

열역학특론
3장 - 열역학 제1법칙과
에너지 방정식

조병남

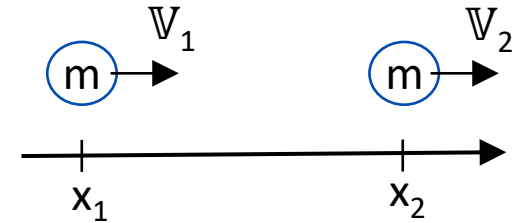
NaTE (Nanofluids & Thermal Energy) Lab.

일 (Work)

▶ 일 (work, W or δW)

✓ 기계적인 일: 변위 x 동안 작용하는 힘 F

$$\delta W = Fdx \quad {}_1W_2 = W_{12} = \int_1^2 Fdx$$



▪ 예1: 물체를 가속 시키기

$$F = ma = m \frac{dV}{dt} = m \frac{dx}{dt} \frac{dV}{dx} = mV \frac{dV}{dx} \rightarrow \int_{x_1}^{x_2} Fdx = \int_{x_1}^{x_2} mVdV \rightarrow F(x_2 - x_1) = \frac{1}{2} m(V_2^2 - V_1^2)$$

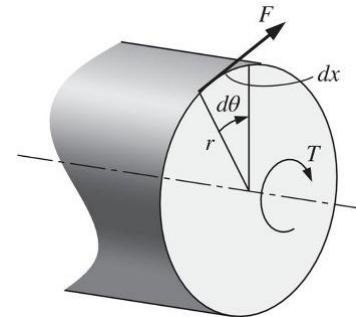
$$W = W_{12} = KE_2 - KE_1$$

▪ 예2: 물체를 들어 올리기

$$\delta W = Fdz = mgdz \quad W_{12} = \int_1^2 mgdz = mg(z_2 - z_1) = PE_2 - PE_1$$

▪ 예3: 축을 회전 시키기 (shaft work)

$$\delta W = \tau d\theta \rightarrow \begin{cases} W_{12} = \int_1^2 \tau d\theta \\ \frac{\delta W}{dt} = \frac{\tau d\theta}{dt} \rightarrow \dot{W} = \tau\omega \end{cases}$$



동력(power): \dot{W} [W]=[J/s]

에너지 방정식

➤ 일 (work)

- ✓ 전기적인 일 (저항, 모터 등)
 - 일은 관심 없음. 동력을 중요하게 고려함.

$$\dot{W}_{elec} = IE = I^2R = \frac{E^2}{R} \quad [W]$$

(마력, horsepower) $1\text{hp} = 0.7457 \text{ kW}$

✓ 경계 이동에 의한 일 (boundary work)

$$W_{12} = \int_1^2 F dx = \int_1^2 \frac{F}{A} dx \cdot A = \int_1^2 P dV$$

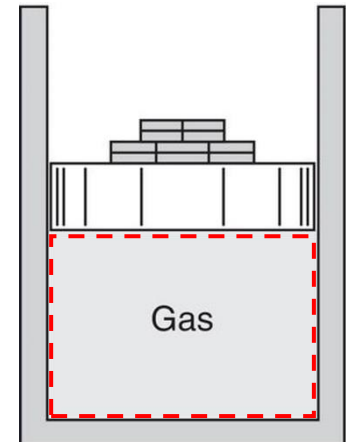
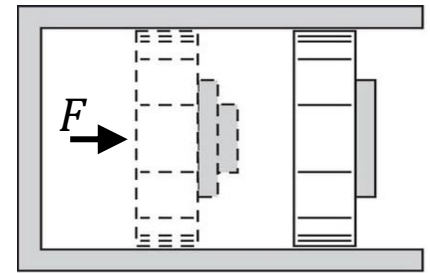
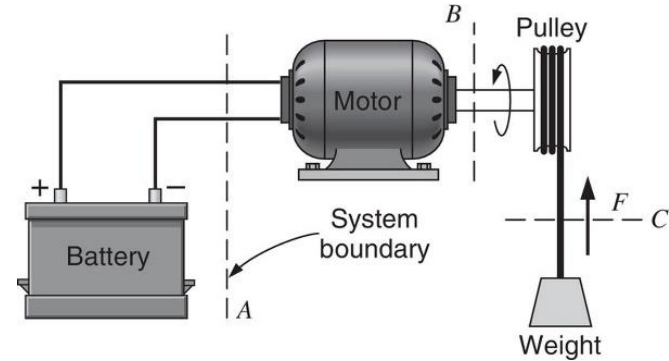
✓ Energy transfer across the boundary of a system

✓ 일의 부호 (sign convention for work)

- 시스템이 주변에 일을 한 경우: positive
- 주변으로부터 시스템이 일을 받은 경우: negative

✓ 예: 피스톤-실린더 안에 있는 기체

- 팽창 (expansion): $W > 0$
- 압축 (compression): $W < 0$



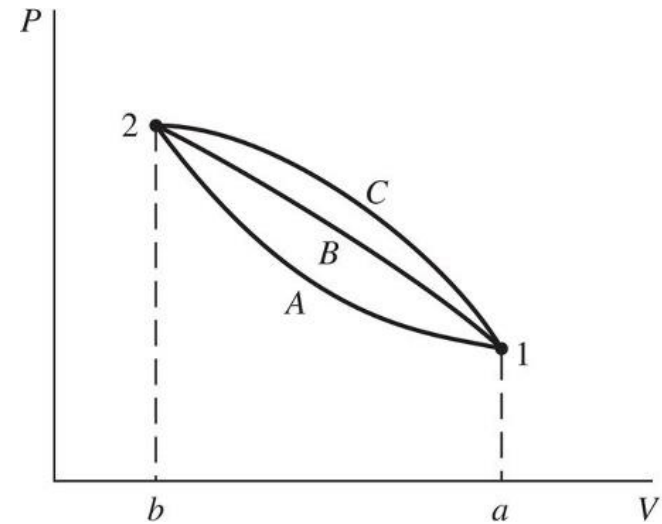
폴리트로픽 과정

▶ 경계 이동에 의한 일

- ✓ 압력-체적 선도 (P-V diagram) 아래쪽의 면적
- ✓ 일의 양은 경로에 의해 달라짐
 - 일은 경로 함수 (path function)
 - δW : 불완전 미분 (inexact differential)
 - 쓸 수 없는 표현: $W_1, W_2, W_2 - W_1$ etc.
- ✓ 비평형 과정에서도 경계 이동에 의한 일이 가능함
- ✓ 압력이 일정하게 유지되는 과정

