

열역학

계와 검사체적
계 : 고정되고 동일한 질량 또는 그 질량을 포함한 장치, 장치들의 조합(검사체적에 의해 좌우)
검사체적 : 계의 경계
계의 종류
밀폐계(검사질량) : 질량 유동 × 계의 경계를 통해 열과
개방계(검사체적) : 질량 유동 ○ 일이 전달
고립계(절연계) : 질량 유동 ×, 에너지 전달 ×
동작물질(작업유체) : 에너지를 저장, 운반하는 물질
냉동기 : 냉매, 내연기관 : 연소가스, 증기기관 : 수증기
상태 : 어떤 압력 및 온도 하에 놓여 있을 때(상태량에 의해 정의) 상태량
강도성 상태량 ⇒ 질량에 무관(T, P, ρ, ν_s 등)
종량성 상태량 ⇒ 질량에 유관(V, U, H, S 등)
열역학적 함수
점함수(상태함수)
: 경로와 관계없이 상태에만 관계되는 양, 완전미분(dT, ds, dh 등)
경로함수(도정함수)
: 경로에 의존, 불완전미분($\delta Q, \delta W$ 등)
과정 : ①상태 → ②상태로 거처가는 연속적인 경로
가역과정 : ①상태 → ②상태까지 감에 있어 열적, 화학적, 역학적 평형이 되는 과정, 어떠한 마찰(손실)도 수반하지 않음
비가역과정 : ①상태 → ②상태까지 감에 있어 열적, 화학적, 역학적 평형이 유지되지 않는 과정, 어떠한 마찰(손실)을 수반
준 평형과정
등온과정 : $T = C$, 정적과정 : $V = C$, 정압과정 : $P = C$, 단열과정 : $S = C$
폴리트ropic 과정 : $PV^n = C$ (등온과 단열과정 사이의 실제과정)
사이클 : 어느 과정을 겪은 다음 다시 최초의 상태로 되돌아오기까지의 과정
기체 분자가 에너지를 저장하는 방법
① 분자들의 위치와 연관된 ⇒ 분자의 위치에너지
② 분자들의 병진운동 ⇒ 분자의 운동에너지
③ 분자 결합, 원자구조, 그의 모든 에너지 ⇒ 내부에너지
비열 : 어느 물질 mkg을 dT올리는 데 필요한 열량
δ
평균온도
$T_m = \frac{\sum m_i C_i T_i}{\sum m_i C_i}$
열효율
$\eta_{th} = \frac{\text{얻은 동력}}{\text{연료의 저위 발열량} \times \text{연료소비율}}$
연료의 고위 발열량 : 연소 시 생기는 H_2O (액체)가 생길 때 열량
연료의 저위 발열량 : 고위 발열량 연소 시 기체가 발생할 때 열량
잠열 : 상변화 하는 데 드는 열(100°C 물 → 100°C 증기)
현열 : 상변화 없이 드는 열(15°C 물 → 100°C 물)
온도계

