

제6강

열 기관과 제2법칙

우리는 지금까지 열역학의 법칙들을
공부해 왔습니다.

열역학 제0법칙

시스템 A가 시스템 B 및 시스템 C와 각각 열평형 상태에 있으면
시스템 B와 시스템 C는 열평형 상태에 있다.

시스템 C를 온도계thermometer라 하면,
온도계가 잘 작동한다.

열역학 제1법칙

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W$$

에너지는 보존되고, 열과 일은 모두 에너지의 형태이다.

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W$$

등온isothermal 팽창

이상기체의 경우, 내부 에너지는 온도만의 함수이므로,
내부 에너지의 변화가 0이 됩니다.

$$\Delta Q = NkT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

등온isothermal 팽창

이상기체의 경우, 내부 에너지는 온도만의 함수이므로,
내부 에너지의 변화가 0이 됩니다.

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W$$

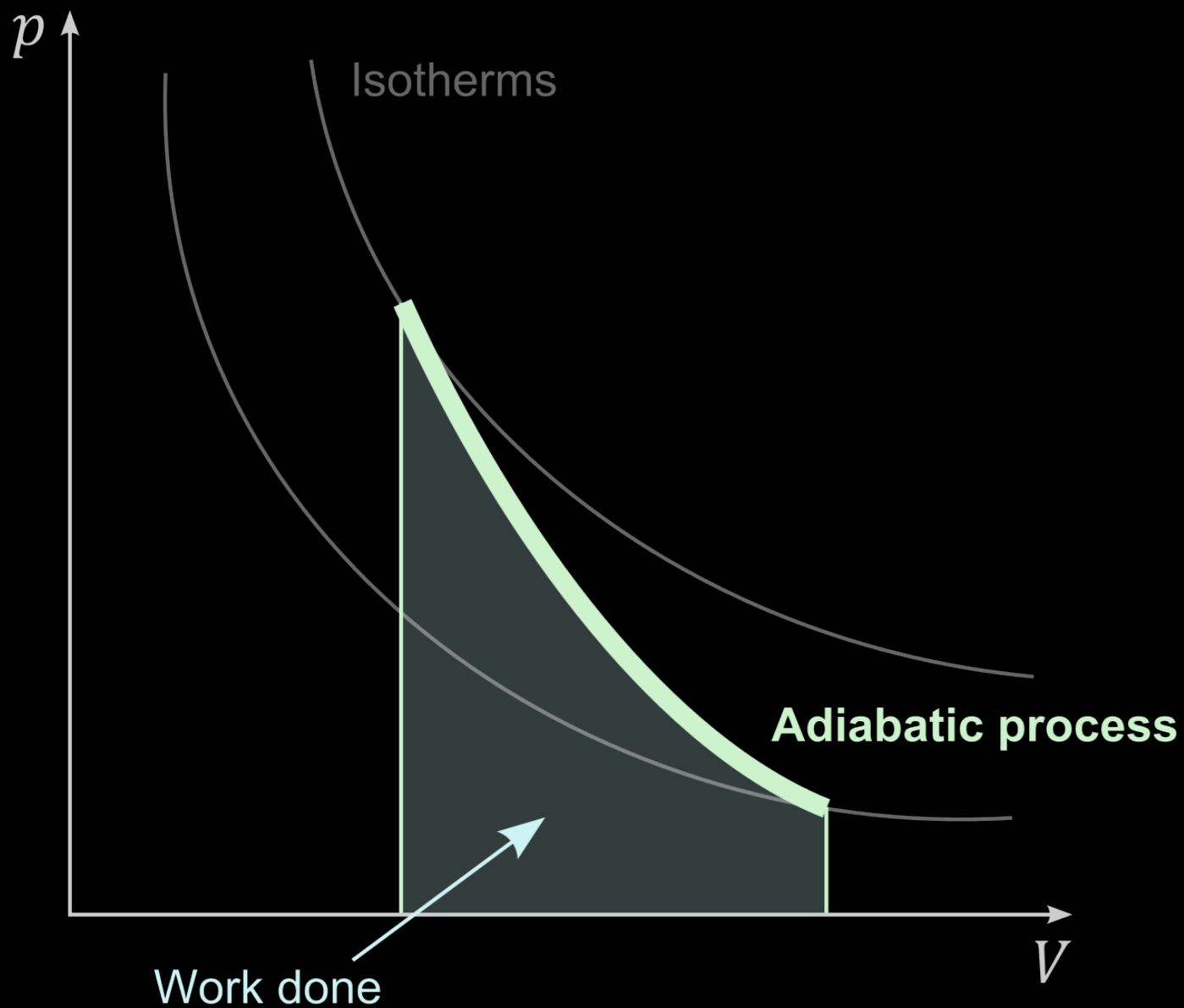
단열adiabatic 팽창

열의 흐름이 없는 경우, 내부 에너지는 일의 변화와 같아집니다.

$$TV^{\gamma-1} = \textit{const}$$

단열adiabatic 팽창

열의 흐름이 없는 경우, 내부 에너지는 일의 변화와 같아집니다.



열역학 제1법칙

$$\Delta E = \Delta Q + \Delta W$$

에너지는 보존되고, 열과 일은 모두 에너지의 형태이다.

이제 우리는 열과 일 사이의 관계,
즉 주어진 열로부터
얼마나 일을 할 수 있는지에 대한
법칙을 찾아봅시다.

열역학 제2법칙 (클라우지우스)

더 차가운 물체로부터 더 뜨거운 물체로 열이 흐르는
유일한 결과를 주는 과정은 불가능하다.

열역학 제2법칙 (켈빈)

열이 일로 완전히 전환되는
유일한 결과를 주는 과정은 불가능하다.

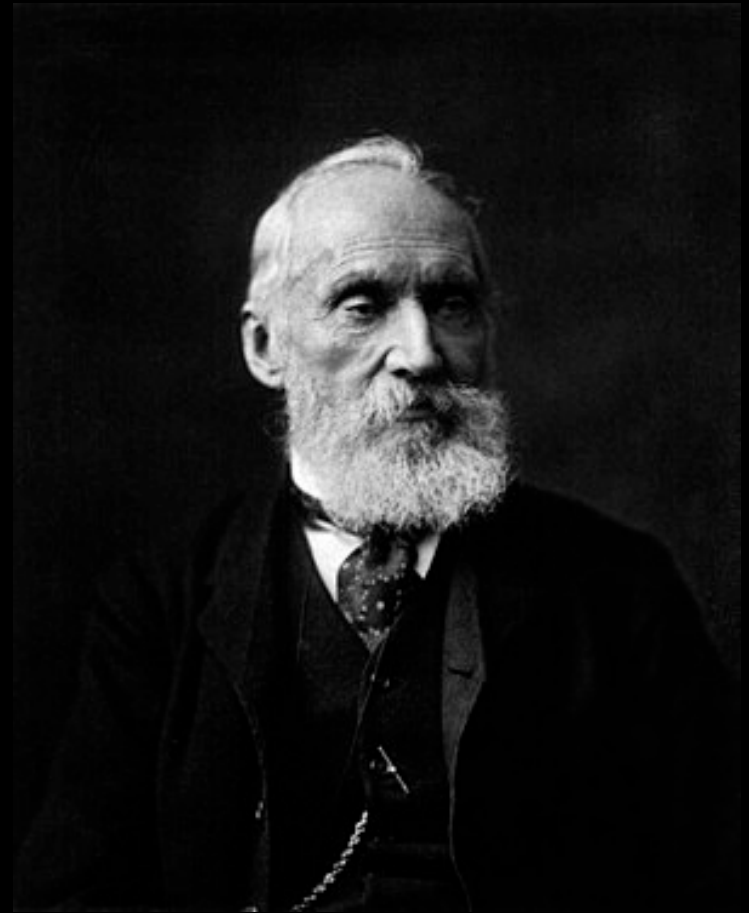
열역학 제2법칙
(엔트로피)

$$dS \geq 0$$

우리는 열역학 제2법칙에 대한
위의 세 가지 표현이 모두
동등한 것임을 확인하게 될 것입니다.



