

제12장 온도와 열

- 12-1 온도
- 12-2 온도의 정의와 측정
- 12-3 열과 일
- 12-4 열역학 제1법칙
- 12-5 열팽창과 열전달
- 12-6 비열과 잠열

수 많은 입자들로 이루어진 다체계의 운동을 자세히 또 정확하게 기술하기 위해서는 각 입자의 위치, 운동량 등, 모든 미시적인 물리량들을 알아내야 한다. 하지만 아보가드로 수만큼이나 되는 입자들의 운동을 뉴턴의 역학법칙으로 풀어낸다는 것은 불가능한 일이다. 그렇다면 이러한 다체계에 대해서는 물리 법칙이 아무 쓸모가 없는 것일까? 그렇지 않다. 다체계의 중요한 물리적 성질들은 부피, 압력, 온도, 밀도, 점도 등 거시적인 양들이며, 이런 거시적인 양들은 대체로 미시적인 양들의 평균값에만 의존한다. 뉴턴의 역학법칙들이 미시적인 양들 간의 관계를 기술하였듯이, 이런 거시적인 양들 간의 관계를 기술하는 것이 바로 열역학이다. 또한 이런 거시적인 양들과 미시적인 양들 간의 관계를 체계적으로 맺어주는 학문이 통계역학이다. 이 장에서는 열역학의 거시적 관점에 대해 다루고, 제13장에서는 미시적 관점에 대해서, 또 제14장에서는 현대 물리학의 수수께끼 중의 하나인 열역학 제2법칙에 대해 알아본다.

12-1 온도

우리가 일상생활에서 느끼는 덥다, 춥다, 따뜻하다는 느낌은 어떻게 생겨날까? 또 어떤 물질을 만졌을 때 손을 통해 전해 오는 뜨겁다, 차갑다는 느낌은 어떻게 생겨날까? 이러한 느낌의 원인을 알아내는 일과 또 이 느낌의 정도를 정확히 계량화 하는 일은 간단하지 않다. 이미 우리는 이러한 느낌의 정도와 그 물질의 온도가 서로 관련이 있다는 사실을 경험으로

알고 있다. 그러면 온도는 어떻게 정의되는 것일까? 또 물질의 온도는 그 물질의 어떤 물리적 성질과 관련이 있는 것일까? 물질의 온도를 실제로 어떻게 측정할 수 있을까?

뜨거운 물체에 손을 대었을 때, 우리는 손을 통해 무엇인가 전해 오는 느낌을 받게 된다. 이것을 열이라고 부르며 이는 에너지 덩어리이다. 온도가 다른 두 물체를 서로 접촉시켜 놓고 오랜 시간 기다려보면 온도가 높은 물체에서 낮은 물체로 열이 전달되어, 결국에는 두 물체의 온도가 같아지는 경우를 우리는 종종 볼 수 있다. 이때 우리는 두 물체가 열역학적 평형에 이르렀다고 말한다. 왜 이런 일이 일어날까? 이러한 질문들에 대답하기 위해서 먼저 온도에 대해 알아 보자.

온도는 거리, 시간, 질량, 전하 등과 같이 근본적인 물리량의 하나이다. 다시 말해서 다른 근본적인 물리량 단위들의 조합으로 표시될 수 없다. 온도는 수많은 입자들이 모인 다체계에에서만 나타나는 거시적인 물리량이다. 전자 한 개의 온도를 논의하는 것은 무의미하다. 물리학에서는 온도의 표준 단위로 켈빈(K; Kelvin)을 사용한다. 1기압에서 물이 끓는 온도는 이 단위로 약 373 K이며 물이 어는 온도는 약 273 K이다. 온도는 무한히 높을 수는 있지만 내려가는데는 한계가 있다. 마치 물체의 속력이 광속도를 넘지 못하는 것과 유사하다. 가장 낮은 온도를 0 K로 정의한다.

물체의 거시적인 양들은 온도에 따라 변화한다. 예를 들어 철막대의 길이, 유체의 부피, 도선의 저항등은 온도에 따라 변화한다. 철막대는 온도를 높이면 길이가 늘어난다. 이러한 성질을 이용하여 우리는 온도를 측정할 수 있는 기구를 만들 수 있다. 예를 들어 온도측정 기구로 작은 철막대를 사용하여 서로 온도가 다른 두 물체의 온도를 측정하고 싶다고 하자. 먼저 A라는 물체에 철막대를 접촉시킨 후 잠시동안 기다리면 A와 철막대는 열평형을 이루어 같은 온도에 다다르게 된다. 이 때 철막대의 길이를 기록해 놓는다. (철막대는 A에 비해 아주 작아서 열평형에 이른 후에도 A의 온도는 접촉전에 비해 거의 변하지 않았다고 가정한다.) 이번에는 B물체에 철막대를 접촉시킨 후 잠시 기다렸다가 철막대의 길이를 기록해 놓는다. 이 두 길이를 비교해 봄으로써 우리는 A 물체와 B 물체중 어느 물체 더 온도가 높은지 알 수 있으며, 또 어느 정도 높은 지도 알 수 있다. 철막대의 길이 차이가 많이 나면 A, B 두 물체의 온도차는 크며, 또 적게 나면 온도차도 적을 것이다. 만약 길이가 같다면, 두 물체의 온도는 같을 것이며, A와 B를 접촉시켜 놓으면 이 두 물체는 즉시 그 온도에서 열평형을 이룰 것이다.

철막대를 이용하여 온도를 측정하는 방법은 손쉬운 방법이나 모든 사람들이 공통적으로 사용할 수 있는 표준 온도를 정의하는 방법으로는 부정확하다. 철막대의 재질, 두께 등에 따라 늘어나는 길이가 달라지기 때문이다. 그러므로 표준 온도를 정의하는 방법으로는 기체 온도계를 사용한다.

는가는 아직 논의하지 않았다. 주어진 물체의 길이를 알기 위해서는 제1장에서 정의된 표준 길이 1m의 몇 배가 되는지를 여러 가지 간단한 측정기구를 사용하여 측정하면 되지만, 주어진 물체의 온도를 측정하는 일은 간단하지 않다. 왜냐하면 어떤 온도 측정 기구를 사용하느냐에 따라(어떤 식으로 주어진 물체의 온도를 정의하느냐에 따라) 주어진 물체의 온도는 달라질 수 있기 때문이다. 예를 들어 온도 측정 기구로 철막대를 사용한다고 가정하여 보자. 삼중점에 있는 물에 철막대를 접촉시켰을 때의 철막대의 길이와 주어진 물체에 철막대를 접촉시켰을 때의 철막대의 길이를 비교함으로써 주어진 물체의 온도를 정의할 수 있다. 하지만 이런 식으로 주어진 물체의 온도를 정의하는 것은 철막대의 재질, 두께, 길이에 따라 달라질 수 있기 때문에 비현실적이다. 따라서 좀 더 일반적이고 표준적인 온도측정기구를 사용해야만 한다.

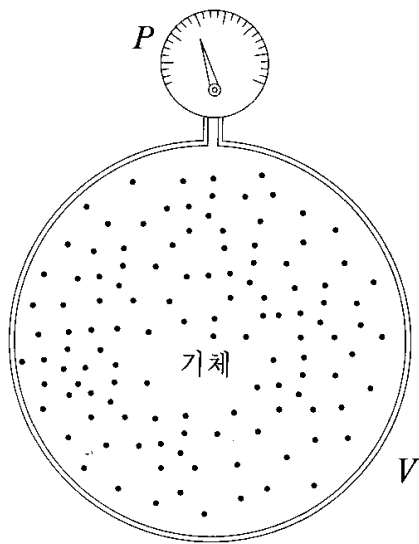
표준 온도 측정 기구로 기체 온도계를 보편적으로 사용한다. 기체 온도계는 기체를 단단한 용기 속에 채워 넣고 그 기체의 압력을 측정할 수 있는 압력계를 부착해 놓은 기구이다(그림 12.2). 기체의 압력이 변화해도 기체를 담은 용기의 부피는 변화하지 않는다. 그래서 이 온도계를 정적 기체 온도계라 부른다.

