

[최고의 수험물리 전문가]

윤형철

변리사 탄탄물리

[개념+기출]

— 09장 열역학 —

“물리는 외우는 과목이 아니라 생각하는 과목입니다.”

세 가지 강의 철학

목차

— 성장기반 물리

(Grow-based Physics)

— 취사선택 물리

(Cut-off Strategy Physics)

— 생각하는 물리

(Thinking Physics)



물리

윤형철 교수

물리 윤형철 교수입니다.

약력

전남과학고등학교 졸업
서울대학교 사범대학 물리교육과 졸업

전 대치 미래탐구
전 대치 새움학원
현 대치 링크물리
현 변리사스쿨 물리 전문교수

개념 POINT

[열역학 개관]

물리현상 (문제상황)	→ 물리량	물리법칙
열역학 현상	① 온도 ② 부피 ③ 압력 ④ 몰수 ⑤ 내부에너지 ⑥ 엔트로피 ⑦ 일 ⑧ 열	[열역학 법칙] - 열역학 제0법칙 - 열역학 제1법칙 - 열역학 제2법칙

I. 계 모형(우주=계+외부)

개념 POINT

1. 계의 정의

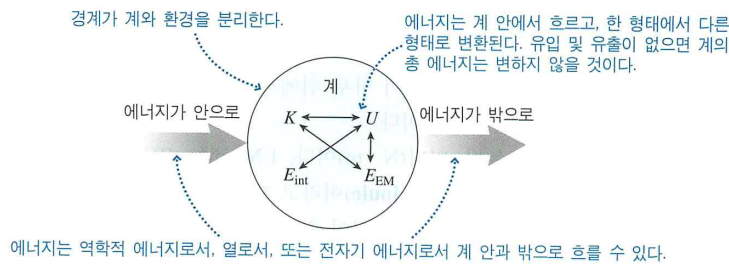
계(system)란 관찰하고자 하는 우주의 한 부분을 말한다.

2. 계의 분류

- (1) 열린계 : 외부와 에너지 및 물질을 모두 교환할 수 있는 계
- (2) 닫힌계 : 외부와 에너지는 교환할 수 있으나 물질은 교환하지 않는 계
- (3) 고립계 : 외부와 에너지 및 물질을 모두 교환할 수 없는 계

3. 계의 특징

계는 1개 이상의 구성요소를 가지며, 구성요소 사이에 상호 작용을 한다. 우주에서 계를 제외한 나머지 부분을 외부, 주위 또는 환경이라고 한다. 계와 외부를 분리하는 것을 경계라고 한다.



II. 온도

1. 정의

2. 표시

3. 성격

4. 단위

5. 적용

- (1) 온도의 최솟값 : $-273^{\circ}C = 0K$
- (2) 온도의 최댓값 : 없음
- (3) 열역학 0법칙



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

III. 부피

IV. 압력

V. 몰수

어떤 물질 시료의 몰 수 n 은 시료에 있는 분자의 수 N 과 1 mol의 분자의 수 N_A 의 비율로

$$n = \frac{N}{N_A} \quad (19-2)$$

이다. (주의: 이 식에 있는 세 기호는 혼동하기 쉬우므로 의미를 명확히 해 두어야 한다) 시료의 몰 수 n 은 시료의 질량 M_{sam} 과 물질의 몰질량 M (1 mol의 질량) 또는 분자 질량 m (분자 하나의 질량)과 다음의 관계가 있다.

$$n = \frac{M_{\text{sam}}}{M} = \frac{M_{\text{sam}}}{mN_A}. \quad (19-3)$$

위 식에서 1 mol의 질량 M 은 분자 하나의 질량 m 과 1 mol의 분자수 N_A 의 곱으로 다음과 같다.

$$M = mN_A. \quad (19-4)$$

개념 POINT

VI. 열

1. 정의

열은 계와 주위의 온도 차이에 따라 계와 주위 사이에 전달되는 에너지이다.

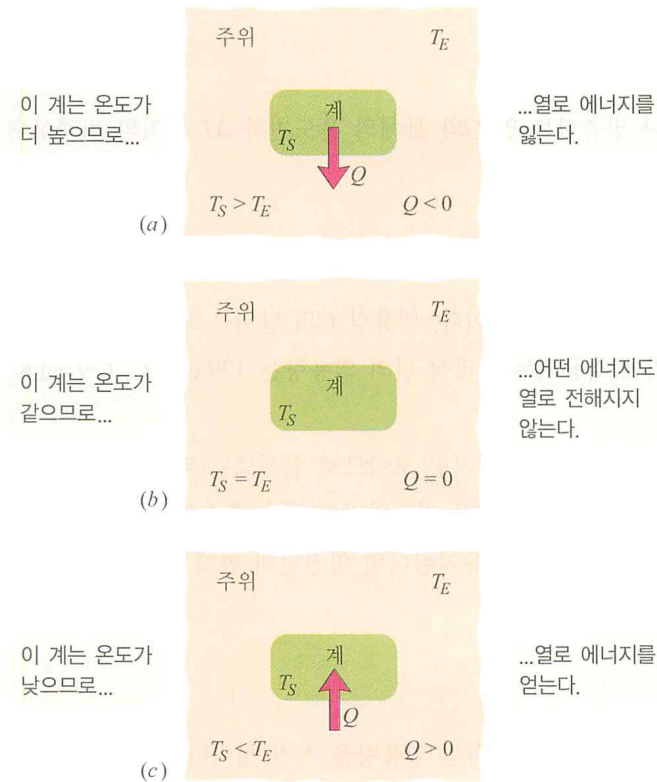


그림 18-12 계의 온도가 (a) 처럼 주위 온도보다 높다면 (b)의 열평형에 도달될 때까지 열 Q 가 계에서 주위로 방출된다. (c) 계의 온도가 주위의 온도보다 낮다면 열평형에 도달될 때까지 계가 열을 흡수한다.

2. 표시

3. 성격

4. 단위

5. 적용

(1) 열용량

$$Q = C \Delta T = C(T_f - T_i). \quad (18-13)$$

(2) 비열

$$Q = C \Delta T = C(T_f - T_i). \quad (18-13)$$

(3) 몰비열

많은 경우 물질의 양을 나타내는 데 가장 편리한 단위는 몰(mol)이고 1 mol은 어느 물질에서나

$$1 \text{ mol} = 6.02 \times 10^{23} \text{ 기본단위}$$

로 주어진다. 따라서 1 mol의 알루미늄에는 6.02×10^{23} 개의 기본단위, 즉 원자가 들어 있고, 1 mol의 산화알루미늄에도 6.02×10^{23} 개의 기본단위, 즉 산화물 분자가 들어 있다.

물질의 양을 몰로 표현하듯이 비열을 단위질량이 아니라 몰당 열용량으로 정의하면 몰비열이 된다. 표 18-3은 단위자로 이루어진 고체 원소들의 실온에서의 몰비열 값들이다.

(4) 잠열 (변환열)

시료가 완전한 상변화를 일으키기 위해 열로 전달되는 단위질량당 에너지를 **변환열** L 이라고 한다. 따라서 질량이 m 인 물질의 상이 완전히 변하려면 총에너지 전달량은 다음과 같다.

$$Q = Lm. \quad (18-16)$$

물체의 상이 액체에서 기체, 또는 기체에서 액체로 바뀔 때의 변환열을 **증발열** L_V 라고 한다. 물의 경우 끓는점, 즉 응축점에서 증발열은 다음과 같다.

$$L_V = 539 \text{ cal/g} = 40.7 \text{ kJ/mol} = 2256 \text{ kJ/kg}. \quad (18-17)$$

물체의 상이 고체에서 액체, 또는 액체에서 고체로 바뀔 때의 변환열을 **융해열** L_F 라고 한다. 물의 어는점, 즉 녹는점에서 융해는 다음과 같다.

$$L_F = 79.5 \text{ cal/g} = 6.01 \text{ kJ/mol} = 333 \text{ kJ/kg}. \quad (18-18)$$

개념 POINT

VII. 열역학 제1법칙

개념 POINT

1. 기체가 하는 일

여기서는 계와 주위 사이에 열과 일의 형태로 에너지가 어떻게 전달되는지를 살펴보기로 한다. 계를 그림 18-13처럼 움직일 수 있는 피스톤이 달린 원통에 갇혀 있는 기체라고 하자. 기체의 압력이 피스톤을 위로 미는 힘은 피스톤의 위에 놓인 납알의 무게와 같다. 원통의 벽은 절연체이므로 열전달이 없지만, 원통의 바닥은 열에너지의 저장고인 열저장고와 열적으로 접촉하고 있다. 열저장고의 온도 T 는 조절손잡이로 조절이 가능하다고 하자.

초기상태 i 에서 압력 p_i , 부피 V_i , 온도 T_i 인 (기체로 이루어진) 계를 압력 p_f , 부피 V_f , 온도 T_f 인 최종상태 f 로 바꾼다고 하자. 계를 이와 같이 초기상태에서 최종상태로 바꾸는 과정을 **열역학과정**이라고 한다. 열역학과정 동안 열저장고에서 계로 열이 전달되거나 (양의 열), 반대로 열이 빠져나간다(음의 열). 또한 계는 부하가 걸린 피스톤을 올리기 위해(양의 일), 또는 내리기 위해(음의 일) 일을 한다. 이러한 모든 변화가 매우 천천히 일어나서 계가 (어림잡아) 항상 열평형을 이룬다고 가정하자(계의 모든 부분이 항상 열평형에 있다.)

이제 그림 18-13의 피스톤 위에서 납알 몇 개를 없애보자. 그러면 기체는 피스톤과 남아 있는 납알을 힘 \vec{F} 로 미소변위 $d\vec{s}$ 만큼 위로 올린다. 변위가 매우 작으므로 변화가 있는 동안 힘의 크기가 일정하다고 가정할 수 있다. 이때 \vec{F} 의 크기는 pA 와 같으며, p 는 기체의 압력이고 A 는 피스톤의 면적이다. 따라서 피스톤이 움직이는 동안 기체가 한 미소량의 일은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} dW &= \vec{F} \cdot d\vec{s} = (pA)(ds) = p(A ds) \\ &= p dV. \end{aligned} \quad (18-24)$$

여기서 dV 는 피스톤이 움직이면서 생긴 기체 부피의 변화량이다. 기체 부피를 V_i 에서 V_f 로 변화시킬 수 있도록 납알을 없애면 기체가 한 전체 일은

$$W = \int dW = \int_{V_i}^{V_f} p dV \quad (18-25)$$

이다. 부피가 변하는 동안 기체의 압력과 온도도 변할 수 있다. 식 18-25를 직접 적분하려면 계가 상태 i 에서 상태 f 로 변하는 실제 과정에서 압력이 부피에 따라 어떻게 바뀌는지 알아야 한다.

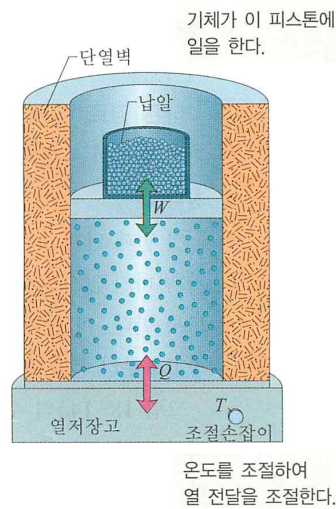


그림 18-13 피스톤이 달린 원통 안에 기체가 갇혀 있다. 열저장고의 온도 T 를 조절하여 열 Q 를 기체에 더하거나 기체에서 제거할 수 있다. 피스톤이 움직일 때 기체는 W 의 일을 한다.

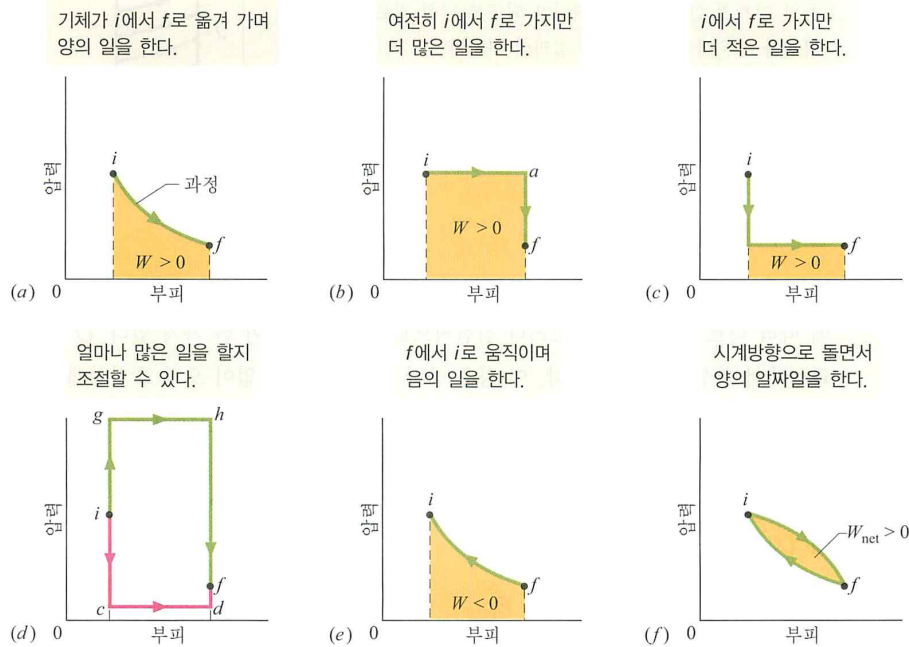


그림 18-14 (a) 색칠한 부분은 초기상태 i 에서 최종상태 f 로 가면서 계가 한 일 W 를 나타낸다. 계의 부피가 증가하므로 일 W 는 양의 값이다. (b) W 역시 양의 값이지만 (a)의 경우보다 크다. (c) W 는 여전히 양의 값이지만 (a)보다 더 작다. (d) W 는 훨씬 더 작을 수도 있고(경로 $icdf$), 훨씬 더 클 수도 있다(경로 $ighf$). (e) 상태 f 에서 i 로 갈 때 외부력이 가해져서 기체가 수축된다. 이때 계(기체)가 한 일 W 는 음의 값이다. (f) 한 번의 순환과정 동안 계가 한 알짜일 W_{net} 은 색칠한 부분의 면적이다.

2. 열역학 제1법칙

앞 절에서는 초기상태에서 최종상태로 계가 바뀌는 동안, 일 W 와 열 Q 가 열역학적 과정에 따라 다르다고 하였다. 그러나 실험적으로 놀라운 사실이 한 가지 있다. $Q - W$ 는 모든 과정에서 항상 같다는 것이다. 이 양은 중간 과정과는 상관없이 오직 초기상태와 최종상태에만 의존한다. Q 와 W 는 물론이고 $Q + W$ 나 $Q - 2W$ 와 같이 Q 와 W 로 이루어진 다른 양들은 경로에 의존하지만, $Q - W$ 는 그렇지 않다.

따라서 $Q - W$ 라는 양은 계의 고유한 특성으로 볼 수 있다. 이 특성을 다음과 같이 내부에너지 E_{int} 로 정의한다.

$$\Delta E_{\text{int}} = E_{\text{int},f} - E_{\text{int},i} = Q - W \quad (\text{제1법칙}) \quad (18-26)$$

식 18-26은 바로 **열역학 제1법칙**이다. 열역학적인 계가 미세하게 변한다면 제1법칙은 다음과 같이 표기할 수 있다.*

$$dE_{\text{int}} = dQ - dW \quad (\text{제1법칙}) \quad (18-27)$$

계의 내부에너지 E_{int} 은 열(Q)의 형태로 에너지가 더해지면 증가하고 계가 일(W)을 하면 감소한다.

8장에서는 고립계, 즉 에너지의 출입이 없는 계에 적용되는 에너지 보존법칙을 보았다. 열역학 제1법칙은 비고립계로 에너지 보존법칙을 확장한 것으로 이 경우 일 W 나 열 Q 의 형태로 에너지가 계로 전달되거나 계에서 주위로 전달될 수 있다. 위의 열역학 제1법칙에서 가정한 것은 계의 운동에너지와 퍼텐셜에너지가 변하지 않는다는 것이다($\Delta K = \Delta U = 0$).

규칙. 이 장 이전에서는 일이라는 용어와 W 라는 기호는 항상 계에 가해지는 것이었다. 하지만 식 18-24부터 열역학을 다루는 19장과 20장에서는 그림 18-13처럼 계가 하는 일로 정의하겠다.

열역학 제1법칙의 특수한 경우

다음의 네 열역학 과정이 표 18-5에 요약되어 있다.

- 1. 단열과정** 단열과정은 그 과정이 매우 빨리 진행되거나, 단열이 매우 잘 되어 열에너지 전달이 일어나지 않는 과정이다. $Q=0$ 을 제1법칙(식 18-26)에 대입하면

$$\Delta E_{\text{int}} = -W \quad (\text{단열과정}) \quad (18-28)$$

이다. 따라서 계가 일을 하면($W>0$) 계의 내부에너지는 그만큼 감소하고, 반대로 계에 일이 가해지면($W<0$) 계의 내부에너지는 그만큼 증가한다.

그림 18-15는 이상적인 단열과정이다. 단열벽 때문에 열의 출입이 없다. 따라서 계와 주위 사이에서 에너지가 전달될 수 있는 유일한 방법은 일에 의한 것이다. 피스톤 위의 납알을 없애서 기체가 팽창하도록 하면 계가 한 일은 양의 값이고 내부에너지는 감소한다. 대신에 납알을 더하여 기체를 압축시키면 계가 한 일은 음의 값이고 내부에

납알을 천천히 제거하여 열교환이 없는 팽창을 하도록 한다.