$$W_{12} = \int_1^2 P dV = P(V_2 - V_1)$$

- ✓ 압력이 일정하지 않은 과정
 - 압력 변화와 부피 변화의 관계를 알아야 함.
- ✓ 부피가 일정하면
 - No work ($W_{12} = 0$)



폴리트로픽 과정

▶ 폴리트로픽 과정 (Polytropic process)

✓ 지수 n 은 과정의 유형을 나타냄. ($-\infty < n < +\infty$)

$$PV^n = C \quad (C: \text{상수})$$

▪ $n=1$ 인 경우

$$W_{12} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V} dV = C(\ln V_2 - \ln V_1) = C \ln \frac{V_2}{V_1} = P_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1}$$

▪ $n \neq 1$ 인 경우

$$\begin{aligned} W_{12} &= \int_1^2 P dV = \int_1^2 \frac{C}{V^n} dV = \frac{C}{1-n} (V_2^{1-n} - V_1^{1-n}) = \frac{1}{1-n} (P_2 V_2^n V_2^{1-n} - P_1 V_1^n V_1^{1-n}) \\ &= \frac{1}{1-n} (P_2 V_2 - P_1 V_1) \end{aligned}$$

경계 이동에 의한 일

(문제 6) 실린더 안에 있는 기체(gas)의 초기 상태 $P_1=30$ kPa, $V_1=0.07$ m³에서 최종 상태 $P_2=130$ kPa, $V_2=0.014$ m³로 변화하였다. 이 과정에서 압력과 체적은 선형적인 관계를 유지하였다.

이 과정 동안의 일을 kJ의 단위로 구하라.

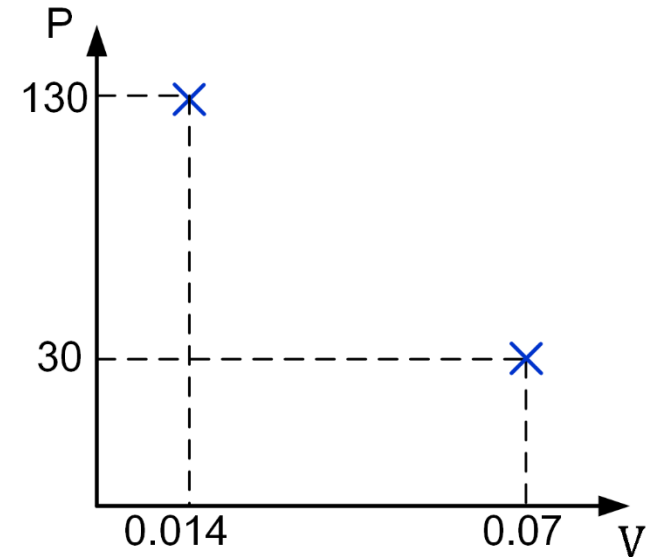
State 1	State 2
$P_1 = 30$ kPa	$P_2 = 130$ kPa
$V_1 = 0.07$ m ³	$V_2 = 0.014$ m ³

$$P = P_1 + (P_2 - P_1) \frac{V - V_1}{V_2 - V_1} = -1785.7V + 155$$

$$W_{12} = \int_1^2 P dV = \int_1^2 (-1785.7V + 155) dV = \left[-\frac{1785.7}{2} V^2 + 155V \right]_1^2$$

$$W_{12} = -\frac{1785.7}{2} \times (0.014^2 - 0.07^2) + 155 \times (0.014 - 0.07) = \underline{-4.48 \text{ [kJ]}}$$

$$W_{12} = P_{avg} \cdot \Delta V = ?$$



열 (Heat)

➤ 열 (Heat, Q or δQ)

✓ 두 시스템의 온도차로 인해 시스템의 경계를 통과하여 높은 온도에서 낮은 온도로 전달되는 에너지

- 과도적 (transient) 현상
- 전도 (conduction), 대류 (convection), 복사 (radiation)

$${}_1Q_2 = Q_{12} = \int_1^2 \delta Q$$

✓ 단위

- 줄 (joule, J)
- 칼로리 (calorie, cal): 물 1g을 14.5 °C에서 15.5 °C로 올리는 데 필요한 열

✓ 열의 부호

- 시스템으로 전달되는 열: positive
- 시스템에서 나오는 열: negative
- 열전달이 없는 과정: 단열 과정 (adiabatic process)

✓ 경로 함수 (불완전 미분)

✓ 비열전달 (specific heat transfer)

$$q = \frac{Q}{m}$$

열 (Heat)

➤ 열전달 방식

✓ 전도: 물질을 구성하는 분자의 상호작용(충돌)에 의한 에너지 전달

- 푸리에 법칙 (Fourier's law)
- 열전도율 (thermal conductivity, k)

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx}$$

✓ 대류: 유체 분자의 확산과 이류에 의한 에너지 전달

- Convection = Conduction + Advection
- 뉴턴의 냉각 법칙 (Newton's law of cooling)
- 대류 열전달 계수 (h)