주어진 물체의 온도를 측정하기 위해서 먼저 기체 온도계를 물체에 접촉시켜 열평형을 이룰 때까지 기다린다. (여기서 기체 온도계는 물체에 비해 아주 작아서 열평형에 이른 후에도 물체의 온도는 접촉 전에 비해 거의 변하지 않았다고 가정한다.) 주어진 물체의 온도에 따라 기체의 압력은 변화한다. 압력계의 눈금을 읽어 기체의 압력 P 를 측정하며, 물체의 온도 T 를 압력 P 에 비례하는 양으로 다음과 같이 정의한다.

$$T = T^* \left(\frac{P}{P^*} \right) \quad (12.1)$$

여기서 T^* 는 물의 삼중점에서의 온도(273.16 K)이며 P^* 는 이 온도계를 삼중점에 있는 물과 접촉시켰을 때 압력계에 나타나는 기체의 압력이다. 따라서 삼중점에 있는 물의 온도는 앞의 표준 온도 단위에서 정의한대로 273.16 K가 된다.

위 방정식으로 표현된 온도의 정의에는 아무런 문제점이 없을까? 아직까지 우리는 용기 속에 들어있는 기체의 성질에 대해서는 아무런 언급도 하지 않았다. 먼저 삼중점에 있는 물과 접촉시켰을 때 얻어지는 P^* 는 용기 속에 들어 있는 기체의 종류에 따라 다르며, 또한 그 기체의 밀도에 따라 달라진다. 물론 주어진 물체에 접촉시켰을 때 얻어지는 P 도 기체의 종류와 밀도



[그림 12.2] 기체 온도계. V 는 단단한 용기이며, P 는 압력계이다

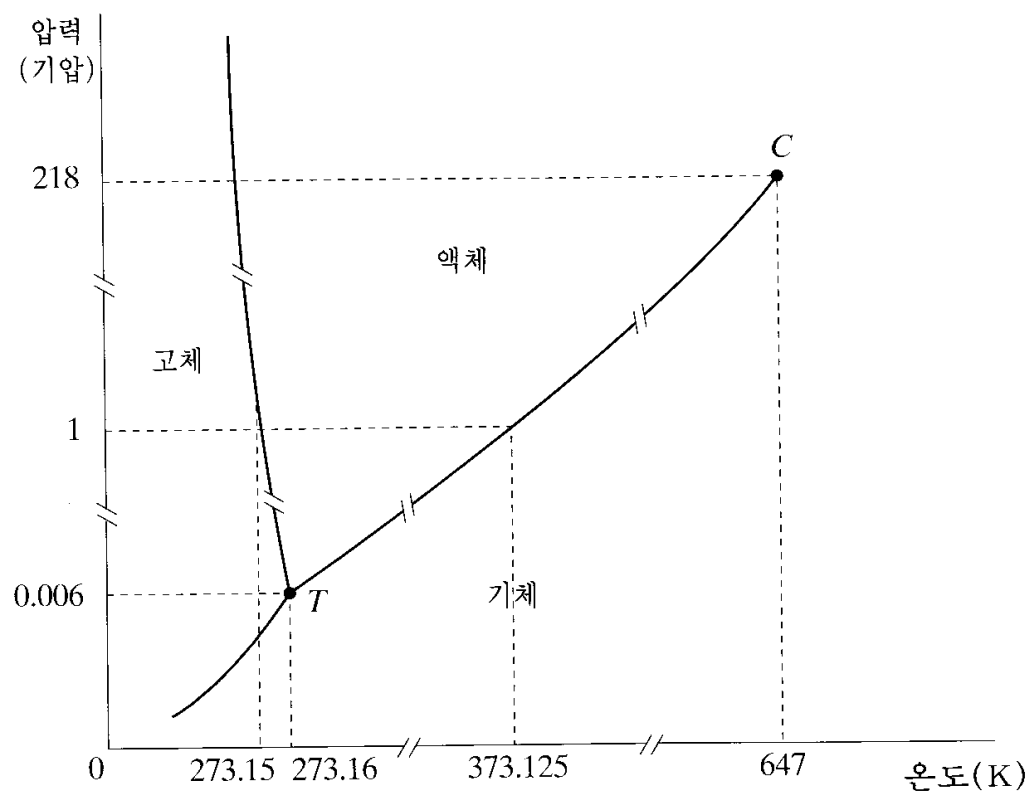
12-2 온도의 정의와 측정

■ 온도의 표준 단위

다른 모든 단위들과 마찬가지로 온도에 대해서도 표준이 필요하다. 길이의 단위인 1 m를 광선이 진공 중에서 1/299,792,458초 동안 진행한 거리로 정의하듯이, 온도의 단위인 1K를 물의 삼중점(triple point)에서 온도의 1/273.16배로 정의한다. 물은 세가지 다른 상태(phase), 즉 고체 상태(얼음), 액체 상태(물), 또 기체 상태(수증기)로 존재 할 수 있다. 삼중점이란 이 세 가지 상태들이 서로 서로 열평형을 이루어 공존하는 점을 말한다(그림 12.1). 액체 상태와 기체 상태가 공존하는 이중점인 물의 끓는 점 온도는 압력에 따라 달라지지만, 삼중점에서의 온도와 압력은 유일하게 주어지기 때문에 표준온도로 삼기에 적당하다. 참고로 삼중점에서의 수증기의 압력은 0.006기압이며, 온도는 앞의 정의에 따라 $T^* = 273.16$ K이다.

■ 기체 온도계

온도의 표준 단위는 정의하였지만, 주어진 물체의 온도를 어떻게 정의하고 어떻게 측정하



[그림 12.1] 물의 상도표. T는 물의 삼중점이며, C는 임계점이다

에 따라 달라진다. 그러면 두 압력의 비 P/P^* 는 기체의 성질에 관계없이 같을까? 그렇지 않다. 두 압력의 비 P/P^* 도 기체의 종류와 밀도에 따라 조금씩 달라진다. 따라서 식 (12.1)로 정의된 물체의 온도는 어떤 기체 온도계를 사용하는가에 따라 각각 다른 값을 갖게 된다. 하지만 기체의 밀도를 조금씩 낮추어 가면 이 차이는 점점 줄어들게 되며, 기체의 밀도가 0으로 가는 극한에서는 어떤 종류의 기체를 사용하더라도 측정된 온도값의 차이가 사라지게 된다. 밀도가 아주 낮은 기체를 **이상기체**(ideal gas)라고 부르며(제13장 참조), 이상기체를 사용한 기체 온도계를 사용하여 식 (12.1)로 정의된 온도는 표준 온도의 정의로서 적합하다. 이 정의에 의해 측정된 여러 가지 물질의 온도를 표 12.1에 기록해 놓았다. 예를 들어 1기압에서 물이 끓는 온도는 373.125K이며, 물이 어는 온도는 273.15K이다.

■ 섭씨 온도와 화씨 온도

일상 생활에서 많이 쓰이는 온도 단위로는 **섭씨**(Celsius)와 **화씨**(Fahrenheit)가 있다. 섭씨 온도의 단위로는 $^{\circ}\text{C}$ (섭씨 몇 도)를 사용하며 화씨 온도의 경우에는 $^{\circ}\text{F}$ (화씨 몇 도)를 사용한다. 섭씨 온도 T_C 는 1기압에서 물의 어는 온도를 기준으로 (0°C) 만들어진 온도 단위이며 1도의 크기는 켈빈 온도 단위와 같다. 그러므로 섭씨 온도와 켈빈 온도 사이의 환산식은

$$T_C = T - 273.15 \quad (12.2)$$

로 표시될 수 있다. 여기서 T 는 켈빈 온도이다. 미국에서 많이 사용되는 화씨 온도 T_F 는 1기압에서 물의 어는 온도를 32°F 로 규정한 온도 단위이며 1도의 크기는 섭씨 온도 1도 크기의 5/9이다. 그러므로 화씨 온도와 섭씨 온도간의 환산식은

$$T_F = \frac{9}{5} T_C + 32 \quad (12.3)$$

로 표시된다.