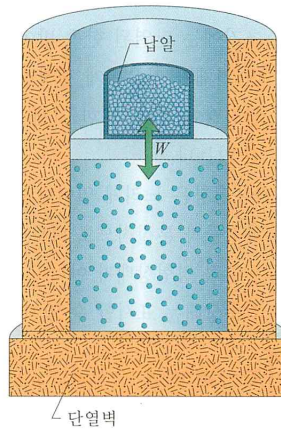


그림 18-15 단열팽창은 피스톤 위에 놓인 납알을 천천히 없애면 구현할 수 있다. 납알을 더하면 언제든지 반대 과정을 만들 수 있다.

표 18-5 열역학 제1법칙: 네 가지 특별한 과정

법칙: $\Delta E_{\text{int}} = Q - W$ (18-26)		
과 정	제한조건	결 과
단열	$Q=0$	$\Delta E_{\text{int}} = -W$
등적과정	$W=0$	$\Delta E_{\text{int}} = Q$
순환	$\Delta E_{\text{int}} = 0$	$Q = W$
자유팽창	$Q = W = 0$	$\Delta E_{\text{int}} = 0$

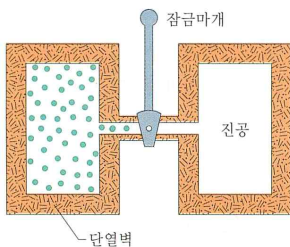


그림 18-16 자유팽창과정의 초기단계. 잠금마개를 열면 기체가 양쪽 방을 채우면서, 결국에는 평형상태에 도달하게 된다.

너지는 증가한다.

- 2. 등적과정** 만일 (기체로 이루어진) 계의 부피가 일정하게 유지된다면 계는 일을 할 수 없다. 제1법칙(식 18-26)에 $W=0$ 을 대입하면 다음과 같다.

$$\Delta E_{\text{int}} = Q \quad (\text{등적과정}) \quad (18-29)$$

즉, 계가 열을 흡수하면($Q>0$) 계의 내부에너지는 증가한다. 반대로 열을 잃으면($Q<0$) 계의 내부에너지는 감소한다.

- 3. 순환과정** 계가 열과 일을 교환한 후 초기상태로 되돌아오는 열역학적 과정도 있다. 이때 계의 고유한 특성, 즉 내부에너지는 변하지 않는다. 제1법칙(식 18-26)에 $\Delta E_{\text{int}} = 0$ 을 대입하면 다음을 얻는다.

$$Q = W \quad (\text{순환과정}) \quad (18-30)$$

따라서 순환과정 동안 알짜일은 열의 형태로 전달된 알짜에너지와 정확히 같고 계의 내부에너지는 변하지 않는다. 순환과정은 그림 18-14에서 보았듯이 $p-V$ 그림에서 폐곡선을 만든다. 이 과정은 20장에서 자세히 다룰 것이다.

- 4. 자유팽창** 계와 주위 사이에 열의 전달이 없고, 계가 일도 하지 않는 단열과정이다. 즉, $Q = W = 0$ 이므로 제1법칙에 따라

$$\Delta E_{\text{int}} = 0 \quad (\text{자유팽창}) \quad (18-31)$$

이다. 그림 18-16은 자유팽창과정의 한 예이다. 기체는 자체적으로 열평형을 이루고, 초기에는 단열된 한쪽 방에 잠금마개로 갇혀 있고 다른 방은 비어 있다. 잠금마개를 열면 기체가 자유롭게 팽창하여 양쪽 방을 모두 채운다. 이때 두 방은 단열되어 있으므로 열전달이 없다. 또한 기체가 진공으로 들어가면서 아무런 압력도 받지 않으므로 일도 하지 않는다.

자유팽창은 느리게 일어나지도 않고 제어 가능한 형태로 일어나지도 않기 때문에 앞에서 본 과정들과 본질적으로 다르다. 결과적으로 갑작스럽게 팽창하는 동안의 어느 순간에도 기체는 열적 평형상태가 아니고 기체의 압력도 균일하지 않다. 따라서 $p-V$ 그림에서 초기상태와 최종상태는 표시할 수 있지만 팽창하는 중간 과정에 대해서는 어떤 표시도 할 수 없다.

VIII. 열전달

개념 POINT

1. 전도

금속 부지깥이의 한쪽 끝을 불 속에 오래 놓아두면 손잡이가 뜨거워진다. 에너지가 불에

서 부지깥이를 따라 손잡이로 전도된 것이다. 불(부지깥이의 입장에서 는 주위)의 온도가 높기 때문에 불 속에 있는 쪽의 금속 원자와 전자 가 진동하는 폭이 상대적으로 커진다. 이렇게 늘어난 진동의 폭과 에 너지는 원자들의 충돌을 통해 원자에서 원자로 전달되어 부지깥이를 따라 손잡이까지 온도가 올라간다.

이제 면적이 A 이고 두께가 L 인 판을 생각해 보자. 그림 18-18과 같 이 두 면의 온도는 뜨거운 열저장고와 차가운 열저장고에 의해 고온 T_H 와 저온 T_C 로 유지되고 있다. 시간 t 동안 뜨거운 면에서 차가운 면 으로 판을 통해 열의 형태로 전달된 에너지를 Q 라고 하자. 실험적으 로 단위시간당 전달되는 에너지량인 전도율 P_{cond} 는 다음과 같이 정의 한다.

$$P_{\text{cond}} = \frac{Q}{t} = kA \frac{T_H - T_C}{L}. \quad (18-32)$$

여기서 k 는 열전도도로서 판을 만든 물질의 상수이다. 전도현상으 로 에너지를 빨리 전달하는 물질은 좋은 열전도체로서 k 값이 크다. 표 18-6에 많이 사용하는 금속, 기체, 건축자재들의 열전도도가 수록되어 있다.

전도에 대한 열저항(R 값)

집을 단열시키거나 소풍 길에 콜라깡통을 차갑게 유지하려면 열전 도도가 나쁜 물체를 찾아야 한다. 이때 물리학적으로는 열저항(R)이 라는 개념을 도입하여, 두께 L 인 판의 열저항 R 값을 다음과 같이 정의 한다.

$$R = \frac{L}{k}. \quad (18-33)$$

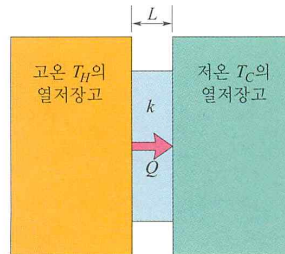
열전도도가 낮은 물질로 판을 만들수록 R 값이 커지기 때문에 R 값이 높은 물체는 나쁜 열전도체이면서 좋은 단열재이다.

R 값은 특정한 두께를 갖는 판의 특성이지만 물질의 특성이 아니다.

복합판을 통한 열전도

그림 18-19처럼 각각의 두께와 열전도도가 L_1, L_2 그리고 k_1, k_2 인 두 판으로 이루어진 복합판이 있다. 판의 바깥면 온도가 각각 T_H, T_C 이고 면적이 A 일 때, 열전달이 정상상태의 과정이라고 가정하고 판을 통한 열전도를 식으로 표기해 보자. 정상상태는 온도와 에너지 전달률 이 판의 모든 곳에서 시간에 따라 변하지 않는다는 뜻이다.

열의 형태로 일정한 에너지의 전달이 있다고 가정한다.



$$T_H > T_C$$

그림 18-18 열전도. 에너지는 두께가 L 이고 열전도도가 k 인 판을 통해 고온 T_H 의 열저장고에서 저온 T_C 의 열저장고로 열의 형태로 전달된다.

표 18-6 열전도도

물 질	$k(\text{W/m} \cdot \text{K})$
금속	
스테인레스 강철	14
납	35
철	67
황동	109
알루미늄	235
구리	401
은	428
기체	
건조한 공기	0.026
헬륨	0.15
수소	0.18
건축자재	
폴리우레탄 폼	0.024
암석섬유	0.043
유리섬유	0.048
전나무	0.11
창유리	1.0

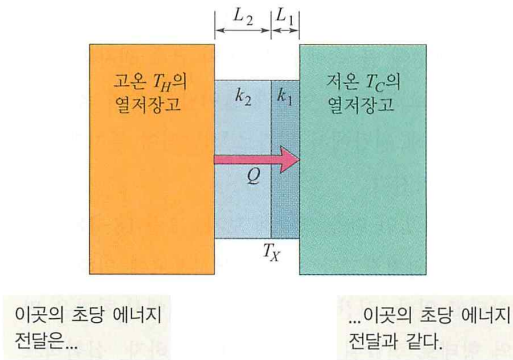


그림 18-19 두께가 다르고 열전도도가 다른 두 물체로 이루어진 복합판을 통해 열이 전달된다. 두 물체 경계면의 정상상태 온도는 T_X 이다.

정상상태에서 두 물체를 통한 전도율이 같아야 한다. 주어진 시각에 한 물체를 통한 에너지 전달량은 같은 시각에 다른 물체를 통한 에너지 전달량과 같다. 만일 이것이 옳지 않다면, 판의 온도는 변할 것이고 정상상태가 아닐 것이다. 두 물체의 경계면에서 온도를 T_X 라고 하고 식 18-32를 사용하면

$$P_{\text{cond}} = \frac{k_2 A (T_H - T_X)}{L_2} = \frac{k_1 A (T_X - T_C)}{L_1} \quad (18-34)$$

가 된다. 식 18-34를 다시 T_X 에 대해 정리하면

$$T_X = \frac{k_1 L_2 T_C + k_2 L_1 T_H}{k_1 L_2 + k_2 L_1} \quad (18-35)$$

이고, 이 식을 다시 식 18-34의 두 등식 중 하나에 대입하면 다음을 얻는다.

$$P_{\text{cond}} = \frac{A(T_H - T_C)}{L_1/k_1 + L_2/k_2}. \quad (18-36)$$

식 18-36은 여러 물질로 이루어진 판에 확장하여 사용할 수 있다. 물질의 개수가 n 이라면

$$P_{\text{cond}} = \frac{A(T_H - T_C)}{\sum (L/k)} \quad (18-37)$$

이다. 분모에서 수열의 합 기호는 사용한 모든 물질에 대해 L/k 를 더한다는 뜻한다.

2. 대류

3. 복사

IX. 이상기체 상태방정식

개념 POINT

$$pV = nRT \quad (\text{이상기체 법칙}), \quad (19-5)$$

$$pV = NkT \quad (\text{이상기체 법칙}), \quad (19-9)$$

온도가 일정할 때 이상기체가 한 일

18장처럼 피스톤-원통 장치에 이상기체를 넣고 기체의 온도 T 를 일정하게 유지하면서 초기부피 V_i 에서 최종부피 V_f 까지 기체를 팽창시킨다고 하자. 일정한 온도에서 이루어지는 이러한 과정을 **등온팽창**이라고 한다(반대 과정은 **등온압축**이라고 한다).

p - V 그림에서 등온곡선은 온도가 같은 점들을 연결한 곡선이다. 즉, 온도 T 가 일정하게 유지되는 기체의 압력 대 부피 곡선이다. n mol의 이상기체에 대한 등온곡선의 방정식은 다음과 같다.

$$p = nRT \frac{1}{V} = (\text{상수}) \frac{1}{V}. \quad (19-10)$$

그림 19-2는 서로 다른 온도의 세 등온곡선들이다(등온곡선의 온도 T 의 값이 위로 올라갈수록 증가함에 주목하여야). 중간의 등온곡선에는 어떤 기체가 310 K의 일정한 온도에서 상태 i 에서 상태 f 로 등온팽창하는 경로를 표시하였다.

등온팽창하는 동안 이상기체가 한 일을 계산하기 위하여, 식 18-25인

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p \, dV \quad (19-11)$$

에서 시작해 보자. 이 식은 어떤 기체의 부피 변화가 일어나는 동안 기체가 한 일에 대한 일반적인 표현식이다. 이상기체에 대해서는 식 19-5, $pV = nRT$ 의 p 를 대입하면

$$W = \int_{V_i}^{V_f} \frac{nRT}{V} \, dV \quad (19-12)$$

를 얻는다. 온도 T 가 상수인 등온팽창을 고려하고 있으므로 T 를 적분기호 밖으로 빼낼 수 있어서

$$W = nRT \int_{V_i}^{V_f} \frac{dV}{V} = nRT \left[\ln V \right]_{V_i}^{V_f} \quad (19-13)$$

를 얻는다. 양쪽 적분극한에서 괄호안의 값을 계산하고 $\ln a - \ln b = \ln(a/b)$ 를 사용하면

$$W = nRT \ln \frac{V_f}{V_i} \quad (\text{이상기체, 등온과정}) \quad (19-14)$$

를 얻는다. 기호 \ln 은 밑이 e 인 자연로그이다.

기체가 팽창하면 V_f 가 V_i 보다 크기 때문에 식 19-14의 비 V_f/V_i 는 1보다 크다. 1보다 큰 수의 자연로그 값은 양수이므로 이상기체가 등온팽창 동안에 한 일 W 는 예상한 대로 양의 값이다. 반대로 압축되면 V_f 가 V_i 보다 작아서 식 19-14의 부피의 비는 1보다 작다. 따라서 식에 있는 자연로그의 값은 음수이고, 예상한 대로 일 W 는 음의 값이다.

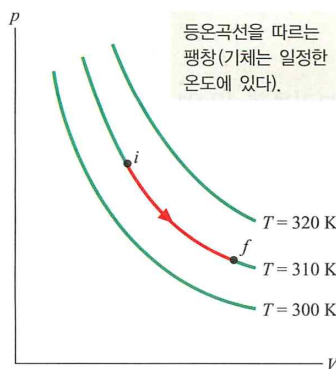


그림 19-2 p - V 그림의 세 등온곡선. 중간에 있는 등온곡선을 따르는 경로는 초기상태 i 에서 최종상태 f 로 기체가 등온팽창하는 과정이다. 등온곡선을 따라 f 에서 i 로 가는 경로는 반대 과정, 즉 등온압축 과정이다.

압력과 부피가 일정할 때 한 일

식 19-14가 모든 열역학 과정 동안 이상기체가 한 일을 나타내지는 않는다. 온도가 일정하게 유지되는 과정에 대한 일만을 나타낸다. 만일 부피가 변하는 과정에서 온도가 변한다면 식 19-12에 있는 기호 T 는 식 19-13에서 한 것처럼 적분기호 밖으로 빼낼 수 없으므로, 식 19-14처럼 표기할 수 없다.

그러나 식 19-11로 돌아가서 등적과정이나 등압과정 같은 열적과정 동안에 이상기체가 한 일을 구할 수 있다. 만일 기체의 부피가 일정하다면 식 19-11은

$$W = 0 \quad (\text{등적과정}) \quad (19-15)$$

으로 표기할 수 있고, 부피는 변하지만 압력이 일정하다면 식 19-11은 다음과 같다.

$$W = p(V_f - V_i) = p \Delta V \quad (\text{등압과정}). \quad (19-16)$$

X. 이상기체의 제곱평균제곱근 속력

$$v_{\text{rms}} = \sqrt{\frac{3RT}{M}} \quad (19-22)$$

XI. 이상기체의 병진운동에너지

그림 19-3의 상자 안에서 움직이는 이상기체 분자 하나를 다시 생각하되, 이제는 그 분자가 다른 분자와 충돌할 때 속력이 변한다고 가정하자. 어느 순간의 병진 운동에너지가 $\frac{1}{2}mv^2$ 이므로, 관찰하는 동안의 평균 병진 운동에너지는 다음과 같다.

$$K_{\text{avg}} = (\frac{1}{2}mv^2)_{\text{avg}} = \frac{1}{2}m(v^2)_{\text{avg}} = \frac{1}{2}mv_{\text{rms}}^2. \quad (19-23)$$

여기서 관찰하는 동안 분자의 평균 속력은 어느 주어진 시점에서 모든 분자들의 평균 속력과 같다고 가정하였다(기체의 총에너지가 변하지 않고, 또한 오랫동안 관찰한다면 이 가정은 적절한 것이다). 식 19-22에서 v_{rms} 를 대입하면,

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

이다. 물질량을 분자의 질량으로 나눈 M/m 은 바로 Avogadro 수이다. 따라서

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

를 얻는다. 또한 식 19-7, $k = R/N_A$ 을 사용하여 다음과 같이 표기할 수 있다.

$$K_{\text{avg}} = \frac{3}{2}kT. \quad (19-24)$$

이 결과는 예상하지 못한 다음과 같은 사실을 말하고 있다.



주어진 온도 T 에서 모든 이상기체 분자는 그들의 질량에 관계없이 평균 병진 운동에너지 $\frac{3}{2}kT$ 는 같다. 결국, 기체의 온도를 측정하는 것은 기체 분자들의 평균 병진 운동에너지를 측정하는 것이다.

XII. 이상기체의 내부에너지

우선 이상기체가 헬륨, 네온, 아르곤 같은(분자라기보다 개개의 원자로 되어 있는) 단원자 기체라고 가정한다. 또한 이상기체의 내부에너지 E_{int} 는 단순히 원자들의 병진 운동에너지의 합이라고 가정한다(양자론에 의하면 회전운동에너지는 허용되지 않는다).

단일 원자의 평균 병진 운동에너지는 기체의 온도에만 의존하며 식 19-24인 $K_{\text{avg}} = \frac{3}{2}kT$ 로 주어진다. n mol의 기체에는 nN_A 개의 원자가 들어 있다. 따라서 기체의 내부에너지는

$$E_{\text{int}} = (nN_A)K_{\text{avg}} = (nN_A)(\frac{3}{2}kT) \quad (19-37)$$

이며, 식 19-7, $k = R/N_A$ 를 이용하면 다음과 같다.

$$E_{\text{int}} = \frac{3}{2}nRT \quad (\text{단원자 이상기체}). \quad (19-38)$$

따라서 다음과 같이 기술할 수 있다.

이상기체의 내부에너지 E_{int} 는 기체 온도만의 함수이고 다른 변수에는 의존하지 않는다.