루돌프 율리우스 에마누엘 클라우지우스



제1대 켈빈 남작 윌리엄 톰슨

열역학 제2법칙 정의의 동등성

클라우지우스의 정의

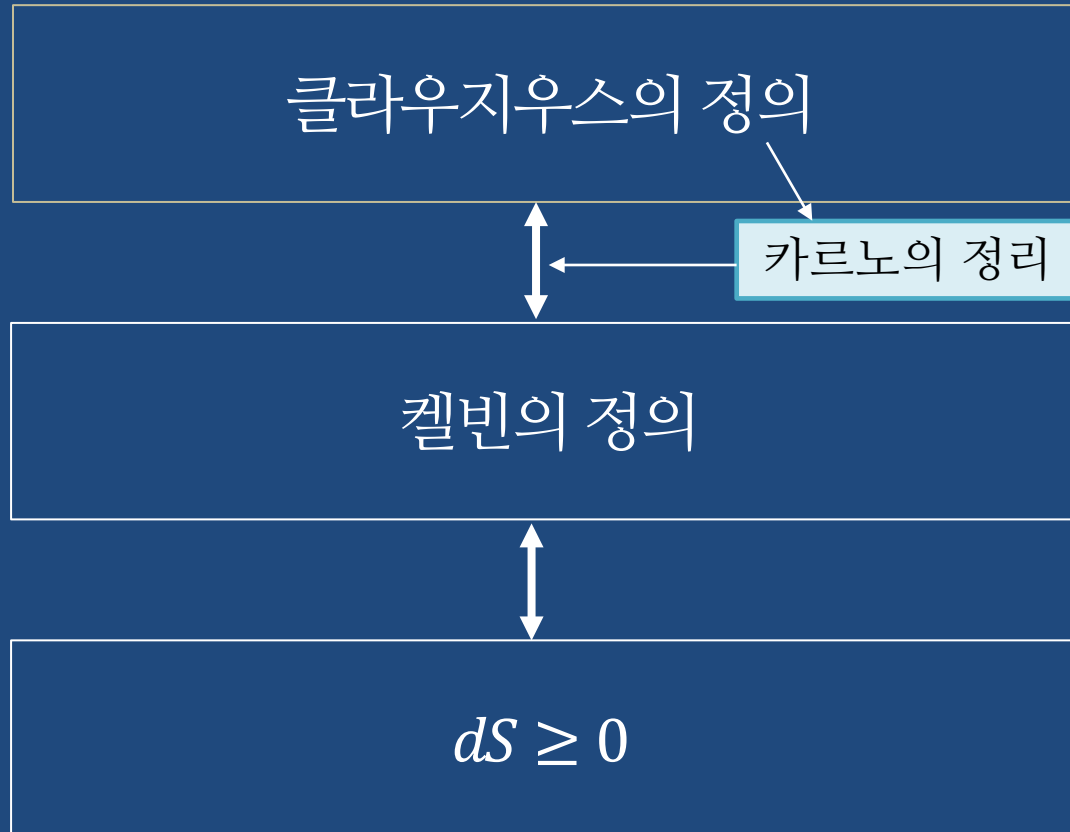


켈빈의 정의

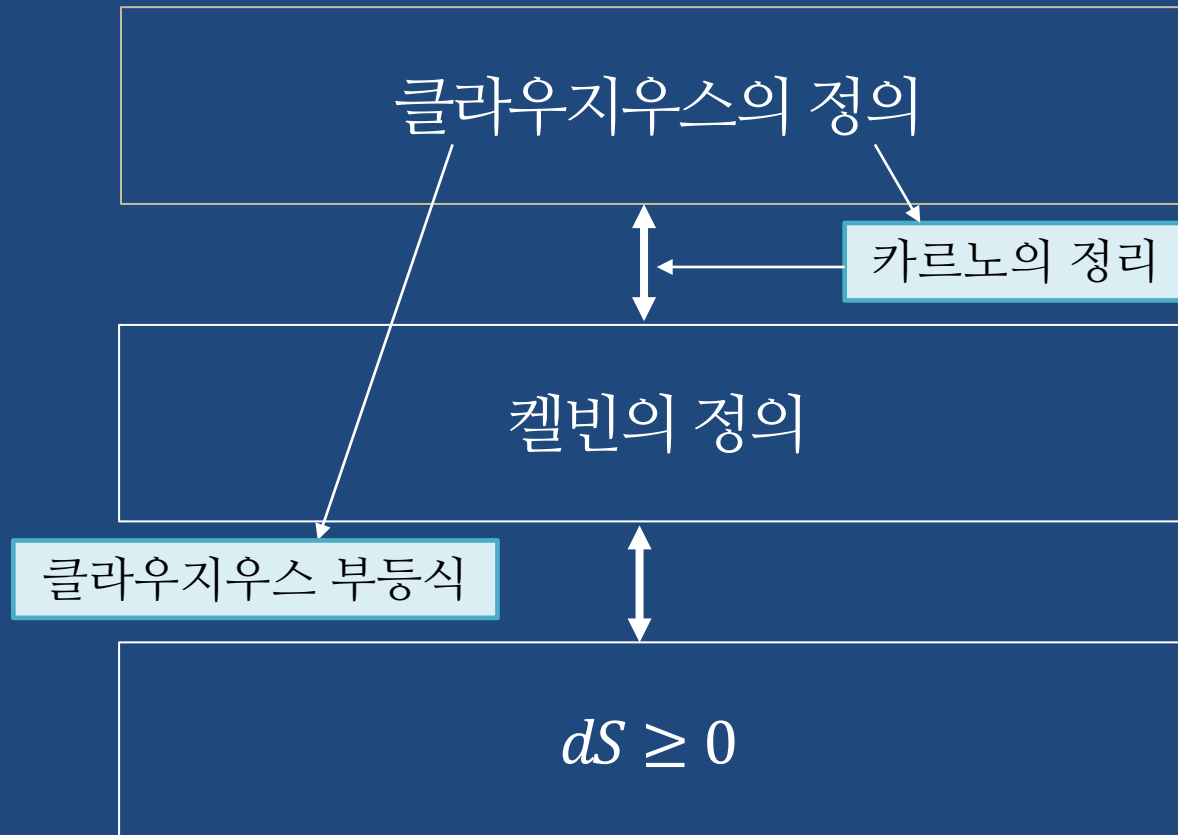


$$dS \geq 0$$

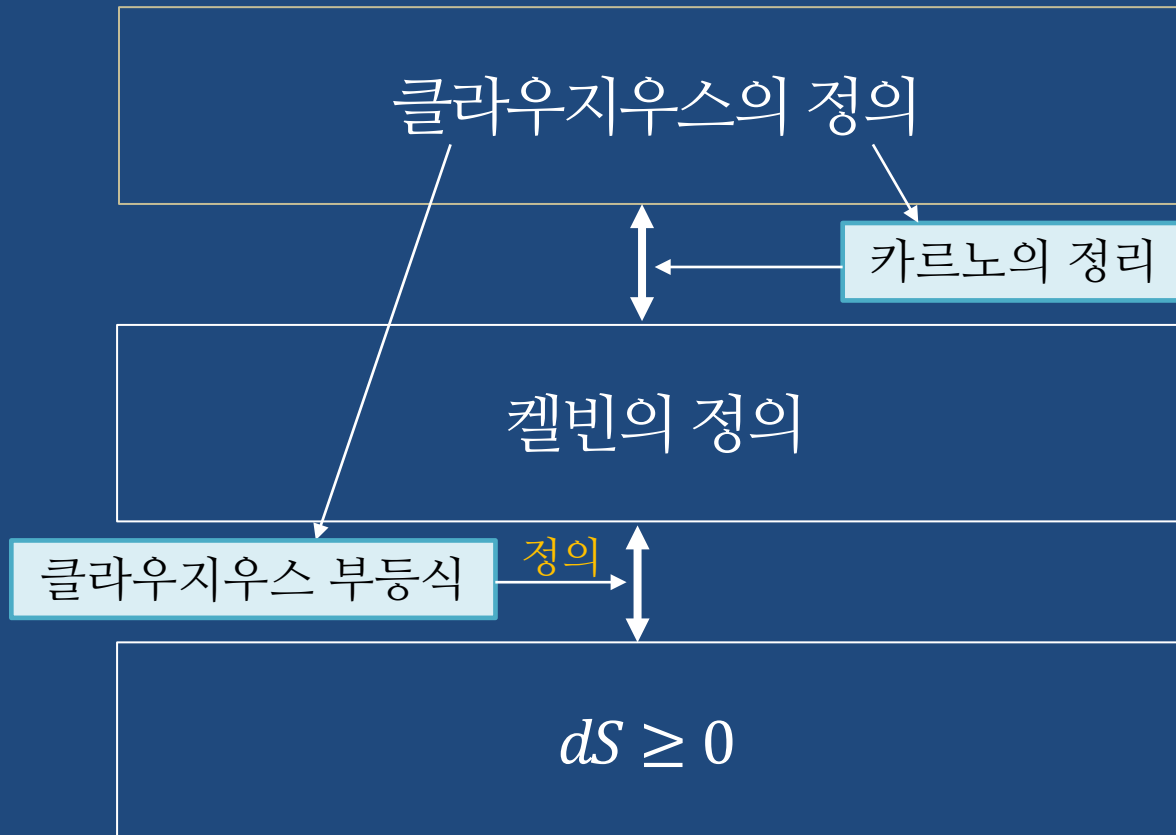
열역학 제2법칙 정의의 동등성