[표 12.1] 1 기압에서 여러 상태의 온도

온 도	K	온 도	K
물의 끓는 점	373.125	산소의 끓는 점	90.19
물의 어는 점	273.15	산소의 어는 점	54.8
물의 삼중점	273.16	구리의 끓는 점	2868
수소의 끓는 점	20.28	구리의 어는 점	1356
수소의 어는 점	14.0		

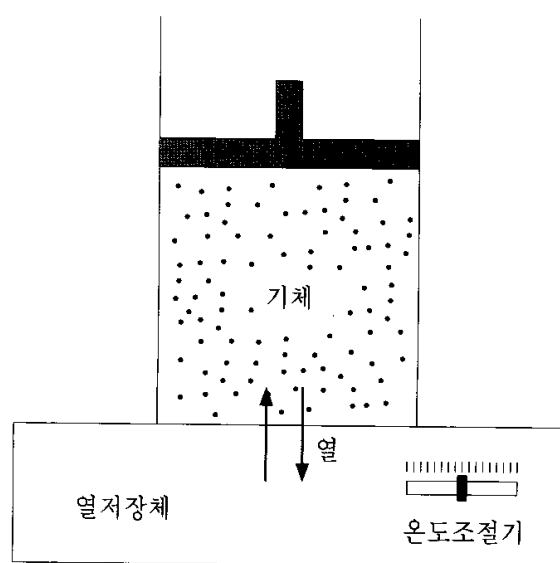
12-3 열과 일

뜨거운 커피를 잔에 받아 놓고 오랫동안 기다려 보자. 커피의 온도는 점점 떨어져서 결국에는 방안의 온도와 같아지게 될 것이다. 다시 말해 커피와 방안의 공기는 서로 열평형을 이루게 된다. 커피와 방안의 공기 사이에는 무엇이 전달되어 열평형을 이루었을까? 19세기 초까지만 하더라도 뜨거운 물체 속에는 칼로릭(Caloric)이라고 불리는 물질이 많이 들어 있어서, 차가운 물체와 접촉시키면 이 물질이 차가운 물체로 흘러 간다고 생각했었다. 이 생각은 열전도등 많은 열현상을 현상학적으로 설명해 주었지만 이러한 물질이 실제로 존재하는지는 실험적으로 밝혀지지 못했다.

톰슨(Benjamin Thomson)은 19세기 초, 대포의 포신을 깎는 과정 속에서 역학적인 운동만으로도 물체의 온도를 올릴 수 있다는 사실을 발견하고 칼로릭의 존재에 대한 문제점을 제기하였다. 결국 19세기 중반, 줄(James P. Joule; 1818~1889 A.D.) 등 여러 과학자들에 의해 뜨거운 물체에서 차가운 물체로 전달되는 것은 칼로릭이라는 물질이 아니라 에너지의 한 형태라는 것이 밝혀졌으며 이 에너지를 열(heat)이라고 부르게 되었다. 온도가 다른 두 물체를 접촉시키면, 온도가 높은 물체에서 온도가 낮은 물체로 열 에너지가 전달되며, 이로 인해 온도가 높은 물체의 에너지는 줄어들고 온도가 낮은 물체의 에너지는 증가하게 된다. 온도가 높은 물체의 온도가 떨어지고 온도가 낮은 물체의 온도는 올라가는 이유가 바로 이 에너지의 증감에 기인한다는 사실을 알 수 있으며, 이는 물체가 가지고 있는 에너지가 그 물체의 온도와 밀접한 관계가 있다는 사실을 시사해 준다. 물체가 가지고 있는 이 에너지를 내부에너지라 부르며 E 로 나타낸다. 온도가

높은 물체는 온도가 낮은 물체에 열을 전달하고 자신의 내부에너지는 그만큼 줄어들게 되며, 반대로 온도가 낮은 물체는 열을 흡수하여 자신의 내부 에너지가 증가하게 된다.

두 물체 사이에 에너지를 전달하는 방법에는 열에 의한 방법 외에도 일에 의한 방법이 있다. 주어진 물체에 일을 해주면 그 물체의 내부에너지가 가해진 일에너지만큼 증가하게 된다. 예를 들어 기체가 들어 있는 풍선을 압축시키면 기체의 내부에너지가 증가하고 그 온도가 올라가게 된다. 이는 풍선과 접촉하고 있는 외부 시스템이 풍선에 힘을 가하여 일을 해주었기 때문이다. 물체의 내부 에너지, 물체에 전달되거나 물체에서 빠져나간 열, 물체에 가해지거나 그



[그림 12.3] 열저장체와 열평형을 이루고 있는 원통 속의 기체

물체가 다른 물체에 해 준 일들 간의 관계를 수식적으로 정리한 것이 바로 **열역학 제1법칙**이며, 이는 보다 큰 관점에서 보면 바로 에너지 보존의 법칙이다.

한 가지 예를 통해 열과 일에 대해 좀 더 알아 보자. 그림 12.3에서와 같이 원통 속에 들어 있는 기체를 생각해 보자. 이 원통 밑바닥에는 온도 조절기가 달린 **열저장체**(heat reservoir)가 부착되어 있어 이장치는 열저장체에서 기체로, 또는 그 반대로 열전달이 가능하게 설계되어 있다. 그러므로 열평형 상태에 있는 기체의 온도는 열저장체의 온도와 같다. 또한 이 원통 윗면에는 자유로이 움직일 수 있는, 즉 원통 벽면과 마찰력이 없는 피스톤이 놓여 있다. 그러므로 기체가 피스톤을 미는 압력과 윗면에서 피스톤과 바깥 대기가 중력에 의해 기체를 누르는 압력은 서로 평형을 이루고 있게 된다. 이 원통의 옆면과 피스톤은 열절연체로 만들어져 있어 바깥과의 열교환은 불가능하다.

외부와 열평형을 이루고 있는 이 기체의 초기 열역학적 상태를 1이라고 하고 이 때 기체의 부피, 압력, 온도를 V_1, P_1, T_1 이라고 하자. 그리고 이 상태에 있는 기체를 다른 평형 상태 2로 변화시키는 과정을 생각해 보자. 즉 피스톤에 압력을 가하거나 열저장체의 온도를 조절하여, 이 기체의 부피, 압력, 온도를 V_2, P_2, T_2 로 변화시키려고 한다. 이러한 변화과정을 **열역학적 과정**(thermodynamic process)이라 부르며, 여기서는 특히 **준정적 과정**(quasistatic process)만을 고려한다. 준정적 과정이란 열역학적 과정을 아주 서서히 일어나게 하여 시스템이 변화하는 과정 중에서도 거의 언제나 열평형 상태에 있도록 하는 과정이다. 피스톤에 압력을 가해 기체의 부피를 줄일 때도 아주 조금씩 줄이고, 열저장체의 온도를 높일 때도 아주 조금씩 높여서, 원통 속에 들어 있는 기체가 위에서 미치는 압력에 매 순간마다 거의 균형을 이루고 열저장체와 매 순간 거의 열평형을 이루도록 하는 과정이다. 준정적 과정이 아닌 열역학적 과정을 **비가역과정**(irreversible process)이라 부르며, 이에 대해서는 제14장에서 논의하겠다.

열저장체의 온도를 약간 올리면 새로이 열평형을 이룬 기체는 부피가 약간 팽창하게 된다. 이 과정 속에서 기체가 바깥에 한 일을 계산하여 보자. 기체의 부피가 팽창하여 피스톤이 위로 조금 움직였으므로 이 기체가 외부에 일을 하여 준 것은 분명하다. 기체가 피스톤을 미는 힘을 F 라 하고 피스톤이 움직인 미소한 거리를 ds 라 하면, 기체가 피스톤에 해준 일 dW 는 Fds 가 된다. 힘 F 는 기체의 압력 P 와 피스톤의 단면적 A 의 곱으로 계산되므로, 미소한 일 dW 는 $PA ds$ 이고 이는 PdV 와 같게 된다. 여기서 미소량 dV 는 기체 부피의 증가량을 나타낸다. 열저장체의 온도를 서서히 변화시켜 기체의 부피가 V_1 에서 V_2 로 변화했다고 하자. 이 과정에서 피스톤과 대기가 중력에 의해 기체를 누르는 압력은 일정하므로 외부와 평형상태에 있는 기체가 피스톤을 미는 압력 P 도 일정하다. 그러므로 기체의 부피가 V_1 에서 V_2 로 변화하는 동안 기체가 외부에 한 일 W 는 $P(V_2 - V_1)$ 로 계산된다. 만약 기체가 팽창했다면 W 는 양

의 값을 갖게 되고, 기체가 수축했다면, W 는 음의 값을 갖게 된다.

