

제 1장 공업 열역학

[1] 열역학의 기본 개념

- 열역학은 다른 방법
 - 미시적 방법 : 분자나 원자 단위로 해석
 - 거시적 방법 : 온도, 압력 등 측정가능한 양을 대상으로 하여 해석

• 계 (system)

- 밀폐계 (closed system) : 질, 에너지 0 / 질량 X
- 개방계 (open system) : 질, 에너지 0 / 질량 0
- 고립계 (Isolated system) : 질, 에너지 X / 질량 X

- 동작물질 (=작업물질 : Working substance)
- 계의 목적달성 및 계의 작용을 위하여 반드시 필요로 하는 물질로 에너지를 저장 또는 이동·교환시키는 물질

[2] 상태량 (Quantity of state)

- 상태함수 (Point function, 상태함수) ⇒ 만능비분 (=선미분: d)
 : 한 상태에서 물질의 각 성질은 특정한 값을 가지며 그 상태에 도달하기 이전의 경로는 관계가 없다.
- 과정함수 (Path function, 경로함수) ⇒ 편미분 (2 또는 δ)
 : 일량과 다양한 상태변화의 경로 (Path)에 의존되며, 처음과 마지막이 상태만으로는 결정되지 않는다.

• 상태량의 종류

- 강도성 상태량 (Intensive Property)
 : 물질의 질량이 관계없이 그 크기가 결정되는 상태량
 ex) 온도, 압력, 밀도, 비체적

- 중량성 상태량 (Extensive Property)
 : 물질의 질량이 따라 그 크기가 결정되는 상태량
 ex) 체적 (V), 내부에너지 (U), 엔탈피 (H), 엔트로피 (S), 질량 (m)

[3] 물질의 성질

- 비중량 (Specific weight: γ) : 단위체적당 중량

$$\gamma = \frac{G}{V} = \frac{mg}{V} = \rho g$$
- 밀도 (Density: ρ) : 단위체적당 질량

$$\rho = \frac{m}{V}$$

- 비체적 (Specific volume): 밀도의 역수, 단위질량당 체적

$$v = \frac{1}{\rho} = \frac{V}{m}$$

- 비중 (Specific gravity: SG): 물과의 비중에 4°C의 물의 밀도나눔

$$SG = \frac{\gamma}{\gamma_{H_2O}} = \frac{\rho}{\rho_{H_2O}}$$

- 압력 (Pressure, P) : 단위면적당 작용하는 힘

$$P = \frac{F}{A}$$

1) 대기압 (Atmospheric pressure, P_{atm}) : 대기 중의 압력

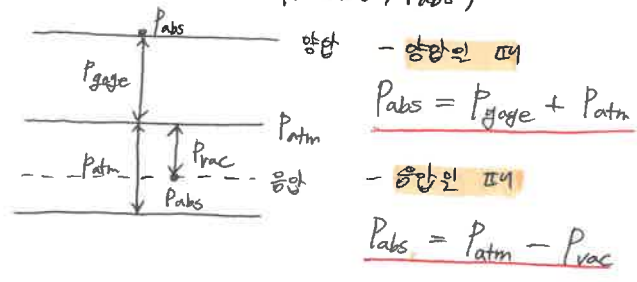
$$P_{atm} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01 \text{ bar} = 760 \text{ mmHg}$$

2) 게이지 압력 (=계기 압력 : Gauge pressure, P_{gauge}) : 압력계로 측정된 압력

3) 진공압 (=진공 게이지 압력 : Vacuum pressure, P_{vac})

$$\text{진공도} = \frac{\text{진공압}}{\text{대기압}} \times 100\%$$

4) 절대 압력 (Absolute pressure, P_{abs})



- 온도 (Temperature, T 또는 t)

섭씨온도(°C) → 화씨온도(°F) : $t = \frac{5}{9} (°F - 32) \text{ (°F)}$

섭씨온도(°C) ↔ 켈빈온도(K) : $t = °C + 273.15 \text{ (K)}$

[4] 일량 (Work) 과 동력 (Power)

- 일량 (Work, W) : $W = F \times S \text{ [J]}$

- 동력 (Power, P) : $P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot S}{t} = F \cdot v = T \cdot \omega \text{ [W]}$

$$1 \text{ PS} = 0.735 \text{ kW}$$

[5] 열량 (Q) 과 비열 (C)

물의 비열: $C_w = 1 \text{ kcal/kg} \cdot ^\circ\text{C} = 4.187 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$

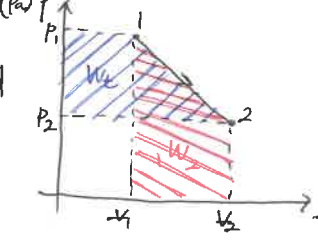
열량: $Q = C m \Delta T \text{ [kJ]}$

평균비열: $C_m = \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} C dt$

[6] 열역학 제 0 법칙 (= 열평형의 법칙)

! 온도가 서로 다른 두 물체를 접촉 (혼합) 시키면 온도가 높은 물체의 온도는 내려가고, 온도가 낮은 물체의 온도는 올라가서 결국 두 물체 사이의 온도차가 없어져 열이 평형상태에 있게 되는 것

[2] 밀폐계와 개방계의 비교



• 밀폐계의 일량 (내부기관)
(권대일) $W_2 = \int_1^2 P dV$ ($W_2 = P dV$)

• 개방계의 일량 (펌프, 터빈, 압축기)
(공압일) $W_t = - \int_1^2 V dP$ ($W_t = -v dp$)

(순일) = 권대일 + 공압일 (in-out)
 $W_t = W_2 + P_1 V_1 - P_2 V_2$

[7] 열역학 제 1 법칙 (= 에너지보존의 법칙)

! 열과 같은 서로 전환이 가능한 뿐만 아니라 열과 일 사이에는 일정한 비례관계가 성립한다.