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty)$$

✓ 복사: 전자기파에 의한 에너지 전달

- 매질이 필요 없음
- 스테판-볼츠만 법칙 (Stefan-Boltzmann law)
- 방사율 (emissivity, ϵ)
- 스테판-볼츠만 상수

$$\dot{Q} = \epsilon\sigma A(T_s^4 - T_{sur}^4)$$

에너지 보존

➤ 물체의 에너지 (E)

$$E = \text{internal} + \text{kinetic} + \text{potential} = U + KE + PE$$

➤ 단위 질량당 총에너지

$$e = \frac{E}{m} = u + ke + pe = u + \frac{1}{2}V^2 + gz$$

➤ 에너지의 변환 (Energy conversion)

✓ 일 (W) $\cdots \rightarrow \Delta KE + \Delta PE$ / 열 (Q) $\cdots \rightarrow \Delta U$

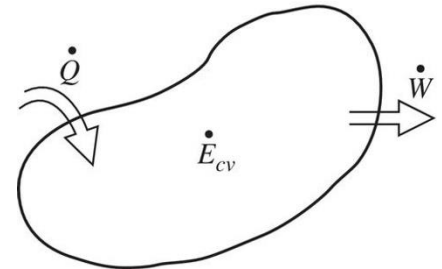
➤ 에너지 보존 (Conservation of energy, energy balance)

✓ 열역학적 과정에서 에너지 변환이 발생하여도 총에너지는 일정

(process) $\Delta E_{CV} = \Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q_{12} - W_{12}$

(differential form) $dU + d(KE) + d(PE) = \delta Q - \delta W$

(rate form) $\dot{E}_{CV} = \frac{dE_{CV}}{dt} = \frac{dU}{dt} + \frac{d(KE)}{dt} + \frac{d(PE)}{dt} = \dot{Q} - \dot{W}$



예제

(예제 3.1) 피스톤-실린더 장치에서 피스톤에 200 kJ의 일을 가해 실린더 내 기체를 압축한다. 압축 과정에서 기체는 따뜻해지기 때문에 실린더 벽면을 통해 45 kJ의 열손실이 발생한다. 기체를 검사 체적으로 생각하고 이 과정에서 내부 에너지 변화를 구하라.

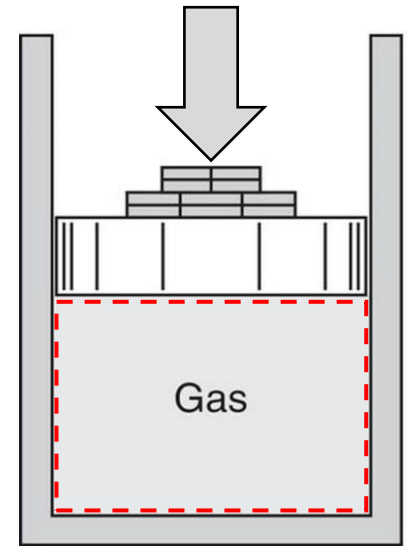
(가정) 운동에너지와 위치에너지의 변화 없음

$$(\Delta KE = 0 \text{ and } \Delta PE = 0)$$

에너지 보존 법칙

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q_{12} - W_{12}$$

$$\rightarrow \Delta U = Q_{12} + W_{12} = -45 - (-200) = \underline{155 \text{ kJ}}$$



문제

(문제 4) 피스톤-실린더 장치에 1MPa, 400 °C 물이 들어 있다. 물은 아래의 두 과정을 통해 상태가 변화한다.

과정 1-2: (등압과정) 물이 포화증기 상태에 도달할 때까지 압축되면서 냉각

과정 2-3: (정적과정) 150 °C까지 냉각

(1) 위 과정을 T-v, P-v 선도에 그려라.

TABLE B.1.2 Saturated Water Pressure Entry (continued)

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
850	172.96	0.001118	0.22586	0.22698	731.25	1847.45	2578.69
900	175.38	0.001121	0.21385	0.21497	741.81	1838.65	2580.46
950	177.69	0.001124	0.20306	0.20419	751.94	1830.17	2582.11
1000	179.91	0.001127	0.19332	0.19444	761.67	1821.97	2583.64
1100	184.09	0.001133	0.17639	0.17753	780.08	1806.32	2586.40

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
800 kPa (170.43°C)					1000 kPa (179.91°C)			
Sat.	0.24043	2576.79	2769.13	6.6627	0.19444	2583.64	2778.08	6.5864
200	0.26080	2630.61	2839.25	6.8158	0.20596	2621.90	2827.86	6.6939
250	0.29314	2715.46	2949.97	7.0384	0.23268	2709.91	2942.59	6.9246
300	0.32411	2797.14	3056.43	7.2327	0.25794	2793.21	3051.15	7.1228
350	0.35439	2878.16	3161.68	7.4088	0.28247	2875.18	3157.65	7.3010
400	0.38426	2959.66	3267.07	7.5715	0.30659	2957.29	3263.88	7.4650

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
140	361.3	0.001080	0.50777	0.50885	588.72	1961.30	2550.02
145	415.4	0.001085	0.44524	0.44632	610.16	1944.69	2554.86
150	475.9	0.001090	0.39169	0.39278	631.66	1927.87	2559.54
155	543.1	0.001096	0.34566	0.34676	653.23	1910.82	2564.04
160	617.8	0.001102	0.30596	0.30706	674.85	1893.52	2568.37

문제

(문제 4) 피스톤-실린더 장치에 1MPa, 400 °C 물이 들어 있다. 물은 아래의 두 과정을 통해 상태가 변화한다.

과정 1-2: (등압과정) 물이 포화증기 상태에 도달할 때까지 압축되면서 냉각

과정 2-3: (정적과정) 150 °C까지 냉각

(1) 위 과정을 T-v, P-v 선도에 그려라.

