

Part II: 열 물리학

1장: 온도와 열

2장: 열과 상태변화

3장: 열의 전달

1장: 온도와 열

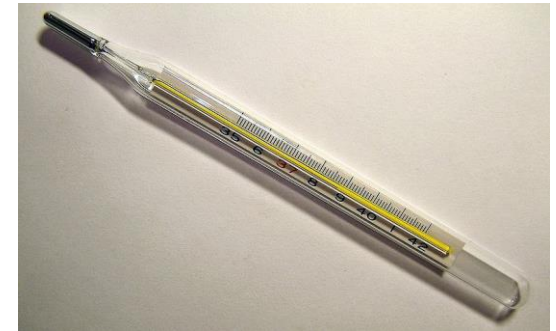


도자기는 굽는 온도에 따라 토기, 도기, 석기, 자기로 구분된다.

1. 온도와 열 평형
2. 열과 상태변화
3. 열의 전달

1. 온도와 열 평형

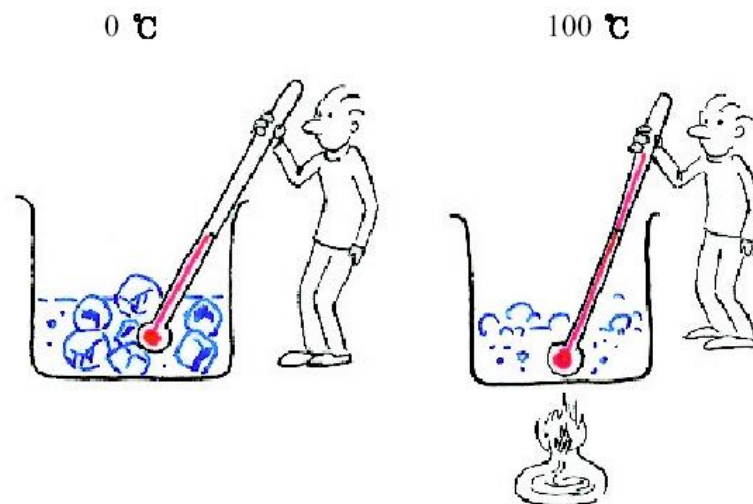
- ◆ 감각적으로 느끼는 **덥고 추운 정도**를 온도로 나타낸다.
- ◆ 온도는 어떻게 정의할까? 온도계의 원리는?



여러 종류의 온도계: (왼쪽) 갈릴레이 온도계, (가운데) 바이메탈을 이용한 온도계, (오른쪽) 체온을 재는 수은온도계[위키피디아].

온도계와 눈금

- ◆ 수은, 알코올 온도계: 물질(수은, 알코올)이 팽창과 수축을 이용
- ◆ 섭씨온도(Celisius): 1기압에서 물이 얼 때의 온도를 0°C 로 정의하고 물이 끓을 때의 온도를 100°C 로 정의

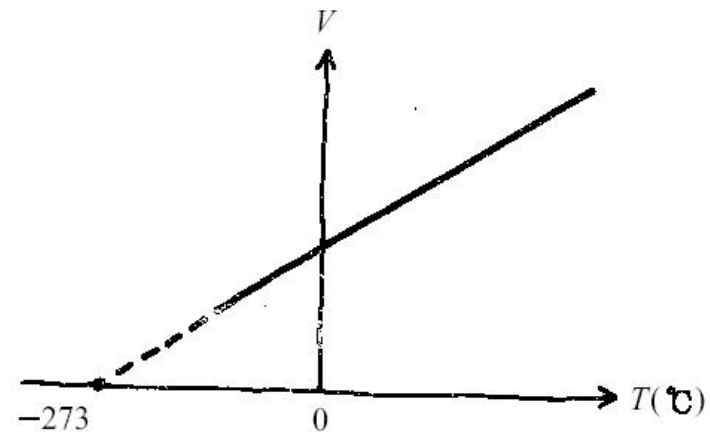


기체 온도계

- ◆ 샤를의 법칙: 기체의 온도를 1°C 씩 서서히 내릴 때마다 부피가 0°C 의 부피에 비해 $1/273$ 씩 줄어든다(기체의 종류에 무관).
- ◆ 이런 기체의 특성을 온도계에 응용



Jacques Charles
(1746-1823)
[위키피디아].



