

열역학

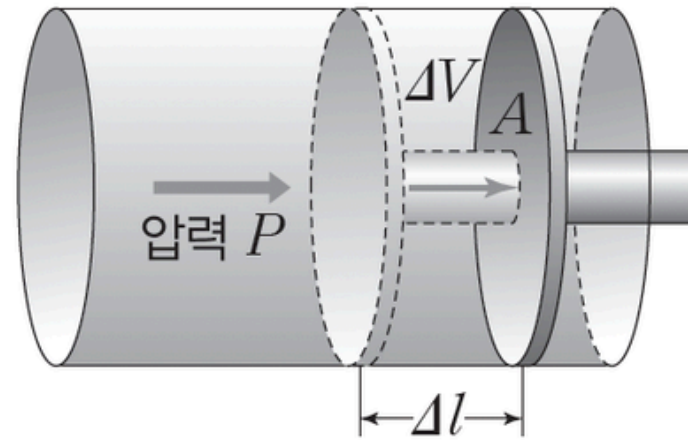


① 온도와 열

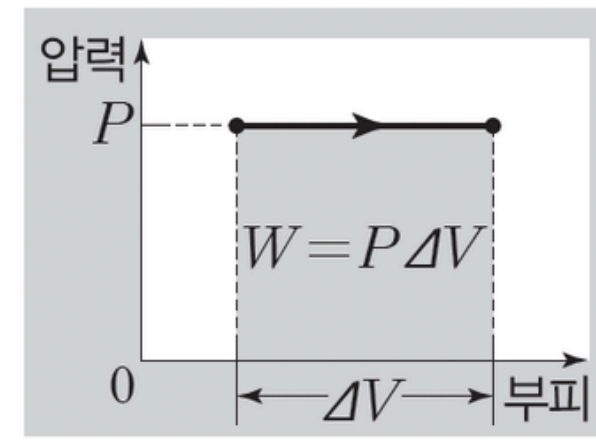
- (1) 온도: 물체의 뜨겁고 차가운 정도를 나타내는 물리량이다.
- (2) 열: 온도가 다른 두 물체 사이에서 이동하는 에너지이다.
- (3) 열평형 상태: 온도가 다른 두 물체 사이에 열이 이동하여 온도가 같아져 더 이상 온도가 변하지 않는 상태이다.

② 열역학 제1법칙

- (1) 기체가 하는 일: 기체가 팽창하면 기체가 외부에 일을 하게 되고, 기체가 외부로부터 일을 받으면 수축하게 된다. 압력이 일정할 때 기체가 하는 일은 다음과 같다.



$$W = F \Delta l = P A \Delta l = P \Delta V$$



압력-부피 그래프에서 그래프 아래 면적은 기체가 외부에 한 일이다.

부피 변화	일의 부호와 의미
증가($\Delta V > 0$)	기체가 외부에 일을 한다. ($W > 0$)
감소($\Delta V < 0$)	기체가 외부로부터 일을 받는다. ($W < 0$)

(2) 기체의 내부 에너지(U): 기체 분자의 운동 에너지와 퍼텐셜 에너지의 총합이다.

① 이상 기체는 분자 사이의 인력이 없으므로 퍼텐셜 에너지가 없다. 따라서 이상 기체의 내부 에너지는 이상 기체 분자의 운동 에너지만의 총합으로 나타난다.

② 이상 기체의 내부 에너지(U)는 기체 분자의 평균 운동 에너지($\overline{E_k}$)에 비례하고, 기체 분자의 평균 운동 에너지는 절대 온도(T)에 비례한다. $\Rightarrow U \propto \overline{E_k} \propto T$