$\frac{dE_{tot}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i (h_i + \frac{1}{2} v_i^2 + gz_i) - \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} v_e^2 + gz_e)$

[3] 정적비열 (C_v) 과 정압비열 (C_p)

$C_v = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_v = \left(\frac{du}{dT} \right)_v = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_v$ $\therefore du = C_v dT$ [kJ/kg]

$C_p = \left(\frac{\partial q}{\partial T} \right)_p = \left(\frac{dh}{dT} \right)_p = T \left(\frac{\partial s}{\partial T} \right)_p$ $\therefore dh = C_p dT$ [kJ/kg]

[6] 열효율

$\eta = \frac{\text{유리 출력 (kJ/hr)}}{\text{저위발열량 (kJ/hr)} \times \text{연료소비율 (kg/hr)}} \times 100\%$
 $\therefore \eta = \frac{Ne}{H_e \times f_e} \times 100\%$

[4] 줄의 법칙 (Joule's law)

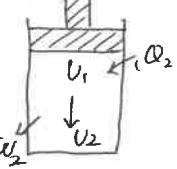
! 프랭크스 (=이성구)가 내열에너지와 연탄에는 온도의 함수이다.

$du = C_v dT = f(T)$
 $dh = C_p dT = f(T)$

제 2장 일과 열 (열역학 제 1 법칙)

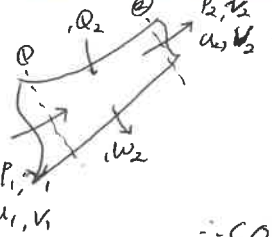
[1] 열역학적 에너지 방정식

• 밀폐계에서의 에너지 방정식



$-\delta Q_2 = dU + \delta W_2$
 $(\therefore du = \delta q - \delta w) \Rightarrow \delta q = du + p dv$
($W_2 = P dV$)
권대일

• 개방계에서의 에너지 방정식



점성유동에서의 에너지 방정식
 $\frac{dE_{tot}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_1 (h_1 + \frac{1}{2} v_1^2 + gz_1) - \dot{m}_2 (h_2 + \frac{1}{2} v_2^2 + gz_2)$

$\therefore \delta_1 Q_2 = dH + \delta_1 W_2$
 $(\therefore dh = \delta q - \delta w) \Rightarrow \delta q = dh - v dp$
($W_t = -v dp$)
공압일

[6] 비열비 (Ratio of specific heat, k)

! 정압비열 (C_p) 과 정적비열 (C_v) 의 비

$k = \frac{C_p}{C_v}$ ($k > 1$) ($C_p - C_v = R$)

* 엔탈피 (H : kcal, kJ)

$H = U + pV$ [kJ]

제 3 장 완전가스 (Perfect Gas)

[1] 완전가스 특성식

• 완전가스 상태방정식 만족할 조건

- 1) 압력이 낮을수록
- 2) 분자량이 작을수록
- 3) 온도가 높을수록
- 4) 비체적이 클수록

보일의 법칙 (= 등온법칙) : $Pv = \text{const}$
 샤를의 법칙 (= 등압법칙) : $\frac{v}{T} = \text{const}$
 보일-샤를의 법칙 : $\frac{Pv}{T} = \text{const}$

• 완전가스의 상태방정식 (= 이상기체 상태방정식)

$Pv = RT$ R: 기체상수

$PV = nRT$ ($v = \frac{V}{m}$)

공기의 기체상수 : $R = 0.287 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} = 287 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$

[2] 일반기체상수 (R)

$R = \frac{\bar{R}}{M}$ (일반기체상수 $\bar{R} = 8.314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K}$
 $= 8314 \text{ J/kmol} \cdot \text{K}$
 (M: 분자량))

[3] 완전가스에서 C_p 와 C_v 의 관계식

1) $C_p - C_v = R \Rightarrow C_v = \frac{R}{k-1}$
 2) $\frac{C_p}{C_v} = k \Rightarrow C_p = kC_v = \frac{kR}{k-1}$

[4] 완전가스의 상태변화

• 정적변화 (Isochoric change) ($dv=0$)

- ① $\frac{P}{T} = C$
- ② $W_2 = \int_1^2 P dv = 0$
- ③ $W_t = - \int_1^2 v dp = -v(P_2 - P_1) = R(T_1 - T_2)$
- ④ $du = C_v dT = C_v(T_2 - T_1)$
- ⑤ $dh = C_p dT = C_p(T_2 - T_1) = kC_v(T_2 - T_1) = k du$
- ⑥ $\delta q = du + P dv \Rightarrow \delta q = du$

• 정압변화 (Isobaric change) ($dp=0$)

- ① $\frac{v}{T} = C$
- ② $W_2 = \int_1^2 P dv = P(v_2 - v_1) = R(T_2 - T_1)$
- ③ $W_t = - \int_1^2 v dp = 0$
- ④ $du = C_v dT = C_v(T_2 - T_1)$
- ⑤ $dh = C_p dT = C_p(T_2 - T_1) = kC_v(T_2 - T_1) = k du$
- ⑥ $\delta q = dh - v dp \Rightarrow \delta q = dh$

• 등온변화 (Isothermal change) ($dT=0$)

- ① $Pv = C$
- ② $W_2 = W_t = Q = RT \ln\left(\frac{v_2}{v_1}\right) = RT \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right)$
- ③ $\left[\begin{array}{l} \delta q = du + \delta w = du + P dv \\ dh + \delta w = dh - v dp \end{array} \right. \rightarrow \left. \begin{array}{l} Pv = RT \text{ 이니} \\ P = \frac{RT}{v} \text{ 를 주면.} \\ v = \frac{RT}{P} \end{array} \right]$

③ $du = C_v dT = 0 \Rightarrow u_1 = u_2$

④ $dh = C_p dT = 0 \Rightarrow h_1 = h_2$

• 단열변화 (Adiabatic change) ($\delta q=0$)

- ① $\frac{Pv^k}{T} = C \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{k-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{k-1}{k}}$ (k: 비열비)
- ② $W_2 = \frac{R}{k-1} (T_1 - T_2)$ ($\delta q = du + \delta w$)
 $= -C_v dT = -du$
- ③ $W_t = \frac{kR}{k-1} (T_1 - T_2)$ ($\delta q = dh + \delta w$)
 $= -C_p dT = -dh$
- ④ $du = -W_2$
- ⑤ $dh = -W_t$
- ⑥ $\delta q = 0$

