Principles of Physics

Thermodynamics
PART 1

seol@gsa.hs.kr

두 번 안준다.
오타 찾거나 오류 찾으면 선물 드립니다.

반번호 : (   )

이름 : (   )

Contents

Chapter 18

Temperature, Heat, and the First Law of Thermodynamics

18.1 Temperature

열역학(Thermodynamics)은 계(system)의 (내부에너지)가 어떻게 되는지, 그것이 어떻게 (변화)하는지 연구하고 응용하는 분야이다. 내부에너지란 무엇인가? 열이란 무엇인가? 온도는 무엇인가? 먼저 온도에 대해 먼저 알아보자.

Temperature

온도는 SI 기본 물리량이다. 과학은 **Kelvin** 척도를 이용하여 온도를 나타내고, 단위는 켈빈(K)을 쓴다. 물체의 온도는 한없이 올릴 수 있어도, 켈빈온도의 0인 *절대영도* 아래로 내려갈 수 없다.

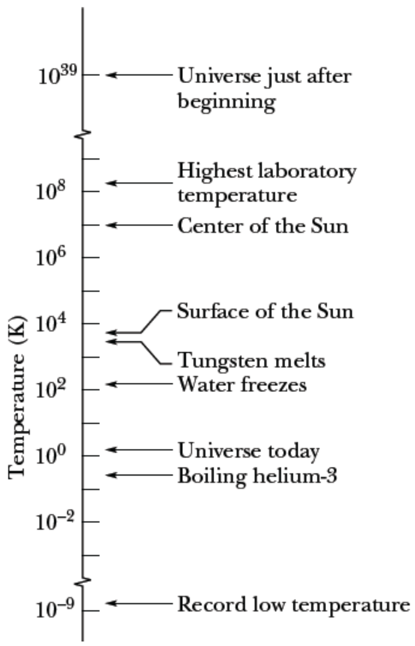


Fig. 18.1.1: Some temperatures on the Kelvin scale. Temperature $T = 0$ corresponds to $10^{-\infty}$ and cannot be plotted on this logarithmic scale.

Fig. 18.1.1은 켈빈 척도로 나타낸 여러 온도이다. 생성 직후 우주의 온도는 10^{39} K이었고, 팽창하며 현재 평균 온도는 3 K이다.

chapter: 온도, 열, 열역학 제1법칙
section: 온도
영하 10 °C의 냉동실 안의 얼음 온도는?
영하 10 °C의 바깥에서 쇠막대와 수건의 온도는 무엇이 더 높을까?
둘다 같다. 냉동실 안의 두 물체인 것이다.
쇠막대가 차갑다고 느끼는 이유는 열을 뺏길 때 춥다고 느끼기 때문이다.
쇠막대는 수건보다 우리 몸에서 열을 더 많이 뺏어갈 수 있다.
우리는 열과 온도를 구분할 수 있어야 한다.

Kelvin scale

독일 연구팀이 **2021.08.**에 절대영도에 가까운 냉각실험에 성공 발표함.
1. 진공 상태로 용기에 루비듐 원자 가스 **10**만 개를 넣어 자석에 넣고 **2**나노켈빈까지 온도를 낮추고 보스-아인슈타인 응축을 발생
2. 실험 설비를 **120m** 자유 낙하시켜 무중력 상태로 하는 동시에 진공 용기 속에 자기 온오프를 전환
- 자기장이 없어지면 가스는 팽창하고 자기장이 있으면 가스는 다시 수축
이를 빠르게 반복해 가스가 운동을 중지하고 온도를 효과적으로 감소, 가스 온도를 **38**피코켈빈까지 낮추는 데 성공.

Kelvin 척도로 나타낸 온도. $T = 0$은 $10^{-\infty}$에 해당하므로 주어진 로그 눈금에 표시할 수 없다.

우주 공간의 온도(3 K)는 어떻게 측정하였을까?
우주배경복사
(CMB - Cosmic Microwave Background)를 이용한다.
복사 공식을 사용함.

The Zeroth Law of Thermodynamics

sub: 열역학 제0법칙

열역학 제0법칙은 물체의 *열평형*을 기술한다. 제1법칙과 제2법칙이 발견되고 이름이 붙여진 지 한참이 지난 후에 정립되었으나 온도라는 개념이 나머지 두 법칙의 기본이 되므로 논리적 순서에 따라 제0법칙으로 명명되었다.

Sss...

A와 B는 서로 모르는 상태이다.
C가 A에게 친구라고 인사하고, B에게도 친구라고 인사한다.
그렇다면 A와 B는 서로가 친구임을 알 수 있다.

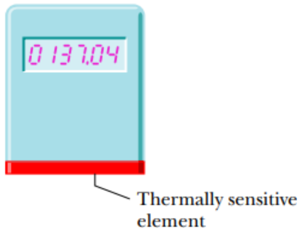
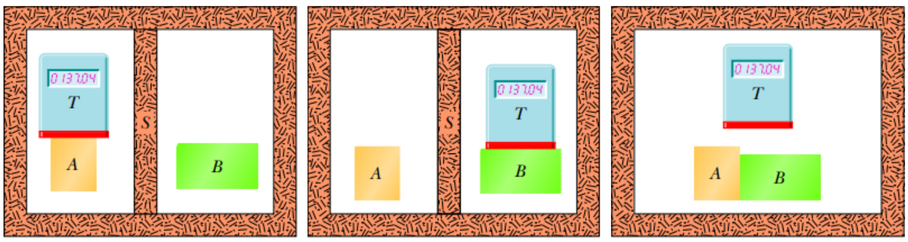


Fig. 18.1.2: A thermoscope. The numbers increase when the device is heated and decrease when it is cooled. The thermally sensitive element could be—among many possibilities—a coil of wire whose electrical resistance is measured and displayed.

검온기. 소자가 가열되면 숫자가 늘어나고 냉각되면 줄어든다. 온도 감지부는 여러 가지 특성을 이용할 수 있는데, 예를 들어 도선의 전기저항을 측정하여 숫자로 표시할 수 있다.

센서는 것은 보통 특정 상황에서 전기적 저항이 달라지는 것을 이용한다.
압력은 스트레인게이지, 빛은 황화카드뮴 (CdS) 등

검온기(Fig. 18.1.2)는 온도 측정 장치를 의미한다. 온도에 따라 물리적 특성이 달라지면, 이를 숫자로 표시할 수 있다. 이 숫자가 온도를 의미하는 것은 아직 아니다.



(a) (b) (c)

Fig. 18.1.3: (a) Body T (a thermoscope) and body A are in thermal equilibrium. (Body S is a thermally insulating screen.) (b) Body T and body B are also in thermal equilibrium, at the same reading of the thermoscope. (c) If (a) and (b) are true, the zeroth law of thermodynamics states that body A and body B are also in thermal equilibrium.

(a) 물체 T(검온기)와 물체 A가 열평형을 이룬다 (칸막이 S는 절연막이다). (b) 물체 T와 물체 B 또한 열평형을 이루고 표시된 숫자가 같다. (c) (a)와 (b)가 참이라면 열역학 제0법칙에 의해 물체 A와 물체 B도 열평형을 이룬다.

Fig. 18.1.3은 열역학 제0법칙을 나타낸다.

단열 상자 속에서
(1) 검온기 T를 A에 접촉 $\longrightarrow$ 더 이상 검온기 눈금 변하지 않음
$\longrightarrow$ (열평형) 상태이고, T와 A의 온도는 같다.
(2) 검온기 T를 B에 접촉 $\longrightarrow$ 더 이상 검온기 눈금 변하지 않음
$\longrightarrow$ (열평형) 상태이고, T와 B의 온도는 같다.
(3) 위의 두 경우 T에 표시된 숫자가 같다면 A와 B의 온도는 (같다.)
(4) A와 B를 접촉시키면 (열평형)을 이룬다.

열은 이동이다. 열평형이라고 하면 이동이 없다는 것이다.
열에 대해서는 뒤에서 계속해서 다시 다룰 것이다.

물체 A와 B가 다른 물체 T와 각각 열평형을 이룬다면 A와 B도 열평형을 이룬다.

모든 물체는 온도라는 특성을 가지며, 두 물체가 열평형 상태에 있으면 둘의 온도는 같다. 또한 그 역도 성립한다. 그렇다면, 검온기의 숫자는 무엇을 의미하는가?

Sss...

검온기의 숫자가 변하는 것은 분명 온도와 관련이 있다. 온도에 따라 일관성 있게 변하지만 그 값은 아직 과학적으로 의미가 없다. 나의 검온기의 값이 140인데 친구의 검온기가 200일 수도 있는 것이다. 우리는 같은 온도 상태에서 두 값이 같게 되도록 '보정'할 필요가 있다. 이러한 의미 있는 척도(scale)는 여러 사람이 제안하였고, 설씨가 제안한 온도는 '설씨온도', 섭씨가 제안한 온도는 '섭씨온도'라고 불렀다. *Celsius*가 제안한 온도는 섭씨온도이고, *Fahrenheit*가 제안한 온도는 화씨온도이다.

여기에서 재미있는 문제가 발생한다. 정해진 약속대로 같은 온도에서 같은 숫자를 쓰는데, '마이너스 온도'가 생긴다는 것이다.(물리적으로 의미가 있는가?)

어두움은 빛이 조금 있는 상태이고, 추움은 온도가 낮을 뿐 0보다 큰 값을 갖는다. 즉, 0은 없음이고 값은 언제나 양수를 가져야 한다.

이러한 이유로 절대 0도를 기준으로 물리적 의미를 담은 온도를 '절대온도'라고 한다. 우리는 물리현상을 절대온도를 이용하여 기술할 것이다.

외국 인명을 중국어 한자로 음역한 방식으로 19세기 말부터 서양 용어가 동아시아로 들어올 때 만들어짐

섭씨는 섭이우사
화씨는 화륜해
뉴턴은 뉴둔으로 음차함

Measuring Temperature

Kelvin 척도로 온도를 어떻게 정의하는지 확인해 보자.

sub: 온도의 측정

* The Triple Point of Water

온도의 눈금을 정하기 위하여 기준이 될 재현 가능한 열적 현상이 필요하다. 이를 *표준 고정점*(*standard fixed point*)이라고 하며, Kelvin 척도에서 (물의 삼중점)을 기준으로 한다.

subsub: 물의 삼중점

물의 끓는점, 어는점 등 다양한 선택지가 있으나 물, 얼음, 수증기가 열적 평형상태에서 공존할 때 압력과 온도가 유일한 값인 삼중점을 택한다. 대략 섭씨 0도이다.

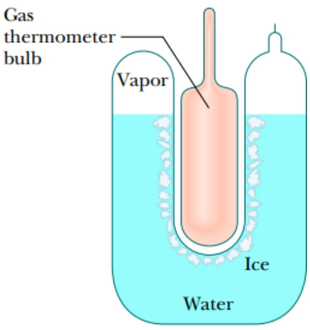


Fig. 18.1.4: A triple-point cell, in which solid ice, liquid water, and water vapor coexist in thermal equilibrium. By international agreement, the temperature of this mixture has been defined to be 273.16 K. The bulb of a constant-volume gas thermometer is shown inserted into the well of the cell.

삼중점 기구(Fig. 18.1.4)는 실험실에서 물의 삼중점을 구현할 수 있게 한다.

삼중점 기구. 고체 상태인 얼음, 액체 상태인 물, 기체 상태인 수증기가 열적 평형상태에서 공존한다. 국제 협약에 따라 혼합물의 온도를 273.16 K으로 정의한다. 기체온도계는 삼중점 기구의 파인 곳에 끼워져 있다.

국제 협약에 따라 물의 삼중점 온도를 273.16 K으로 약속하고, 이 온도를 표준 고정점 온도로 한다.

$$T_3 = 273.16\,\mathrm{K} \qquad \text{(triple-point temperature)} \tag{18.1.1}$$

아래 첨자 3은 삼중점을 뜻하고, 1켈빈의 크기는 절대영도와 물의 삼중점 온도 차이의 1/273.16에 해당한다. 정도를 나타내는 ° 기호를 쓰지 않고 K만 단독으로 쓴다. 온도 자체를 K로 표시하고, 온도차도 K로 표시한다.

Sss...

왜 하필 273.16 K으로 정의하는가? 그 이유는 (섭씨온도)와 눈금 간격을 같이 하기 위함이다. 섭씨온도를 기준으로 삼중점은 0.01 °C이고, 절대 영도는 −273.15 °C이다. 1도 간격의 차이가 절대온도와 섭씨온도가 같다는 것은, 온도 차이를 기술할 때 절대온도, 섭씨온도 중 어떤 것을 써도 상관없다는 것을 의미한다.

* The Constant-Volume Gas Thermometer

subsub: 일정부피 기체온도계

표준온도계는 일정 부피를 유지하는 기체의 압력을 이용한다.

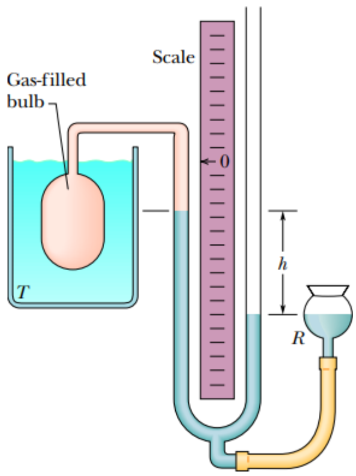


Fig. 18.1.5: A constant-volume gas thermometer, its bulb immersed in a liquid whose temperature T is to be measured.

일정부피 기체온도계. 기체 용기에 측정하고자 하는 온도 T의 액체가 담겨있다.

보통 오른쪽 h 만큼 더 높은 그림이 많은데 이거 그림 헷갈림.. 대기압보다 작아서 빨려 들어간 형태이고, **h**가 더 높다고 생각하면 **1**차원적으로 생각할 수 있음. 온도가 높아지면 수은을 밀고 나온다. 이때 수은 용기를 올리면, 다시 눈금이 **0**에 맞는다. 기체의 부피는 일정하게 한 상태로 새롭게 바뀐 h로 압력을 구할 수 있다.