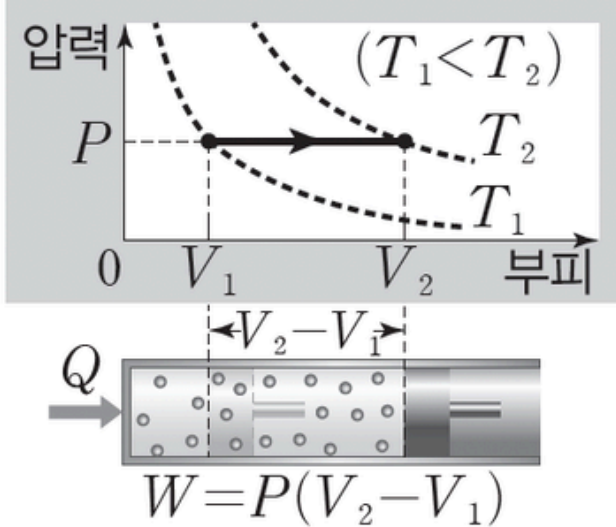
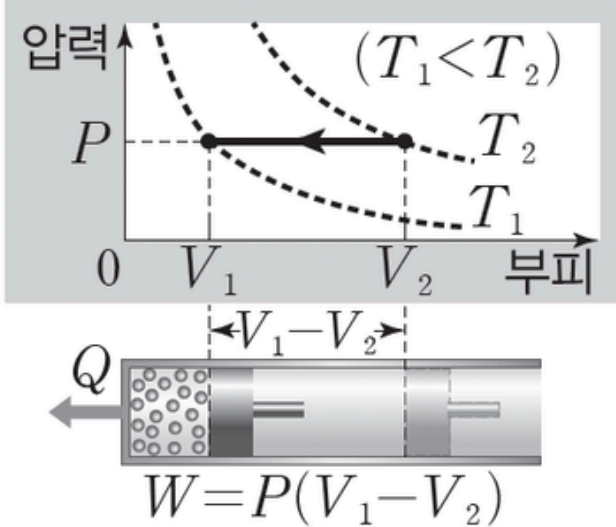
(3) 열역학 제1법칙: 기체의 내부 에너지 증가량(ΔU)은 기체가 흡수한 열량(Q)에서 기체가 외부에 한 일(W)을 뺀 값과 같다.

$$\Delta U = Q - W \Rightarrow Q = \Delta U + W$$

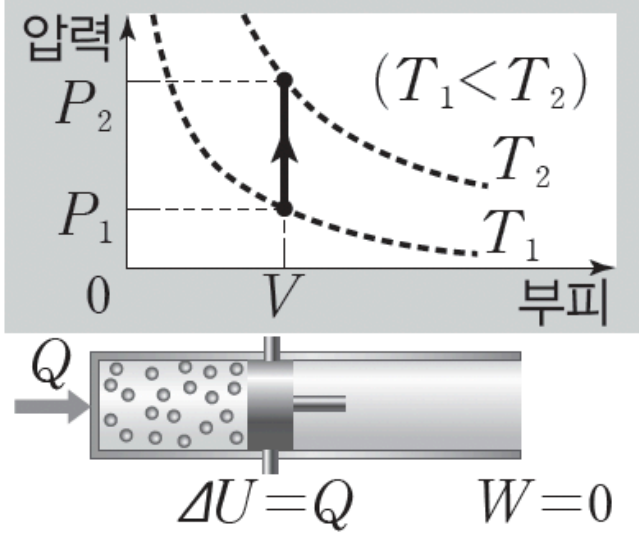
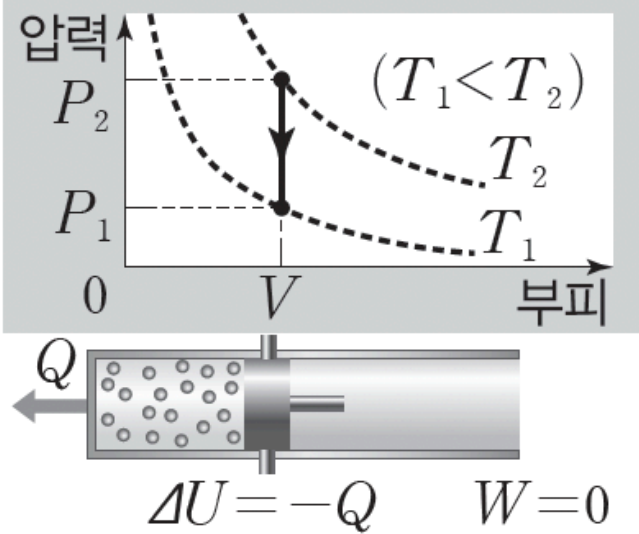
구분	(+)부호의 의미	(-)부호의 의미
Q	기체가 외부로부터 열을 흡수함	기체가 외부로 열을 방출함
ΔU	기체의 내부 에너지가 증가함 (기체의 온도가 올라감)	기체의 내부 에너지가 감소함 (기체의 온도가 내려감)
W	기체가 외부에 일을 함 (기체의 부피가 증가함)	기체가 외부로부터 일을 받음 (기체의 부피가 감소함)