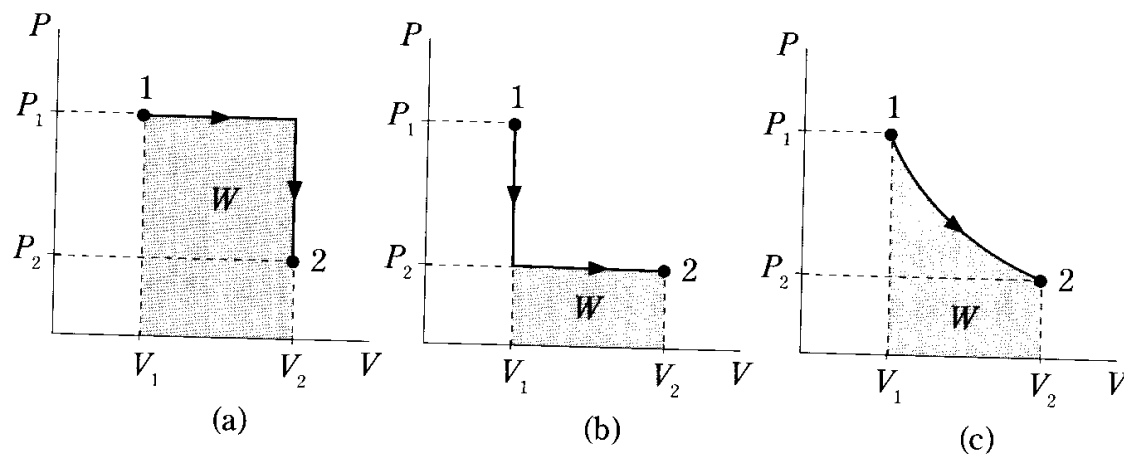
일반적으로 부피가 변화하는 동안 기체의 압력도 변화할 수 있으므로(예를 들어, 외부에서 피스톤에 일정하지 않은 압력을 가하는 경우), 기체의 부피가 V_1 에서 V_2 로 변화하는 동안 기체가 외부에 한 일 W 는 미소량 dW 를 적분함으로써 얻을 수 있다. 즉 W 는 일반적으로

$$W = \int_1^2 dW = \int_{V_1}^{V_2} P(V) dV \quad (12.4)$$

로 주어진다. 기체의 압력을 부피의 함수로 그래프에 그렸을 경우(P - V 도표), 총 일은 이 그래프의 밑면적이 된다(그림 12.4).

한 열역학적 상태 1에서 다른 열역학적 상태 2로 변화시키는 준정적 열역학적 과정에는 여러 가지 방법이 있을 수 있다. 첫째로 위에서와 같이 압력을 일정하게 유지시키면서 부피를 V_1 에서 V_2 로 팽창시킨 다음, 부피를 고정시키고 압력만 P_1 에서 P_2 로 감소시키는 과정이다(그림 12.4a). 피스톤을 고정시키고 열저장체의 온도를 낮추어 두 번째 단계를 실행할 수 있다. 첫 번째 단계에서 시스템(기체)은 열저장체로부터 열(Q)을 흡수하고 외부(피스톤)에 일(W)을 한다. <관례적으로 Q 는 시스템이 흡수한 열량으로 정의하고 W 는 시스템이 외부에 한 일로 정의>하기 때문에 이 과정에서 Q 와 W 는 모두 양의 값을 가진다. 두 번째 단계에서는 기체의 부피가 변하지 않았기 때문에 시스템이 한 일은 없으며($W=0$), 시스템에서 열이 방출되었기 때문에 Q 는 음의 값을 가진다. 전체적으로 이 과정을 통해 시스템은 밖에 일을 하였고($W>0$), 그 크기는 그림 12.4a에서 진한 부분 면적과 같다. 시스템이 흡수한 열량 Q 는 처음 상태 1과 나중 상태 2에 따라 양의 값을 가질 수도 있고 음의 값을 가질 수도 있다.

둘째로 위의 과정에서 두 단계의 순서가 뒤바뀐 경우를 생각해 볼 수 있다. 먼저 부피를 고정시키고 압력을 낮춘 다음, 압력을 고정시키고 부피를 늘이는 과정이다(그림 12.4b). 이 과정을 통해 시스템이 한 일은 첫 번째 과정과 마찬가지로 양의 값을 갖지만, 그 크기는 훨씬 작다(그림 12.4b의 빗금친 면적). 또한 시스템이 흡수한 열량도 첫 번째 과정에서 흡수한



[그림 12.4] 여러 가지 준정적 열역학적 과정

열량의 크기와 다르다. 일반적으로 압력과 부피를 동시에 조금씩 변화시키는 여러 가지 경로를 생각해 볼 수 있으며(그림 12.4c), 시스템이 한 일과 흡수한 열은 어떤 경로를 택하는가에 따라 다르다. 즉 시스템을 한 상태에서 다른 상태로 변화시키기 위해서는 수많은 경로가 있으며, 시스템이 변화하는 동안 외부에 한 일과 외부로부터 흡수한 열은 경로에 따라 다르다. 다시 말해서 일과 열이라는 물리량들은 경로에 의존하는 양들이다. 이는 역학에서 비보존력이 하는 일이 경로에 의존하는 경우와 유사하다.

12-4 열역학 제1법칙

열역학 제 1 법칙은 시스템의 내부 에너지(E)가 시스템이 외부에 해 준 일(W)과 외부로부터 흡수한 열(Q)에 따라 어떻게 변화하는가를 기술하는 법칙이다. 일과 열은 앞에서 기술한 바와 같이 에너지의 한 형태이다. 그러므로 시스템이 열역학적 상태 1에서 상태 2로 변화하면서 외부에 W 만큼 일을 해주고 Q 만큼 열을 흡수했다면, 시스템의 내부 에너지의 변화량($\Delta E = E_2 - E_1$)은

$$\Delta E = Q - W \quad (12.5)$$

로 쓸 수 있다. 이 식을 **열역학 제1법칙**이라고 부르며 이는 에너지 보존의 법칙이다.

그러면 시스템의 내부 에너지란 무엇일까? 시스템에 대한 미시적인 관점이 정립되기 전에는, 다시 말해서 통계역학이 자리를 잡기 전에는 내부에너지가 무엇인지 잘 모르고 있었다. 다만 시스템이 상태 1에서 2로 변화하면서 흡수한 열량과 외부에 해준 일의 차이($Q - W$)가 경로에 관계없이 일정하다는 것을 실험적으로 알고 있었다. < Q 와 W , 각각은 경로에 따라 달라지는 양인데 비해 그 차이는 경로에 관계없이 항상 같았다.> 이 사실은 경로에 관계없이 시스템의 상태에만 의존하는 어떤 수학적 함수가 존재하는 것을 의미한다. 마치 역학적 시스템에서 보존력이 하는 일이 경로에 관계없이 일정하기 때문에 그 시스템의 위치에만 의존하는 위치에너지라는 함수를 정의할 수 있었던 것과 마찬가지로이다. 따라서 식 (12.5)에 의해 정의된 내부에너지는 시스템의 열역학적 상태(예를 들어, 온도, 압력, 부피)에만 의존하는 양이다. 시스템에 대한 미시적인 관점이 정립된 이후에는, 제5장에서 설명하였듯이 시스템을 구성하는 입자들이 가지는 미시적인 운동에너지와 위치에너지의 총합을 그 시스템의 내부 에너지라고 생각할 수 있다(제13장 참조).

결론적으로 열역학적 평형에 있는 시스템은 상태에만 의존하는 내부에너지를 갖고 있으며, 그 내부에너지는 시스템이 또 다른 평형상태로 변화할 때 외부로부터 흡수한 열량과 외부에 해 준 일의 차이만큼 변화한다. 다시 말해서 시스템과 외부의 총에너지의 합은 보존된다. 열

역학 제1법칙은 에너지가 보존되는 열역학적 과정만이 일어날 수 있다는 중요한 지침을 우리에게 제공한다. 하지만 에너지는 보존되면서도 실제로 우리 주위에서 절대로 일어나지 않는 과정들에 대해서는 설명하지 못한다. 예를 들어 잔 속의 커피가 방안의 공기로부터 열을 흡수하여 저절로 끓게 되는 현상을 우리는 본 적이 없다. 열역학 제1법칙에는 어긋나지 않지만 이러한 과정은 현실적으로 일어나지 않는다. 이에 대해서는 제14장에서 열역학 제2법칙이라고 불리우는 또 다른 법칙을 도입하여 설명할 것이다. 몇 가지 특별한 열역학적 과정들에 열역학 제1법칙을 적용하여 보자.