온도의 바닥과 절대온도

- ◆ 온도의 바닥: 샤를의 법칙에 의하면 $-273\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에 기체의 부피가 0이 될 것. 이 온도를 절대영도(0 K)라고 한다.
- ◆ 반면에 높은 온도에는 어떤 한계가 존재하지 않는다.
- ◆ 절대온도의 국제 표준:

$$\text{절대온도(K; Kelvin)} = \text{섭씨온도} + 273.15\text{도}$$

샤를, 보일의 법칙

- ◆ 샤를의 법칙: 압력이 일정할 때 기체의 부피는 절대온도에 비례

$$V/T = \text{일정}$$

- ◆ 보일의 법칙: 온도가 일정할 때 기체의 부피가 압력에 반비례하는 사실을 발견하였다.

$$PV = \text{일정}$$

- ◆ 보일-샤를의 법칙:

$$PV/T = \text{일정}$$

이상기체 방정식

- ◆ $PV/T = \text{일정}$ 을 만족하는 기체를 이상기체(ideal gas)라고 한다.
- ◆ 부피가 일정하면 이상기체의 온도는 압력에도 비례한다.

$$P/T = \text{일정}$$

질문: 기체상수

- ◆ 1기압 1몰의 기체는 0°C 에서 부피가 22.4 l 라는 것을 써서 **기체상수**(PV/T)의 값을 구할 수 있다. 기체상수의 값은?
- ◆ 20°C , 1기압에서 기체 밀도는 0°C 와 비교할 때 어떻게 바뀔까?

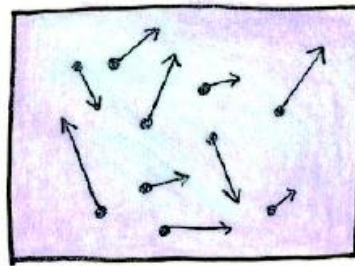
온도의 표준

- ◆ 기체 온도계: **희박한 헬륨**을 이용
- ◆ 기체 온도계의 문제점: 물의 어는점과 끓는점은 압력에 민감
- ◆ **온도의 표준**: 자연에 존재하는 유일한 상태인 물의 **삼중점**(압력이 610 Pa일 때 물과 수증기, 얼음이 공존)을 이용
- ◆ 삼중점의 온도를 $0.01\text{ }^{\circ}\text{C} = 273.16\text{ K}$ 로 정의하고,

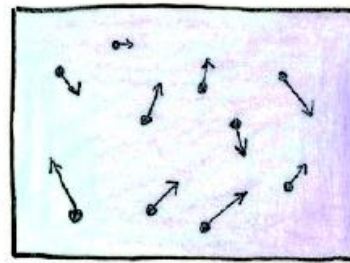
$$\text{절대온도(K)} = \text{섭씨온도} + 273.15\text{도}$$

계와 열 평형

- ◆ 액체나 기체 속에는 아보가드로 수(6.02×10^{23} /mol)만큼 많은 입자가 들어있기 때문에 운동상태(속도분포)를 통계적으로 다룰 수 밖에 없다.
- ◆ 이러한 입자들의 집단을 계(system)이라고 한다.
- ◆ 열 평형상태: 계에 들어있는 수많은 입자들의 운동상태가 통계적으로 동질성을 띠는 경우.



열평형계 1

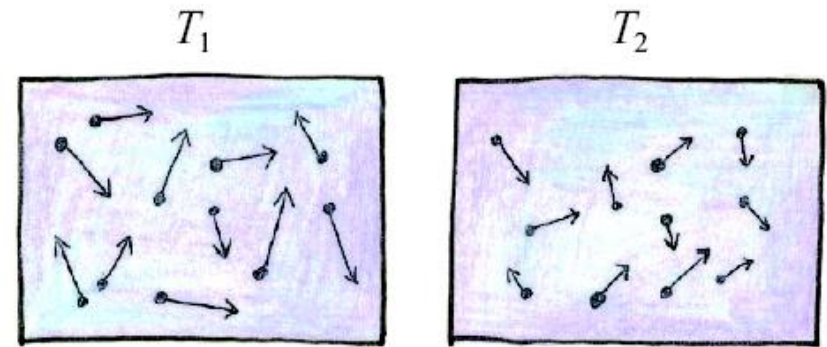


열평형계 2

온도의 다른 의미: 열 평형 상태

- ◆ 열 평형상태에서는 **시간이 지나도** 계의 온도가 변하지 않음
- ◆ 서로 다른 두 계가 열 평형상태에 있게 되면 두 계의 운동 상태는 **통계적으로 동등**

- ◆ **온도**: 두 계가 서로 같은 열 평형상태(동질성)에 있는지 여부를 표현하는 양.



