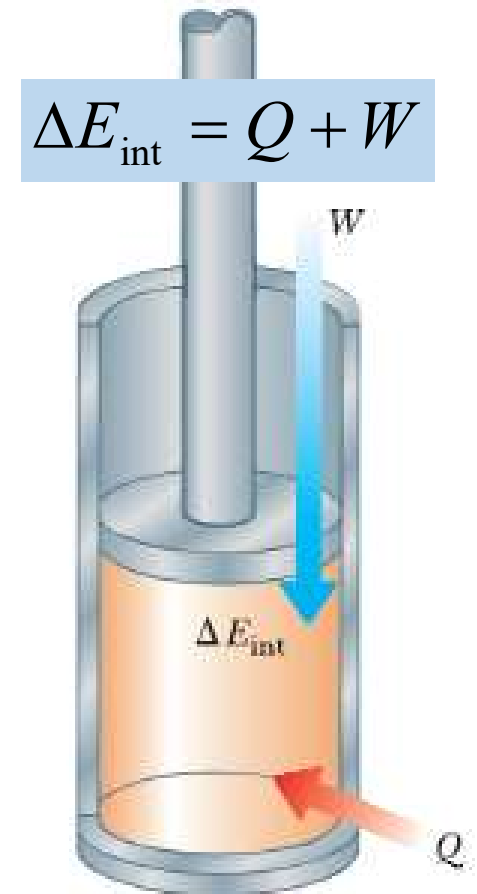
$$W = -P(V_f - V_i)$$

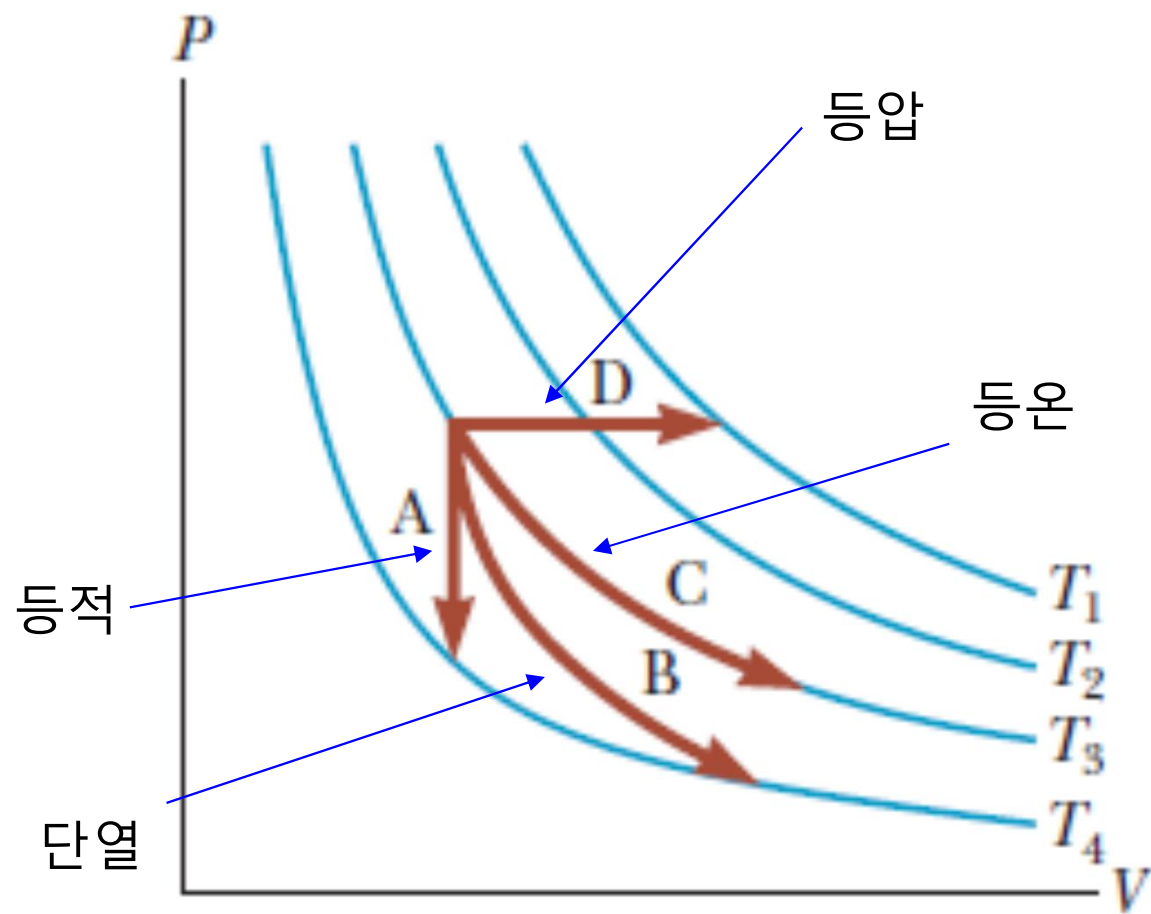
- ▷ 등적 과정(isovolumetric process): $\Delta V=0 \rightarrow \Delta W=0$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q$$