열역학 제 0법칙	
열역학 제0법칙	
: 온도의 동등성($T_A = T_C, T_B = T_C \Rightarrow T_A = T_B$)	
열역학 제1법칙	
: 에너지 보존의 법칙($\oint \delta W = \oint \delta Q$)	
열역학 제2법칙	
: 자연의 방향성 제시(비가역)	
열역학 제3법칙	
: 절대온도 0K에 이르게 할 수 없다.(카르노 사이클)	
제1종영구기관 : 1법칙 위반, 입력 없이 계속 일을 하는 기관	
제2종영구기관 : 2법칙 위반, 열효율 100%인 기관	
제3종영구기관 : 운동은 계속하나 일을 얻을 수 없는 기관	
일 : 에너지의 일종, 공간적 변위 효과($\delta W = F \cdot dx$)	
절대일 : 밀폐계의 일	
공업일 : 개방계의 일	
(질량유동 ×)	(질량유동 ○)
$\delta W = P \cdot dV$	$\delta W = -V \cdot dP$
${}_1W_2 = \int_1^2 P dV$	${}_1W_2 = \int_1^2 -V dP$
열 : 두 시스템의 온도차에 의해 계의 경계를 통해 전달 되는 에너지의 형태	
일과 열의 부호	
	일을 받으면(-) 일을 하면(+) 열을 받으면(+) 열을 방출하면(-)
밀폐계에 대한 열역학 1법칙	
$\delta q = du + pdv$	
${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + {}_1W_2$	
엔탈피	
$P = c$ 일 때	
${}_1Q_2 = U_2 - U_1 + P_2V_2 - P_1V_1$	
$= (U_2 + P_2V_2) - (U_1 + P_1V_1)$	
$H = U + PV$	
$dh = du + pdv + vdp$	
$\delta q = dh - vdp$	
개방계에 대한 열역학 1법칙	
$q_{c.v} + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gZ_i = h_e + \frac{V_e^2}{2} + gZ_e + w_{c.v}$	
검사체적을 보일러에 적용(열 교환기, 열을 받음)	
$q_B = h_e - h_i$	
검사체적을 터빈에 적용(단열 팽창, 일을 함)	
$w_T = h_i - h_e$	
검사체적을 압축기에 적용(단열 압축, 일을 받음)	
$w_C = h_e - h_i$	
검사체적을 응축기에 적용(열 교환기, 열을 방출)	
$q_C = h_i - h_e$	
검사체적을 노즐에 적용(속도 증가가 목적)	
$V_e = \sqrt{2g(h_i - h_e)} = \sqrt{2g\Delta h}$	
교축과정(등엔탈피 과정, $h=c$)	
$h_i = h_e$	
보일-샤를 법칙	
$\frac{PV}{T} = C$	
이상기체 상태방정식	
$PV = mRT$	

이상기체의 정적 비열과 정압 비열	
$\delta q = du + pdv = dh - vdP$ $C = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_{V=c} = \frac{du + Pdv}{dT}, C_v = \frac{du}{dT}, du = C_v dT$ $C = \left(\frac{\delta q}{dT}\right)_{P=c} = \frac{dh + vdP}{dT}, C_p = \frac{dh}{dT}, dh = C_p dT$	
비열 간의 관계식	
$h = u + Pv, Pv = RT, h = u + RT$ $dh = du + RdT + TdR (R=c)$ $C_p dT = C_v dT + RdT$ $C_p - C_v = R, \text{비열비 } k = \frac{C_p}{C_v}$ $C_v = \frac{R}{k-1}, C_p = \frac{kR}{k-1}$	
이상기체의 각 과정 해석	
정적과정($v=c, dv=0$)	정압과정($P=c, dp=0$)
$\frac{T_2}{T_1} = \frac{P_2}{P_1}$	$\frac{T_2}{T_1} = \frac{V_2}{V_1}$
$\delta w = Pdv$ ${}_1w_2 = 0$	$\delta w = Pdv$ ${}_1w_2 = P(v_2 - v_1)$
$\delta w_t = -vdP$ ${}_1w_{2t} = v(P_1 - P_2)$	$\delta w_t = -vdP$ ${}_1w_{2t} = 0$
$du = C_v \cdot dT = \frac{R}{k-1} dT$ $u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1)$	$du = C_v \cdot dT = \frac{R}{k-1} dT$ $u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1)$
$dh = C_p \cdot dT = \frac{kR}{k-1} dT$ $h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1)$	$dh = C_p \cdot dT = \frac{kR}{k-1} dT$ $h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1)$
$\delta q = du + Pdv = C_v \cdot dT$ ${}_1q_2 = u_2 - u_1$	$\delta q = dh - vdP = C_p \cdot dT$ ${}_1q_2 = h_2 - h_1$
$ds = \frac{\delta q}{T} = C_v \frac{dT}{T}$ $s_2 - s_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1}$	$ds = \frac{\delta q}{T} = C_p \frac{dT}{T}$ $s_2 - s_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1}$
등온과정($T=c, dT=0$)	단열과정($\delta q = 0, s = c$)
$\frac{V_2}{V_1} = \frac{P_1}{P_2}$	$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{k-1}$
$\delta w = Pdv = \frac{c}{v} dv$ ${}_1w_2 = \int_1^2 \frac{c}{v} dv = P_1 v_1 \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$\delta q = du + Pdv, Pdv = -du$ ${}_1w_2 = -\int_1^2 C_v \cdot dT$ $= \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$
$\delta w_t = -vdP = -\frac{c}{P} dP$ ${}_1w_{2t} = -\int_1^2 \frac{c}{P} dP$ $= P_1 v_1 \cdot \ln \frac{P_1}{P_2}$	$\delta q = dh - vdP, -vdP = -dh$ ${}_1w_{2t} = -\int_1^2 C_p \cdot dT$ $= \frac{kR}{k-1} (T_1 - T_2)$
$du = C_v \cdot dT = 0$ $u_1 = u_2$	$du = C_v \cdot dT = \frac{R}{k-1} dT$ $u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1)$
$dh = C_p \cdot dT = 0$ $h_1 = h_2$	$dh = C_p \cdot dT = \frac{kR}{k-1} dT$ $h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1)$
$\delta q = du + Pdv = dh - vdP$ $\delta q = Pdv = -vdP$	$\delta q = 0$ ${}_1q_2 = 0$
$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{Pdv}{T} = \frac{R}{v} dv$ $s_2 - s_1 = R \cdot \ln \frac{v_2}{v_1}$	$ds = \frac{\delta q}{T} = 0$ $s_1 = s_2$