(2) 전체 과정 동안의 단위 질량당 일을 구하라. (답: -112.2 kJ/kg)

(3) 전체 과정 동안의 단위 질량당 열전달을 구하라. (답: -1485 kJ/kg)

사이클 과정에서의 일

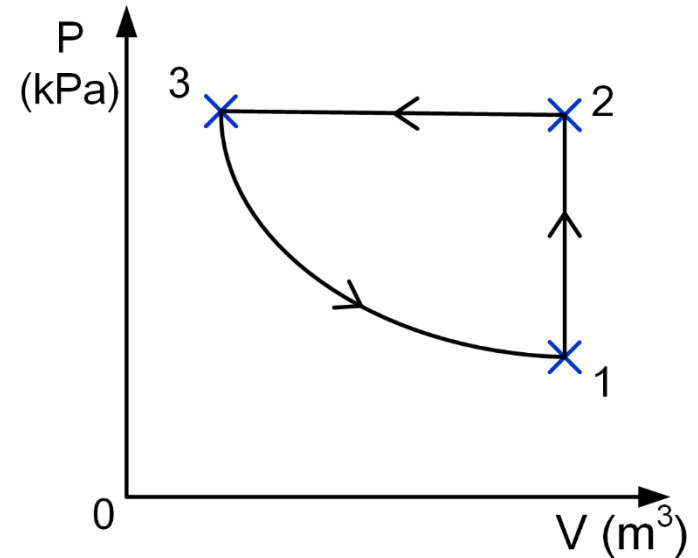
▶ 사이클 과정 (feat. P-V diagram)

- ✓ 과정 1-2: 정적과정
- ✓ 과정 2-3: 등압과정 + 압축
- ✓ 과정 3-1: 팽창
- ✓ 질문

$$W_{12} = \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases} \quad W_{23} = \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases} \quad W_{31} = \begin{cases} > 0 \\ = 0 \\ < 0 \end{cases}$$

✓ 1 사이클 동안의 일

- 반시계방향 사이클: work is negative!
- 시계방향 사이클: work is positive!



$$(W_{cycle} < 0)$$

문제

(문제 8) 피스톤-실린더 장치 내부의 기체가 아래와 같은 사이클 과정에 놓여있다.

과정 1-2: 등압 과정 ($P_1 = 100 \text{ kPa}$, $V_1 = 0.025 \text{ m}^3$, $W_{12} = 1.5 \text{ kJ}$)

과정 2-3: 폴리트로픽 압축 ($PV = \text{일정}$, $U_2 = U_3$)

과정 3-1: 정적 과정 ($U_1 - U_3 = -133.5 \text{ kJ}$)

모든 과정에서 운동에너지와 위치에너지를 무시한다.

(a) 위의 사이클 과정을 P-V 선도에 스케치하라.

(b) 사이클 과정 동안의 일을 계산하라.

(c) 과정 1-2에서의 열전달을 구하라.

열기관 (Heat engine)

➤ 열기관

- ✓ 열에너지 (thermal energy, heat)를 기계적인 일로 변환하는 장치
- ✓ 고온의 열원과 저온의 열원 사이의 온도차를 이용
- ✓ 일반적으로 사이클 운전을 함
- ✓ 예: 증기기관, 가솔린/디젤 엔진, 제트엔진, 가스터빈 등
- ✓ 에너지 보존 (열역학 제1법칙)

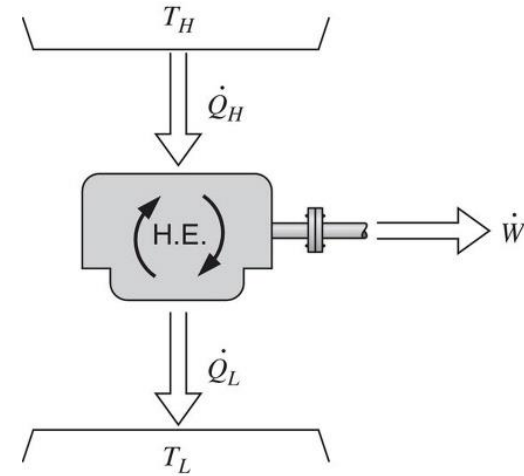
$$\text{Energy in} = \text{energy out} \quad \rightarrow \quad Q_H = Q_L + W$$

$$\quad \quad \quad \rightarrow \quad \dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W}$$

- ✓ 열효율 (thermal efficiency, η)

$$\eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

- 대형 동력 발전소: 35~50%
- 가솔린 기관: 30~35%
- 디젤 기관: 30~40%



열기관 예제

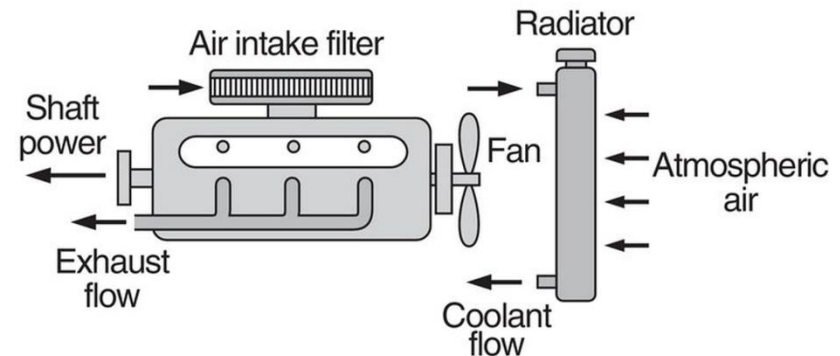
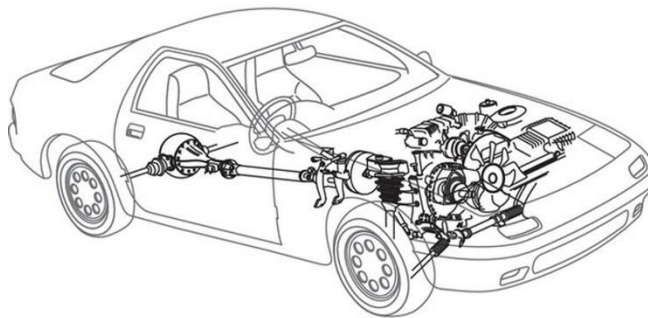
(예제 5.1) 자동차 기관이 열효율 30%로 출력 축에 136 hp의 동력을 전달한다. 연료는 연소하면서 35000 kJ/kg의 열을 발생시킨다. 주위로 방출된 총열전달률과 연료 소모량을 kg/s 단위로 구하라.