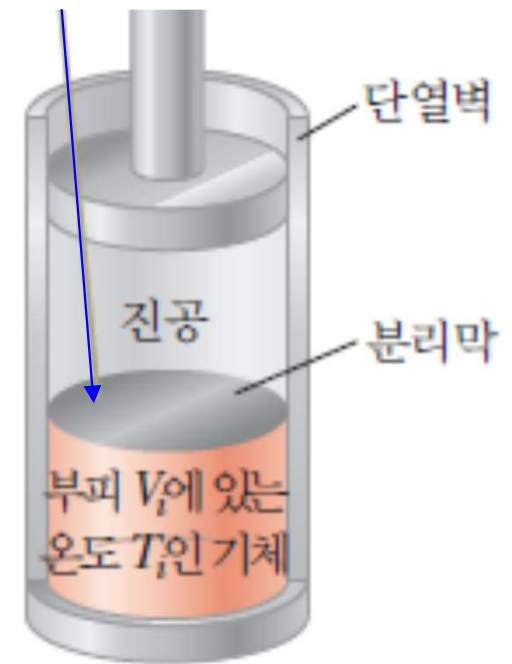
- ▷ 등온 과정(isothermal process): $\Delta T=0$ Constant temperature

$$\Delta E_{\text{int}} = 0 \quad Q = -W$$





자유팽창



이상 기체의 등온 팽창(Isothermal Expansion of an Ideal Gas)

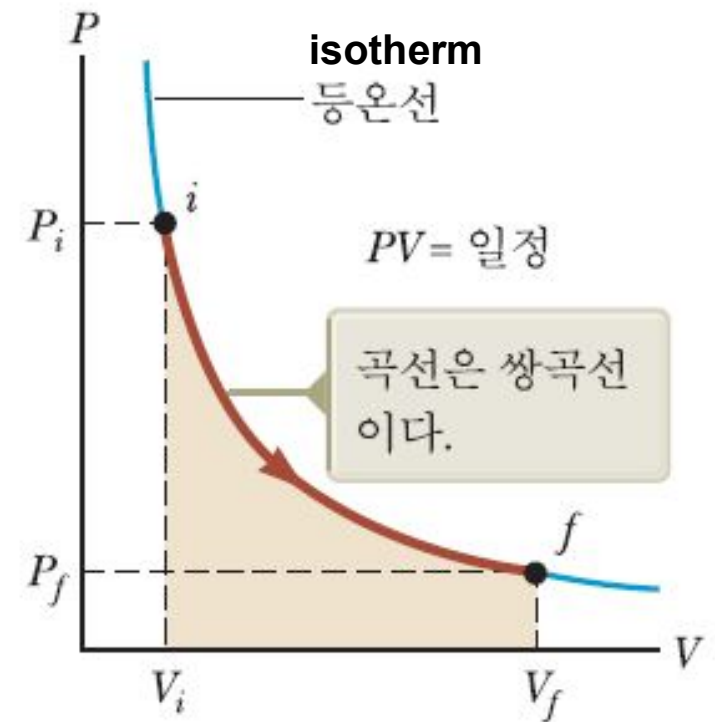
일정한 온도에서 기체가 팽창하는 경우,

$$W = -\int_{V_i}^{V_f} P dV = -\int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} dV$$

$\swarrow \quad \searrow$
 $PV = nRT$

$$W = -nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = -nRT \ln V \Big|_{V_i}^{V_f}$$
$$= nRT (\ln V_i - \ln V_f)$$

$$\therefore W = nRT \ln \left(\frac{V_i}{V_f} \right)$$



$$P V = n R T = \text{constant.}$$

Because the gas expands, $V_f > V_i$ and the value of the work done on the gas is negative.

