

THEME

13

[열역학]

[1] 순환 과정

교육과정의 개정되면서 열기관 내부 이상 기체의 순환 과정과 열역학 법칙을 엮는 주제가 강화되었다. 이에 따라 대부분의 문항 유형이 전체 순환 과정을 표현하는 그래프와 표에 기반하여 출제된다.

■ 열역학적 상태와 열역학 과정

기체의 열역학적 상태를 구성하는 요소에는 압력(P), 부피(V), 온도(T)가 있다. 여기서 온도는 보통 절대 온도를 뜻한다. 서로 다른 열역학적 상태는 보일-샤를의 법칙을 이용하여 비교할 수 있다. 보일-샤를의 법칙에 의하면, 일정량의 이상 기체의 $\frac{PV}{T}$ 는 항상 일정하므로 이를 이용하여 비례식을 세울 수 있다.

성질

- ① 기체의 압력은 기체와 외부의 경계를 이루는 모든 점에서 일정하다.
- ② 기체의 부피는 기체가 점유하고 있는 공간의 부피와 같다.
- ③ 기체의 (절대) 온도는 기체의 내부 에너지에 비례한다. 즉, $T \propto U$ 또는 $\Delta T \propto \Delta U$ 이다.
- ④ 일정량의 이상 기체의 압력, 부피, 온도 사이에서 $PV \propto T$ 이다.

예제 1 그림은 일정량의 이상 기체의 열역학적 상태 A, B, C, D를 나타낸 것이다. 이상 기체의 상태는 화살표를 따라 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 순으로 순환한다.

A, B, C, D에서 이상 기체의 온도의 비는?

해설

- ① 기체의 압력의 비는 1:2:2:1이다.
- ② 기체의 부피의 비는 1:1:2:2이다.
- ③ 기체의 온도의 비는 압력의 비와 부피의 비를 곱한 것이므로, $(1:2:2:1) \times (1:1:2:2) = 1:2:4:2$ 이다.

한편, 기체의 열역학적 상태를 변화시키는 원인에는 열(Q)과 일(W)이 있다. 기체의 열역학적 상태를 보일-샤를의 법칙으로 비교한 것처럼, 기체가 겪는 열역학 과정은 열역학 제1 법칙으로 표현할 수 있다. 열역학 제1 법칙에 따르면, 이상 기체의 내부 에너지 변화량이 ΔU 일 때, 등식 $Q = \Delta U + W$ 가 성립한다.

성질

- ① 기체가 한 일 $W = \sum P \Delta V$ 이다.
- ② 기체의 내부 에너지는 기체의 온도에 비례한다. 즉, $T \propto U$ 또는 $\Delta T \propto \Delta U$ 이다.

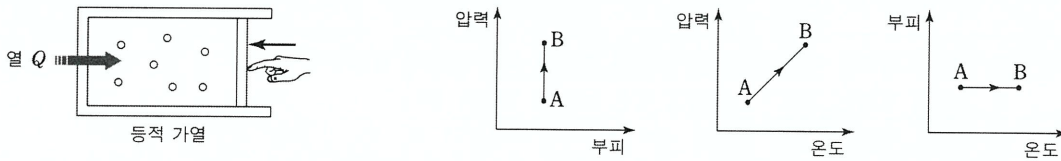
■ 부피가 일정한 열역학 과정

기체의 부피가 일정하게 유지되는 열역학 과정을 **등적 과정**이라고 한다. 기체가 열을 흡수(또는 방출)하는 동시에 피스톤을 고정하여 부피를 일정하게 유지하면 등적 과정을 겪게 된다.

참고

등적 과정을 비롯한 대표적인 열역학 과정, 그리고 어느 것에도 속하지 않는 열역학 과정 모두 **[보일-샤를의 법칙]** 및 **[열역학 제 1법칙]**으로 해석할 수 있다면 출제될 수 있다.

다음 그림은 등적 가열 과정에서 압력-부피-온도 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.



부피의 변화가 없기 때문에 $P-V$ 그래프가 압력에 나란한 직선을 그린다. 따라서 기체가 한 일 $W=0$ 이므로, $Q=\Delta U$ 이다. 즉, 공급한 열(+)이 손실 없이 그대로 내부 에너지(+)로 전환된다. 압력과 온도가 서로 비례 관계에 있으므로 $P-T$ 그래프가 일차함수 꼴이 된다.

다음은 등적 가열 과정과 등적 냉각 과정을 비교한 것이다. 변화량의 부호(±)가 반대임을 알 수 있다.

열역학 과정	압력	부피	온도
등적 가열	증가(+)	일정	증가(+)
등적 냉각	감소(-)	일정	감소(-)

열역학 과정	일	내부 에너지	열
등적 가열	없음	증가(+)	흡수(+)
등적 냉각	없음	감소(-)	방출(-)

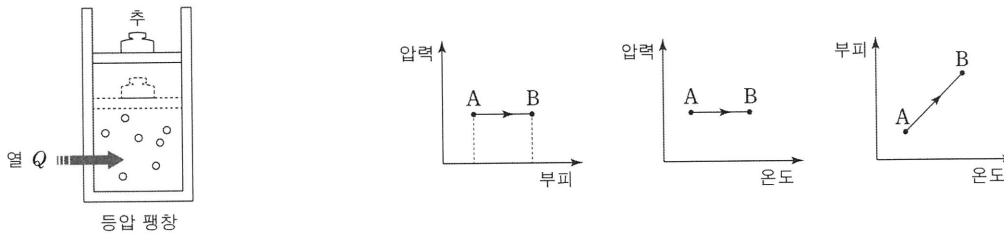
■ 압력이 일정한 열역학 과정

기체의 압력이 일정하게 유지되는 열역학 과정을 **등압 과정**이라고 한다. 기체가 열을 흡수(또는 방출)할 때 피스톤의 압력이 대기압, 혹은 추의 압력 등으로 일정하게 유지되면 등압 과정을 겪는다.

참고

등압 과정을 비롯한 모든 열역학 과정은 매 순간 피스톤이 힘의 평형($\Sigma F=0$)을 이루며 서서히($v \approx 0$) 일어난다. 따라서 실린더 내부에서 기체가 피스톤을 밀어내는 압력은 실린더 외부에서 피스톤을 누르는 압력과 항상 같다($P_{내부} = P_{외부}$)고 가정한다. 이외의 상황은 교육과정 내에서 출제할 수 없다.

다음 그림은 등압 팽창 과정에서 압력-부피-온도 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.



$P-V$ 그래프에서 그래프 아래 면적이 기체가 한 일(W)이므로, $Q = \Delta U + P\Delta V$ 이다. 즉, 공급한 열(+) 중 일부는 내부 에너지(+)로 전환되어 남고, 일부는 일(+)의 형태로 방출된다. $P-V$ 그래프가 상수함수 꼴이어서 그래프 아래 면적을 쉽게 계산할 수 있으므로, 한 일을 정량적으로 계산할 수 있다.

다음은 등압 팽창 과정과 등압 수축 과정을 비교한 것이다. 변화량의 부호(±)가 반대임을 알 수 있다.