(4) 열역학 과정

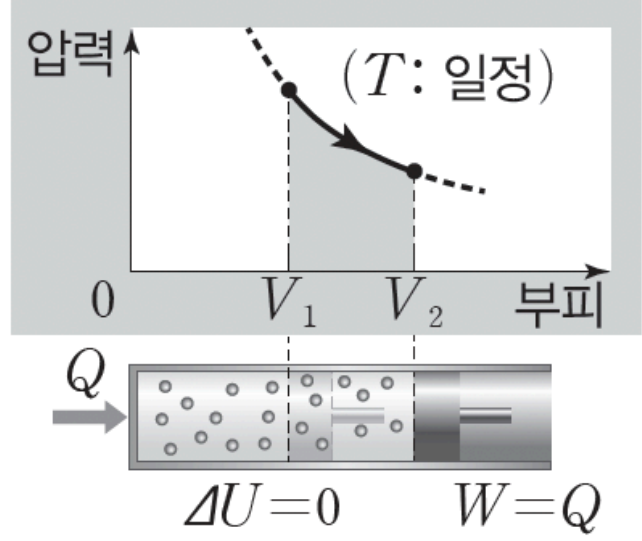
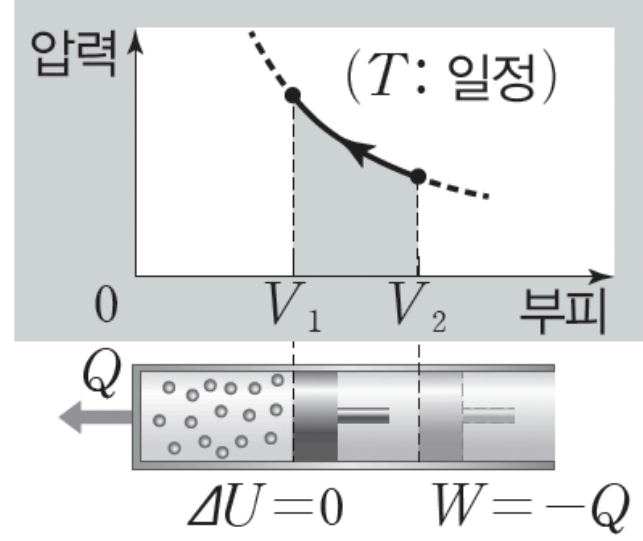
- ① 등압 과정: 기체의 압력이 일정하게 유지되면서 기체의 부피와 온도가 변하는 과정이다. ($\Delta P = 0$)

구분	등압 팽창	등압 수축
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V > 0, W > 0$	$\Delta V < 0, W < 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T > 0, \Delta U > 0$	$\Delta T < 0, \Delta U < 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일과 기체의 내부 에너지 증가량의 합과 같다. ➡ 기체의 부피, 내부 에너지, 절대 온도는 각각 증가한다.	기체가 방출한 열량은 기체가 외부로부터 받은 일과 기체의 내부 에너지 감소량의 합과 같다. ➡ 기체의 부피, 내부 에너지, 절대 온도는 각각 감소한다.