If the gas is compressed, $V_f < V_i$ and the value of the work done on the gas is positive.

예제 19.5 등온 팽창

0°C에서 1.0몰의 이상 기체가 3.0L에서 10.0L로 팽창할 때

(A) 기체가 팽창하는 동안 기체에 한 일을 구하라.

(B) 이 과정에서 외부와의 접촉에서 얼마나 많은 에너지 전달이 일어났는가?

(C) 기체가 등압 과정을 거쳐 원래의 부피로 돌아왔다면 기체에 한 일을 구하라.

풀이 (A) $W = nRT \ln\left(\frac{V_i}{V_f}\right)$

$$= (1.0 \text{ mol})(8.31 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{K})(273 \text{ K}) \ln\left(\frac{3.0 \text{ L}}{10.0 \text{ L}}\right)$$

$$= -2.7 \times 10^3 \text{ J}$$

(B) $\Delta E_{\text{int}} = Q + W$

$$0 = Q + W$$

$$Q = -W = 2.7 \times 10^3 \text{ J}$$

(C) $W = -P(V_f - V_i) = -\frac{nRT_i}{V_i}(V_f - V_i)$

$$= \frac{(1.0 \text{ mol})(8.31 \text{ J} / \text{mol} \cdot \text{K})(273 \text{ K})}{10.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3}$$
$$(3.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3 - 10.0 \times 10^{-3} \text{ m}^3)$$
$$= 1.6 \times 10^3 \text{ J}$$

예제 19.6 끓는 물

1.00 g의 물이 대기압 ($1.013 \times 10^5 \text{ Pa}$) 에서 등압하에 끓고 있다. 액체 상태에서 물의 부피는 $V_i = V_{\text{liquid}} = 1.00 \text{ cm}^3$ 이고 수증기 상태에서 부피는 1671 cm^3 가 된다. 계가 팽창할 때 한 일과 내부 에너지 변화를 구하라. 수증기가 주변의 공기를 밀어 낸다고 가정하여 수증기와 공기의 혼합은 무시한다.

풀이

$$\begin{aligned} W &= -P(V_f - V_i) \\ &= -(1.013 \times 10^5 \text{ Pa})(1671 \times 10^{-6} \text{ m}^3 - 1.00 \times 10^{-6} \text{ m}^3) \\ &= \boxed{-169 \text{ J}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q &= L_v \Delta m_s = m_s L_v = (1.00 \times 10^{-3} \text{ kg})(2.26 \times 10^6 \text{ J/kg}) \\ &= \boxed{2260 \text{ J}} \end{aligned}$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q + W = 2260 \text{ J} + (-169 \text{ J}) = \boxed{2.09 \text{ kJ}}$$

7 열과정에서 에너지 전달 메커니즘 (Energy Transfer Mechanisms in Thermal Processes)

Conduction, Convection, Radiation

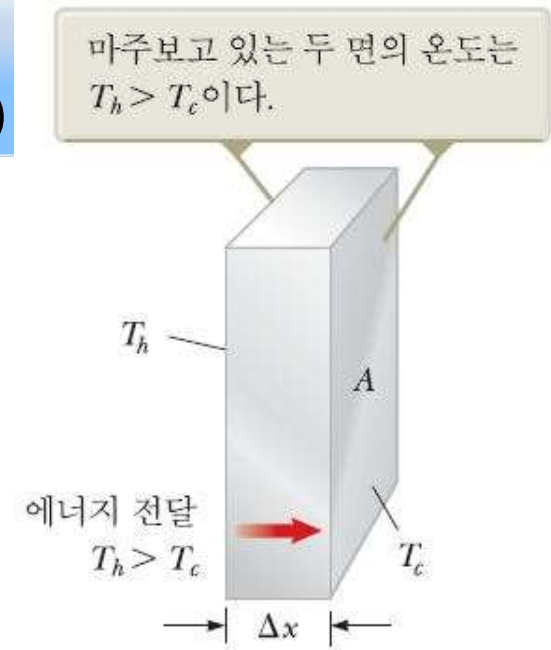
▷ 열전도(Thermal Conduction)

The rate of transfer
[Watts] $P = \frac{Q}{\Delta t} \propto A \frac{\Delta T}{\Delta x}$

$$P = kA \left| \frac{dT}{dx} \right|$$

온도 기울기

열전도도 (thermal conductivity)



- Good conductors have high k values and good insulators have low k values.