열역학 과정	압력	부피	온도
등압 팽창	일정	증가(+)	증가(+)
등압 수축	일정	감소(-)	감소(-)

열역학 과정	일	내부 에너지	열
등압 팽창	방출(+)	증가(+)	흡수(+)
등압 수축	흡수(-)	감소(-)	방출(-)

주의

일(W)은 외부에 하는 것을 양(+)으로, 열(Q)은 외부로부터 받는 것을 양(+)으로 약속하였다. 이는 공급한 열로부터 열기관이 만들어낸 동력을 계산하는 공학적 관점으로부터 유래했다.

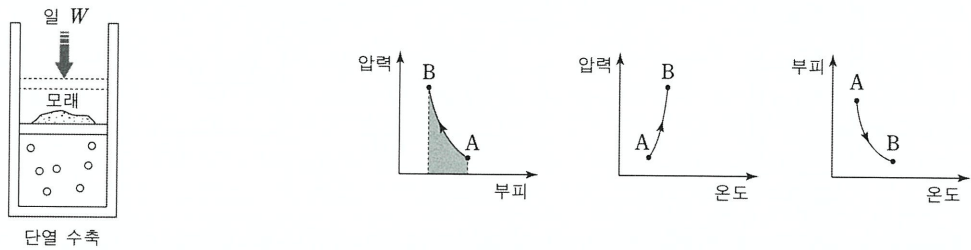
■ 열 출입이 없는 열역학 과정

기체에 열 출입이 없는 열역학 과정을 **단열 과정**이라고 한다. 열 출입이 없도록 단열된 상태에서 기체에 작용하는 외부 압력을 연속적으로 증가(또는 감소)시키면 발생한 일에 의해 기체가 단열 과정을 겪는다.

성질

- ① 피스톤 반대편에 다른 기체가 있는 경우, 다른 기체의 압력 변화에 따라(피스톤이 평형을 이루도록 하는) 기체의 압력이 변화하므로, 이에 따라 단열 과정이 일어난다.
- ② 피스톤 반대편에 모래를 쌓는 등 누르는 힘을 크게 하면 압력이 서서히 증가하면서 단열 수축한다.
- ③ 피스톤 반대편에 실을 연결해 당기는 힘을 크게 하면 압력이 서서히 감소하면서 단열 팽창한다.

다음 그림은 단열 수축 과정에서 압력-부피-온도 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.



공급하거나 방출한 열(Q)이 없으므로, $Q=0$, $-W = \Delta U$ 이다. 즉, 외부로부터 받은 일(-)이 그대로 내부 에너지(+)로 전환된다. 단열 과정에서는 모든 그래프가 곡선이다. 다시 말해 교육과정 수준에서 직접 그래프 면적을 계산할 수 없다. **따라서 일을 계산할 때는 반드시 내부 에너지 변화량을 이용한다.** 압력-부피-온도의 변화 양상이 보일-샤를의 법칙만으로는 예측할 수 없는 형태로 나타나므로 주의해야 한다.

다음은 단열 팽창 과정과 단열 수축 과정을 비교한 것이다. 변화량의 부호(±)가 반대임을 알 수 있다.

열역학 과정	압력	부피	온도
단열 팽창	감소(-)	증가(+)	감소(-)
단열 수축	증가(+)	감소(-)	증가(+)

열역학 과정	일	내부 에너지	열
단열 팽창	방출(+)	감소(-)	없음
단열 수축	흡수(-)	증가(+)	없음

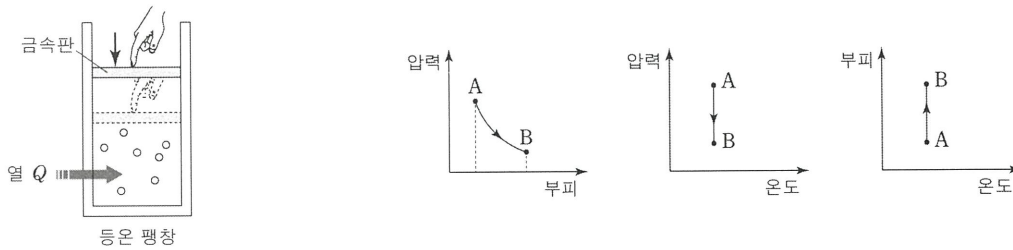
■ 온도가 일정한 열역학 과정

기체의 온도가 일정하게 유지되는 열역학 과정을 **등온 과정**이라고 한다. 기체가 열을 흡수(또는 방출)할 때 실린더나 피스톤이 단열되지 않아서 외부와 열 교환이 일어나면 등온 과정을 겪는다.

성질

- ① 접촉한 두 계는 온도가 높은 곳에서 낮은 곳으로, 온도가 같아질 때까지 열이 이동한다.
- ② $P-V$ 그래프에서 온도가 같은 점을 연결한 곡선을 등온선이라고 한다. 등온선은 원점에 가까울수록 온도가 낮고, 원점에서 멀수록 온도가 높다.

다음 그림은 등온 팽창 과정에서 압력-부피-온도 사이의 관계를 그래프로 나타낸 것이다.



기체의 내부 에너지가 일정하므로, $Q = W$ 이다. 즉, 흡수한 열(+)을 그대로 외부에 일(+)로 방출한다. 등온 과정에서는 $P-V$ 그래프가 곡선이므로 단열 과정과 마찬가지로 그래프 면적을 직접 계산할 수가 없다. **따라서 일을 계산할 때는 반드시 출입한 열을 이용**한다. 압력과 부피가 서로 반비례 관계에 있는 것이 큰 특징이다.

다음은 등온 팽창 과정과 등온 수축 과정을 비교한 것이다. 변화량의 부호(±)가 반대임을 알 수 있다.

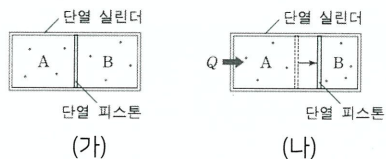
열역학 과정	압력	부피	온도
등온 팽창	감소(-)	증가(+)	일정
등온 수축	증가(+)	감소(-)	일정

열역학 과정	일	내부 에너지	열
등온 팽창	방출(+)	일정	흡수(+)
등온 수축	흡수(-)	일정	방출(-)

예제 2

■ 2015학년도 9월 모의평가 물리 I 18번

그림 (가)와 같이 이상 기체가 들어 있는 단열 실린더가 단열 피스톤에 의해 A, B로 나누어져 있다. 그림 (나)는 (가)에서 A의 기체에 열량 Q 를 가했더니 피스톤이 천천히 이동하여 정지한 모습을 나타낸 것이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오. (단, 실린더와 피스톤 사이의 마찰은 무시한다.)

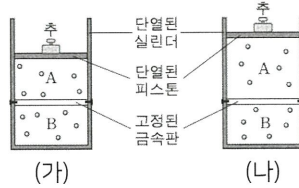
| 보기 |

- ㄱ. A와 B의 기체 내부 에너지 변화량의 합은 Q 이다.
- ㄴ. B의 기체가 받은 일은 Q 보다 작다.
- ㄷ. B의 기체는 온도가 증가하였다.

예제 3

■ 2017학년도 9월 모의평가 물리 I 13번

그림 (가)와 같이 열전달이 잘되는 고정된 금속판에 의해 분리된 실린더에 같은 양의 동일한 이상 기체 A와 B가 열평형 상태에 있다. A, B의 부피와 압력은 같다. 그림 (나)는 (가)에서 B에 열량 Q 를 가했더니 A의 부피가 서서히 증가하여 피스톤이 정지한 모습을 나타낸 것이다.



