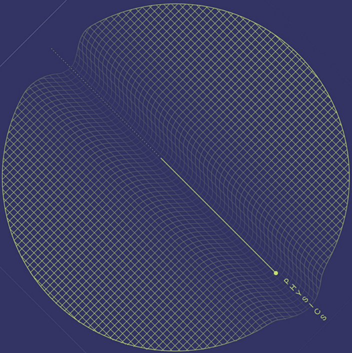
박문각 임용 동영상강의 www.pmg.co.kr

2025
임용 전공물리
Master Key 시리즈



정승현
열 및 통계물리학 양자역학

정승현 편저

박문각

PREFACE

머리말

열역학은 물질의 열적 특성을 이해하고 설명하는 학문으로, 물질의 열에 의한 운동을 분석하는 데 초점을 둡니다. 또한 우리 주변에서 일어나는 현상들을 설명하고 예측하는 데 중요한 역할을 합니다. 예를 들어, 자동차의 엔진, 냉장고, 에어컨, 난방 시스템 등의 열적인 기기를 설계되며, 대기 및 해양 열전달과 같은 현상을 이해하는 데 활용되고 있습니다.
통계역학은 열역학에서 발전한 학문으로, 분자운동론을 기반으로 하여 열에 의한 에너지의 전달 및 변환에 관해 연구합니다. 자연 상태에서 우리는 열이 고온에서 저온으로, 연기가 주변으로 자연스럽게 퍼지는지에 대해 경험적 이해로 그친 상태에서 이유를 알지 못했습니다. 볼츠만은 이를 통계적 확률로 설명하고 엔트로피라는 개념을 도입하였는데, 통계의 핵심은 단순합니다. 우리가 정의 가능하고, 측정 가능한 물리적 개념으로부터 시간이 지날 때 시스템의 변화를 이해하는 데 있습니다. 그리고 이 시간의 흐름을 엔트로피가 대체합니다. 그래서 물리 학문 중 거의 유일하게 통계역학에서 시간이라는 변수가 등장하지 않는 것입니다.

20세기 발견된 학문 중 가장 영향력이 강력한 분야는 양자역학이라고 해도 무방합니다. 그만큼 최첨단 시대에 모든 전자기기는 이 양자역학을 기반으로 만들어졌습니다. 양자역학은 결정론적 세계관의 붕괴를 일으켰습니다. 그리고 우리의 일반적인 상식과 인식에 반하는 현상을 보여 이해하는 데 어려움이 큰 학문입니다. 동전을 던져 바닥에 떨어뜨리면 앞면과 뒷면이 결정이 납니다. 땅에 떨어지기 전에는 앞면과 뒷면이 공존상태인데 이것이 양자역학에서 말하는 관측 전 상태입니다. 측정 전에는 물질의 상태가 정해지지 않고, 중첩된 상태라는 게 양자역학에서 말하는 핵심입니다. 양자역학에서 양자란 측정 가능한 불연속이라는 말입니다. 양자 세계에서는 모든 것이 불연속입니다. 위치, 운동량, 에너지 등등 우리가 측정하려고 하는 모든 것이 양자 세계에서는 불연속으로 이루어져 있습니다. 우리가 모니터나 TV로 영상을 관측할 때, 연속적 움직임을 보이지만 사실 아주 작은 불연속적인 픽셀들이 불연속적인 빛의 밝기의 조합으로 구성되는 것을 관측할 뿐입니다. 양자역학은 관측 전에는 모든 것이 중첩된 상태이고, 관측되면 불연속적인 것들 중 하나의 값을 얻을 수 있습니다. 그래서 양자역학을 한 줄로 정의한다면 '중첩된 세계의 관측적 디지털화'라고 할 수 있습니다.

이 책은 수학적으로 엄밀함을 추구하기보다는 물리적 이해를 돕기 위함에 초점을 맞춰 기술하였습니다. 제가 이해하는 열 및 통계역학과 양자역학이 임용을 공부하는 여러분에게 셰르파 역할을 하길 바랍니다.

저자 정승현

물리에 필요한 수학

1. 벡터 및 좌표계

(1) 두 벡터의 내적(Inner product, scalar product, dot product)

두 벡터 $\vec{a}$, $\vec{b}$의 내적은 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{a} = (a_1,\ a_2),\ \vec{b} = (b_1,\ b_2)$$

$$\vec{a} \cdot \vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}|cos(\theta) = a_1b_1 + a_2b_2$$

벡터의 내적은 상대벡터로 연직선을 그렸을 때 두 벡터의 수평성분의 곱이다.

