

Chapter 18. 온도, 열, 열역학 제 1 법칙

Physics 1 1

열역학

- **열역학**: 열과 역학적 일의 기본적인 관계를 바탕으로 열 현상을 비롯해서 자연계 안에서 에너지의 흐름을 통일적으로 다루는 물리학의 한 분야
 - ❖ 18-19세기 산업혁명의 영향을 받아 태동
 - ❖ 증기기관과 같은 열기관에 기초이론 제공
 - ❖ 역사적으로 열역학의 발전은 원자이론의 발전과정과 같이 이루어졌다.
- ❖ What is heat?
- ❖ How do we define it?
- ❖ How is it related to temperature?
- ❖ What are heat's effects?
- ❖ How is it related to other forms of energy and to work?

Physics 1 2

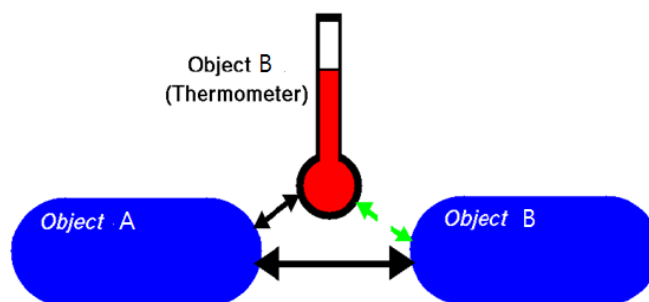
온도, 열접촉, 열(적)평형

- **온도**: 물체의 뜨겁거나 차가운 정도를 표현하는 척도
 - ❖ 고체, 액체, 기체를 구성하는 분자들의 운동상태에 대한 척도
 - ❖ **평균운동에너지와 관련이 있음**(기체분자운동론)
 - ❖ 온도가 높다: 분자들이 매우 활발하게 움직임
 - ❖ 온도의 상한은 없으나 온도의 하한은 있다:
 - ❖ 절대영도(**absolute zero**)에서는 고전적인 분자의 움직임이 실질적으로 없어진다.
- **열접촉(thermal contact)**: 두 물체 사이에 에너지 교환 (대부분 열이나 전자기파의 복사에 의해서 일어남)이 가능한 상태
 - ❖ 에너지 교환은 **온도차이** 때문에 생긴다.
- **열평형(thermal equilibrium)**: 열접촉하는 물체 사이에 더 이상의 알짜 에너지 교환이 없는 상태

Physics 1 3

열역학 0-법칙

물체 A와 B가 열적 평형상태에 있고, B와 C가 열적 평형상태에 있으면, A와 C도 열평형상태에 있다



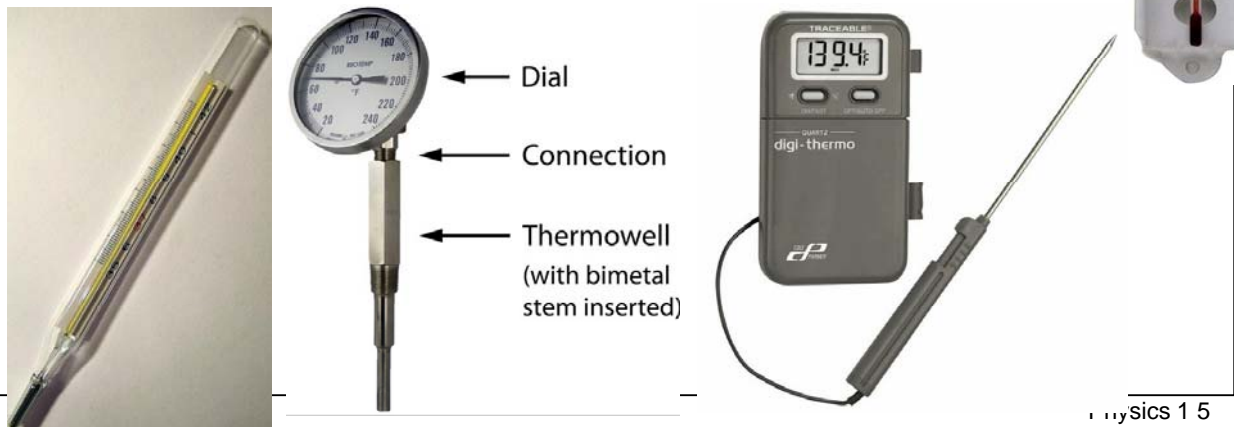
1. 온도의 존재를 주장하는 열역학의 기본법칙임: 열적 평형상태에 있는 물체들끼리는 같은 숫자(온도)를 부여하여 다른 물체들과 구별할 수 있다
- 이 법칙이 성립하지 않으면 매년 온도계에 따라 측정결과가 달라질 수 있다.
2. 물체의 온도를 재려면 물체와 온도계를 열접촉시켜서 열평형 상태에 도달하게 만들어야 한다.

열역학 0법칙에 의하면 두 물체(A,C)의 온도가 같은지 알고 싶다면 더 다루기 쉬운 온도계(B)를 이용하여 각각의 물체의 온도를 측정하면 된다.
두 물체를 접촉시키고 둘 사이에 열평형을 이루어졌는지 알 필요가 없다.

Physics 1 4

온도계의 원리

- **온도계의 원리**: 물체의 온도가 변하면 달라지는 물성을 이용하여 온도를 측정:
 1. 액체의 부피 (수은온도계, 알코올 온도계)
 2. 고체의 크기
 3. 일정 부피의 기체의 압력
 4. 일정 압력 하의 기체의 부피
 5. 도체의 전기저항
 6. 물체의 색



온도계 눈금메기기

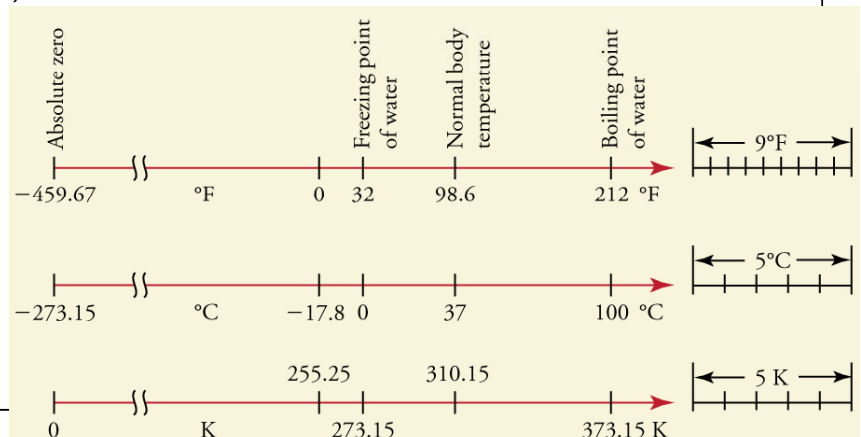
- 온도의 눈금(척도)는 두 기준이 되는 온도(쉽게 재현될 수 있어야 한다)와 그 두 온도 사이를 몇 등분할 것인지를 정하여 결정한다
 - 온도의 설정은 임의적임
 - 화씨온도 척도(단위 °F) : 물의 어는 점(32°F) ~ 끓는 점(212°F): 180등분
 - 섭씨온도 척도(단위 °C) : 물의 어는 점(0°C) ~ 끓는 점(100°C): 100등분
 - **절대온도 척도(단위 K) : 절대영도(0K)~ 물의 삼중점(273.16K)**
 [물의 삼중점 = 0.01°C at 0.006 atm]
- * 100°F ~ 사람체온(37.8°C)!

• 변환공식:

$$K \rightarrow ^\circ C : T_C = T_K - 273.15^\circ$$

(note, $\Delta T_C = \Delta T_K$)

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

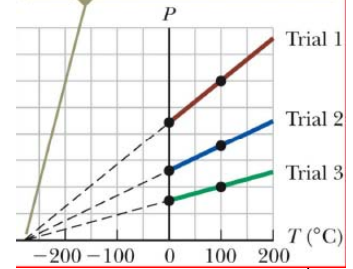


절대온도의 척도

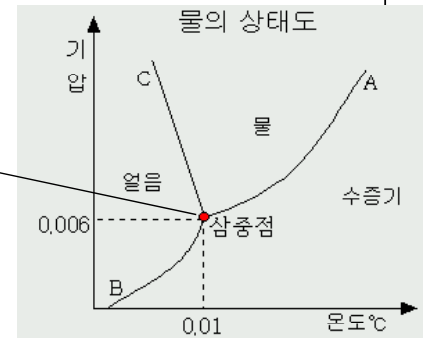
- 첫 번째 기준온도: 기체의 압력은 온도가 내려가면 감소함. 압력-온도의 연장선은 기체의 종류에 상관없이 온도가 -273.15°C 일 때 한 점에서 수렴한다

→ 절대영도(0K)

For all three trials, the pressure extrapolates to zero at the temperature -273.15°C .