$T_1 > T_2$ 일 때 T_1 인 계의 입자들의 운동이 T_2 인 계보다 활발한 것을 의미

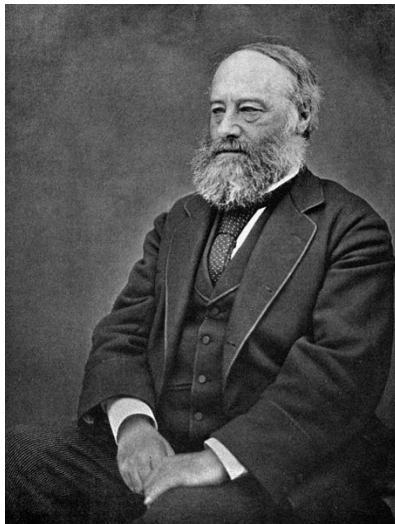
2. 열과 상태 변화

- ◆ 물체에 **열**을 가하면 물체의 온도가 높아지고 물체의 평형 상태를 변화시킨다. 그러나 같은 열을 받아도 온도가 달라지는 정도가 다르다.
- ◆ 같은 물체에 열을 가해도 온도가 높아지지 않고 **물체의 상**이 변하기도 한다.

열과 일

- ◆ 1 cal: 14.5°C의 물 1 g을 1°C 높이는 데 필요한 열량
- ◆ 역학적 에너지와 열이 동등 (줄의 실험)

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



(왼쪽) James Joule
(1818–1889), (오른쪽) 줄이
행한 실험 장치
[위키피디아].

질문: 열과 일

- ◆ 체중 50 kg인 여학생이 열량이 150 kcal인 케이크 한 조각을 먹고 계단오르기로 운동하여 이 열량을 소모하고자 한다. 운동으로 소모하는 열량은 운동을 하기 위해 필요한 일의 10배 정도 든다(효율 10%)고 할 때 이 여학생은 얼마나 높은 계단을 올라가야 할까?

비열

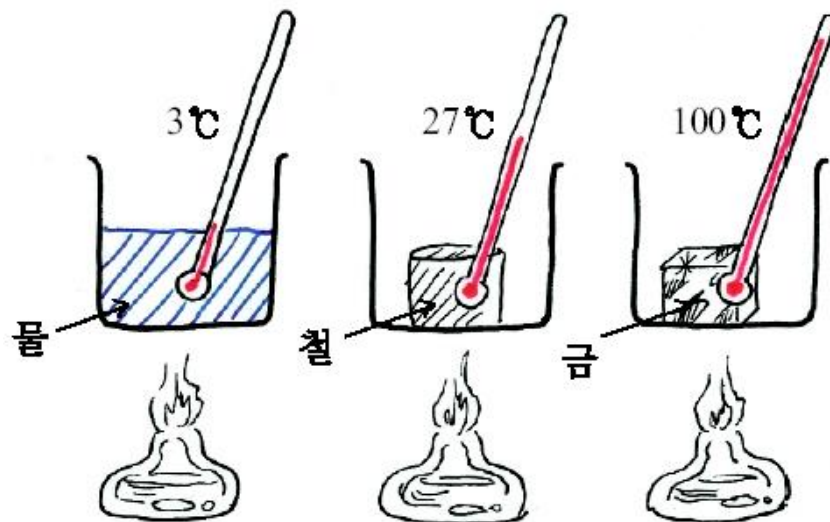
◆ 같은 열을 가해도 물질에 따라 온도가 상승하는 정도가 다르다(아래 그림).

◆ **비열**: 단위 질량 물질을 1°C 만큼 올리기 위해 드는 열량

◆ 질량 m 인 물질을 ΔT 높이기 위해서 드는 열량

$$\Delta Q = c m \Delta T$$

◆ 물의 비열은 $1 \text{ kcal/kg}^{\circ}\text{C}$

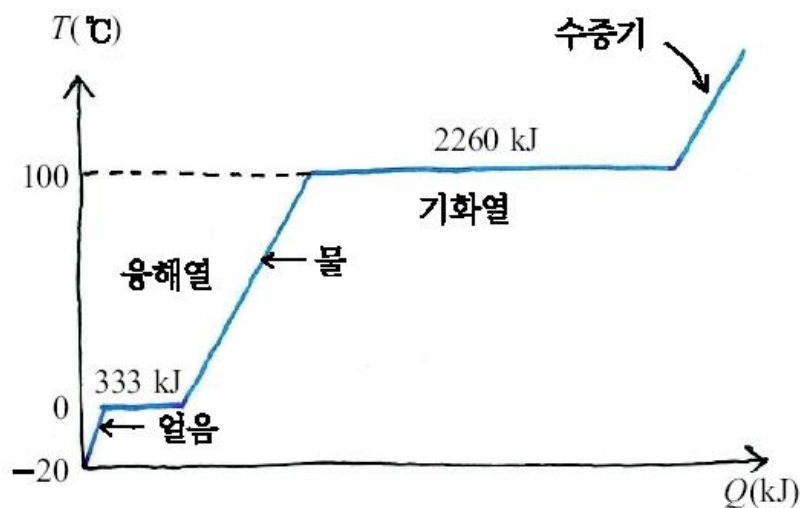


여러 물질의 비열

물질	J/kg℃	kcal/kg℃
알루미늄	900	0.125
구리	387	0.0924
유리	837	0.200
금	129	0.0308
얼음	2090	0.500
철	448	0.107
납	128	0.0305
은	234	0.056
수증기	-2010	0.480
물	4186	1.00