(2) 두 벡터의 외적(vector product, cross product)

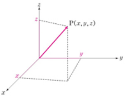
두 벡터 $\vec{a}$, $\vec{b}$의 외적은 다음과 같이 정의된다.

$$\vec{a} \times \vec{b} = |\vec{a}||\vec{b}|sin(\theta)\vec{n}$$

$$\vec{a} \times \vec{b} = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ a_x & a_y & a_z \\ b_x & b_y & b_z \end{vmatrix} = (a_yb_z - a_zb_y)\hat{x} + (a_zb_x - a_xb_z)\hat{y} + (a_xb_y - a_yb_x)\hat{z}$$

벡터의 외적은 두 벡터가 이루는 평행사변형의 넓이와 방향은 평행사변형과 수직한 방향이다. 회전 파트에서 주로 사용된다.

(3) 좌표계



① 직교 좌표계: x, y, z축 각 수직을 이루는 3차원 일반적인 좌표계이다. 평행이동 대칭성이 있어서 일반적인 병진운동에서 많이 활용된다.

직교 좌표계는 회전 대칭성과는 별개로 평행이동 대칭성을 관계에 있으므로 단위벡터를 시간에 대해 미분한 값 즉, $\frac{d\hat{x}}{dt} = \frac{d\hat{y}}{dt} = \frac{d\hat{z}}{dt} = 0$

- 단위벡터: $\hat{x}$, $\hat{y}$, $\hat{z}$
- 위치, 속도, 가속도

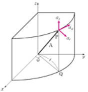
$$\vec{s} = \overrightarrow{OP} = (x,\ y,\ z) = x\hat{x} + y\hat{y} + z\hat{z}$$

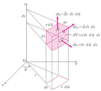
$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} = (v_x,\ v_y,\ v_z) = \dot{x}\hat{x} + \dot{y}\hat{y} + \dot{z}\hat{z}$$

$$\vec{a} = \frac{d^2\vec{s}}{dt^2} = (a_x,\ a_y,\ a_z) = \ddot{x}\hat{x} + \ddot{y}\hat{y} + \ddot{z}\hat{z}$$

- 미소 부피: $dV = dxdydz$

② 원통형 좌표계: ρ, ϕ, z축 각 수직을 이루는 3차원 좌표계이다. x, y평면 회전 대칭성 및 z축 평행이동 대칭성이 있다.





- 단위벡터 $\hat{\rho}$, $\hat{\phi}$, $\hat{z}$: 원통형 좌표계에서 단위벡터 $\hat{\rho}$, $\hat{\phi}$는 회전 대칭성을 가지므로 회전하게 되면 시간에 따라 단위벡터의 방향이 바뀌게 된다. 즉, 시간에 대한 상수가 아니다.

- 위치, 속도, 가속도

$$\vec{s} = \overrightarrow{OP} = (x,\ y,\ z) = (\rho\cos\phi,\ \rho\sin\phi,\ z) = \vec{\rho} + \vec{z} = \rho\hat{\rho} + z\hat{z}$$

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = (\dot{\rho}\cos\phi - \rho\dot{\phi}\sin\phi,\ \dot{\rho}\sin\phi + \rho\dot{\phi}\cos\phi,\ \dot{z}) = \dot{\rho}\hat{\rho} + \rho\dot{\phi}(-\sin\phi, \cos\phi) + \dot{z}\hat{z}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} = \frac{d}{dt}(\vec{\rho} + \vec{z}) = \frac{d}{dt}(\rho\hat{\rho} + z\hat{z}) = \dot{\rho}\hat{\rho} + \rho\dot{\hat{\rho}} + \dot{z}\hat{z}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} = (v_\rho, v_\phi, v_z) = \dot{\rho}\hat{\rho} + \rho\dot{\phi}\hat{\phi} + \dot{z}\hat{z}$$

$$\therefore \dot{\hat{\rho}} = \dot{\phi}\hat{\phi}$$

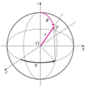
$$\hat{\phi} = (-\sin\phi,\ \cos\phi)$$

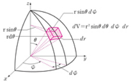
$$\dot{\hat{\phi}} = \dot{\phi}(-\cos\phi,\ -\sin\phi) = -\dot{\phi}\hat{\rho}$$