삼중점(triple point): 물의 상태도에서 기체, 액체, 고체가 공존하는 점: 온도(0.01°C), 압력(0.006기압)에서만 생김



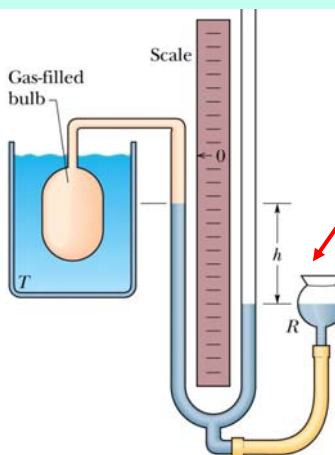
- 두 번째 기준온도: 삼중점 온도 = 273.16K

켈빈온도 1K 간격 = 삼중점 온도와 절대영도 차이를 273.15 등분

Physics 1 7

일정부피 기체온도계

- 부피가 일정할 때, 기체의 절대온도(T)는 압력(p)에 비례하는 특성을 이용하면 정밀한 온도측정이 가능함



수는 Reservoir를 내리거나 올려서 기체의 부피를 일정하게 유지할 수 있다

- 기체법칙: " $T/pV = \text{일정}$ ", " $V = \text{일정}$ "이므로 기체의 온도는 압력에 비례: $T = Cp$ ($C = \text{상수}$)
- 기체압력은 $p = p_0 - \rho g h$ ($\rho = \text{수은 밀도}$) 에서 h를 재서 측정함.
- 기체가 담긴 용기를 삼중점 상태의 물(T_3)에 담근 후 기체의 압력 p_3 을 측정하여 계수 C 결정: $T_3 = Cp_3$
→ $C = 273.16\text{ K}/p_3$

$$T = T_3 \left(\frac{p}{p_3} \right) = (273.16\text{K}) \left(\frac{p}{p_3} \right): \text{압력을 재면 온도가 측정됨}$$

✓ 매우 넓은 온도범위에서 동작하고, 정교하게 온도를 측정할 수 있다.

Physics 1 8

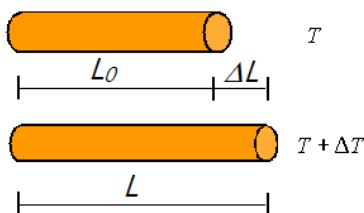
몇 가지 기준 온도

	K	°C	°F		K	°C	°F
Absolute zero	0	-273.15	-459.67	Water boils	373.15	100.00	212.0
Lowest transient temperature achieved (laser cooling)	10^{-9}			Campfire	1,000	700	1,300
Intergalactic space	3	-270	-454	Gold melts	1,337	1,064	1,947
Helium boils	4.2	-269	-452	Lightbulb filament	3,000	2,700	4,900
Nitrogen boils	77	-196	-321	Surface of Sun; iron welding arc	6,300	6,000	11,000
Carbon dioxide freezes ("dry ice")	195	-78	-108	Center of Earth	16,000	15,700	28,300
Mercury freezes	234	-39	-38	Lightning channel	30,000	30,000	50,000
Ice melts/water freezes	273.15	0	32.0	Center of Sun	10^7	10^7	10^7
Human body temperature	310	37	98.6	Interior of neutron star	10^9	10^9	10^9

Physics 1 9

열팽창(Thermal Expansion)

- 열팽창:** 물체의 온도가 올라갈 때 물체의 크기가 늘어나는 현상. 물체의 온도가 오르면 구성분자의 운동이 활발해져서 분자간의 사이가 일반적으로 늘어난다.



- 늘어난 길이는 온도변화 (ΔT) & 처음 길이 (L_0)에 비례:

$$\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T, \quad \alpha = \text{선팽창 계수 (단위: } ^\circ\text{C}^{-1}\text{)}$$

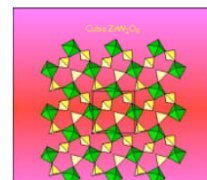
$$\Rightarrow L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$$

예외: $0 \rightarrow 4^\circ\text{C}$ 물은 수축한다: 물고기 생존에 매우 중요 (뒤에 다룸)

Some Coefficients of Linear Expansion^a

Substance	α ($10^{-6}/^\circ\text{C}^\circ$)	Substance	α ($10^{-6}/^\circ\text{C}^\circ$)
Ice (at 0°C)	51	Steel	11
Lead	29	Glass (ordinary)	9
Aluminum	23	Glass (Pyrex)	3.2
Brass	19	Diamond	1.2
Copper	17	Invar ^b	0.7
Concrete	12	Fused quartz	0.5

ZrW_2O_8 is a ceramic with negative thermal expansion over a wide temperature range, 0-1050 K



Problem 1: Brooklyn Bridge Expansion

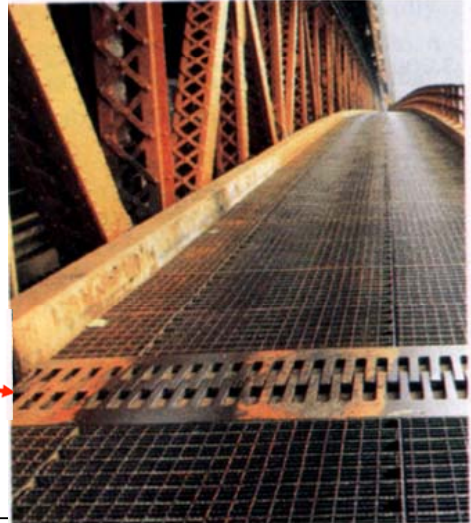
The steel bed of the main suspension bridge is 490 m long at + 20°C. If the extremes in temperature are - 20°C to + 40°C, how much will it contract and expand? [$\alpha_{steel} = 12 \times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}$]



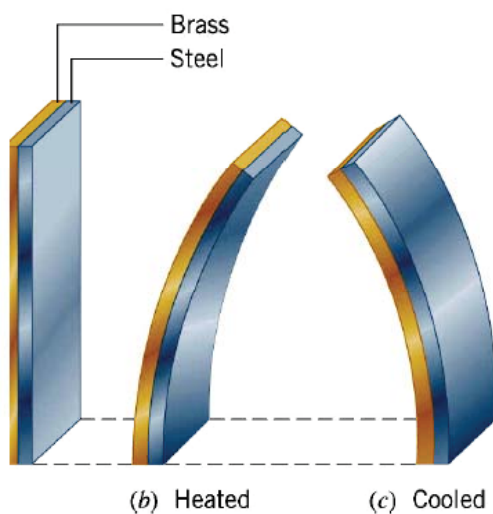
$$\alpha_{steel} = 12 \times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1}$$

$$\begin{aligned}\Delta L &= \alpha_{steel} L_0 \Delta T \\ &= 12 \times 10^{-6} (^{\circ}C)^{-1} (490m) (60^{\circ}C) \\ &= 35 \text{ cm}\end{aligned}$$

The solution is to use expansion joints



Bimetal



$$\Delta L = L \alpha \Delta T$$

Substance	$\alpha (10^{-6}/C^{\circ})$
Brass	19
Copper	17

Problem 2: Pendulum Clock

A pendulum clock made of brass is designed to keep accurate time at 20°C. If the clock operates at 0°C, does it run fast or slow?



If so, how much?

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{L}{g}}$$

$$L = L_0 + \Delta L \\ = L_0 + \alpha_{brass} L_0 \Delta T$$

If the original period was 1 second

$$L_0 = \left(\frac{1s}{2\pi}\right)^2 g = 24.824 \text{ cm}$$

$$L = 24.824 \text{ cm} \left(1 + (19 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C})(-20^\circ\text{C})\right) \\ = 24.824 \text{ cm}(0.9996) \\ = 24.814 \text{ cm}$$

The new period is:

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{24.814}{9.8}} = 0.9998 \text{ s}$$

It runs slow (less time per tick)

$$\# \text{ ticks} = 24 * 60 * 60 = 86400 \text{ at } 20^\circ\text{C}$$

$$\text{at } 0^\circ\text{C: time} = 86400 * 0.9998 = 86383 \text{ s}$$

1.7hr/yr behind at 0°C

Physics 1 13

고체의 면적, 부피의 팽창

- 길이의 팽창: $\frac{\Delta L}{L_0} = \alpha \Delta T$;

$$L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$$

- 면적의 팽창: $L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$, $W = W_0(1 + \alpha \Delta T)$

$$A = [L_0(1 + \alpha \Delta T)][W_0(1 + \alpha \Delta T)] = A_0(1 + \alpha \Delta T)^2$$

$$\Delta A = A_0(1 + \alpha \Delta T)^2 - A_0 \cong A_0(2\alpha) \Delta T$$

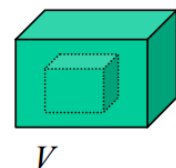
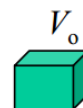
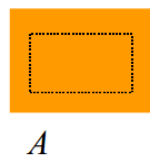
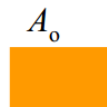
$$\frac{\Delta A}{A_0} = \beta_A \Delta T \quad \therefore \boxed{\text{면적 팽창 계수: } \beta_A = 2\alpha} \text{ (면적)}$$

- 부피의 팽창: $L = L_0(1 + \alpha \Delta T)$, $W = W_0(1 + \alpha \Delta T)$, $H = H_0(1 + \alpha \Delta T)$

$$V = [L_0(1 + \alpha \Delta T)][W_0(1 + \alpha \Delta T)][H_0(1 + \alpha \Delta T)] = V_0(1 + \alpha \Delta T)^3$$

$$\Delta V = V_0(1 + \alpha \Delta T)^3 - V_0 = V_0(3\alpha) \Delta T$$

$$\frac{\Delta V}{V_0} = \beta_V \Delta T \quad \therefore \boxed{\text{부피 팽창 계수: } \beta_V = 3\alpha} \text{ (부피)}$$



Volume expansion coefficients

solids: $1 - 87 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

liquids: $210 - 1100 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

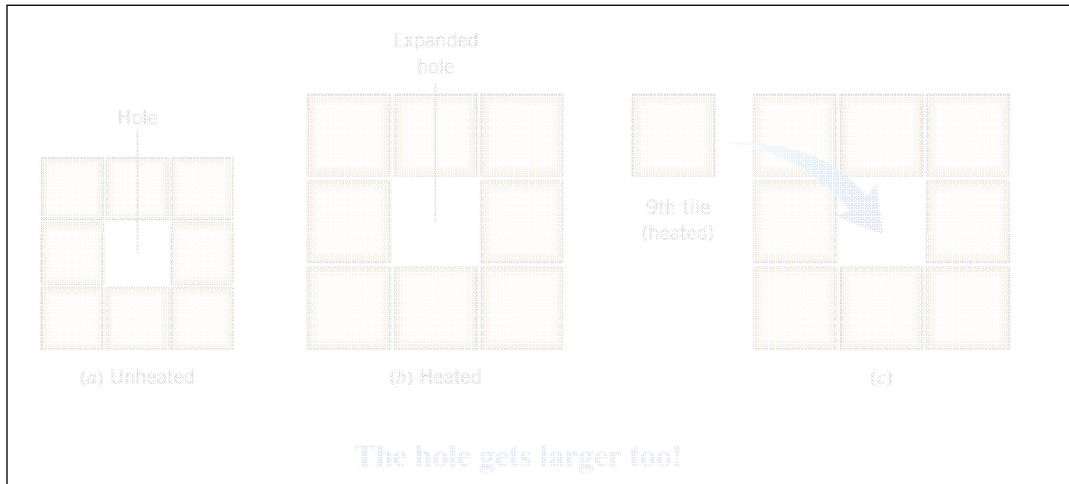
gasses: $3400 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$

Physics 1 14

구멍의 팽창

Do holes expand or contract when heated?