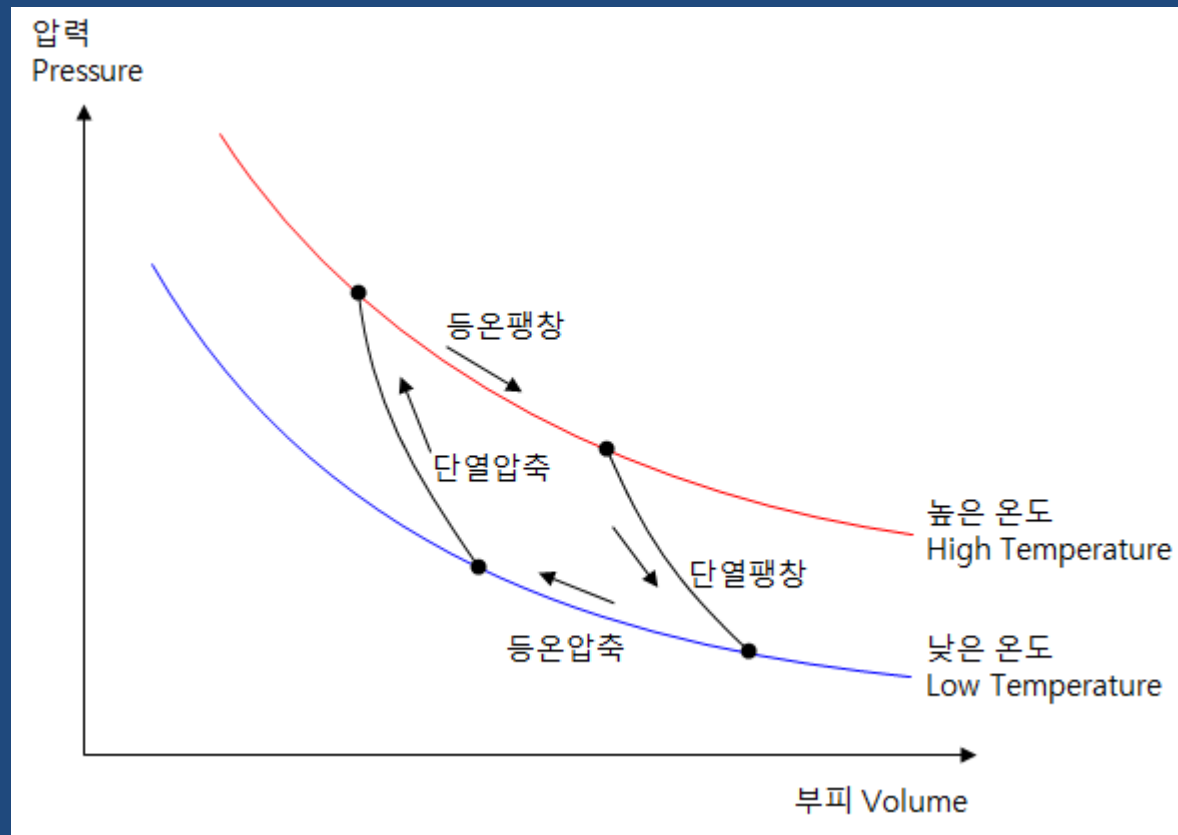
열역학 제2법칙 정의의 동등성



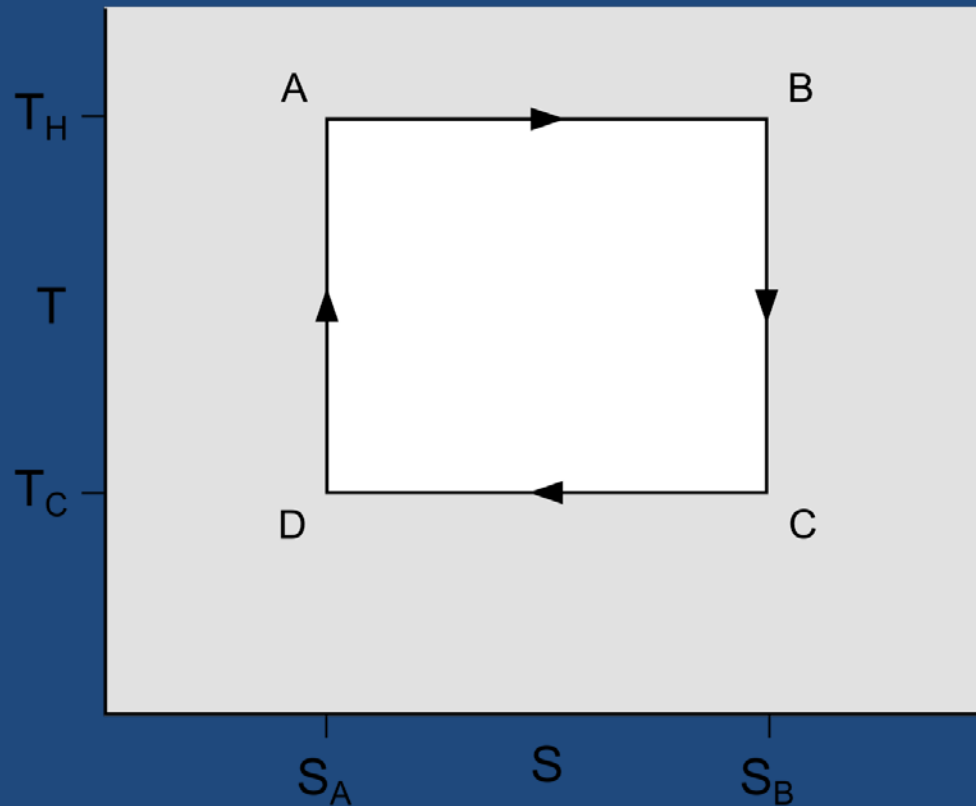
열역학 제2법칙 정의의 동등성



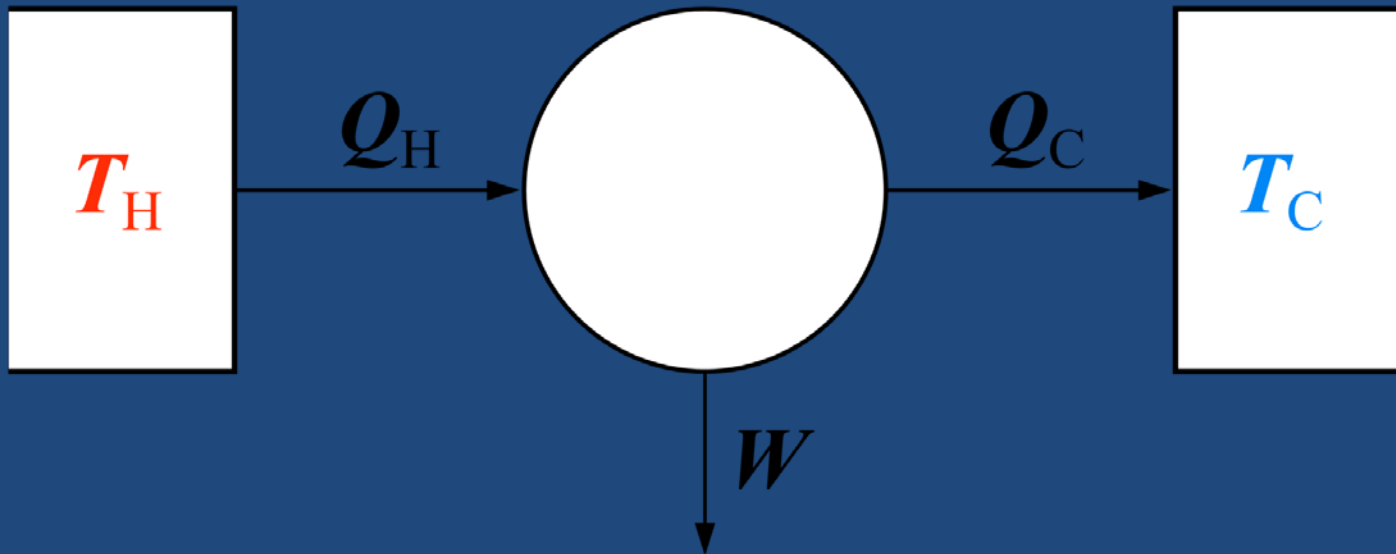
먼저, **카르노 기관**에 대해 알아보시다.
처음에는 단지 하나의 특별한 기관으로 보이지만,
가장 효율적이고 이상적인 기관으로서
열역학 현상의 한계를 보여주는 중요한 사례가 됩니다.