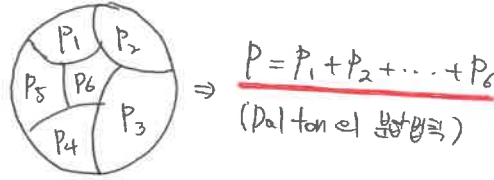
폴리트로픽 변화 (Polytropic change)

실제로 가스가 변화하는 경우 적용. 비열이 k 대신 폴리트로픽 지수 n을 대입

- ① $P_1 V_1^n = C \Rightarrow \frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{n-1}{n}}$
- ② $W_2 = \frac{k}{n-1} (T_1 - T_2)$
- ③ $W_t = \frac{nR}{n-1} (T_1 - T_2)$
- ④ $du = C_v(T_2 - T_1) = \frac{R}{k-1} (T_2 - T_1) = -\left(\frac{n-1}{k-1}\right) W_2$
- ⑤ $dh = C_p(T_2 - T_1) = \frac{kR}{k-1} (T_2 - T_1) = k du$
- ⑥ $\gamma_2 = C_n(T_2 - T_1)$ 단, $C_n = \left(\frac{n-k}{n-1}\right) C_v$

[5] 가스의 혼합

완전가스를 혼합할 때 혼합가스의 압력(P)의 산화수의 분비량과 같다.



제 4 장 열역학 제 2 법칙

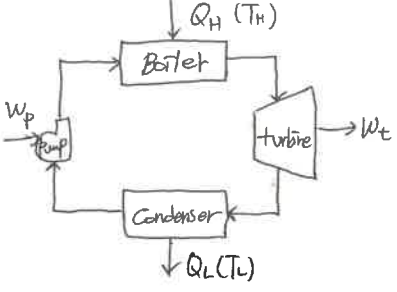
[1] 열역학 제 2 법칙의 표현

- Clausius의 표현 \Rightarrow 냉동기
- Kelvin-Planck의 표현 \Rightarrow 열기관

제 1종 열기관: 입력보다 출력이 더 큰 기관, 열효율이 100% 이상인 기관
 제 2종 열기관: 입력과 출력이 같은 기관, 열효율이 100%인 기관
 비가역과정의 예: 마찰, 혼합, 열의 이동, 화학반응, 삼투압 현상, 압축과 팽창

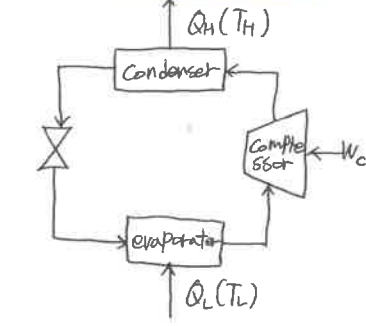
[2] 열기관과 성능계수

열기관 (Heat engine)



$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{W_t - W_p}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{\text{유용한 일}}{\text{공급한 일}}$$

냉동기 (Refrigerator)



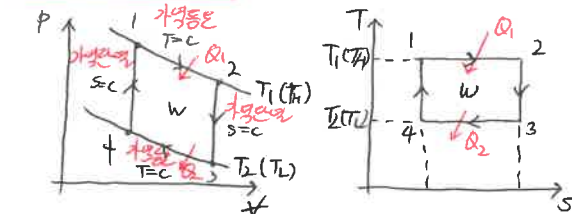
냉동기의 성능계수 $E_f = \frac{Q_L}{W_c} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{\text{제거한 열}}{\text{공급한 일}}$

열펌프의 성능계수 $E_H = \frac{Q_H}{W_c} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L} = \frac{\text{유용한 열}}{\text{공급한 일}}$

$(E_H = E_f + 1)$

[3] 카르노 사이클 (Carnot cycle)

2개의 가역등온변화, 2개의 가역단열변화로 구성된 열기관에서 최대 열효율을 갖는 사이클



$$\eta_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \quad (K)$$

[4] 엔트로피 (Entropy, S: kJ/K)

- 클라우지우스 (Clausius)의 관점
- 가역사이클: $\oint \frac{\delta Q}{T} = 0$
- 비가역사이클: $\oint \frac{\delta Q}{T} < 0$

엔트로피 증가의 원리

가역이면 엔트로피는 변하지 않음, 비가역이면 항상 증가한다. 실제로 자연계에서 일어나는 모든 상태는 비가역인 등엔트로피 엔트로피는 항상 증가한다.

$ds = \frac{\delta Q}{T}$ 또는 $ds = \frac{\delta q}{T} \quad [kJ/kg \cdot K]$
 $\Delta S = S_2 - S_1 = \int_1^2 \frac{\delta Q}{T}$ 이고 $\delta Q = cm dT$ 이므로
 $\Delta S = cm \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$ 또는 $\Delta S = c \ln\left(\frac{T_2}{T_1}\right)$

열역학 제3법칙 (The third law of thermodynamics)

어떠한 이상적인 방법으로도 어떠한 계를 절대영도 0K (-273°C) 에는 이르지 할 수 없다. ($\eta_c = 1 - \frac{T_2}{T_1}$ 이기 때문 이므로)

[5] 이상기체의 엔트로피

· 함수관계

$T, v \Rightarrow \Delta S = S_2 - S_1 = C_v \ln \frac{T_2}{T_1} + R \ln \frac{v_2}{v_1}$

$P, T \Rightarrow \Delta S = S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{T_2}{T_1} - R \ln \frac{P_2}{P_1}$

$P, v \Rightarrow \Delta S = S_2 - S_1 = C_p \ln \frac{v_2}{v_1} + C_v \ln \frac{P_2}{P_1}$

· 상태변화

1) 정적변화 ($v=C, v_1=v_2$)

$\Delta S = S_2 - S_1 = C_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = C_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) - R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = C_v \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$

2) 정압변화 ($P=C, P_1=P_2$)

$\Delta S = S_2 - S_1 = C_p \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = C_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) + R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = C_p \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right)$

3) 등온변화 ($T=C, T_1=T_2$)