Does radius
increase or decrease
when heated?



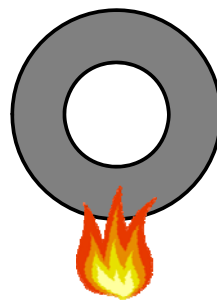
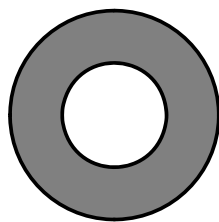
원자 사이거리가 커진다고 생각하면 이해하기 쉽다

Physics 1 15

열팽창

동근 쇠고리를 가열하면 안쪽 구멍이 커질까
아니면 작아질까?

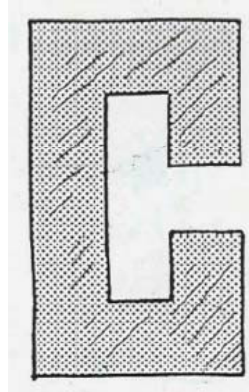
열팽창
동영상



금속뚜껑이 잘 안 열리는
경우에 더운물로 데우면
열리는가? 더 안 열리는가?

Physics 1 16

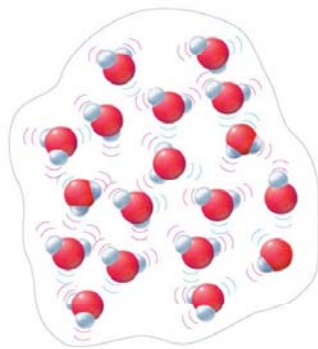
아래 모양의 물체에 열을 가하면 간격은 어떻게 되는가?



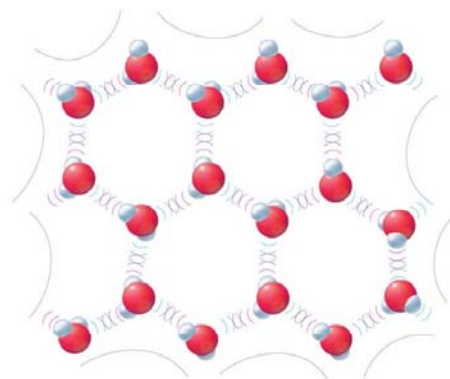
Physics 1 17

물의 팽창

- 액체에서 의미 있는 팽창은 부피의 팽창 뿐이다.
- 얼음은 물보다 더 규칙적인 구조를 가지므로 같은 질량의 얼음의 부피가 물보다 더 크다
 - ❖ 빙산이 물에 뜨는 이유



Liquid water
(dense)

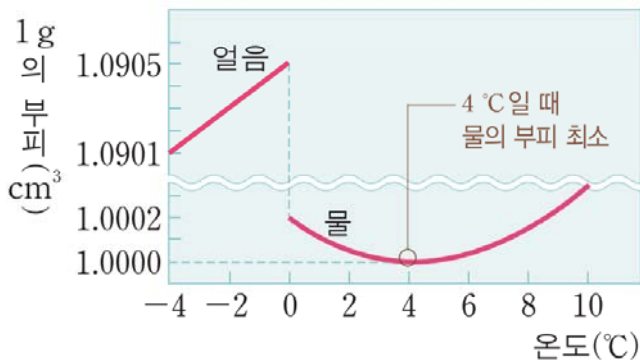


Ice
(less dense)

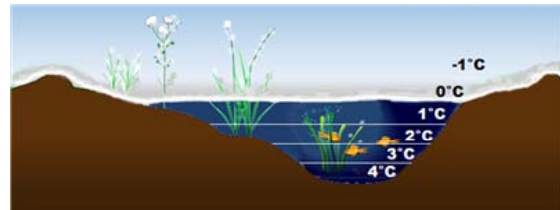
Physics 1 18

물의 팽창

- 물은 4도에서 밀도가 가장 크다.
- 물이 냉각이 되면 표면의 물은 무거워져서 바닥으로 내려간다.
- 바닥의 물이 4도가 되면 표면의 물이 냉각이 되어도 바닥에 내려가지 못한다
- 표면이 얼면 얼음은 밀도가 물보다 작으므로 뜨게 된다.
- 표면 전체가 얼더라도 바닥의 물은 4도를 유지할 수 있다.
- 이는 물고기의 생존에 매우 중요한 역할을 한다.



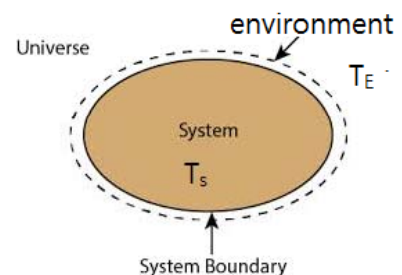
4도의 물이 가장 무거우므로 호수바닥으로 내려가고 호수의 물은 표면부터 얼게 된다



Physics 1 19

열역학에서 계(system)와 환경(environment)

- ◆ (열역학적) 계(system): 열역학에서 다루는 원자/분자들의 모임.
- ◆ 환경(environment, 주변): 계를 제외한 나머지. 계와 에너지나 물질을 교환하는 상호작용을 한다.
 - 고립계(isolated system): 환경과 에너지 및 입자의 교환이 없는 계
 - 닫힌계(closed system): 환경과 입자와 열의 교환이 없다. 그러나 역학적 일의 교환은 있다.
 - 열린계(open system): 환경과 에너지와 입자의 교환이 있다.
- ◆ 상태변수(state variable): 계의 상태를 기술하는 변수들
 - 온도, 내부에너지, 엔트로피, 엔탈피, ...
 - 열과 일은 계의 상태변수가 아니다.
 - 열이나 일은 변화의 과정에 수반되는 물리량임.



Physics 1 21

Heat

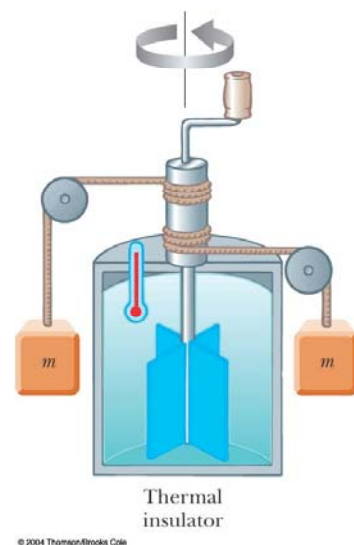
- **열**: 두 물체나 계 사이에서 온도 차이에 의해서 흐르는 에너지의 한 형태.
 - ❖ (원자의무작위 충돌인)전도, 대류, 복사 등의 방법으로 전달된다.
 - ❖ 열소이론(caloric theory): 열이 더운 물체에서 차가운 물체로 흐르는, 눈에 보이지 않는 유체인 열소(caloric)로 이루어졌다는 이론. 19세기 중반까지 열현상 설명
 - 더운 물체에는 열소가 많고, 찬 물체는 열소가 적다고 생각
 - 열소는 생성되거나 소멸되지 않는다고 생각함.
 - 열소 질량 = 0, 물체의 온도가 변해도 질량은 변화 없음.
 - ❖ 열소이론 → 망치로 못을 칠 때 온도가 오르는 이유를 설명 못함
- **열의 단위**: 칼로리(cal)
 - ❖ 열에 대한 연구는 역학이나 전자기학과 독립적으로 발전.
 - ❖ 1 칼로리(cal) = 1 g 의 물을 14.5°C 에서 15.5°C 올리는데 필요한 열량.
- 물리계의 열이 얼마인가는 잘못된 표현이다. **열은 온도차이 때문에 생기는 에너지 전달에서만 사용한다.**
 - ❖ “열이 많다” 또는 열에너지는 → 내부에너지(원자나 분자의 무작위 운동에 수반되는 운동E + 위치E의 합)가 크다

Physics 1 22

열의 일당량

열이 얼마만큼의 역학적 일에 해당하는가를 나타내는 양

- **James Joule(in 1843)**: 역학적일 일과 열이 서로 같으며 또한 서로 변환이 될 수 있다는 사실을 밝힘
- 회전날개로 물을 휘저을 때 물에 공급된 열량을 측정하여 열과 역학적 에너지 사이에 4.185J/cal의 관계가 성립함을 보였다. 공급이 될 수 있음을 보임



- 물 1그램을 14.5°C 에서 15.5°C 로 올리는데 필요한 에너지: 4.186 J

열의 일당량
1 cal = 4.186 J

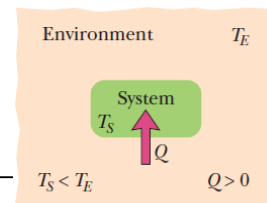
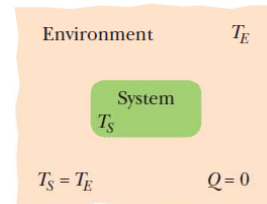
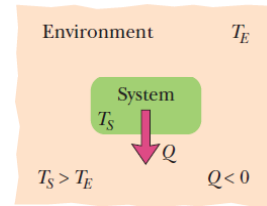
Physics 1 23

온도와 열

물리계의 온도가 주변환경의 온도와 다르면 둘 사이에 에너지의 흐름이 발생한다. 온도는 에너지가 흐르는 방향을 결정한다.