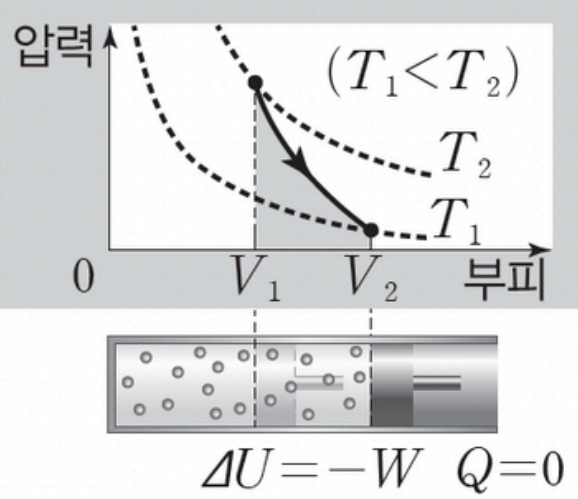
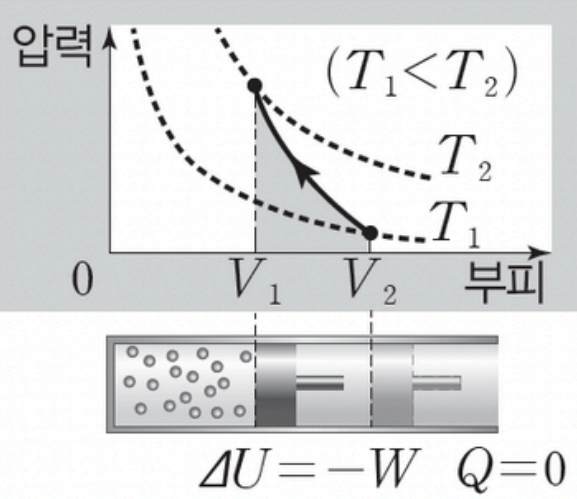
② 등적 과정: 기체의 부피가 일정하게 유지되면서 기체의 압력과 온도가 변하는 과정이다. ($\Delta V = 0, W = 0$)

구분	등적 가열(압력 증가)	등적 냉각(압력 감소)
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V = 0, W = 0$	$\Delta V = 0, W = 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T > 0, \Delta U > 0$	$\Delta T < 0, \Delta U < 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. ➡ 기체의 압력, 내부 에너지, 절대 온도는 각각 증가한다.	기체가 방출한 열량은 기체의 내부 에너지 감소량과 같다. ➡ 기체의 압력, 내부 에너지, 절대 온도는 각각 감소한다.

③ 등온 과정: 기체의 온도가 일정하게 유지되면서 기체의 압력과 부피가 변하는 과정이다. ($\Delta T=0$, $\Delta U=0$)

구분	등온 팽창	등온 압축
압력-부피 그래프		
기체가 외부에 한 일	$\Delta V > 0$, $W > 0$	$\Delta V < 0$, $W < 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T = 0$, $\Delta U = 0$	$\Delta T = 0$, $\Delta U = 0$
특징	기체가 흡수한 열량은 기체가 외부에 한 일과 같다. 기체의 부피는 증가하고, 압력은 감소한다. 압력-부피 그래프 아래의 면적은 기체가 흡수한 열량 또는 기체가 외부에 한 일과 같다.	기체가 방출한 열량은 기체가 외부로부터 받은 일과 같다. 기체의 부피는 감소하고, 압력은 증가한다. 압력-부피 그래프 아래의 면적은 기체가 방출한 열량 또는 기체가 외부로부터 받은 일과 같다.

- ④ 단열 과정: 기체가 외부와의 열 출입이 없는 상태에서 압력, 부피, 온도가 변하는 과정이다. ($Q=0$)

구분	단열 팽창	단열 압축
압력-부피 그래프	 $\Delta U = -W \quad Q = 0$	 $\Delta U = -W \quad Q = 0$
기체가 외부에 한 일	$\Delta V > 0, W > 0$	$\Delta V < 0, W < 0$
내부 에너지 변화	$\Delta T < 0, \Delta U < 0$	$\Delta T > 0, \Delta U > 0$
특징	기체가 외부에 한 일은 기체의 내부 에너지 감소량과 같다. 기체의 부피는 증가하고, 압력과 온도는 감소한다. 압력-부피 그래프 아래의 면적은 기체가 외부에 한 일 또는 기체의 내부 에너지 감소량과 같다.	기체가 외부로부터 받은 일은 기체의 내부 에너지 증가량과 같다. 기체의 부피는 감소하고, 압력과 온도는 증가한다. 압력-부피 그래프 아래의 면적은 기체가 외부로부터 받은 일 또는 기체의 내부 에너지 증가량과 같다.