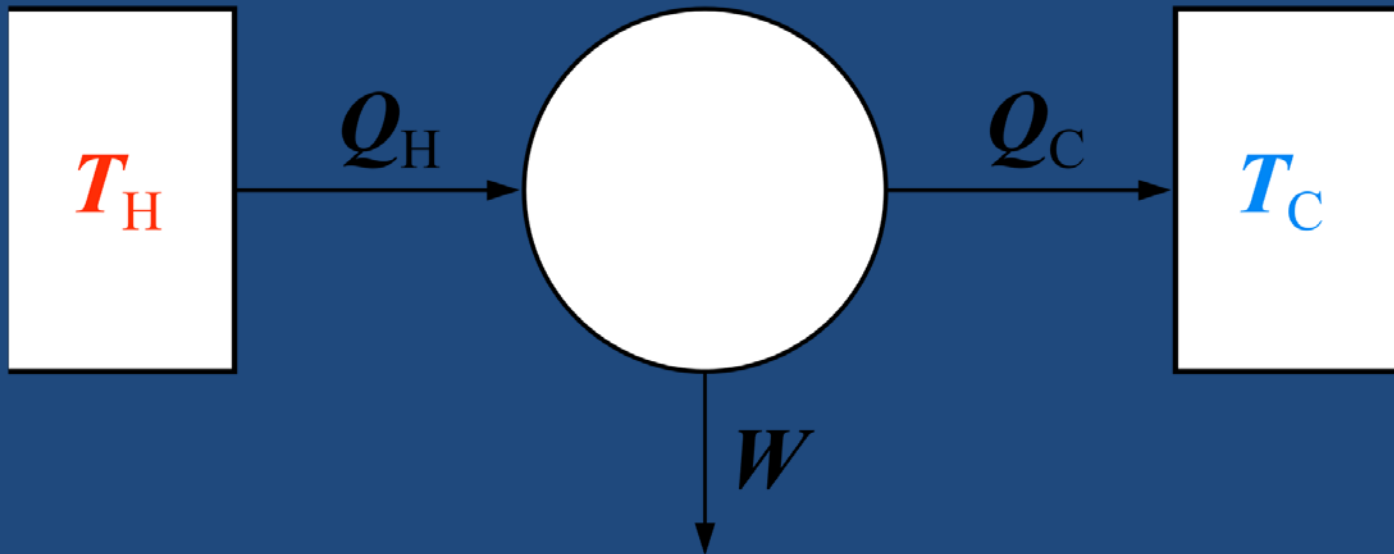
카르노 기관은 등온팽창, 단열팽창, 등온압축, 단열압축의 과정을 거쳐 같은 지점으로 돌아오는 순환과정으로 정의됩니다.



카르노 기관은 등온팽창, 단열팽창, 등온압축, 단열압축의 과정을 거쳐 같은 지점으로 돌아오는 순환과정으로 정의됩니다.

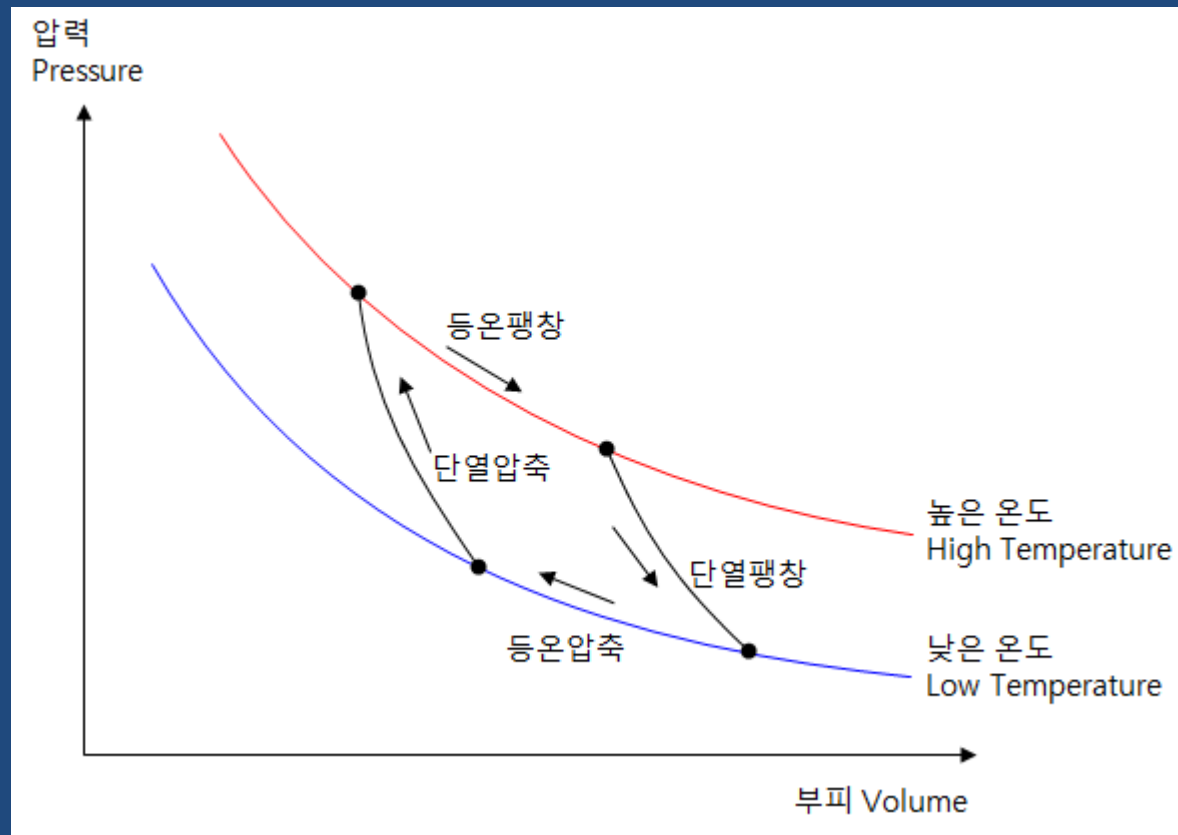


이것은 주어진 열 Q_H 로부터 일 W 을 얻어낸다는 점에서
열 기관heat engine이 됩니다.