Sign Conventions

- 계에서 주변으로 열이 흘러가면
 $T_S > T_E \rightarrow Q < 0$ (열의 방출)
- 계와 주변이 열 교환이 없을 때
 $T_S = T_E \rightarrow Q = 0$ (열적 평형)
- 주변에서 계로 열이 들어오면
 $T_S < T_E \rightarrow Q > 0$ (열의 흡수)



Physics 1 24

열용량(Heat Capacity)

- 물질에 따라 같은 열을 주어도 온도의 변화는 다르게 나타난다.
- 물질의 **열용량**(C , 단위= $J/^{\circ}C$, $cal/^{\circ}C$): 주어진 물질을 $1^{\circ}C$ 올리는데 필요한 에너지 (열량)

• Q 의 열량을 주었을 때, 물질의 온도가 ΔT 만큼 오르면,

$$Q = C\Delta T \longrightarrow [C] = cal/K, cal/^{\circ}C$$

- 물질의 양이 많을수록 같은 온도를 올리는데 더 많은 열이 필요함
- 단위질량당 열용량 = **비열(specific heat)**
 - ✓ 물질의 특성임.
 - ✓ 비열이 큰 물질은 열의 출입에 온도변화가 작다 (물)
 - ✓ 비열이 작은 물질은 열의 출입에 온도변화가 크게 일어난다(금속)

$$\text{비열(specific heat): } c = \frac{Q}{m\Delta T} \quad (\text{단위: } cal/g, ^{\circ}C)$$

$$Q = mc\Delta T$$

여러 물질의 비열

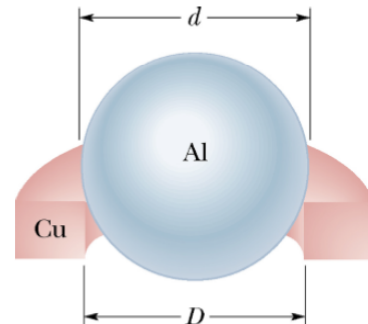
- ❖ 물질의 열용량이나 비열을 결정할 때 어떤 환경에서 열에너지를 주었는지가 중요함.
 - 일정한 압력 조건에서 가열하는 경우: 등압비열
 - 일정한 체적 조건에서 가열하는 경우: 등적비열
- ❖ 액체나 고체의 경우에는 차이가 작으나, 기체의 경우에는 두 조건에서의 열용량/비열은 매우 다르다.

Some Specific Heats and Molar Specific Heats at Room Temperature

Substance	Specific Heat		Molar Specific Heat
	$\frac{\text{cal}}{\text{g} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$	$\frac{\text{J}}{\text{mol} \cdot \text{K}}$
<i>Elemental Solids</i>			
Lead	0.0305	128	26.5
Tungsten	0.0321	134	24.8
Silver	0.0564	236	25.5
Copper	0.0923	386	24.5
Aluminum	0.215	900	24.4
<i>Other Solids</i>			
Brass	0.092	380	
Granite	0.19	790	
Glass	0.20	840	
Ice (-10°C)	0.530	2220	
<i>Liquids</i>			
Mercury	0.033	140	
Ethyl alcohol	0.58	2430	
Seawater	0.93	3900	
Water	1.00	4180	

Physics 1 26

A 20.0 g copper ring at 0.000°C has an inner diameter of $D=2.54000\text{ cm}$. An Al sphere at 100.0°C has a diameter of $d=2.54508\text{ cm}$. The sphere is placed on top of the ring and the two are allowed to come to thermal equilibrium, with no heat lost to the surroundings. The sphere just passes through the ring at the equilibrium temperature. What is the mass of the sphere???



Q. $D=d$ 인 온도는?

$$\text{Cu: } D = D_0(1 + \alpha_{\text{Cu}}(T_f - 0))$$

$$\text{Al: } d_f = d_i(1 + \alpha_{\text{Al}}(T_f - 100))$$

$$D = d_f \rightarrow 2.54 \times (1 + \alpha_{\text{Cu}}(T_f - 0)) = 2.54508 \times (1 + \alpha_{\text{Al}}(T_f - 100))$$

$$\therefore T_f = 50.38^\circ\text{C}$$

Q. 금속구의 질량은?

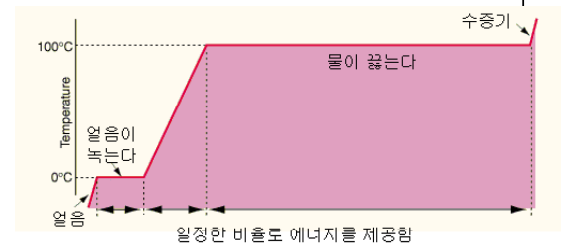
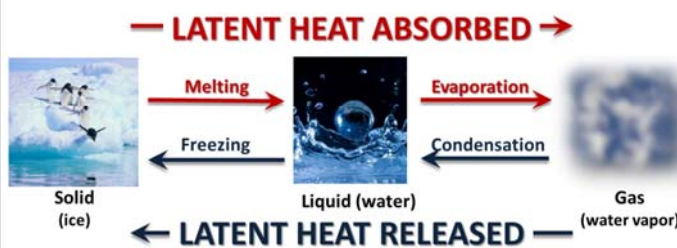
$$\begin{cases} \text{링으로 간 열량: } Q = c_{\text{Cu}} m_{\text{Cu}} (T_f - 0) \\ \text{구에서 온 열량: } |Q| = c_{\text{Al}} m_{\text{Al}} (T_f - 100) \end{cases}$$

$$\therefore m_{\text{Al}} = \frac{c_{\text{Cu}} m_{\text{Cu}} T_f}{c_{\text{Al}} (T_f - 100)}$$

Physics 1 27

상변화

- 물질이 열에너지를 흡수하면 항상 온도가 오르는가? → No
- 물질은 고체, 액체, 또는 기체로 존재할 수 있는데 이것을 상(phase)라고 한다.
 - ❖ 물질이 한 상에서 다른 상으로 상전이(phase transition)를 하는 동안에는 외부에서 열을 주어도 온도변화가 없다.
 - ❖ 제공된 열은 모두 분자 사이의 결합을 끊는데(위치에너지) 사용된다.
 - 온도는 분자들의 평균운동에너지로 결정이 됨.
 - ❖ 물질의 상태변화에 필요한 열 → 변환열(latent heat).



Physics 1 28

변환열

- 변환열(Latent Heat) : 물질의 상태변화를 일으키기 위해 열로 전달되는 단위 질량당 에너지
 - ❖ 융해열(L_f) : 고체 → 액체
 - 물 : $L_f = 97.5 \text{ cal/g} = 6.01 \text{ kJ/mol} = 333 \text{ kJ/kg}$
 - ❖ 증발열(L_v) : 액체 → 기체
 - 물 : $L_v = 539 \text{ cal/g} = 60.7 \text{ kJ/mol} = 2256 \text{ kJ/kg}$
 - ❖ 물질 m 그램의 변환열 : $Q = m.L$

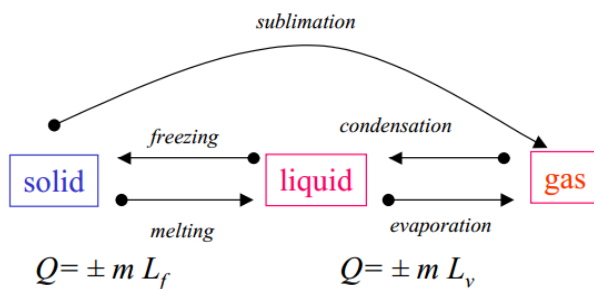


표 19.4 변환열

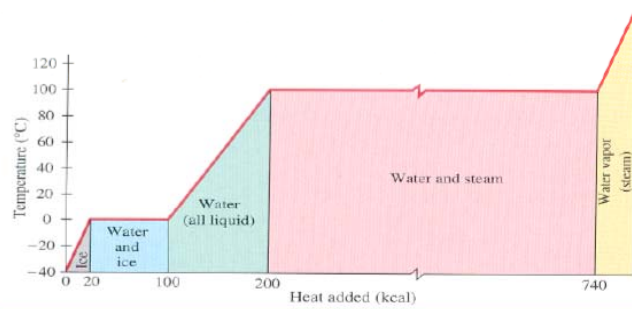
물질	녹음		끓음	
	녹는점 (K)	융해열 L_f (kJ/kg)	끓는점 (K)	증발열 L_v (kJ/kg)
수소	14.0	58.0	20.3	455
산소	54.8	13.9	90.2	213
수은	234	11.4	630	296
물	273	333	373	2256
납	601	23.2	2017	858
은	1235	105	2323	2326
구리	1356	207	2868	4730

Physics 1 29

Example:

H₂O

$$\begin{aligned} c_{\text{ice}} &= 0.53 \text{ cal/g}\cdot\text{K} \\ L_F &= 79.5 \text{ cal/g} \\ c_{\text{water}} &= 1.0 \text{ cal/g}\cdot\text{K} \\ L_V &= 539 \text{ cal/g} \end{aligned}$$



Making ice

How much energy does a refrigerator have to remove from 1.5 kg of water at 20°C to make ice at -12°C.

$$Q_1 = 1.5 \text{ kg} \times 1.0 \text{ cal/g}\cdot\text{K} \times (20^\circ\text{C} - 0^\circ\text{C}) = 30 \text{ kcal}$$

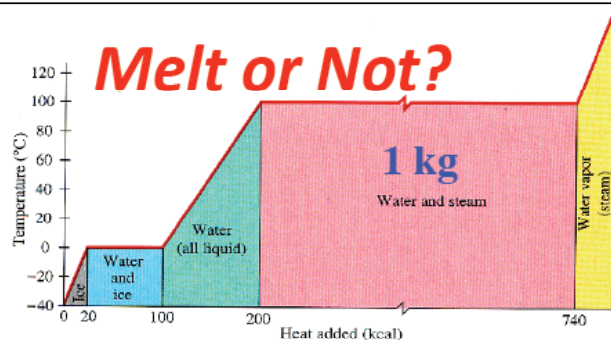
$$Q_2 = 1.5 \text{ kg} \times 79.5 \text{ cal/g} = 119.25 \text{ kcal}$$

$$Q_3 = 1.5 \text{ kg} \times 0.53 \text{ cal/g}\cdot\text{K} \times (0^\circ\text{C} - (-12^\circ\text{C})) = 9.54 \text{ kcal}$$

Physics 1 30

H₂O

$$\begin{aligned} c_{\text{ice}} &= 2000 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C} \\ L_F &= 33.5 \times 10^4 \text{ J/kg} \\ c_{\text{water}} &= 4186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C} \\ L_V &= 22.6 \times 10^5 \text{ J/kg} \end{aligned}$$



Will all the ice melt?

At a party, a 0.5 kg chunk of ice at -10°C is placed in a 3.0 kg of tea at 20°C. At what temperature and in what phase will the final mixture be?

- 얼음을 0°C 물로 바꾸는 데 필요한 열:

$$\begin{aligned} Q &= \underbrace{(0.5 \text{ kg})(2000 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C})(10^\circ\text{C})}_{10000 \text{ J}} + \underbrace{(33.5 \times 10^4 \text{ J/kg})(0.5 \text{ kg})}_{167500 \text{ J}} \\ &= 177500 \text{ J} \end{aligned}$$

- tea가 0°C로 변할 때 내는 열:

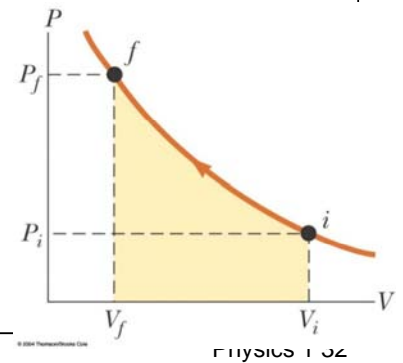
$$Q = (3 \text{ kg})(4186 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C})(20^\circ\text{C}) = 251160 \text{ J}$$

0도까지 차의 온도가 내려갈 때 내는 열은 얼음을 다 녹이고도 남는다.

Physics 1 31

열역학적 과정

- 계와 환경(주변)과의 에너지 교환은 열이나 일을 통해서 일어난다.
 - ❖ 계에 에너지의 출입이 생기면 계의 상태가 변하게 된다.
 - ❖ 계의 상태는 압력, 온도, 부피, 몰수, 내부에너지와 같은 상태변수에 의해서 기술된다.
- 열역학적 과정: 계가 한 상태에서 다른 상태로 바뀌는 과정
 - ❖ 계의 상태는 pV도의 한 점으로 표현된다.
 - ❖ 계의 압력과 부피가 변하는 과정은 pV도의 경로로 표현할 수 있다.
 - ❖ 계가 상태도의 경로를 따라 변할 때 모든 변화가 매우 서서히 진행되어 매 순간 계는 **열적평형 상태**를 유지한다고 가정함
 - 이 경우만 pV도에서 계가 거치는 과정을 곡선으로 표시가능: quasi-statics (준 정적과정)
 - 만약에 계가 빠르게 팽창하여 평형이 이루어지지 온도나 압력을 정의할 수 없다.



Heat & Work는 상태변수인가?

- 상태변수: 물리계의 상태를 표현하는데 필요한 변수들
 - ❖ 운동하는 계: 구성입자의 위치, 속도
- 온도, 압력, 체적, 몰수, 내부에너지 등이 상태변수다
 - ❖ 계의 현재 상태를 기술하는 물리량임.
 - ❖ 서로 독립적인 것은 아님
- 열, 일은 열역학적 상태변수가 아니다
 - ❖ 계의 상태 변화에 수반되는 물리량임(→ transfer variable).
 - ❖ 계의 열이 얼마인가, 계의 일이 얼마인가는 의미 없는 질문임.
 - 의미있는 질문: 계의 상태가 변화는 과정에서 열이 얼마나 출입했는가, 계가 한 일이 얼마인가?
 - 이 물체의 열이 많다 → 내부에너지가 크다는 의미임.

계가 한 일

- 열과 일을 통해서 에너지를 전달한다.
- 계(기체)가 팽창하면서 피스톤을 밀어낸다.
 - ❖ 팽창 → 계가 일을 함
 - ❖ 수축 → 계가 일을 받음.

• 부피가 ΔV 만큼 변할 때 기체가 한 일:

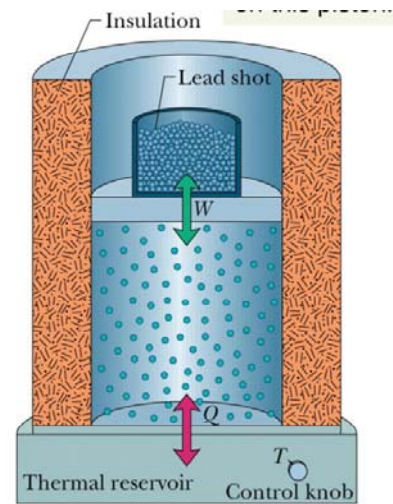
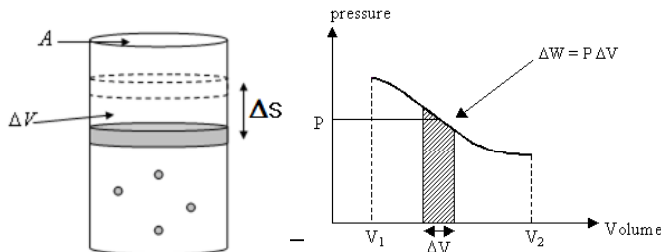
$$dW = \vec{F} \cdot d\vec{s} = (pA)(ds) = p(Ads) = pdV$$

• 부피변화가 $V_i \rightarrow V_f$ 일 때 기체가 한 일:

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

p-V 표에서 면적

*일반적으로 p (& T)는 V 에 따라 변함.



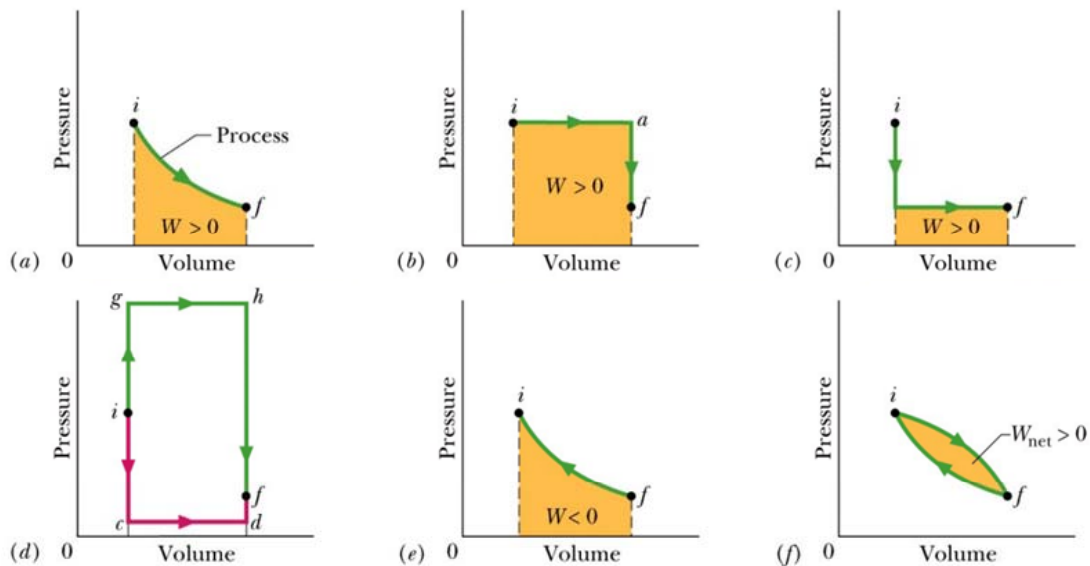
열원: 실린더 내의 기체의 온도를 일정하게 유지.

매우 작은 납알갱이를 추가하거나 덜어내면서 **가역적**인 방법으로 기체의 부피를 변화시킬 수 있다.