■ 등압과정(isobaric process)

등압과정은 앞 절에서 그림 12.3에 있는 시스템을 통해 이미 설명하였다. 즉 열저장체의 온도만 조절하면 된다. 이 때 이 기체가 외부에 한 일은 $W = P\Delta V$ (ΔV 는 부피 증가량)이며 내부에너지의 증가량은 $\Delta E = Q - P\Delta V$ 이 된다. 열저장체의 온도를 올리는 경우, ΔV 는 양수이며 Q 도 양수가 된다. 특별히 이상기체의 경우에는 Q 가 W 보다 항상 크기 때문에 기체의 내부에너지가 증가한다. 반대로 열저장체의 온도를 내리는 경우에는 기체의 내부에너지도 감소한다.

■ 등부피과정(isometric process)

이 과정은 그림 12.3에서 피스톤을 고정시킨 후, 열저장체의 온도를 조절하여 만들 수 있다. 기체의 부피가 변하지 않았으므로($\Delta V = 0$), 기체가 외부에 한 일은 $W = 0$ 이다. 따라서 $\Delta E = Q$ 가 된다. 등압과정과 마찬가지로 열저장체의 온도를 올리면 기체의 내부에너지도 증가한다. 하지만 외부에 일을 해주지 않기 때문에 내부에너지의 증가량은 등압과정에서 보다 훨씬 크다.

■ 단열과정(adiabatic process)

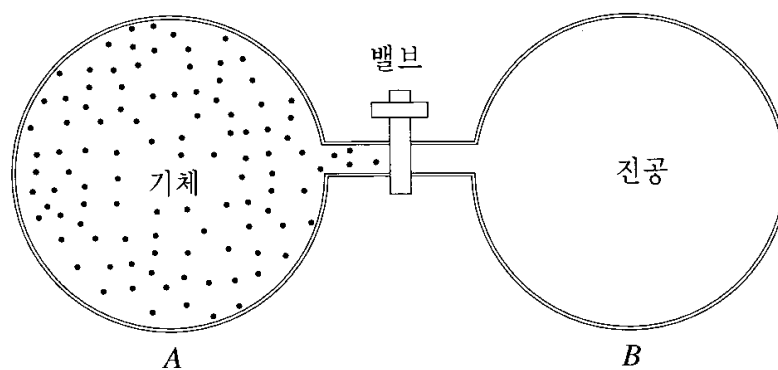
열교환을 허용하지 않는 과정을 단열과정이라 한다($Q = 0$). 열역학 제1법칙에 의해 내부에너지의 변화량은 $\Delta E = -W$ 이 된다. 그림 12.3에서 열저장체를 떼어 버린 후 열절연체로 원통의 밑바닥을 폐쇄시킨 경우를 생각해 보자. 피스톤에 힘을 조금 가해 기체를 압축시키면, 기체가 외부에 한 일 W 는 음의 값을 갖게 되며, 따라서 기체의 내부에너지는 증가하게 된다. 반대로 피스톤을 조금 들어 올리면, W 는 양의 값을 갖게 되고, 내부에너지는 감소하게 된다. 이 단열 과정은 열교환없이 기체의 온도를 올리거나 내리는데 유용한 방법이다. 증기기관이나 내연기

관 내부에서 일어나는 기체의 급속한 압축과 팽창 등은 단열과정으로 생각할 수 있다. 이는 압축이나 팽창이 급속도로 이루어지기 때문에 열교환이 이루어질 시간적 여유가 없기 때문이다.

■ 자유팽창(free expansion)

그림 12.5와 같이 밸브로 연결되어 있는 A, B 두 방을 가지고 있는 기구를 생각하자.

A방에는 기체가 들어 있고 B방은 진공상태에 놓여 있다. 이 두 방은 열절연체로 둘러싸여 있다. 밸브를 열면 A방에 있는 기체가 밸브를 통해 퍼져나가 B방을 채우기 시작할 것이다. 그리고 곧 평형 상태에 이르러 양 방에 기체가 고루 퍼져 있게 된다. 이 자유팽창 과정에서 기체가 흡수한 열과 외부에 한 일이 얼마인지 생각해 보자. 먼저 외부와의 열교환이 없으므로 $Q=0$ 이 된다. 또한 기체가 진공 속으로 팽창해 나가는 동안, 두 방의 크기가 변화하지 않았기 때문에 두 방을 둘러싸고 있는 외부에 아무런 일도 하지 않았다($W=0$). (사실상 이 과정 동안에, A에 남아있는 기체는 B에 이미 흘러들어 가 있는 기체에 일을 해준다. 하지만 이 일은 기체 내부에서 서로 서로에게 해 주는 일이므로 기체 시스템이 외부에 해주는 일이 아니다.) 따라서 열역학 제1법칙에 의해 내부에너지도 변화가 없다($\Delta E=0$). 이 자유팽창과정은 이 과정을 천천히 준정적으로 실행할 수 없다는 점에서 앞의 다른 과정들과 다르다. 이 과정 중에는 시스템이 열평형 상태에 있지 않기 때문에 압력이나 온도를 유일하게 정의할 수 없다. 따라서 이 과정의 시작 상태와 나중 상태는 $P-V$ 도표에 두 점으로 표시할 수 있지만, 중간과정은 표시할 수 없다. 이 자유팽창 과정은 대표적인 비가역 과정이다. 이에 대해서는 제14장에서 자세히 논의하도록 하자.



[그림 12.5] 자유팽창 기구

■ 순환과정(cyclic process)

순환과정은 시스템이 변화하다가 처음 상태로 복귀하는 과정이다. 상태만의 함수인 내부에

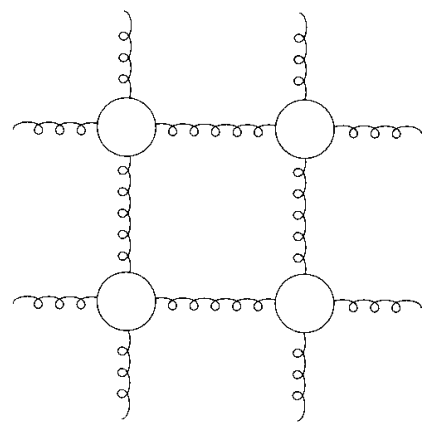
너지의 변화는 없어야 하므로 $\Delta E = 0$ 이다. 따라서 $Q = W$ 가 된다. 즉 외부에서 흡수한 열량만큼 외부에 일을 해주게 된다. 순환과정을 $P-V$ 도표에 그리면 폐곡선을 이루게 되며 이 과정은 열기관에 꼭 필요한 과정이다. 이 열기관에 대해서도 제14장에서 자세히 논의할 것이다.

12-5 열팽창과 열전달

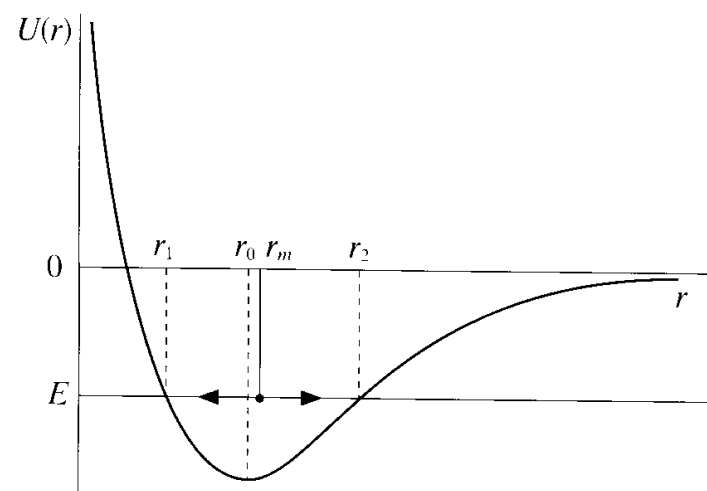
■ 열팽창

겨울에 기차의 철로를 보면, 약간의 틈새들을 발견할 수 있다. 이는 온도가 높은 여름에는 철로가 늘어나기 때문에 기차의 탈선을 방지하기 위해 틈새를 두어야만 하기 때문이다. 또 자동차로 다리를 건너다 보면 차가 덜컹거리는 느낌을 여러번 받게 된다. 이는 다리 위에 놓여 있는 상판에 팽창 이음새들이 있기 때문이다. 만약 이 이음새들이 없다면 아주 더운 여름 날엔 상판이 열팽창 때문에 울퉁불퉁하게 휘어져 교통사고가 날 위험이 높아진다. 자연에 존재하는 대부분의 물질들은 온도를 높이면 팽창한다. 그러면 온도가 높아지면 왜 물질의 부피가 늘어날까?