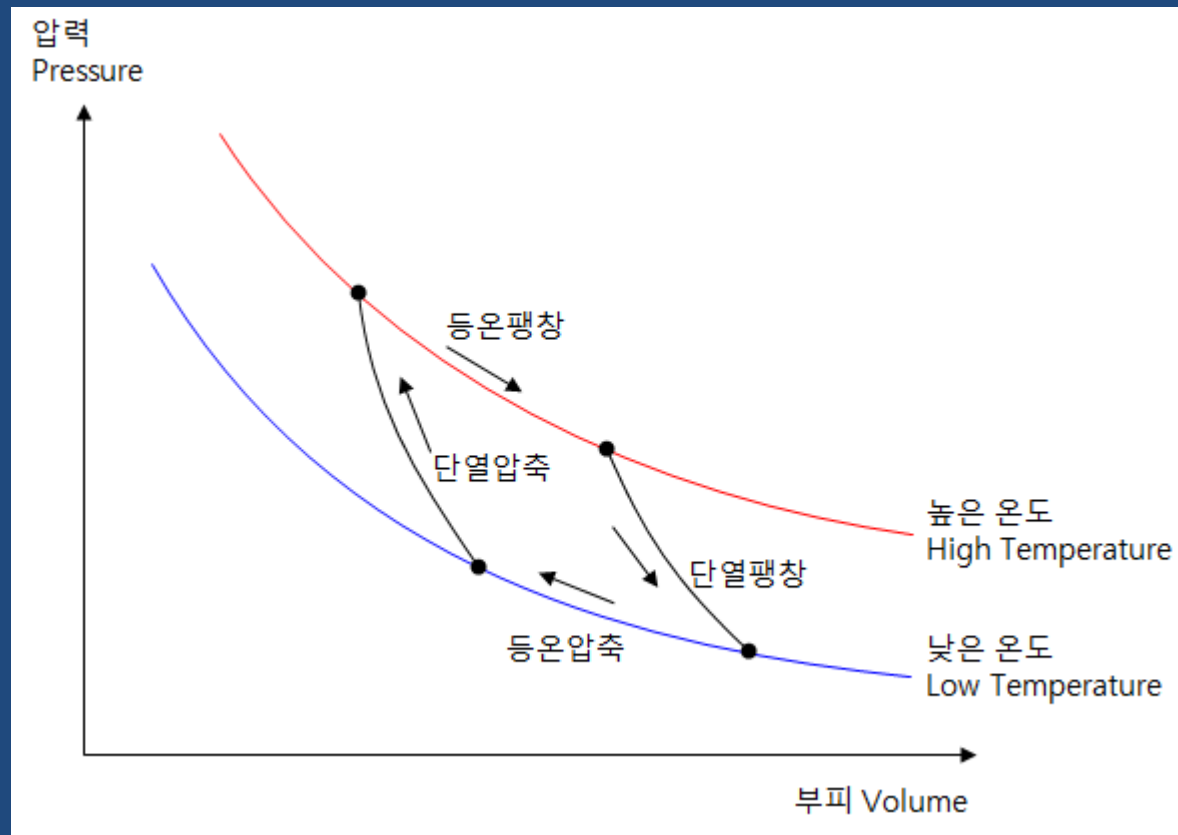


열 기관의 효율

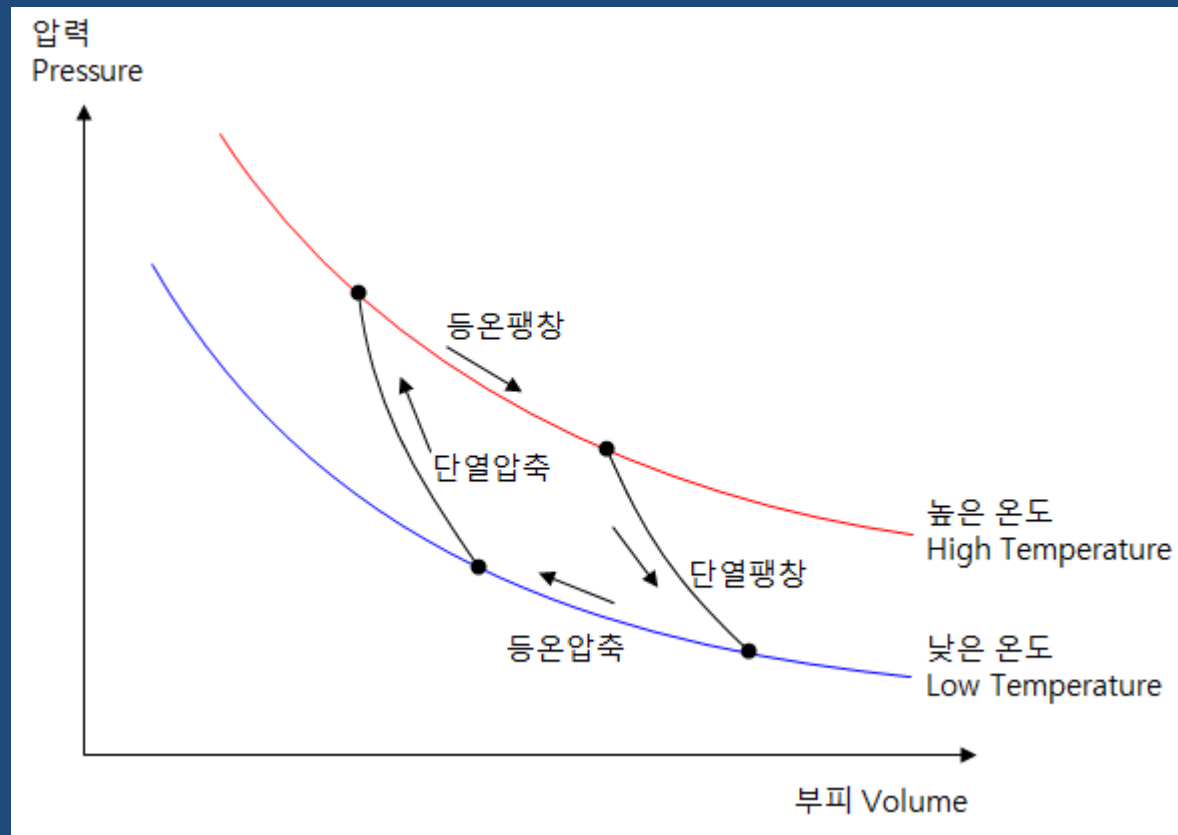
$$\eta \equiv \frac{W}{Q_H}$$



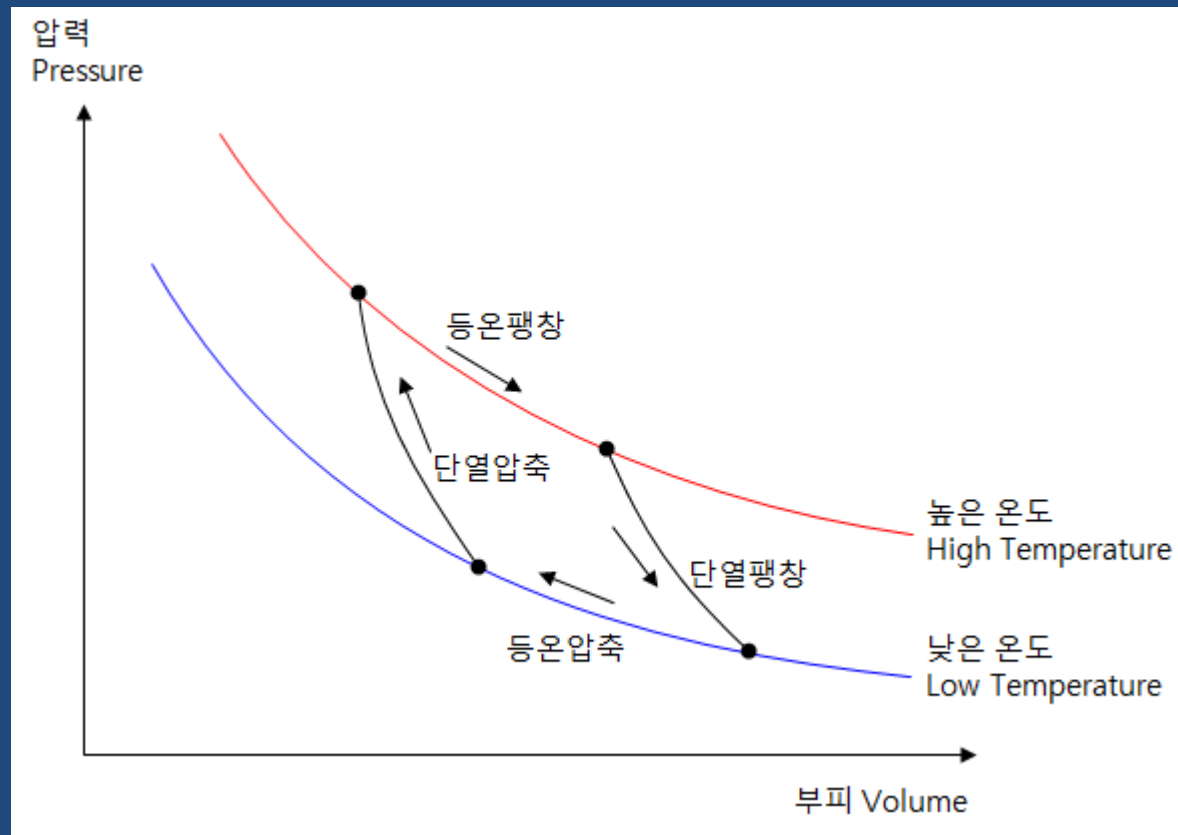
이제 카르노 기관이 한 바퀴 순환할 때,
이 기관에 들어오고 나간 **열**과
이 기관이 한 **일**을 계산해 봅시다.



오직 **등온** 팽창 및 압축 과정에서만 **열**이 들어오고 나갑니다.
 팽창 과정에서는 Q_H 가 들어오고,
 수축 과정에서는 Q_L 만큼 나간다고 합시다.



그리고 **일**은 $p - V$ 다이어그램에서 한 순환을 할 때 닫힌 곡선의 **면적**을 의미합니다.



전체는 순환 과정이므로 내부 에너지의 총 변화는 0입니다.
 따라서 $W = Q_H - Q_L$ 이 됩니다.

$$\Delta Q = NkT \ln \frac{V_2}{V_1}$$

등온isothermal 팽창

이상기체의 경우, 내부 에너지는 온도만의 함수이므로,
내부 에너지의 변화가 0이 됩니다.

$$TV^{\gamma-1} = \textit{const}$$

단열adiabatic 팽창

열의 흐름이 없는 경우, 내부 에너지는 일의 변화와 같아집니다.

$$Q_H = NkT_H \ln \frac{V_B}{V_A}$$

단계 1: 등온 팽창 ($T_H, V_A \rightarrow V_B$)

$$\left(\frac{T_H}{T_L}\right) = \left(\frac{V_C}{V_B}\right)^{\gamma-1}$$

단계 2: 단열 팽창 ($T_H \rightarrow T_L, V_B \rightarrow V_C$)

$$Q_L = -NkT_L \ln \frac{V_D}{V_C}$$

단계 3: 등온 압축 ($T_L, V_C \rightarrow V_D$)

$$\left(\frac{T_L}{T_H}\right) = \left(\frac{V_A}{V_D}\right)^{\gamma-1}$$

단계 4: 단열 압축 ($T_L \rightarrow T_H, V_D \rightarrow V_A$)

$$\frac{Q_H}{Q_L} = \frac{T_H}{T_L}$$

최종적으로 위의 관계를 얻습니다.