일정부피 기체온도계(Fig. 18.1.5)는 기체가 채워진 용기가 수은 압력계에 연결되어 있는 형태이다. 수은을 담은 용기 R을 올리거나 내리면서 U자형 관의 왼쪽 부분의 수은 높이를 눈금의 0에 맞추어 기체의 부피를 일정하게 만들 수 있다.

Sss...

온도가 높아지면, 기체가 (팽창)하려고 한다. 이때, 팽창하지 못하도록(원래의 부피를 유지하도록) (압력)을 가하는 원리이다.

- 유리병의 입구를 손으로 막고 있는데 기체가 팽창하려는 압력이 손에 느껴진다.
- 기체가 팽창하지 못하도록 더 강한 압력으로 입구를 막는다.
- 이 압력의 정도를 측정하면 기체의 온도를 알아낼 수 있다.

일정 압력을 유지하는 것보다 일정 부피를 유지하는 방법이 더 쉬워 널리 사용된다.

기체 용기와 접촉하는 물체(Fig. 18.1.5에서 용기를 둘러싼 액체)의 온도 T는 기체에 가해진 압력 p와 비례 상수 C를 이용하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T = Cp \tag{18.1.2}$$

계기 압력 p_g에 관한 식(Eq. 14.3.2)에 의해 압력 p를 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$p = p_0 - \rho gh \tag{18.1.3}$$

여기서 p_0는 대기압이고, ρ는 압력계 안 수은의 밀도, h는 관의 양쪽 수은 기둥 높이의 차이이다. 앞 장에서 다룬 것처럼 압력의 SI 단위는 제곱미터당 뉴턴인 파스칼(Pa)을 쓴다. 1기압은 1 atm으로 나타낸다.

$$1\,\text{atm} = 1.01 \times 10^5\,\text{Pa} = 760\,\text{torr} = 14.7\,\text{lb/in}^2$$

일정부피 기체온도계의 기체 용기를 삼중점 기구(Fig. 18.1.4)에 넣고, 압력을 p_3라고 하면 온도를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_3 = Cp_3 \tag{18.1.4}$$

Eq. 18.1.2와 Eq. 18.1.4를 연립하여 상수 C를 제거하면 잠정적인 식은 다음과 같다.

$$T = T_3\left(\frac{p}{p_3}\right) = (273.16\,\text{K})\left(\frac{p}{p_3}\right) \qquad \text{(provisional)} \tag{18.1.5}$$

그러나 위의 방식은 같은 온도를 측정하더라도 기체의 종류가 바뀔 때마다 결과가 조금씩 달라지는 문제가 생긴다. 이러한 문제를 개선하기 위하여 용기를 채우는 기체의 양을 점점 줄여나간다. 기체의 양이 점점 줄어들면 어떤 기체를 사용하더라도 하나의 온도에 수렴하게 된다.

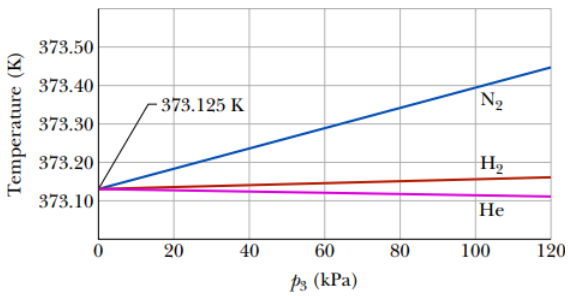


Fig. 18.1.6: Temperatures measured by a constant-volume gas thermometer, with its bulb immersed in boiling water. For temperature calculations using Eq. 18.1.5, pressure p_3 was measured at the triple point of water. Three different gases in the thermometer bulb gave generally different results at different gas pressures, but as the amount of gas was decreased (decreasing p_3), all three curves converged to 373.125 K.

Fig. 18.1.6은 세 가지 기체를 이용하여 끓는 물의 온도를 측정할 시 기체를 줄여나갈 때 하나의 온도(373.125 K)에 수렴하는 것을 보여준다.

열린 관 압력계의 계기 압력(**Eq. 14.3.2**)
$p_g = p - p_0 = \rho gh$에서 주어진 예시와 h가 반대임. 압력이 대기압보다 작기 때문에 수은이 빨려 들어간 형태
압력이 p_0인 곳을 기준으로 측정하므로 부호가 음이다.

atm : atmospheric pressure

1기압은 **10**만 파스칼이다. 101,325 Pa

아직 이론적으로 완전히 증명되거나 일반화된 식은 아니지만, 현재 상황이나 실험 결과에 일시적으로 적용하거나 근사적으로 사용하는 식

삼중점 온도는 국제 협약에 따라 273.16 K으로 정의하였음.

기체 용기를 끓는 물에 담갔을 때 일정부피 기체온도계로 측정한 온도. **Eq. 18.1.5**로 온도를 계산할 때 압력 p_3은 물의 삼중점에서 측정하였다. 온도계의 기체 용기에 담긴 기체가 다르면 압력이 바뀔 때 일반적으로 다른 결과를 얻지만 기체의 양이 줄어들면 (즉, p_3가 감소하면) 모든 결과는 373.125 K으로 수렴한다.

따라서 이상기체 온도계를 이용해 온도를 정의하는 식은 다음과 같다.

$$T = (273.16\,\mathrm{K})\left(\lim_{\text{gas}\to 0}\frac{p}{p_3}\right) \tag{18.1.6}$$

정리하면 미지의 온도 T를 측정하는 방법은 다음과 같다.

(1) 온도계에 일정량의 기체를 채운 후 삼중점 용기를 사용하여 (p_3)를 측정
(2) 기체의 부피를 일정하게 하면서 측정하고 싶은 온도에서 기체의 압력 p를 측정
(3) (p/p_3)를 계산
(4) 기체 용기 안의 기체 부피를 점점 줄여나가면서 같은 측정을 반복
　$\longrightarrow$ 그때마다 (p/p_3)를 계산
(5) 기체가 거의 없다고 볼 수 있는 경우의 (p/p_3)를 추정
(6) 이 비율을 미지 온도 측정 식(Eq. 18.1.6)에 대입하여 온도 T를 계산
　$\longrightarrow$ 이 온도를 *이상기체 온도(ideal gas temperature)*라고 한다.

check 18.1.1

For four gas samples, here are the pressure of the gas at temperature T and the pressure of the gas at the triple point. Rank the samples according to T, greatest first.

네 기체 시료에 대해 온도 T에서 기체의 압력과 삼중점에서 기체의 압력을 나타내었다. 시료를 T가 큰 것부터 나열하여라.

Sample	Pressure (kPa)	Triple-Point Pressure (kPa)
1	2.6	2.0
2	4.8	4.0
3	5.5	5.0
4	7.2	6.0

Solution

Sol:
(1) 기체 용기 속의 기체가 거의 없다고 가정하자.
　(어느 하나가 많고, 적으면 비율이 달라지므로 제한 조건이 엄밀해야 함.
　가정이 아니라 문제 조건으로 주어졌어야 함.)
(2) p/p_3를 계산하면 순서대로 1.3, 1.2, 1.1, 1.2이다.
(3) 여기에 273.16 K을 곱한 값이 온도가 된다.
Ans: $1 > 2 = 4 > 3$

책에서도 잠정적인 식 이후에 정의식에 **limit**까지 해놓고.. 왜 문제에서 조건으로 안 쓰는지...

18.2 The Celsius and Fahrenheit Scales

여러 온도 척도를 비교하고 관계를 찾아보자.

section: 섭씨온도와 화씨온도

The Celsius and Fahrenheit Scales

sub: 섭씨온도와 화씨온도

여러 척도 중 섭씨온도는 도(°)의 단위로 측정하며 섭씨 1도는 켈빈 눈금의 1도와 크기가 같다. 섭씨온도의 0도는 절대영도와 다르다. 두 온도척도는 다음의 관계를 가진다.

$$T_C = T - 273.15\,^\circ \tag{18.2.1}$$

화씨온도는 미국에서만 사용하는데, 섭씨온도와 화씨온도 사이의 관계는 다음과 같다.

$$T_F = \frac{9}{5}T_C + 32\,^\circ \tag{18.2.2}$$

몇 가지 온도의 값에 대한 비교는 다음 표와 같다.

Table 18.2.1: Some corresponding temperatures

Temperature	°C	°F
Boiling point of water	100	212
Normal body temperature	37.0	98.6
Accepted comfort level	20	68
Freezing point of water	0	32
Zero of Fahrenheit scale	≈ −18	0
Scales coincide	−40	−40

Strictly, the boiling point of water on the Celsius scale is 99.975 °C, **and the freezing point is** 0.00 °C. **Thus, there is slightly lessthan** 100 °C **between those two points.**
엄밀히 말하면 섭씨로 물의 끓는점은 99.975 °C이고, 어는점은 0.00 °C이다. 따라서 두 점의 차이는 100 °C보다 약간 작다.

옛날엔 끓는점이 100 °C이라고 했지만, 새로운 도량형으로 삼중점을 0.01 °C로 잡는 등 새로운 온도척도가 정의되면서 정밀 측정 결과 99.974 °C가 됨
책과도 살짝 다름

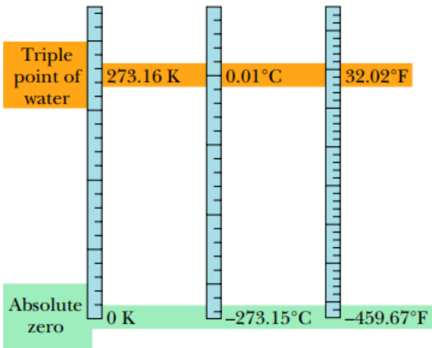


Fig. 18.2.1: The Kelvin, Celsius, and Fahrenheit temperature scales compared.

켈빈, 섭씨, 화씨온도의 비교.
앞에서 이야기한 대로 여러 사람이 제안한 척도일 뿐이다. **Celsius**는 물의 끓는점과 어는 점을 **100, 0**이라는 척도로 제안하였고, 간격을 **100**등분 하였으며 **Fahrenheit**는 **212, 32**로 제안하였고, 간격을 **180**등분 한 것이다.

최초에 **Fahrenheit**는 염화암모늄+물+얼음 혼합물의 최저 온도 (소금물 기반 인공냉각)에서 가장 낮은 온도를 찾으려고 했고, 그것을 0으로 잡으려고 하였다. 또한 사람의 체온을 약 **96**정도로 잡으려고 하였다.
셀시우스, 켈빈, 뉴턴, 뢰머 등 온도 척도는 다양하다.

Fig. 18.2.1은 켈빈, 섭씨, 화씨온도 눈금을 비교한 것이다.

두 척도는 문자 C와 F로 구별하여 섭씨 0°가 화씨 32°와 같음을 다음과 같이 나타낸다.

$$0\,^\circ\mathrm{C} = 32\,^\circ\mathrm{F}$$

섭씨로 온도 차이가 5도이면 화씨로 9도 차이가 있음을 다음과 같이 나타낼 수 있다. 이 경우 도를 나타내는 기호는 C 다음에 온다.

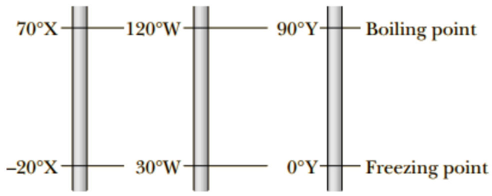
5 °C가 9 °F라는 뜻이 아니라 섭씨 **5**개의 눈금이 화씨 **9**개 눈금과 같다는 의미로, 간격을 비교하기 위해 사용함

$$5\,\mathrm{C}^\circ = 9\,\mathrm{F}^\circ$$

오른편 그림은 물의 어는점과 끓는점이 표시된 세 가지 선형 온도척도이다.
(a) 온도 1도의 차이가 가장 큰 순서대로 나열하여라.
(b) 50 °X, 50 °W, 50 °Y 의 온도 중에서 가장 높은 순서대로 나열하여라.

check 18.2.1

The figure here shows three linear temperature scales with the freezing and boiling points of water indicated.
(a) Rank the degrees on these scales by size, greatest first.
(b) Rank the following temperatures, highest first: 50 °X, 50 °W, and 50 °Y.



Solution

Sol:
(1) 1도 온도는 같은 두 지점 간격을 몇 등분하느냐를 비교하면 된다.
모두 90등분 되어있으므로, (a)의 답은 모두 동일하다.
(2) 눈금 간격이 같으므로 50도까지 어느 만큼 이동하는지 비교한다.
순서대로 맨 위에서 20칸, 70칸, 40칸 만큼 아래로 이동하므로
X, Y, W 순서대로 높은 온도를 의미한다.
Ans(a): 모두 동일하다.
Ans(b): X, Y, W

순서가 **x,y,z**가 아니라 **z,y,w**네..

practice 18.2.1 Conversion between two temperature scales

Suppose you come across old scientific notes that describe a temperature scale called Z on which the boiling point of water is 65.0 °Z and the freezing point is −14.0 °Z. To what temperature on the Fahrenheit scale would a temperature of $T = -98.0\,°Z$ correspond? Assume that the Z scale is linear; that is, the size of a Z degree is the same everywhere on the Z scale.

두 온도척도의 전환

옛날의 과학 원고를 읽다가 온도척도를 Z라고 하여 물의 끓는점과 어는점을 각각 65.0 °Z와 −14.0 °Z라고 쓴 기록을 보았다. $T = -98.0\,°Z$는 화씨로 몇 도인가? Z라는 척도는 선형, 즉 1도Z는 Z 척도 어디서나 같다고 가정하자.

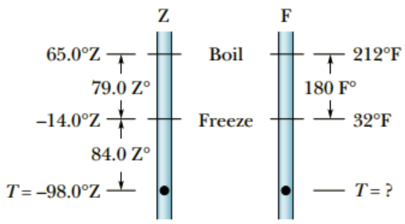


Fig. 18.2.2: An unknown temperature scale compared with the Fahrenheit temperature scale.