$$\begin{aligned}\vec{a} &= (a_\rho,\ a_\phi,\ a_z) = \frac{d}{dt}(\dot{\rho}\hat{\rho} + \rho\dot{\phi}\hat{\phi} + \dot{z}\hat{z}) \\ &= \ddot{\rho}\hat{\rho} + \dot{\rho}\dot{\hat{\rho}} + \dot{\rho}\dot{\phi}\hat{\phi} + \rho\ddot{\phi}\hat{\phi} + \rho\dot{\phi}\dot{\hat{\phi}} + \ddot{z}\hat{z} \\ &= (\ddot{\rho} - \rho\dot{\phi}^2)\hat{\rho} + (\rho\ddot{\phi} + 2\dot{\rho}\dot{\phi})\hat{\phi} + \ddot{z}\hat{z}\end{aligned}$$

- 미소 부피: $dV = d\rho(\rho d\phi)dz = \rho d\rho d\phi dz$

③ 구면 좌표계: r, θ, ϕ축 각 수직을 이루는 3차원 좌표계이다. ϕ, θ회전 대칭성이 있다.





- 단위벡터: r, $\hat{\theta}$, $\hat{\phi}$구면 좌표계에서 $\hat{r}$, $\hat{\theta}$, $\hat{\phi}$는 회전 대칭성을 가지므로 회전하게 되면 시간에 따라 단위벡터의 방향이 바뀌게 된다. 즉, 시간에 대한 상수가 아니다.
- 위치, 속도

$$\vec{s} = \overrightarrow{OP} = (x,\ y,\ z) = (r\sin\theta\cos\phi,\ r\sin\theta\sin\phi,\ r\cos\theta) = r\hat{r}$$

$$\frac{d\vec{s}}{dt} = (\dot{r}\sin\theta\cos\phi + r\dot{\theta}\cos\theta\cos\phi - r\dot{\phi}\sin\theta\sin\phi,\ \dot{r}\sin\theta\sin\phi + r\dot{\theta}\cos\theta\sin\phi + r\dot{\phi}\cos\phi,\ \dot{r}\cos\theta - r\dot{\theta}\sin\theta)$$

$$= \dot{r}\hat{r} + r\sin\theta\,\dot{\phi}(-\sin\phi, \cos\phi, 0) + r\dot{\theta}(\cos\theta\cos\phi, \cos\theta\sin\phi, -\sin\theta)$$

$$\vec{v} = \frac{ds}{dt} = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\hat{r}}$$

$$\vec{v} = \frac{d\vec{s}}{dt} = (v_r,\ v_\theta,\ v_\phi) = \dot{r}\hat{r} + r\dot{\theta}\hat{\theta} + r\sin\theta\dot{\phi}\hat{\phi}$$

$$\therefore \dot{\hat{r}} = \dot{\theta}\hat{\theta} + \sin\theta\dot{\phi}\hat{\phi}$$

- 미소 부피: $dV = dr(r\sin\theta d\phi)rd\theta = r^2\sin\theta\, drd\theta d\phi$

2. 미적분 공식

(1) 3차원 미분 연산자 ▽

① $gradient\ \vec{\nabla} f$: 기하적 의미는 특정 좌표에서 기울기를 의미한다.

- 직교좌표계(x, y, z): $\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial x}, \frac{\partial f}{\partial y}, \frac{\partial f}{\partial z}\right)$
- 원통좌표계(ρ, ϕ, z): $\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial \rho}, \frac{1}{\rho}\frac{\partial f}{\partial \phi}, \frac{\partial f}{\partial z}\right)$
- 구면좌표계(r, θ, ϕ): $\nabla f = \left(\frac{\partial f}{\partial r}, \frac{1}{r}\frac{\partial f}{\partial \theta}, \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial f}{\partial \phi}\right)$

② Divergence $\vec{\nabla}\cdot\vec{F}$: 기하학적 의미는 특정 좌표계에서 각 좌표축 방향으로 이동 성분을 의미한다. 즉, 중심에 대해 퍼져나가는 성분을 말한다.