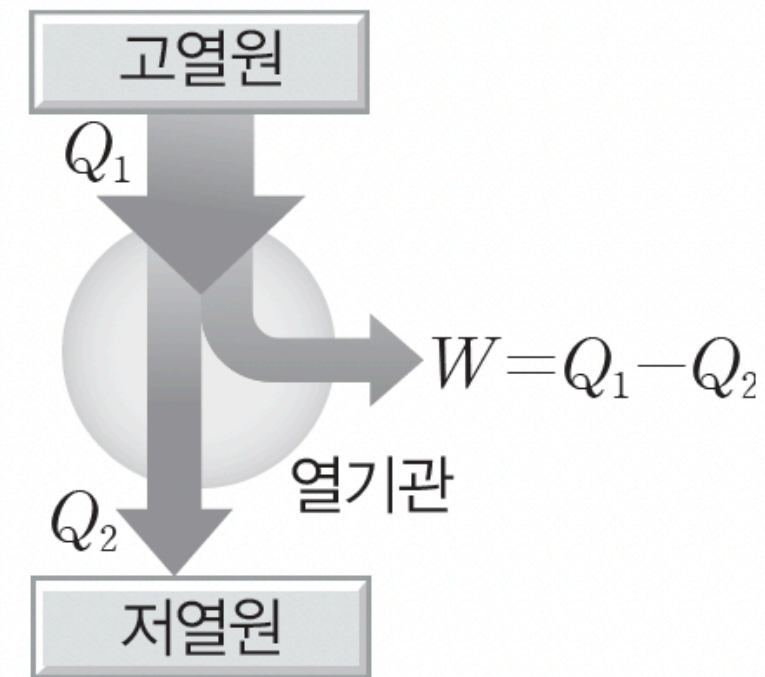
④ 열기관과 열효율

(1) 열기관: 열에너지를 일로 바꾸는 기관이다.

(2) 열기관의 열효율(e)

$$e = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1}$$

➔ 열기관의 열효율 e 는 항상 1보다 작다.



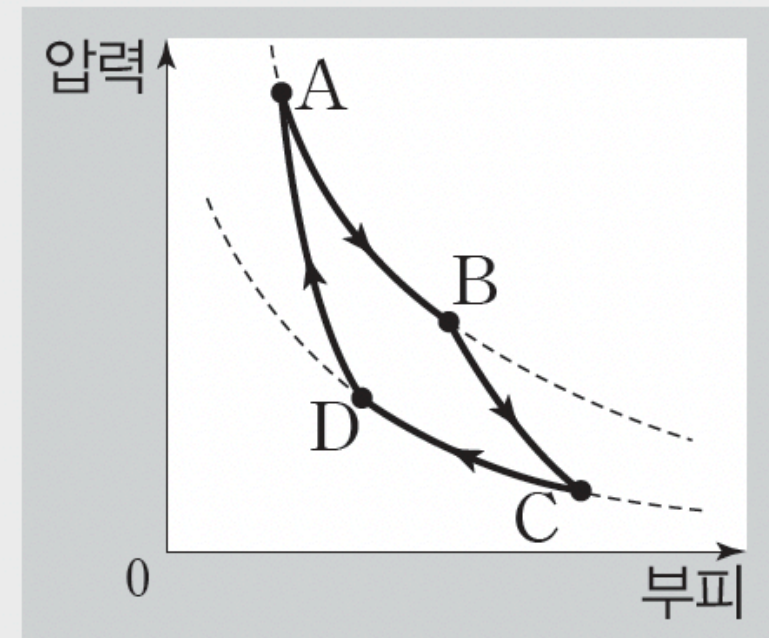
더 알기



카르노 기관

- 카르노 기관은 열효율이 최대인 이상적인 열기관이다.
- 순환 과정: 등온 팽창($A \rightarrow B$) $\rightarrow$ 단열 팽창($B \rightarrow C$) $\rightarrow$ 등온 압축($C \rightarrow D$) $\rightarrow$ 단열 압축($D \rightarrow A$)
- 열효율: 고열원에서 흡수하는 열량 Q_1 과 저열원으로 방출하는 열량 Q_2 가 각각 고온부의 절대 온도 T_1 과 저온부의 절대 온도 T_2 에 비례한다. 따라서 카르노 기관의 열효율은 다음과 같다.