잠열

- ◆ 얼음이 녹을 때와 물이 증발할 때는 온도가 변하지 않는다. 상태가 변할 때 드는 열을 **잠열**이라고 한다.
- ◆ 얼음 1 kg을 녹이는 데는 333 kJ(**융해열**)이 필요하고 물 1 kg을 수증기로 바꾸는 데는 2260 kJ(**기화열**)이 필요하다.



얼음을 가열하여 수증기로
만들 때 온도 변화

여러 물질의 잠열

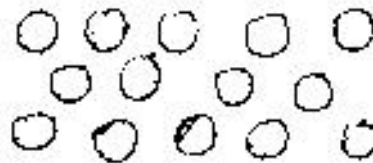
물질	녹는점(°C)	융해열(J/kg)	끓는점(°C)	응축열(J/kg)
헬륨	-269.65	5.23×10^3	-268.93	2.09×10^4
질소	-209.97	2.55×10^4	-195.81	2.01×10^5
에틸알코올	-114	1.04×10^5	78	8.54×10^5
물	0.00	3.33×10^5	100.00	2.26×10^6
알루미늄	660	3.97×10^5	2450	1.14×10^7
은	960.80	8.82×10^4	2193	2.33×10^6
금	1068.00	6.44×10^4	2660	1.58×10^6
구리	1083	1.34×10^5	1187	5.06×10^6

잠열의 원인

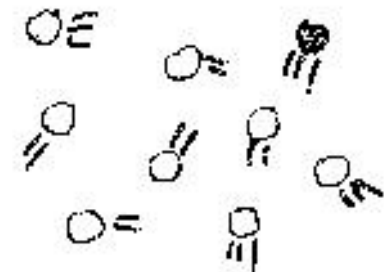
- ◆ 상이 바뀔 때 잠열이 필요한 것은 상이 바뀌면서 분자들의 배열구조가 바뀌기 때문이다(아래 그림).
- ◆ 상이 바뀌기 위해서는 분자들이 이웃 분자들과 결합을 느슨하게 하거나 끊을 수 있을 만한 에너지를 얻어야 한다.



고체



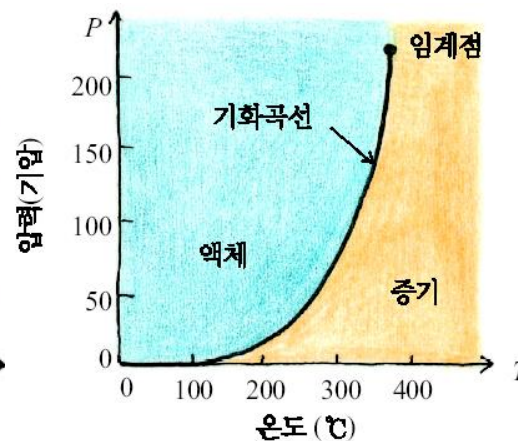
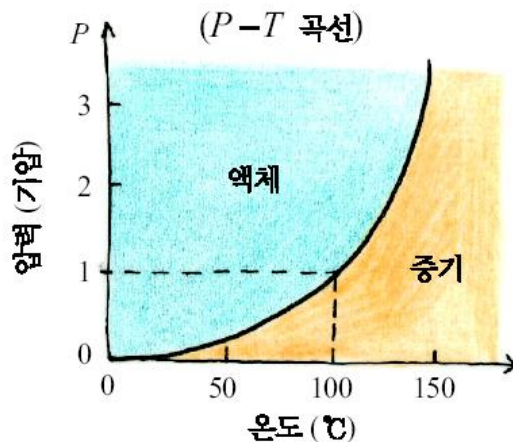
액체



기체

상태 그림(phase diagram)