Solution

Sol:
(1) 동일 온도에서 비교하면, 212 °F는 65.0 °Z이고 32 °F는 −14.0 °Z이다.
(2) Z 척도를 F 척도로 바꾸려면 간격에 대한 보정은
$(212 - 32)\,F° = (65 - (-14))\,Z°$ 에서 $180\,F° = 79\,Z°$ 이므로, $1\,Z° = \frac{180}{79}\,F°$이다.
(3) Z 척도의 −14.0 °Z에서 −84.0 °Z만큼 온도가 내려가므로,
동일한 온도의 32 °F에서 $84 \times \frac{180}{79}\,F°$만큼 온도가 내려가면 된다.
(4) $32 - 84 \times \frac{180}{79} = -159.39\,(°F)$이다.
Ans: −159.39 °F

18.3 Thermal Expansion

모든 물체는 온도에 따라 크기가 변한다.

section: 열팽창

Thermal Expansion

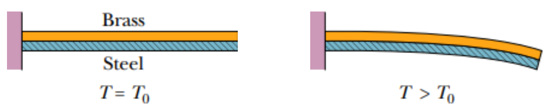
온도 상승에 따른 열팽창은 주위에서 흔히 볼 수 있다. 한여름에 철로가 팽창하여 휘지 않도록 철로의 간격은 약간 떨어져 있지만, 한겨울에 지나치게 수축하여 기차가 이탈할 위험도 있다. 따라서 정확한 특징 파악과 계산이 필요하다.

sub: 열팽창

Fig. 18.3.1: When a Concorde flew faster than the speed of sound, thermal expansion due to the rubbing by passing air increased the aircraft's length by about 12.5 cm. (The temperature increased to about 128 °C at the aircraft nose and about 90 °C at the tail, and cabin windows were noticeably warm to the touch.)

콩코드 비행기(**Fig. 18.3.1**)가 음속보다 빨리 날면 공기에 의한 마찰로 열팽창이 일어나서 길이가 12.5 cm나 늘어난다. (비행기의 앞부분은 128 °C, 비행기의 꼬리 부분은 90 °C이고, 객실의 유리창을 만지면 상당히 따뜻하다).

콩코드 비행기(Fig. 18.3.1)는 초음속 비행이 가능하기 때문에 공기에 의한 마찰열이 많이 발생하므로 기체의 열팽창을 고려해야 한다.



(a) (b)

Fig. 18.3.2: (a) A bimetal strip, consisting of a strip of brass and a strip of steel welded together, at temperature T_0. (b) The strip bends as shown at temperatures above this reference temperature. Below the reference temperature the strip bends the other way. Many thermostats operate on this principle, making and breaking an electrical contact as the temperature rises and falls.

(a) 온도 T_0에서 황동과 강철이 용접되어 붙어 있는 금속이중띠. **(b)** 이 기준온도보다 온도가 올라가면 띠는 그림처럼 휘어지고, 내려가면 위로 휘게 된다. 많은 검온계가 이 원리로 작동하여 온도의 증감에 따라 전기 접촉을 끊거나 잇는다.

보통 그대로 바이메탈이라고 부른다.

금속이중띠(Fig. 18.3.2)는 팽창이나 수축하는 길이가 다르기 때문에 휘어진다.

Sss...

황동과 강철 중에 온도가 변할 때 더 많이 변하는 것은 (황동)이다. 잘 변하고 변하지 않은 정도를 팽창계수로 나타낼 수 있다. 팽창계수가 더 큰 것은 (황동) 이다. 알코올 온도계의 경우 알코올의 열에 의한 팽창으로 온도를 확인할 수 있다. 이때, 유리는 팽창하지 않는가? 어떻게 해야 정확한 온도계를 만들 수 있을까?

두 물질의 팽창을 종합적으로 고려하여 눈금을 작성한다.
황동(**brass**)은 구리와 아연의 합금으로 놋쇠라고 부르기도 한다.
합금 정도에 따라 성질이 조금씩 달라질 수도 있지만 구리**7**:아연**3**의 칠삼황동을 대표값으로 나타낸다.

* Linear Expansion

subsub: 선팽창

길이가 L인 금속막대의 온도가 ΔT만큼 올라간다면 길이 변화는 다음과 같다.

$$\Delta L = L\alpha\Delta T \tag{18.3.1}$$

이 책에서는 초기 길이를 L이라고 함. L_0으로 생각하는 것이 나중에 안 헷갈릴수도 있으니 초기 길이를 L_0로 쓸 것임. 또한 길이는 소문자 l로 나타낼 것임.

여기서 α는 선팽창계수라고 한다. 차원을 분석하면 선팽창계수는 (K^{-1})의 단위를 갖는다. 선팽창계수는 단위온도 변화당 길이 변화의 비율을 의미한다.

온도 차이에 곱하므로, 선팽창계수의 단위는 섭씨온도, 절대온도 무엇을 써도 상관없다.

Sss...

처음 길이를 l_0, 나중 길이를 l이라고 하고, l에 대해 정리하면 다음을 얻는다.

$$l = l_0 + \Delta l = l_0(1 + \alpha T)$$

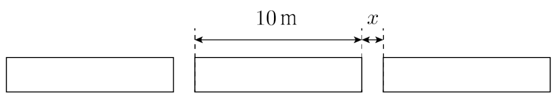
열수축이라는 게 있을까?
그냥 $\Delta L = L\alpha\Delta T$ (**Eq. 18.3.1**)에서 $\Delta T < 0$임. 그대로 감소하는 것.

check

겨울에 철로를 매설하며 여름에 늘어날 것을 대비하고자 한다. 철로 한 구간의 길이는 10 m일 때 얼마의 간격으로 철로를 매설해야 할까? (단, 겨울의 온도는 $-10\,°C$이고, 여름의 최대 온도는 $40\,°C$이다. 철의 선팽창계수는 $11 \times 10^{-6}/C°$이다.)

Solution

Sol:



(1) 10 m 막대기를 배치할 때, 틈을 x라고 하면, 두 가지 방법으로 생각할 수 있다.

- 왼쪽을 모두 고정시키고 반대쪽(오른쪽)만 늘어난다.
- 양쪽이 똑같이 늘어서 늘어난 길이를 절반 나누지만, 두 막대가 가까워지므로 다시 2를 곱한다. 즉, 위와 같다.

(2) $\Delta l = l_0\alpha\Delta T$에서 $\Delta l = 10 \times 11 \times 10^{-6} \times 50 = 5.5 \times 10^{-3}\,(\mathrm{m})$이다.

Ans: 5.5 mm

Table 18.3.1: Some coefficients of linear expansion

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

(a) Room temperature values except for the listing for ice.
(b) This alloy was designed to have a low coefficient of expansion. The word is a shortened form of "invariable."
(a) 얼음을 제외하고는 실온에서의 값이다.
(b) 인바 합금의 팽창계수는 낮다. 인바(Invar)는 영어 "invariable"의 약어이다.

유리도 어떻게 만든 유리인지에 따라 성질이 달라질 것이다.
일반적으로 사용되는 유리를 대표값으로 한다.

Table. 18.3.1은 여러 물질에서 선팽창계수가 얼마인지를 나타낸 것이다.

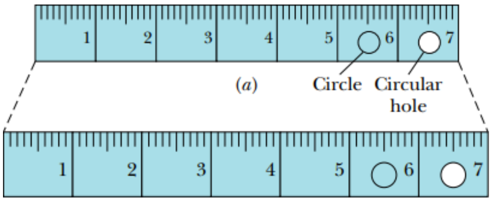


Fig. 18.3.3: The same steel ruler at two different temperatures. When it expands, the scale, the numbers, the thickness, and the diameters of the circle and circular hole are all increased by the same factor. (The expansion has been exaggerated for clarity.)

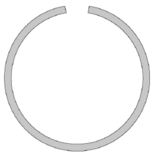
서로 다른 온도에서 강철로 만든 자. 자가 팽창하면 그 위의 척도, 숫자, 자의 두께, 원과 원형 구멍의 지름 등은 모두 동일한 비율로 늘어난다(팽창되었음을 보이기 위해 과장되게 그렸다).

Fig. 18.3.3은 자의 열팽창을 나타낸 것이다. 사진을 확대한 것과 비슷하다. 구멍을 뚫으면서 생긴 원판은 자에 딱 맞고, 자와 원판의 온도가 같이 올라갈 때 원판은 여전히 구멍에 딱 맞게 된다.

휴대폰으로 확대하듯 그대로 커진다.
안으로 부풀듯이 그린 학생들이 굉장히 많음. 위의 자 그림처럼 꽉 찬 금속 덩어리에 매직으로 그림을 그리고 마지막에 잘라낸다고 생각해도 됨

Sss...

2023학년도 광주과학고등학교 입학전형 2단계 2교시(과학영역) 2번 문제
일부가 끊긴 원 모양의 금속 고리를 가열할 때, 변한 금속 고리의 모양은?



* Area Expansion

subsub: 면팽창
면팽창은 잘 다루지 않음. 일반물리학 교재에서도 면팽창은 없음. 면팽창계수는 부피팽창계수와 같은 이유로 선팽창의 2배가 됨.

물체가 늘어난 면적은 처음 면적과 온도 변화의 곱에 비례한다.

* Volume Expansion

subsub: 부피팽창

고체의 경우 온도에 따라 모든 방향으로 팽창하기 때문에 부피가 늘어난다. 액체의 경우는 부피팽창만 의미가 있다. 부피가 V인 고체나 액체의 온도가 ΔT만큼 올라갈 때 부피 변화는 다음과 같다.

$$\Delta V = V\beta\Delta T \tag{18.3.2}$$

선팽창과 마찬가지로 이 식에서는 초기 부피를 V이라고 함.
V_0으로 생각하는 것이 나중에 안 헷갈릴 수도 있음

선은 α, 부피는 β를 씀.
면은 건너뛴 것임. γ 쓰거나 β에 첨자를 붙여서 면팽창을 나타내기도 함

선팽창과 마찬가지로 팽창계수가 있고, β는 부피팽창계수라고 한다. 부피팽창계수와 선팽창계수 사이에는 다음의 관계가 있다.

$$\beta = 3\alpha \tag{18.3.3}$$

Eq. 18.3.1은 초기 길이가 L임에 유의
$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$
$\Delta L = L - L_0$ 연립

Sss...

간단하게 $\beta = 3\alpha$임을 보이자.

(1) 선팽창 식 Eq. 18.3.1에서 나중 길이는 $l = ($ $l_0(1+\alpha\Delta T)$ $)$이다.

(2) 세 변의 길이를 각각 $a + \Delta a$, $b + \Delta b$, $c + \Delta c$라고 하면
부피 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$
\begin{aligned}
\Delta V &= (a+\Delta a)(b+\Delta b)(c+\Delta c) - abc \\
&\approx ab\Delta c + bc\Delta a + ca\Delta b \\
&= 3abc\,\alpha\Delta T = V_0 \cdot 3\alpha \cdot \Delta T = V_0 \cdot \beta \cdot \Delta T
\end{aligned}
$$

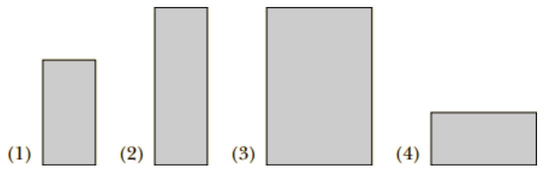
Δa의 값은 매우 작아서 두 번 곱한 값은 무시(근사)
테일러 급수전개로 근사하는 것과 같음.

(3) 비등방성 재료(결정 구조 방향에 따라 다른 팽창률)에서는
$\Delta V = V_0(\alpha_x + \alpha_y + \alpha_z)\Delta T$가 된다.

check 18.3.1

The figure here shows four rectangular metal plates, with sides of L, $2L$, or $3L$. They are all made of the same material, and their temperature is to be increased by the same amount.
Rank the plates according to the expected increase in
(a) their vertical heights and
(b) their areas, greatest first.

오른편 그림처럼 변의 길이가 각각 L, $2L$, $3L$인 직사각형 금속판이 있다. 각 판은 모두 동일한 재질로 들었고, 온도가 동일하게 증가한다고 하자.
(a) 수직 방향 높이의 증가와
(b) 면적의 증가가 가장 큰 순서대로 각각 나열하여라.



Solution

Sol:

(1) 높이를 보면 $2L, 3L, 3L, L$인 듯함
처음 크기에 비례하여 커지므로, 높이 증가는 $2 = 3 > 1 > 4$

(2) 면적은 $2L^2, 3L^2, 6L^2, 2L^2$인 듯함
처음 크기에 비례하여 커지므로, 면적 증가는 $3 > 2 > 1 = 4$

Ans(a): $2 = 3 > 1 > 4$

Ans(b): $3 > 2 > 1 = 4$

액체는 그릇에 담는다. 따라서 액체가 팽창할 때는 그릇(고체)의 팽창을 함께 고려해야 한다. 우리가 눈으로 관찰하는 팽창은 액체만의 실제 팽창에서 그릇의 팽창을 뺀 겉보기 팽창이다.

Sss...

열팽창과 밀도의 관계는 어떻게 나타낼 수 있을까?
온도가 상승해도 질량 $m = \rho_0 V_0 = \rho V$는 변하지 않는다.

$$
\begin{aligned}
V &= V_0(1+\beta\Delta T) \\
\frac{m}{\rho} &= \frac{m}{\rho_0}(1+\beta\Delta T) \\
\rho &= \rho_0\frac{1}{1+\beta\Delta T} \;\approx\; \rho_0(1-\beta\Delta T)
\end{aligned}
$$

따라서 밀도 변화는 $\Delta\rho = \rho - \rho_0 = -\rho_0\beta\Delta T$이다.

$\beta \ll 1$에서 테일러 급수전개 하였음
밀도는 온도가 증가하면 반대로 작아진다.
(팽창하니까)

practice 18.3.1 Thermal expansion on the Moon

Fig. 18.3.4: Apollo 15.

When Apollo 15 landed on the Moon at the foot of the Apennines mountain range, an American flag was planted (Fig. 18.3.4). The aluminum, telescoping flagpole was $2.0\,\mathrm{m}$ long with a coefficient of linear expansion $2.3 \times 10^{-5}\,/^\circ\mathrm{C}$. At that latitude on the Moon ($26.1\,^\circ\mathrm{N}$), the temperature varied from $290\,\mathrm{K}$ in the day to $110\,\mathrm{K}$ in the night. What was the change in length of the pole between day and night?