$$e = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (0 \leq e < 1)$$



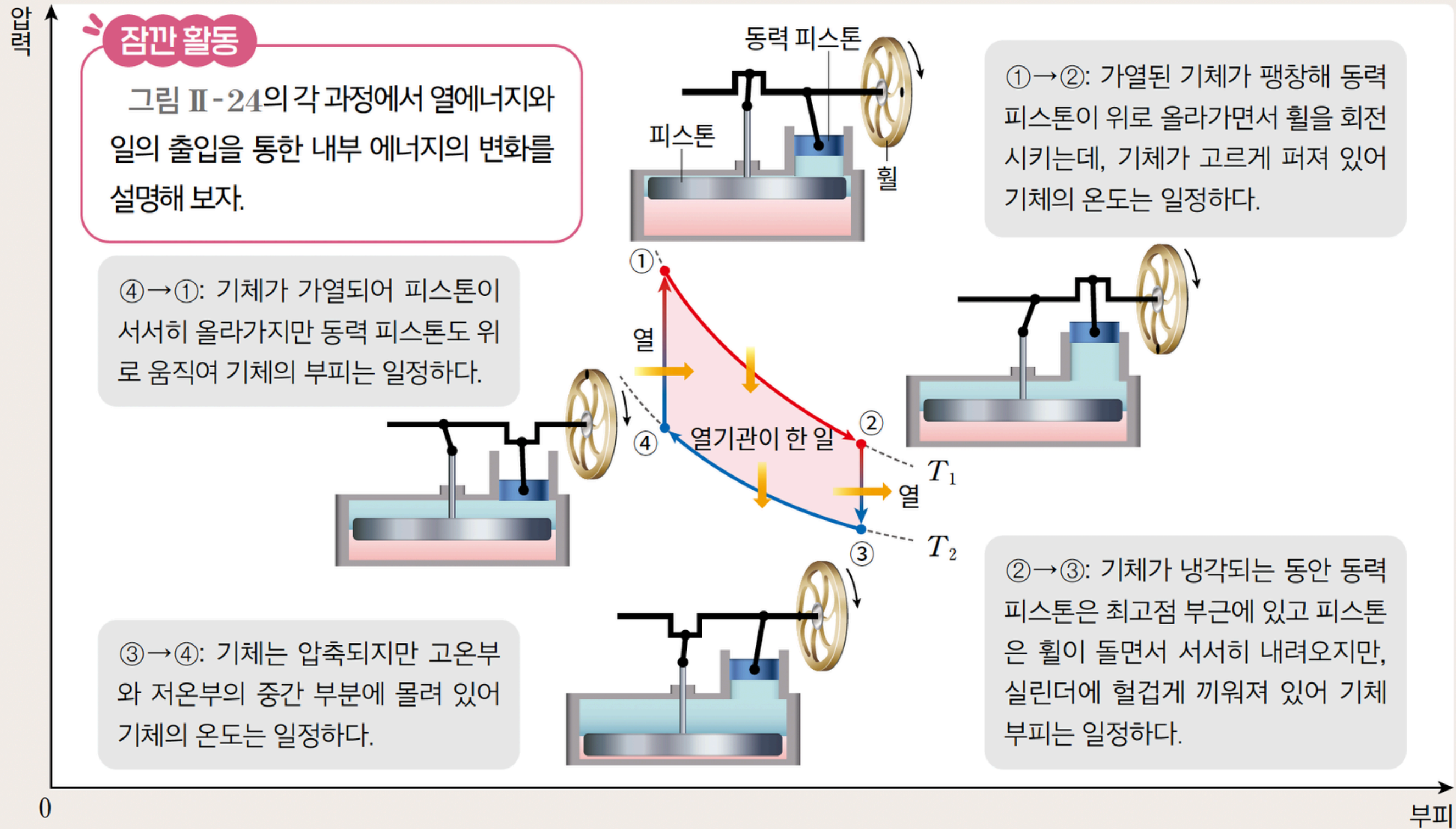


그림 II-24 스텔링 엔진의 열역학 과정

③ 열역학 제2법칙

(1) 가역 현상과 비가역 현상

- ① 가역 현상: 물체가 외부에 어떠한 변화도 남기지 않고 처음의 상태로 되돌아가는 현상이다.

예 역학적 에너지가 보존되는 용수철의 진동, 진공 중에서 마찰 없이 운동하는 진자

- ② 비가역 현상: 어떤 현상이 한쪽 방향으로만 저절로(자발적으로) 일어나지만, 그 반대 방향으로만 저절로 일어나지 않는 현상이다. 가역 현상은 마찰이나 공기 저항이 없는 이상적인 상황에서만 가능하기 때문에 자연 현상은 대부분 한쪽 방향으로만 일어나는 비가역 현상이다.