Physics 1 34

계가 한 일

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV$$

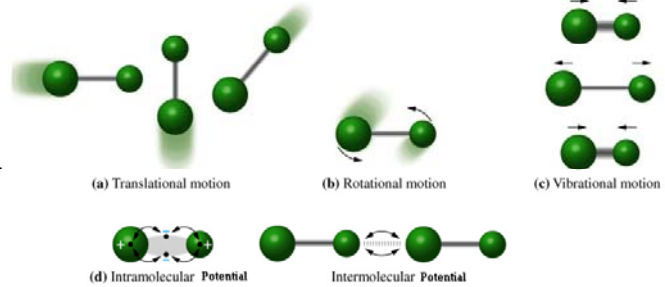


- 계의 상태가 변할 때 ($i \rightarrow f$) 계가 한 일 : W = 아래 면적
- 다시 원래 상태로 돌아오는 경우 (cycle): W = 폐곡선의 면적
- 열에너지와 일 에너지의 경로 의존성** : 계의 상태가 바뀌는 과정에서 흡수하는 열에너지 Q 와 계가 한 일 W 의 값은 처음과 나중상태가 같더라도 계가 p-V 표상에서 어떤 경로를 거쳐서 변했는가 따라 다르다.

Physics 1 35

내부에너지: E_{int}

- 계에 들어온 일 / 열 \rightarrow 다른 형태의 에너지로 변환되어 계에 저장됨.
- 내부에너지 (internal energy): 계를 구성하는 미시적인 분자나 원자가 가지는 모든 에너지의 합이다
 - ❖ 병진운동에너지
 - ❖ 회전운동에너지
 - ❖ 진동운동에너지
 - ❖ 분자 사이의 상호작용에 의한 위치에너지
 - ❖ 정지질량 에너지
- 내부에너지가 아닌 것
 - ❖ 계 전체 또는 거시적인 일부의 병진, 회전, 진동에 의한 에너지
 - ❖ 계 분자와 계의 외부와의 상호작용(분자가 받는 중력위치 E)에 의한 위치에너지.
- 열역학적 관점에서는 내부에너지 자체보다는 내부에너지의 변화에만 주된 관심이 있다.



Physics 1 36

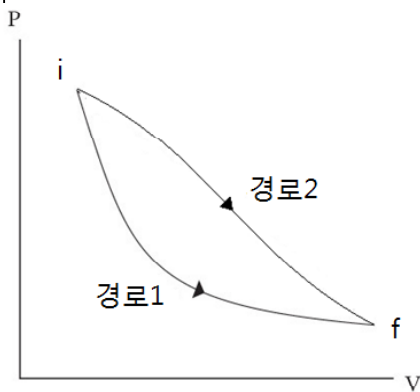
내부에너지 변화: ΔE_{int}

- 내부에너지가 변하는 경우:
 - ❖ 계에 출입하는 열(Q)이 있는 경우
 - 예: 기체의 가열/냉각
 - ❖ 계가 일(W)을 하거나, 외부에서 계에 일을 하는 경우
 - 예: 피스톤을 이용해서 기체의 압축/팽창
- 내부에너지는 계의 상태를 나타내므로, 내부에너지 변화는 계의 처음 상태와 최종상태에만 의존함
- 계에 출입하는 열과 일은 상태변수가 아니다.
 - ❖ PV도 상의 한 상태에서 다른 상태로 변해갈 때, 계가 한 일 W 이나, 흡수한 열 Q 은 어떠한 열역학적 과정을 거쳤는가에 따라서 달라짐
 - 예: 일정한 부피를 유지하면서 1°C 를 올리는 경우와 일정한 압력을 유지하면 1°C 를 올리는 경우 필요한 열량은 다르다.

Physics 1 37

열역학 제 1법칙

- 계가 한 상태에서 다른 상태로 변화는 과정에서 계가 한 일 W 와 출입한 열 Q 는 열역학적 과정에 따라 다르지만 $Q - W$ 값은 경로에 무관하게 항상 같음이 실험적으로 알려져 있다. 즉, $Q - W$ 값은 오직 처음과 나중 상태에만 의존한다.



- $Q(\text{경로1}) \neq Q(\text{경로2}), W(\text{경로1}) \neq W(\text{경로2})$
 Q, W 는 계의 처음과 나중상태가 같더라도 중간에 어떤 과정을 거쳤는가에 따라 달라짐

→ $path\text{-dependent}$

- $Q(\text{경로1}) - W(\text{경로1}) = Q(\text{경로2}) - W(\text{경로2})$

→ $Q - W$: $path\text{-independent}$

- 결론: $Q - W =$ 계의 상태변화를 표현하는 특성임
 → 내부에너지 차이 (ΔE_{int}) 를 나타내는 물리량
 ΔE_{int} : $path\text{-independent}$ 처음과 나중상태에만 의존

Physics 1 38

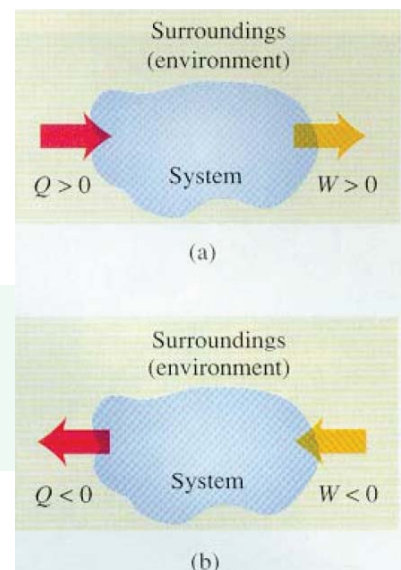
열역학 제 1법칙

- $Q - W =$ 계의 상태변화를 표현하는 특성임
 (에너지 단위를 가짐)
 → 내부에너지 차이 (ΔE_{int}) 임
 → $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$

해석: 계에 열의 형태로 에너지가 더해지면 일부는 외부에 대해서 일을 하는 데 쓰이고, 나머지는 내부에너지로 저장된다.

→ **에너지 보존법칙**

1st - law : $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$
 1st - law (미소변화) : $dE_{\text{int}} = dQ - dW$
 : 에너지 보존법칙



Physics 1 39

열역학 제 1법칙

- Q, W : 상태변수가 아님(전달변수)

→ *path-dependent*

- $\Delta E_{\text{int}} (= Q - W)$: 상태변수 변화

→ *path-independent*

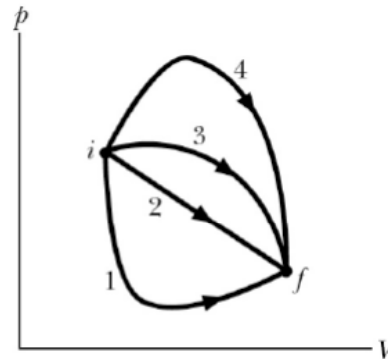
- PV 상태도의 닫힌 경로

(cycle: $f = i$)에 대해서:

$$\begin{cases} \text{상태변수: } \Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = 0 \\ \text{전달변수: } W \neq 0, Q \neq 0 \end{cases}$$

Figure shows four paths on p-V diagram along which a gas can be taken from state i to state f. Rank:

- 1) ΔE_{int} ?
- 2) Work done by gas?
- 3) Heat transferred?

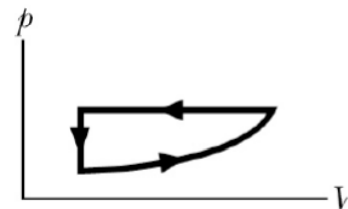


Physics 1 40

Checkpoint

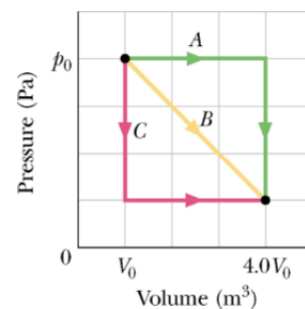
For one complete cycle as shown in the p-V diagram,
Which ones are positive? Negative? Or Zero?

ΔE_{int} ? Net work done by gas W ? Net energy transferred Q ?



Problem#18-45

A gas sample expands from V_0 to $4.0V_0$ while its pressure decreases from p_0 to $p_0/4$. If $V_0 = 1.0 \text{ m}^3$ and $p_0 = 40.0 \text{ Pa}$, how much work is done by the gas if its pressure changes with volume via (a) path A, (b) path B, and (c) path C?



Physics 1 41

Problem

대기압 하에서 100°C 의 물 1.0 kg 을 가열하여 100°C 수증기로 만들었다. 물의 처음 부피는 $1.0 \times 10^{-3}\text{ m}^3$ 이었고 최종 수증기의 부피는 1.671 m^3 이다. 이 과정에서 계의 내부에너지 변화는 얼마인가?