- 직교좌표계($x,\ y,\ z$): $\nabla\cdot F = \frac{\partial F_x}{\partial x} + \frac{\partial F_y}{\partial y} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$
- 원통좌표계($\rho,\ \phi,\ z$): $\nabla\cdot F = \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}(\rho F_\rho) + \frac{1}{\rho}\frac{\partial F_\phi}{\partial\phi} + \frac{\partial F_z}{\partial z}$
- 구면좌표계($r,\ \theta,\ \phi$): $\nabla\cdot F = \frac{1}{r^2}\frac{\partial}{\partial r}(r^2 F_r) + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta F_\theta) + \frac{1}{r\sin\theta}\frac{\partial F_\phi}{\partial\phi}$

③ Curl $\vec{\nabla}\times\vec{F}$: 기하적 의미는 특정 좌표계에서 각 좌표축을 회전축으로 회전 성분을 의미한다. 즉, 중심에 대해 회전 성분을 말한다.

- 직교좌표계($x,\ y,\ z$)

$$\nabla\times F = \begin{vmatrix} \hat{x} & \hat{y} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial x} & \frac{\partial}{\partial y} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_x & F_y & F_z \end{vmatrix} = \left(\frac{\partial F_z}{\partial y} - \frac{\partial F_y}{\partial z},\ \frac{\partial F_x}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial x},\ \frac{\partial F_y}{\partial x} - \frac{\partial F_x}{\partial y}\right)$$

- 원통좌표계($\rho,\ \phi,\ z$)

$$\nabla\times F = \frac{1}{\rho}\begin{vmatrix} \hat{\rho} & \rho\hat{\phi} & \hat{z} \\ \frac{\partial}{\partial\rho} & \frac{\partial}{\partial\phi} & \frac{\partial}{\partial z} \\ F_\rho & \rho F_\phi & F_z \end{vmatrix} = \left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial F_z}{\partial\phi} - \frac{\partial F_\phi}{\partial z}\right)\hat{\rho} + \left(\frac{\partial F_\rho}{\partial z} - \frac{\partial F_z}{\partial\rho}\right)\hat{\phi} + \left(\frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial\rho}(\rho F_\phi) - \frac{1}{\rho}\frac{\partial F_\rho}{\partial\phi}\right)\hat{z}$$

- 구면좌표계($r,\ \theta,\ \phi$)

$$\nabla\times F = \frac{1}{r^2\sin\theta}\begin{vmatrix} \hat{r} & r\hat{\theta} & r\sin\theta\hat{\phi} \\ \frac{\partial}{\partial r} & \frac{\partial}{\partial\theta} & \frac{\partial}{\partial\phi} \\ F_r & rF_\theta & (r\sin\theta)F_\phi \end{vmatrix}$$

$$= \frac{1}{r\sin\theta}\left[\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta F_\phi) - \frac{\partial F_\theta}{\partial\phi}\right]\hat{r} + \frac{1}{r}\left[\frac{1}{\sin\theta}\frac{\partial F_r}{\partial\phi} - \frac{\partial}{\partial r}(rF_\phi)\right]\hat{\theta} + \frac{1}{r}\left[\frac{\partial}{\partial r}(rF_\theta) - \frac{\partial F_r}{\partial\theta}\right]\hat{\phi}$$

(2) 가우스 발산 법칙

$$\int\vec{\nabla}\cdot\vec{F}dV = \int\vec{F}\cdot d\vec{S}$$

가우스 발산 법칙은 벡터장 $\vec{F}$의 발산, 즉 뻗어나가는 성분을 알아내는데 사용된다.

(3) 스토크스 법칙

$$\int(\vec{\nabla}\times\vec{F})\cdot\, d\vec{S} = \int\vec{F}\cdot d\vec{l}$$

스토크스 법칙은 벡터장 $\vec{F}$의 회전 성분을 알아내는데 사용된다.

3. 행렬

1차식 $x+by=m$, $cx+dy=n$일 때 행렬로 표현하면

$$\begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix} \rightarrow \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a & b \\ c & d \end{pmatrix}^{-1}\begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = \frac{1}{ad-bc}\begin{pmatrix} d & -b \\ -c & a \end{pmatrix}\begin{pmatrix} m \\ n \end{pmatrix}$$

복잡한 1차 방정식의 해를 동시에 구하거나 해의 존재성을 판명할 때 사용된다.