식 19-38에서 이상기체의 몰비열에 대한 표현을 유도할 수 있다. 실제로 두 개의 표현을 유도할 수 있다. 하나는 에너지가 열로 드나들면서 기체의 부피가 일정하게 유지되는 경우에 대한 것이고, 다른 하나는 에너지가 열로 드나들면서 기체의 압력이 일정하게 유지되는 경우에 대한 것이다. 두 몰비열의 기호는 각각 C_V 와 C_p 이다(C_V 와 C_p 는 열용량이 아니라 비열을 나타내는 것이지만 관용적으로 두 경우 모두 대문자 C 로 표기한다).

부피가 일정할 때의 몰비열

그림 19-9a에서 압력 p , 온도 T 인 이상기체 n mol이 고정된 부피 V 의 원통에 들어 있다. 기체의 초기상태 i 는 그림 19-9b의 p - V 그림에 표시되어 있다. 열저장고의 온도를 천천히 올려서 기체에 작은 양의 열에너지를 더한다고 생각해 보자. 기체의 온도는 $T + \Delta T$ 로 올라가고, 압력은 $p + \Delta p$ 로 올라가서 최종상태 f 에 도달한다.

이런 실험에서 열 Q 는 온도변화 ΔT 와

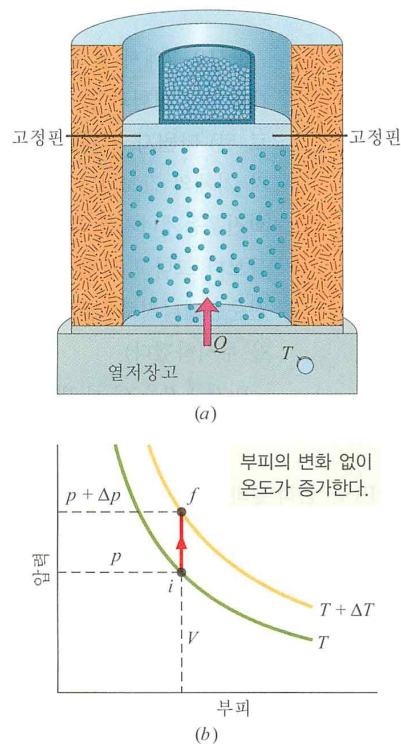


그림 19-9 (a) 등적과정에서 이상기체의 온도가 T 에서 $T + \Delta T$ 로 올라간다. 열은 더해지지만 일을 하지는 않는다. (b) p - V 그림에서 등적과정.

$$Q = nC_V \Delta T \quad (\text{일정부피}) \quad (19-39)$$

의 관계가 있다. 여기서 C_V 는 등적 몰비열이라 부르는 상수이다. Q 에 대한 이 표현을 식 18-26에 있는 열역학 제1법칙($\Delta E_{\text{int}} = Q - W$)에 대입하면

$$\Delta E_{\text{int}} = nC_V \Delta T - W \quad (19-40)$$

를 얻는다. 부피가 일정하게 유지되어 기체는 팽창할 수 없고 따라서 일을 할 수 없다. 즉, $W = 0$ 이므로 식 19-40에서

$$C_V = \frac{\Delta E_{\text{int}}}{n \Delta T} \quad (19-41)$$

를 얻는다. 식 19-38에서 $E_{\text{int}} = \frac{3}{2} nRT$ 이므로, 내부에너지의 변화는 다음과 같다.

$$\Delta E_{\text{int}} = \frac{3}{2} nR \Delta T. \quad (19-42)$$

이 결과를 식 19-41에 대입하면 다음을 얻는다.

$$C_V = \frac{3}{2} R = 12.5 \text{ J/mol} \cdot \text{K} \quad (\text{단원자 기체}). \quad (19-43)$$

표 19-2에서 알 수 있듯이 이상기체에 대한 기체운동론의 예측이 실제 단원자 기체들에 대해서는 실험과 잘 맞는다. (두 원자로 된 분자를 가진) 이원자 기체와 (두 개 이상의 원자로 된) 다원자 기체에 대한 C_V 의 (예측값과) 실험값은 19-8절에 제시될 이유 때문에 단원자 기체의 값보다 더 크다. 여기서 일단 더 복잡하게 생긴 분자들은 회전할 수 있으므로, 회전운동에너지를 갖기 때문에 이원자와 다원자 기체에 대한 C_V 값들이 단원자 기체의 값들보다 크다고 가정한다. 그러면 이원자 혹은 다원자 기체에 Q 가 전달될 때 일부분만이 병진운동에너지로 가서 온도를 높인다(이제부터는 에너지를 분자의 진동에 집어넣는 가능성을 무시하겠다).

이제 $\frac{3}{2} R$ 을 C_V 로 바꾸어서 이상기체의 내부에너지에 대한 식 19-38을 일반화해서 다음을 얻는다.

$$E_{\text{int}} = nC_V T \quad (\text{이상기체}). \quad (19-44)$$

이 식은 단원자뿐만 아니라 적절한 C_V 값이 사용된다면, 이원자나 다원자 분자에도 적용된다. 식 19-38처럼 기체의 내부에너지는 기체의 온도에만 의존하고 압력이나 밀도에는 의존하지 않는다는 것을 알 수 있다.

이상기체가 담겨 있는 용기의 온도가 ΔT 만큼 변화할 때 내부에너지의 변화를 식 19-41이나 식 19-44로부터

$$\Delta E_{\text{int}} = nC_V \Delta T \quad (\text{이상기체, 임의의 과정}) \quad (19-45)$$

로 표기할 수 있다. 이 식이 뜻하는 바는 다음과 같다.

표 19-2 등적 몰비열

분자	예	$C_V (\text{J/mol} \cdot \text{K})$
단원자	이상기체	$\frac{3}{2} R = 12.5$
	실제기체 He Ar	12.5 12.6
이원자	이상기체	$\frac{5}{2} R = 20.8$
	실제기체 N ₂ O ₂	20.7 20.8
다원자	이상기체	$3R = 24.9$
	실제기체 NH ₄ CO ₂	29.0 29.7

개념 POINT



간혀 있는 이상기체의 내부에너지 변화는 기체의 온도변화에
만 의존하고, 온도를 변화시키는 과정에 대해서는 무관하다.

그 예로 그림 19-10의 p - V 그림에 있는 두 등온곡선 사이의 세 경로를 생각해 보자. 경로 1은 등적과정이고, 경로 2는 등압과정이며, 경로 3은 계의 주위와 열교환이 없는 단열 과정이다(19-9절에서 이것을 논의할 것이다). p_f 와 V_f 가 달라서 세 개의 경로와 관련된 열 Q 와 일 W 는 서로 다르지만, 모두 같은 온도변화 ΔT 와 연관되므로 세 개의 경로와 관련된 ΔE_{int} 의 값은 모두 같고 식 19-45로 주어진다. 따라서 T 와 $T + \Delta T$ 사이에 실제로 어떤 경로를 거쳤든지 간에 경로 1과 식 19-45를 사용하여 ΔE_{int} 를 쉽게 계산할 수 있다.

압력이 일정할 때의 몰비열

이제 이상기체의 온도를 이전과 같은 작은 양 ΔT 만큼 올리
되 일정한 압력 하에서 필요한 에너지(열 Q)를 더했다고 생각
해 보자. 그림 19-11a는 실험장치이고, 그림 19-11b는 p - V
그림이다. 이 실험에서 열 Q 는 온도변화 ΔT 와

$$Q = nC_p \Delta T \quad (\text{등압}) \quad (19-46)$$

의 관계가 있음을 알 수 있다. 여기서 C_p 는 등압 몰비열이라고
부르는 상수다. C_p 가 등적 몰비열 C_v 보다 크다. 왜냐하면 기
체의 온도를 올리기 위해서 뿐만이 아니라 기체가 일을 하기
위해서, 즉 그림 19-11a의 무거운 피스톤을 밀어 올리기 위해
서도 에너지가 공급되어야 하기 때문이다.

몰비열 C_p 와 C_v 의 관계를 알아보기 위해 열역학 제1법칙 식
18-26

$$\Delta E_{\text{int}} = Q - W \quad (19-47)$$

에서 시작해 보자. 식 19-47에 있는 각 항을 바꾸는 데 ΔE_{int}
는 식 19-45를 Q 는 식 19-46을 사용한다. W 를 바꾸기 위해
서 먼저 압력이 일정하기 때문에 식 19-16에 의해 $W = p\Delta V$
가 되는 것에 주목하자. 그러면 이상기체 방정식($pV = nRT$)을
사용하여

$$W = p \Delta V = nR \Delta T \quad (19-48)$$

로 표기할 수 있다. 식 19-47에 이 모든 것을 대입하고 전체를 $n\Delta T$ 로 나누면

$$C_v = C_p - R$$

이므로, 결국 다음과 같다.

$$C_p = C_v + R. \quad (19-49)$$

이러한 기체운동론의 예측은 기체의 밀도가 충분히 작아서 이상기체로 취급할 수만 있다면
단원자뿐만 아니라 일반적인 기체에 대해서도 실험결과와 잘 맞는다.

그림 19-12의 왼쪽은 등적과정($Q = \frac{5}{2} nR\Delta T$) 또는 등압과정($Q = \frac{7}{2} nR\Delta T$)을 거치는 단
원자 기체의 Q 값이다. 최종에 Q 값은 기체가 팽창하면서 한 일 W 만큼 커진다. 또한 등적과
정에서는 들어온 열에너지 Q 는 모두 내부에너지의 변화 ΔE_{int} 로, 등압과정에서는 ΔE_{int} 와
한 일 ΔW 로 전달된다.

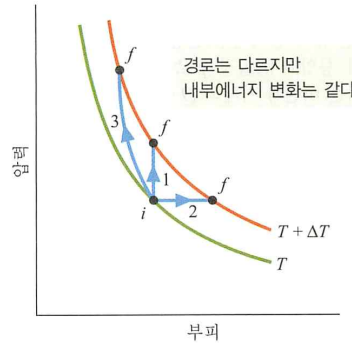
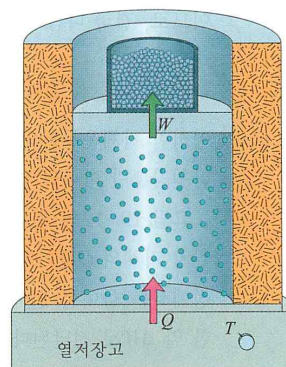
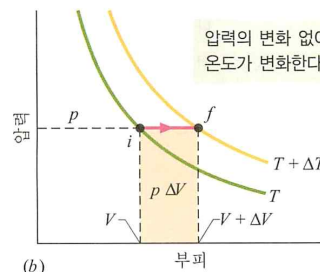


그림 19-10 이상기체를 온도 T 의 초기상
태 i 에서 온도 $T + \Delta T$ 의 최종상태 f 로 가
져가는 서로 다른 과정을 나타내는 세 경
로. 기체의 내부에너지 변화 ΔE_{int} 는 세 과
정 및 같은 온도변화를 주는 어떤 과정에
대해서도 같다.



(a)



(b)

그림 19-11 (a) 등압과정에서 이상기체의
온도를 T 에서 $T + \Delta T$ 로 올린다. 열이 더
해지면 피스톤을 밀어올리며 일을 한다.
(b) p - V 그림으로 나타낸 등압과정. 일
 $p\Delta V$ 는 색칠한 부분의 면적이다.

개념 POINT

XIII. 이상기체의 단열팽창

개념 POINT

$$pV^\gamma = \text{상수} \quad (\text{단열과정}). \quad (19-53)$$

$$TV^{\gamma-1} = \text{상수} \quad (\text{단열과정}). \quad (19-55)$$

자유팽창

18-5절로부터 기체의 자유팽창은 기체가 한 일도, 기체에 가해진 일도 없고 기체의 내부 에너지 변화도 없는 단열과정이었음을 되새겨 보자. 따라서 자유팽창은 식 19-53에서 19-61까지 기술되는 일이 행해지고 내부에너지가 변하는 단열과정의 유형과는 다른 것이다. 자유팽창이 단열팽창이기는 하지만 이 식들은 자유팽창에는 적용되지 않는다.

또한 자유팽창에서 기체가 초기상태와 최종상태에서만 평형에 있기 때문에, p - V 그림에서 두 점만을 나타낼 수 있고 팽창과정 자체는 나타낼 수 없다. 게다가 $\Delta E_{\text{int}} = 0$ 이므로 최종상태의 온도는 초기상태의 온도와 같아야 한다. 따라서 p - V 그림에서 시작점과 끝점은 같은 동온곡선 위에 있어야 하므로 식 19-56 대신 다음 식을 얻는다.

$$T_i = T_f \quad (\text{자유팽창}). \quad (19-62)$$

또한 기체를 이상기체($pV = nRT$)로 가정하면 온도의 변화가 없으므로 pV 에도 변화가 없다. 따라서 식 19-53대신에 자유팽창은 다음과 같은 관계가 있다.

$$p_i V_i = p_f V_f \quad (\text{자유팽창}). \quad (19-63)$$

XIV. 엔트로피

따라서 닫힌계에서의 에너지 변화는 비가역과정의 방향을 결정하지 못한다. 오히려 이 장에서 논의하려고 하는 다른 특성, 즉 계의 엔트로피 변화 ΔS 가 그 방향을 결정한다. 계의 엔트로피 변화는 다음 절에서 정의하겠지만 다음의 엔트로피 가설로 핵심 특성을 나타낼 수 있다.



닫힌계에서 비가역과정이 일어나면 계의 엔트로피 S 는 항상 증가하며 결코 감소하지 않는다.

엔트로피는 에너지와 달리 보존법칙을 따르지 않는다. 닫힌계에서 에너지는 보존된다, 즉 항상 일정하다. 그러나 비가역과정에서 닫힌계의 엔트로피는 항상 증가한다. 이러한 특성 때문에 엔트로피의 변화를 “시간의 화살”이라고도 한다. 예를 들어 옥수수 알갱이가 터지는 것은 시간의 진행방향, 즉 엔트로피의 증가에 해당한다. 시간의 역방향(비디오테이프를 거꾸로 돌리는 것)은 팍콘이 원래 옥수수알갱이로 되돌아가는 것에 해당한다. 이러한 역방향 과정은 엔트로피를 감소시키기 때문에 결코 일어날 수 없다.

계의 엔트로피 변화는 (1) 계의 온도와 계가 열로써 얻거나 잃는 에너지로, 또는 (2) 계를 구성하는 원자나 분자가 정렬할 수 있는 경우의 수로 정의한다. 첫 번째 접근방법은 다음 절에서 다루고, 두 번째 접근방법은 20-4절에서 다룰 것이다.

엔트로피 변화

엔트로피 변화를 18-5절과 19-9절에서 다룬 이상기체의 자유팽창으로 접근해 보자. 그림 20-1a는 마개가 닫혀서 열적으로 단열된 용기의 왼쪽에 갇혀 있는 초기의 평형상태 i 에 있는 기체를 나타낸다. 마개를 열면 기체가 흘러나와 전체 용기에 골고루 퍼져서 결국 그림 20-1b처럼 최종 평형상태 f 에 도달할 것이다.

그림 20-2의 p - V 그림은 초기상태 i 와 최종상태 f 에서 기체의 압력과 부피이다. 압력과 부피는 그 상태에 이르는 방법과는 무관하고, 상태에만 의존하는 상태의 특성이다. 온도와 에너지도 상태의 특성이다. 이제 엔트로피를 또다른 상태의 특성으로 가정해 보자. 계가 초기상태 i 에서 최종상태 f 로 변하는 과정 동안 계의 엔트로피 변화 $S_f - S_i$ 는

$$\Delta S = S_f - S_i = \int_i^f \frac{dQ}{T} \quad (\text{엔트로피 변화의 정의}) \quad (20-1)$$

로 정의한다. 여기서 Q 는 외부에서 계로 또는 계에서 외부로 열로써 전달된 에너지이고, T 는 계의 절대온도이다. 즉, 엔트로피 변화는 열로 전달된 에너지뿐만 아니라 열전달이 발생한 온도에

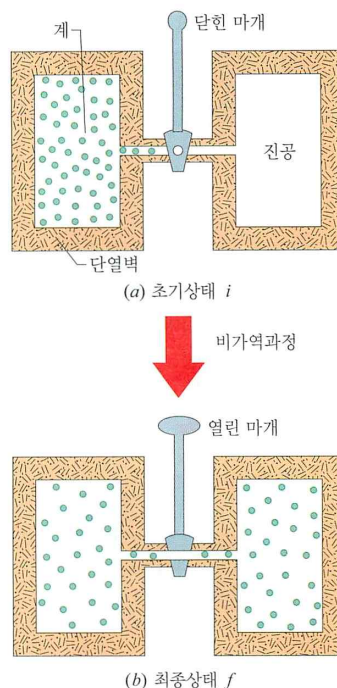


그림 20-1 이상기체의 자유팽창. (a) 마개가 닫혀서 기체가 단열된 용기의 왼쪽에만 갇혀 있다. (b) 마개를 열면 기체가 흘러나와 전체 용기를 골고루 채운다. 이 과정은 비가역적이다. 즉, 기체가 자발적으로 용기의 왼쪽에 모이는 역과정은 일어날 수가 없다.

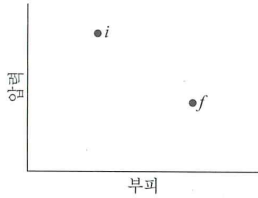
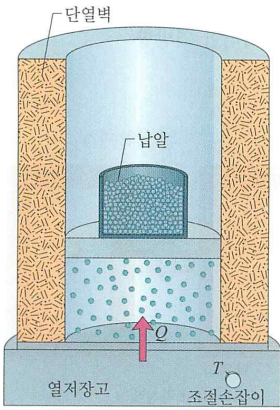
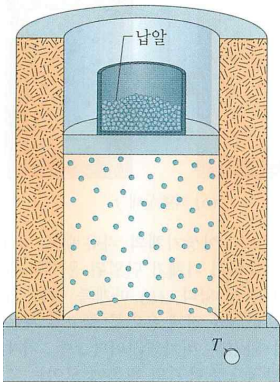


그림 20-2 그림 (20-1)의 자유팽창에서 초기상태 i 와 최종상태 f 를 나타내는 p - V 그림. 중간상태는 평형상태가 아니므로 나타낼 수 없다.