$\Delta S = S_2 - S_1 = R \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) = -R \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right) = C_p \ln \left(\frac{v_2}{v_1} \right) + C_v \ln \left(\frac{P_2}{P_1} \right)$

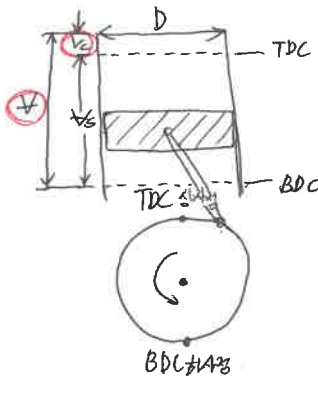
4) 단열변화 ($q=0, \delta q=0$)

$S_1 = S_2$ (등엔트로피 변화)

5) 폴리트로픽 변화

$\Delta S = S_2 - S_1 = C_n \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right) = \left(\frac{n-k}{n-1} \right) C_v \ln \left(\frac{T_2}{T_1} \right)$

제5장 기체의 압축



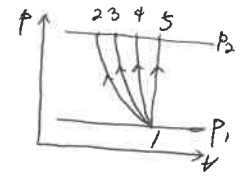
D: 실린더 안지름
S: 행정, 행정거리 TDC에서 BDC까지의 거리
 V_c : 간극체적, 통체적
피스톤이 TDC에 왔을 때 남은체적
 V_s : 행정체적, 피스톤이 배제하는 체적
 $V_s = AS = \frac{\pi D^2}{4} \cdot S$ [m³]
 V : 실린더 체적 $\Rightarrow V = V_c + V_s$

- 압축비 $\lambda = \frac{V_c}{V_s}$

- 압축비 (Compression ratio) $\epsilon = \frac{V}{V_c} = \frac{V_c + V_s}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c}$ ($\epsilon > 1$)

압축비 = $\frac{\text{정기체적}}{\text{간극체적}}$

· 정압압축



1-2 가역단 압축
1-3 폴리트로픽 압축
1-4 가역단 단열 압축
1-5 체적 일정 압축

· 압축비 크기: 가역정적 > 가역단열 > 폴리트로픽 > 가역등온 > 가역정압

· 다단압축기

: 압축비가 클수록 압축일수록 작게 하고 체적비율은 크게 하여 최대한 여러단으로 나누어 단과 단 사이에 중간냉각기를 두 냉각하면 필요한 일을 감소시킬 수 있다.

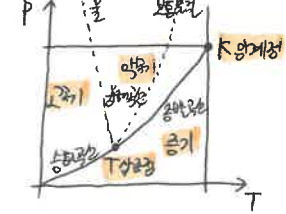
$P_m = \sqrt[n]{P_1 \cdot P_2}$ (P_1 : 취입압력, P_2 : 취출압력, n : 단수)

제6장 증기

[1] 증기의 열역학적 성질

· 순물질 (Pure substance): 균일하고 일정한 화학적 구성을 갖는 물질
화학적으로 균일하고 타동적 성질이 고정한 물질

· 압계점과 삼중점



K: 압계점 (Critical point)
: 그 이상의 압력에서는 액체와 증기가 서로 평행
으로 존재할 수 없는 상태

T: 삼중점 (Triple point)

: 액체, 기체, 고체 3상태 서로 평행
으로 존재할 수 있는 점

[6] 유효에너지와 부유효에너지

- 유효에너지 (=가용에너지, Available energy)

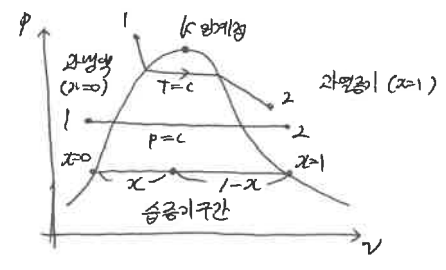
$Q_a = Q_1 \eta_c$ ($\eta_c = \frac{W}{Q_1}$)

- 부유효에너지 (=비가용에너지, Unavailable energy)

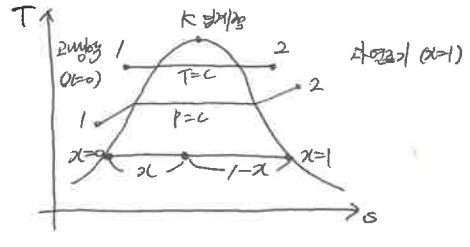
$Q_2 = T_2 \Delta S = T_2 \cdot \frac{Q_1}{T_1}$

[2] 증기선도

• P-v 선도



• T-S 선도



[3] 증기의 상태량 공식

$$h = h_g + x h_{fg}$$

$$v = v_g + x v_{fg}$$

$$s = s_g + x s_{fg}$$

$$u = u_g + x u_{fg}$$

f: 포화액 상태에서의 상태량
 g: 포화증기 상태에서의 상태량
 fg: 포화증기 상태에서의 상태량
 - 포화액 상태에서의 상태량

[4] 증기의 열적 상태량

• 포화수의 열적 상태량

$$q_e = h_g - h_o \quad (h_o: \text{과냉액 상태에서의 엔탈피})$$

$$\Delta S = S_g - S_o = C \ln\left(\frac{T_s}{273.15}\right) \quad (\text{단, } T_s: \text{포화온도 (K)})$$

• 건포화증기의 열적 상태량

$$q_{\text{증발}} = h_g - h_f = h_{fg}$$

$$\Delta S = S_g - S_f = \frac{r}{T_s} \quad (r: \text{증발잠열, } T_s: \text{포화온도 (K)})$$

• 과열증기의 열적 상태량

$$q_s = C_{pm} (T - T_s) \quad (T: \text{과열증기온도, } T_s: \text{포화온도, } C_{pm}: \text{평균 증발비열})$$

$$\Delta S = S - S_g = C_{pm} \ln\left(\frac{T}{T_s}\right) \quad \text{과열도} = T - T_s = \text{과열증기온도} - \text{포화온도}$$