폴리트로픽 과정	$PV^n = c$
$(PV^n = c, 1 < n < k)$	$n=0 \Rightarrow P=c$ (정압과정) $n=1 \Rightarrow T=c$ (등온과정) $n=n \Rightarrow$ 폴리트로픽 과정 $n=k \Rightarrow P=c$ (단열과정, $s=c$) $n=\infty \Rightarrow V=c$ (정적과정)
$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1}$	
${}_1w_2 = \frac{R}{n-1} (T_1 - T_2)$	
${}_1w_{2t} = \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2)$	
$u_2 - u_1 = C_v(T_2 - T_1) = \frac{RT_1}{k-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$	
$h_2 - h_1 = C_p(T_2 - T_1) = \frac{kRT_1}{k-1} \left(\frac{T_2}{T_1} - 1\right)$	
$\delta q = \frac{n-k}{n-1} \cdot C_v \cdot dT$	
$C_n = \frac{n-k}{n-1} \cdot C_v$	
$\delta q = C_n \cdot dT$	
$ds = \frac{\delta q}{T} = \frac{C_n \cdot dT}{T}$	
$s_2 - s_1 = \frac{n-k}{n-1} \cdot \frac{R}{k-1} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1}$	
열역학 제2법칙(자연의 방향성, 비가역과정)	
열기관(Kelvin-Planck 표현)	
① 고온체로부터 열을 받아 주위에 아무런 변화없이 일로 만드는 것은 불가능 ② 열효율 100%인 기관을 만들 수 없다.	
냉동기관(Clausius 표현)	
① 외부 입력 일 없이 저온체로부터 고온체로 열을 전달하는 것은 불가능 ② 냉동기 성적계수가 ∞ 인 냉동기는 만들 수 없다.	
열효율(η_{th})과 성적(성능)계수(β, β')	
	$\eta_{th} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{W}{Q_H}$ $\beta = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$ $\beta' = \frac{Q_H}{W} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = 1 + \beta$
카르노 사이클	
① 모든 과정이 가역과정 ② 가장 이상적인 열기관 사이클 ③ 두 개의 단열과정, 두 개의 등온과정	
$\eta_{car} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$	
클라우시우스(Clausius) 부등식	
$\oint \frac{\delta Q}{T} \leq 0$ (= : 가역, < : 비가역)	
엔트로피	
$ds = \frac{\delta q}{T}, s_2 - s_1 = \int_1^2 \frac{\delta q}{T}$	

유효에너지와 무효에너지	
	유효에너지(가용에너지) $Q_a = \eta_{car} \cdot Q_H$ 무효에너지 (비가용에너지, 가용에너지의 손실) $Q_L = T_L \cdot \Delta S = T_L \cdot \frac{Q_H}{T_H}$

내연기관의 압축	
	실린더 체적 ($V = V_c + V_s$) 간극비 $\lambda = \frac{V_c}{V_s}$ 압축비 $\epsilon = \frac{V}{V_c} = \frac{V_c + V_s}{V_c}$ $= 1 + \frac{V_s}{V_c} = 1 + \frac{1}{\lambda}$

순수물질 : 어떠한 상에서도 그 화학적 조성이 균일한 물질
 상태 : 고체, 액체, 기체
 증기 : 상변화를 쉽게 하는 것
 가스 : 상변화가 어렵다