(a) 초기상태 i



(b) 최종상태 f

도 의존한다. T 는 항상 양수이므로 ΔS 의 부호는 Q 와 같다. 식 20-1에서 알 수 있듯이 엔트로피와 엔트로피 변화의 SI 단위는 J/K 이다.

그러나 식 20-1을 그림 20-1의 자유팽창에 적용하는 데에는 문제가 있다. 기체가 흘러나와 전체 용기를 채우는 동안 기체의 압력과 온도, 부피는 예측할 수 없이 요동친다. 다시 말해서 초기 평형상태 i 에서 최종 평형상태 f 로 변하는 중간과정에는 명확히 규정된 평형값을 갖지 않는다. 따라서 그림 20-2의 p - V 그림에서 자유팽창에 대한 압력 대 부피의 경로를 그릴 수 없다. 보다 심각한 것은, 식 20-1을 적용하는 데 필요한 Q 와 T 사이의 관계를 알 수가 없다는 것이다.

하지만 엔트로피가 상태의 특성이라면 상태 i 와 f 간의 엔트로피 차이는 계의 변화과정과는 무관하게 두 상태에만 의존해야 한다. 이제 그림 20-1의 비가역적 자유팽창을 상태 i 와 f 를 연결하는 가역과정으로 바꾸어 생각해 보자. 가역과정에서는 p - V 그림에 압력 대 부피의 경로를 그릴 수 있으므로 식 20-1을 계산하기 위한 Q 와 T 사이의 관계를 알 수 있다.

19-9절에서 자유팽창하는 동안 이상기체의 온도가 변하지 않았다 ($T_i = T_f = T$). 즉, 그림 20-2의 점 i 와 f 는 같은 등온곡선상에 있어야 한다. 따라서 상태 i 에서 상태 f 로 변하는 가역 등온과정을 대체과정으로 취하면 편리하다. 가역 등온과정에서는 T 가 일정하기 때문에 식 20-1의 계산이 아주 간단해진다.

그림 20-3은 가역 등온팽창 과정이 어떻게 만들어지는지를 알려준다. 온도 T 의 열저장고에 놓인 단열된 원통에 기체를 가둔다. 이제 그림 20-1a의 초기상태 i 에서의 압력과 부피가 되도록 움직이는 피스톤에 적당한 납알을 얹는다. 다음으로 그림 20-1b의 최종상태 f 에서의 압력과 부피가 될 때까지 납알을 한 개씩 천천히 제거한다. 이 과정 동안 기체는 열저장고와 열접촉되어 있으므로 온도가 변하지 않는다.

그림 20-3의 가역 등온팽창은 그림 20-1의 비가역적 자유팽창과는 물리적으로 전혀 다르다. 그러나 두 과정은 동일한 초기상태와 최종상태를 가지므로 엔트로피 변화는 똑같다. 등온팽창 과정에서 납알을 천천히 제거했으므로 과정 중의 기체가 평형상태에 있고, 그림 20-4처럼 p - V 그림을 그릴 수 있다.

식 20-1을 등온팽창 과정에 적용하면, 일정한 온도 T 를 적분 밖으

그림 20-3 가역적으로 진행되는 이상기체의 등온팽창. 기체는 그림 (20-1)과 (20-2)의 비가역과정과 동일한 초기상태 i 와 최종상태 f 를 가진다.

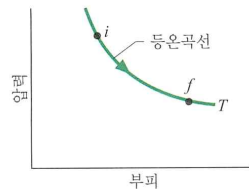


그림 20-4 그림 20-3의 가역 등온팽창에 대한 p - V 그림. 평형상태인 중간상태를 나타낼 수 있다.

로 빼낼 수 있으므로 다음과 같다.

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

이때 $\int dQ = Q$ (여기서 Q 는 과정 중 열로 전달된 총에너지이다)이므로 다음을 얻는다.

$$\Delta S = S_f - S_i = \frac{Q}{T} \quad (\text{엔트로피 변화, 등온과정}) \quad (20-2)$$

그림 20-3의 등온팽창 과정 동안 기체의 온도 T 를 일정하게 유지하기 위해서는 열 Q 가 열저장고로부터 기체로 전달되어야 한다. 이때 Q 가 양수이므로 등온과정뿐만 아니라 그림 20-1의 자유팽창 동안에도 기체의 엔트로피는 증가한다.



단원제에서 일어나는 비가역과정에 대한 엔트로피 변화를 알기 위해서 그 과정을 동일한 초기상태와 최종상태를 잇는 가역과정으로 바꾼다. 그리고 식 20-1에 따라 가역과정에서의 엔트로피 변화를 계산한다.

$$\Delta S = S_f - S_i = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + nC_V \ln \frac{T_f}{T_i} \quad (20-4)$$

개념 POINT

XV. 열역학 제2법칙

단한계의 비가역과정에서 엔트로피가 증가하며 가역과정에서는 일정하다. 즉, 엔트로피는 결코 감소하지 않는다.

단한계의 어떤 한 부분에서 엔트로피가 감소할 수는 있지만 그때 계의 다른 부분에서는 동일하거나 더 큰 엔트로피의 증가가 항상 있게 된다. 그 결과 계의 전체 엔트로피는 결코 감소하지 않는다. 이 사실은 열역학 제2법칙의 한 형태로써 다음과 같이 표기한다.

$$\Delta S \geq 0 \quad (\text{열역학 제2법칙}). \quad (20-5)$$

여기서 부등호는 비가역과정에 적용되고, 등호는 가역과정에 적용된다. 물론 식 20-5는 단한계에서만 성립한다.

대부분의 실제 과정은 마찰, 마흐름 등 다른 요인들 때문에 다소 비가역적이다. 따라서 실제과정을 수행하는 단한계의 엔트로피는 항상 증가한다. 즉, 엔트로피가 일정하게 유지되는 과정은 이상적인 경우뿐이다.

XVI. 열기관

열기관, 즉 기관은 주위에서 열에너지를 끄집어내어 일을 수행하는 장치이다. 이때 모든 열기관의 핵심은 작동물질이다. 증기기관에서는 증기나 액체 형태의 물이 작동물질이다. 자동차 엔진에서는 휘발유와 공기의 혼합물이 작동물질이다. 만일 열기관이 지속적으로 일을 하려면 작동물질이 순환 작동되어야 한다. 즉, 작동물질은 각 상태가 반복되는 “순환과정”이라고 불리는 열역학적 과정을 거쳐야 한다. 이 절에서는 열기관의 작동에 열역학법칙이 어떻게 적용되는지 알아본다.

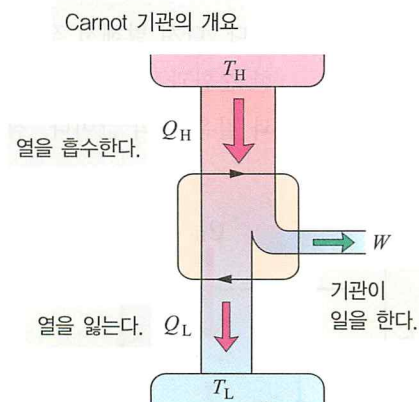


그림 20-8 Carnot 기관. 가운데 고리에 표시한 검은 화살표는 작동물질이 작동하는 순환과정을 나타낸다. $|Q_H|$ 의 열이 T_H 의 고온 열저장고에서 작동물질로 전달된다. $|Q_L|$ 의 열이 작동물질에서 T_L 의 저온 열저장고로 전달된다. 기관(실제로는 작동물질)은 외부에 W 의 일을 한다.

Carnot 기관의 효율

기관의 목적은 뽑아낸 열에너지 Q_H 를 최대한 일로 변환시키는 것이다. 따라서 순환과정 당 한 일(얻은 에너지)을 흡수한 열에너지(공급한 에너지)로 나눈 값으로 **열효율** ε 를 다음과 같이 정의한다.

$$\varepsilon = \frac{\text{얻은 에너지}}{\text{공급한 에너지}} = \frac{|W|}{|Q_H|} \quad (\text{기관의 효율}). \quad (20-11)$$

이상기관의 경우 식 20-8에서 W 의 표현을 식 20-11에 대입하면

$$\varepsilon = \frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|} = 1 - \frac{|Q_L|}{|Q_H|} \quad (20-12)$$

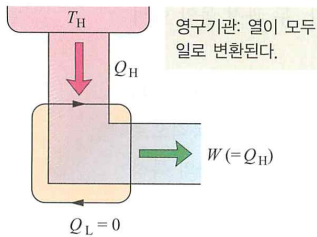


그림 20-11 영구기관. 고온의 열저장고에서 받은 열 Q_H 를 100% 일로 바꾸는 기관이다.

이다. 또한 식 20-10을 사용하면 다음을 얻는다.

$$\varepsilon_C = 1 - \frac{T_L}{T_H} \quad (\text{Carnot 기관의 효율}). \quad (20-13)$$

여기서 온도 T_L 과 T_H 는 켈빈 단위이다. $T_L < T_H$ 이므로 Carnot 기관의 효율은 1보다 작다. 즉 100%보다 낮다. 그림 20-8처럼 고온 열저장고에서 뽑아낸 열에너지의 일부만 일로 사용되고 나머지는 저온 열저장고를 통해 빠져나간다. 어떤 실제 기관의 열효율도 식 20-13으로 계산되는 값보다는 클 수 없음을 20-7절에서 보일 것이다.

발명가들은 한 순환과정마다 소비되는 열에너지 $|Q_L|$ 을 줄여서 기관의 효율을 향상시키고자 끊임없이 노력한다. 발명가들의 꿈은 그림 20-11과 같은 영구기관을 만드는 것이다. 여기서 $|Q_L|$ 은 0이므로 $|Q_H|$ 는 완전히 일로 전환된다. 이런 영구기관을 배에서 사용한다면 연료를 사용하지 않고 물에서 열에너지를 뽑아 프로펠러를 돌릴 수 있다. 영구기관이 장착된 자동차는 연료를 사용하지 않고 주위 공기로부터 열에너지를 뽑아 차를 움직일 수 있다. 그러나 영구기관은 한낱 꿈에 불과하다. 식 20-13에서 알 수 있듯이 실제로 만족시킬 수 없는 $T_L = 0$ 또는 $T_H \rightarrow \infty$ 인 조건에서만 100%(즉, $\varepsilon = 1$)의 효율을 얻을 수 있기 때문이다. 이제 오랜 공학적인 경험에서 열역학 제2법칙을 다음과 같이 기술할 수 있다. 간단히 말해서 “영구기관은 없다.”



열저장고에서 뽑아낸 열에너지를 전부 다 일로 바꾸는 과정은 불가능하다

개념 POINT

■ 변리사 기출문제

개념 POINT

1. [2002년 변리사] (하)
다음 중 옳지 않은 것은?!)

- ① 열역학 제1법칙은 물체의 에너지는 다른 형태로 전환되더라도 에너지 자체는 창조 또는 소멸되지 않는 에너지 보존의 법칙을 의미한다.
- ② 내부에너지는 물질을 구성하는 분자나 원자가 갖고 있는 모든 역학적 에너지를 의미한다.
- ③ 열역학 제2법칙은 열은 외부에서 일을 해주지 않고는 저온에서 고온으로 이동할 수 없는 자연현상을 의미한다.
- ④ 열역학 제3법칙은 두 물체 A, B가 각각 물체 C와 열적 평형상태에 있다면, A, B도 열적 평형상태라는 것을 의미한다.
- ⑤ 엔트로피란 입자계에 있어서의 무질서한 정도를 나타내는 척도로서 열역학 제2법칙과 관련 있다.

2. [2003년 변리사] (하)

다음의 열반응 중 밑줄 친 물질이 열을 흡수하는 과정인 것을 모두 고른 것은?²⁾

< 보기 >

ㄱ. 냉장고에서 꺼낸 사이다 병에 물방울이 맺히는 과정

ㄴ. 따뜻한 물 표면에서 수증기가 발생하는 과정

ㄷ. 상승하는 공기가 단열 팽창하는 과정

ㄹ. 냉장고 뒷면에서 냉매가 액화되는 과정

① ㄱ

② ㄴ

③ ㄷ

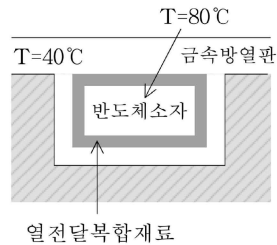
④ ㄷ, ㄹ

⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

3. [2006년 변리사] (하)

80 W의 전력으로 구동되는 반도체 소자가 있다. 이 소자의 표면은 두께 4.0mm의 열전달 복합재로 보호되어 있고, 복합재료 외부 전체가 40 °C로 항상 유지되는 금속 방열판에 접촉되어 있다. 이 소자가 작동되어 일정한 시간이 지난 후 소자의 내부 온도는 80 °C로 유지되고, 복합재료 부분의 온도는 안쪽면 80 °C로부터 바깥면 40 °C에 이를 때까지 균일하게 감소한다. 이 반도체 소자가 금속 방열판과 접촉하고 있는 총 표면적은 얼마인가? (열전달 복합재료의 열전도도는 40 W/m·K이다.)³⁾

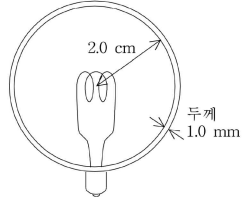


- ① 100mm² ② 200mm² ③ 500mm² ④ 100mm² ⑤ 100mm²

개념 POINT

4. [2007년 변리사] (하)

어떤 60 W 구형의 전구는 50 W 일률로 열에너지를 전구 밖으로 방출한다. 전구의 반경은 2.0 cm , 표면적은 약 $5 \times 10^{-3}\text{ m}^2$, 유리의 두께는 1.0 mm 일 때, 유리의 안쪽 면과 바깥쪽 면의 온도차는 약 몇 도인가? (단, 유리의 열전도도는 $1\text{ J}/(\text{s} \cdot \text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ 라 하고, 열은 등방적으로 방출된다고 가정한다.)⁴⁾



① 10°C

② 20°C

③ 30°C

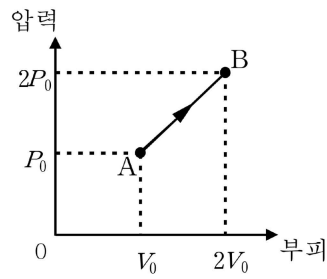
④ 40°C

⑤ 50°C

개념 POINT

5. [2008년 변리사] (중)

그래프는 일정량의 단원자 분자 이상기체의 상태가 $A \rightarrow B$ 를 따라 변화할 때, 압력(P)과 부피(V)의 관계를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 이 기체가 흡수한 열량은?⁵⁾



- ① $\frac{3}{2}P_0V_0$ ② $3P_0V_0$ ③ $\frac{9}{2}P_0V_0$ ④ $\frac{11}{2}P_0V_0$ ⑤ $6P_0V_0$

개념 POINT

6. [2009년 변리사] (상)

열용량이 C 이고 온도가 $360K$ 인 물체를 온도가 $300K$ 로 유지되는 커다란 물통에 담가 열평형을 이루었다. 이 과정에서 일어나는 엔트로피 총 변화량에 가장 가까운 값은? ⁶⁾
(단, $\ln 1.2 = 0.182$ 이다.)

- ① $0.018C$ ② $0.036C$ ③ $0.048C$ ④ $0.064C$ ⑤ $0.182C$

개념 POINT

7. [2010년 변리사] (상)

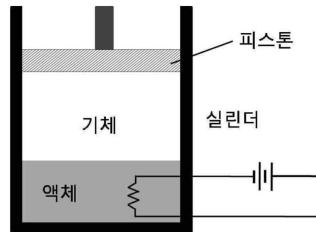
일교차가 $10^{\circ}C$ 인 날에 휘발유 $5 \times 10^4 cm^3$ 를 자동차에 주유한다. 휘발유의 온도변화가 일교차의 온도변화와 같다면, 휘발유의 온도가 가장 낮을 때와 가장 높을 때에 주유되는 휘발유의 최대 질량차이는 얼마인가? (단, 이 휘발유의 온도변화 범위 내에서 휘발유의 밀도는 온도에 선형적으로 변하며 기울기는 $-1.6 \times 10^{-3} g/cm^3 \cdot K$ 이다.)⁷⁾

- ① $3.2kg$ ② $0.8kg$ ③ $0.32kg$ ④ $0.08kg$ ⑤ $0.032kg$

개념 POINT

8. [2011년 변리사] (상)

그림과 같이 피스톤이 달린 단열된 실린더 안에 온도 100°C , 질량 60g 인 액체 상태의 물이 있다. 실린더 내부 압력을 1기압으로 유지한 채 열을 공급하여 액체 상태의 물이 모두 100°C 의 기체 상태가 되었다. 물의 밀도는 액체 상태일 때 $1.0 \times 10^3 \text{kg/m}^3$, 기체 상태일 때 0.6kg/m^3 이고, 물의 기화열은 1기압 하에서 $2.3 \times 10^6 \text{J/kg}$ 이다.



이 과정에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?⁸⁾
(단, 1기압은 $1.0 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 이고, 피스톤의 마찰력은 무시한다.)