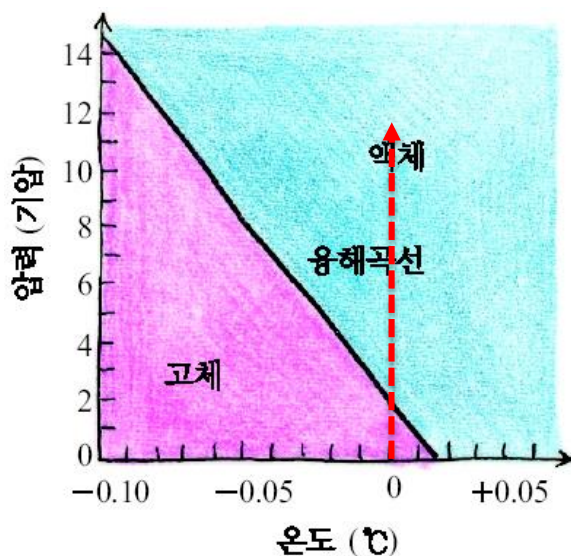
- ◆ 열을 가해 상태를 변화시킬 때는 온도 뿐만 아니라 압력의 영향도 받는다. 온도와 압력의 변화에 따라 상태를 나타낸 그림을 상태 그림이라고 한다.



(왼쪽) 물의 상태 그림, 액체에서 기체로 변하는 모습이 나타나 있다.
(오른쪽) 왼쪽의 그림을 큰 범위에서 본 것. 액체와 기체를 구별하는 선을 기화곡선이라고 한다.

임계점, 융해곡선

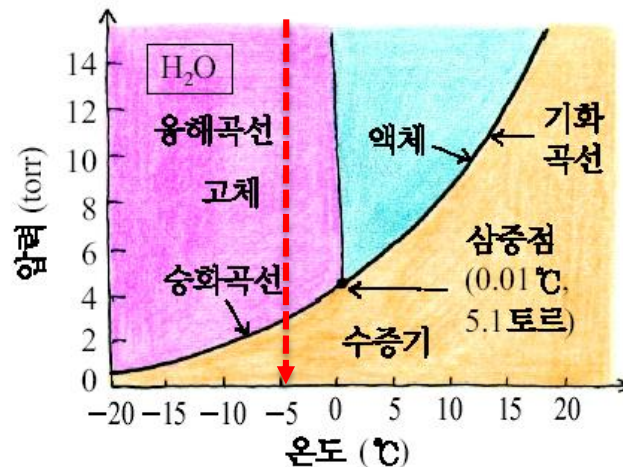
- ◆ **임계점**(critical point): 상태 그림에서 액체와 기체의 구별이 없어지는 점. 물의 임계점은 647.4 K ($344.3\text{ }^{\circ}\text{C}$), $221.2 \times 10^5\text{ Pa}$ (약 218기압)이다.
- ◆ 얼음(고체)과 물(액체)은 **융해곡선**으로 구별된다(아래 그림).



얼음은 융해곡선이
왼쪽으로 기울어져
있기 때문에 $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 에
있는 얼음을
압력을 가하기만
해도(화살표)
얼음이 녹는다.

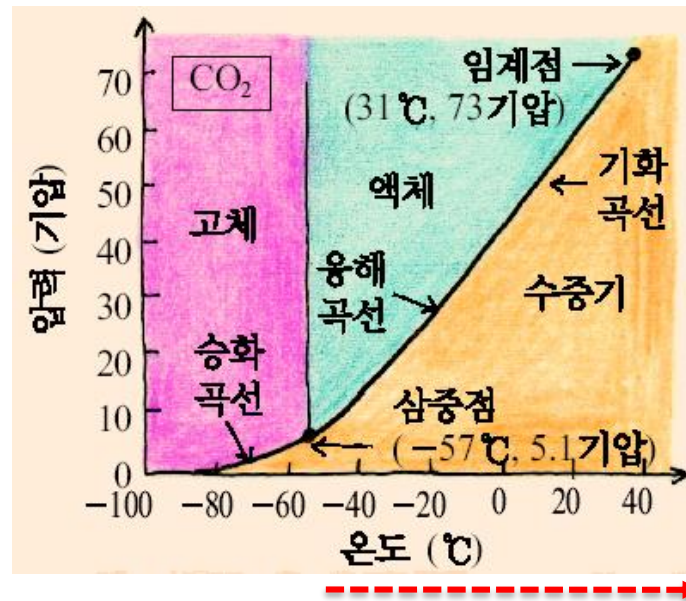
삼중점

- ◆ 얼음(고체), 물(액체), 수증기(기체)가 동시에 존재하는 **삼중점**이 보인다. 상태 그림에서 위치는 610 Pa(5.1 torr), 273.16 K(0.01 °C)이다.
- ◆ 삼중점보다 낮은 압력에서는 액체가 존재할 수 없다. 이 기압에서는 온도가 증가함에 따라 고체에서 기체로 바로 변한다(**승화**).