달 위의 열팽창

Apollo 15 호 가 달 의 **Apennines** 산맥 기슭에 도착하여 미국 국기를 꽂았다 (**Fig. 18.3.4**). 망원경이 장착되어 있는 알루미늄 깃대의 길이는 $2.0\,\mathrm{m}$이고, 선팽창률은 $2.3 \times 10^{-5}\,/^\circ\mathrm{C}$이다. 이 위도 ($26.1\,^\circ\mathrm{N}$)의 달에서 온도는 낮에는 $290\,\mathrm{K}$, 밤에는 $110\,\mathrm{K}$로 변한다. 낮과 밤 사이에 깃대의 길이 변화는 얼마인가?

Solution

Sol:
$L_0 = 2.0\,\mathrm{m}$, $\alpha = 2.3 \times 10^{-5}\,/\mathrm{K}$, $\Delta T = 180\,\mathrm{K}$이므로,
$\Delta L = L_0 \alpha \Delta T$에서, $8.28 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}$이다.
Ans: $8.28 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}$

practice 18.3.2 The shrinking fuel load

On a hot day in Las Vegas, a fuel trucker loaded $37\,000\,\mathrm{L}$ of diesel fuel. He encountered cold weather on the way to Payson, Utah, where the temperature was $23.0\,\mathrm{K}$ lower than in Las Vegas, and where he delivered his entire load. How many liters did he deliver? The coefficient of volume expansion for diesel fuel is $\beta = 9.50 \times 10^{-4}\,/\mathrm{C}^\circ$, and the coefficient of linear expansion for his steel tank is $\alpha = 11 \times 10^{-6}\,/\mathrm{C}^\circ$.

부피 열팽창

무더운 날 유류 수송차량 운전기사가 라스베이거스에서 $37\,000\,\mathrm{L}$의 경유를 싣고 유타 주의 페이손으로 배달을 갔다. 페이손에서는 날씨가 쌀쌀해서 라스베이거스보다 온도가 $23.0\,\mathrm{K}$ 낮았다면, 배달된 경유는 몇 리터인가? 경유의 부피 팽창계수는 $9.50 \times 10^{-4}\,/\mathrm{C}^\circ$이고, 트럭의 강철 탱크의 선팽창 계수는 $11 \times 10^{-6}\,/\mathrm{C}^\circ$라고 하자.

겉보기 팽창 문제가 아니다.

Solution

Sol:
(1) 온도가 낮아져서 경유의 부피가 감소한다.
이때, 강철 탱크 역시 부피가 감소한다.
그러나 경유의 배달과 강철 탱크의 부피는 상관 없다. (경유 부피 변화만 고려)
(2) 경유의 변화량은 $\Delta V = V_0 \beta \Delta T$에서
$\Delta V = (37\,000\,\mathrm{L})(9.50 \times 10^{-4}/\mathrm{K})(-23.0\,\mathrm{K}) = -808.45\,\mathrm{L}$
(3) 배달된 양은 $37\,000 - 808.45 = 36\,191.5\,\mathrm{L}$이다.
Ans: $3.62 \times 10^4\,\mathrm{L}$

practice 자의 선팽창

Table. 18.3.1을 참고하면, 강철(Steel)의 선팽창계수는 11×10^{-6} /C°, 황동(Brass)의 선팽창계수는 19×10^{-6} /C°이다. 0 °C에서 정확히 눈금을 맞춘 강철 자로 30 °C일 때 황동 막대의 길이를 100 cm로 측정하였다. 0 °C에서 황동 막대의 길이는 얼마인가?

물만 봐도 20 °C, 100 °C일때 팽창계수 몇 배로 달라짐
약 2.07×10^{-4} /C°
약 6.9×10^{-4} /C°
계속 일정하게 유지된다고 가정하자.

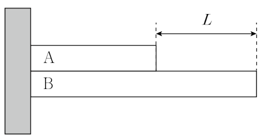
practice 유리그릇 속 액체

Table. 18.3.1을 참고하면, 유리(Glass)의 선팽창계수는 9×10^{-6} /C°이다. 부피팽창계수가 2×10^{-4} /C°로 유지되는 액체가 유리그릇에 담겨있다.

1. 20 °C에서 부피가 1 m^3인 정육면체 모양의 유리그릇에 액체가 가득 들어 있다. 액체와 그릇의 온도를 함께 100 °C로 올리면 각각 부피가 얼마가 되는가?
2. 100 °C에서 부피가 1 m^3인 정육면체 모양의 유리그릇에 액체가 가득 들어 있다. 액체와 그릇의 온도를 함께 20 °C로 내리면 각각 부피가 얼마가 되는가?

practice 팽창 보정 장치

온도가 변하더라도 떨어진 두 점의 거리가 일정하게 하는 방법은 선팽창계수가 다른 두 막대의 한쪽 끝을 결합하는 것이다. 금속 A의 질량은 m_A, 선팽창계수는 α_A이고, 금속 B의 질량은 m_B, 선팽창계수는 α_B이다.



1. 온도변화에 따라 길이 L이 변하지 않기 위한 조건을 구하시오.
2. 물질 A는 황동, 물질 B는 강철이다. 0 °C에서 황동의 길이가 250 cm이면 L은 얼마인가?

[교사용 페이지(양면) **1/2**]

Solution

Sol:

Ans:

Solution

Sol:

Ans:

[교사용 페이지(양면) **2/2**]

Solution

Sol:

Ans:

18.4 Absorption of Heat

열은 계와 주위 사이 온도 차이 때문에 전달되는 에너지이다.

section: 열흡수

Temperature and Heat

앞에서 다룬 열평형은 두 계의 온도가 같아짐을 설명하였다. 조금 더 정교하게 이를 다루면 다음과 같다.

sub: 온도와 열

(1) 방 안에 음료가 있다. 음료를 기준으로 설명하고 싶다면,
계(*System*)가 *외부*(*Environment*)에 놓여 있다고 표현할 수 있다.
음료의 온도를 T_S, 외부의 온도를 T_E라고 하자.
(2) 최초에 T_S와 T_E가 같지 않다면, 두 온도는 변화하여 (열평형)을 이룬다.
이러한 온도 변화는 계와 주위 사이에 (열에너지)가 전달된 결과이다.
(3) 열에너지는 원자나 분자 같은 미시입자의 막운동과 관련된 (운동에너지)와 퍼텐셜에너지로 이루어진 (내부에너지)이다. 이렇게 전달되는 방식을 (열)이라고 하고, 크기를 (열량)이라고 한다. 기호는 (Q)이다.
(4) 열이 양의 값을 갖는다는 것은 계가 열을 (흡수)한다는 뜻이다.
열이 음의 값을 갖는다는 것은 계가 열을 (방출)한다는 뜻이다.

부호에 대한 약속이라고 생각할 수 있다.
누가 어떻게 하느냐를 양 또는 음으로 약속하는 것이다.
열을 어떻게 약속하는지 살펴보자.

(위키백과 출처)
열은 일처럼 계에서 다른 계로 에너지가 전달되는 방식 중 하나이다.

열을 받으면 일을 하거나 내부에너지가 늘어난다.
이때의 내부에너지를 열에너지라고도 한다.
열에너지는 내부에너지의 열적 부분이다.
열에너지는 물체가 가진 내부에너지 중 열적 부분이고
열은 상태를 나타내지 않고 경로에 의존하는 에너지 전달량이다.
그래서 차원은 에너지로 같다.

물체는 내부에너지로써 열에너지는 가질 수 있지만 열을 가질수는 없다. 따라서 열에너지보다 내부에너지라는 용어가 더 많이 사용된다. 열은 전도, 대류, 복사로 전달된다.

정리하자면, 열 Q는 전달량,
내부에너지 U는 저장량이다.
열에너지는 내부에너지의 열적 부분이다.
차원은 모두 에너지이다.

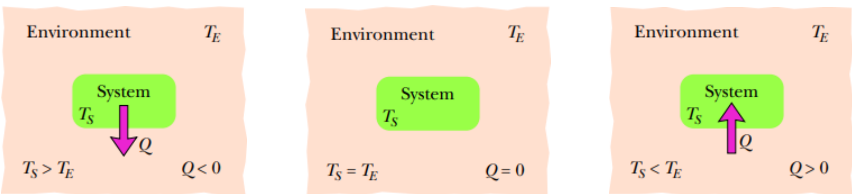
엄밀하게 지키면 좋지만, 의미 전달되는 선에서 사용하도록 하자.

Sss...

(1) 내부에너지는 계의 질량중심에 대해 정지해 있는 기준틀에서 볼 때
계의 미시적 구성 성분(원자와 분자)들이 갖는 모든 에너지를 의미한다.
(2) 내부에너지는 내부 원자간 퍼텐셜에너지를 포함한 각 요소들의 에너지 합이다.

$$\begin{aligned}\text{내부에너지} &= \text{분자력에 의한 위치에너지} + \text{분자의 병진 운동 에너지} \\ &\quad + \text{회전 운동에너지} + \text{분자 내 원자들의 진동 에너지}\end{aligned}$$

(3) 중력 퍼텐셜에너지, 전체 계의 운동에너지는 내부에너지가 아니다.



(a) (b) (c)

Fig. 18.4.1: If the temperature of a system exceeds that of its environment as in (a), heat Q is lost by the system to the environment until thermal equilibrium (b) is established. (c) If the temperature of the system is below that of the environment, heat is absorbed by the system until thermal equilibrium is established.

계의 온도가 (a)처럼 주위 온도보다 높다면 (b)의 열평형에 도달될 때까지 열 Q가 계에서 주위로 방출된다. (c) 계의 온도가 주위의 온도보다 낮다면 열평형에 도달될 때까지 계가 열을 흡수한다.

Fig. 18.4.1은 열과 온도에 대한 위의 설명을 나타낸 그림이다.

(a) $T_S > T_E$이므로 계는 열로 에너지를 (얻는다 / 잃는다).
즉, Q는 (양수 / 음수)이다.
(b) $T_S = T_E$이므로, 열에너지의 전달이 없고, $Q =$ (0)이다.
(c) $T_S < T_E$이므로 계는 열로 에너지를 (얻는다 / 잃는다).
즉, Q는 (양수 / 음수)이다.
• 열은 계와 주위 온도 차이에 따라 계와 주위 사이 전달되는 에너지 전달량이다.

교재의 비유: '송금'이라는 말은 돈이 움직일 때만 의미가 있다. 이는 계좌에 얼마가 있다는 의미가 아니다. 계좌에는 돈이 있지 송금이 있는 것이 아니다.

British thermal unit
1파운드(lb) 물을 63 °F에서 64 °F까지 올리는 데 필요한 열
(0.45 kg 물을 17.22 °C에서 17.78 °C으로)

한편, 열의 일당량의 국제적 합의는 **184**임. 역사적 실험적으로는 **1868**

1 cal = 4.184 J, 1 J = 0.239 cal
물의 비열은 일정하지 않기 때문에, (처음 온도에 따라 1도 올리는 데 필요한 에너지 다름) 초기, 최종값에 따라 다를 수 있음. 비열은 바로 아래에서 다룸

한편 계에 에너지가 전달되는 방법으로 계에 작용하는 힘이 한 일 W가 있다. 열과 일은 물체가 가진 물리량이 아니다. 물체가 일이나 열을 받고나면 더이상 '일'이나 '열'이라고 부르지 않는다. 열과 일은 어떠한 계에서 다른 계로 에너지가 (전달될 때)만 의미가 있다.

열의 단위 중 줄(J), 칼로리(cal), 영국열단위(Btu)의 관계는 다음과 같다.

$$1\,\text{cal} = 3.968 \times 10^{-3}\,\text{Btu} = 4.1868\,\text{J} \tag{18.4.1}$$

칼로리(cal)는 물 1 g을 14.5 °C에서 15.5 °C로 올리는 데 필요한 열로 정의하였다. 열도 일과 마찬가지로 SI 단위를 에너지 단위인 줄(J)로 결정하였다.

The Absorption of Heat by Solids and Liquids

sub: 고체와 액체의 열흡수

* Heat Capacity

subsub: 열용량

물체가 흡수하거나 방출하는 열 Q와 물체의 온도 변화 ΔT는 비례한다. 이때, 비례상수 C를 사용하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$Q = C\Delta T = C(T_f - T_i) \tag{18.4.2}$$

여기서 비례상수 C는 물체마다 다르며, 다음의 지표가 된다.

Sss...

- 이 물체의 온도변화(ΔT)를 일으키려면 열(Q)이 얼마나 필요할까?
- 이만큼의 열(Q)로 이 물체의 온도를 얼마나(ΔT) 올릴 수 있을까?
- 두 물체가 있을 때, 동일한 열로 어떤 물체의 온도를 더 올릴 수 있을까?

비례상수 C를 열용량이라고 한다. 차원을 분석하면 열용량의 단위는 (J/K)이다. 절대온도의 눈금 간격과 섭씨온도의 눈금 간격이 같으므로 (cal/°C)의 단위를 사용할 수도 있다.

Sss...

- 물체 A가 B보다 열용량이 크다. 즉, $C_A > C_B$이다.
- T_1에서 T_2까지 온도를 변화시킬 때 더 많은 열을 가해야 하는 물체는? A
- 동일한 열을 가했을 때 온도 변화가 더 큰 물체는? B
- 냄비와 뚝배기 중 열용량이 더 큰 물체는? 뚝배기 냄비는 빨리 끓고 식음.
- 냄비와 뚝배기에 라면을 끓이면 각각의 특징은? 뚝배기는 오래 걸리고 잘 안 식음

냄비에 끓인 사람이 다 먹을 때까지 뚝배기는 물도 안 끓음
뚝배기가 끓었는데 국물이 안 식어서 먹기 힘듦

* Specific Heat

subsub: 비열

열용량은 물체가 가진 열적 성질이다. 같은 물질로 만든 물체라면 질량이 더 큰 물체의 온도를 올릴 때 더 많은 열이 필요할 것이다.

Sss...