<보기>

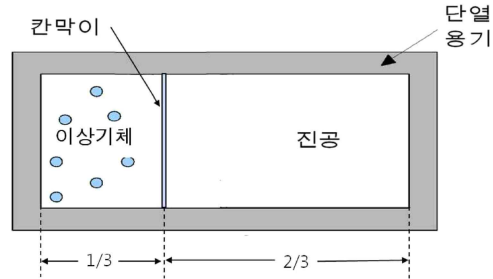
- ㄱ. 실린더에 가한 열은 10^5J 보다 크다.
- ㄴ. 기체가 한 일의 양은 내부에너지의 변화량보다 크다.
- ㄷ. 물의 엔트로피 증가량은 100J/K 보다 크다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄱ, ㄷ ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

9. [2012년 변리사] (하)

외부로부터 단열시킨 이상적인 용기를 칸막이로 아래 그림과 같은 비율로 나누었다. 한쪽에는 이상기체를 채우고 다른 쪽은 진공상태로 된 계(system)를 구성하였다. 칸막이를 순간적으로 제거했을 때 이 계에서 나타나는 현상을 설명한 것으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?9)



< 보기 >

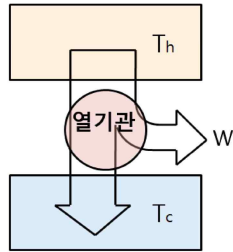
- ㄱ. 계의 엔트로피는 증가한다.
- ㄴ. 계의 온도는 변하지 않는다.
- ㄷ. 계가 외부에 대해 일을 한다.
- ㄹ. 계의 내부에너지는 증가한다.

- ① ㄱ, ㄴ ② ㄱ, ㄷ, ㄹ ③ ㄱ, ㄹ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄷ, ㄹ

개념 POINT

10. [2013년 변리사] (중)

그림과 같이 온도 $T_h = 127^\circ\text{C}$ 인 고온 열원과 온도 $T_c = 27^\circ\text{C}$ 인 저온 열원 사이에서 작동하여 외부에 일(W)을 하는 Carnot 열기관이 있다. 이 열기관의 사용 가능한 출력 일률은 2.0kW 이다. 이 열기관이 매 순환과정마다 15kJ 의 열을 배출할 때, 한 번의 순환과정에서 소요되는 시간(s)은? (단, 0°C 의 절대온도는 273K 이다.)¹⁰⁾

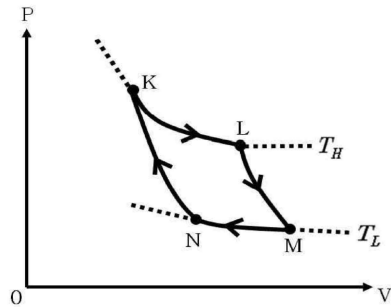


- ① 2.0 ② 2.5 ③ 3.0 ④ 3.5 ⑤ 4.0

개념 POINT

11. [2014년 변리사] (하)

그림은 카르노 기관(시스템)의 순환과정을 나타내는 $P-V$ 도표이다. 순환과정에서 $K \rightarrow L$ 과 $M \rightarrow N$ 은 등온과정이고, $L \rightarrow M$ 과 $N \rightarrow K$ 는 가역적 단열과정이다. 이 시스템은 높은 온도 T_H 인 열저장고로부터 열량 Q_H 를 흡수하며, 낮은 온도 T_L 인 열저장고로 열량을 방출한다.



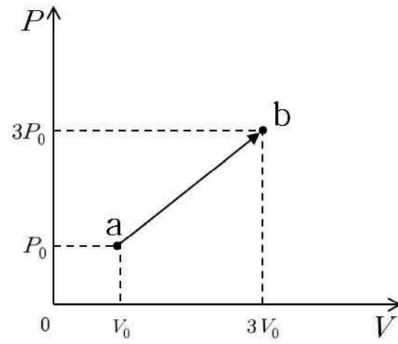
이 순환과정에 대한 설명으로 옳지 않은 것은?¹¹⁾

- ① $\frac{|Q_H|}{T_H} = \frac{|Q_L|}{T_L}$ 이다.
- ② T_H 열 저장고의 엔트로피는 감소한다.
- ③ 순환 결과 이 시스템의 엔트로피는 증가한다.
- ④ 이 시스템이 순환당 한 일의 크기는 $|Q_H| - |Q_L|$ 이다.
- ⑤ 이 시스템의 효율은 $\frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|}$ 이다.

개념 POINT

12. [2015년 변리사] (하)

1mol 단원자 이상기체 상태가 압력-부피($P-V$) 그림의 a에서 b까지 직선 경로를 따라 변할 때, 기체의 엔트로피(entropy) 변화량은? (단, 이상기체 상수는 R 이다.)¹²⁾



- ① $3R \cdot \ln 3$ ② $41R \cdot \ln 2$ ③ $4R \cdot \ln 3$ ④ $4R \cdot \ln 4$ ⑤ $4R \cdot \ln 5$

개념 POINT

13. [2016년 변리사] (하)

계의 엔트로피가 증가하는 경우만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?¹³⁾

< 보기 >

ㄱ. 등온 팽창하는 이상기체

ㄴ. 단열 팽창하는 이상기체

ㄷ. 온도가 다르고 열 접촉된 두 물체로만 이루어진 계

① ㄴ

② ㄷ

③ ㄱ, ㄴ

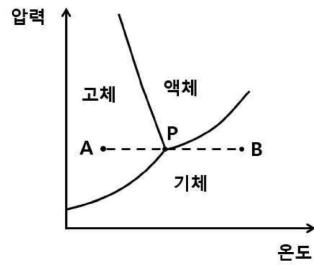
④ ㄱ, ㄷ

⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

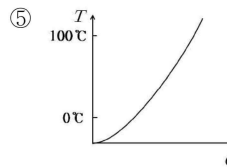
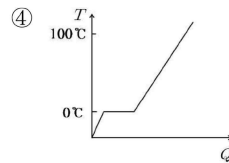
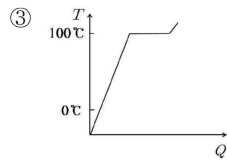
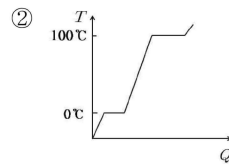
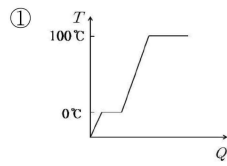
개념 POINT

14. [2018년 변리사] (하)

그림은 물의 상(phase) 도표를 나타낸 것이다. 점 P는 물의 삼중점이다.



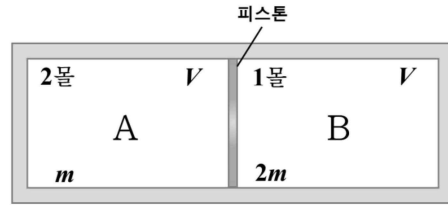
등압 가열과정을 통해 상태 A에 있던 얼음이 P를 지나 상태 B가 될 때, 공급되는 열량 Q 에 따른 물의 온도 T 그래프로 가장 적절한 것은?¹⁴⁾



개념 POINT

15. [2019년 변리사] (하)

그림과 같이 단열된 피스톤으로 나누어진 단열된 실린더의 두 부분 A, B에 각각 2몰, 1몰의 단원자 분자 이상기체가 들어 있다. 마찰이 없는 피스톤은 평형상태로 정지해 있다. A와 B의 부피는 V 로 같고, A와 B에 들어 있는 이상기체 분자 한 개의 질량은 각각 m , $2m$ 이다.



A와 B에서 값이 같은 물리량만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?¹⁵⁾

< 보기 >

ㄱ. 기체의 압력

ㄴ. 기체의 온도

ㄷ. 기체 분자 한 개의 제곱평균제곱근 속도(root-mean-square speed)

① ㄱ

② ㄴ

③ ㄱ, ㄴ

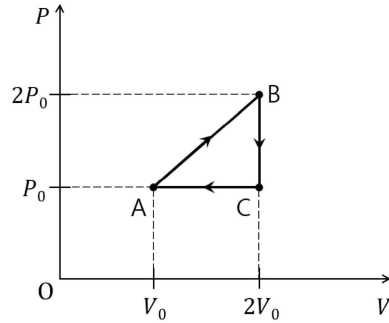
④ ㄱ, ㄷ

⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

16. [2020년 변리사] (중)

그림은 1mol 의 단원자 이상기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 로 변하는 순환과정에서의 압력 P 와 부피 V 를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 흡수한 열량 Q_{AB} 와 이 순환과정에서 기체가 외부에 한 총 일 W 의 비 $\left| \frac{W}{Q_{AB}} \right|$ 는? ¹⁶⁾



① $\frac{1}{24}$

② $\frac{1}{16}$

③ $\frac{1}{12}$

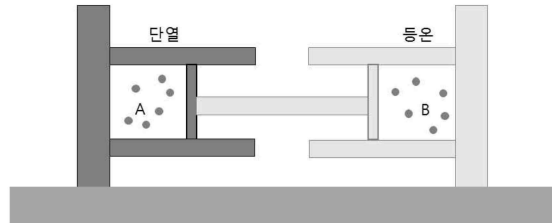
④ $\frac{1}{8}$

⑤ $\frac{1}{6}$

개념 POINT

17. [2021년 변리사] (상)

그림은 힘의 평형을 이루며 정지해 있는 연결된 피스톤과 단원자 이상기체 A와 B가 각각 실린더에 들어 있는 모습을 나타낸 것이다. A와 B의 압력, 부피, 절대온도는 각각 P, V, T 로 같다. A가 들어 있는 실린더는 단열 되어 있고, B가 들어있는 실린더는 외부와 열적 평형을 이룬다. 이 때 A에 열량 $Q_{in}(>0)$ 을 서서히 공급하면, A의 나중 온도는 $4T$ 가 되고 B에서 열량 $Q_{out}(>0)$ 이 외부로 방출된다.



열량의 차 ($Q_{in} - Q_{out}$)는? (단, 외부의 온도는 T 로 일정하고, 대기압은 일정하며 마찰은 무시한다.)¹⁷⁾

- ① $\frac{1}{2}PV$ ② $\frac{3}{2}PV$ ③ $\frac{5}{2}PV$ ④ $\frac{7}{2}PV$ ⑤ $\frac{9}{2}PV$

개념 POINT

18. [2022년 변리사] (하)

절대온도 T_0 에 있던 1몰의 단원자 분자 이상기체에 열을 가했더니, 기체가 등압팽창을 하여 온도 $2T_0$ 인 상태가 되었다. 이 과정에서 기체에 공급된 열량은? (단, R 은 기체상수이다.)¹⁸⁾

① $\frac{1}{2}RT_0$

② RT_0

③ $\frac{3}{2}RT_0$

④ $2RT_0$

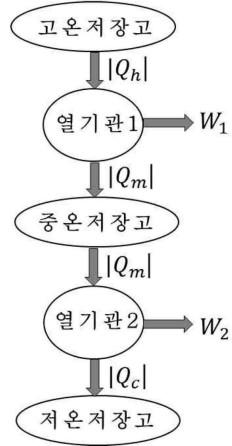
⑤ $\frac{5}{2}RT_0$

개념 POINT

19. [2023년 변리사] (중)

그림과 같이 고온저장고에서 열 $|Q_h|$ 를 흡수하여 W_1 의 일을 하는 열기관 1의 열효율이 0.4이다. 열기관의 배기열 $|Q_m|$ 을 다른 열기관 2에 공급하였더니, 열기관 2는 W_2 의 일을 하고 열효율이 0.3이었다. 전체 열효율 $(W_1 + W_2)/|Q_h|$ 는?¹⁹⁾

개념 POINT



① 0.52

② 0.58

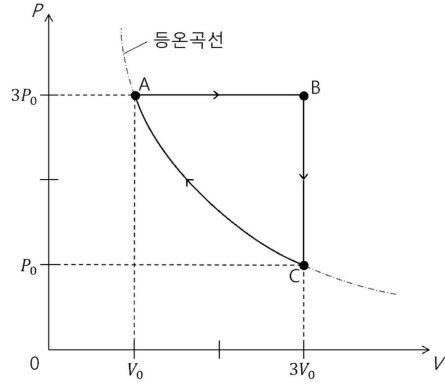
③ 0.63

④ 0.69

⑤ 0.75

20. [2024년 변리사]

그림은 1mol 의 단원자 이상기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 로 변하는 순환과정에서의 압력 P 와 부피 V 를 그래프로 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$, $B \rightarrow C$, $C \rightarrow A$ 는 각각 등압, 등적, 등온과정이다. 이 순환과정에서 기체가 외부에 한 총 일은 W 이다. $|W|$ 는? ²⁰⁾



① $(6 - 3\ln 3)P_0 V_0$

② $(8 - 4\ln 3)P_0 V_0$

③ $(6 - 2\ln 3)P_0 V_0$

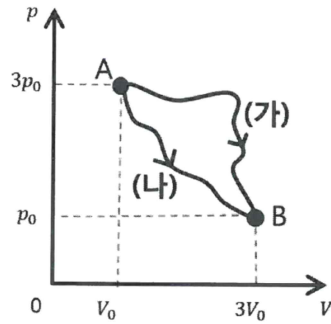
④ $(8 - 3\ln 3)P_0 V_0$

⑤ $(6 - \ln 3)P_0 V_0$

개념 POINT

21. [2025년 변리사]

그림은 일정량의 단원자 분자 이상기체가 압력 $3P_0$, 부피 V_0 인 상태 A에서 압력 P_0 , 부피 $3V_0$ 인 상태 B로 변하는 두 과정 (가), (나)를 나타낸 것이다.



(가)에서의 물리량이 (나)에서의 물리량보다 더 큰 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?21)

< 보기 >

- ㄱ. 기체가 외부에 한 일
- ㄴ. 기체가 외부로부터 흡수한 열량
- ㄷ. 기체의 내부에너지 변화량

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄷ ④ ㄱ, ㄴ ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

22. [2026년 변리사] (하) 열효율

절대 온도가 $500K$ 인 고온의 열원에서 열에너지를 받아 일을 하고 $300K$ 인 저온의 열원으로 열에너지를 방출하는 열기관 A와 B가 있다. A는 가역적인 카르노(Carnot) 기관이고, B는 한 사이클 당 $4000J$ 의 열에너지를 받아 $1500J$ 의 일을 하는 기관이다. A의 열효율을 $e_{\text{카르노}}$, B의

열효율을 e_B 라고 할 때, $\frac{e_B}{e_{\text{카르노}}}$ 는?22)

① $\frac{3}{8}$

② $\frac{2}{5}$

③ $\frac{5}{8}$

④ $\frac{16}{25}$

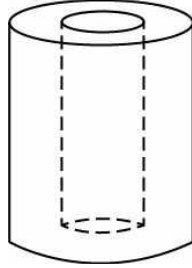
⑤ $\frac{15}{16}$

개념 POINT

■ 개념확인문제

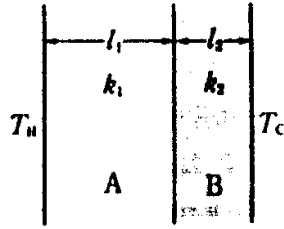
개념 POINT

23. 그림과 같이 내부, 외부가 원기둥 모양인 금속통의 온도가 100K 증가하면 금속통이 담을 수 있는 공간의 부피는 대략 몇 % 증가하는가? 금속통의 선팽창 계수는 $5 \times 10^{-5}/K$ 이다.²³⁾



- ① 0.5% ② 0.75% ③ 1% ④ 1.5% ⑤ 5%

24. 두께가 l_1, l_2 이고, 열전도율이 k_1, k_2 인 두 물질 A, B가 오른쪽 그림과 같이 접촉해 있다. A 바깥쪽의 온도가 T_H , B 바깥쪽의 온도가 T_C 이며, 열은 일정하게 전달된다고 한다.²⁴⁾

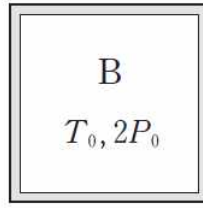
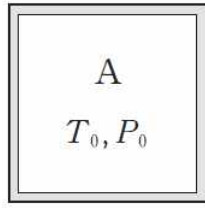


- (1) 두 물질 A, B사이의 접촉면에서의 온도를 구하라(단, $T_H > T_C$ 이다.)
- (2) 이 복합 평판을 통해서 단위 시간, 단위 면적당 전달되는 열량을 구하라.

개념 POINT

25. 그림과 같이 부피가 같은 밀폐된 용기에 단원자 분자 이상 기체 A, B가 들어 있다. A, B는 온도가 T_0 으로 같고, 압력이 각각 P_0 , $2P_0$ 이다.

개념 POINT



B의 물리량이 A의 물리량보다 큰 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?25)

<보 기>

- ㄱ. 분자의 개수 ㄴ. 분자 1 개의 평균 운동 에너지
ㄷ. 내부 에너지

① ㄱ

② ㄷ

③ ㄱ, ㄴ

④ ㄱ, ㄷ

⑤ ㄴ, ㄷ

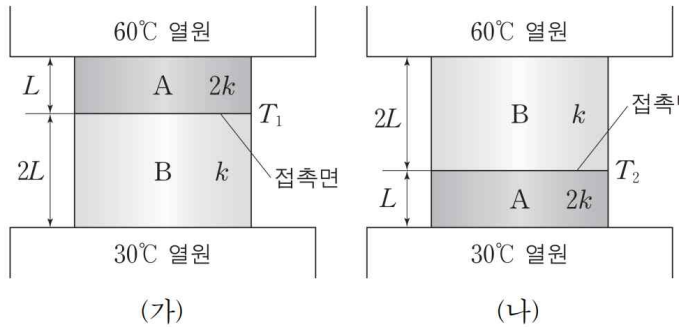
26. 100°C 인 끓는 물에 오랜 시간 잠겨있던 금속조각 100 g 을 꺼내어 단열되어 있는 250 g , 25°C 물에 담그고 충분히 기다리니 물의 온도가 30°C 가 되었다. 이 금속조각의 비열은? 물의 비열은 $4.2\text{ J/g}^{\circ}\text{C}$ 이다.²⁶⁾

- ① $0.67\text{ J/g}^{\circ}\text{C}$
- ② $0.75\text{ J/g}^{\circ}\text{C}$
- ③ $1.35\text{ J/g}^{\circ}\text{C}$
- ④ $1.50\text{ J/g}^{\circ}\text{C}$
- ⑤ $0.95\text{ J/g}^{\circ}\text{C}$

개념 POINT

27. 그림 (가)와 (나)는 단면적이 같은 원기둥 모양의 물체 A와 B를 단면이 일치하도록 접촉시켜 60°C 와 30°C 인 열원에 연결한 것을 나타낸 것이다. A와 B의 열전도도는 각각 $2k$, k 이고 길이는 각각 L , $2L$ 이다. (가)와 (나)에서 60°C 열원에서 30°C 열원으로 단위 시간 동안 전달되는 열에너지는 각각 Q_1 , Q_2 이고, A와 B의 접촉면의 온도는 각각 T_1 , T_2 로 일정하다.²⁷⁾

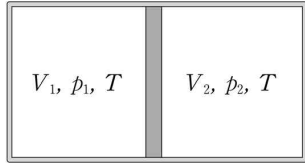
개념 POINT



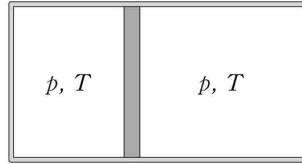
- (1) $\frac{Q_2}{Q_1}$ 을 구하여라.