※ 회전 변환

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

▲ 점의 회전 변환

$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix}\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$$

▲ 좌표축의 회전 변환

4. 삼각함수 공식

(1) 피타고라스 정리

- $\cos^2\theta + \sin^2\theta = 1$
- $1+\tan^2\theta = \sec^2\theta$
- $1+\cot^2\theta = \mathrm{cosec}^2\theta$

(2) 삼각함수 합차 공식

- $\sin(\alpha+\beta) = \sin\alpha\cos\beta + \cos\alpha\sin\beta$
- $\sin(\alpha-\beta) = \sin\alpha\cos\beta - \cos\alpha\sin\beta$
- $\cos(\alpha+\beta) = \cos\alpha\cos\beta - \sin\alpha\sin\beta$
- $\cos(\alpha-\beta) = \cos\alpha\cos\beta + \sin\alpha\sin\beta$
- $\tan(\alpha+\beta) = \dfrac{\tan\alpha + \tan\beta}{1-\tan\alpha\tan\beta}$
- $\tan(\alpha-\beta) = \dfrac{\tan\alpha - \tan\beta}{1+\tan\alpha\tan\beta}$

(3) 삼각함수 두배각 공식

- $\sin 2\theta = 2\sin\theta\cos\theta$
- $\cos 2\theta = \cos^2\theta - \sin^2\theta$
  $= 2\cos^2\theta - 1$
  $= 1 - 2\sin^2\theta$
- $\tan 2\theta = \dfrac{2\tan\theta}{1-\tan^2\theta}$

(4) 삼각함수 반각 공식

- $\cos^2\theta = \dfrac{1+\cos 2\theta}{2}$
- $\sin^2\theta = \dfrac{1-\cos 2\theta}{2}$

(5) 삼각함수 합성 공식

- $\sin A + \sin B = 2\sin\left(\dfrac{A+B}{2}\right)\cos\left(\dfrac{A-B}{2}\right)$
- $\sin A - \sin B = 2\cos\left(\dfrac{A+B}{2}\right)\sin\left(\dfrac{A-B}{2}\right)$
- $\cos A + \cos B = 2\cos\left(\dfrac{A+B}{2}\right)\cos\left(\dfrac{A-B}{2}\right)$
- $\cos A - \cos B = -2\sin\left(\dfrac{A+B}{2}\right)\sin\left(\dfrac{A-B}{2}\right)$

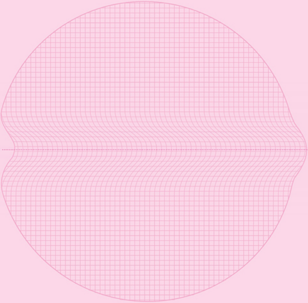
CONTENTS

차례

Part 02 양자역학

정승현
열 및 통계물리학
양자역학

PHYSICS



Part

01

열 및 통계물리학

Chapter

01 열역학

01 열(heat)

뜨겁다 또는 차갑다고 하는 표현은 일상적으로 많이 사용되는 표현으로 열과 온도가 관련되어 있다. 그러나 이러한 표현들은 감각에 의존하는 것으로써 동일한 상황에서 서로 다르게 느껴질 수 있다. 예를 들어, 한 손을 뜨거운 물에 담그고 다른 한 손을 차가운 물에 담갔다가 두 손을 동시에 미지근한 물에 담근다면 뜨거운 물에 담갔던 손은 차갑게 느껴질 것이고 차가운 물에 담갔던 손은 뜨겁게 느껴질 것이다.

이와 같이 주관적인 감각은 물체의 열적 성질(thermal properties)을 정확하게 나타낼 수 없다. 뜨겁거나 차갑게 느끼는 것은 단지 열의 이동에 의한 것일 뿐이다. 어떤 물체를 손으로 잡았을 때 차갑게도 뜨겁게도 느껴지지 않는다면 그 물체와 손 사이에 열의 이동이 없는 것을 의미하고 이러한 경우 두 물체 사이에 열평형(thermal equilibrium)이 이루어졌다고 한다. 열평형을 이룬 두 물체는 열적으로 서로 동등한 상태에 있으며 이러한 시스템의 열적 성질을 나타내는 물리량이 온도이다.

1. 온도

⑴ 섭씨온도

일상생활에서 주로 사용하는 온도인 섭씨온도는 스웨덴의 셀시우스(Celsius, A.; 1701~1744)가 제안한 것으로, 1기압에서 물이 어는 온도를 0℃, 물이 끓는 온도를 100℃로 정하고 그사이를 100등분 한 값이다.