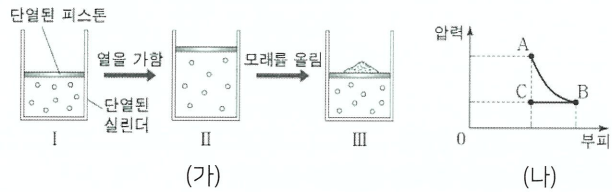
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오. (단, 피스톤의 질량, 실린더와 피스톤 사이의 마찰, 금속판이 흡수한 열량은 무시한다.)

- | 보기 |
- ㄱ. (나)에서 기체의 압력은 A가 B보다 작다.
 - ㄴ. (나)에서 기체의 내부 에너지는 A가 B보다 크다.
 - ㄷ. (가)에서 (나)로 되는 과정에서 A가 흡수한 열량은 $\frac{1}{2}Q$ 보다 크다.

예제 4

■ 2020학년도 9월 모의평가 물리 I 18번

그림 (가)의 I은 이상 기체가 들어 있는 실린더에 피스톤이 정지해 있는 모습을, II는 I에서 기체에 열을 서서히 가했을 때 기체가 팽창하여 피스톤이 정지한 모습을, III은 II에서 피스톤에 모래를 서서히 올려 피스톤이 내려가 정지한 모습을 나타낸 것이다. I과 III에서 기체의 부피는 같다. 그림 (나)는 (가)의 기체 상태가 변화할 때 압력과 부피를 나타낸 것이다. A, B, C는 각각 I, II, III에서의 기체의 상태 중 하나이다.



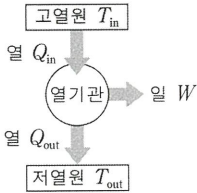
이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오. (단, 피스톤의 마찰은 무시한다.)

| 보기 |

- ㄱ. I → II 과정에서 기체는 외부에 일을 한다.
- ㄴ. 기체의 온도는 III에서가 I에서보다 높다.
- ㄷ. II → III 과정은 B → C 과정에 해당한다.

■ 열기관과 열효율

열기관은 한 번의 순환 과정 동안 고열원(T_1)에서 열(Q_{in})을 흡수하여 외부에 일(W)을 하고, 저열원(T_2)으로 남은 열(Q_{out})을 방출하는 장치이다.



열기관 내부의 이상 기체는 한 번의 순환 과정을 거친 후 원래의 열역학적 상태로 되돌아온다. 즉, 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지의 변화량(ΔU)은 0이다.

열기관의 순환 과정은 다른 열역학 과정과 마찬가지로 $P-V$ 그래프로 나타낼 수 있다. 앞에서 살펴본 대표적인 열역학 과정이 한 열역학적 상태에서 다른 열역학적 상태로 전이하는 과정이라면, 순환 과정은 여러 열역학적 상태를 거쳐 본래의 열역학적 상태로 다시 돌아오는 과정이다. 이때 순환 과정의 그래프는 닫힌 곡선을 그리게 된다. 이 그래프 내부의 면적이 바로 외부에 한 일(W)이 된다.

한 번의 순환 과정에서 열기관에 공급해준 열에 대한 일의 비를 열효율 $\frac{W}{Q_{in}} = \frac{Q_{in} - Q_{out}}{Q_{in}} = e$ 로 정의하며, 이는 열기관의 고유한 성질이다.

성질

- ① 고열원의 온도(T_H)는 저열원의 온도(T_L)보다 크다.
- ② 열효율은 1 미만이다.

열효율의 정의를 다시 쓰면 $W = e \times Q_{in}$ 이 된다. 이는 일과 열 사이의 관계식이므로, 열기관에서 일어나는 열역학 과정의 $Q = \Delta U + W$ 등식을 정량적으로 풀 때 활용될 수 있다.

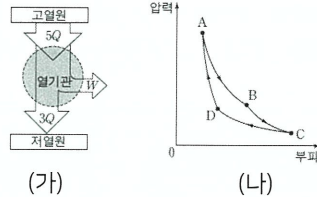
요령

- ① 순환 과정을 해석하는 문제에서 압력(P)과 부피(V)의 변화 양상은 그래프를 통해 제공된다. 보통 한 이상 기체가 겪는 열역학 과정에 해당하므로, 무엇이 일정한지를 파악하여 대표적인 열역학 과정에 대응시키거나 보일-샤를의 법칙을 이용해서 분석한다. 그래프 아래 면적으로부터 한 일(W)을 구한다.
- ② 일(W), 열(Q), 내부 에너지(U)에 관한 정보는 표를 통해 제공된다. 예를 들어 흡수 또는 방출되는 열량, 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일, 내부 에너지 증가량 또는 감소량 등의 정보가 각 열역학 과정마다 주어진다. 이를 열역학 제 1법칙이나 열효율 식에 대입하여 분석한다.

예제 5

■ 2012학년도 6월 모의평가 물리Ⅱ 15번

그림 (가)는 1회의 순환 과정에서 고열원으로부터 $5Q$ 의 열을 흡수하여 외부에 W 의 일을 하고 저열원으로 $3Q$ 의 열을 방출하는 열기관을 모식적으로 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)의 열기관에 있는 일정량의 이상 기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 변할 때 압력과 부피의 관계를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 와 $C \rightarrow D$ 는 등온 과정, $B \rightarrow C$ 와 $D \rightarrow A$ 는 단열 과정이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

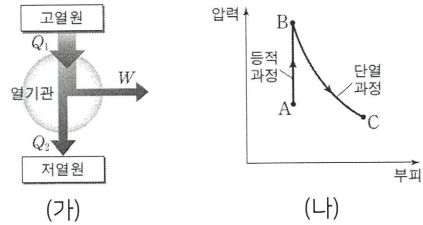
| 보기 |

- ㄱ. $A \rightarrow B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 외부에 한 일은 W 이다.
- ㄴ. $C \rightarrow D$ 과정에서 기체가 방출한 열량은 $3Q$ 이다.
- ㄷ. 열기관의 열효율은 60%이다.

예제 6

■ 2017학년도 대학수학능력시험 물리 I 16번

그림 (가)는 열효율이 0.2인 열기관이 고열원에서 Q_1 의 열을 흡수하여 W 의 일을 하고 저열원으로 Q_2 의 열을 방출하는 것을 모식적으로 나타낸 것이다. 그림 (나)는 (가)의 열기관의 작동 과정의 일부에 대한 기체의 상태 변화를 압력과 부피의 그래프로 나타낸 것이다. A→B 과정은 등적 과정이고, B→C 과정은 단열 과정이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

| 보기 |

- ㄱ. $Q_2 = 4W$ 이다.
- ㄴ. A→B 과정에서 기체는 열을 흡수한다.
- ㄷ. B→C 과정에서 기체가 한 일은 B→C 과정에서 기체의 내부 에너지 감소량과 같다.

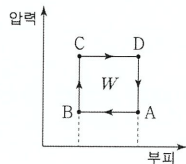
■ 열기관의 순환 과정

열기관 내부의 기체는 일반적으로 수축-가열-팽창-냉각의 4가지 과정을 연속적으로 겪고 원래의 열역학적 상태로 돌아온다. 가능한 경우를 따로 암기할 필요는 없으나, 각 경우에서 일, 열, 내부 에너지 변화량의 관계가 어떻게 되는지 파악해 보는 연습은 필요하다.