- 계에 들어온 열:

$$\begin{aligned} Q &= \text{기화열(물} \rightarrow \text{수증기)} = L_v m \\ \Rightarrow Q &= (2256\text{ kJ/kg})(1\text{ kg}) \\ &= 2260\text{ kJ} \end{aligned}$$

- 수증기 팽창과정에 한 일: 등압과정

$$\begin{aligned} W &= \int_{V_i}^{V_f} p dV = p_{\text{대기압}} \int_{V_i}^{V_f} dV = p_{\text{대기압}} (V_f - V_i) \\ \Rightarrow W &= (1.01 \times 10^5 \text{ Pa})(1.671\text{ m}^3 - 1.0 \times 10^{-3}\text{ m}^3) \\ &= 169\text{ kJ} \end{aligned}$$

- 열역학 제1 법칙:

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{int}} &= Q - W = 2090\text{ kJ} \\ &= 2260\text{ kJ} \end{aligned}$$

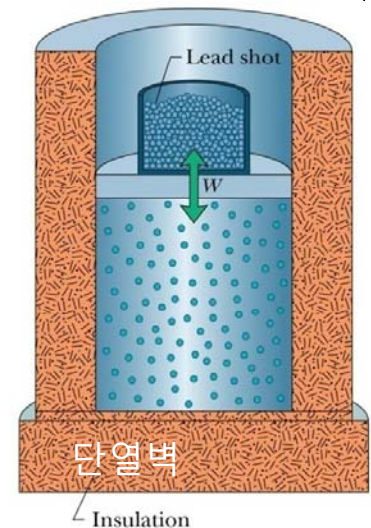
Physics 1 42

특별한 열역학적 과정

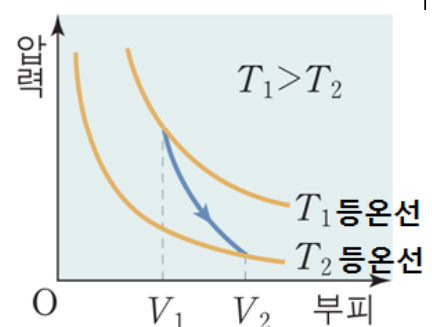
- ▶ 단열과정: 계를 출입하는 열의 차단이 아주 잘 되거나, 과정이 매우 빨리 진행되어서 계와 주위 사이에 열 형태로 에너지 전달이 일어나지 않는 과정

$$Q = 0 \text{ (단열과정)} \Rightarrow \Delta E_{\text{int}} = -W$$

- 계가 일을 하면 ($W > 0$) \rightarrow 내부에너지 감소 ($\Delta E_{\text{int}} < 0$)
- 계가 일을 받으면 ($W < 0$) \rightarrow 내부에너지 증가 ($\Delta E_{\text{int}} > 0$)



상승구름에서 수증기의 응결현상

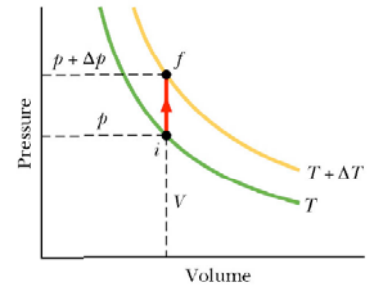


Physics 1 43

▶ **등적과정**: 계의 부피가 일정하게 유지되면서 상태가 변함. 계가 바깥에 일을 해줄 수 없으므로

$$W = 0 \text{ (일정부피과정)} \rightarrow \Delta E_{\text{int}} = Q$$

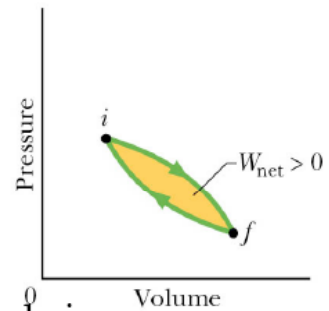
- 계가 열을 흡수 ($Q > 0$) \rightarrow 내부에너지 증가 ($\Delta E_{\text{int}} > 0$)
- 계가 일을 방출 ($Q < 0$) \rightarrow 내부에너지 감소 ($\Delta E_{\text{int}} < 0$)



▶ **순환과정**: 계의 상태가 여러 과정을 거쳐 처음상태로 되돌아오는 과정. 나중상태가 처음상태와 같으므로;

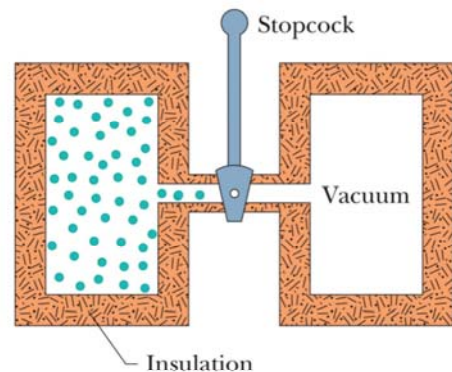
$$\Delta E_{\text{int}} = 0 \text{ (순환과정)} \rightarrow Q = W$$

☞ 순환과정: PV도에서 폐곡선 경로.



자유팽창(Free Expansion)

- 쿡을 열면 왼편의 기체는 오른쪽으로 자발적으로 이동한다.
- 단열벽으로 둘러싸여 있어서 외부에서 열도 차단.



▶ **자유팽창을 하는 과정에서 기체는 (주변에 대해서) 일을 하지 않고, 또 단열이므로**

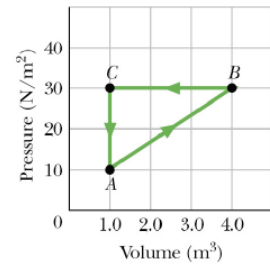
$$Q = W = 0 \text{ (자유팽창)} \rightarrow \Delta E_{\text{int}} = 0$$

☞ 자유팽창에서 온도 변화가 없다(Chap-19)

◆ 에너지의 변화가 없으므로 자유팽창의 역과정도 자발적으로 가능한가?

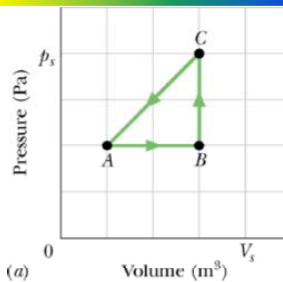
Problem 18-43

Gas within a closed chamber undergoes the cycle shown in the p-V diagram. Calculate the net energy added to the system as heat (Q) in a complete cycle.



A thermodynamic system is taken from state A to state B to state C, and then back to A, as shown in the figure.

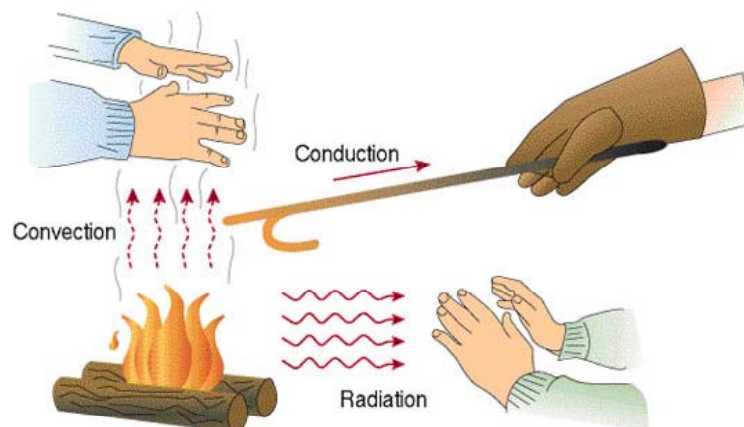
(a)–(g) Complete the table on the right by inserting a plus sign, a minus sign, or a 0 in each indicated cell. (h) What is the net work done by the system as it moved once through the cycle ABCA?



	Q	W	ΔE_{int}
$A \rightarrow B$	(a)	(b)	+
$B \rightarrow C$	+	(c)	(d)
$C \rightarrow A$	(e)	(f)	(g)

Physics 1 46

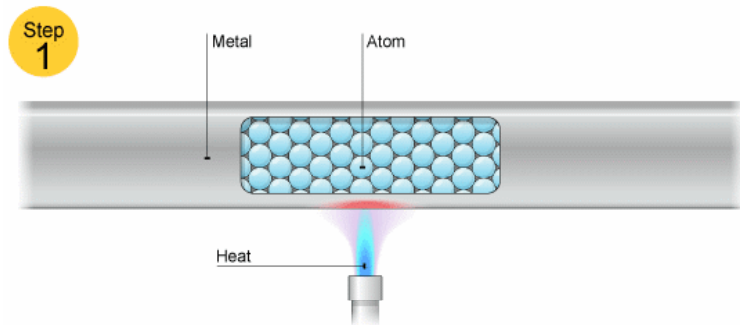
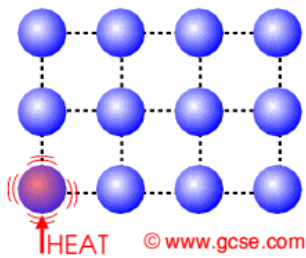
열의 전달



Physics 1 47

열전도 (heat conduction)

- 열전도는 물질의 직접적인 이동을 수반하지 않고 접촉하고 있는 두 물체의 온도 차에 의해서 열이 흐르는 방식이 전도이다.
- 미시적 규모에서 보면 전도는 빠르게 진동하거나 움직이는 원자 또는 분자들이 이웃 원자 또는 분자들과의 상호작용을 통해서 열이 전달되는 것이다.
- 전도는 고체에서는 가장 중요한 열전달 방법이다.
- 고체에서 전도는 결정을 이루는 분자들의 진동의 조합과 자유전자의 이동에 의해서 일어난다.
- 기체와 액체에서는 분자들의 충돌과 그들의 무작위 운동이 일어나는 동안의 확산에 의해서 일어난다.