증기선도
 포화온도 : 주어진 압력하에서 증발이 일어나는 온도
 ↳ 그 때의 압력 : 포화압력
 과냉액체 : 동일압력 상태에서 포화온도보다 낮은 상태
 압축액체 : 같은 포화온도 상에 있으나 압력이 더 높은 상태
 포화액 : 포화온도에 도달한 물로서 증발 직전($x=0$)
 습증기 : 액체 일부가 증발하여 액체+증기($0 < x < 1$)
 포화증기 : 액체가 모두 증기가 된 상태($x=1$)
 과열증기 : 포화온도 이상의 증기($x=1$)

건도 : 포화액의 증발 정도	
	건조 $x = \frac{m_g}{m_t}$ (증기질량 / 전체질량) $v_x = v_f + x(v_g - v_f)$ $h_x = h_f + x(h_g - h_f)$ $s_x = s_f + x(s_g - s_f)$

보간법			
10°C	15°C	20°C	$x = 10 + (50 - 10) \cdot \frac{15 - 10}{20 - 10}$
10	x	50	

랭킨 사이클 : 증기동력발전소의 이상사이클

--	--

	$q_{c.v} + h_i = h_e + w_{c.v}$ 1→2 과정 (보일러 : 정압가열) $q_B = h_2 - h_1$ 2→3 과정 (터빈 : 단열팽창) $w_T = h_2 - h_3$ 3→4 과정 (응축기 : 정압방열) $q_L = h_3 - h_4$ 4→1 과정 (펌프 : 단열압축) $w_P = h_1 - h_4$
--	---

	$\text{열효율 } \eta_R = \frac{q_B - q_L}{q_B} = \frac{w_T - w_P}{q_B}$ $= \frac{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)}{h_2 - h_1}$
--	---

랭킨 사이클의 열효율 증가시키는 방법

- ① 최고 압력을 높인다.
(최고 온도를 같게 한다.) 단점 : 터빈 날개에 부식을 가져온다.
 - ② 배기압력과 배기온도를 낮춘다.
 - ③ 과열증기를 사용한다.
- 재열(실질적, 터빈 부식 방지) 장점 : 터빈 부식 방지
 재생(이론적) 단점 : 복수기 용량이 커짐
 재열-재생

재열 사이클(재열기) : Reheat cycle
 열효율 증가, 건도 증가(터빈 부식 방지)

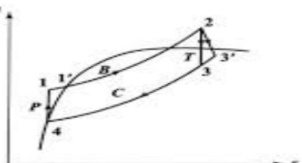
	$q_{c.v} + h_i = h_e + w_{c.v}$ 1→2 과정 (보일러 : 정압가열) $q_B = h_2 - h_1$ 2→3 과정 (고압터빈 : 단열팽창) $w_{TH} = h_2 - h_3$ 3→4 과정 (재열기 : 정압가열) $q_{Re} = h_4 - h_3$ 4→5 과정 (저압터빈 : 단열팽창) $w_{TL} = h_4 - h_5$ 5→6 과정 (응축기 : 정압방열) $q_L = h_5 - h_6$ 6→1 과정 (펌프 : 단열압축) $w_P = h_1 - h_6$ $\text{열효율 } \eta_{RH} = \frac{(w_{TH} + w_{TL}) - w_P}{q_B + q_{Re}}$ $= \frac{(h_2 - h_3) + (h_4 - h_5) - (h_1 - h_6)}{(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)}$

재생 사이클(Regenerative cycle) : 이론적 열효율 증가 도모

	$q_{c.v} + h_i = h_e + w_{c.v}$ 1→2 과정 (보일러 : 정압가열) $Q_B = m(h_2 - h_1)$ 터빈 : 단열팽창 $W_T = W_{T1} + W_{T2} + W_{T3}$ ① 2→3 과정 $W_{T1} = m(h_2 - h_3)$ ② 3→4 과정 $W_{T2} = (m - m_1)(h_3 - h_4)$ ③ 4→5 과정 $W_{T3} = (m - m_1 - m_2)(h_4 - h_5)$ 펌프 : 단열압축 $W_P = W_{P1} + W_{P2} + W_{P3}$ ① 6→7 과정 $W_{P1} = (m - m_1 - m_2)(h_7 - h_6)$ ② 8→9 과정 $W_{P2} = (m - m_1)(h_9 - h_8)$ ③ 10→1 과정 $W_{P3} = m(h_1 - h_{10})$
--	--