물 질	열전도도 (W/m · °C)	물 질	열전도도 (W/m · °C)	물 질	열전도도 (W/m · °C)
금속 (25°C)		비금속 (근삿값)		기체 (20°C)	
알루미늄	238	석 면	0.08	공 기	0.0234
구 리	397	콘크리트	0.8	헬 른	0.138
금	314	다이아몬드	2,300	수 소	0.172
철	79.5	유 리	0.8	질 산	0.0234
납	34.7	얼 음	2	산 소	0.0238
은	427	고 무	0.2		
		물	0.6		
		나 무	0.08		

Temperature Gradient

The quantity $|dT / dx|$ is called the **temperature gradient** of the material.

- It measures the rate at which temperature varies with position.

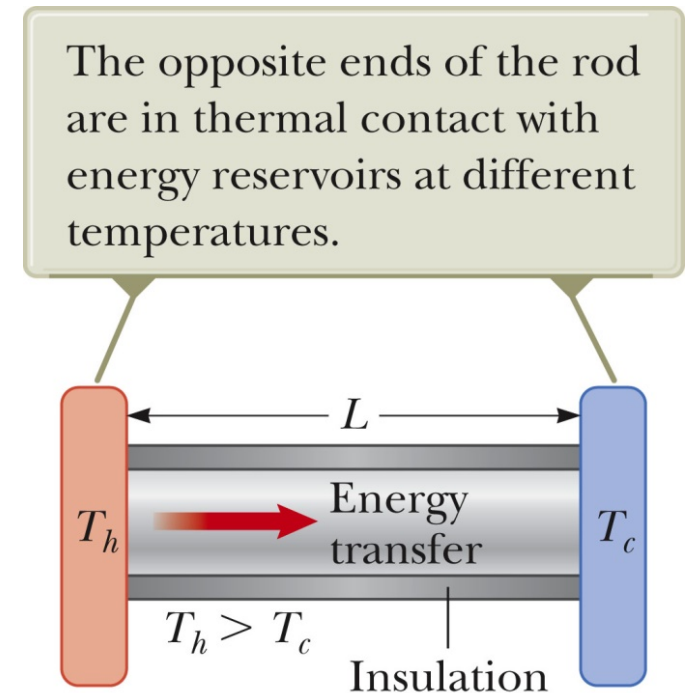
For a rod, the temperature gradient can be expressed as:

$$\left| \frac{dT}{dx} \right| = \frac{T_h - T_c}{L}$$

Using the temperature gradient for the rod, the rate of energy transfer becomes:

$$P = kA \left| \frac{dT}{dx} \right| \rightarrow P = kA \left(\frac{T_h - T_c}{L} \right)$$

➤ 길이 L 인 균일한 단열 막대를 통한 에너지 전도



Compound Slab

For a compound slab containing several materials of various thicknesses (L_1, L_2, \dots) and various thermal conductivities (k_1, k_2, \dots) the rate of energy transfer depends on the materials and the temperatures at the outer edges:

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i (L_i / k_i)}$$

Home Insulation

Substances are rated by their R-values

- $R = L / k$ and the rate becomes

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i R_i}$$

- For multiple layers, the total R value is the sum of the R values of each layer.

Wind increases the energy loss by conduction in a home.

Insulation Values

TABLE 20.4 R-Values for Some Common Building Materials

Material	R-value (ft ² · °F · h/Btu)
Hardwood siding (1 in. thick)	0.91
Wood shingles (lapped)	0.87
Brick (4 in. thick)	4.00
Concrete block (filled cores)	1.93
Fiberglass insulation (3.5 in. thick)	10.90
Fiberglass insulation (6 in. thick)	18.80
Fiberglass board (1 in. thick)	4.35
Cellulose fiber (1 in. thick)	3.70
Flat glass (0.125 in. thick)	0.89
Insulating glass (0.25-in. space)	1.54
Air space (3.5 in. thick)	1.01
Stagnant air layer	0.17
Drywall (0.5 in. thick)	0.45
Sheathing (0.5 in. thick)	1.32

예제 19.7 두 판을 통한 열전달

두께가 L_1 과 L_2 이고 열전도도가 k_1 과 k_2 인 두 판이 그림 19.16과 같이 서로 접촉되어 있다. 바깥면의 온도는 각각 T_c 와 T_h (T_c)이다. 접촉면에서의 온도와 정상 상태에서 넓이가 A 인 판을 통하여 전도되는 에너지 전달률을 구하라.