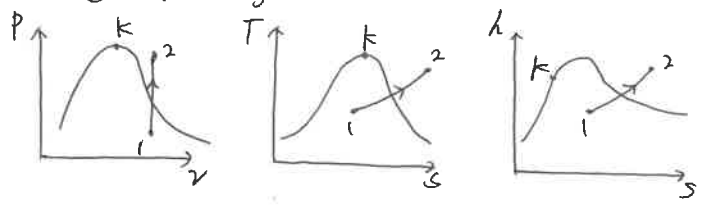
⊕ 반데르 발스 (Van der Waals) 식

$$\left(P + \frac{a}{v^2}\right) (v - b) = RT$$

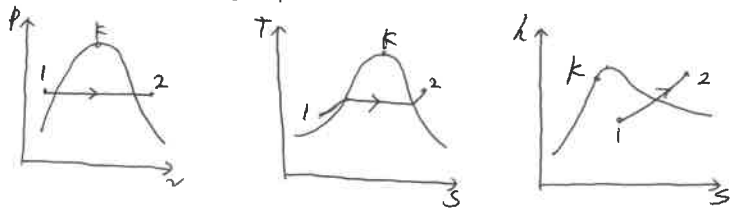
$\frac{a}{v^2}$: 분자의 인력이 압력이 미치는 영향
 b : 분자부피

[5] 증기의 상태변화

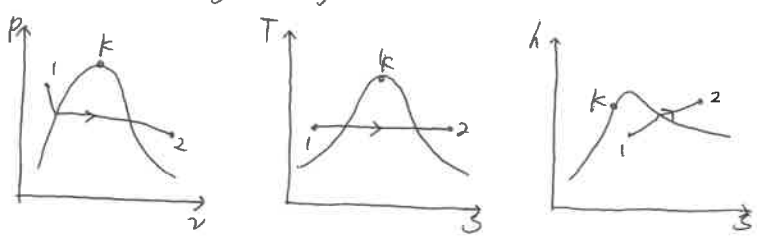
1) 정적변화 ($v=C, dv=0$)



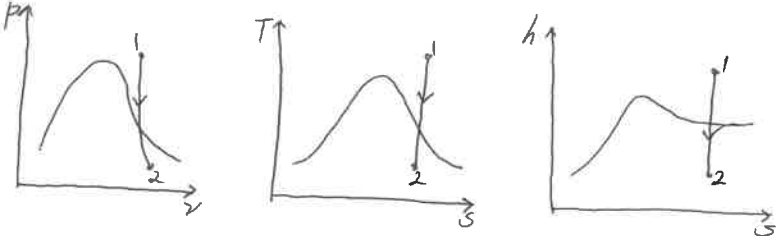
2) 정압변화 ($P=C, dP=0$)



3) 등온변화 ($T=C, dT=0$)



4) 단열변화 ($q=C, dq=0$)

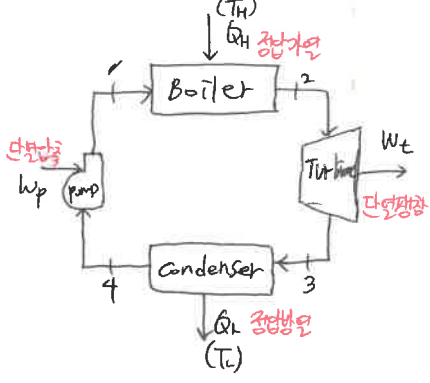


5) 목화과정 (Throttling Process) = 등엔탈피 과정, 엔트로피는 증가

유체가 밸브, 곡, 작은 구멍 등 좁은 통로를 흐를 때 마찰이나 난류 등으로 인하여 압력이 급격히 낮아지는 현상

제 7장 증기 원동소 사이클

[1] 증기 원동소의 구조



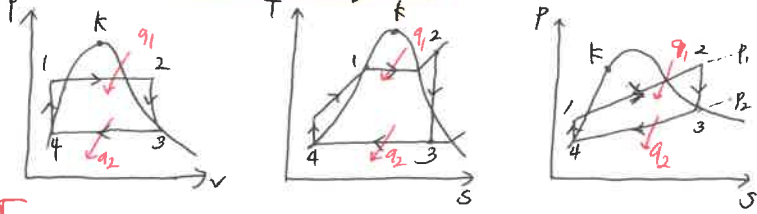
• 열효율 (η_{re})

$$\eta_{re} = \frac{W_{net}}{q_1 + q_{re}} = \frac{W_{TH} + W_{LT} - W_P}{q_1 + q_{re}} = \frac{[(h_2 - h_3) + (h_4 - h_5)] - (h_1 - h_6)}{(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)}$$

(펌프 일을 무시하면) $\eta_{re} = \frac{(h_2 - h_3) + (h_4 - h_5)}{(h_2 - h_1) + (h_4 - h_3)}$

• 개선율 = $\frac{\eta_{re} - \eta_R}{\eta_R} \times 100 \%$

[2] 랭킨 사이클 (Rankine cycle)



• 가열량 (q_1): $\delta q = dh - v dp$ 이므로 $q_1 = \Delta h = h_2 - h_1$

• 방열량 (q_2): $q_2 = h_3 - h_4$

• 터빈 일량 (W_T): 단변팽창 이므로 $W_T = h_2 - h_3$

• 펌프 일량 (W_P): 단변압축 이므로 $W_P = h_1 - h_4$

• 열효율 (η_R): $\eta_R = \frac{W_{net}}{q_1} = \frac{W_T - W_P}{q_1} = \frac{(h_2 - h_3) - (h_1 - h_4)}{h_2 - h_1}$

(펌프 일을 무시하면) $\eta_R = \frac{W_T}{q_1} = \frac{h_2 - h_3}{h_2 - h_1}$

• 증기 소비율 (SR)