질문: 드라이아이스의 승화

- ◆ 드라이아이스는 대기압에서 녹지 않고 바로 기화되는 이유는?



열 팽창

- ◆ 물체에 열을 가하면 열 평형상태가 바뀌고 온도가 높아진다. 더불어 부피가 늘어나는데 누적될 경우 그 효과를 무시할 수 없다.



옆의 그림은 다리의
철 이음쇠인데
열팽창을 고려하여
사이를 벌려놓았다.

선팅창 계수

- ◆ 열을 받으면 보통 고체는 길이와 부피가 늘어난다.
- ◆ 이때 늘어난 길이($\Delta L = L - L_0$)는 원래의 길이(L_0)와 온도증가($\Delta T = T - T_0$)에 비례한다.

$$\Delta L / L_0 = \alpha \Delta T$$

- ◆ 이 비례상수 α 는 물질의 열특성을 나타내고 **선팅창 계수**라고 부른다.

여러 물질의 상온에서 선팽창 계수

물질	$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	물질	$\alpha(10^{-6}/^{\circ}\text{C})$
얼음	51	보통유리	9
납	29	파이렉스유리	3.2
알루미늄	23	다이아몬드	1.2
놋쇠	19	Invar(불변강: 철과 니켈의 합금)	0.7
구리	17	수정	0.5
콘크리트	12		
강철	11		

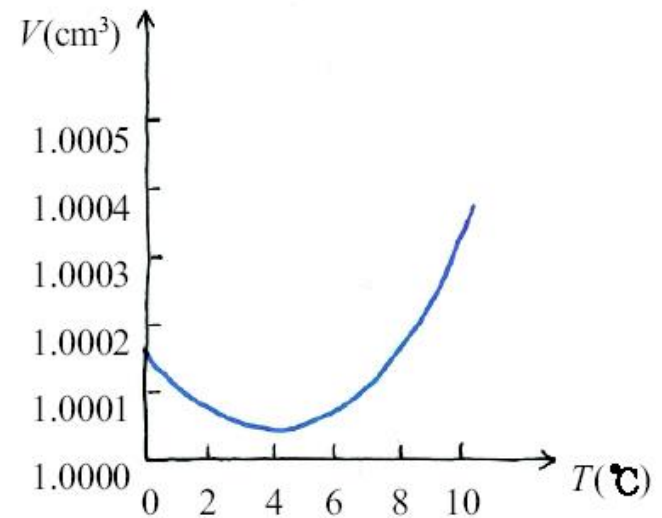
부피 팽창 계수

- ◆ 부피 팽창 계수 β 는 $\Delta V/V_0 = \beta \Delta T$ 로 정의된다.
- ◆ 부피는 길이의 세제곱이므로 부피증가는 $\Delta V = (L_0 + \Delta L)^3 - L_0^3 = 3L_0^2 \Delta L$ 가 된다.
- ◆ 위의 식을 $V_0 = L_0^3$ 로 나누면

$$\Delta V/V_0 = 3L_0^2 \Delta L / L_0^3 = 3\Delta L / L_0 = 3\alpha \Delta T$$
 가 되어 부피 팽창 계수는 선 팽창 계수의 세배가 된다.
 마찬가지로 면적 팽창 계수는 선 팽창 계수의 두배가 된다.

물의 비정상적인 열팽창

- ◆ 보통물질은 온도가 올라가면 부피가 늘어난다. 그러나 0°C 부터 4°C 사이의 물은 그렇지 않다. 즉, 4°C 의 물이 0°C 의 물보다 가볍다.
- ◆ 물의 온도가 0°C 가까이 내려가면 차가운 물은 가벼우므로 위로 떠오르고 덜 차가운 물은 밑으로 가라앉는다. 이 때문에 물은 표면부터 얼기 시작한다.

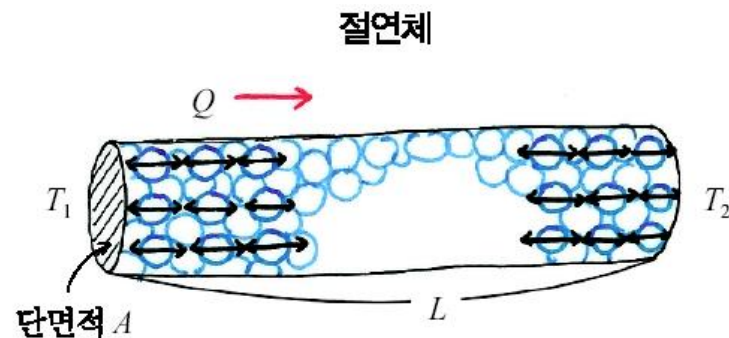
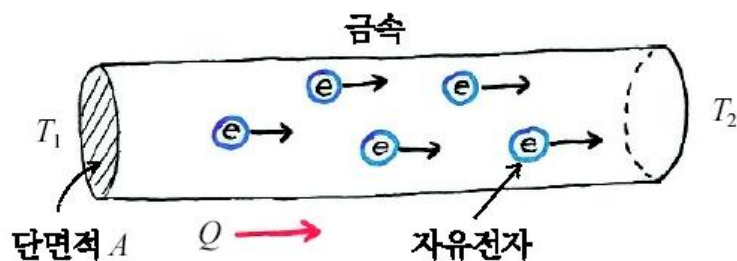