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} \quad \dot{W} = 136 \text{ hp} = 136 \times 0.7457 \text{ (kW/hp)} = 101.4 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_H = \frac{\dot{W}}{\eta} = \frac{101.4}{0.3} = 338 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = \dot{Q}_H - 0.3\dot{Q}_H = 0.7\dot{Q}_H = \underline{236.6 \text{ kW}}$$

$$\dot{Q}_H = q_H \dot{m} \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{Q}_H}{q_H} = \frac{338 \text{ kW}}{35000 \text{ kJ/kg}} = \underline{0.009657 \text{ kg/s}}$$



냉동기 (Refrigerator)

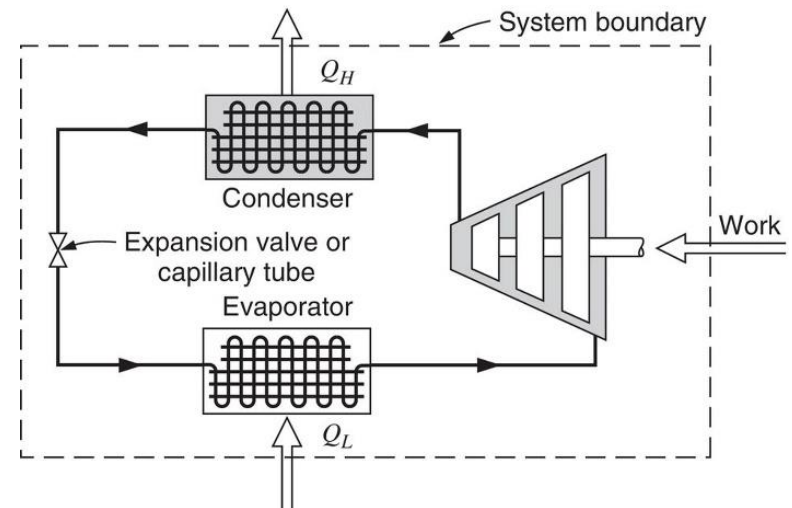
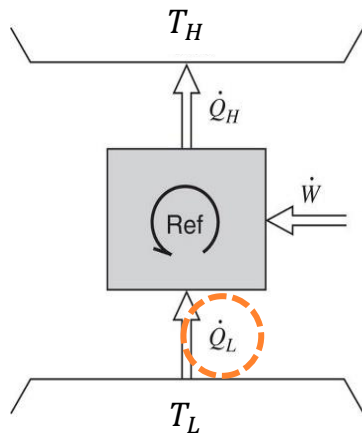
➤ 냉동기

- ✓ 밀폐된 용기 속의 온도를 주위보다 낮추는 장치
- ✓ 저온의 물체에서 열을 흡수하여 고온의 다른 물체로 운반
 - 예: 증기 압축 냉동 사이클 - 압축기, 응축기, 팽창 밸브(모세관), 증발기로 구성

(Energy balance) $Energy\ in = energy\ out \rightarrow Q_H = Q_L + W$ or $\dot{Q}_L + \dot{W} = \dot{Q}_H$

✓ 성능 계수 (coefficient of performance, COP; β)

$$COP_R = \beta_R = \frac{\text{energy sought}}{\text{energy input}} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$



열펌프 (Heat pump)

➤ 열펌프

- ✓ 저온의 물체에서 열을 흡수하여 고온의 물체에 열을 주는 장치
- ✓ 열기관 사이클을 반대로 작동

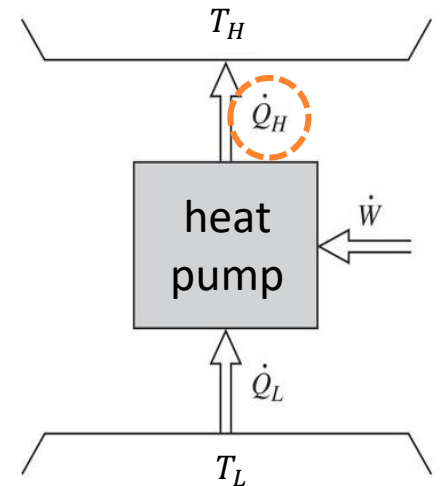
(Energy balance) *Energy in = energy out* → $Q_H = Q_L + W$ or $\dot{Q}_L + \dot{W} = \dot{Q}_H$

- ✓ 성능 계수 (coefficient of performance, COP; β)

$$COP_H = \beta_H = \frac{\text{energy sought}}{\text{energy input}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L} = \frac{1}{1 - \dot{Q}_L/\dot{Q}_H}$$

$$\beta_H = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_L}{\dot{W}} = 1 + \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = 1 + \beta_R$$

$$COP_H = 1 + COP_R$$



예제

(예제 5.2) 그림과 같이 부엌에 있는 냉장고는 전기 동력으로 150 W가 입력되어 시스템이 운전되며 부엌의 공기로 400 W의 열을 방출한다. 저온 공간으로부터 시간당 에너지가 제거되는 양과 냉장고의 성능 계수를 구하라.