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

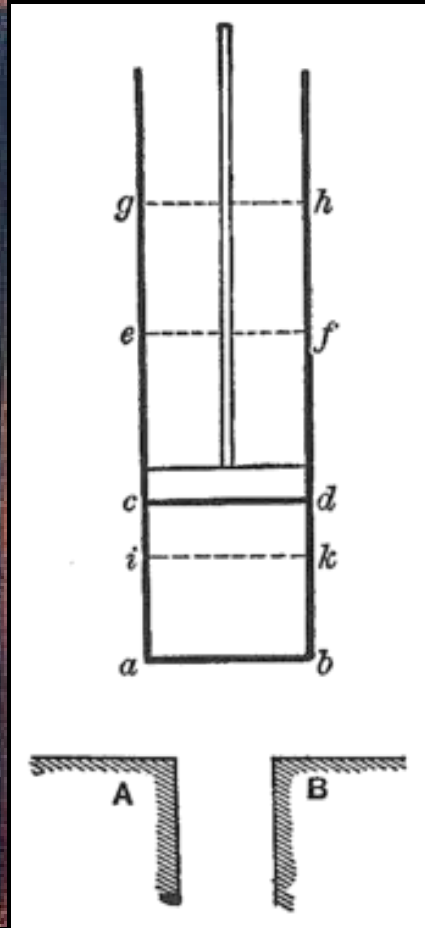
또는 위와 같은 효율을 얻습니다.

$$\eta = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$

여기에서 중요한 것은,
카르노 기관의 효율이 가장 이상적인 효율이라는 것입니다.
그것은 왜일까요?

카르노의 정리

주어진 두 온도 사이에서 동작하는 기관 중
카르노 기관보다 더 효율적인 것은 없다.



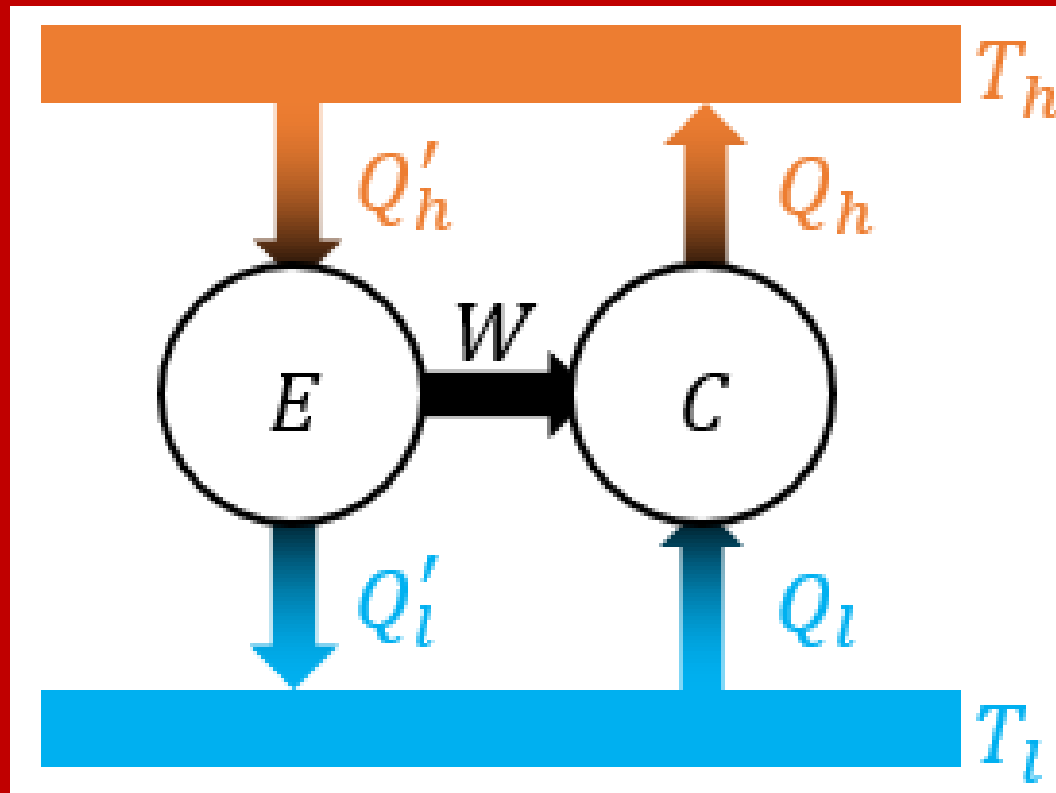
니콜라 레오나르 사디 카르노

“이 원리에 따르면, 추진력을 얻는 데
열의 생산만으로는 충분하지 않다.
더 찬 곳이 있어야 한다는 말이다.
더 찬 곳이 없으면 열은 소용이 없을 것이다.”

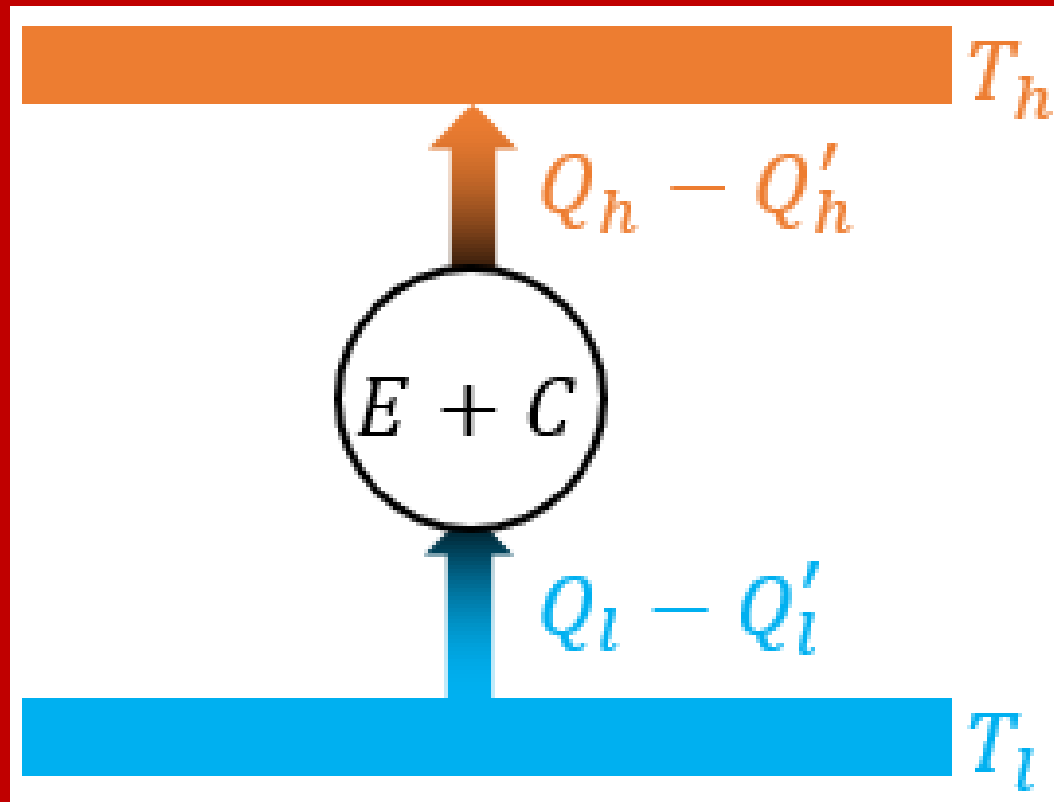
- 사디 카르노, “불의 동력에 관한 고찰” 중

카르노의 정리가 틀렸다면,
카르노 기관보다 더 효율적인 어떤 기관이 존재할 것입니다.