$\text{열효율 } \eta_{Reg} = \frac{W_T - W_P}{Q_B}$	$m_1(h_3 - h_{10}) = (m - m_1)(h_{10} - h_8)$ $m_1 = m \cdot \frac{h_{10} - h_8}{h_3 - h_8}$ $m_2(h_4 - h_8) = (m - m_1 - m_2)(h_8 - h_6)$ $m_2 = \frac{(m - m_1)(h_8 - h_6)}{h_4 - h_6}$
--	--

실제 랭킨사이클 ⇒ 압력강하

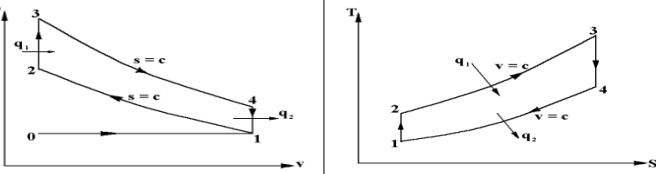


$$\eta_P = \frac{h_1 - h_4}{h_1' - h_4}$$

$$\eta_T = \frac{h_2 - h_3'}{h_2 - h_3}$$

오토 사이클(Otto cycle)

전기점화(가솔린)기관 이상사이클(정적 사이클)

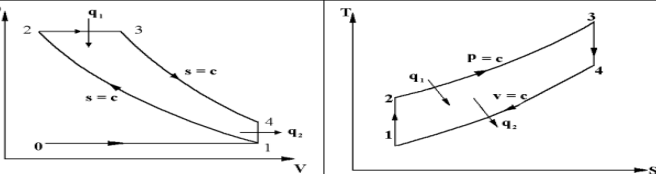


$$\eta_{Otto} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{k-1}$$

$$\epsilon = \frac{V_{1,4}}{V_{2,3}} \text{ 실린더 체적} / \text{연소실 체적}$$

디젤 사이클(Diesel cycle)

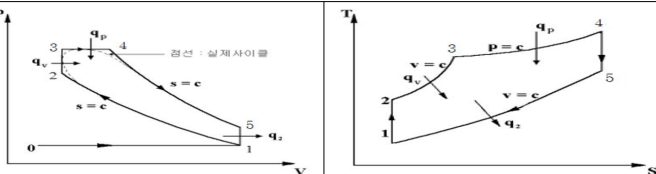
디젤기관의 이상사이클(정압사이클)



$$\eta_{Diesel} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{k-1} \cdot \frac{\sigma^k - 1}{k(\sigma - 1)}$$

$$\sigma = \frac{V_3}{V_2} \text{ 연소 후 체적} / \text{연소실 체적}$$

사바테 사이클(Sabathe cycle) : 정적+정압 사이클



$$\eta_{sabathe} = 1 - \frac{T_5 - T_1}{(T_3 - T_2) - k(T_4 - T_3)}$$

$$= 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{k-1} \cdot \frac{\rho \cdot \sigma^k - 1}{(\rho - 1) + \rho \cdot k(\sigma - 1)}$$

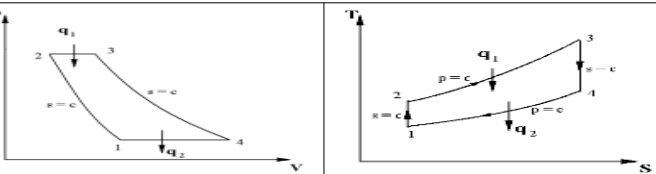
$$\rho = \frac{P_{3,4}}{P_2} \text{ 연소 후 최고압력} / \text{압축말의 압력}$$

$\sigma = 1$ 일 때, 오토사이클의 효율
 $\rho = 1$ 일 때, 디젤사이클의 효율

내연기관 사이클의 열효율 비교

- ① 압축비가 같을 때 : $\eta_{Otto} > \eta_{Sabathe} > \eta_{Diesel}$
- ② 최고 압력이 같을 때 : $\eta_{Diesel} > \eta_{Sabathe} > \eta_{Otto}$