- 물체 A를 두 개 붙인 물체 A'이 있다.
- 같은 온도만큼 올리려면 A'는 A보다 두 배의 열이 필요하다.
  (애초에 하나씩 두 물체를 데워서 붙인다고 생각할 수 있음)
- 물체가 아닌 (물질) 자체의 성질을 비교할 필요가 생김
  $\longrightarrow$ (질량)당 열용량의 개념이 자연스럽게 필요해짐

물체의 질량에 관계없는 단위질량당 열용량은 물체를 구성하는 (물질)에 대한 단위질량당 열용량이다. 이것을 비열 c라고 정의한다. 비열은 내부에너지를 저장하는 능력의 차이이다. 열용량 식(Eq. 18.4.2)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$Q = cm\Delta T = cm(T_f - T_i) \tag{18.4.3}$$

칼로리와의 관계는 다음과 같다.

$$c = 1\,\mathrm{cal/g\cdot C^\circ} = 1\,\mathrm{Btu/lb\cdot F^\circ} = 4186.8\,\mathrm{J/kg\cdot K} \tag{18.4.4}$$

check 18.4.1

A certain amount of heat Q will warm 1 g of material A by 3 °C and 1 g of material B by 4 °C. Which material has the greater specific heat?

일정한 열 Q로 1 g의 물질 A는 3 °C만큼, 1 g의 물질 B는 4 °C만큼 온도를 올릴 수 있다. 어느 쪽의 비열이 더 큰가?

Solution

Sol:
- 비열이 크다는 것은 같은 열이 주어질 때 온도가 잘 안 올라간다는 뜻이다.
- 비열에 관한 식 $Q = cm\Delta T$(Eq. 18.4.3)에 의해 같은 Q와 m에서 c가 클수록 ΔT가 작아진다.

Ans: A

비열에 대해 다양하게 묘사해보자
가열 시간은? 필요한 에너지의 양은?
비열이 크면 잘 버틴다.
열의 효과가 없다는 것이 아니다.
모두 머금고 보관한다. 다시 말해, 그만큼 다시 방출할 수 있다.
뚝배기는 냄비보다 열용량이 크고, 구성 물질의 비열도 뚝배기가 크다.

check

질량이 100 g인 철에 열을 가하여 100 °C가 되었을 때 찬 물에 넣었더니 철의 온도가 30 °C가 되었다. 철이 잃은 열량은 얼마인가? (단, 철의 비열은 0.11 cal/g · K이다.)

Solution

Sol: $Q = cm\Delta T = 0.11 \times 100 \times 70 = 770\,(\mathrm{cal})$

Ans: 0.77 kcal

만약, 비열이 온도에 따라 변하면
$Q = m\int_{T_i}^{T_f} C(T)\,dT$으로 풀어야 함

check

밀도가 1 kg/L인 5 °C인 물 100 mL에 밀도가 13 kg/L인 수은온도계 1 mL를 잠기게 넣었다. 온도계의 처음 온도가 5 °C였을 때, 충분한 시간이 지난 뒤 온도계의 눈금은 얼마가 되는가? (단, 물의 비열은 4.18 kJ/kg · K이고, 수은의 비열은 0.14 kJ/kg · K이다. 온도계는 유리를 무시하고 수은으로만 가정한다.)

Solution

Sol:
- $c_w m_w \Delta T_w = c_m m_m \Delta T_m$에서 수은의 질량은 $m_m = 13.6 \times 0.001\,(\mathrm{kg})$이다.
  $4.18 \times 0.1 \times (T - 5) = 0.14 \times 13.6 \times 0.001 \times (10 - T)$

Ans: $T = 5.02\,°\mathrm{C}$

check

온도가 100 °C이고, 질량이 50 g인 금속 조각을 물에 넣었더니 온도가 30 °C로 낮아지며 752.5 cal의 열을 방출했다. 금속의 비열은 얼마인가?

Solution

Sol: $c = \frac{Q}{m\Delta T} = \frac{752.5}{50\times70} = 0.215\,\mathrm{cal/g\cdot K}$

Ans: 0.215 cal/g · K (알루미늄)

subsub: 몰비열

표를 보고 물과 금속을 비교해보자
물보다 철, 구리 등 금속의 비열이 훨씬 낮으므로 쉽게 온도가 올라간다.
물은 분자내 원자의 병진, 회전, 진동 에너지에 에너지를 저장하기 때문에 시간과 열량이 많이 필요하다.
즉, 비열이 크다.
.
금속은 고체구조로 결속되어 진동 에너지에만 에너지를 저장하기 때문에 적은 양의 에너지를 저장한다.
즉, 비열이 작다.
.
육풍, 해풍

* Molar Specific Heat

물질의 양을 나타내는 데 편리한 단위는 몰(mol)이고, 1 mol은 어느 물질에서나 같다. 1 mol의 알루미늄에는 6.02×10^{23}개의 기본단위(elementary units)가 들어 있다.

$$1\,\text{mol} = 6.02 \times 10^{23}\ \text{elementary units}$$

비열 또한 단위질량이 아닌 몰당 열용량으로 정의할 수 있고, 몰비열이라고 한다.

Table 18.4.1: Some specific heats and molar specific heats at room temperature

Substance	Specific Heat cal/g · K	Specific Heat J/kg · K	Molar Specific Heat J/mol · K
Elemental Solids			
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
Other Solids			
Brass	0.092	380	
Granite	0.19	790	
Glass	0.20	840	
Ice (−10°C)	0.530	2220	
Liquids			
Mercury	0.033	140	
Ethyl alcohol	0.58	2430	
Seawater	0.93	3900	
Water	1.00	4187	

물의 비열은 1이다.
구리, 얼음의 비열 아래 문제에서 사용
반드시 단위에 유의해야 함
어떤 단위를 쓸지 보고 따라가야 함

Table. 18.4.1은 실온에서 여러 물질의 비열과 몰비열을 나타낸 것이다. 단원자로 이루어진 고체 원소들의 실온에서의 몰비열 값이 함께 있다.

보통 고체, 액체에서 에너지 전달이 있을 때, 압력은 (대기압으로) 일정하다고 가정한다. 또는 압력을 가하여 팽창을 억제함으로써 부피를 일정하게 할 수도 있다. 이처럼 압력이 일정한 경우(등압 또는 정압)와 부피가 일정한 경우(등적 또는 정적)의 비열은 조금씩 달라질 수 있다.

고체와 액체에서는 등압비열과 등적비열이 별로 차이 나지 않는다. 하지만 기체의 경우 등압비열과 등적비열은 크게 달라진다.

Sss...

(1) 물의 비열은 1이다.
하지만, 실제로 온도가 높아지면 비열은 살짝 감소한다.
표준상태(약 20 °C, 1 atm)에서 대푯값이 1인 것이다.
(2) 비열은 물질의 고유 성질이라고 이야기하지만, 조건에 따라 조금씩 변한다.
그래서 보통 조건을 고정하고 고유 성질로 취급한다.
Table. 18.4.1에서 실온임을 표기한 이유가 그 때문이다.
(3) 한편, 같은 물질을 같은 온도만큼 상승시키고자 하여도
⟶ 상태에 따라 다른 에너지 양이 필요하다.
⟶ 비열은 온도와 압력에 영향을 받지만 고체, 액체에서는 무시한다.
⟶ 기체에서는 등압비열과 등적비열 두 가지를 구분한다.

* Heats of Transformation

고체나 액체가 열에너지를 흡수하더라도 반드시 온도가 올라가는 것은 아니다. 상태가 변화할 때 분자 간의 결합을 변화시키는 데 에너지가 사용되기 때문에 상태 변화 중에는 온도가 올라가지 않는다.

subsub: 변환열, 숨은열(잠열)

1. ***Melting.*** 융해(용융)는 고체가 액체가 되는 것을 의미하고, 녹는다고 말한다. 얼음이 녹아 물이 되는 것처럼 고체는 녹으면 액체가 된다. 반대 과정은 액체로부터 에너지를 제거하여 분자가 고정된 구조에 자리 잡도록 하는 것이고 ***Solidification, Freezing***(응고, 얼음)이라고 한다.

2. ***Vaporization, Evaporation, Boiling*** 기화(증발, 끓음)는 액체가 기체가 되는 것을 의미한다. 물이 끓어 수증기가 되는 것처럼 액체는 끓음 또는 증발을 통해 기체가 된다. 반대 과정은 기체로부터 에너지를 제거하여 액체가 되게 하는 것이고 ***Condensation***(응축, 액화)라고 한다.

3. ***Sublimation*** 승화는 고체가 기체가 되는 것을 의미한다. 드라이아이스가 기체 상태의 이산화탄소가 되는 것처럼 고체가 승화하면 기체가 된다. 반대 과정은 기체로부터 에너지를 제거하여 고체가 되게 하는 것이고 ***Deposition, Desublimation***(증착, 역승화)라고 한다.

교재에서 승화를 다루지는 않음. 하지만 참고로 알고 있도록 하자

시료가 상태 변화를 일으키기 위해 열로 전달되는 단위질량당 에너지를 변환열(잠열) L이라고 한다. 질량이 m인 물질의 상태가 완전히 변할 때 총 에너지의 전달량은 다음과 같다.

$$Q = Lm \tag{18.4.5}$$

액체에서 기체 또는 기체에서 액체로 상태가 변할 때 변환열을 증발열 L_V라고 한다. 물의 끓는점(응축점)에서 증발열은 다음과 같다.

$$L_V = 539\,\mathrm{cal/g} = 40.7\,\mathrm{kJ/mol} = 2256\,\mathrm{kJ/kg} \tag{18.4.6}$$

kJ/kg을 J/g로 나타낼 수 있다.
1 g당 몇 J의 에너지를 가해야 상태변화할 수 있는지에 대한 값이다.

고체에서 액체 또는 액체에서 고체로 상태가 변할 때 변환열을 융해열 L_F라고 한다. 물의 어는점(녹는점)에서 융해열는 다음과 같다.

$$L_F = 79.5\,\mathrm{cal/g} = 6.01\,\mathrm{kJ/mol} = 333\,\mathrm{kJ/kg} \tag{18.4.7}$$

Table 18.4.2: Some Heats of Transformation

	Melting		Boiling	
Substance	Melting Point (K)	Heat of Fusion L_f (kJ/kg)	Boiling Point (K)	Heat of Vaporization L_v (kJ/kg)
Hydrogen	14.0	58.0	20.3	455
Oxygen	54.8	13.9	90.2	213
Mercury	234	11.4	630	296
Water	273	333	373	2256
Lead	601	23.2	2027	858
Silver	1235	105	2323	2336
Copper	1356	207	2868	4730

물의 융해 잠열(용융 잠열)은 333 kJ/kg이다.
아래 문제에서 쓰임. 단위에 유의할 것

Table. 18.4.2는 몇 가지 물질의 변환열을 나타낸 것이다.

practice 18.4.1 Hot slug in water, coming to equilibrium

A copper slug whose mass m_c is 75 g is heated in a laboratory oven to a temperature T of 312 °C. The slug is then dropped into a glass beaker containing a mass $m_w = 220$ g of water. The heat capacity C_b of the beaker is 45 cal/K. The initial temperature T_i of the water and the beaker is 12 °C. Assuming that the slug, beaker, and water are an isolated system and the water does not vaporize, find the final temperature T_f of the system at thermal equilibrium.

평형에 도달하는 물속의 뜨거운 덩어리

질량(m_c) 75 g의 구리 덩어리를 실험실에서 312 °C까지 가열한 후, 물 220 g이 담긴 유리 비커에 떨어뜨렸다. 비커의 열용량 C_b는 45 cal/K이고, 물과 비커의 초기온도는 12 °C이다. 구리 덩어리와 비커, 물이 고립계를 이루며 물은 증발하지 않는다고 가정할 때, 열평형을 이룬 계의 최종온도 T_f를 구하여라.

practice 18.4.2 Heat to change temperature and state

(a) How much heat must be absorbed by ice of mass $m = 720$ g at −10 °C to take it to the liquid state at 15 °C?
(b) If we supply the ice with a total energy of only 210 kJ (as heat), what are the final state and temperature of the water?

온도와 상태를 바꾸는 열

(a) 질량 $m = 720$ g인 −10 °C의 얼음이 15 °C의 액체상태로 바뀌려면 열을 얼마나 흡수해야 되는가?
(b) 얼음에 210 kJ의 에너지만 (열로) 공급한다면 최종상태와 온도는 어떻게 되는가?

Solution

Sol:

(1) 최종 온도를 T_f라고 할 때, 각자 갖는 초기 온도에서 모두 T_f가 된다.
비커의 질량을 모르지만 비커 자체의 열용량이 주어졌으므로
$T_i = 12\,°\mathrm{C}$이고, $T = 312\,°\mathrm{C}$라고 하면
Eq. 18.4.2와 Eq. 18.4.3에 의해 다음 식을 얻을 수 있다.

$$\text{for the water}: \quad Q_w = c_w m_w (T_f - T_i) \tag{18.4.8}$$

$$\text{for the beaker}: \quad Q_b = C_b (T_f - T_i) \tag{18.4.9}$$

$$\text{for the copper}: \quad Q_c = c_c m_c (T_f - T) \tag{18.4.10}$$

열용량 식 $Q = C\Delta T$ **(Eq. 18.4.2)**
비열 식 $Q = cm\Delta T$ **(Eq. 18.4.3)**

(2) 열이 흡수될 때 Q값은 양수이고, 방출될 때 Q값은 음수이다.
구리, 비커, 물이 고립계를 이루고, 계 내부에서 이동한 총 에너지는 0이다.

$$Q_w + Q_b + Q_c = 0 \tag{18.4.11}$$

(3) Eq. 18.4.8 Eq. 18.4.9 Eq. 18.4.10을 Eq. 18.4.11에 대입하면 다음을 얻는다.

$$c_w m_w (T_f - T_i) + C_b (T_f - T_i) + c_c m_c (T_f - T) = 0 \tag{18.4.12}$$

(4) Eq. 18.4.12에서 온도차이는 섭씨온도와 절대온도가 같기 때문에
섭씨온도를 그대로 사용할 수 있다. 하지만 답을 분리할 때 T만 남게 되므로,
답의 차원은 반드시 섭씨온도로 표기한다. T_f에 대해 정리하면 다음과 같다.

$$T_f = \frac{c_c m_c T + C_b T_i + c_w m_w T_i}{c_w m_w + C_b + c_c m_c}$$

(5) 비커의 열용량을 포함한 주어진 값과 구리, 물의 비열을 Table. 18.4.1을
참고하여 대입하면 다음을 얻는다.