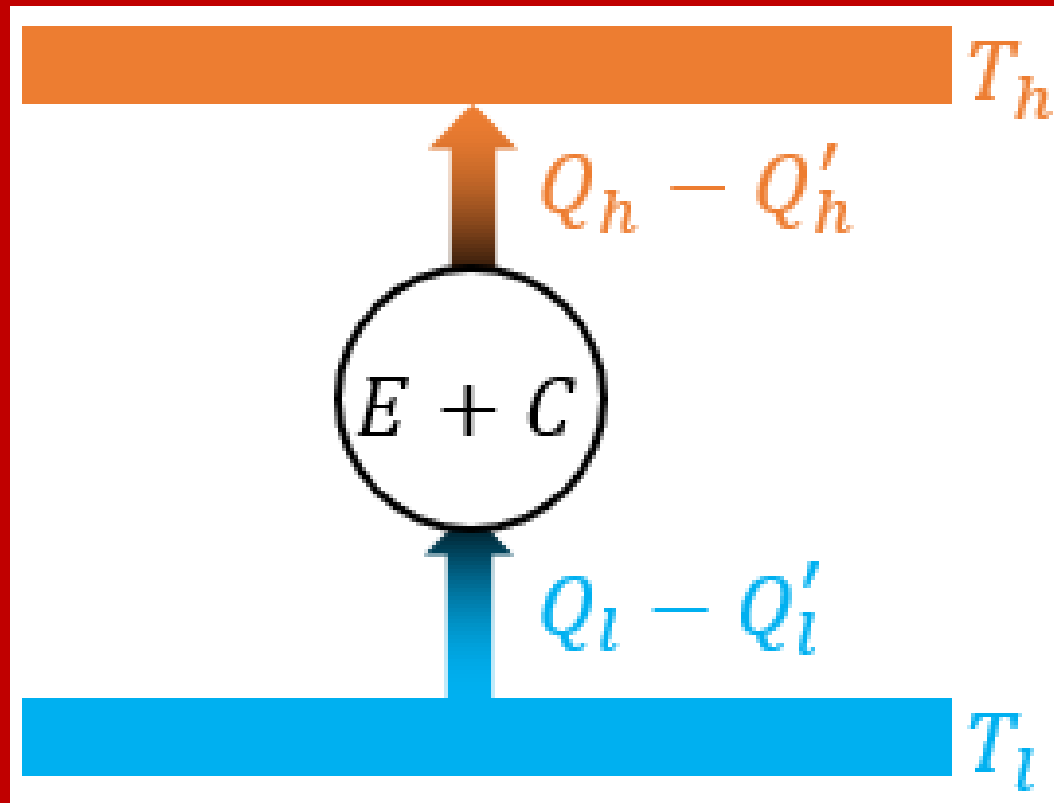
카르노 기관은 **가역 과정**이므로,
카르노 기관보다 더 효율적인 기관과
카르노 기관의 **역과정**을 붙여봅시다.



카르노 기관: C
더 효율적인 기관: E



이 기관은 사실상 낮은 온도에서 높은 온도로
열을 전달하는 것과 같습니다.



그러나 이것은 열역학 제2법칙에 대한
클라우지우스의 정의와 상충합니다.

따름 정리

두 온도에서 동작하는 가역 기관은
모두 카르노 기관과 같은 효율을 가진다.

이 따름 정리는
카르노 기관과 어떤 가역 기관의 역과정을 붙여 놓고 생각하면
쉽게 증명할 수 있습니다.

따라서 우리는 카르노 기관이 가장 효율적이며
모든 가역 기관은 카르노 기관과
같은 효율을 가진다는 것을 보았습니다.

이제 열역학 제2법칙에 대한
클라우지우스와 켈빈의 정의를 비교해 봅시다.

클라우지우스 → 켈빈

어떤 계가 켈빈의 정의를 어긴다면,
열을 완전히 일로 전환할 수 있습니다.
이렇게 켈빈의 정의를 어기는 기관과
카르노 기관의 역과정을 붙여 놓으면,
낮은 온도에서 높은 온도로 열을 옮기는 것이 가능해집니다.
이것은 클라우지우스의 정의와 모순이 생깁니다.

켈빈 → 클라우지우스

어떤 계가 클라우지우스의 정의를 어긴다면,
낮은 온도에서 높은 온도로 열을 옮기는 것이 가능해집니다.
이렇게 가져온 열을 사용해서 카르노 순환을 시키면
마치 열을 완전히 일로 바꿀 수 있는 것처럼 보입니다.
따라서 이것은 켈빈의 정의와 모순이 생깁니다.

열역학 제2법칙 정의의 동등성

클라우지우스의 정의

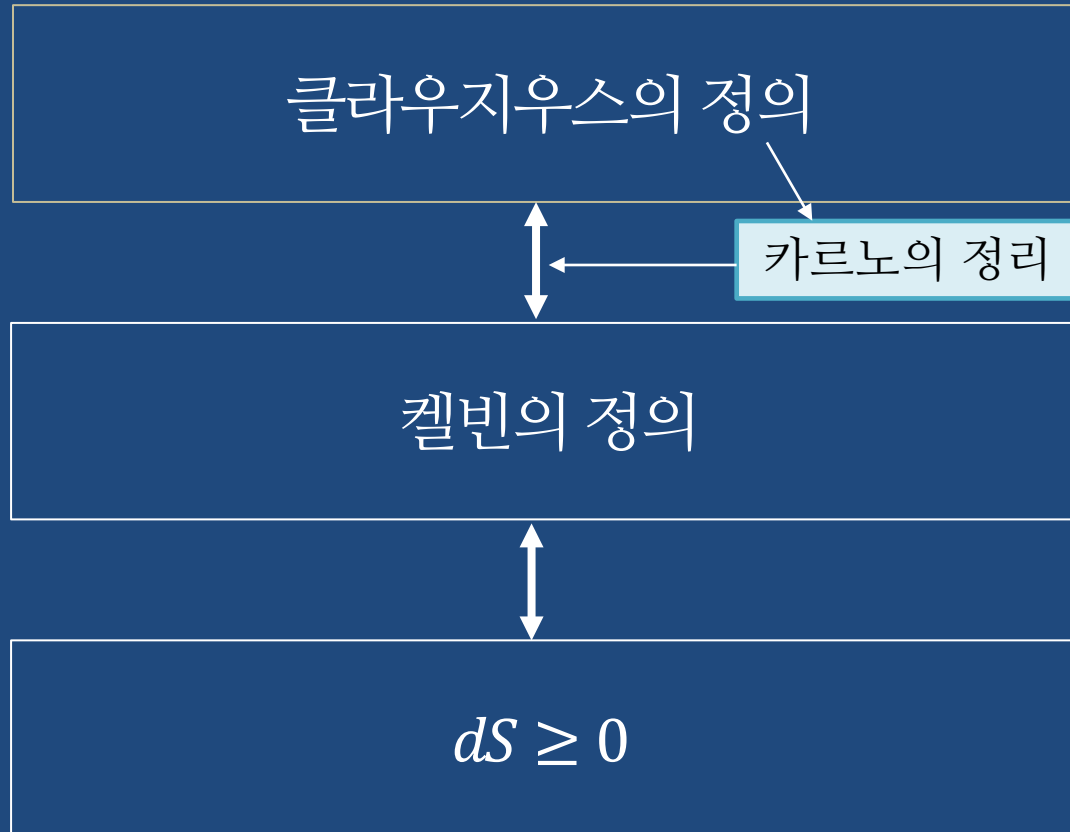


켈빈의 정의



$$dS \geq 0$$

열역학 제2법칙 정의의 동등성



클라우지우스의 정리

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

단, 등호는 가역 과정에서 필요조건으로 성립한다.

임의의 기관을 생각해봅시다.
이것은 가역일 수도 있고 비가역일 수도 있습니다.

이 기관은 매 순간 온도 T_i 로부터 열 dQ_i 를 공급받아
한 순환을 거쳤을 때
알짜 일 $\Delta W = \sum dQ_i$ 를 하게 됩니다.

이제 이 기관에 온도 T 로부터 열을 공급받아
온도 T_i 로 열 dQ_i 를 방출하고
일을 dW_i 만큼 하는 카르노 기관이 설치되어 있다고 합시다.

그러면 다음 관계가 성립합니다.

$$\frac{dQ_i}{T_i} = \frac{dQ_i + dW_i}{T}$$

한편, 이 기관과 여기에 붙어있는 카르노 기관 둘이
한 번 순환을 하면,
마치 외부에서 열을 공급은 받는데
외부로 방출되는 열은 없는 것처럼 보입니다.

이 때 이 두 기관들이 하는 전체 알짜 일은
외부에서 공급한 열을 완전히 일로 바꿀 수는 없으므로
0보다 작은 값이 되어야 합니다.

$$\Delta W + \sum dW_i \leq 0$$

앞의 두 식을 정리해서 다음을 얻습니다.

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

앞의 두 식을 정리해서 다음을 얻습니다.

$$\oint \frac{dQ}{T} \leq 0$$

여기에서 가역 과정인 경우에는 등호가 성립합니다.
그러나 등호가 성립한다고 해서 반드시 가역 과정인 것은 아닙니다.
따라서 등호는 가역 과정에서 필요조건으로 성립합니다.