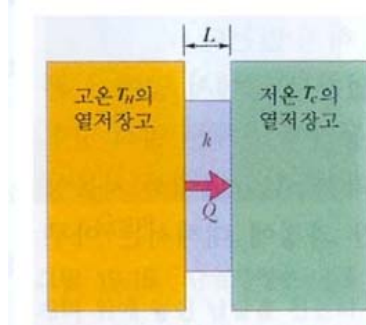
Physics 1 48

열전도

- 단위시간당 전달되는 열에너지=열전도율
t초동안에 Q만큼의 열량이 전달되는 경우

$$P_{\text{cond}} = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_H - T_C}{L}$$

$k = \text{열전도도}$



- 열전도에 대한 저항:

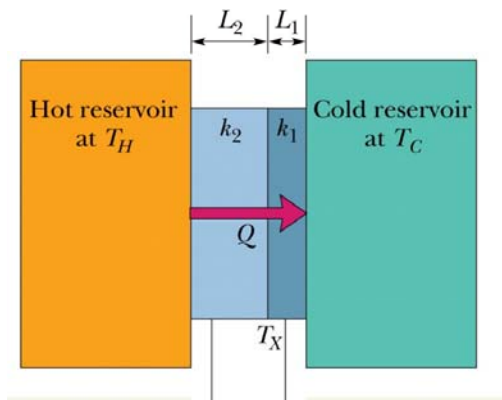
$$R = \frac{L}{k}$$

: R이 크면 나쁜 열전도체(좋은 단열재)

Note, $P = A \frac{\Delta T}{R}$

Physics 1 49

복합슬랩에서 열전도



중간에 열이 축적이
안되므로 열전도율을 동일

$$P_{cond} = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_X - T_C)}{L_1}$$

$$\Rightarrow T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1}$$

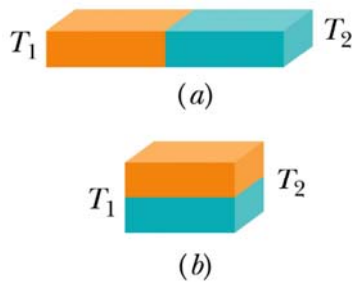
$$\therefore P_{cond} = \frac{A (T_H - T_C)}{L_1 / k_1 + L_2 / k_2} = \frac{A (T_H - T_C)}{\sum_i (L_i / k_i)}$$

표. 몇가지 재료의 열전도도 [W/(m · K)]

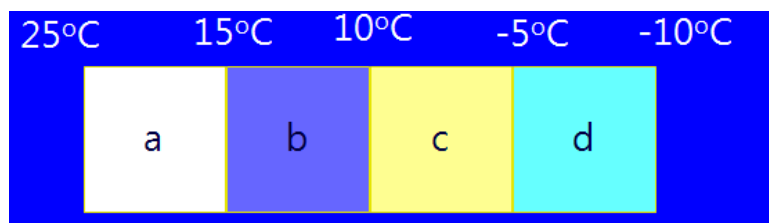
$T_H > T_C$

금속재료	열전도도	건축재료	열전도도	기체	열전도도
스테인레스 스틸	14	폴리우레탄 거품	0.024	건조한 공기	0.026
알루미늄	235	유리섬유	0.048	수소	0.18
구리	401	백송	0.11		
은	428	창유리	1.0		

Physics 1 50

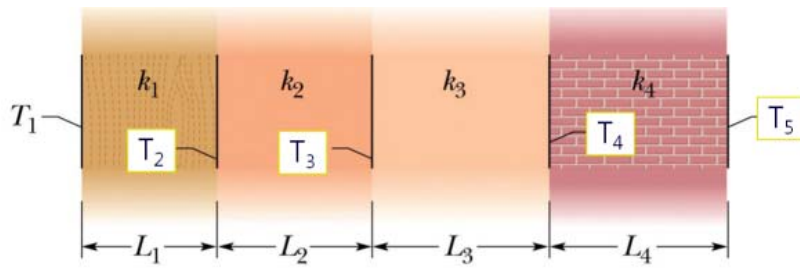


Q1. T_1 쪽에서 $T_2 (< T_1)$ 쪽으로
열전도율이 더 큰 경우는?



Q2: 표면 경계면에서 복합슬랩(두께가 같다)
의 온도가 그림과 같을 때, 열전도도 순으로
나열하면?

Physics 1 51



$$T_1 = 25^\circ\text{C}, T_2 = 20^\circ\text{C}, T_5 = -10^\circ\text{C}$$

$$\text{If } L_4 = 2L_1, k_4 = 5k_1, T_4 = ?$$

열전율은 어디서나 같아야(중간에 열이 새지 않으면)

$$P_1 = k_1 \frac{T_1 - T_2}{L_1}, P_4 = k_4 \frac{T_4 - T_5}{L_4}$$

$$T_4 = T_5 + \frac{k_4}{k_1} \frac{L_1}{L_4} (T_1 - T_2)$$

$$T_4 = -10^\circ\text{C} + \frac{5k_1}{k_1} \frac{L_1}{2L_1} (25^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$T_4 = -10^\circ\text{C} + 5 \cdot \frac{1}{2} \cdot 5^\circ\text{C}$$

$$T_4 = -10^\circ\text{C} + 12.5^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 2.5^\circ\text{C}$$

유리창을 통한 열전도율

유리창의 크기가 20cm, 15cm이고 두께가 0.32cm인 유리창문이 있다. 유리창 바깥의 온도가 -15°C 이고, 내부온도가 22°C 일 때 이 유리창을 통해서 집밖으로 빠져나가는 열의 흐름률은?

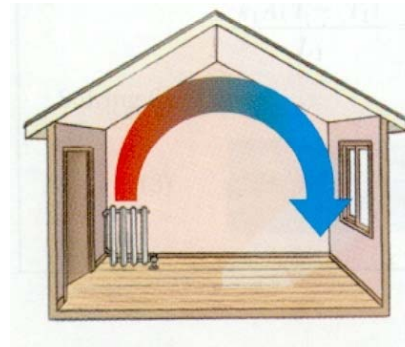
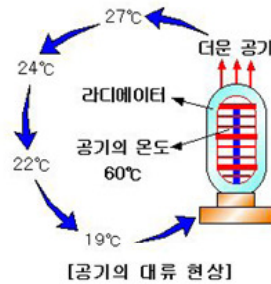
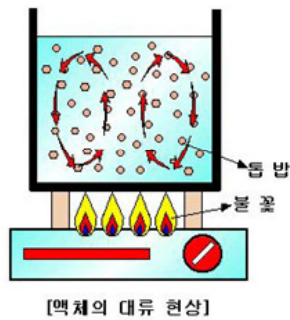
$$\begin{cases} \Delta T = 22^\circ\text{C} - (-15^\circ\text{C}) = 37^\circ\text{C} \\ \text{유리창두께: } L = 0.32 \times 10^{-2} \text{m} \\ \text{유리창넓이: } A = (0.2\text{m}) \times (0.15\text{m}) = 0.03\text{m}^2 \\ \text{유리의 열전도도: } k = 0.63\text{W}/(\text{m.K}) \end{cases}$$

$$P = kA \frac{\Delta T}{L} = (0.63)(0.03) \frac{37}{0.32 \times 10^{-2}} = 220\text{W}$$

- ✓ 약간 과장된 수치임: 유리창의 안쪽 표면에서 온도는 실내공기온도보다 낮고, 바깥쪽 표면에서 온도는 외부온도보다 높다. 따라서 실제로는 ΔT 가 더 작다 \rightarrow 따라서 P도 마찬가지로

대류

- 기체나 액체에서 물질이 이동함으로써 열이 전달되는 현상.
- 기체나 액체가 부분적으로 가열되면 가열된 부분이 팽창하면서 밀도가 작아져 위로 올라가고 위에 있던 밀도가 큰 부분은 내려오게 되는데 이런 과정이 되풀이되면서 기체나 액체의 전체가 고르게 가열됨.
- 액체나 기체는 열의 전도율이 작기 때문에 대부분의 열은 대류에 의하여 전달된다.

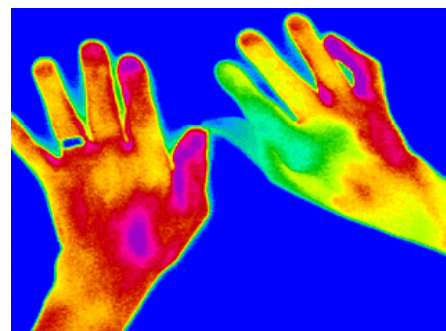
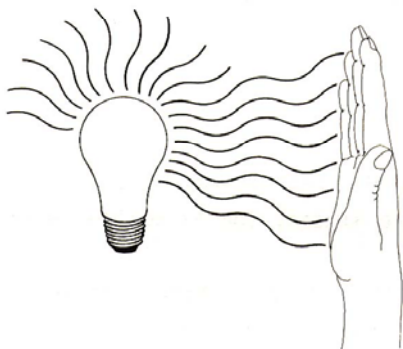


Physics 1 54

복사

- 열이 매질을 통하지 않고 전자기파에 의해 고온의 물체에서 저온의 물체로 직접 전달되는 현상이다
- 온도가 있는 모든 물체는 모든 파장의 전자기파를 방출한다.
- 절대온도가 T(K)인 표면으로부터 빛의 형태로 내보낼 수 있는 최대 방출열량은 단위 표면적당 σT^4 ($\sigma=5.673 \times 10^{-8} \text{W/m}^2 \cdot \text{K}^4$: Stefan-Boltzmann 상수)를 넘지 못함
- 낮은 온도에서는 주로 적외선이 나옴.

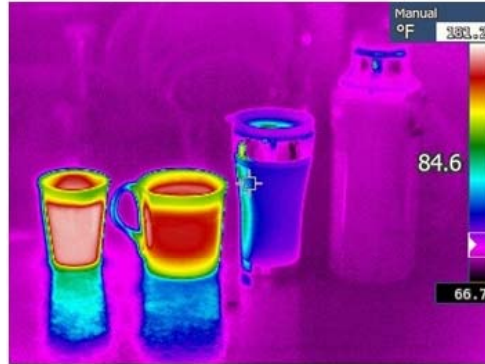
적외선 카메라를 통해 본 우리 몸이 방출하는 복사에너지



Physics 1 55

Minimizing Energy Transfer

- The Thermos bottle, also called a Dewar(1890) flask is designed to minimize energy transfer by conduction, convection, and radiation. The standard flask is a double-walled Pyrex glass with silvered walls and the space between the walls is evacuated.



적외선 영상: 보온병의 입구만
제외하고는 방안온도와 동일함