많은 경우에 4가지 과정 중 번갈아 두 과정씩이 같은 과정인 대칭 구조를 갖는 경우가 많으므로 이에 해당하는 열역학 과정 몇 가지를 분석해보자.

예제 7

그림은 열효율이 e 인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하며 외부에 W 만큼의 일을 하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 표는 각 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량, 그리고 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일을 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 압력이 일정한 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 부피가 일정한 과정이다.



과정	내부 에너지 증가량 또는 감소량	외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일
$A \rightarrow B$	E_{AB}	W_{AB}
$B \rightarrow C$	E_{BC}	0
$C \rightarrow D$	E_{CD}	W_{CD}
$D \rightarrow A$	E_{DA}	0

분석

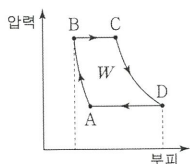
- ☞ $B \rightarrow C$ (등적) 과정에서 흡수한 열량 $Q_{BC} = E_{BC}$ 이고 $C \rightarrow D$ (등압) 과정에서 흡수한 열량 $Q_{CD} = E_{CD} + W_{CD}$ 이다. 열을 흡수하는 과정은 이 둘뿐이므로, 열기관이 고열원에서 흡수한 열량 $Q_1 = Q_{BC} + Q_{CD}$ 이다.
- ☞ $D \rightarrow A$ (등적) 과정에서 방출한 열량 $Q_{DA} = E_{DA}$ 이고 $A \rightarrow B$ (등압) 과정에서 방출한 열량 $Q_{AB} = E_{AB} + W_{AB}$ 이다. 열을 방출하는 과정은 이 둘뿐이므로, 열기관이 저열원으로 방출한 열량 $Q_2 = Q_{DA} + Q_{AB}$ 이다.
- ☞ 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지 변화량은 0이므로, $E_{BC} + E_{CD} = E_{DA} + E_{AB}$ 이다. 이때 (둘 다 증가량이므로) $E_{BC} + E_{CD} = E_{BD}$ 로 간략히 나타낼 수 있다. 내부 에너지는 온도에만 비례한다. 따라서 기체가 상태 B에서 상태 D까지 어떤 경로를 따라 변화했는지에 영향을 받지 않는다. 마찬가지로 (둘 다 감소량이므로) $E_{DA} + E_{AB} = E_{DB}$ 로 간략히 나타낼 수 있다. 정리하면 $E_{BD} = E_{DB}$ 이다. 이를 통해 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지 변화량이 0임을 다시 확인할 수 있다.
- ☞ 열기관이 한 일 $W = Q_1 - Q_2 = W_{CD} - W_{AB}$ 임을 다시 확인할 수 있다. 이는 그래프에서 시계 방향으로 둘러싸인 면적과 같다. 기체가 한 일은 기체의 상태가 어떤 경로를 따라 변화했는지에 직접 영향을 받는다. 그렇기 때문에 한 번의 순환 과정에서 내부 에너지 변화량은 0이지만, 기체가 한 일은 0이 아니다.
- ☞ 마지막으로 열효율 $e = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{W_{CD} - W_{AB}}{E_{BD} + W_{CD}}$ 이다.

요령

- ① 각 열역학 과정에서 어떤 물리량이 0인지 조사한다.
- ② 이를 바탕으로 각 과정에서 $Q, \Delta U, W$ 를 표로 정리한다.
- ③ 열효율 공식과 내부 에너지 변화량 공식을 이용한다.

예제 8

그림은 열효율이 $\frac{2}{3}$ 인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하며 외부에 W 만큼의 일을 하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 표는 각 과정에서 기체가 흡수 또는 방출하는 열량, 그리고 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량을 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 열 출입이 없는 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 압력이 일정한 과정이다.



과정	흡수 또는 방출하는 열량	내부 에너지 증가량 또는 감소량
$A \rightarrow B$	0	30J
$B \rightarrow C$	150J	90J
$C \rightarrow D$	0	E_{CD}
$D \rightarrow A$	Q_{DA}	30J

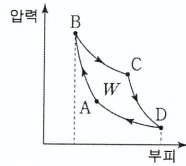
Q_{DA} , E_{CD} , W 는?

분석

- ☞ **[열효율]** 열을 흡수하는 과정은 $B \rightarrow C$ 과정뿐이고, 열을 방출하는 과정은 $D \rightarrow A$ 과정뿐이므로, 기체가 저열원으로 방출한 열량 $Q_{DA} = \left(1 - \frac{2}{3}\right) \times 150 = 50\text{J}$ 이다.
- ☞ **[내부 에너지]** 내부 에너지가 증가하는 과정은 $A \rightarrow B$ 과정과 $B \rightarrow C$ 과정으로, $30 + 90 = 120\text{J}$ 만큼이다. 따라서 나머지 두 과정에서 감소한 총 내부 에너지가 120J 이어야 하므로, $E_{CD} + 30 = 120$, $E_{CD} = 90\text{J}$ 이다.
- ☞ 마지막으로, 기체가 외부에 한 일은 두 가지 관점에서 따로 구할 수 있다.
- ☞ 열기관의 관점에서, 한 일은 공급된 열량에서 방출된 열량을 뺀 것과 같다. 따라서 $W = 150 - 50 = 100\text{J}$ 이다. 가능하다면 이 방법으로 구하는 것이 간단하다.
- ☞ $A \rightarrow B$ 과정에서 외부로부터 받은 일은 내부 에너지 증가량과 같은 30J 이다. $B \rightarrow C$ 과정에서 외부에 한 일은 흡수한 열량에서 내부 에너지 증가량을 차감한 $150 - 90 = 60\text{J}$ 이다. $C \rightarrow D$ 과정에서 외부에 한 일은 내부 에너지 감소량과 같은 90J 이다. $D \rightarrow A$ 과정에서 외부로부터 받은 일은 방출한 열량에서 내부 에너지 감소량을 차감한 20J 이다. 따라서 총 일의 양은 $60 + 90 - 30 - 20 = 100\text{J}$ 이다.
- ☞ 열역학 과정마다 한 일을 하나하나 따져서 계산하는 방법은 당연히 손이 많이 간다. 하지만 문제 풀이 순서에 따라, 기체가 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일은 모두 계산되어 있는 반면, 기체가 방출한 열량과 흡수한 열량은 계산되어 있지 않을 수 있다. 그럴 때는 이미 계산된 결과를 이용하기만 하면 된다.

예제 9

그림은 열효율이 $\frac{1}{4}$ 인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하며 외부에 W 만큼의 일을 하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 표는 각 과정에서 기체가 흡수 또는 방출하는 열량, 그리고 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량을 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 열 출입이 없는 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 온도가 일정한 과정이다.

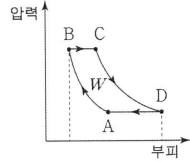


과정	흡수 또는 방출하는 열량	내부 에너지 증가량 또는 감소량
$A \rightarrow B$	0	E_{AB}
$B \rightarrow C$	80 J	0
$C \rightarrow D$	0	50 J
$D \rightarrow A$	Q_{DA}	0

Q_{DA} , E_{AB} , W 는?