$$\begin{aligned} T_f &= \frac{(0.0923 \times 75 \times 312) + (45 \times 12) + (1.00 \times 220 \times 12)}{(1.00 \times 220) + 45 + (0.0923 \times 75)} \\ &= \frac{5339.82}{271.9225} \approx 19.637286 \ldots\ (°\mathrm{C}) \end{aligned}$$

차원분석 하면 **cmt**를 **cm**으로 나누니 온도 단위가 맞음

Ans: $20\,°\mathrm{C}$

열용량 식 $Q = C\Delta T$ (**Eq. 18.4.2**)
비열 식 $Q = cm\Delta T$ (**Eq. 18.4.3**)
얼음의 비열은 0.530 cal/g · K 또는 2220 J/kg · K을 사용할 수 있다.
(**b**)에서 J을 요구하므로, 2220 J/kg · K을 사용한다. 온도 차이가 필요하므로 섭씨온도를 써도 된다. 답의 차원은 에너지이다.
잠열 식 $Q = Lm$ (**Eq. 18.4.5**)
물의 융해 잠열 333 kJ/kg (**Eq. 18.4.7**)

Solution

Sol(a):

(1) $-10\,°\mathrm{C}$의 얼음이 $15\,°\mathrm{C}$의 물이 되는 과정을 빠짐없이 고려해야 한다.
- 1단계 : $-10\,°\mathrm{C}$의 얼음이 $0\,°\mathrm{C}$의 얼음이 된다. ($Q_1 = c_{\text{ice}} m\Delta T$ 흡수)
- 2단계 : $0\,°\mathrm{C}$의 얼음이 $0\,°\mathrm{C}$의 물이 된다. (변환열 $Q_2 = L_F m$ 흡수)
- 3단계 : $0\,°\mathrm{C}$의 물이 $15\,°\mathrm{C}$의 물이 된다. ($Q_3 = c_{\text{liq}} m\Delta T$ 흡수)

(2) 1단계에서 Eq. 18.4.3에 얼음의 비열을 Table. 18.4.1을 참고하여 다음을 얻는다. 반드시 단위에 유의하여 값을 대입한다.

$$Q_1 = c_{\text{ice}} m(T_f - T_i) = 2220 \times 0.720 \times [0 - (-10)] = 15\,984\,\mathrm{J}$$

(3) 2단계에서 Eq. 18.4.5에 Eq. 18.4.7을 참고하여 다음을 얻는다.

$$Q_2 = L_F m = 333 \times 0.720 = 239\,760\,(\mathrm{J})$$

(4) 3단계에서 Eq. 18.4.3에 물의 비열을 Table. 18.4.1을 참고하여 다음을 얻는다.

$$Q_3 = c_{\text{liq}} m(T_f - T_i) = 4187 \times 0.720 \times [15 - (-10)] = 45\,219.6\,\mathrm{J}$$

(5) 계가 흡수한 전체 열량은 다음과 같다.

$$Q_{tot} = Q_1 + Q_2 + Q_3 = 300\,963.6\,\mathrm{J}$$

Ans(a): 300 kJ

Sol(b):

(1) 210 kJ의 에너지는 얼음을 완전히 녹일 수 없다.
- 1단계 : $-10\,°\mathrm{C}$의 얼음이 $0\,°\mathrm{C}$의 얼음이 된다.
- 2단계 : $0\,°\mathrm{C}$의 얼음 중 일부만 물이 된다.

남은(**remaining**) 열은 $(210 - 15.984)\,\mathrm{kJ}$

(2) 위에서 구한대로, 1단계에는 15.984 kJ의 열이 사용되므로, 남은 열은 194.016 kJ이다.

잠열 식 $Q = Lm$ (**Eq. 18.4.5**)

(3) 194.016 kJ의 에너지로 녹일 수 있는 얼음의 양을 계산해야 한다. Eq. 18.4.5를 이용하면 다음을 얻는다.

$$m = \frac{Q_{\text{rem}}}{L_F} = \frac{194.016}{333} = 0.58263\ldots\,\mathrm{kg}$$

(4) 얼음 580 g을 녹일 수 있고, 남은 얼음의 양은 140 g이다.

Ans(b): $0\,°\mathrm{C}$의 얼음 140 g과 물 580 g

18.5 The First Law of Thermodynamics

본문 내용

section: 열역학 제1법칙

A Closer Look at Heat and Work

본문 내용

sub: 열과 일에 대한 자세한 고찰

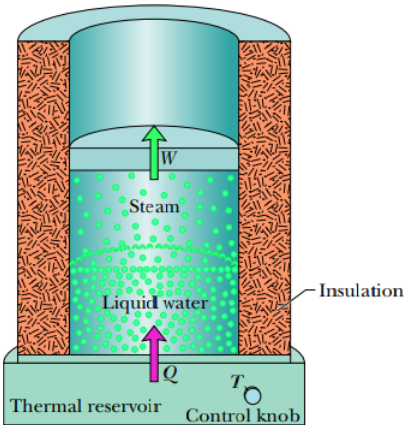


Fig. 18.5.1: A gas is confined to a cylinder with a movable piston. Heat Q can be added to or withdrawn from the gas by regulating the temperature T of the adjustable thermal reservoir. Work W can be done by the gas by raising or lowering the piston.

피스톤이 달린 원통 안에 기체가 갇혀 있다. 열저장고의 온도 T를 조절하여 열 Q를 기체에 더하거나 기체에서 제거할 수 있다. 피스톤이 움직일 때 기체는 W의 일을한다.

Fig. 18.5.1은 피스톤 속 기체가 하는 일과 열 전달을 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} dW &= \vec{F} \cdot d\vec{s} = (pA)(ds) = p(A\,ds) \\ &= p\,dV \end{aligned} \tag{18.5.1}$$

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p\,dV \tag{18.5.2}$$

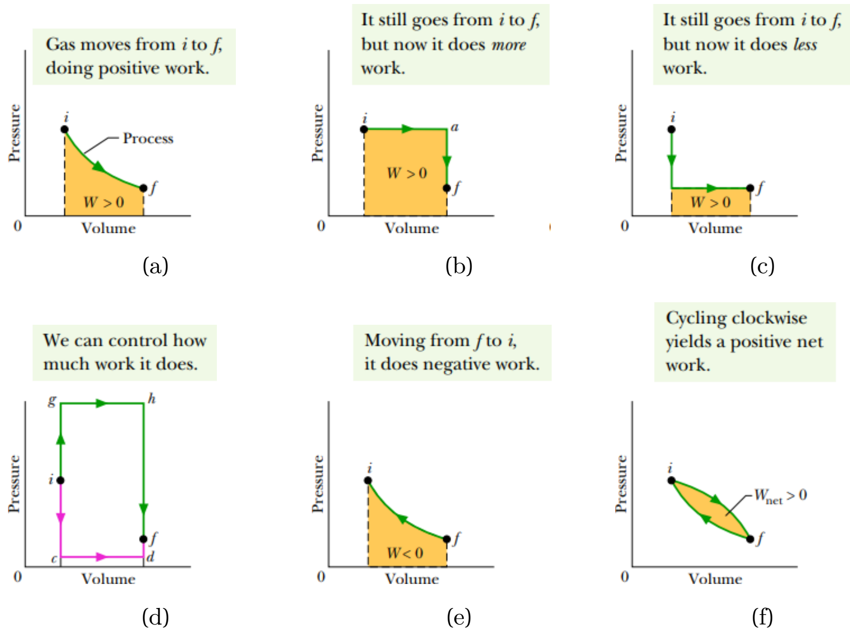


Fig. 18.5.2: (a) The shaded area represents the work W done by a system as it goes from an initial state i to a final state f. Work W is positive because the system's volume increases. (b) W is still positive, but now greater. (c) W is still positive, but now smaller. (d) W can be even smaller (path $icdf$) or larger (path $ighf$). (e) Here the system goes from state f to state i as the gas is compressed to less volume by an external force. The work W done by the system is now negative. (f) The net work W_{net} done by the system during a complete cycle is represented by the shaded area

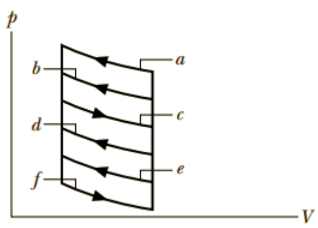
(a) 색칠한 부
태 f로 가면
계의 부피가
값이다.
(b) W 역시
크다.
(c) W는 여전
작다.
(d) W는 훨
$icdf$), 훨씬 더
(e) 상태 f에
져서 기체가
일 W는 음의
(f) 한 번의 순
W_{net}은 색칠

Fig. 18.5.2는 초기 상태에서 최종 상태로 이동할 때 시스템(기체)이 수행하는 일의 양

check 18.5.1

The $p-V$ diagram here shows six curved paths (connected by vertical paths) that can be followed by a gas. Which two of the curved paths should be part of a closed cycle (those curved paths plus connecting vertical paths) if the net work done by the gas during the cycle is to be at its maximum positive value?

그림과 같이 기체의 변화를 나타내는 수직 경로로 연결되어 있는 여섯 가지 $p-V$ 곡선이 있다. 순환과정 동안 기체가 한 알짜 일이 최대가 되도록 닫힌 경로를 만들때, 곡선 가운데 어느 두 개를 골라야 하는가?



Solution

Sol:

(1)

(2)

(3)

(ㅇ ㅇ

ㅇ ㅇ)

Ans(a):

Ans(b):

First Law of Thermodynamics

본문 내용

sub: 열역학 제1법칙

$$\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = Q - W \qquad \text{(first law)} \tag{18.5.3}$$

$$dE_{\text{int}} = dQ - dW \qquad \text{(first law)} \tag{18.5.4}$$

check 18.5.2

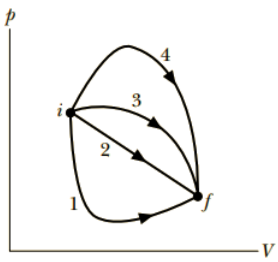
The figure here shows four paths on a p−V diagram along which a gas can be taken from state i to state f. Rank the paths according to (a) the change ΔE_{int} in the internal energy of the gas, (b) the work W done by the gas, and (c) the magnitude of the energy transferred as heat Q between the gas and its environment, greatest first.

그림의 $p - V$ 곡선 네 가지는 기체가 초기상태 i에서 최종상태 f로 변할 때의 경로이다. 다음의 양이 큰 경로부터 순서대로 나열하여라

(a) 기체 내부에너지의 변화 ΔE_{int},

(b) 기체가 한 일 W,

(c) 기체와 주위 사이에 전달된 열에너지 Q의 크기.



Solution

Sol:
(1)
(2)
(3)
(ㅇ ㅇ
ㅇ ㅇ)

Ans(a):

Ans(b):

Some Special Cases of the First Law of Thermodynamics

sub: 열역학 제1법칙의 특수한 경우

본문 내용

Table 18.5.1: The First Law of Thermodynamics: Four Special Cases

The Law : $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$ (Eq. 18.5.3)		
Process	Restriction	Consequence
Adiabatic	$Q = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = -W$
Constant volume	$W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = Q$
Closed cycle	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$Q = W$
Free expansion	$Q = W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = 0$

단열, 등적, 순환, 자유팽창

Table. 18.5.1은 열역학 제1법칙의 네 가지 특별한 과정을 나타낸 것이다.

1. ***Adiabatic processes.*** 단열과정은

$$\Delta E_{\text{int}} = -W \qquad \text{(adiabatic process)} \tag{18.5.5}$$

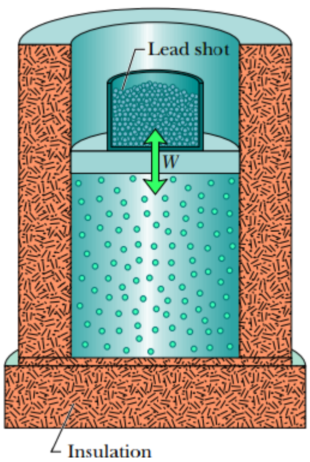


Fig. 18.5.3: An adiabatic expansion can be carried out by slowly removing lead shot from the top of the piston. Adding lead shot reverses the process at any stage.

단열팽창은 피스톤 위에 놓인 납알을 천천히 없애면 구현할 수 있다. 납알을 더하면 언제든지 반대 과정을 만들 수 있다.

Fig. 18.5.3은 단열팽창에 대한

2. ***Constant-volume processes.*** 등적과정은

$$\Delta E_{\text{int}} = Q \qquad \text{(constant-volume process)} \tag{18.5.6}$$

3. ***Cyclical processes.*** 순환과정은

$$Q = W \qquad \text{(cyclical process)} \tag{18.5.7}$$

4. ***Free expansions.*** 자유팽창은

$$\Delta E_{\text{int}} = 0 \qquad \text{(free expansion)} \tag{18.5.8}$$

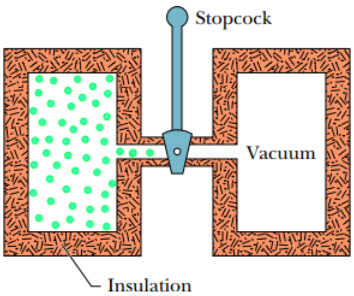


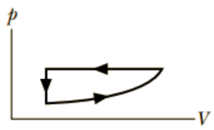
Fig. 18.5.4: The initial stage of a free-expansion process. After the stopcock is opened, the gas fills both chambers and eventually reaches an equilibrium state.

Fig. 18.5.4는 자유팽창과정의 초기 단계를 나타낸 것이다.

자유팽창과정의 초기단계. 잠금마개를 열면 기체가 양쪽 방을 채우면서, 결국에는 평형 상태에 도달하게 된다.

check 18.5.3

For one complete cycle as shown in the $p-V$ diagram here, are (a) ΔE_{int} for the gas and (b) the net energy transferred as heat Q positive, negative, or zero?



오른편의 $p-V$ 그림은 어떤 순환과정이다.
(a) 기체의 ΔE_{int},
(b) 알짜 열에너지 전달량 Q는 양수인가, 음수인가, 아니면 0인가?