예 공기 중에서 용수철의 진동 또는 단진자의 감쇠 진동, 열의 이동, 잉크 또는 연기의 확산

(2) 열역학 제2법칙

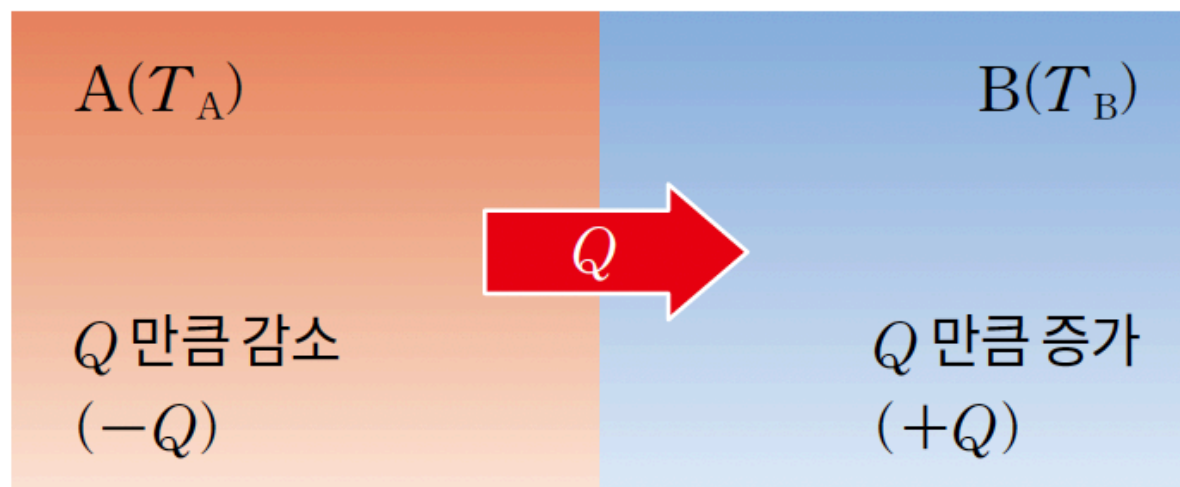
- ① 자연 현상은 대부분 비가역적으로 일어나며, 무질서도가 증가하는 방향으로 일어난다.
- ② 어떤 계를 고립시켜 외부와의 상호 작용을 없애 줄 때 그 계는 더욱더 불규칙한 상태로 변하며, 그 반대 현상은 자발적으로 일어나지 않는다.
- ③ 역학적 에너지는 전부 열에너지로 전환될 수 있으나(마찰열), 열에너지는 전부 역학적 에너지로 전환될 수 없다.
- ④ 열은 항상 고온에서 저온으로 저절로 이동한다.
- ⑤ 고립계에서 자발적으로 일어나는 자연 현상은 항상 확률이 높은 방향으로 진행된다.
- ⑥ 제2종 영구 기관: 열에너지를 모두 일로 바꾸는 기관으로, 열역학 제2법칙에 위배되어 만들 수 없는 열기관이다.