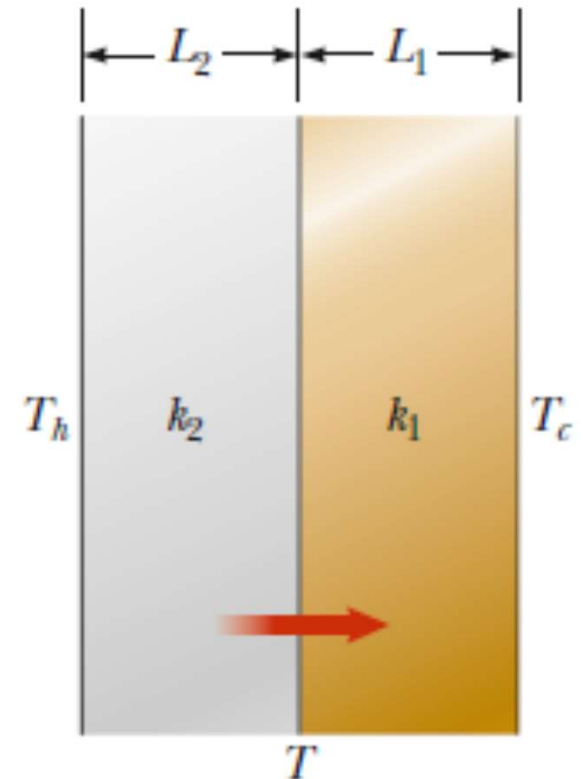
풀이

$$P_1 = k_1 A \left(\frac{T - T_c}{L_1} \right) \quad P_2 = k_2 A \left(\frac{T_h - T}{L_2} \right)$$

$$k_1 A \left(\frac{T - T_c}{L_1} \right) = k_2 A \left(\frac{T_h - T}{L_2} \right)$$

$$T = \frac{k_1 L_2 T_c + k_2 L_1 T_h}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{(L_1/k_1) + (L_2/k_2)}$$



- 집의 단열(Home Insulation)

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i (L_i/k_i)}$$

$$P = \frac{A(T_h - T_c)}{\sum_i R_i}$$

표 20.4 일반적인 건축 재료의 R 값

물질	R 값 (ft ² · °F · h/Btu)
두꺼운 나무 판자 (1인치 두께)	0.91
판자널 (겹쳐 있는)	0.87
벽돌 (4인치 두께)	4.00
콘크리트 블록	1.93
유리 섬유 단열재 (3.5인치 두께)	10.90
유리 섬유 단열재 (6인치 두께)	18.80
유리 섬유판 (1인치 두께)	4.35
섬유소 실 (1인치 두께)	3.70
평판 유리 (0.125인치 두께)	0.89
절연 유리 (0.25인치 두께)	1.54
공기층 (3.5인치 두께)	1.01
정체된 공기층	0.17
건식 벽 (0.5인치 두께)	0.45
덮개 (피복판, 0.5인치 두께)	1.32

예제 19.8 전형적인 벽의 R 값

그림 19.17a와 같은 벽의 R 값을 구하라. 벽은 외부(그림의 앞쪽)로부터 안쪽으로, 벽돌 4인치와 내장벽 0.5인치와 공기층 3.5인치의 건식 벽체로 이루어져 있다.

풀이

$$R_1 \text{ (outside stagnant air layer)} = 0.17 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h/Btu}$$

$$R_2 \text{ (brick)} = 4.00 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h/Btu}$$

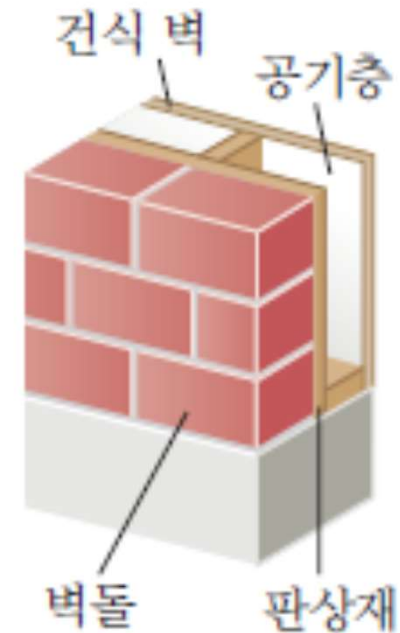
$$R_3 \text{ (sheathing)} = 1.32 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h/Btu}$$

$$R_4 \text{ (air space)} = 1.01 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h/Btu}$$

$$R_5 \text{ (drywall)} = 0.45 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h/Btu}$$

$$R_6 \text{ (inside stagnant air layer)} \\ = 0.17 \text{ ft}^2 \cdot ^\circ\text{F} \cdot \text{h/Btu}$$