(검사 체적): 냉장고, (가정): 정상 상태

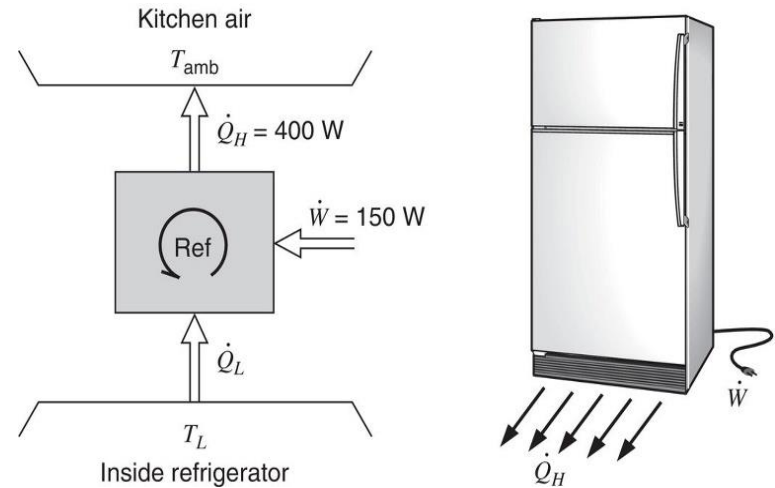
(Energy balance)

$$\dot{Q}_L + \dot{W} = \dot{Q}_H$$

$$\rightarrow \dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 400 - 150 = \underline{250 \text{ W}}$$

(성능계수)

$$\beta_R = \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = \frac{250}{150} = \underline{1.67}$$



문제

(문제 9) 냉동기 또는 열펌프를 위한 사이클 시스템을 고려한다. 시스템으로의 열전달은 60 kJ 이고 시스템으로의 입력 일은 30 kJ이다.

(a) 시스템에서 외부로의 열전달을 구하라.

$$Q_H = Q_L + W \quad \left(\begin{array}{l} Q_L = 60 \text{ kJ} \\ W = 30 \text{ kJ} \end{array} \right) \quad \rightarrow \quad Q_H = 60 + 30 = \underline{90 \text{ kJ}}$$

(b) 냉동기의 성능계수를 구하라.

$$COP_R = \frac{Q_L}{W} = \frac{60}{30} = \underline{2}$$

(c) 열펌프의 성능계수를 구하라.

$$COP_H = \frac{Q_H}{W} = \frac{90}{30} = \underline{3} \quad (COP_H = 1 + COP_R = 1 + 2 = 3)$$

예제

(예제 3.11) 피스톤-실린더 장치에 1000 kPa, 500 °C의 수증기가 0.1 kg 들어 있다. 피스톤에 일정한 힘이 작용하여 물의 체적이 1/2이 될 때까지 냉각된다. 피스톤이 멈추게에 닿은 채로 25 °C까지 계속 냉각된다.

물의 최종 압력과 전 과정의 일을 구하고, 이 과정을 P-v 선도에 나타내라.

(풀이) 초기상태(1), 최종상태(2)

과정 1-1a: P=일정 (등압과정)

과정 1a-2: 부피 일정 (정적과정)

상태(1): 표 B.1.2

At 1000 kPa, $P_{sat} = 179.91 \text{ °C} < 500 \text{ °C}$

상태(1): 과열증기 (표 B.1.3)

$$v_1 = 0.35411 \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

$$u_1 = 3124.34 \text{ (kJ/kg)}$$

상태(2): $T_2 = 25 \text{ °C}$, $V_2 = 0.5V_1$

$$v_2 = \frac{V_{1a}}{m} = \frac{V_2}{m} = \frac{v_1}{2} = 0.17706 \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

$$v_f(25\text{°C}) < v_2 < v_g(25\text{°C})$$

TABLE B.1.2 Saturated Water Pressure Entry (continued)

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
850	172.96	0.001118	0.22586	0.22698	731.25	1847.45	2578.69
900	175.38	0.001121	0.21385	0.21497	741.81	1838.65	2580.46
950	177.69	0.001124	0.20306	0.20419	751.94	1830.17	2582.11
1000	179.91	0.001127	0.19332	0.19444	761.67	1821.97	2583.64
1100	184.09	0.001133	0.17639	0.17753	780.08	1806.32	2586.40

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)				
					v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
800 kPa (170.43°C)					1000 kPa (179.91°C)			
Sat.	0.24043	2576.79	2769.13	6.6627	0.19444	2583.64	2778.08	6.5864
200	0.26080	2630.61	2839.25	6.8158	0.20596	2621.90	2827.86	6.6939
250	0.29314	2715.46	2949.97	7.0384	0.23268	2709.91	2942.59	6.9246
300	0.32411	2797.14	3056.43	7.2327	0.25794	2793.21	3051.15	7.1228
350	0.35439	2878.16	3161.68	7.4088	0.28247	2875.18	3157.65	7.3010
400	0.38426	2959.66	3267.07	7.5715	0.30659	2957.29	3263.88	7.4650
500	0.44331	3125.95	3480.60	7.8672	0.35411	3124.34	3478.44	7.7621
600	0.50184	3297.91	3699.38	8.1332	0.40109	3296.76	3697.85	8.0289

TABLE B.1.1 Saturated Water

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
0.01	0.6113	0.001000	206.131	206.132	0	2375.33	2375.33
5	0.8721	0.001000	147.117	147.118	20.97	2361.27	2382.24
10	1.2276	0.001000	106.376	106.377	41.99	2347.16	2389.15
15	1.705	0.001001	77.924	77.925	62.98	2333.06	2396.04
20	2.339	0.001002	57.7887	57.7897	83.94	2318.98	2402.91
25	3.169	0.001003	43.3583	43.3593	104.86	2304.90	2409.76

예제

(예제 3.11) 피스톤-실린더 장치에 1000 kPa, 500 °C의 수증기가 0.1 kg 들어 있다. 피스톤에 일정한 힘이 작용하여 물의 체적이 1/2이 될 때까지 냉각된다. 피스톤이 멈추게에 닿은 채로 25 °C까지 계속 냉각된다.

물의 최종 압력과 전 과정의 일을 구하고, 이 과정을 P-v 선도에 나타내라.