원자들이 격자 모양으로 연결되어 있는 고체를 생각해보자(그림 12.6). 각 원자들은 격자점을 중심으로 진동을 하고 있다. 온도가 올라가면 내부에너지가 증가하여 원자들의 진폭이 커지게 된다. 고체의 부피가 증가한다는 것은 격자점 간격이 평균적으로 늘어난다는 것이다. 그러면 왜 이 간격이 늘어날까? 고체 원자들은 서로 서로 힘을 미친다. 이 힘은 주로 원자를 구성하고 있는 전자들과 핵 속의 양성자들에 작용하는 전자기력 때문에 생기는 힘이다. 이 원자들은 거리가 멀어지면 서로 당기고 또 너무 가까워지면 서로 밀쳐낸다. 두 원자들 사이에 적당한 간격이 주어지면 이 원자들은 안정한 상태가 된다. 그림 12.7은 두 원자 사이에 미



[그림 12.6] 고체의 구조



[그림 12.7] 원자의 위치에너지

치는 힘에 의한 위치에너지 U 를 원자 간격 r 의 함수로 그린 것이다. 위치에너지 함수 $U(r)$ 은 r_0 에서 최소값을 가지며, 이 r_0 가 최저 온도인 0 K에서 격자점 간격이 된다. 온도를 올리면 내부에너지 E 가 증가하며 원자간의 간격은 r_1 과 r_2 사이에서 진동하게 된다. 중요한 점은 $U(r)$ 이 r_0 를 중심으로 비대칭적이라는 사실이다. 원자 간격이 줄어들 때보다 늘어날 때 $U(r)$ 의 경사가 더 완만하다. 따라서 r_1 과 r_2 사이의 평균간격 r_m 이 r_0 보다 크게 된다. 이 때문에 온도가 올라가면 원자간의 평균간격이 멀어져 물체의 부피가 증가하게 된다. 만약 $U(r)$ 이 대칭적이라면 온도가 올라가도 고체의 부피는 늘어나지 않을 것이다.

물체의 열팽창 정도를 나타내는 계수에는 선팽창계수 α 와 부피팽창계수 β 가 있다. 온도의 증가에 따라 물체의 길이, 또는 부피가 얼마나 증가하는 가를 나타내는 실험적 상수들이다. 고체의 선팽창계수는 온도가 1도 올라갔을 때 단위 길이당 늘어난 길이로 정의되며, 다음 식으로 표시될 수 있다.

$$\alpha = \frac{1}{L} \frac{\Delta L}{\Delta T} \quad (12.6)$$

여기서 L 은 물체의 길이, ΔL 은 늘어난 길이, ΔT 는 온도의 상승분이다. α 는 일반적으로 온도에 따라 약간 달라지지만 실용적인 온도 범위에서는 거의 상수이다. 표 12.2에 몇몇 물질의 선팽창 계수가 기록되어 있다. 고체의 길이는 온도가 1K 증가할 때마다 약 10^{-3} – $10^{-5}\%$ 정도 늘어난다. 유체는 모양이 일정하지 않기 때문에 부피 변화만이 의미를 가진다. 기체의 부피는 온도에 매우 민감하게 반응하지만(제13장 참조), 액체나 고체의 부피 변화는 매우 적다. 부피가 V 인 고체나 액체의 부피팽창 계수 β 는

$$\beta = \frac{1}{V} \frac{\Delta V}{\Delta T} \quad (12.7)$$

로 정의된다. 등방성 고체의 부피팽창 계수와 선팽창 계수의 관계 $\beta = 3\alpha$ 는 쉽게 유도할 수

[표 12.2] 상온(20°C)에서 고체의 선팽창 계수 α 와 유체의 부피팽창 계수 β

물 질	$\alpha (\times 10^{-6}/K)$	물 질	$\beta (\times 10^{-4}/K)$
알루미늄	24	에틸 알콜	1.1
구리	17	수은	1.8
보통 유리	9	가솔린	9.5
파이렉스 유리	3.3	물	2.1
철	12	1 기압의 공기	35
콘크리트	12		
석영	0.5		
0°C 얼음	51		

있다. 액체의 부피팽창 계수는 고체보다 보통 10배 정도 크다.

우리 주위에 가장 흔한 액체인 물은 특이한 성질을 가지고 있다. 4°C 이상에서는 온도 상승과 더불어 부피가 늘어나지만 0°C에서 4°C 사이에서는 그 반대현상이 일어난다. 즉 0°C 물보다 4°C 물의 부피가 더 작다. 이런 성질 때문에 호수의 물은 윗면부터 얼어붙는다. 밀도가 높은 4°C의 물이 호수 바닥으로 내려가고 밀도가 낮은 0°C의 물이 위로 올라가기 때문이다. 만약 물에 이런 특이한 성질이 없다면 호수는 바닥부터 얼게 될 것이며 호수 바닥에 있는 동식물 생태계는 멸종되어 버릴 것이다.

■ 열전달

두 시스템 사이에 에너지의 한 형태인 열이 교환된다는 사실을 우리는 앞 절에서 배웠다. 하지만 어떤 방식으로 열이 전달되는 것일까? 열전달은, 전도(conduction), 대류(convection), 복사(radiation) 등 세 가지 방식에 의해 일어난다.

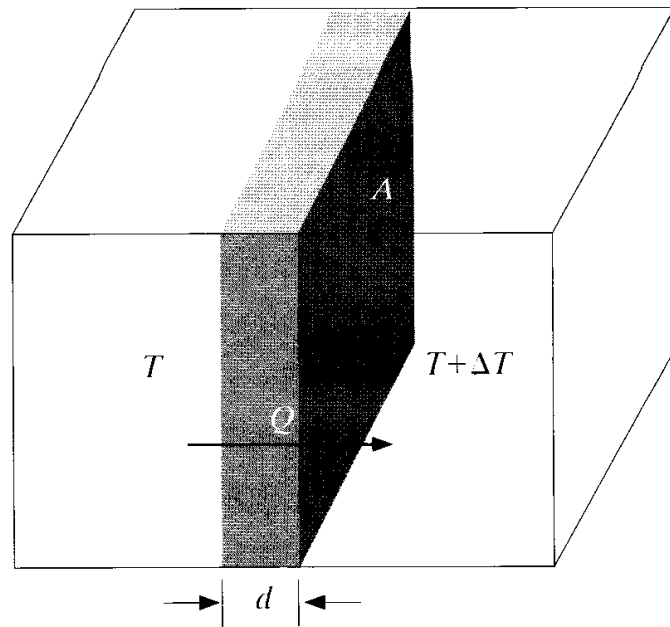
먼저 열전도에 대해 알아보자. 오븐 위에 끓고 있는 물 속에 쇠젓가락의 한 쪽 끝을 담가 보자. 시간이 조금 지나면, 손으로 잡고 있는 젓가락 끝이 뜨거워 질 것이다. 왜 이런 일이 일어날까? 물 속에 담겨 있는 젓가락 한쪽 끝의 온도가 올라가 그 부분에 있는 원자들과 전자들의 움직임이 활발해지고, 그 원자와 전자들이 인접해 있는 다른 원자나 전자들에게 충돌을 통해 에너지를 전달하여, 결국에는 손으로 잡고 있는 젓가락 부분의 원자와 전자들의 운동도 활발해져 그 부분의 온도가 올라가기 때문이다. 이런 현상을 열전도라 부른다. 철, 은과 같이 원자에 속박되어 있지 않은 자유전자들이 많은 금속일수록 열전달이 쉬우며, 유리, 나무와 같이 자유전자가 적은 비금속들은 열전달이 어려운 열절연체이다.