3. 열의 전달

- ◆ 물체에 열을 가하려면 열을 한 곳에서 다른 곳으로 전달해야 한다. **열을 전달**하는 방법에는 어떤 것이 있을까?
- ◆ 열을 전달하는 방법으로는 금속 등을 매개체로 하는 **열전도**, 공기처럼 매개체가 직접 움직이는 **대류**, 그리고 열 에너지가 전자기파 형태로 바뀌어 전달되는 **복사**가 있다.

열 전도

- ◆ 물질마다 열을 전달하는 속도가 다르다.
- ◆ 금속은 자유전자가 열을 직접 전달한다. 그러나 부도체는 자유 전자가 없다. 대신에 고체분자들이 진동하여 이웃 분자에 열을 전달한다. 이 때문에 부도체는 금속에 비해 열을 잘 전달하지 못한다.



열 전도도

- ◆ 단위시간 동안 이동하는 열량을 **열류**라고 한다:

$$H = dQ/dt$$

- ◆ 열류는 단면적 A 와 온도차이 $\Delta T = T_1 - T_2$ 에 비례하고 길이 L 에는 반비례한다.

$$H = kA\Delta T/L$$

비례상수 k 를 **열전도도**라고 하고 단위는 W/mK이다.

여러 물질의 열 전도도 k (W/mK)

금속	열 전도도	여러 고체	열 전도도
은	406.0	얼음	1.6
구리	385.0	유리	0.8
알루미늄	205.0	콘크리트	0.8
놋쇠	109.0	붉은 벽돌	0.6
강철	50.2	코르크	0.04
납	34.7	나무	0.12-0.04
수은	8.3	스티로폼	0.01
기체	열 전도도	기체	열 전도도
공기	0.024	헬륨	0.14
수소	0.14	산소	0.023

질문: 열 전도

- ◆ 면적이 3 m^2 이고 두께가 3.2 mm 인 사무실 유리창을 통해 빠져나가는 열류를 구하여라. 사무실 안의 온도는 15°C 이고 밖의 온도는 -5°C 라고 한다. 유리의 열전도도는 0.8 W/mK 이다. 만약 두께가 4배인 유리창을 사용할 경우 열류는 얼마로 바뀔까?

복사

- ◆ 슈테판-볼츠만의 법칙: 복사가 내는 파워 H (단위: J/s=W)는 빛을 내는 물체의 표면 절대온도의 네 제곱에 비례한다.

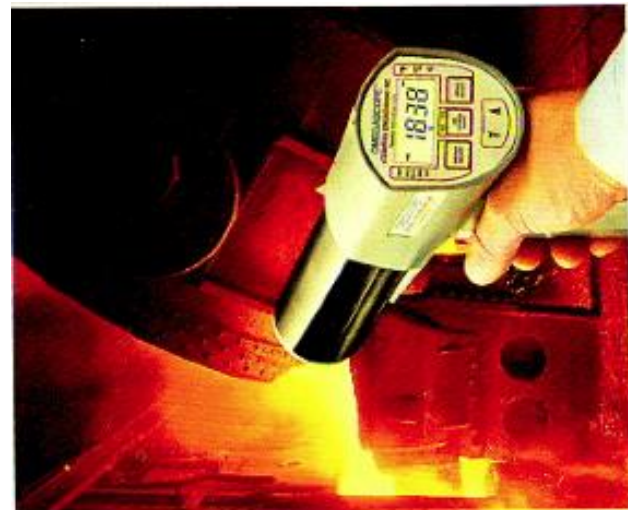
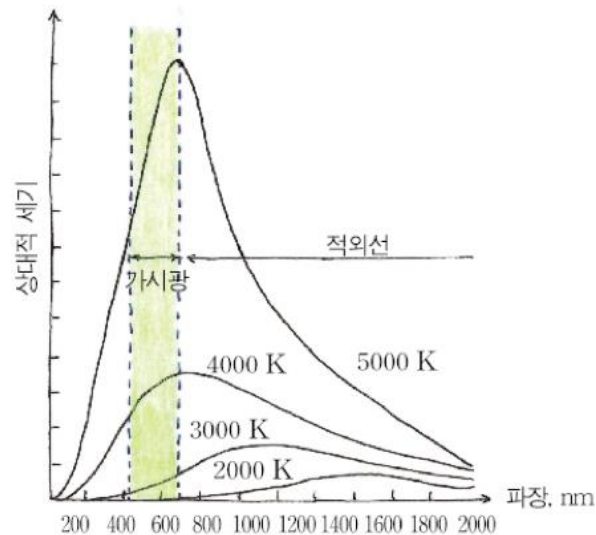
$$H = eA\sigma T^4$$