- (2) T_1 과 T_2 를 구하여라.

28. 그림 (가)는 직육면체 상자를 좌우로 분리하는 피스톤이 고정되어 있고 양쪽에 이상기체가 채워져 있는 것을 나타낸 것이다. 왼쪽 부분의 부피와 압력은 각각 V_1 , p_1 이고 오른쪽 부분은 V_2 , p_2 이다. 그림 (나)는 (가)의 피스톤이 마찰 없이 좌우로 자유롭게 이동할 수 있게 되어 평형을 이룬 상태를 나타낸 것이며, 이때 압력은 p 이다. (가), (나)에서 기체의 온도는 T 로 일정하게 유지된다.²⁸⁾



(가)



(나)

압력 p 는?

- ① $\frac{2V_1V_2}{(V_1+V_2)^2}(p_1+p_2)$ ② $\frac{1}{2}\left(\frac{V_1}{V_2}p_1+\frac{V_2}{V_1}p_2\right)$
 ③ $\frac{1}{2}\left(\frac{V_2}{V_1}p_1+\frac{V_1}{V_2}p_2\right)$ ④ $\frac{p_1V_2+p_2V_1}{V_1+V_2}$
 ⑤ $\frac{p_1V_1+p_2V_2}{V_1+V_2}$

개념 POINT

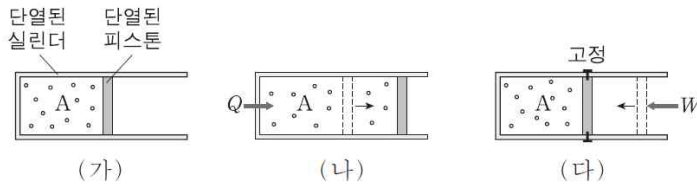
29. 1mol의 이상기체가 처음 압력과 부피가 P_i, V_i 인 상태에서 나중 압력과 부피가 $P_f = 3P_i, V_f = 3V_i$ 인 상태로 변화하였다. 이 과정에서 기체의 압력은 항상 부피에 비례한다.²⁹⁾

개념 POINT

(1) 팽창 과정에서 기체가 한 일은 얼마인가?

(2) 변화 과정에서 기체의 온도 T 는 부피 V 에 어떻게 의존하는가? (기체 상수는 R 이다.)

30. 그림 (가)는 이상 기체 A가 들어 있는 실린더에서 피스톤이 정지해 있는 모습을, (나)는 (가)의 A에 열량 Q 를 가하여 피스톤이 이동해 정지한 모습을, (다)는 (나)의 A에 일 W 를 하여 피스톤을 이동시킨 후 고정한 모습을 나타낸 것이다. A의 압력은 (가)→(나) 과정에서 일정하고, A의 부피는 (가)와 (다)에서 같다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? (단, 피스톤의 마찰은 무시한다.)³⁰⁾

<보 기>

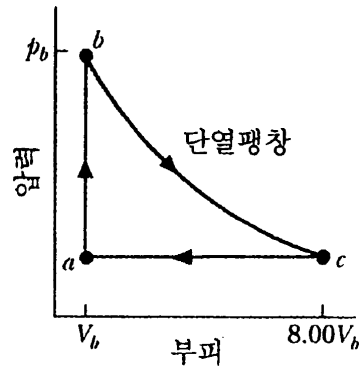
- ㄱ. A의 온도는 (가)에서가 (다)에서보다 낮다.
 ㄴ. (나) → (다) 과정에서 A의 압력은 일정하다.
 ㄷ. (가) → (나) 과정에서 A가 한 일은 (나) → (다) 과정에서 A의 내부 에너지 변화량과 같다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄷ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

개념 POINT

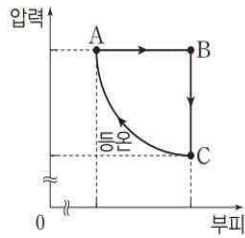
31. 1mol의 단원자 이상 기체가 그림의 가역 순환과정을 거친다. bc 는 단열 팽창과정이며, $p_b = 10.0\text{atm}$, $V_b = 1.00 \times 10^{-3}\text{m}^3$ 이다. 다음을 구하라.³¹⁾

개념 POINT



- (1) 기체에 가해진 열량
- (2) 기체에서 빠져나간 열량
- (3) 기체가 한 일
- (4) 한 순환과정의 효율

32. 그림은 열효율이 0.2인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 변할 때 기체의 압력과 부피를 나타낸 것으로, $C \rightarrow A$ 과정은 등온 과정이다. 표는 각 과정에서 기체가 흡수 또는 방출한 열량을 나타낸 것이다.



과정	기체가 흡수 또는 방출한 열량
$A \rightarrow B$	$5Q_0$
$B \rightarrow C$	㉠
$C \rightarrow A$	Q_0

이에 대한 설명으로 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?³²⁾

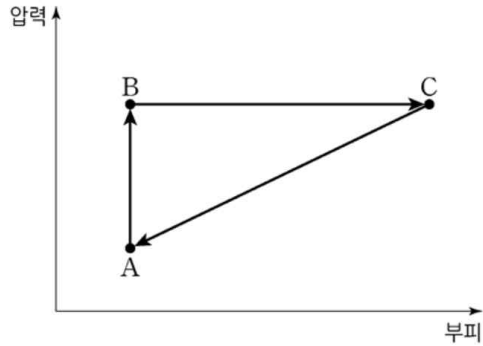
<보 기>

- ㄱ. ㉠은 $2Q_0$ 이다.
 ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량은 $3Q_0$ 이다.
 ㄷ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 한 일은 $C \rightarrow A$ 과정에서 기체가 받은 일의 3배이다.

- ① ㄱ
 ② ㄴ
 ③ ㄷ
 ④ ㄱ, ㄴ
 ⑤ ㄴ, ㄷ

개념 POINT

33. 그림과 같이 2몰의 단원자 분자 이상기체가 절대온도 T 인 상태 A에서 시작하여 과정 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 변한다. 등적과정 $A \rightarrow B$ 에서 B의 압력은 A의 압력의 3배이고, 등압과정 $B \rightarrow C$ 에서 C의 부피는 B의 부피의 5배이다. $C \rightarrow A$ 과정은 압력-부피 도표에서 직선을 따라 변화하는 과정이다. $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 변하는 동안 기체가 외부로부터 받은 열량은? (단, 기체상수는 R 이다.)³³⁾

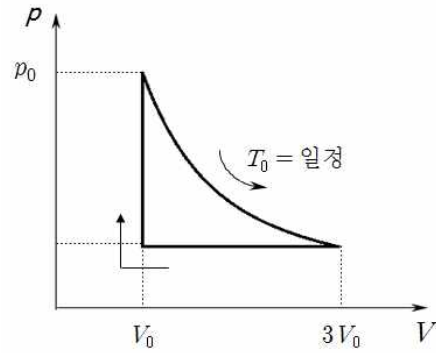


- ① $20RT$
- ② $16RT$
- ③ $8RT$
- ④ $14RT$
- ⑤ $10RT$

개념 POINT

34. 단원자 분자의 이상기체를 사용하여 그림과 같이 등온-등압-등적의 3단계로 작동하는 가역적인 열기관을 만든다면 가능한 최대의 열효율은 얼마인가?³⁴⁾

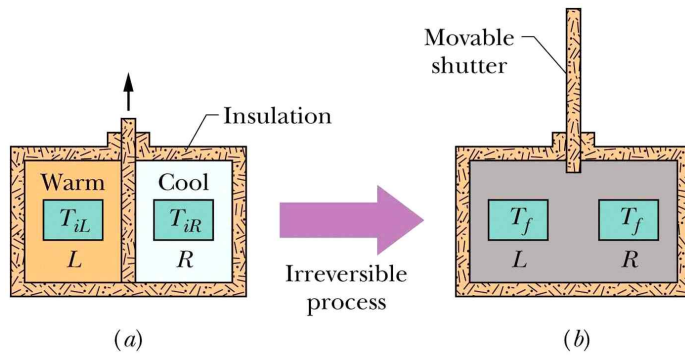
개념 POINT



- ① $\frac{1}{3}$ ② $\frac{2}{3}$ ③ $\frac{3\ln 3 - 2}{3\ln 3 + 3}$ ④ $1 - \frac{2}{3\ln 3}$
- ⑤ 주어진 정보만으로는 계산할 수 없다.

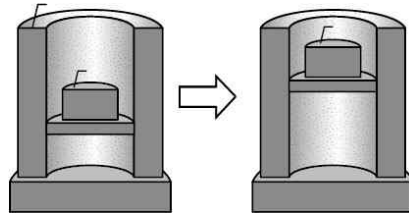
35. 그림은 질량 m , 비열 c 로 동일한 두 구리토막이 단열상자의 칸막이에 나뉜 채 놓여 있는 것을 나타낸 것이다. 처음에 왼쪽 토막의 온도는 T_{iL} , 오른쪽 토막의 온도는 T_{iR} 이다. 칸막이를 제거하면 토막들의 최종 평형 온도가 T_f 가 되는 비가역 과정을 겪는다. 이 과정에서 계의 알짜 엔트로피 변화는?³⁵⁾

개념 POINT

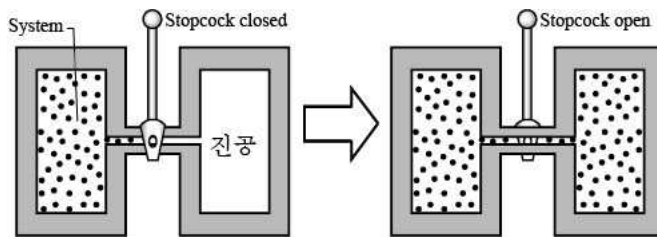


36. 다음은 가역 등온과정(과정 A)과 자유 팽창과정 (과정 B)을 비교한 설명이다. 기체는 모두 단위자 분자 이상기체이며, 두 과정에서 기체의 처음 상태와 나중 상태는 동일하다. 과정 A와 과정 B에 대한 설명 중 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은? ³⁶⁾

개념 POINT



과정 A: T, V, n 상태에 놓여있는 기체를 온도가 T 인 열원과 접촉시킨 채로 피스톤 위의 납알을 하나씩 제거하여 기체의 부피를 2배로 만든다.



과정 B: T, V, n 상태에 놓여있는 기체를 자유팽창시켜 기체의 부피를 2배로 만든다.

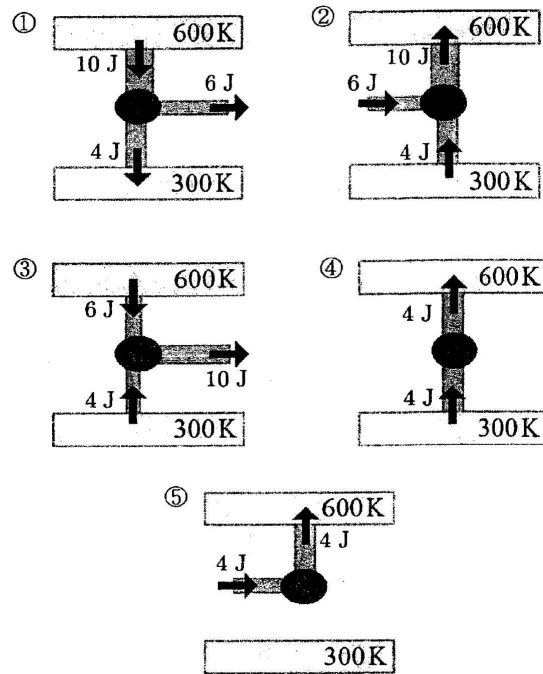
—<보 기>—

- ㄱ. 과정 A와 과정 B에서 기체의 엔트로피 변화량은 같다.
 ㄴ. 과정 A에서 기체의 엔트로피 변화량과 열원의 엔트로피 변화량은 크기는 같고 부호는 반대이다.
 ㄷ. 과정 B에서 기체의 엔트로피 변화량은 0이다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

다음 중, 작동이 가능한 기관을 2개 고르시오. (단, 고온의 열원의 온도는 $600K$, 저온의 열원의 온도는 $300K$ 임.)³⁷⁾

개념 POINT



37. 어떤 물질의 고체 비열은 $2000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$, 액체 비열은 $4000 \text{ J/kg}^\circ\text{C}$ 이고, 녹는점 27°C 에서 용해열은 $3 \times 10^5 \text{ J/kg}$ 이다. 온도가 -73°C 인 고체 상태의 물질 2 kg 이 녹아 온도가 127°C 인 액체 상태의 물질이 되었을 때, 물질의 엔트로피의 변화는? (단, $0^\circ\text{C} = 273 \text{ K}$ 이며, $\ln 2 = 0.7$, $\ln 3 = 1.1$ 로 근사한다.)³⁸⁾

- ① 4000 J/K
- ② 6000 J/K
- ③ 2000 J/K
- ④ 8000 J/K
- ⑤ 3000 J/K

개념 POINT

38. 한 변의 길이가 L 인 정육면체 모양의 용기에 단원자 분자 이상 기체 N 개가 들어있다. 정육면체 모양을 유지하면서 변의 길이를 $\frac{1}{3}L$ 로 서서히 줄였더니, 기체의 압력은 4배 증가했다. 이 과정에서 기체의 엔트로피 변화는 ? (단, 볼츠만 상수는 k 이다.)³⁹⁾

개념 POINT

- ① $\left(3\ln 2 - \frac{15}{2}\ln 3\right)kN$
- ② $\left(4\ln 2 - \frac{13}{2}\ln 3\right)kN$
- ③ $\left(5\ln 2 - \frac{11}{2}\ln 3\right)kN$
- ④ $\left(6\ln 2 - \frac{9}{2}\ln 3\right)kN$
- ⑤ $\left(7\ln 2 - \frac{7}{2}\ln 3\right)kN$

39. 역학적 제 1, 2법칙에 대한 설명 중 옳은 것만을 <보기>에서 있는 대로 고른 것은?⁴⁰⁾

개념 POINT

<보기>

- ㄱ. 공기 중에 매달려 있는 정지해 있는 추에 무작위로 운동하는 공기 분자들이 충돌하여 추가 단진자 운동을 하게 되었다면, 이는 열역학 제 1법칙에 위배되는 것이다.
- ㄴ. 외부에서의 에너지 유입 없이 저절로 저온에서 고온으로 열이 이동한다면, 이는 열학적 제 2법칙에 위배되는 것이다.
- ㄷ. 계의 엔트로피는 절대 감소하지 않는다.

① ㄱ

② ㄴ

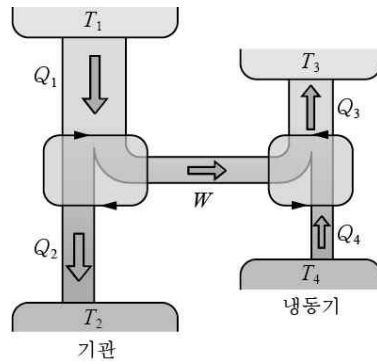
③ ㄱ, ㄴ

④ ㄴ, ㄷ

⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

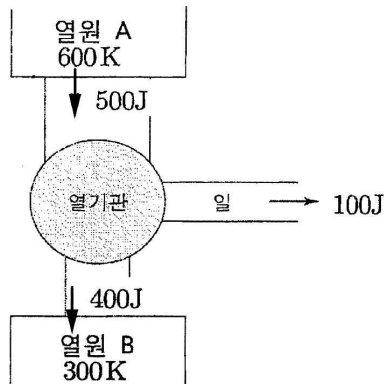
40. 어떤 Carnot 기관이 T_1 과 T_2 의 온도 사이에서 동작된다. 이 기관의 일을 그림과 같이 온도 T_3 와 T_4 사이에서 작동하는 Carnot 냉동기관에 공급한다. Q_3/Q_1 을 T_1, T_2, T_3, T_4 로 나타내어라.⁴¹⁾

개념 POINT



41. 그림은 온도가 $600K$ 인 열원 A로부터 $500J$ 의 열을 흡수하여 $100J$ 의 일을 하고, 온도가 $300K$ 인 열원 B로 $400J$ 의 열을 방출하는 열기관을 나타낸 것이다.

개념 POINT



이에 대한 설명 중 옳은 것을 <보기>에서 모두 고른 것은?⁴²⁾

<보기>

- ㄱ. 이 열기관의 열효율은 20%이다.
- ㄴ. 열원 A와 열원 B의 엔트로피 변화량의 합은 0보다 크다.
- ㄷ. 열원 A와 열원 B 사이에서 작동하는 카르노 기관이 $500J$ 의 열을 흡수하면 $250J$ 의 일을 한다.