주어진 물체가 열을 얼마나 잘 전달하는가 하는 문제는 그 물체의 구성물질의 성질에도 관계하지만, 그 물체의 모양과도 큰 관련이 있다. 단면적이 A 이고, 두께가 d 인 물체에서 그 양 쪽 단면의 온도가 ΔT 만큼 다를 때, 온도가 높은 단면 쪽에서 온도가 낮은 단면 쪽으로 시간 t 동안 흐르는 열량을 Q 라고 하자(그림 12.8).

여러 가지 다른 모양새를 가진 물체들을 가지고 실험해 보면, 단위시간 당 흐르는 열 이동률(heat flow rate) $H(=Q/t)$ 는 온도차이 ΔT 와 단면적 A 에 비례하고 두께 d 에 반비례한다는 사실을 알 수 있다. 즉

$$H = k \left(\frac{A}{d} \right) \Delta T \quad (12.8)$$

여기서 비례상수로 쓰인 k 는 그 물체의 구성물질의 성질에만 의존하는 양이며, 이를 그 물질의 열전도도(thermal conductivity)라 부른다. 열전도도는 일상 온도의 범위에서는 거의 변



[그림 12.8] 열전도

하지 않는다. 표 12.3에 여러 물질의 열전도도를 일상 온도에서 기록해 놓았다. 공학적으로 편리하게 사용하기 위해, 앞으로 전자기 부분에서 배울 도선의 저항과 유사하게, 물체의 열저항 R 을 d/k 로 정의할 수 있다. R 이 클수록 좋은 열절연체이며, 폴리우레탄 폼이나 움직이지 않는 공기의 R 값은 매우 크다. 방안과 밖 사이에 열차단을 위해서 이중 창문을 쓰는 이유가 바로 이 때문이다.

열전달의 또 다른 방법으로는 대류가 있다. 오븐 위에 물을 올려 놓고 데워보자. 처음에는 물 그릇 밑바닥 부분부터 데워지겠지만, 온도가 물의 끓는 점에 가까워지면, 물 전체가 심한 순환운동을 하는 것을 볼 수 있다. 즉 밑부분의 물은 뜨거워지고 밀도가 낮아져 위로 올라가게 되고, 상대적으로 차가운 윗부분의 물이 밑으로 내려오게 된다. 밑으로 내려온 물은 다시 데워져 위로 올라가고, 윗부분의 물은 차가운 대기와 접촉하여 온도가 낮아져 밑으로 내려온다. 그래서 이 과정이 계속 반복된다. 이렇게 유체가 순환운동에 의해 유체 전체에 열을 전달하는 방법을 대류라 부른다. 이러한 대류과정은 구름의 생성 등 기후와 밀접한 관계가 있다. 즉 태양열에 의해 데워진 뜨거운 공기가 위로 올라가고 차가운 공기는 밑으로 내려오는 과정이 반복된다. 열전도가 미시적인 입자들이 인접 입자들에게 에너지를 전달하여 이루어지는 반면, 대류는 물질에 거시적인 운동을 일으켜 열전달을 이루는 방식이다.

열전달의 마지막 방법으로 복사가 있다. 태양에서 방출되는 에너지가 어떻게 우리에게 전달될까? 태양과 지구 사이는 거의 물질이 없는 진공상태이다. 그러므로 전도나 대류에 의해 열이 전달될 수 없다. 모든 물질은 전자기파를 발생하며, 바로 이 전자기파에 의해 진공 속에서도 에너지가 전달된다. 이렇게 전자기파를 통해 에너지를 전달하는 방식을 복사라고 부른

[표 12.3] 일상 온도에서 열전도도

물 질	열전도도 k W/(m K)	물 질	열전도도 k W/(m K)
철	46	폴리우레탄 포말	0.024
납	35	파이버 글라스	0.048
알루미늄	235	벽돌	0.71
구리	401	유리	1.0
물	0.57	콘크리트	1.3
공기	0.026	스티로폴	0.042
수소	0.18	나무	0.15

다. 해변가에서 모닥불을 피워놓고 둘러 앉았을 때, 따뜻함을 느끼는 것도 복사 때문이다. 공기는 좋은 열전도체가 아니기 때문에 열전도만에 의해 우리가 따뜻해 지지 않는다. 우리 피부에 있는 수많은 물 분자들이 모닥불이 내어놓는 전자기파를 흡수하여 운동이 활발해져 온도가 올라가기 때문이다. 제25장에서 열복사에 대한 자세한 내용을 다룰 것이다.

12-6 비열과 잠열

외부에서 물체에 열을 가하면 물체는 열을 흡수하여 온도가 올라가거나 상변화(phase change)를 일으키게 된다. 물체의 온도를 올리거나 상변화를 일으키기 위해서는 얼마만큼의 열이 필요할까?

■ 비 열

먼저 물체의 상변화가 일어나지 않는 한도내에서 이 문제를 논의해 보자. 물체의 온도를 단위 온도만큼 올리는데 필요한 열량을 그 물체의 **열용량**(heat capacity)이라 부른다. 즉 어떤 물체의 온도를 ΔT 만큼 올리는데 열량 Q 가 필요하다면, 물체의 열용량 C 는 다음 식으로 정의된다.

$$Q = C \Delta T \quad (12.9)$$

그러므로 열용량 C 의 단위는 J/K이다. 물론 열용량 C 는 물체의 크기에 따라 달라진다. 커다란 물체의 온도를 올리는데 드는 열량은 작은 물체를 올리는데 드는 열량보다 크다. 물체를 구성하고 있는 물질의 성질에만 의존하는 양을 정의하기 위해서는 단위 크기당 열용량을 정의해야 하며, 이를 물질의 **비열**(specific heat)이라 부른다. 비열은 보통 소문자 c 로 나타내

며, 여러 가지 단위를 사용하는데, 그 중에서도 <단위 질량당 열용량>과 단위 <몰(mole)당 열용량>이 가장 많이 쓰인다. 즉 물질 1kg을 1K 올리는데 드는 열량이나, 아보가드로 수(6×10^{23})만큼의 분자들로 구성된 물질을 1K 올리는데 드는 열량을 그 물질의 비열로 사용한다. 그러므로 비열 c 의 단위는 $J/(K \cdot kg)$ 또는 $J/(K \cdot mol)$ 이다. 예를 들어 단위 질량당 열용량을 비열로 정의하면, 식 (12.9)은

$$Q = mc\Delta T \quad (12.10)$$

이 된다. 여기서 m 은 물체의 질량이다. 단위 몰당 열용량은 **몰비열**(molar specific heat)이라 부르며 이에 대한 식은 식 (12.10)에서 질량 m 대신 물체의 몰수 n 을 대입하여 정의된다.

비열 c 의 값도 일반적으로 온도에 따라 달라지지만 일상 온도 근처에서는 큰 변화를 보이지 않는다. 하지만 기체의 비열은 어떤 환경 속에서 비열을 측정했는가에 따라 많은 차이가 난다. 고체나 액체는 열을 흡수해도 부피가 많이 늘어나지 않지만 기체의 부피는 흡수한 열량에 매우 민감하다. 기체의 부피가 고정된 상태(정적 상태)에서 물질의 온도를 단위 온도만큼 올리는데 필요한 열량은 기체 외부의 압력이 고정된 상태(정압 상태)에서 단위 온도만큼 올리는데 필요한 열량보다 적다. 왜냐하면 외부 압력이 고정된 상태에서 열을 가하면 기체의 부피가 늘어나 외부에 일을 해주기 때문이다. 그러면 가해진 열에너지의 일부가 이 일에 일부 쓰이게 되어 물체의 온도를 올리는데 더 많은 열에너지가 필요하다. 따라서 기체의 정압 비열은 정적 비열보다 훨씬 크다. 고체나 액체의 경우에는 늘어나는 부피가 매우 적기 때문에 정압 비열이 정적 비열보다 기껏해야 몇 % 정도 크다.