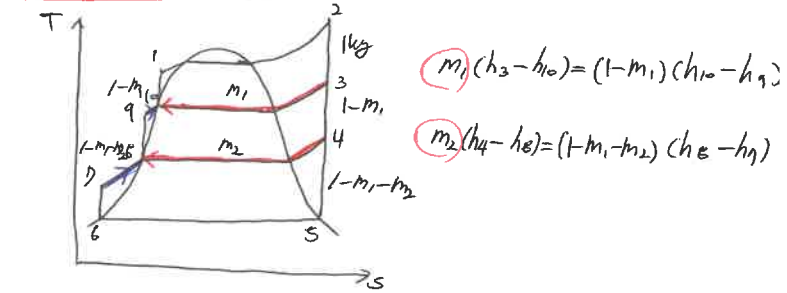
: 1kwh 즉, 3600kJ의 에너지를 얻기 위한 증기 소비량

$m \text{ (kg)} = SR \text{ (kg)} = \frac{3600}{W_{net}}$

($W_{net} \times SR = 3600 \text{ kJ}$)

[4] 재생 사이클 (Regenerative cycle)

: 급수언저리를 이용하여 증기량을 줄 수 있는 한 극기함으로서 열효율은 개선되나 2인의 사이클



[5] 재열-재생 사이클 (Reheating and regenerative cycle)

• 재열 사이클: 실재에서 생기는 내부손실을 작게 하고 열효율을 높이는데 목적이 있다.

• 재생 사이클: 열효율을 단변팽창의 증가시키는데 목적이 있다.

[6] 2유계 사이클 \Rightarrow 크레톤을 위한 사이클로서 사용

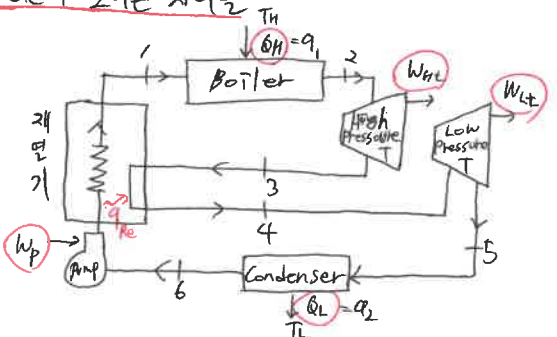
[7] 실제 사이클

• 펌프 효율 $\eta_p = \frac{\text{이론 소요동력}}{\text{실제 소요동력}} = \frac{W_{ideal,P}}{W_{real,P}} = \frac{\Delta h_{ideal}}{\Delta h_{real}} = \frac{\Delta T_i}{\Delta T_r}$

• 터빈 효율 $\eta_T = \frac{\text{실제 생산일량}}{\text{이론 생산일량}} = \frac{W_{real,T}}{W_{ideal,T}} = \frac{\Delta h_{real}}{\Delta h_{ideal}} = \frac{\Delta T_r}{\Delta T_i}$

[3] 재열 사이클 (Reheat cycle)

: 팽창으로 증대시키던 터빈 출구 증기의 온도를 떨어뜨리지 않는 수단으로서 팽창도중에 증기를 뽑아내어 가열장치로 보내 재가열한 후 다시 터빈에 보내는 사이클



제1장 가스동력 사이클

* 내연기관 사이클의 변환 비교

압축비: $\epsilon_d > \epsilon_s > \epsilon_o$

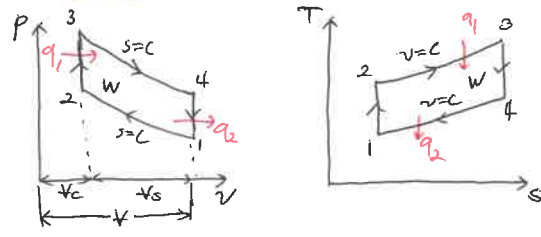
가변량, 압축비: $\eta_o > \eta_s > \eta_d$

가변량, 최대로력: $\eta_o < \eta_s < \eta_d$

[1] 내연기관 사이클

• 오토사이클 (Otto cycle)

: 2단변, 2과정



D: 원터 내경

S: 행정 (stroke)

r_c : 압축비, r_s : 팽창비, r : 실린더 체적 (= $v_c + v_s$)

압축비 (Compression ratio): $\epsilon = \frac{\text{실린더체적}}{\text{연료체적}}$

$$\epsilon = \frac{v}{v_c} = \frac{v_c + v_s}{v_c} = 1 + \frac{v_s}{v_c} = \frac{v_1}{v_2}$$

열효율 (η_o)

$$\eta_o = \frac{W}{q_1} = 1 - \frac{q_2}{q_1} = 1 - \frac{C_v(T_4 - T_1)}{C_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

• 1 → 2 과정 (Pump) : 단변압축

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} \therefore T_2 = T_1 \left(\frac{v_1}{v_2}\right)^{\gamma-1} = T_1 \epsilon^{\gamma-1}$$

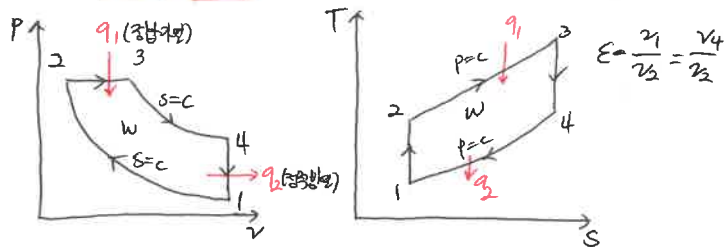
• 3 → 4 과정 (Turbine) : 단변팽창

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma-1} \therefore T_3 = T_4 \left(\frac{v_4}{v_3}\right)^{\gamma-1} = T_4 \epsilon^{\gamma-1}$$

$$\therefore \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} \therefore \eta_o = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\gamma-1}$$

• 디젤사이클 (Diesel cycle)

: 2단변, 3과정, 1과정



열효율: $\eta_d = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\gamma-1} \cdot \frac{\sigma^{\gamma} - 1}{\gamma(\sigma - 1)}$ ($\sigma = \frac{v_3}{v_2}$ 단변비)

• 사바테 사이클 (Sabathe cycle)