열의 이동과 엔트로피

열이 항상 온도가 높은 물체에서 온도가 낮은 물체로 이동하는 것처럼 자발적으로 일어나는 비가역 현상의 방향성을 보다 정량적으로 이해하기 위해서는 **엔트로피**라는 개념이 필요하다. 엔트로피는 계의 열역학적 상태를 나타내는 물리량의 하나이다. 클라우지우스는 절대 온도가 T 인 열역학적 계가 Q 만큼 열을 흡수할 때 그 계의 엔트로피 증가량 ΔS 를 다음과 같이 정의했다.

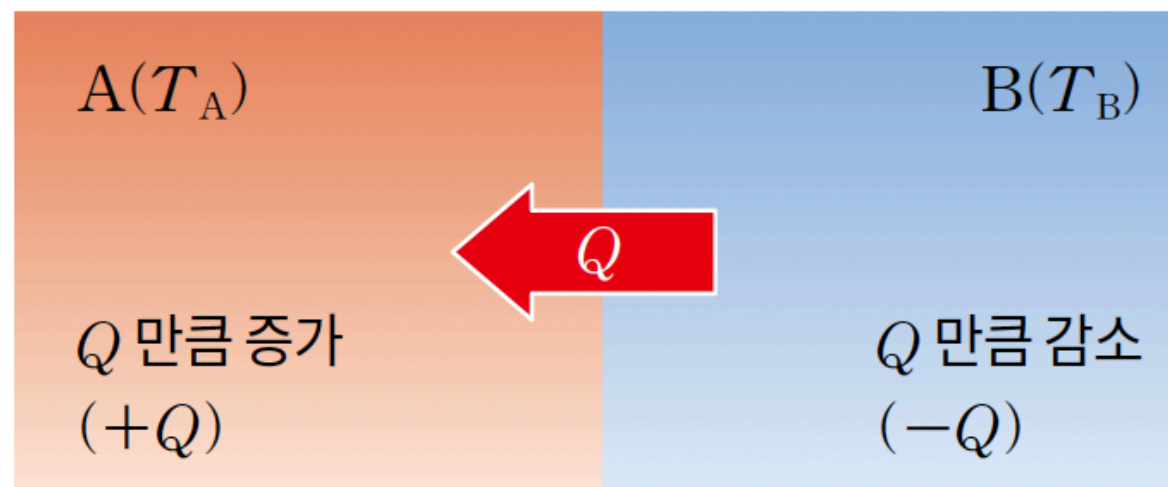
$$\Delta S = \frac{Q}{T}$$

(가)



엔트로피	변화
ΔS_A	$\Delta S_A = -\frac{Q}{T_A}$
ΔS_B	$\Delta S_B = +\frac{Q}{T_B}$
전체 ($\Delta S_A + \Delta S_B$)	$\Delta S = Q\left(-\frac{1}{T_A} + \frac{1}{T_B}\right) > 0$

(나)



엔트로피	변화
ΔS_A	$\Delta S_A = +\frac{Q}{T_A}$
ΔS_B	$\Delta S_B = -\frac{Q}{T_B}$
전체 ($\Delta S_A + \Delta S_B$)	$\Delta S = Q\left(\frac{1}{T_A} - \frac{1}{T_B}\right) < 0$

엔트로피와 카르노 기관

카르노 기관의 각 단계에서 엔트로피 변화는 다음과 같다.

- 등온 팽창: $+\frac{Q_1}{T_1}$
- 단열 팽창: 0($Q=0$ 이므로)
- 등온 압축: $-\frac{Q_2}{T_2}$
- 단열 압축: 0($Q=0$ 이므로)

카르노 기관은 한 번 순환하는 동안 엔트로피 변화의 합이 0인 이상적인 열기관이므로

$\frac{Q_1}{T_1} - \frac{Q_2}{T_2} = 0$ 에서 $\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1}$ 이다.

그림 II-28 열의 이동과 엔트로피 변화