Solution

Sol:

(1)

(2)

(3)

(ㅇ ㅇ
ㅇ ㅇ)

Ans(a):

Ans(b):

practice 18.5.1 First law of thermodynamics: work, heat, internal energy change

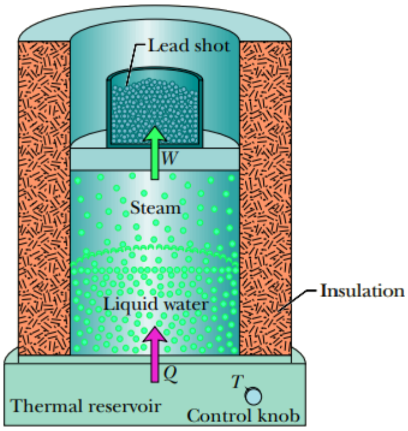


Fig. 18.5.5: Water boiling at constant pressure. Energy is transferred from the thermal reservoir as heat until the liquid water has changed completely into steam. Work is done by the expanding gas as it lifts the loaded piston.

Let 1.00 kg of liquid water at 100 °C be converted to steam at 100 °C by boiling at standard atmospheric pressure (which is 1.00 atm or 1.01×10^5 Pa) in the arrangement of Fig. 18.5.5. The volume of that water changes from an initial value of $1.00 \times 10^{-3}\,\mathrm{m}^3$ as a liquid to $1.671\,\mathrm{m}^3$ as steam.

(a) How much work is done by the system during this process?

(b) How much energy is transferred as heat during the process?

Sol:

Ans:

물이 일정
완전히 수
에너지를
피스톤을

원서에서는
로 나옴
열역학 제1
Fig. 18.5
표준대기압
에서 100 °
초기 부피
되었을 때
(a) 계가 한
(b) 이 과
지는 얼마

18.6 Heat Transfer Mechanisms

본문 내용

section: 열전달 과정

Heat Transfer Mechanisms

본문 내용

sub: 열전달 과정

* Conduction

본문 내용

subsub: 전도

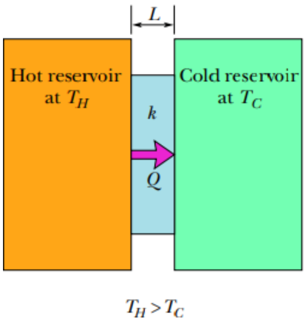


Fig. 18.6.1: Thermal conduction. Energy is transferred as heat from a reservoir at temperature T_H to a cooler reservoir at temperature T_C through a conducting slab of thickness L and thermal conductivity k

Fig. 18.6.1은 열전도를 나타낸 것이다.

$$P_{\text{cond}} = \frac{Q}{t} = kA\frac{T_H - T_C}{L} \tag{18.6.1}$$

Table 18.6.1: Some Thermal Conductivities

Substance	k (W/m · K)
Metals	
Stainless steel	14
Lead	35
Iron	67
Brass	109
Aluminum	235
Copper	401
Silver	428
Gases	
Air (dry)	0.026
Helium	0.15
Hydrogen	0.18
Building Materials	
Polyurethane foam	0.024
Rock wool	0.043
Fiberglass	0.048
White pine	0.11
Window glass	1.0

Table. 18.6.1은 몇 가지 물질의 열전도도를 나타낸 것이다.

* Thermal Resistance to Conduction (R-Value)

subsub: 전도에 대한 열저항(R 값)

본문 내용

$$R = \frac{L}{k} \tag{18.6.2}$$

* Conduction Through a Composite Slab

subsub: 복합판을 통한 열전도

본문 내용

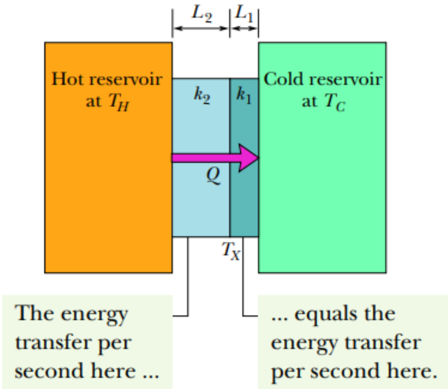


Fig. 18.6.2: Heat is transferred at a steady rate through a composite slab made up of two different materials with different thicknesses and different thermal conductivities. The steady-state temperature at the interface of the two materials is T_X

Fig. 18.6.2는 복합판을 통한 열전도를 나타낸 것이다.

$$P_{\text{cond}} = \frac{k_2 A(T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A(T_X - T_C)}{L_1} \tag{18.6.3}$$

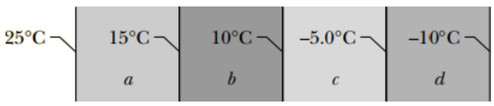
$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1} \tag{18.6.4}$$

$$P_{\text{cond}} = \frac{A(T_H - T_C)}{L_1/k_1 + L_2/k_2} \tag{18.6.5}$$

$$P_{\text{cond}} = \frac{A(T_H - T_C)}{\sum(L/k)} \tag{18.6.6}$$

check 18.6.1

The figure shows the face and interface temperatures of a composite slab consisting of four materials, of identical thicknesses, through which the heat transfer is steady. Rank the materials according to their thermal conductivities, greatest first.



오른편 그림처럼 두께가 같은 네 가지 물질로 이루어진 복합판에 열이 정상상태로 전달되고 있다. 표면과 경계면의 온도가 그림과 같을 때 열전도도가 가장 큰 순서대로 나열하여라.

Solution

Sol:

(1)

(2)

(3)

(ㅇ ㅇ

ㅇ ㅇ)

Ans(a):

Ans(b):

* Convection

본문 내용

subsub: 대

* Radiation

subsub: 복사

본문 내용

$$P_{\text{rad}} = \sigma\varepsilon A T^4 \tag{18.6.7}$$

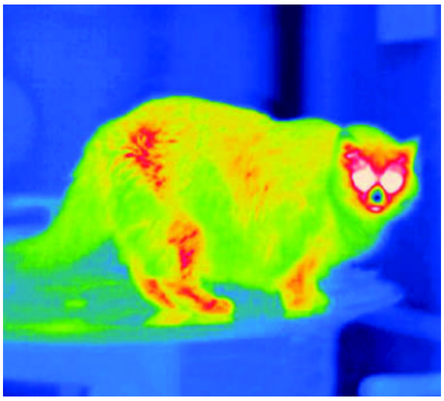


Fig. 18.6.3: A false-color thermogram reveals the rate at which energy is radiated by a cat. The rate is colorcoded, with white and red indicating the greatest radiation rate. The nose is cool.

색깔을 입힌 열상사진은 고양이의 에너지 복사율을 나타낸다. 흰색과 빨간색은 복사율이 가장 높은 곳이다. 따라서 고양이 코가 가장 차다.

Fig. 18.6.3은 색깔을 입힌 열상사진이다.

$$P_{\text{abs}} = \sigma\varepsilon A T_{\text{env}}^4 \tag{18.6.8}$$

$$P_{\text{net}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{rad}} = \sigma\varepsilon A \left(T_{\text{env}}^4 - T^4\right) \tag{18.6.9}$$

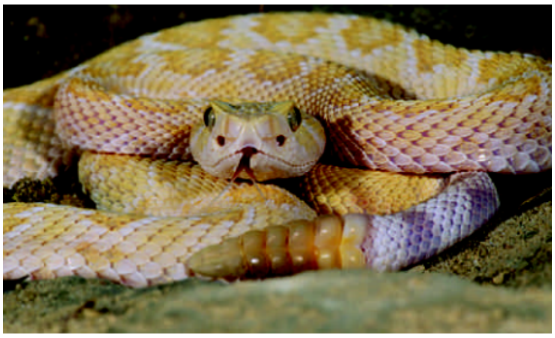


Fig. 18.6.4: A rattlesnake's face has thermal radiation detectors, allowing the snake to strike at an animal even in complete darkness.

방울뱀의 얼굴에는 캄캄한 야음에도 동물을 공격할 수 있는 열복사 감지기가 있다.

방울뱀(Fig. 18.6.4)은 열복사를 감지할 수 있다.

practice 18.6.1 Thermal conduction through a layered wall

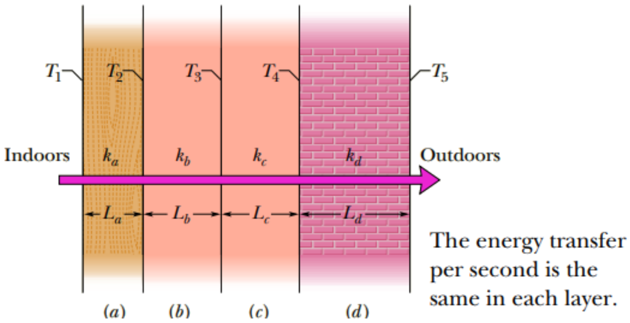


Fig. 18.6.5: Steady-state heat transfer through a wall.

Fig. 18.6.5 shows the cross section of a wall made of white pine of thickness L_a and brick of thickness $L_d\,(=2.0L_a)$, sandwiching two layers of unknown material with identical thicknesses and thermal conductivities. The thermal conductivity of the pine is k_a and that of the brick is $k_d\,(=5.0k_a)$. The face area A of the wall is unknown. Thermal conduction through the wall has reached the steady state; the only known interface temperatures are $T_1 = 25\,°\mathrm{C}$, $T_2 = 20\,°\mathrm{C}$, and $T_5 = -10\,°\mathrm{C}$. What is interface temperature T_4?

Sol:

Ans:

정상상태의 열전도가 이루어지고 있는 네 겹으로 이루어진 벽

여러 층의 벽을 통한 열전도

Fig. 18.6.5의 벽 은 맨 안 쪽 이 두 께 L_a 인 전나무판이고 바깥쪽은 두께 $L_d\,(= 2.0L_a)$인 벽돌로 이루어져 있다. 두 벽 사이에는 두께와 열전도가 동일한 두 판이 들어가 있다. 전나무와 벽돌의 열전도도는 각각 k_a, $k_d\,(= 5.0k_a)$이고, 벽의 면적 A의 값은 모른다. 벽을 통한 열전도가 정상상태에 도달했을 때 알고 있는 온도는 $T_1 = 25\,°\mathrm{C}$, $T_2 = 20\,°\mathrm{C}$, $T_5 = -10\,°\mathrm{C}$이다. 경계면의 온도 T_4는 얼마인가?

practice 18.6.2 Making ice by radiating to the sky

During an extended wilderness hike, you have a terrific craving for ice. Unfortunately, the air temperature drops to only $6.0\,°\mathrm{C}$ each night—too high to freeze water. However, because a clear, moonless night sky acts like a blackbody radiator at a temperature of $T_s = -23\,°\mathrm{C}$, perhaps you can make ice by letting a shallow layer of water radiate energy to such a sky. To start, you thermally insulate a container from the ground by placing a poorly conducting layer of, say, foam rubber, bubble wrap, Styrofoam peanuts, or straw beneath it. Then you pour water into the container, forming a thin, uniform layer with mass $m = 4.5\,\mathrm{g}$, top surface $A = 9.0\,\mathrm{cm}^2$, depth $d = 5.0\,\mathrm{mm}$, emissivity $\varepsilon = 0.90$, and initial temperature $6.0\,°\mathrm{C}$. Find the time required for the water to freeze via radiation. Can the freezing be accomplished during one night?

Sol:

Ans:

하늘로 복사하여 얼음 만들기

긴 황야 도보여행을 하는 동안 얼음을 먹고 싶어졌다. 불행하게도 공기의 온도는 밤마다 $6.0\,°\mathrm{C}$로 떨어져 얼음이 얼기에는 온도가 너무 높다. 그러나 맑고, 달이 없는 밤하늘은 온도 $T_s = -23\,°\mathrm{C}$에서 흑체와 같이 작용하므로 물의 얇은 층에서 에너지를 밤하늘로 복사 방출하여 얼음을 만들 수 있을 것이다. 먼저 거품 고무, 거품 포장지, 스티로폼이나 밀짚과 같이 열을 잘 전달하지 않는 층을 용기 아래 지면에 놓아 용기를 열적으로 고립시킨다. 그리고 질량 $m = 4.5\,\mathrm{g}$, 윗면의 넓이 $A = 9.0\,\mathrm{cm}^2$, 깊이 $d = 5.0\,\mathrm{mm}$, 복사율 $\varepsilon = 0.90$, 초기 온도 $6.0\,°\mathrm{C}$인 용기에 물을 붓는다. 복사에 의해 물이 어는 데 걸리는 시간을 구하여라. 하루 밤 동안 얼릴 수 있는가?