- ① ㄱ ② ㄴ ③ ㄱ, ㄴ ④ ㄴ, ㄷ ⑤ ㄱ, ㄴ, ㄷ

■ 정답과 해설

개념 POINT

1) [정답] ④

[해설]

④번 지문은 열역학 제0법칙이다. 열역학 제3법칙은 '절대영도에서 완벽한 결정상태인 물질의 엔트로피는 0이다' 라는 법칙이다.

2) [정답] ②

[해설]

- ㄱ. 공기 중의 수증기가 차가운 사이다 병 표면에 닿아 액체(물)로 변하는 액화현상이다. 기체가 액체가 될 때는 에너지를 밖으로 내 보내야 하므로, 사이다병(또는 수증기) 입장에서 열을 방출하는 과정이다.(거짓)
- ㄴ. 액체인 물이 기체인 수증기로 변하는 증발(기화)현상이다. 액체가 기체가 되기 위해서는 분자간의 인력을 끊어낼 에너지가 필요하므로 열을 흡수해야 한다. (참)
- ㄷ. '단열' 과정은 외부와 열을 주고 받지 않는 과정이다. (거짓)
- ㄹ. 기체 상태의 냉매가 액체로 변하는 과정이다. 냉매는 액화되면서 숨은열(액화열)을 외부로 방출한다.(거짓)

3) [정답] ②

[해설]

정상상태에서 전도공식 $P_{\text{전도}} = k \frac{A(T_H - T_L)}{L}$ 을 정리하면

$$A = \frac{P_{\text{전도}} L}{k(T_H - T_L)} = \frac{80 \times (4.0 \times 10^{-3})}{40 \times (353 - 313)} = \frac{320 \times 10^{-3}}{40 \times 40} = \frac{0.32}{1600} = 0.0002 \text{ m}^2 = 200 \text{ mm}^2 \text{ 이다.}$$

4) [정답] ①

[해설]

정상상태에서 전도공식 $P_{\text{전도}} = k \frac{A(T_H - T_L)}{L}$ 에서 유리의 안쪽 면과 바깥쪽 면의 온도차는

$$(T_H - T_L) = \frac{P_{\text{전도}} L}{kA} = \frac{50 \times (1.0 \times 10^{-3})}{1 \times (5 \times 10^{-3})} = 10^\circ \text{ C 이다.}$$

5) [정답] ⑤

[해설]

W 는 사다리꼴의 넓이이므로 $W = \frac{2P_0 + P_0}{2} \times (2V_0 - V_0) = \frac{3}{2} P_0 V_0$ 이다.

단원자 분자 이상기체의 내부에너지 변화량은

$$\Delta U = \frac{3}{2} \Delta(PV) = \frac{3}{2} (P_B V_B - P_A V_A) = \frac{3}{2} (4P_0 V_0 - P_0 V_0) = \frac{9}{2} P_0 V_0 \text{ 이다.}$$

따라서 이 기체가 흡수한 열량은 열역학 제1법칙에 따라 둘을 더하면 $6P_0 V_0$ 이다.

6) [정답] ①

[해설]

$$S_{\text{물체}} = \int_{T_1}^{T_2} \frac{C}{T} dT = C \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = C \ln \left(\frac{300}{360} \right) = C \ln \left(\frac{5}{6} \right) = -C \ln \left(\frac{6}{5} \right) = -C \ln 1.2 = -0.182 C$$

$$\Delta S_{\text{물통}} = \frac{Q}{T} = \frac{C(T_1 - T_2)}{T} = \frac{60C}{300} = 0.2C$$

따라서 엔트로피 총 변화량은 두 값을 더하면 $0.018C$ 이다.

개념 POINT

7) [정답] ②

[해설]

이 휘발유의 온도변화 범위 내에서 휘발유의 밀도는 온도에 선형적으로 변하며 기울기는 $-1.6 \times 10^{-3} g/cm^3 \cdot K$ 이므로 밀도변화량 $\Delta\rho = |\text{기울기}| \times \Delta T$ 이고 대입하여 정리하면

$$\Delta\rho = (1.6 \times 10^{-3} g/cm^3 K) \times 10K = 1.6 \times 10^{-2} g/cm^3 \text{이다.}$$

$$\Delta m = \Delta\rho \times V \text{이므로 } \Delta m = (1.6 \times 10^{-2} g/cm^3) \times (5 \times 10^4 cm^3) = 800g = 0.8kg \text{이다.}$$

8) [정답] ④

[해설]

$$\text{ㄱ. } Q = Lm = (2.3 \times 10^6) \times 0.06 = 1.38 \times 10^5 J > 10^5 J \text{ (참)}$$

$$\text{ㄴ. } V_{\text{액체}} = \frac{m}{\rho_{\text{액체}}} = \frac{0.06}{1000} = 6 \times 10^{-5} m^3, \quad V_{\text{기체}} = \frac{m}{\rho_{\text{기체}}} = \frac{0.06}{0.6} = 0.1 m^3 \text{이고 액체의 부피는 무시할}$$

$$\text{정도로 작으므로 } \Delta V = V_{\text{기체}} = 0.1 m^3 \text{이고}$$

$$W = P \Delta V = (1.0 \times 10^5 N/m^2) \times 0.1 m^3 = 10^4 J \text{이다.}$$

이때 내부에너지 변화량 $\Delta U = Q - W = 138,000J - 10,000J = 128,000J$ 이다. 따라서 기체가 한 일의 양은 내부에너지의 변화량보다 작다. (거짓)

$$\text{ㄷ. 등온과정이므로 } \Delta S = \frac{Q}{T} = \frac{138,000J}{373K} = 369.97 J/K \text{이다. 따라서 } 100 J/K \text{보다 크다. (참)}$$

9) [정답] ①

[해설]

ㄱ. 자유 팽창은 스스로 일어나는 대표적인 비가역 과정이므로 엔트로피가 증가한다. (참)

ㄴ. 이상기체의 내부에너지는 온도에만 비례하는데 내부에너지가 일정하므로 온도 또한 변하지 않는다. (참)

ㄷ. 기체가 진공상태로 퍼져 나갈 때는 밀어낼 대상(외부압력)이 없으므로 기체가 하는일은 0입니다. (거짓)

ㄹ. 용기가 외부로부터 단열되어 있으므로 열의 출입은 0이다. 따라서 일이 0이고 열의 출입이 0이므로 내부에너지도 변하지 않는다. (거짓)

10) [정답] ②

[해설]

$$\text{카르노 기관의 효율 } e_{\text{카르노}} = 1 - \frac{T_c}{T_H} = 1 - \frac{300}{400} = \frac{1}{4} = \frac{W}{Q_h} = \frac{W}{W+15} \text{이므로 } \frac{1}{4} = \frac{W}{W+15} \text{에서}$$

$$W = 5,000J \text{이다. } P = \frac{W}{t} \text{에서 } t = \frac{W}{P} = \frac{5,000J}{2,000W} = 2.5s \text{이다.}$$

11) [정답] ③

[해설]

① 가역기관인 카르노기관에서 흡수/방출한 열량과 절대온도의 비는 일정하다. 이는

$$\Delta S = \frac{Q_H}{T_H} - \frac{Q_L}{T_L} = 0 \text{에서 도출된다. (참)}$$

② 고온 열저장고는 시스템에 열을 공급하므로 열을 잃는다. 따라서 엔트로피 변화량이 음수가 되어 엔트로피는 감소한다. (참)

③ 엔트로피는 상태함수이므로 카르노기관이 한 바퀴 돌아 다시 원래의 상태(점K)로 복귀하면, 시스템의 엔트로피 변화량은 0이 된다. (거짓)

④ 열역학 제1법칙에 따라 한 순환동안 시스템이 외부에 한 일은 흡수한 총열량과 방출한 총 열량의 차이인 $|Q_H| - |Q_L|$ 과 같다. (참)

⑤ 열효율은 공급된 열량 대비 한 일의 양으로 정의되므로 $\frac{|Q_H| - |Q_L|}{|Q_H|}$ 이다. (참)

12) [정답] ③

[해설]

이상기체의 엔트로피 변화량 $\Delta S = nC_v \ln\left(\frac{T_b}{T_a}\right) + nR \ln\left(\frac{V_b}{V_a}\right)$ 에서 $n=1$ 이고 $C_v = \frac{3}{2}R$ 이다. 따라서 $T_a = \frac{P_0 V_0}{R}$, $T_b = \frac{9P_0 V_0}{R}$ 이므로 대입하여 정리하면 $\Delta S = 4R \ln 3$ 이다.

13) [정답] ④

[해설]

ㄱ. 등온팽창의 경우 T 가 일정하고 $Q > 0$ 이므로 $\Delta S = \int \frac{dQ}{T}$ 에서 $\Delta S > 0$ 이다. (참)

ㄴ. 단열팽창의 경우 $Q = 0$ 이므로 $\Delta S = 0$ 이다. (거짓)

ㄷ. 온도가 다른 두 물체가 접촉하면 열은 고온에서 저온으로 스스로 이동하는 대표적인 비가역현상이다. 이 경우 고온 물체의 엔트로피 감소량보다 저온 물체의 엔트로피 증가량이 항상 더 크기 때문에, 전체 계의 총 엔트로피는 항상 증가한다. (참)

14) [정답] ④

[해설]

1. 상평형 그림 해석

점 P는 물의 삼중점이며, 삼중점은 고체(얼음), 액체(물), 기체(수증기)가 공존하는 상태이다. 따라서 삼중점을 통과한다는 것은 고체가 액체와 기체로 변하는 과정이 동시에 혹은 연속적으로 일어남을 의미한다.

2. 상태 변화에 따른 온도 변화 (\$Q\$-\$T\$ 그래프)

- 얼음의 가열 (고체 구간) : 열을 가하면 온도가 상승한다.
- 삼중점 P에서의 상태 변화 : 삼중점 압력에서 가열하면 고체가 액체를 거쳐 기체로 변하거나, 고체가 바로 기체로 승화하는 등 상태 변화가 일어난다. 상태 변화가 일어나는 동안 공급된 열량은 모두 상태를 바꾸는 데 쓰이므로 온도는 일정하게 유지된다. 삼중점 온도는 약 0.01°C 이다.
- 수증기의 가열 (기체 구간) : 모든 얼음이 수증기로 변한 후 다시 열을 가하면 온도가 상승한다.

3. 그래프 선택

경로가 삼중점(P)을 직접 통과하므로, 일반적인 1기압에서의 가열 곡선(수평 구간이 2개인 경우)과 달리 수평 구간이 삼중점 온도에서 한 번만 나타난다. 따라서 가장 적절한 그래프는 ④이다.

15) [정답] ④

[해설]

ㄱ. 피스톤이 평형상태이므로 A와 B의 압력은 같다. (참)

ㄴ. $T = \frac{PV}{nR}$ 이므로 A와 B에서 P 와 V 가 동일하므로 T 는 n 에 반비례한다. A와 B의 몰수 n 이 다르므로 기체의 온도는 다르다. (거짓)

ㄷ. 단위자 이상기체 분자의 제곱평균제곱근 속력은 $\sqrt{\frac{3RT}{M}} = \sqrt{\frac{3R}{mN_A} \times \frac{PV}{nR}} = \sqrt{\frac{3PV}{nmN_A}}$ 이므로 A와 B에서 P 와 V 가 동일하므로 분모 nmN_A 에 의해서 값이 결정된다. m 이상기체 한 개의 질량이므로 $n_A m_A N_A = 2m N_A$, $n_B m_B N_A = 2m N_A$ 이므로 동일하다. 따라서 제곱평균제곱근 속력은 같다. (참)

16) [정답] ③

[해설]

순환과정에서 기체가 외부에 한 총 일 W 는 삼각형의 넓이이므로

$$W = \frac{2P_0 - P_0}{2} \times (2V_0 - V_0) = \frac{1}{2} P_0 V_0 \text{이다.}$$

$$A \rightarrow B \text{ 과정에서 } W_{AB} = \frac{2P_0 + P_0}{2} \times (2V_0 - V_0) = \frac{3}{2} P_0 V_0 \text{ 이고}$$

$$\text{내부에너지 변화량은 } \Delta U = \frac{3}{2} \Delta(PV) = \frac{3}{2} (P_B V_B - P_A V_A) = \frac{3}{2} (4P_0 V_0 - P_0 V_0) = \frac{9}{2} P_0 V_0 \text{이다.}$$

따라서 이 기체가 흡수한 열량은 열역학 제1법칙에 따라 둘을 더하면 $Q_{AB} = 6P_0 V_0$ 이다.

$$\text{결국 } \left| \frac{W}{Q_{AB}} \right| = \left| \frac{\frac{1}{2} P_0 V_0}{6P_0 V_0} \right| = \frac{1}{12} \text{이다.}$$

17) [정답] ⑤

[해설]

이 시스템은 두 피스톤이 막대로 연결되어 있어 한 쪽이 한 일은 다른 쪽이 받은 일과 같다.

기체 A에서 $Q_{in} = \Delta U_A + W$ 이고, 기체 B에서 $-Q_{out} = -W$ 이므로 $Q_{out} = 1W$ 이다. 따라서

$$(Q_{in} - Q_{out}) = \Delta U_A = \frac{3}{2} nR \Delta T = \frac{3}{2} nR(4T - T) = \frac{9}{2} nRT = \frac{9}{2} PV \text{이다.}$$

18) [정답] ⑤

[해설]

$$\text{등압팽창이므로 } Q = nC_p \Delta T = 1 \cdot \left(\frac{5}{2} R \right) \cdot T_0 = \frac{5}{2} RT_0 \text{ 이다.}$$

19) [정답] ②

[해설]

$$\text{열기관 1의 열효율 } e_1 = \frac{W_1}{|Q_h|} = 0.4 \text{에서 } W_1 = 0.4 |Q_h| \text{이고 } |Q_m| = 0.6 |Q_h| \text{이다.}$$

$$\text{열기관 2의 열효율 } e_2 = \frac{W_2}{|Q_m|} = 0.3 \text{에서 } W_2 = 0.3 |Q_m| = 0.18 |Q_h| \text{이다.}$$

$$\text{따라서 전체 열효율 } (W_1 + W_2) / |Q_h| = \frac{0.4 |Q_h| + 0.18 |Q_h|}{|Q_h|} = 0.58 \text{이다.}$$

20) [정답] ①

[해설]

$A \rightarrow B$ 에서 등압팽창이므로 $W_{AB} = P \Delta V = 3P_0 (3V_0 - V_0) = 6P_0 V_0$ 이고

$B \rightarrow C$ 에서 등적감압이므로 $W_{BC} = 0$ 이며

개념 POINT

$C \rightarrow A$ 에서 등온압축이므로 $W_{CA} = nRT_A \ln\left(\frac{V_A}{V_C}\right) = 3P_0 V_0 \cdot \ln\left(\frac{V_0}{3V_0}\right) = -3P_0 V_0 \ln 3$ 이다.

따라서 모두 더하면 $W = (6 - 3\ln 3)P_0 V_0$ 이다.

21) [정답] ④

[해설]

ㄱ. P - V 도표에서 밑면적은 기체가 한 일이므로 (가)의 경로가 (나)의 경로보다 밑면적이 크다. 따라서 (가)의 물리량이 (나)의 물리량보다 크다. (참)

ㄴ. (가), (나) 모두 내부에너지가 동일하나 $W_{(가)} > W_{(나)}$ 이므로 열역학 제1법칙에 따라 $Q_A > Q_B$ 이다. (참)

ㄷ. (가), (나) 모두 처음상태와 나중상태가 동일하므로 온도차이가 없다. 따라서 내부에너지 변화량은 둘다 0이므로 같다. (거짓)

22) [정답] ⑤

[해설]

$e_{\text{카르노}} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{500} = 1 - \frac{3}{5} = \frac{2}{5}$, $e_B = \frac{W}{|Q_H|} = \frac{1500}{4000} = \frac{15}{40}$ 이므로 $\frac{e_B}{e_{\text{카르노}}} = \frac{15}{40} \times \frac{5}{2} = \frac{15}{16}$ 이다.