브레이튼 사이클(Brayton cycle) : 가스 터빈 이상사이클



1→2 과정 : 단열압축, 2→3 과정 : 정압가열
 3→4 과정 : 단열팽창, 4→1 과정 : 정압방열
 공급열량 $q_H = C_p(T_3 - T_2)$, 방열량 $q_L = C_p(T_4 - T_1)$

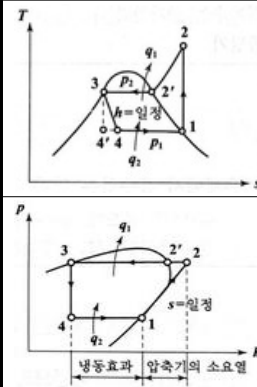
$$\eta_{Bray} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left(\frac{1}{\gamma}\right)^{\frac{k-1}{k}}$$

$$\gamma = \frac{P_{2,3}}{P_{1,4}} \text{ 최대 압력} / \text{최소 압력}$$

냉동 사이클

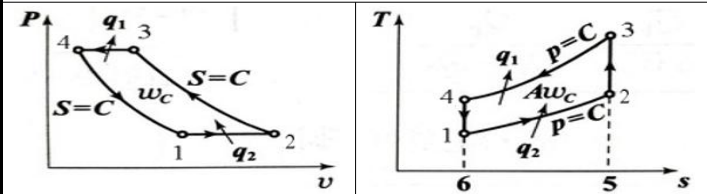
냉매 : 저열원으로부터 열을 흡수, 고열원에 열을 운반
 냉동효과 : 저온체로부터 냉매가 흡수한 열량
 냉동능력 : 냉매가 1시간동안 저온체로부터 흡수한 열량
 냉동톤(RT) : 하루에 0°C의 순수물 1ton을 0°C얼음으로 바꾸는 데 필요한 냉동능력

증기압축냉동 사이클



1→2 과정(압축기 : 단열압축)
 $w_C = h_2 - h_1$ (등엔트로피 과정)
 2→3 과정(응축기 : 정압방열)
 $q_H = h_2 - h_3$
 3→4 과정(팽창밸브 : 교축과정)
 $h_3 = h_4$
 4→1 과정(증발기 : 등온, 정압흡열)
 $q_L = h_4 - h_1$
 $\beta = \frac{q_L}{w_C} = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{h_1 - h_{3,4}}{h_2 - h_1}$

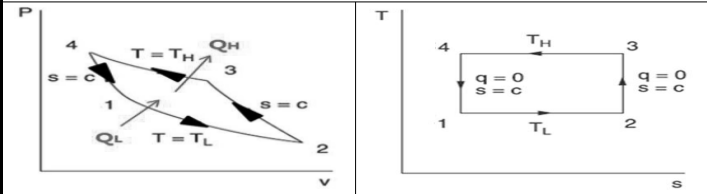
역 브레이튼 사이클 : 공기냉동기의 표준사이클



1→2 과정 : 정압흡열, 2→3 과정 : 단열압축
 3→4 과정 : 정압방열, 4→1 과정 : 단열팽창
 냉동효과
 $q_L = C_p(T_3 - T_2)$
 성적계수

$$\beta = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{T_2 - T_1}{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}$$

역 카르노 사이클 : 냉동기의 이상사이클



1→2 과정 : 등온가열(팽창), 2→3 과정 : 단열압축
 3→4 과정 : 등온압축, 4→1 과정 : 단열팽창
 성적계수

$$\beta = \frac{q_L}{q_H - q_L} = \frac{T_L}{T_H - T_L}$$

열전달 : 전도, 대류, 복사

전도

열전달율

$$Q = kA \frac{dT}{dx} [W]$$

k : 열전도율($W/m^{\circ}C$), A : 면적, dT : 온도변화량($^{\circ}C$),
 dx : 전열면의 두께(m), $\frac{dT}{dx}$: 온도구배

대류

열전달율

$$Q = hA(T_s - T_{\infty}) [W]$$

h : 대류열전달계수($W/m^2^{\circ}C$), A : 면적,
 T_s : 고체표면 온도, T_{∞} : 유체의 온도

복사(스테판=볼츠만의 법칙)

열전달율

$$Q = \sigma AT^4 [W]$$

σ : 스테판-볼츠만의 상수 [W/m^2K], A : 면적,
 T : 절대온도