열역학 제2법칙 정의의 동등성

클라우지우스의 정의

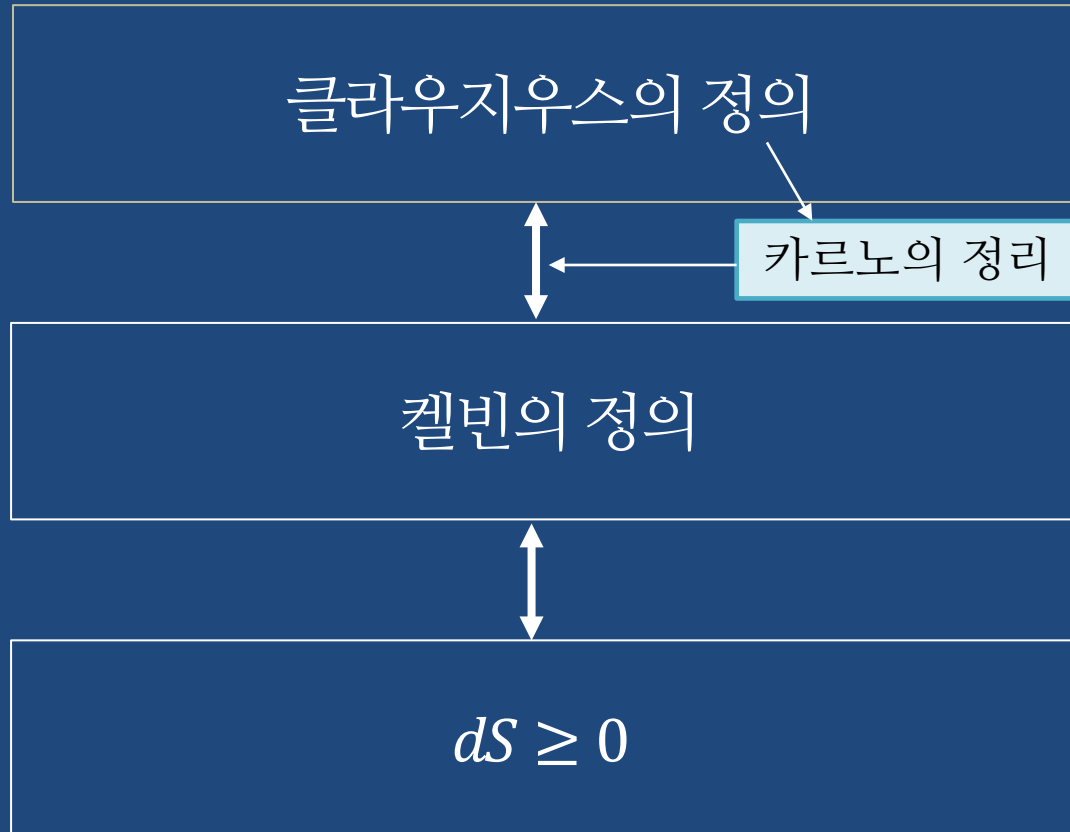


켈빈의 정의

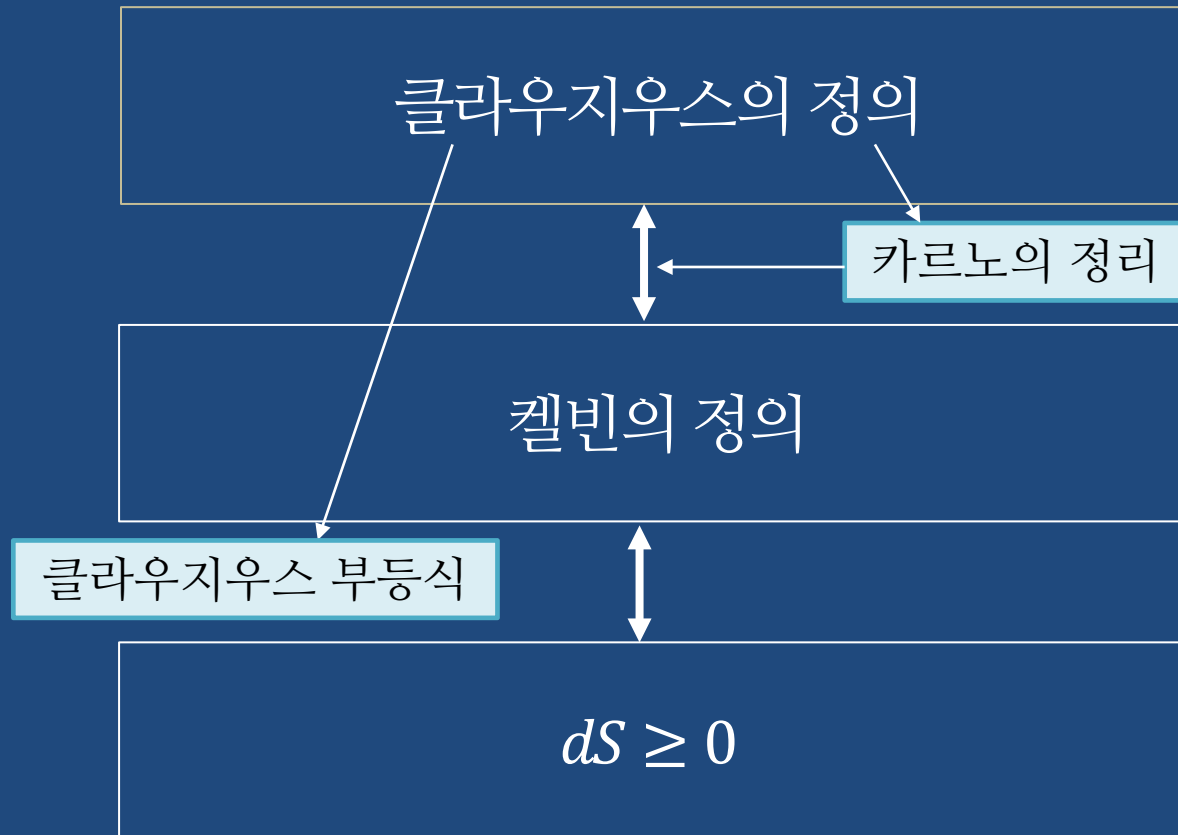


$$dS \geq 0$$

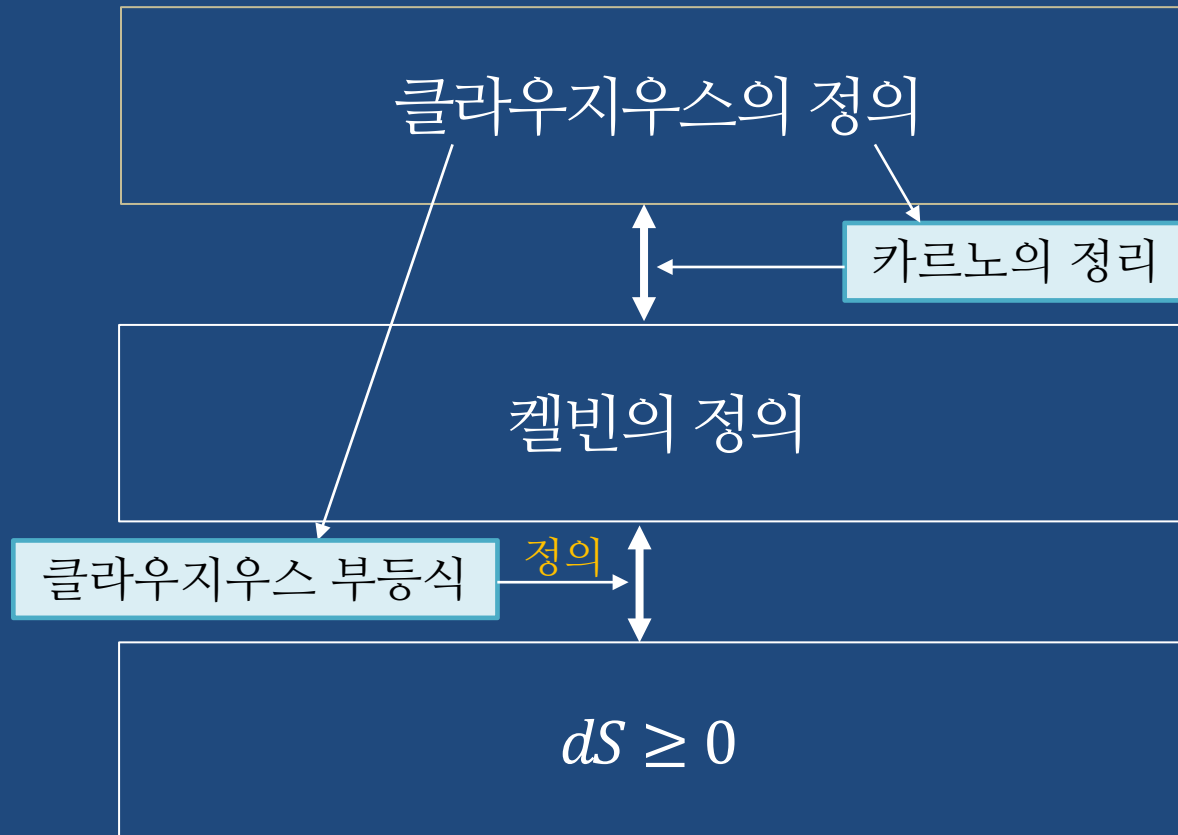
열역학 제2법칙 정의의 동등성



열역학 제2법칙 정의의 동등성



열역학 제2법칙 정의의 동등성



감사합니다