A 는 물체의 표면적이고 $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

- ◆ e 는 0과 1사이의 값으로 방출률이라고 하고 표면 상태를 나타낸다.

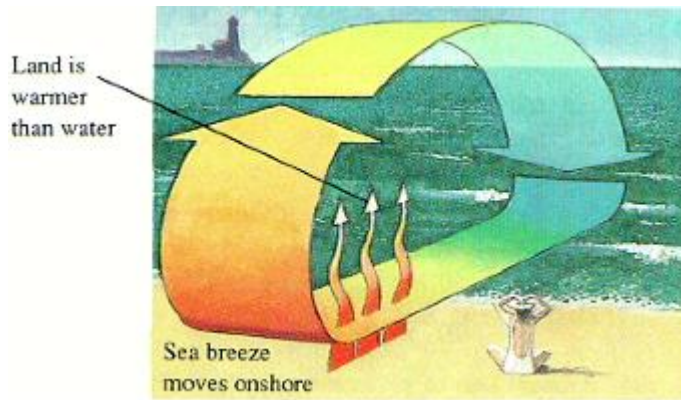
복사 스펙트럼

- ◆ 복사 에너지는 모든 물체의 표면에서 방출되고 복사 빛깔(스펙트럼)을 조사하면 그 물체의 표면온도를 알 수 있다(그림 왼쪽).
- ◆ 파이로미터(pyrometer)는 용광로에서 나오는 빛의 색깔로 용광로의 온도를 잴다(그림 오른쪽).
- ◆ 태양에서 나오는 빛은 노랑-녹색이 가장 강하므로 표면온도가 6000 K임을 알 수 있다.

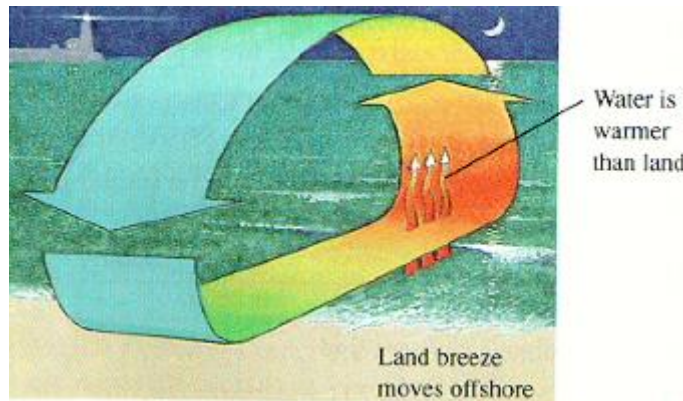


대류

- ◆ 기체는 더워지면 가벼워져 상승하고 차가워지면 하강한다. 온도차이가 생기면 유체는 열팽창에 의해 밀도가 달라지고 이에 따라 유체가 이동하여 대류가 생긴다.



낮에는 땅이 더 빨리 뜨거워지므로 땅 위의 공기가 상승한다 → 바람이 물에서 땅으로 분다.



밤에는 땅이 더 빨리 식기 때문에 물 위의 공기가 상승한다 → 바람이 땅에서 물로 분다.

단원요약

- ◆ 온도란 많은 입자들의 열평형을 재는 양이다. 온도 1 K 가 줄어들면 이상기체의 부피가 $1/273$ 씩 줄어든다.
- ◆ 열은 에너지와 동등하고 $1 \text{ cal} = 4.186 \text{ J}$ 이다. 단위질량 당 온도 1 K 올리기 위해 필요한 열량을 비열이라고 부른다.
- ◆ 물질이 존재하는 상태는 압력, 부피, 온도에 따라 다르고 상태그림으로 표시한다. 곡선이 끊어지는 점을 임계점, 고체, 액체, 기체가 동시에 존재하는 점을 삼중점이라고 한다.
- ◆ 온도 변화에 의해 단위 길이당 늘어나는 길이변화를 선팽창 계수라고 한다.
- ◆ 열을 전달하는 방법에는 열전도, 대류, 복사 등이 있다.