Chapter 19

The Kinetic Theory of Gases

19.1 Avogadro's Number

본문 내용

chapter: 기체운동론
section: Avogadro 수

Avogadro's Number

본문 내용

sub: Avogadro 수

$$N_A = 6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1} \qquad \text{(Avogadro's number)} \tag{19.1.1}$$

$$n = \frac{N}{N_A} \tag{19.1.2}$$

$$n = \frac{M_{\text{sam}}}{M} = \frac{M_{\text{sam}}}{mN_A} \tag{19.1.3}$$

$$M = mN_A \tag{19.1.4}$$

19.2 Ideal Gases

본문 내용

section: 이상기체

Ideal Gases

본문 내용

sub: 이상기체

$$pV = nRT \qquad \text{(ideal gas law)} \tag{19.2.1}$$

$$R = 8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \tag{19.2.2}$$

$$k = \frac{R}{N_A} = \frac{8.31 \text{ J/mol} \cdot \text{K}}{6.02 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}} = 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K} \tag{19.2.3}$$

$$nR = Nk \tag{19.2.4}$$

$$pV = NkT \qquad \text{(ideal gas law)} \tag{19.2.5}$$

* Work Done by an Ideal Gas at Constant Temperature

subsub: 온도가 일정할 때 이상기체가 한 일

본문 내용

$$p = nRT\frac{1}{V} = (\text{a constant})\frac{1}{V} \tag{19.2.6}$$

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p\,dV \tag{19.2.7}$$

$$W = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V}\,dV \tag{19.2.8}$$

$$W = nRT\int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = W = nRT\Big[\ln V\Big]_{V_i}^{V_f} \tag{19.2.9}$$

$$W = nRT\ln\frac{V_f}{V_i} \qquad \text{(ideal gas, isothermal process)} \tag{19.2.10}$$

* Work Done at Constant Volume and at Constant Pressure

subsub: 압력과 부피가 일정할 때 한 일 이상기체가 한 일임. 누가 한 일인지 써줘야 함

본문 내용

$$W = 0 \quad \text{(constant-volume process)} \tag{19.2.11}$$

$$W = p(V_f - V_i) = p\,\Delta V \qquad \text{(constant-pressure process)} \tag{19.2.12}$$

19.3 Pressure, Temperature, and RMS Speed

section: 압력, 온도 및 제곱평균제곱근 속력

본문 내용

Pressure, Temperature, and RMS Speed

sub: 압력, 온도 및 제곱평균제곱근 속력

본문 내용

$$\Delta p_x = (-mv_x) - (mv_x) = -2mv_x$$

$$\frac{\Delta p_x}{\Delta t} = \frac{2mv_x}{2L/v_x} = \frac{mv_x^2}{L}$$

$$
\begin{aligned}
p &= \frac{F_x}{L^2} = \frac{mv_{x1}^2/L + mv_{x2}^2/L + \cdots + mv_{xN}^2/L}{L^2} \\
&= \left(\frac{m}{L^3}\right)(v_{x1}^2 + v_{x2}^2 + \cdots + v_{xN}^2)
\end{aligned} \tag{19.3.1}
$$

$$p = \frac{nmN_A}{L^3}\left(v_x^2\right)_{\text{avg}}$$

$$p = \frac{nM(v_x^2)_{\text{avg}}}{V} \tag{19.3.2}$$

$$p = \frac{nM(v^2)_{\text{avg}}}{3V} \tag{19.3.3}$$

$$p = \frac{nMv_{\text{rms}}^2}{3V} \tag{19.3.4}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \tag{19.3.5}$$

19.4 Translational Kinetic Energy

본문 내용

section: 병진 운동에너지

Translational Kinetic Energy

본문 내용

sub: 병진 운동에너지

$$K_{\text{avg}} = \left(\tfrac{1}{2}mv^2\right)_{\text{avg}} = \tfrac{1}{2}m(v^2)_{\text{avg}} = \tfrac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2 \tag{19.4.1}$$

$$K_{\text{avg}} = \left(\tfrac{1}{2}m\right)\frac{3RT}{M}$$

$$K_{\text{avg}} = \frac{3RT}{2N_A}$$

$$K_{\text{avg}} = \tfrac{3}{2}kT \tag{19.4.2}$$

19.5 Mean Free Path

본문 내용

section: 평균자유거리

Mean Free Path

본문 내용

sub: 평균자

$$\lambda = \frac{1}{\sqrt{2}\,\pi d^2\, N/V} \qquad \text{(mean free path)} \tag{19.5.1}$$

$$\begin{aligned}\lambda &= \frac{\text{length of path during } \Delta t}{\text{number of collisions in } \Delta t} \approx \frac{v\,\Delta t}{\pi d^2 v\,\Delta t\, N/V} \\ &= \frac{1}{\pi d^2\, N/V}\end{aligned} \tag{19.5.2}$$

19.6 The Distribution of Molecular Speeds

section: 분자의 속력 분포

본문 내용

The Distribution of Molecular Speeds

sub: 분자의 속력 분포

본문 내용

$$P(v) = 4\pi \left(\frac{M}{2\pi R T}\right)^{3/2} v^2 e^{-Mv^2/2RT} \tag{19.6.1}$$

$$\int_0^\infty P(v)\, dv = 1 \tag{19.6.2}$$

$$\text{frac} = \int_{v_1}^{v_2} P(v)\, dv \tag{19.6.3}$$

* Average, RMS, and Most Probable Speeds

subsub: 평 균 속 력, RMS 속 력, 가 장 잦은 속력
최빈속력이라고 보통 부름

본문 내용

$$v_{\text{avg}} = \int_0^\infty v\, P(v)\, dv \tag{19.6.4}$$

$$v_{\text{avg}} = \sqrt{\frac{8RT}{\pi M}} \qquad \text{(average speed)} \tag{19.6.5}$$

$$(v^2)_{\text{avg}} = \int_0^\infty v^2\, P(v)\, dv \tag{19.6.6}$$

$$(v^2)_{\text{avg}} = \frac{3RT}{M} \tag{19.6.7}$$

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{(v^2)_{\text{avg}}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \qquad \text{(rms speed)} \tag{19.6.8}$$

$$v_p = \sqrt{\frac{2RT}{M}} \qquad \text{(most probable speed)} \tag{19.6.9}$$

19.7 The Molar Specific Heats of an Ideal Gas

본문 내용

section: 이상기체의 몰비열

The Molar Specific Heats of an Ideal Gas

본문 내용

sub: 이상기체의 몰비열

* Internal Energy E_{int}

본문 내용

subsub: 내부에너지 E_{int}

$$E_{\text{int}} = (nN_A)K_{\text{avg}} = (nN_A)\left(\tfrac{3}{2}kT\right) \tag{19.7.1}$$

$$E_{\text{int}} = \tfrac{3}{2}nRT \qquad \text{(monatomic ideal gas)} \tag{19.7.2}$$

* Molar Specific Heat at Constant Volume

본문 내용

subsub: 부피가 일정할 때의 몰비열

$$Q = nC_V\,\Delta T \qquad \text{(constant volume)} \tag{19.7.3}$$

$$\Delta E_{\text{int}} = nC_V\,\Delta T - W \tag{19.7.4}$$

$$C_V = \frac{\Delta E_{\text{int}}}{n\,\Delta T} \tag{19.7.5}$$

$$\Delta E_{\text{int}} = \tfrac{3}{2}nR\,\Delta T \tag{19.7.6}$$

$$C_V = \tfrac{3}{2}R = 12.5\ \text{J/mol}\cdot\text{K} \qquad \text{(monatomic gas)} \tag{19.7.7}$$

$$E_{\text{int}} = nC_VT \qquad \text{(any ideal gas)} \tag{19.7.8}$$

$$\Delta E_{\text{int}} = nC_V\,\Delta T \qquad \text{(ideal gas, any process)} \tag{19.7.9}$$

* Molar Specific Heat at Constant Pressure

본문 내용

subsub: 압

$$Q = nC_p\,\Delta T \qquad \text{(constant pressure)} \tag{19.7.10}$$

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \tag{19.7.11}$$

$$W = p\,\Delta V = nR\,\Delta T \tag{19.7.12}$$

$$C_V = C_p - R$$

$$C_p = C_V + R \tag{19.7.13}$$

19.8 Degrees of Freedom and Molar Specific Heats

section: 자유도와 몰비열

본문 내용

Degrees of Freedom and Molar Specific Heats

sub: 자유도와 몰비열

본문 내용

$$C_V = \left(\frac{f}{2}\right) R = 4.16f\ \text{J/mol}\cdot\text{K} \tag{19.8.1}$$

A Hint of Quantum Theory

sub: 양자론의 단서

본문 내용

19.9 The Adiabatic Expansion of an Ideal Gas

section: 이상기체의 단열팽창

본문 내용

The Adiabatic Expansion of an Ideal Gas

sub: 이상기체의 단열팽창

본문 내용

$$pV^{\gamma} = \text{a constant} \qquad \text{(adiabatic process)} \tag{19.9.1}$$

단열과정에서 압력과 부피 사이의 관계식(Eq. 19.9.1)은

$$p_i V_i^{\gamma} = p_f V_f^{\gamma} \qquad \text{(adiabatic process)} \tag{19.9.2}$$

$$\left(\frac{nRT}{V}\right) V^{\gamma} = \text{a constant}$$

$$\boxed{TV^{\gamma-1} = \text{a constant} \qquad \text{(adiabatic process)} \qquad (19.9.3)}$$

$$T_i V_i^{\gamma-1} = T_f V_f^{\gamma-1} \qquad \text{(adiabatic process)} \tag{19.9.4}$$

* Proof of Eq. 19.9.1

본문 내용

subsub: Eq. 19.9.1의 증명

$$dE_{\text{int}} = Q - p\,dV \tag{19.9.5}$$

$$n\,dT = -\left(\frac{p}{C_V}\right) dV \tag{19.9.6}$$

$$p\,dV + V\,dp = nR\,dT \tag{19.9.7}$$

$$n\,dT = \frac{p\,dV + V\,dp}{C_p - C_V} \tag{19.9.8}$$

$$\frac{dp}{p} + \left(\frac{C_p}{C_V}\right) \frac{dV}{V} = 0$$

$$\ln p + \gamma \ln V = \text{a constant}$$

$$pV^{\gamma} = \text{a constant} \tag{19.9.9}$$

* Free Expansions

본문 내용

subsub: 자유팽창

$$T_i = T_f \qquad \text{(free expansion)} \tag{19.9.10}$$

$$p_i V_i = p_f V_f \qquad \text{(free expansion)} \tag{19.9.11}$$

Chapter 20

Entropy and the Second Law of Thermodynamics

20.1 Entropy

본문 내용

chapter: 엔트로피와 열역학 제2법칙
section: 엔트로피

Irreversible Processes and Entropy

본문 내용

sub: 비가역과정과 엔트로피

Change in Entropy

본문 내용

sub: 엔트로피 변화

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad \text{(change in entropy defined)} \tag{20.1.1}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{1}{T}\int_i^f dQ$$

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{Q}{T} \quad \text{(change in entropy, isothermal process)} \tag{20.1.2}$$

$$\Delta S = S_f - S_i \approx \frac{Q}{T_{\text{avg}}} \tag{20.1.3}$$

* Entropy as a State Function

본문 내용

subsub: 상태함수로서 엔트로피

$$dE_{\text{int}} = dQ - dW$$

$$dQ = p\,dV + nC_V\,dT$$

$$\frac{dQ}{T} = nR\frac{dV}{V} + nC_V\frac{dT}{T}$$

$$\int_i^f \frac{dQ}{T} = \int_i^f nR\,\frac{dV}{V} + \int_i^f nC_V\,\frac{dT}{T}$$

$$\Delta S = S_f - S_i = nR\ln\frac{V_f}{V_i} + nC_V\ln\frac{T_f}{T_i} \tag{20.1.4}$$

The Second Law of Thermodynamics

sub: 열역학 제2법칙

본문 내용

$$\Delta S_{\text{gas}} = -\frac{|Q|}{T}$$

$$\Delta S_{\text{res}} = +\frac{|Q|}{T}$$

$$\Delta S \geq 0 \qquad \text{(second law of thermodynamics)} \tag{20.1.5}$$

* Force Due to Entropy

subsub: 엔트로피 때문에 생기는 힘

본문 내용

$$dE = dQ - dW$$

$$dE = T\,dS + F\,dx \tag{20.1.6}$$

$$F = -T\frac{dS}{dx} \tag{20.1.7}$$

20.2 Entropy in the Real World: Engines

section: 일상생활의 엔트로피: 기관

본문 내용

Entropy in the Real World: Engines

sub: 일상생활의 엔트로피: 기관

본문 내용

* A Carnot Engine

subsub: Carnot 기관
카르노기관

본문 내용

$$W = |Q_H| - |Q_L| \tag{20.2.1}$$

$$\Delta S = \Delta S_H + \Delta S_L = \frac{|Q_H|}{T_H} - \frac{|Q_L|}{T_L} \tag{20.2.2}$$

$$\frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_L|}{T_L} \tag{20.2.3}$$

* Efficiency of a Carnot Engine

본문 내용

subsub: Carnot 기관의 효율

$$\varepsilon = \frac{\text{energy we get}}{\text{energy we pay for}} = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad \text{(efficiency, any engine)} \tag{20.2.4}$$

$$\varepsilon = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \tag{20.2.5}$$

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad \text{(efficiency, Carnot engine)} \tag{20.2.6}$$

* Stirling Engine

본문 내용

subsub: Stirling 기관
스털링엔진, 스털링기관

20.3 Refrigerators and Real Engines

본문 내용

section: 냉동기와 실제 기관

Entropy in the Real World: Refrigerators

본문 내용

sub: 일상생활의 엔트로피: 냉동기

$$K = \frac{\text{what we want}}{\text{what we pay for}} = \frac{|Q_L|}{|W|} \quad \begin{array}{l}\text{(coefficient of performance,}\\ \text{any refrigerator)}\end{array} \tag{20.3.1}$$

$$K = \frac{|Q_L|}{|Q_H| - |Q_L|} \tag{20.3.2}$$

$$K_C = \frac{T_L}{T_H - T_L} \quad \begin{array}{l}\text{(coefficient of performance,}\\ \text{Carnot refrigerator)}\end{array} \tag{20.3.3}$$

$$\Delta S = -\frac{|Q|}{T_L} + \frac{|Q|}{T_H}$$

The Efficiencies of Real Engines

본문 내용

sub: 실제 기관의 효율

$$\varepsilon_X > \varepsilon_C \quad \text{(a claim)} \tag{20.3.4}$$

$$\frac{|W|}{|Q'_{\mathrm{H}}|} > \frac{|W|}{|Q_{\mathrm{H}}|}$$

$$|Q_{\mathrm{H}}| > |Q'_{\mathrm{H}}| \tag{20.3.5}$$

$$|Q_{\mathrm{H}}| - |Q_{\mathrm{L}}| = |Q'_{\mathrm{H}}| - |Q_{\mathrm{L}}|$$

$$|Q_{\mathrm{H}}| - |Q'_{\mathrm{H}}| = |Q_{\mathrm{L}}| - |Q'_{\mathrm{L}}| = Q \tag{20.3.6}$$

20.4 A Statistical View of Entropy

section: 통계역학적 관점에서 본 엔트로피

본문 내용

A Statistical View of Entropy

sub: 통계역학적 관점에서 본 엔트로피

본문 내용

$$W_{\mathrm{III}} = \frac{6!}{4!\,2!} = \frac{720}{24 \times 2} = 15$$

$$W = \frac{N!}{n_1!\,n_2!} \qquad \text{(multiplicity of configuration)} \tag{20.4.1}$$

* Probability and Entropy

subsub: 확률과 엔트로피

본문 내용

$$S = k \ln W \qquad \text{(Boltzmann's entropy equation)} \tag{20.4.2}$$

$$\ln N! \;\approx\; N(\ln N) - N \qquad \text{(Stirling's approximation)} \tag{20.4.3}$$

principles of physics

seol