예제 10

그림은 열효율이 0.3인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하며 외부에 60J만큼의 일을 하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 표는 각 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량, 그리고 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일을 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 온도가 일정한 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 압력이 일정한 과정이다.

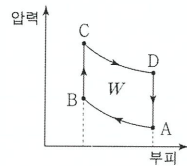


과정	내부 에너지 증가량 또는 감소량	외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일
$A \rightarrow B$	0	90J
$B \rightarrow C$	E_{BC}	20J
$C \rightarrow D$	0	W_{CD}
$D \rightarrow A$	E_{DA}	20J

E_{BC} , E_{DA} , W_{CD} 는?

예제 11

그림은 열효율이 0.5인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하며 외부에 W 만큼의 일을 하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 표는 각 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량, 그리고 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일을 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 온도가 일정한 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 부피가 일정한 과정이다.

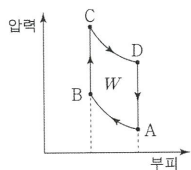


과정	내부 에너지 증가량 또는 감소량	외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일
$A \rightarrow B$	0	20 J
$B \rightarrow C$	160 J	0
$C \rightarrow D$	0	W_{CD}
$D \rightarrow A$	E_{DA}	0

E_{DA} , W_{CD} , W 는?

예제 12

그림은 열효율이 e 인 열기관에서 일정량의 이상 기체가 상태 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow D \rightarrow A$ 를 따라 순환하며 외부에 W 만큼의 일을 하는 동안 기체의 압력과 부피를 나타낸 것이다. 표는 각 과정에서 기체의 내부 에너지 증가량 또는 감소량, 그리고 외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일을 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정과 $C \rightarrow D$ 과정은 열 출입이 없는 과정, $B \rightarrow C$ 과정과 $D \rightarrow A$ 과정은 부피가 일정한 과정이다.



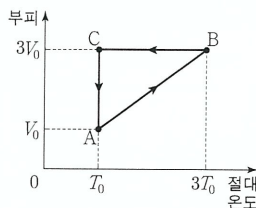
과정	내부 에너지 증가량 또는 감소량	외부에 한 일 또는 외부로부터 받은 일
$A \rightarrow B$	E_{AB}	25 J
$B \rightarrow C$	125 J	0
$C \rightarrow D$	100 J	W_{CD}
$D \rightarrow A$	E_{DA}	0

E_{AB} , E_{DA} , W_{CD} , W , e 는?

예제 13

■ 2022학년도 대학수학능력시험 물리학 I 17번

그림은 열기관에서 일정량의 이상 기체의 상태가 $A \rightarrow B \rightarrow C \rightarrow A$ 를 따라 순환하는 동안 기체의 부피와 절대 온도를 나타낸 것이다. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체는 압력이 P_0 로 일정하고 기체가 흡수하는 열량은 Q_1 이다. $B \rightarrow C$ 과정에서 기체가 방출하는 열량은 Q_2 이다.



이에 대한 설명으로 옳은 것만을 | 보기 | 에서 있는 대로 고르시오.

| 보기 |

- ㄱ. $A \rightarrow B$ 과정에서 기체의 내부 에너지는 증가한다.
- ㄴ. 열기관의 열효율은 $\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ 보다 작다.
- ㄷ. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $\frac{2}{3}P_0V_0$ 보다 크다.

[2] 일과 열

교육과정이 개정되면서 일과 열, 에너지 사이의 관계가 중요한 주제로 자리매김했다. 대표적인 심화 주제인 실린더와 용수철 조합에 대해 알아본다.

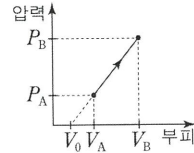
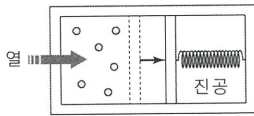
■ 비가 일정한 경우

피스톤을 가운데 두고 기체와 용수철이 서로 반대쪽에서 힘을 작용하는 경우, 두 힘이 평형 관계에 있으므로 압력×면적과 탄성력이 비례하게 된다.

성질

- ① 피스톤은 항상 힘의 평형 상태에 있으므로, 좌우의 압력이 서로 같다.
- ② 기체가 외부에 한 일은 피스톤에 접촉한 대상이 받은 일과 같다.

예를 들어보자. 그림과 같이 P_A 이고 부피가 V_A 인 상태로 평형을 이루고 있던 이상 기체에 열을 공급했더니 피스톤이 서서히 움직여 기체의 압력이 P_B 이고 부피가 V_B 인 상태에서 정지하였다.



[1] 피스톤이 매 순간 힘의 평형을 이루므로, 기체의 압력 P 와 피스톤의 단면적 S 를 곱한 것(기체가 피스톤을 미는 힘)은 용수철이 피스톤을 미는 탄성력 F 와 항상 크기가 같다. 즉, $P \times S = F$ 이다. 이때 기체가 외부에 한 일 $W = \frac{P_A + P_B}{2} \times (V_B - V_A)$ 로 평균 압력을 이용하여 계산할 수 있다.

이로부터 일-열-에너지에 관한 성질을 정리하면 다음과 같다.

성질

- ① 기체가 한 일(±)은 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(±)과 같다.
- ② 기체에 공급한 열(±)은 기체의 내부 에너지 변화량(±)과 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(±)의 합과 같다.

[2] $P-V$ 그래프를 연장하면 부피 절편 V_0 을 구할 수 있다. 이는 이론적으로 용수철이 원래 길이었을 때 기체의 부피를 의미한다. 이제 이 성질을 활용하여 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지를 기체의 압력 P 와 부피 V 에 대해 표현하면,

$$E = \frac{1}{2} P(V - V_0) = \frac{k}{2S^2} (V - V_0)^2 = \frac{S^2}{2k} P^2 \text{이다. } (P \times S = k \frac{V - V_0}{S})$$

이로부터 비례식에 관한 성질을 정리하면 다음과 같다.

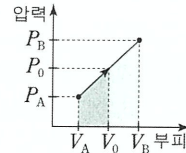
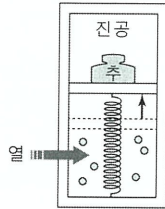
성질

- ① 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지는 압력의 제곱 P^2 에 비례한다.
- ② 용수철이 탄성 퍼텐셜 에너지는 부피 변화의 제곱 $(V - V_0)^2$ 에 비례한다.
- ③ 기체의 $P-V$ 그래프의 기울기는 용수철 상수 k 에 비례한다.

■ 합이 일정한 경우

피스톤을 기준으로 기체와 용수철이 같은 쪽에서 힘을 작용하는 경우, 두 힘의 합력이 일정해야 평형을 이룰 수 있으므로, 압력×면적과 탄성력의 합이 일정하게 된다.

예를 들어보자. 그림과 같이 무게가 P_0S 인 추를 피스톤 위에 놓고 압력이 P_A 이고 부피가 V_A 인 상태로 평형을 이루고 있던 이상 기체에 열을 공급했더니 피스톤이 서서히 움직여 기체의 압력이 P_B 이고 부피가 V_B 인 상태에서 정지하였다.