⑵ 절대온도

과학에서 주로 사용하는 절대온도는 분자 운동의 정도를 온도로 표시한 것이다. 절대온도에서 가장 낮은 온도는 분자 운동이 거의 멈춘 상태로 0K으로 표시한다.

절대온도(K) = 섭씨온도(℃)+273

(3) 화씨온도

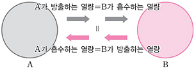
독일의 파렌하이트(Fahrenheit, D. G.; 1686~1736)의 이름을 딴 온도 단위이며, 처음에는 소금물이 어는 온도를 0°F, 사람의 체온을 100°F로 정하였다. 이후 이를 정량적으로 규정하여, 1기압에서 물이 어는 온도를 32°F, 물이 끓는 온도를 212°F로 정하고 그사이를 180등분한 값이다.

$$화씨온도(°F) = \frac{9}{5} \times 섭씨온도(℃) + 32$$

2. 열평형상태와 동적 평형

열평형상태는 두 물체의 온도가 같아져 열의 이동이 균형을 이룬 상태를 말한다. 이때 열의 이동이 균형을 이룬다는 말은 열이 이동하지 않는다는 말이 아니다. 모든 물체는 표면으로부터 열을 방출하는데 열평형에서는 방출하는 열량과 흡수하는 열량이 같은 상태이기 때문에 두 물체의 온도가 변하지 않는 것이다.

이렇게 두 물체 사이에 무언가 이동하며 교환하지만 서로의 물리적 상태가 변하지 않는 평형의 상태를 동적 평형(dynamic equilibrium)이라고 한다.

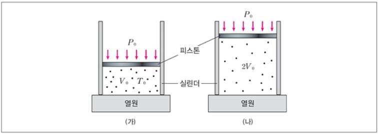


| A와 B의 열평형상태 |

연습문제

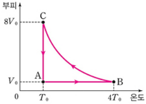
✦ 정답_ 300p

01 그림 (가)는 절대온도가 T_0이고 부피가 V_0인 단원자 이상기체 1몰이 실린더 안에 있는 것을 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)에서 외부압력을 P_0으로 일정하게 유지한 채 서서히 열을 가하여 기체의 부피가 $2V_0$이 된 것을 나타낸 것이다.



이때 (가)와 (나)의 제곱평균제곱근 속력의 비 $\dfrac{v_{나}}{v_{가}}$와 엔트로피 변화 ΔS를 구하시오.

02 다음 그림은 1몰의 이상기체의 상태가 A → B → C → A를 따라 변화할 때 부피와 절대온도를 나타낸 것이다. A → B 과정은 등적 과정, B → C 과정은 단열 과정, C → A 과정은 등온 과정이다.



이때 B와 C에서의 압력의 비 $\frac{P_B}{P_C}$와 한 순환 과정 동안 열효율 e를 구하시오.

Part 01 | 열 및 통계물리학 연습문제 정답

Chapter 01 열역학

+ 본문_ 46~57p

01 1) $\frac{v_{나}}{v_{가}} = \sqrt{2}$, 2) $\Delta S = \frac{5}{2}R\ln 2$

02 1) $\frac{P_B}{P_C} = 32$, 2) $e = \frac{3-2\ln 2}{3}$

03 1) $V = eV_0$, 2) $\eta = \frac{2}{7}$

04 1) $\frac{V_C}{V_A} = 2^{\frac{5}{2}}$, 2) $S = \frac{5}{2}nRT_0(1-\ln 2)$, 3) $e = 1-\ln 2$

05 1) $\frac{U_A}{U_B} = 1$, 2) $\frac{N_A}{N_B} = \sqrt{2}$

06 1) $\frac{V_C}{V_A} = 4$, 2) $\Delta S_{BC} = nR\ln 2$

07 1) $\frac{W_{AB}}{W_{CD}} = \frac{T_L}{T_H}$, 2) $e = 1 - \frac{T_L}{T_H}$

08 1) $T' = \frac{7T_1T_2}{T_1+6T_2}$, 2) $P' = \frac{7}{3}P$

09 1) $P_B = \frac{3}{2}P_0$, $P_C = \frac{1}{2}P_0$, 2) $e = \frac{2\ln 2}{3+3\ln 2}$

10 1) $\frac{|Q_{out}|}{P_0V_0} = \frac{27}{2}$, 2) $\frac{|W|}{P_0V_0} = 1+8\ln 2$

11 1) $T = \frac{kx^2}{R}$, 2) $Q = \frac{5}{2}kl^2$, 3) $\Delta S = 4R\ln\frac{3}{2}$