(풀이) 상태(1): $v_1 = 0.35411 \text{ (m}^3/\text{kg)}$ $u_1 = 3124.34 \text{ (kJ/kg)}$

상태(2): 이상 영역 ($T_2=25 \text{ °C}$, $V_2=0.5V_1$)

$$v_2 = v_{1a} = 0.17706 \text{ (m}^3/\text{kg)}$$

$$x_2 = \frac{(v_2 - v_f)}{v_{fg}} = \frac{(0.17706 - 0.001003)}{43.3593} = \underline{0.00406}$$

$$u_2 = u_f + x_2 u_{fg} = 104.86 + 0.00406 \cdot 2304.90 = \underline{114.22 \text{ (kJ/kg)}}$$

$$\begin{aligned} W_{12} = W_{11a} &= m \cdot w_{11a} = m \int_1^{1a} P dv = m \cdot P_1 (v_{1a} - v_1) \\ &= 0.1 \cdot 1000(0.17706 - 0.35411) = \underline{-17.71 \text{ (kJ)}} \end{aligned}$$

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q_{12} - W_{12} \quad (\text{neglect } \Delta KE \text{ and } \Delta PE)$$

$$\rightarrow Q_{12} = \Delta U + W_{12} = m(u_2 - u_1) + W_{12} = 0.1 \cdot (114.2 - 3124.34) + (-17.71) = \underline{-318.7 \text{ (kJ)}}$$

TABLE B.1.1 Saturated Water

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v _f	Evap. v _{fg}	Sat. Vapor v _g	Sat. Liquid u _f	Evap. u _{fg}	Sat. Vapor u _g
0.01	0.6113	0.001000	206.131	206.132	0	2375.33	2375.33
5	0.8721	0.001000	147.117	147.118	20.97	2361.27	2382.24
10	1.2276	0.001000	106.376	106.377	41.99	2347.16	2389.15
15	1.705	0.001001	77.924	77.925	62.98	2333.06	2396.04
20	2.339	0.001002	57.7887	57.7897	83.94	2318.98	2402.91
25	3.169	0.001003	43.3583	43.3593	104.86	2304.90	2409.76

엔탈피

▶ 등압 준평형 가열 과정

- ✓ 운동에너지 및 위치에너지 변화 없음
- ✓ 열역학 제1법칙

$$\Delta U = Q_{12} - W_{12}$$

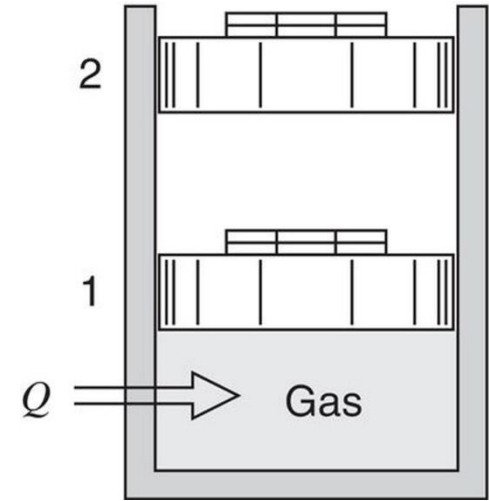
- ✓ 경계 이동에 의한 일 (과정 1 → 2)

$$W_{12} = \int_1^2 P dV = P(V_2 - V_1)$$

- ✓ 과정 1 → 2 동안 전달된 열량

$$Q_{12} = \Delta U + W_{12} = (U_2 - U_1) + P(V_2 - V_1) = (U_2 + PV_2) - (U_1 + PV_1)$$

$$\therefore \underline{Q_{12} = H_2 - H_1} \quad \underline{q_{12} = h_2 - h_1}$$



비열

➤ 열용량 (Heat capacity, C)

✓ 물질의 온도를 1도 높이는데 필요한 열량 (단위: J/K)

✓ 비열 (Specific heat)

▪ 물질 1 g (단위 질량)의 온도를 1도 높이는데 필요한 열량 (단위: J/g·K)

✓ Case 1

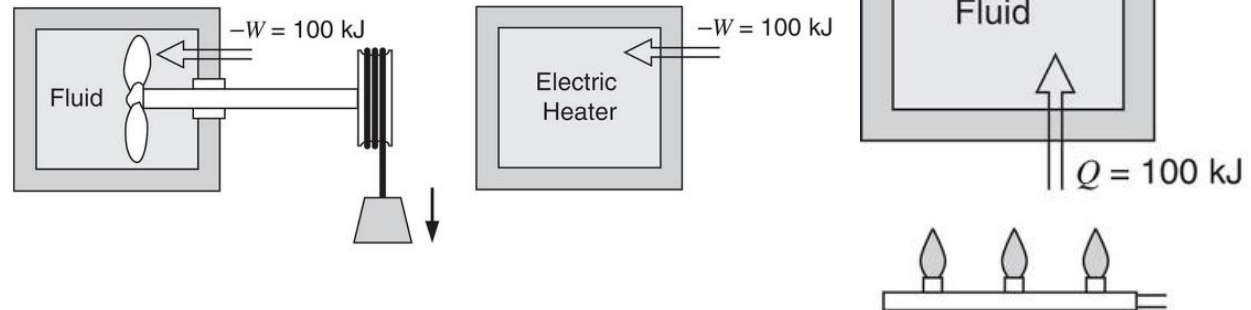
▪ 부피가 일정한 용기 안에 있는 기체를 가열하는 경우 (위치, 운동에너지 변화 무시)

$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q_{12} - W_{12} \quad \rightarrow \Delta u = q \quad \rightarrow du = \delta q$$

$$\rightarrow \delta q = \frac{\partial u}{\partial T} dT = C_v dT$$

▪ 정적 비열 (specific heat at constant volume)

$$C_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v$$



비열

➤ 열용량 (Heat capacity, C)