[1] 피스톤이 매 순간 힘의 평형을 이루므로, 기체의 압력 P 와 피스톤의 단면적 S 의 곱(기체가 피스톤을 미는 힘)과 용수철이 피스톤을 당기거나 미는 탄성력 F 의 합력은 추가 피스톤을 누르는 힘과 항상 크기가 같다. 즉, $P \times S + F = P_0 \times S$ 이다. 여기서 추가 없는 대신 피스톤에 질량이 있는 경우도 완전히 동일한 상황으로 볼 수 있다. 이때 기체가 외부에 한 일 $W = \frac{P_A + P_B}{2} \times (V_B - V_A)$ 로, 평균 압력을 이용하여 계산할 수 있다.

이로부터 일-열-에너지에 관한 성질을 정리하면 다음과 같다.

성질

- ① 기체가 한 일(±)은 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(±)과 추의 중력 퍼텐셜 에너지 변화량(±)의 합과 같다.
- ② 기체에 공급한 열(±)은 기체의 내부 에너지 변화량(±), 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(±), 추의 중력 퍼텐셜 에너지 변화량(±)의 합과 같다.

[2] 압력-부피 그래프에서 기체의 압력이 추의 압력 P_0 과 같을 때, 용수철이 작용하는 힘이 0이므로 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지는 0이다. 이 기체의 상태(압력 P_0 , 부피 V_0)를 기준으로 탄성력의 방향이 변한다. 기체의 압력이 P_0 보다 낮은 P_A 일 때, 용수철은 수축하여 피스톤의 압력을 $P_0 - P_A$ 만큼 증가시키며, 기체의 압력이 P_0 보다 높은 P_B 일 때, 용수철은 팽창하여 피스톤의 압력을 $P_B - P_0$ 만큼 감소시킨다. 따라서 그 합은 항상 P_0 으로 추의 압력과 평형을 이룬다. 반대로 기체의 압력이 P_A 에서 P_0 까지 증가하는 동안 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지는 감소하고, 기체의 압력이 P_0 에서 P_B 까지 증가하는 동안 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지는 증가한다.

다음 두 그림도 기체가 피스톤을 미는 힘과 용수철이 피스톤을 당기거나 미는 탄성력의 합이 일정한 상황이다. 어떤 경우든, **피스톤은 항상 힘의 평형을 이룬다는 원칙에 따라 해석하면 된다.**



기체의 압력이 대기압보다 낮은 경우, 용수철이 피스톤을 당기는 방향으로 힘을 작용하여 평형을 이루며, 기체의 압력이 대기압보다 높은 경우, 용수철이 피스톤을 미는 방향으로 힘을 작용하여 평형을 이루게 된다.

성질

- ① 기체가 한 일(±)과 대기가 받은 일(∓)의 합은 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(±)과 같다.
- ② 기체에 공급한 열(±)과 대기가 받은 일(∓)의 합은 기체의 내부 에너지 변화량(±)과 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(±)의 합 같다.

오른쪽 그림에서 용수철의 다른 한 끝이 지면이 아니라 지면에 놓인 물체와 연결되어 있을 수 있다. 이때, 탄성력(F)의 크기가 변함에 따라 물체(mg)가 지면으로부터 받는 수직항력($N = mg + F$)의 크기가 달라지는데 이를 조건으로 제시하는 문제가 주어질 수 있다.

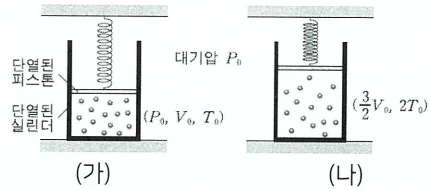
주의

- ① 추에 의한 압력이 아닌, 대기압이 압력의 기준이 된다. 대기 전체를 하나의 추라고 생각해도 된다.
- ② 기체가 대기에 한 일이 있으므로, 기체의 $P-V$ 그래프 아래 면적이 용수철의 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량과 같지 않다.

예제 14

■ 2013학년도 대학수학능력시험 물리 II 19번

그림 (가)는 일정량의 이상 기체가 들어 있는 실린더에서 피스톤이 용수철에 연결되어 정지해 있는 것을 나타낸 것이다. 기체의 압력, 부피, 온도는 각각 P_0 , V_0 , T_0 이고, 용수철은 늘어나거나 줄어들지 않은 상태이다. 그림 (나)는 (가)의 기체가 열을 공급받아 부피, 온도가 각각 $\frac{3}{2}V_0$, $2T_0$ 이 된 상태에서 피스톤이 정지해 있는 것을 나타낸 것이다.



(가)→(나) 과정에서 용수철의 탄성력에 의한 퍼텐셜 에너지 증가량은? (단, 피스톤의 질량, 실린더와 피스톤의 마찰은 무시한다.)

■ 기체가 두 부분으로 나뉘어 있는 경우

예시를 살펴보자. 다음 두 그림은 같은 양의 동일한 이상 기체가 단열된 피스톤으로 두 부분 A, B로 나누어져 있고, B 쪽에 용수철이 피스톤과 연결되었을 때, A 또는 B에 열을 가하는 과정을 나타낸 것이다. 기체가 돌인 경우도 마찬가지로 피스톤이 힘의 평형을 이루지만, 평형을 이루도록 하는 힘의 크기 자체는 변화한다는 것에 주의한다.

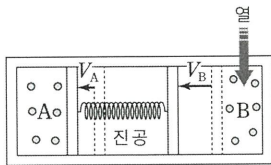


A에 열을 가하는 경우(왼쪽 그림)는 B가 단열 수축하게 되고, B에 열을 가하는 경우(오른쪽 그림)는 A가 단열 수축하게 된다. 따라서 각 경우 모두 두 기체의 $P-V$ 그래프가 모두 직선이 아니라 곡선이 된다. 따라서 계산에 필요한 정보들(열 Q , 일 W , ...)은 발문이나 표를 통해서 직접적으로 값이 제시되어야 하므로, 열역학 제 1법칙에 따라 열과 일, 내부 에너지, 탄성 퍼텐셜 에너지가 어떻게 교환되는지만 따져주면 된다.

예를 들어 B에 열을 공급하는 경우 다음 성질이 성립한다. A에 열을 공급하는 경우는 A와 B의 자리만 바꾸면 된다.

성질

- ① B가 외부에 한 일(±)과 A가 받은 일(∓)의 합은 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(?)과 같다.
- ② B에 공급한 열(±)은 A와 B의 내부 에너지 변화량(±)과 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(?)의 합과 같다.

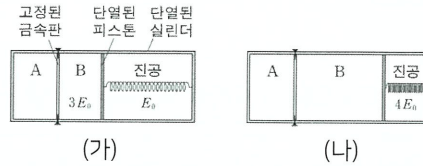


왼쪽 그림의 상황도 A의 부피 감소량, B의 부피 증가량이 각각 V_A , V_B 로 서로 다르다는 점을 제외하면, 세울 수 있는 식의 형태는 동일하다. 이때 용수철의 길이 감소량은 피스톤의 단면적 S 에 대하여 $\frac{V_B - V_A}{S}$ 이다.