12 1) $W = \pi\alpha^2 P_0V_0$, 2) $\Delta E = -3\alpha P_0V_0$, 3) $\Delta S = \frac{5}{2}R\ln\left(\frac{1+\alpha}{1-\alpha}\right)$

Chapter 02 열통계역학의 기본

본문_ 67~71p

01 1) $U=Nk_BT$, 2) $p=\dfrac{Nk_BT}{V}$

02 $k=\dfrac{1}{3}$

03 1) $S(T,\ V,\ N)=S_0+Nk\ln\left[\left(\dfrac{3}{2}\dfrac{NkT}{U_0}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\dfrac{N_0}{N}\right)^{\frac{5}{2}}\left(\dfrac{V}{V_0}\right)\right]$

2) $C_V=\left(\dfrac{\partial Q}{\partial T}\right)_V=\left(\dfrac{\partial U}{\partial T}\right)_V=T\left(\dfrac{\partial S}{\partial T}\right)_V=\dfrac{3}{2}Nk$

3) $F(T,\ V,\ N)=U-TS=\dfrac{3}{2}NkT-TS_0-NkT\ln\left[\left(\dfrac{3}{2}\dfrac{NkT}{U_0}\right)^{\frac{3}{2}}\left(\dfrac{N_0}{N}\right)^{\frac{5}{2}}\left(\dfrac{V}{V_0}\right)\right]$

04 1) $\Delta S(T,\ V)=C_V\ln\dfrac{T}{T_0}+Nk\ln\dfrac{V-Nb}{V_0-Nb}$, 2) $\Delta U(T,\ V)=C_V(T-T_0)-N^2a\left(\dfrac{1}{V}-\dfrac{1}{V_0}\right)$

05 1) $T=\dfrac{T_1+T_2}{2}$, 2) $\Delta S=\dfrac{5Nk}{2}\ln\left(\dfrac{(T_1+T_2)^2}{4T_1T_2}\right)$

Chapter 03 고전 통계

본문_ 92~100p

01 1) $P_{도}=\dfrac{2^5\times 3}{5^4}$, $P_{걸}=\dfrac{2^3\times 3^3}{5^4}$, 2) $S_{걸}-S_{도}=k\ln\dfrac{9}{4}=2k\ln\dfrac{3}{2}$

02 1) 5J, 6J, 7J, 2) 5J : 3가지, 6J : 9가지 7J : 3가지, 3) 엔트로피는 $S=k\ln\Omega$ 이므로 Ω가지 수가 가장 높은 6J일 때가 엔트로피가 가장 높다.

03 1) $\dfrac{P_B}{P_A}=24$, 2) $S_B-S_A=k\ln\left(\dfrac{\Omega_B}{\Omega_A}\right)=k\ln\left(\dfrac{P_B}{P_A}\right)=k\ln 24$

04 1) $F=-2smB-kT\left[N\ln N-\left(\dfrac{N}{2}+s\right)\ln\left(\dfrac{N}{2}+s\right)-\left(\dfrac{N}{2}-s\right)\ln\left(\dfrac{N}{2}-s\right)\right]$

2) $E_{평형}=-NmB\tanh x$ $[where\ x=m\beta B]$

05 1) $U=2k_BT$, 2) $S=2k_B+k_B\ln a(2\pi k_BT)^2$

2023 고객선호브랜드지수 1위
교육서비스 부문

2022 한국 브랜드 만족지수 1위
교육(교육서비스)부문 1위

2021 대한민국 소비자 선호도 1위
교육부문 1위 선정

2020 한국 산업의 1등
브랜드 대상 수상

2019 한국 우수브랜드평가대상
교육브랜드 부문 수상

2018 대한민국 교육산업 대상
교육서비스 부문 수상

2017 대한민국 고객만족
브랜드 대상 수상

2017 한국소비자선호도 1위
브랜드 대상 수상

2016 한국 소비자
만족지수 1위 선정

브랜드스탁 BSTI
브랜드 가치평가 1위

PHYSICS

정승현
열 및 통계물리학
양자역학

정가 22,000원

14420

ISBN 979-11-6987-732-9
ISBN 979-11-6987-729-9(SET)

박문각 www.pmg.co.kr 교재관련 문의 02-6466-7202 학원관련 문의 02-816-2030 온라인강의 문의 02-6466-7201