■ 잠 열

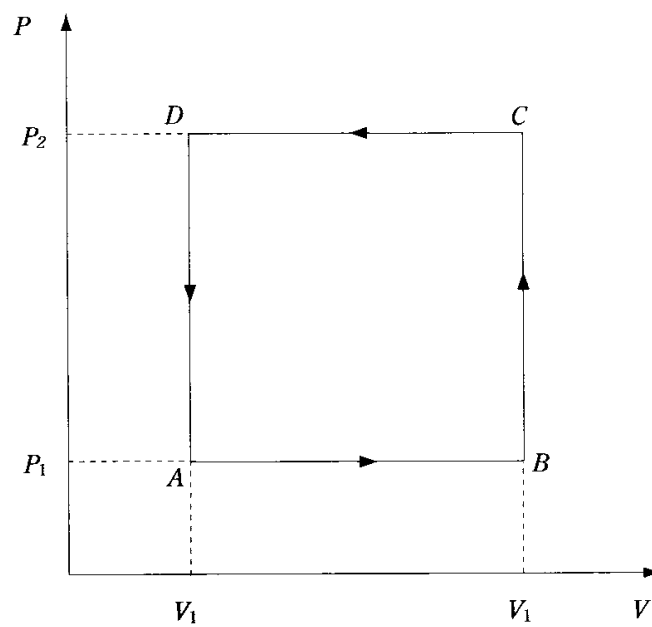
상변화를 일으키는 경우에는 어떻게 될까? 고체에서 액체로, 또는 액체에서 기체로 상변화를 일으키는데는 부가적인 열량이 필요할까? 물의 경우를 생각해 보자. 오븐 위에 물을 올려 놓고 데워보자. 100°C 가 되면 물이 끓어 수증기로 날아가기 시작한다. 즉 액체 상태인 물이 기체 상태인 수증기로 상변화를 일으킨다. 열을 계속 가하여도 물의 온도는 계속 100°C 를 유지하며 수증기로 상변화를 계속한다. 100°C 에서 가한 열은 물의 온도를 더 이상 올리지는 못하며 단지 수증기로 상변화를 일으키는데 필요한 에너지만을 공급한다. 오븐 위에 있는 100°C 물을 모두 100°C 의 수증기로 상변화 시키기 위해서는 상당한 양의 열이 필요하다. 단위 질량당 상변화를 일으키는데 필요한 열량을 **잠열**(latent heat)이라 부른다. 특히 액체에서 기체로 상변화를 일으키는데 필요한 잠열을 **기화열**이라 부르며, 고체에서 액체로 상변화를 일으키는데 필요한 잠열을 **융해열**이라 부른다. 1 기압 하에서 물의 기화열은 333 kJ/kg 이며, 융해열은 2260 kJ/kg 이다. 물의 상변화에 대한 압력-온도 도표가 그림 12.1에 그려져 있다. 이

그림을 **상도표**(phase diagram)라 부른다. 이 상도표에서 볼 수 있듯이 주어진 환경의 압력에 따라 물의 끓는 온도는 상당한 변화를 일으키지만 물의 어는 온도는 변화가 매우 적다. 액체나 고체는 외부 압력에 의한 부피변화가 매우 적기 때문이다. 물의 삼중점에서의 압력(0.006 기압)보다 더 낮은 압력 하에서는 얼음에서 수증기로 승화현상이 일어난다.

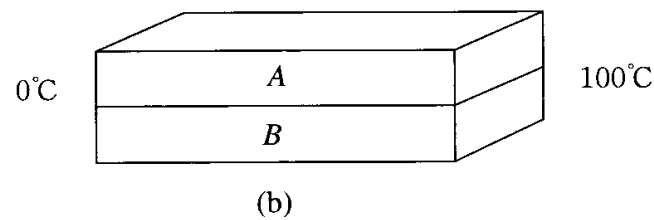
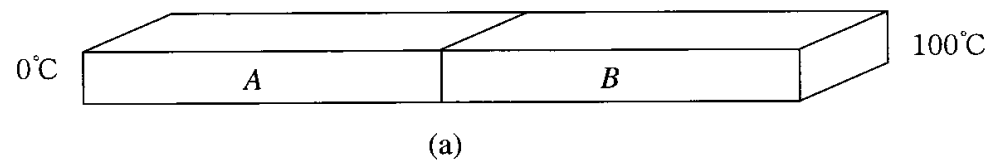
이 상도표에서 가장 흥미로운 점은 액체와 기체 사이를 구분해주는 기화곡선이 어떤 온도 이상이면(물의 경우에는 약 374°C) 사라져 버린다는 사실이다. 이 점을 임계점(critical point)이라고 부르며 이 임계점의 온도를 임계온도, 압력을 임계압력이라 부른다. 임계온도보다 더 뜨거운 수증기는 아무리 압력을 가하여도 상변화가 일어나지 않는다. 임계온도보다 낮은 온도의 수증기는 압력을 가하면 물로 상변화를 일으키며 이때 잠열을 외부에 내어 놓는다. 하지만 이 잠열의 크기는 온도에 따라 다르다. 온도가 높아질수록 잠열은 점점 작아지며 임계온도에서는 잠열이 사라진다. 임계점 근처에서의 물과 수증기는 압력이 매우 높고 온도도 높기 때문에 우리가 평상시에 보는 물과 수증기와는 전혀 다른 형태를 지니며, 사실상 이들을 눈으로 봐서 구분하기는 매우 어렵다. 이 근처의 물과 수증기의 물리적인 성질은 거의 동일하다. 임계온도 근처에 있는 수증기를 시험관에 담아 놓고 압력을 높여가는 실험을 할 때, 어느 순간 잠열이 발생되면 이때부터 액화가 시작됐다고 기록하게 되고 압력이 더욱 높아지면 시험관 안에 있는 물질을 액체라고 부르게 된다. 임계온도 보다 더 높은 온도의 수증기는 아무리 압력을 높여도 잠열이 발생하지 않기 때문에 더 이상 액체인지 기체인지 구별할 수 없다. 그래서 이 근처의 물질은 그냥 유체라고 부른다. 반면에 고체와 액체를 구분짓는 액화곡선은 현재까지의 실험으로는 끝이 없다고 알려져 있다. 따라서 고체와 유체(액체나 기체)는 확실하게 구분할 수 있지만, 액체와 기체는 구분을 짓기가 사실 모호하다. 다만 실험 도중 잠열이 발생하는가에 따라 상대적으로 구분할 수 있을 뿐이다. 이러한 사실은 물뿐만 아니라 모든 물질에도 공통적으로 일어나는 사실이다. 특히 임계점에 있는 물질들은 비열이 무한대로 커지는 등 매우 흥미로운 현상을 보인다. 이런 현상을 **임계현상**(critical phenomena)이라 부른다.

연습 문제

- [1] 물의 밀도는 0°C 에서 약 0.99985 g/cm^3 이며, 4°C 에서는 약 0.99997 g/cm^3 이다. 이 온도 범위에서 물의 부피 팽창 계수를 근사적으로 계산하라.
- [2] 통 속에 들어 있는 기체의 압력과 부피를 측정하여, 기체가 다음 그림과 같이 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 의 순환 과정을 하는 것을 알 수 있었다. 이 순환과정을 한 번 하는 동안 기체가 외부로부터 흡수한 알짜 열은 얼마인가?



- [3] 그림과 같이 크기와 모양은 같고 서로 다른 종류의 금속으로 만들어진 막대 A와 B를 두 가지 방식으로 붙인다. A의 열전도도는 B의 열전도도의 3 배이다. 100 cal 가 전달되는 데에 그림 (a)와 같이 붙였을 때에 2분 걸렸다면, 그림 (b)와 같이 붙이면 얼마나 걸리는가?



200 제12장 온도와 열

[4] 부피가 10 m^3 이며 압력이 2.0 기압인 이상기체가 있다. 이 기체를 압축시켜 부피가 5.0 m^3 가 되었다. 압축시키는 동안 기체의 온도는 T 로 일정하였다. 기체의 양은 2.0몰이고 기체상수는 R 이다.

(가) 압축 후 기체의 압력은 몇 기압인가?

(나) 이 과정에서 기체가 외부에서 흡수한 열은 몇 J인가?

[5] 길이가 12 m이고 철로 만들어진 선로가 0°C 에서 설치되었다. 40°C 에서 선로들끼리 닿지 않기 위한 최소 간격은 얼마인가?

[6] 부피 V 가 온도에 의존한다면 질량 밀도 ρ 역시 온도에 의존한다. 온도 변화량 ΔT 에 의한 질량 밀도의 변화량 $\Delta \rho$ 는

$$\Delta \rho = -\beta \rho \Delta T$$

이다. 여기서 β 는 부피 팽창계수이다. 음의 부호 (-)를 설명하시오.