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 + R_6 \\ = \boxed{7.12 \text{ ft}^2 \cdot \text{F} \cdot \text{h/Btu}}$$



▷ 대류(Convection)

가열된 매질의 이동에 의해 열 에너지가 전달되는 현상

- Energy transferred by the movement of a substance.
- It is a form of matter transfer:
 - When the movement results from differences in density, it is called *natural convection*.
 - When the movement is forced by a fan or a pump, it is called *forced convection*.

▷ 복사(Radiation)

열 진동에 의해 발생하는 전자기파의 형태로 에너지를 전달하는 현상

- Radiation does not require physical contact.
- All objects radiate energy continuously in the form of electromagnetic waves due to thermal vibrations of their molecules.

스테판의 법칙(Stefan's law)

Rate of radiation ,
the rate of energy transfer,
in Watts

$$\mathcal{P} = \sigma A e T^4 \quad [W]$$

Ideal Absorbers

An *ideal absorber* is defined as an object that absorbs all of the energy incident on it.

- $e = 1$

This type of object is called a **black body**.

An ideal absorber is also an ideal radiator of energy.

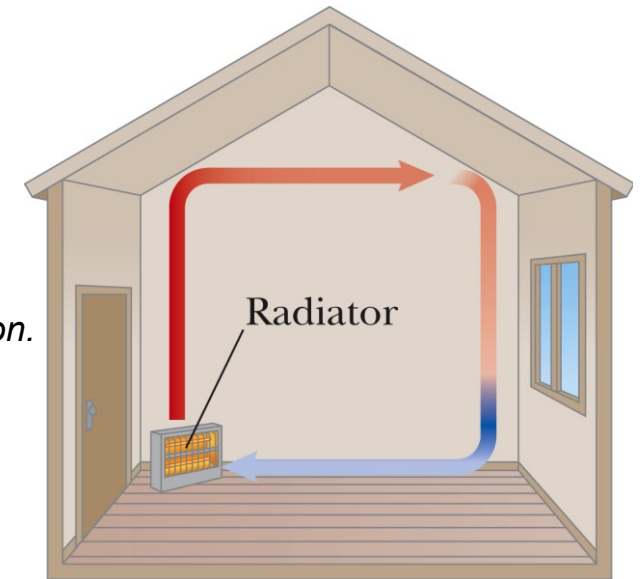
$$\sigma = 5.6696 \times 10^{-8} W / m^2 K^4$$

e (복사율, emissivity): 0 ~ 1 범위의 값. 흡수율(absorptivity)과 같음
 $e=1$: 이상 흡수체 또는 흑체(black body)

A = the surface area of the object

T = the temperature in Kelvins

$$P_{\text{net}} = \sigma A e (T^4 - T_0^4)$$



Air directly above the radiator is warmed and expands. →
 The density of the air decreases, and it rises. →
 A continuous air current is established.



Energy Absorption and Emission by Radiation

With its surroundings, the rate at which the object at temperature T with surroundings at T_o radiates is

- $P_{\text{net}} = \sigma A e (T^4 - T_o^4)$
- When an object is in equilibrium with its surroundings, it radiates and absorbs at the same rate.
 - Its temperature will not change.

• 보온병(The Dewar Flask)

듀어(James Dewar, 1842~1923)경이 발명

전도, 대류, 복사에 의한 열 에너지 손실이 최소화되도록 설계된 보온병

The Dewar Flask (보온병)

- A Dewar flask is a container designed to minimize the energy losses by conduction, convection, and radiation.
 - Invented by Sir James Dewar (1842 – 1923)
- It is used to store either cold or hot liquids for long periods of time.
 - A Thermos bottle is a common household equivalent of a Dewar flask.
- The space between the walls is a vacuum to minimize energy transfer by conduction and convection.
- The silvered surface minimizes energy transfers by radiation.
 - Silver is a good reflector.
- The size of the neck is reduced to further minimize energy losses.