: 2단변, 1과정, 1과정, 1과정



$$\epsilon = \frac{v_1}{v_2} = \frac{v_4}{v_3}$$

$$\sigma = \frac{v_3}{v_2}$$

$$p = \frac{p_3}{p_2}$$

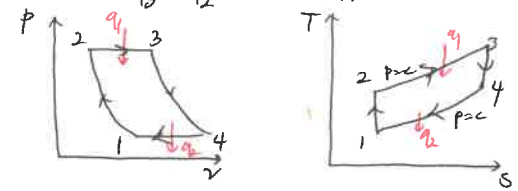
열효율: $\eta_s = 1 - \left(\frac{1}{\epsilon}\right)^{\gamma-1} \cdot \frac{p\sigma^{\gamma} - 1}{(p-1) + \gamma p / (p-1)}$

[2] 가스터빈 사이클

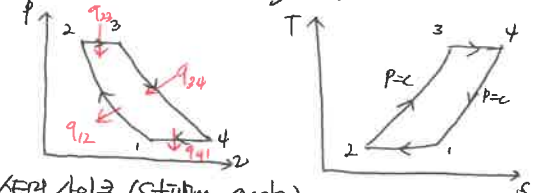
• 브레이튼 사이클 (Brayton cycle): 2단변, 2과정

$$\eta_B = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \left(\frac{1}{r}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

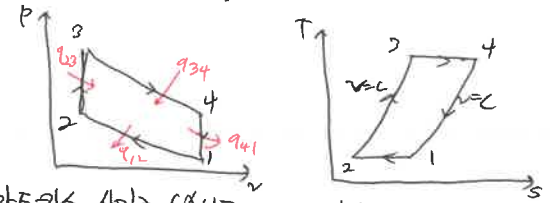
단변비: $r = \frac{p_2}{p_1}$



• 에릭슨 사이클 (Ericsson cycle)



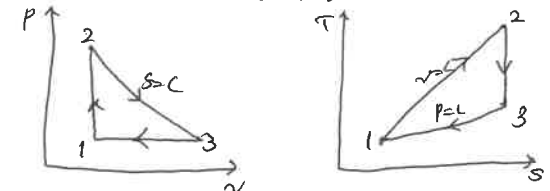
• 스티링 사이클 (Stirling cycle)



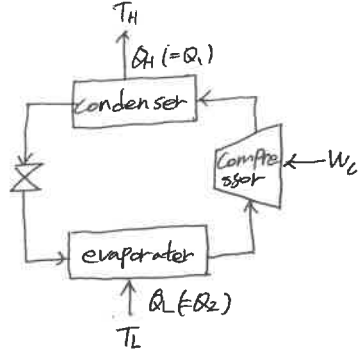
• 아트킨슨 사이클 (Atkinson cycle)



• 라누아 사이클 (Lenoir cycle)



제 9강 냉동사이클



• 냉동기의 성능계수

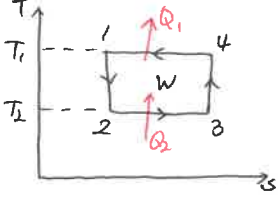
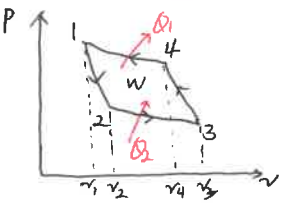
$$E_r = \frac{Q_L}{W_c} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L}$$

• 열펌프의 성능계수

$$E_h = \frac{Q_H}{W_c} = \frac{Q_H}{Q_H - Q_L}$$

$(E_h = 1 + E_r)$

[1] 역카르노 사이클



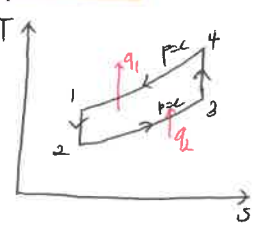
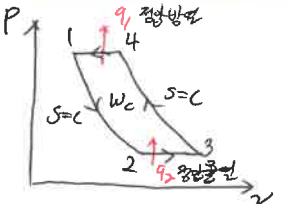
• 냉동기의 성능계수

$$E_r = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_2}{T_1 - T_2}$$

• 열펌프의 성능계수

$$E_h = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{T_1}{T_1 - T_2} \quad (E_h = 1 + E_r)$$

[2] 역브레이튼 사이클 (= 공기냉동의 표준사이클)



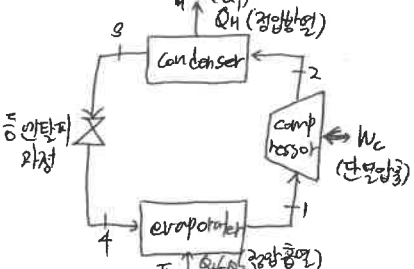
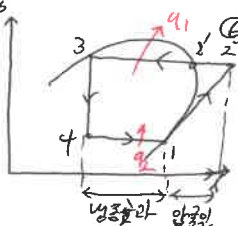
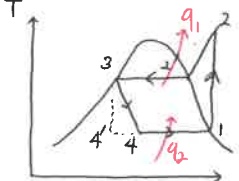
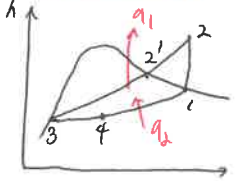
• 냉동효과 (q2) : 저온에서 흡수하는 열량

$$q_2 = q(T_2 - T_1)$$

• 성능계수 (E_p) :

$$E_p = \frac{T_2}{T_1 - T_2} = \frac{T_3}{T_4 - T_3}$$

[3] 증기냉동사이클



• 흡입량 : $q_2 = h_1 - h_4$

• 방열량 : $q_1 = h_2 - h_3$

• 소비일량 : $W_c = h_2 - h_1$

• 성능계수 : $E_r = \frac{q_2}{W_c} = \frac{q_2}{q_1 - q_2}$

$E_h = \frac{q_1}{W_c} = \frac{q_1}{q_1 - q_2}$

[4] 2온 냉동사이클

: 저온측과 고온측에서 각각의 사이클을 행하는 2개의 냉동기를 하나로 결합한 것이며 대체로 -60°C 이하의 저온도를 얻는데 사용된다.

[5] 흡식 냉동사이클

: 흡식 냉동사이클에서는 암모니아나 물의 물리의 친화력을 이용하여 물을 암모니아의 흡제로 사용하고 그 수용액을 가열함으로써 냉매의 증기를 발생시킴과 동시에 압축하는 것이다.