예제 15

■ 2019학년도 6월 모의평가 물리 II 19번

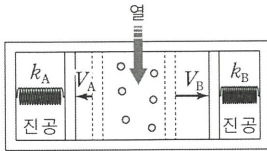
그림 (가)와 같이 단열된 실린더가 열을 잘 전달하는 고정된 금속판과 단열된 피스톤에 의해 분리되어 있다. 실린더의 A, B에는 같은 양의 동일한 이상 기체가 들어 있고, 피스톤은 진공에 있는 용수철에 연결되어 정지해 있다. B에 들어 있는 기체의 내부 에너지는 $3E_0$ 이다. 그림 (나)는 (가)의 A에 열량 $21E_0$ 를 천천히 가했더니 피스톤이 이동하여 정지해 있는 모습을 나타낸 것이다. (가), (나)에서 용수철에 저장된 탄성력에 의한 퍼텐셜 에너지는 각각 $E_0, 4E_0$ 이다.



(가)에서 B의 부피가 V_B 일 때, (나)에서 B의 부피는? (단, 실린더와 피스톤의 사이 마찰, 금속판의 열용량은 무시한다.)

■ 용수철이 둘인 경우

예시를 살펴보자. 그림과 같이 이상 기체에 열을 서서히 가하였더니 기체가 용수철 상수가 각각 k_A, k_B 인 용수철 A, B 쪽으로 부피 V_A, V_B 만큼 증가하여 정지하였다.



두 피스톤이 매 순간 힘의 평형을 이루므로, 기체의 압력 P 와 피스톤의 단면적 S 를 곱한 것(기체가 피스톤을 미는 힘)은 용수철이 피스톤을 미는 탄성력 F_A, F_B 와 항상 크기가 같다. 즉, $P \times S = F_A = F_B$ 이다.

기체가 A쪽 피스톤에 한 일(+) $W_A = \bar{P} V_A$ 이고, B쪽 피스톤에 한 일(+) $W_B = \bar{P} V_B$ 로 쉽게 계산할 수 있고, 각각은 A, B에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량(+)이 된다. (\bar{P} 는 평균 압력)

두 용수철의 용수철 상수가 각각 k_A, k_B 이고 값이 다른 경우, 작용하는 힘이 같아야 하므로, 압축된 길이가 서로 다를 수 있다. 또한, 기체의 압력이 증가함에 따라 각 용수철이 압축된 길이가 증가할 때도, 길이의 변화량이 서로 다르다. 한편, 두 용수철에 저장된 탄성 퍼텐셜 에너지 변화량의 비는 (평균 압력이 같아) 부피 변화량의 비와 같고, 용수철 상수의 비와 서로 역수 관계이다.

성질

두 용수철 A, B에 대하여 $\frac{k_A}{k_B} = \frac{V_B}{V_A} = \frac{U_B}{U_A} = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_B}$ 이다.

[3] 예제 풀이

예제 2 ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㄱ. 계(A와 B)는 단열되어 있고 부피가 일정하므로 외부에 하거나 받은 일이 0이다. 따라서 기체 내부 에너지 변화량의 합은 공급된 열량 Q 이다. (○)
- ㄴ. B는 단열 수축하므로 압력이 증가하고, A의 압력은 B와 같으므로 마찬가지로 증가한다. A의 부피는 증가하므로, 보일-샤를의 법칙에 의하여 A의 온도도 증가한다. 따라서 A의 내부 에너지는 증가한다. 이제 A에 공급된 열량 Q 는 A의 내부 에너지 증가량과 B에 한 일의 합과 같으므로, B가 받은 일은 Q 에서 A의 내부 에너지 증가량을 뺀 것이다. 따라서 B의 기체가 받은 일은 Q 보다 작다. (○)
- ㄷ. B는 단열 수축하므로 온도가 증가하였다. (○)

예제 3 ㄱ, ㄷ

- ㄱ. $PV \propto T$ 로부터, (나)에서 A와 B의 온도는 같고 부피는 A가 B보다 크므로 압력은 A가 B보다 작다. (○)
- ㄴ. $U \propto T$ 로부터, (나)에서 A와 B의 온도가 같으므로 내부 에너지는 같다. (×)
- ㄷ. B에 가한 열량은 B가 일부 흡수하여 내부 에너지를 E 만큼 증가시키고, 나머지는 금속판을 통해 A가 흡수하여 내부 에너지를 E 만큼 증가시키면서 외부에 W 만큼 일을 한다. $Q = E + E + W$ 이므로, $\frac{1}{2}Q < E + W$ 이다. (○)

예제 4 ㄱ, ㄴ

- ㄱ. I → II 과정은 압력이 대기압으로 일정하므로 등압 팽창이고, 그래프에서 C → B 과정에 해당한다. 이때 기체는 그래프 아래 면적(W)만큼 외부에 일을 한다. (○)
- ㄴ. II → III 과정은 열 출입이 없으므로 단열 수축 과정이고, 그래프에서 B → A 과정에 해당한다. 이때 기체의 내부 에너지는 증가하므로, 온도는 증가한다. I → II 과정(등압 팽창)에서도 온도가 증가하므로, 기체의 온도는 III에서가 I에서보다 높다. (○)
- ㄷ. II → III 과정은 B → A 과정에 해당한다. (×)

예제 5 ㄴ

- ㄱ. A → B → C 과정에서 기체가 한 일(+)과 C → D → A 과정에서 기체가 받은 일(-)의 합이 W 이다. (×)
- ㄴ. A → B 과정은 고열원으로부터 $5Q$ 의 열을 흡수하는 과정, C → D 과정은 저열원으로 $3Q$ 의 열을 방출하는 과정이다. 다른 과정은 단열 과정이므로 열 출입이 없다. (○)
- ㄷ. 열기관의 열효율은 $\frac{5Q - 3Q}{5Q} = 40\%$ 이다. (×)

예제 6 ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㄱ. 열효율이 0.2이므로 $0.2 \times Q_1 = W$, $Q_1 = 5W$ 이다. 따라서 $Q_2 = Q_1 - W = 4W$ 이다. (○)
- ㄴ. A → B 과정은 등적 가열 과정이므로 $Q = \Delta U$ 이다. 따라서 기체는 열을 흡수하여 내부 에너지가 증가한다. (○)
- ㄷ. B → C 과정은 단열 과정이므로 $0 = \Delta U + W$ 이다. 따라서 기체가 한 일은 내부 에너지 감소량과 같다. (○)

예제 9 60J, 50J, 20J

- ☞ **[열효율]** 열을 흡수하는 과정은 B→C 과정뿐이고, 열을 방출하는 과정은 D→A 과정뿐이므로, 기체가 저열원으로 방출한 열량 $Q_{DA} = \left(1 - \frac{1}{4}\right) \times 80 = 60\text{J}$ 이다. 그리고 기체가 한 일 $W = 80 \times \frac{1}{4} = 20\text{J}$ 이다.
- ☞ **[내부 에너지]** 내부 에너지가 증가하는 과정은 A→B 과정뿐이므로, $E_{AB} = 50\text{J}$ 이다.