23) [정답] ④ 1.5%

[해설]

부피는 $1 + 3\alpha \Delta T$ 배가 된다.

$$3\alpha \Delta T = 3(5 \times 10^{-5} / \text{K})(100 \text{ K}) = 1.5 \times 10^{-3}$$

24) [정답] (1) $\frac{k_1 l_2 T_H + k_2 l_1 T_C}{k_1 l_2 + k_2 l_1}$ (2) $\frac{T_H - T_C}{(l_1/k_1) + (l_2/k_2)}$

[해설] (1) 접촉면의 온도를 T_x 라 하면 A와 B를 통해서 전달되는 열량이 같아야 하므로

$$k_1 A \frac{(T_H - T_x)}{l_1} t = k_2 A \frac{(T_x - T_C)}{l_2} t \dots \dots \textcircled{1}$$

$$\therefore T_x = \frac{k_1 l_2 T_H + k_2 l_1 T_C}{k_1 l_2 + k_2 l_1}$$

(2) T_x 값을 ①식에 대입하면 단위 시간 동안에 단위 면적당 전달되는 열은 $H = \frac{T_H - T_C}{\frac{l_1}{k_1} + \frac{l_2}{k_2}}$

25) [정답] ④ ㄱ, ㄷ

[해설]

ㄱ. $N = \frac{PV}{kT}$ 에서 부피와 온도가 같으므로 $\frac{N_B}{N_A} = \frac{P_B}{P_A} = 2$ 가 되어서 $N_B > N_A$ 이다. (O)

ㄴ. 단위자 이상기체의 분자 1개의 평균운동에너지는 $\frac{1}{2} m v_{rms}^2 = \frac{3}{2} kT$ 이며, 두 기체는 온도가 같으므로 평균운동에너지는 같다. (X)

ㄷ. 단위자 이상기체의 내부 에너지는 $U = \frac{3}{2} nRT = \frac{3}{2} PV$ 이다. 부피가 같고 B의 압력이 A의 2배이므로 B의 내부에너지가 A의 내부에너지의 2배이다. (O)

개념 POINT

26) [정답] ② $0.75 \text{ J/g}^\circ\text{C}$

[해설]

$$30 = \frac{(100c_1)(100) + (250c_2)(25)}{100c_1 + 250c_2}$$

정리하면

$$c_1 = \frac{5}{28} \times (4.2 \text{ J/g}^\circ\text{C}) = 0.75 \text{ J/g}^\circ\text{C}$$

27) [정답] (1) $\frac{Q_2}{Q_1} = 1$ (2) $T_1 = 54^\circ\text{C}$, $T_2 = 36^\circ\text{C}$

[해설]

(1) (2)

$$Q_1 = \frac{A(60^\circ\text{C} - T_1)}{\frac{L}{2k}} = \frac{A(T_1 - 30^\circ\text{C})}{\frac{2L}{k}} = \frac{A(60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})}{\frac{L}{2k} + \frac{2L}{k}} = \frac{2}{5} \frac{kA}{L} (30^\circ\text{C})$$

이며 $60^\circ\text{C} - T_1 : T_1 - 30^\circ\text{C} = 1 : 4$ 이므로 $T_1 = 54^\circ\text{C}$ 이다.

$$Q_2 = \frac{A(60^\circ\text{C} - T_2)}{\frac{2L}{k}} = \frac{A(T_2 - 30^\circ\text{C})}{\frac{L}{2k}} = \frac{A(60^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C})}{\frac{2L}{k} + \frac{L}{2k}} = \frac{2}{5} \frac{kA}{L} (30^\circ\text{C})$$

$60^\circ\text{C} - T_2 : T_2 - 30^\circ\text{C} = 4 : 1$ 이므로 $T_2 = 36^\circ\text{C}$

28) [정답] ⑤

[해설]

기체의 온도가 T 로 유지되므로 최종 압력을 p 라고 하자. 용기의 전체 부피가 변하지 않으므로

$$V_1' + V_2' = V_1 + V_2$$

이며, 여기에 보일 샤를의 법칙을 이용해보자.

$$\frac{p_1 V_1}{p} + \frac{p_2 V_2}{p} = V_1 + V_2$$

따라서 $p = \frac{p_1 V_1 + p_2 V_2}{V_1 + V_2}$ 가 된다.

29) [정답] (1) $4P_i V_i$ (2) $\frac{P_i}{RV_i} V^2$

[해설] (1) 압력과 부피 사이의 관계는 $p = \frac{P_i}{V_i} V$ 이다.

$$W = \int_{V_i}^{V_f} p dV = \int_{V_i}^{V_f} \frac{P_i}{V_i} V dV = \frac{P_i}{V_i} \times \frac{1}{2} (V_f^2 - V_i^2) = 4P_i V_i$$

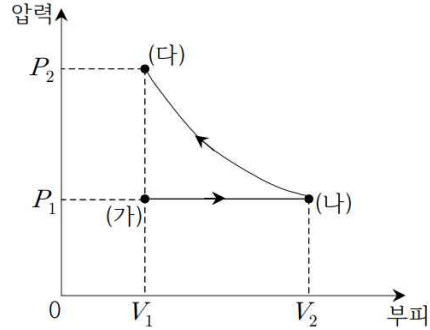
$$(2) T = \frac{pV}{R} = \frac{P_i}{RV_i} V^2$$

30) [정답] ① \neg

[해설]

\neg . A 는 (가) \rightarrow (나)의 등압 팽창 과정에서 열량 Q 를 받아 외부에 W 의 일을 하고 내부 에너지가 증가하여 온도가 높아졌다. 다시 (나) \rightarrow (다)에서 W 의 일을 받았으므로 A 의 온도는

(다)에서가 (나)에서보다 높다. 따라서 A의 온도는 (가)에서가 (다)에서보다 낮다. (O)



- ㄴ. (나) → (다) 과정에서 A는 단열 과정이고 부피가 감소하므로 A의 압력은 증가한다. (X)
 ㄷ. (다)의 온도는 (가)의 온도보다 높으므로 (다) → (나)의 과정에서 A의 내부 에너지 변화량은 (가) → (나) 과정에서 A가 한 일과 같지 않다. (X)

31) [정답] (1) $1.47 \times 10^3 \text{J}$ (2) 554J (3) 918J

(4) 62.4%

[해설] (i) $a \rightarrow b$ 과정에서 열을 흡수하고, $b \rightarrow c$ 는 열 출입이 없으며, $c \rightarrow a$ 과정에서 열을 방출한다.

(ii) $b \rightarrow c$ 는 단열 과정이므로 ($\gamma = \frac{5}{3}$)

$$p_b V_b^{5/3} = p_c (8.00 V_b)^{5/3} \Rightarrow p_b = p_c \times 32$$

$$\Rightarrow p_c = p_b \div 32$$

$$= 10.0 \times 1.013 \times 10^5 \text{Pa} \div 32 \approx 3.166 \times 10^4 \text{Pa}$$

(iii) $c \rightarrow a$ 는 등압 과정이므로

$$p_a = p_c = 3.166 \times 10^4 \text{Pa}$$

(1) $a \rightarrow b$ 과정은 등적 과정이므로 흡수한 열은

$$\begin{aligned} Q_{in} &= n c_V \Delta T = \frac{3R}{2} (T_b - T_a) = \frac{3}{2} (p_b V_b - p_a V_a) \\ &= \frac{3}{2} (p_b - p_a) V_b \\ &= \frac{3}{2} \times (1.013 \times 10^6 \text{Pa} - 3.166 \times 10^4 \text{Pa}) \times 1.00 \times 10^{-3} \text{m}^3 \\ &\approx 1.472 \times 10^3 \text{J} \end{aligned}$$

(2) $c \rightarrow a$ 과정은 등압 과정이므로 기체가 방출한 열량은

$$\begin{aligned} Q_{out} &= -n c_p \Delta T = -\frac{5R}{2} (T_a - T_c) \\ &= -\frac{5}{2} (p_a V_a - p_c V_c) = -\frac{5}{2} (V_b - 8.00 V_b) p_a \\ &= -\frac{5}{2} \times (-7) \times 1.00 \times 10^{-3} \text{m}^3 \times 3.166 \times 10^4 \text{Pa} \\ &\approx 554 \text{J} \end{aligned}$$

(3) $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow a$ 의 한 순환과정에서 기체의 내부 에너지 변화는 0이므로, 열역학 제1법칙에 의해 기체가 받은 알짜 열은 기체가 외부에 한 알짜 일과 같아야 한다.

$$W_{\text{알짜}} = Q_{\text{알짜}} = Q_{in} - Q_{out} = 1472 \text{J} - 554 \text{J} = 918 \text{J}$$

$$(4) e = \frac{W_{\text{알짜}}}{Q_{in}} = \frac{918 \text{J}}{1472 \text{J}} \approx 0.624 = 62.4\%$$

32) [정답] ② ㄴ

개념 POINT

[해설] 왼쪽의 $P-V$ 그래프에서 $Q_{AB} > 0$, $Q_{BC} < 0$, $Q_{CA} < 0$ 임을 먼저 확인 할 수 있다.

그 다음 표에서 $Q_{AB} = 5Q_0$, $Q_{CA} = -Q_0$ 가 주어져 있다.

문제에서 $e = 0.2$ 로 주어져 있으므로, 이제 Q_{BC} , Q_H , Q_C , W 모두 계산할 수 있다.

$Q > 0$ 인 구간은 $A \rightarrow B$ 만 있으므로 $Q_H = Q_{AB} = 5Q_0$

열효율이 0.2이므로 $W = e Q_H = (0.2)(5Q_0) = Q_0$

$$|Q_C| = Q_H - W = 5Q_0 - Q_0 = 4Q_0$$

ㄱ. $|Q_C| = |Q_{BC}| + |Q_{CD}|$ 이다.

위에서 $|Q_C| = 4Q_0$ 를 구했고, 표에서 $|Q_{CA}| = Q_0$ 로 주어져 있으므로

$$|Q_{BC}| = |Q_C| - |Q_{CD}| = 4Q_0 - Q_0 = 3Q_0 \quad (X)$$

ㄴ. $B \rightarrow C$ 과정은 등적과정이므로 열량을 방출한 만큼 내부에너지가 감소한다. $Q_{BC} = -3Q_0$ 이므로 기체의 내부에너지 감소량은 $3Q_0$ 이다. (O)

ㄷ. 이제 모든 과정에서 한 일을 구해보자.

$C \rightarrow A$ 과정이 등온과정이므로 내부에너지 변화량이 0이다.

$$W_{CA} = Q_{CA} - \Delta U_{CA} = -Q_0 - 0 = -Q_0$$

$B \rightarrow C$ 과정은 등적과정이므로 $W_{BC} = 0$

전체 순환과정에서의 일은

$$W = e Q_H = (0.2)(5Q_0) = Q_0$$

따라서 $W = W_{AB} + W_{BC} + W_{CA}$ 를 계산하면

$$Q_0 = W_{AB} + 0 + (-Q_0)$$

따라서 $W_{AB} = 2Q_0$ 이다.

$W_{AB} = 2Q_0$, $W_{BC} = 0$, $W_{CA} = -Q_0$ 이므로, $A \rightarrow B$ 과정에서 기체가 한 일은 $C \rightarrow A$ 과정에서 기체가 받은 일의 2배이다. (X)

33) [정답] ③ $8RT$

[해설]

한 순환과정동안 기체가 받은 전체 열량은 열역학 제1법칙에 의해 기체가 한 일과 같다.

기체가 한 일은 삼각형 ABC 의 넓이가 되며

$$W = \frac{1}{2}(P_B - P_A)(V_C - V_B)$$

이다.

B 의 압력이 A 의 압력의 3배이며, C 의 부피는 B 의 부피의 5배이고 $V_B = V_A$ 이므로

$$W = \frac{1}{2}(3P_A - P_A)(5V_A - V_A) = 4P_A V_A = 4nRT$$

여기서 $n = 2\text{mol}$ 이므로 $W = 8RT$ 이다.

$$Q_{\text{cycle}} = W_{\text{cycle}} = 8RT$$

34) [정답] ③ $\frac{3\ln 3 - 2}{3\ln 3 + 3}$

[해설]

등적과정에서는 온도가 $\frac{T_0}{3}$ 에서 T_0 가 된다.

$$Q_{\text{등적}} = \frac{3}{2}nR\left(T_0 - \frac{T_0}{3}\right) = nRT_0$$

등압과정에서는 온도 T_0 로 부피가 3배가 된다.

$$Q_{\text{등압}} = nRT_0 \ln 3$$

등압과정에서는 온도 T_0 에서 $\frac{T_0}{3}$ 가 된다.

$$Q_{\text{등압}} = \frac{5}{2}nR\left(\frac{T_0}{3} - T_0\right) = -\frac{5}{3}nRT_0$$

이다.

1순환 과정동안 받은 열량은

등적과정과 등온과정에서 받은 열의 합이다.

$$Q_H = nRT_0(1 + \ln 3)$$

1순환 과정동안 기관이 한 일은, 1순환과정동안 받은 열의 합이다.

$$W = \sum Q = \left(1 + \ln 3 - \frac{5}{3}\right)nRT_0 = \left(\ln 3 - \frac{2}{3}\right)nRT_0$$

이다.

열효율은

$$e = \frac{W}{Q_H} = \frac{\ln 3 - \frac{2}{3}}{1 + \ln 3} = \frac{3\ln 3 - 2}{3\ln 3 + 3}$$

35) [정답] 풀이참조

[해설]

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2$$

$$= cm \ln \frac{T_f}{T_1} + cm \ln \frac{T_f}{T_2} = cm \ln \frac{T_f^2}{T_1 T_2}$$

$$= cm \ln \frac{\left(\frac{T_{iL} + T_{iR}}{2}\right)^2}{T_{iL} T_{iR}} = cm \ln \frac{(T_{iL} + T_{iR})^2}{4 T_{iL} T_{iR}}$$

36) [정답] ③ ㄱ, ㄴ

[해설] ㄱ. A과정에서는 등온팽창으로 부피가 2배가 되었으므로

$$\Delta S_A = nR \ln 2 \text{이다.}$$

B과정은 자유팽창이므로

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + nC_v \ln \frac{T_f}{T_i} \text{가 되어서}$$

$$\Delta S_B = nR \ln 2$$

이다. 사실 처음상태와 나중상태가 같으므로 엔트로피변화량이 같다. (O)

ㄴ. 기체가 받은 열만큼 열원은 열을 잃었고 열원과 기체의 온도가 같으므로 맞는 진술이다. (O)

ㄷ. 기체의 엔트로피 변화량이 $\Delta S_B = nR \ln 2$ 이다. (X)

37) [정답] ②, ⑤

$$[\text{해설}] \textcircled{1} \Delta s = -\frac{10}{600} + \frac{4}{300} = -\frac{10}{600} + \frac{8}{300} < 0 \text{ 불가능}$$

$$\textcircled{2} \Delta s = +\frac{10}{600} - \frac{4}{300} = \frac{2}{600} > 0 \text{ 가능}$$

$$\textcircled{3} \Delta s = -\frac{6}{600} - \frac{4}{300} < 0 \text{ 불가능}$$

$$\textcircled{4} \Delta s = -\frac{4}{300} + \frac{4}{600} < 0 \text{ 불가능}$$

$$\textcircled{5} \Delta s = +\frac{4}{600} > 0 \text{ 가능}$$

개념 POINT

38) [정답] ② 6000 J/K

[해설] 먼저 고체상태의 물질이 -73°C 에서 27°C 가 되는데 엔트로피 변화량은

$$\Delta S_1 = \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_1 m dT}{T} = c_1 m \ln \frac{T_2}{T_1}$$

$$= (2000 \text{ J/kg K}) (2 \text{ kg}) \ln \frac{300 \text{ K}}{200 \text{ K}}$$

$$= 4000 \ln \frac{3}{2} \text{ J/K}$$

$$\simeq (4000)(1.1 - 0.7) \text{ J/K} = 1600 \text{ J/K}$$

27°C 고체상태의 물질이 녹아 27°C 액체상태가 되는데 엔트로피 변화량은

$$\Delta S_2 = \frac{Lm}{T_2} = \frac{(3 \times 10^5 \text{ J/kg}) (2 \text{ kg})}{300 \text{ K}} = 2000 \text{ J/K}$$

27°C 인 액체가 127°C 가 되는데 엔트로피 변화량은

$$\Delta S_3 = \int_{T_2}^{T_3} \frac{c_2 m dT}{T} = c_2 m \ln \frac{T_3}{T_2}$$

$$= (4000 \text{ J/kg K}) (2 \text{ kg}) \ln \frac{400 \text{ K}}{300 \text{ K}}$$

$$= 8000 \ln \frac{4}{3} \text{ J/K}$$

$$\simeq (8000)(1.4 - 1.1) \text{ J/K} = 2400 \text{ J/K}$$

전체 엔트로피 변화량은

$$\Delta S = \Delta S_1 + \Delta S_2 + \Delta S_3$$

$$= (1600 + 2000 + 2400) \text{ J/K}$$

$$= 6000 \text{ J/K}$$

39)

[정답] ① $\left(3\ln 2 - \frac{15}{2}\ln 3\right)kN$

[해설]

이상기체의 엔트로피 변화량은

$$\Delta S = nR \ln \frac{V_f}{V_i} + nC_V \ln \frac{T_f}{T_i}$$

임을 사용하자.

여기서 단원자 이상기체가 N 개가 있으므로 $nR = Nk$, $nC_V = \frac{3}{2}Nk$ 이다.

부피가 $\frac{1}{3^3}$ 배가 되며 압력은 4배가 되었으므로

$$\Delta S = Nk \ln \frac{1}{3^3} + \frac{3}{2} Nk \ln \frac{4}{3^3}$$

$$= Nk \left\{ -3\ln 3 + \frac{3}{2}(2\ln 2 - 3\ln 3) \right\}$$

$$= \left(3\ln 2 - \frac{15}{2}\ln 3 \right) Nk$$

이다.

40)

[정답] ② ㄴ

[해설]

ㄱ. 열이 순수하게 일로 바뀐것이므로 열역학 제2법칙에 위반된다. (X)

ㄴ. 맞는 진술이다. (O)

ㄷ. 고립된 계의 경우만 엔트로피가 감소하지 않는다.

고온에서 저온으로 열이 이동하면 고온인 부분의 엔트로피는 감소한다. (X)

개념 POINT

41) [정답] $\frac{1 - T_2/T_1}{1 - T_4/T_3}$

[해설] 카르노 순환 과정에서는 열량비가 온도비와 같다.

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{T_1}{T_2} \quad \frac{Q_3}{Q_4} = \frac{T_3}{T_4}$$

카르노 기관이 하는 일은

$$W = Q_1 - Q_2 = Q_1 \left(1 - \frac{Q_2}{Q_1} \right) = Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right) \dots\dots ①$$

카르노 냉동기관이 받는 일은

$$W = Q_3 - Q_4 = Q_3 \left(1 - \frac{Q_4}{Q_3} \right) = Q_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right) \dots\dots ②$$

①을 ②로 나누면

$$1 = \frac{Q_1 \left(1 - \frac{T_2}{T_1} \right)}{Q_3 \left(1 - \frac{T_4}{T_3} \right)} \quad \therefore \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{1 - \frac{T_2}{T_1}}{1 - \frac{T_4}{T_3}}$$

42)

[답] ⑤

[풀이] ㉠. $e = \frac{100J}{500J} = 0.2$

㉡. $\Delta S = \frac{-500J}{600K} + \frac{+400J}{300K} = 0.5J/K$

㉢. $e_{car} = 1 - \frac{T_c}{T_h} = 0.5$