[6] 냉동능력의 표기방법

- 열량의 표기법 : 0°C의 얼음 → 0°C의 물 ⇒ 39.68 kcal/kg
 - 냉동톤 (RT : Ton of refrigeration)
 - : 0°C의 물 / ton (=1000kg) 을 24시간 동안 0°C의 얼음으로 냉동시킬 수 있는 능력
- $$1RT = 39.68 \text{ kcal/kg} \times \frac{1000 \text{ kg}}{24 \text{ hr}} = 3320 \text{ kcal/hr} = 3.86 \text{ kW}$$

[7] 냉매의 일반적인 구비조건

- 물리적 조건
 - ① 증발압력과 응축압력이 적당한 것
 - ② 증발면과 증기의 비열은 크고 액체의 비열은 작은 것
 - ③ 응축점이 낮은 것
 - ④ 증기의 비열비가 작은 것
 - ⑤ 점성계수가 작고, 열전도계수가 큰 것

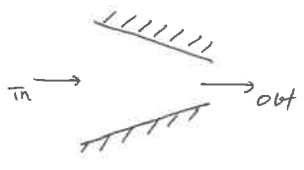
• 화학적 조건

- ① 부식성이 없고 안전성이 있는 것
- ② 얼룩 및 액체의 점성이 작은 것
- ③ 가능한 한 교환유기 능력이 좋은 것
- ④ 인화나 폭발이 위험성이 없는 것
- ⑤ 전극화력이 큰 것
- ⑥ 분해성이고 안정하며 비가연성일 것

제 10 장 가스 및 증기의 흐름

[1] 평상류의 일반 에너지식 (단면유동, 노즐사이에서 흐름)

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i (h_i + \frac{1}{2} V_i^2 + g z_i) - \dot{m}_e (h_e + \frac{1}{2} V_e^2 + g z_e)$$

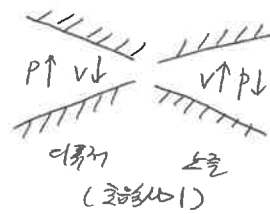
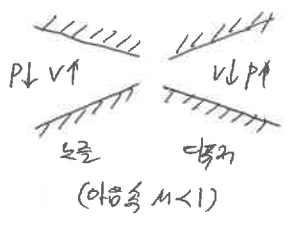


$\dot{Q} = 0, \dot{W} = 0, V_i = 0, z_i = z_e$

$$V_e = \sqrt{2(h_1 - h_2) \times 10^3}$$

$$= 44.7 \sqrt{(h_1 - h_2)}$$

[2] 노즐 (Nozzle)



• 임계속도 $V_c = \sqrt{kRT_c}$ (k: 비열비, R: 기체상수, T_c : 임계온도)

• $M = \frac{V}{V_c}$ (마하수)

• 임계온도 (T_0): $\frac{T_0}{T} = (1 + \frac{k-1}{2} M^2)$

• 임계압도 (P_0): $\frac{P_0}{P} = (1 + \frac{k-1}{2} M^2)^{\frac{1}{k-1}}$

• 임계압력 (P_0): $\frac{P_0}{P} = (1 + \frac{k-1}{2} M^2)^{\frac{k}{k-1}}$

• 임계온도 (T_c): $\frac{T_c}{T_0} = (\frac{2}{k+1})$

• 임계압도 (P_c): $\frac{P_c}{P_0} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{1}{k-1}}$

• 임계압력 (P_c): $\frac{P_c}{P_0} = (\frac{2}{k+1})^{\frac{k}{k-1}}$

• 질량유량 $\dot{m} = \rho A V$
 $= \frac{\rho A V}{RT}$

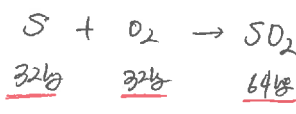
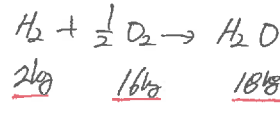
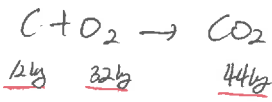
ρ : 밀도 ($= \frac{\rho}{RT}$), A: 단면적 (m^2)
 V: 속도 (m/s)

$P_0 = RT \rightarrow \rho \frac{1}{P} = RT$

$\therefore \rho = \frac{P}{RT}$

제 11 장 연소와 전열

[1] 연소 (Combustion)



- 액화천연가스 (Liquefied natural gas): LNG, CH₄
- 액화석유가스 (Liquefied Petroleum gas): LPG, C₃H₈, C₄H₁₀
- 발열량 (calorific value)
 - 고발열량 (Higher heating value: H_h): 연소가스 중 수분(수)이 포화상태
 - 저발열량 (Lower heating value: H_l): 연소가스 중 수분(수)이 증기상태

• 공기과잉률 (=공기비): $M = \frac{L}{L_0} = \frac{\text{실제 공기량}}{\text{이론 공기량}} > 1$

• 연료비 (Fuel ratio): $\frac{\text{고정탄소}}{\text{휘발분}}$

[2] 전열 (Heat transfer)

• 전도 (conduction)

정판: $Q = -kA \cdot \frac{dT}{dx}$ [W/hr]
 k: 열전도도, A: 전면적, $\frac{dT}{dx}$: 온도차, dx: 전방면 두께

원통: $Q = \frac{2\pi r k \Delta T}{\ln(\frac{r_2}{r_1})}$
 r: 원통의 반경 (m), k: 열전도도, ΔT : 온도차, r_1, r_2 : 반경

• 대류 (convection): 고체 벽과 유체사이의 전열

$Q = hA (t_w - t_f)$ [W/hr]

• 복사 (Radiation): 열이 고온물체로부터 저온으로 되어 공간을 지나 가는 물체에 도달한 후 열로 되는 현상

스테판-볼츠만 법칙: $E_b = \sigma T^4 \propto T^4$

(σ : 스테판-볼츠만 상수 [$kJ/m^2 \cdot K^4$], T: 흑체표면의 절대온도(K))