예제 10 30J, 30J, 150J

- ☞ **[열효율]** 열을 흡수하는 과정은 B→C 과정과 C→D 과정이고 열을 방출하는 과정은 D→A 과정과 A→B 과정이다. 따라서 흡수한 열량 $Q_1 = E_{BC} + W_{CD} + 20$ 이고 방출한 열량 $Q_2 = E_{DA} + 110$ 이므로, $0.3 = \frac{60}{E_{BC} + W_{CD} + 20}$, $E_{BC} + W_{CD} = 180\text{J}$ 이다.
- ☞ **[내부 에너지]** 한 번의 순환 과정 동안 기체의 내부 에너지 변화는 없으므로, $E_{BC} = E_{DA}$ 이다.
- ☞ 한 번의 순환 과정 동안 기체가 외부에 한 일 $Q_1 - Q_2 = E_{BC} + W_{CD} + 20 - E_{DA} - 110 = 60\text{J}$ 이므로 $W_{CD} = 150\text{J}$ 이다. 앞서 얻은 식에 대입하면 $E_{BC} = E_{DA} = 180 - 150 = 30\text{J}$ 이다.

예제 11 160J, 200J, 180J

- ☞ **[열효율]** 열을 흡수하는 과정은 B→C 과정과 C→D 과정이고 열을 방출하는 과정은 D→A 과정과 A→B 과정이다. 따라서 흡수한 열량 $Q_1 = W_{CD} + 160$ 이고, 방출한 열량 $Q_2 = E_{DA} + 20$ 이므로, $0.5 = \frac{W_{CD} - E_{DA} + 140}{W_{CD} + 160}$, $2E_{DA} - W_{CD} = 120\text{J}$ 이다.
- ☞ **[내부 에너지]** 한 번의 순환 과정 동안 기체의 내부 에너지 변화는 없으므로, $E_{DA} = 160\text{J}$ 이다. 앞서 얻은 식에 대입하면 $W_{CD} = 2 \times 160 - 120 = 200\text{J}$ 이다.
- ☞ 한 번의 순환 과정 동안 기체가 외부에 한 일 $W = 200 - 20 = 180\text{J}$, 혹은 $W = 0.5 \times (200 + 160) = 180\text{J}$ 이다.

예제 12 25J, 50J, 100J, 75J, $\frac{3}{5}$

- ☞ A→B 과정은 단열 과정이므로 $E_{AB} = 25\text{J}$ 이다. 마찬가지로 C→D 과정도 단열 과정이므로 $W_{CD} = 100\text{J}$ 이다.
- ☞ **[내부 에너지]** 한 번의 순환 과정 동안 기체의 내부 에너지 변화는 없으므로, $E_{AB} + 125 = 100 + E_{DA}$ 로부터 $E_{DA} - E_{AB} = 25\text{J}$ 이다. 따라서 $E_{DA} = 50\text{J}$ 이다.
- ☞ **[열효율]** 흡수한 열량 $Q_1 = 125\text{J}$ 이고 방출한 열량 $Q_2 = 50\text{J}$ 이므로, $e = \frac{125 - 50}{125} = \frac{3}{5}$ 이고, $W = eQ_1 = 75\text{J}$ 이다.

예제 13 ㄱ, ㄴ, ㄷ

- ㄱ. A → B 과정에서 기체의 압력이 P_0 로 일정하므로 기체의 상태는 $(P_0, V_0, T_0) \Rightarrow (P_0, 3V_0, 3T_0)$ 으로 변화한다. 이때 기체의 온도가 증가($T_0 \rightarrow 3T_0$)하므로 내부 에너지도 그에 비례하여 증가($U_0 \rightarrow 3U_0$)한다. (○)
- ㄴ. A → B 과정에서 기체의 압력이 P_0 로 일정하므로, 기체는 외부에 $P_0 \times (3V_0 - V_0) = 2P_0V_0$ 의 일을 한다. 정리하면 $Q_1 = 2U_0 + 2P_0V_0$ 이다. 이후 B → C 과정에서 기체의 부피가 $3V_0$ 으로 일정하므로 기체의 상태는 $(P_0, 3V_0, 3T_0) \Rightarrow \left(\frac{1}{3}P_0, 3V_0, T_0\right)$ 으로 변화한다. 부피 변화가 없으므로 기체가 한 일은 0이고, 기체의 온도가 감소($3T_0 \rightarrow T_0$)하므로 내부 에너지도 그에 비례하여 감소($3U_0 \rightarrow U_0$)한다. 정리하면 $Q_2 = 2U_0$ 이다. 열기관의 열효율은 흡수한 열 Q_1 과 방출한 열 ($Q_2 + Q$)를 이용하여 계산하면 $\frac{Q_1 - (Q_2 + Q)}{Q_1} < \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1}$ 이다. (○)
- ㄷ. C → A 과정에서 기체의 상태는 $\left(\frac{1}{3}P_0, 3V_0, T_0\right) \Rightarrow (P_0, V_0, T_0)$ 으로 변화한다. 온도 변화가 없으므로 내부 에너지 변화량은 0이고, 부피가 감소하므로 외부로부터 일을 받는다. 받은 일의 양은 삼각형의 넓이 $\frac{1}{2} \times \left(P_0 + \frac{1}{3}P_0\right) \times (3V_0 - V_0) = \frac{4}{3}P_0V_0$ 보다 작다. 따라서 방출한 열량을 Q 라 두면 $Q < \frac{4}{3}P_0V_0$ 이다. 기체가 한 번 순환하는 동안 한 일은 $W = 2P_0V_0 - Q$ 이므로 정리하면 $W > \frac{2}{3}P_0V_0$ 이다. (○)

예제 14 $\frac{1}{12}P_0V_0$

- ① (나)에서 기체의 압력 P 는 $\frac{P_0V_0}{T_0} = \frac{P \times \frac{3}{2}V_0}{2T_0}$ 으로부터 $P = \frac{4}{3}P_0$ 이다.
- ② (가) → (나) 과정에서 기체의 압력은 $P_0 \rightarrow \frac{4}{3}P_0$ 으로 증가하며, 대기압을 뺀 값 (= 용수철에 의한 압력)은 $0 \rightarrow \frac{1}{3}P_0$ 으로 증가한다.
- ③ 기체가 용수철에 한 일 $W = \frac{0 + \frac{1}{3}P_0}{2} \times \left(\frac{3}{2}V_0 - V_0\right) = \frac{1}{12}P_0V_0$ 이고, 이는 용수철의 탄성력에 의한 퍼텐셜 에너지 증가량과 같다. 따라서 용수철의 탄성력에 의한 퍼텐셜 에너지 증가량은 $\frac{1}{12}P_0V_0$ 이다.

예제 15 $2V_B$

- ① (가)에서 같은 양의 동일한 이상 기체 A와 B는 금속판으로 맞닿아 있으므로 온도 및 내부 에너지가 $3E_0$ 으로 같다.
- ② 탄성력에 의한 퍼텐셜 에너지는 (나)에서가 (가)에서의 4배이므로, 용수철이 피스톤에 작용하는 압력은 (나)에서가 (가)에서의 2배이다.
- ③ (나)에서도 A와 B의 온도 및 내부 에너지가 같으므로 이를 $E + 3E_0$ 으로 두면, 열역학 제 1법칙에 의하여 A에 가한 열량 $21E_0 = E + E + (4E_0 - E_0)$, $E = 9E_0$ 이다.
- ④ (나)에서 B의 내부 에너지는 $12E_0$ 이므로 온도는 (가)에서의 4배이고, 압력은 (가)에서의 2배이므로, $PV \propto T$ 로부터 B의 부피는 (가)에서의 2배인 $2V_B$ 이다.