✓ Case 2

- 기체의 부피를 일정하게 유지하면서 가열하는 경우 (위치, 운동에너지 변화 무시)

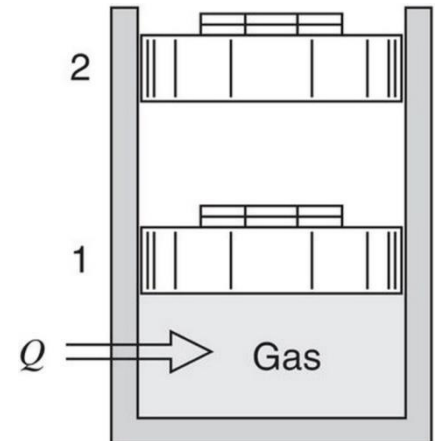
$$\Delta U + \Delta KE + \Delta PE = Q_{12} - W_{12} \quad \rightarrow \quad \Delta u = q - w \quad \rightarrow \quad q = (u_2 - u_1) + P(v_2 - v_1)$$

$$\rightarrow q = (u_2 + Pv_2) - (u_1 + Pv_1) = \Delta h \quad \rightarrow \quad \delta q = dh \quad \rightarrow \quad \delta q = \frac{\partial h}{\partial T} dT = C_p dT$$

- 등압 비열 (specific heat at constant pressure)

$$C_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

- ✓ 고체나 액체와 같이 비압축성 물질은 비체적이 매우 작아 정적 비열과 등압 비열이 거의 동일함



비열

정적비열 / 등압비열

$$c_v \equiv \left(\frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad c_p \equiv \left(\frac{\partial h}{\partial T} \right)_p$$

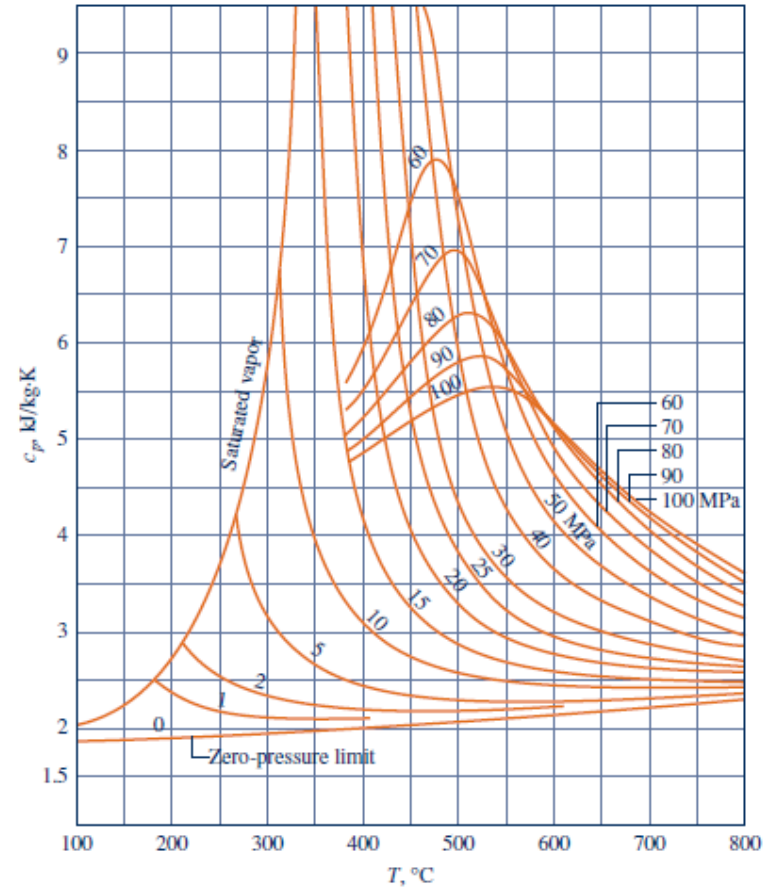
물의 비열 (증기)

✓ 과열 증기 영역

- 물의 비열은 온도와 압력에 따라 크게 변화

✓ 물의 내부에너지와 엔탈피

- 열역학 상태량표 이용



C_p of water vapor as a function of temperature and pressure

이상기체의 내부에너지, 엔탈피, 비열

▶ 이상기체의 내부에너지

✓ 온도에 주로 영향을 받음. (압력 변화에 따른 내부에너지 변화가 작음)

▪ 압력이 낮을수록, 온도가 높을수록 압력에 대한 영향이 작아짐.

▪ 이상기체 모델이 타당한 낮은 압력 조건에서 내부에너지는 온도만의 함수로 가정

$$Pv = RT \quad u = u(T) \quad \rightarrow \quad C_{v0} = \frac{du}{dT} \quad \rightarrow \quad dU = mC_{v0}dT$$

▶ 이상기체의 엔탈피

✓ 이상기체의 엔탈피도 온도만의 함수

$$h = u + Pv = u + RT = h(T) \quad \rightarrow \quad C_{p0} = \frac{dh}{dT} \quad \rightarrow \quad dH = mC_{p0}dT$$

$$C_{p0} = \frac{dh}{dT} = \frac{d}{dT}(u + RT) = \frac{du}{dT} + R = C_{v0} + R$$

$$\rightarrow C_{p0} - C_{v0} = R$$

$$\rightarrow \bar{C}_{p0} - \bar{C}_{v0} = \bar{R}$$

$$(\bar{C}_{p0} = MC_{p0}, \bar{C}_{v0} = MC_{v0}, \bar{R} = MR)$$

TABLE 3.1 Internal Energy for Superheated Vapor Steam

T, °C	P, kPa			
	10	100	500	1000
200	2661.3	2658.1	2642.9	2621.9
700	3479.6	3479.2	3477.5	3475.4
1200	4467.9	4467.7	4466.8	4465.6

예제

(예제 3.14) 실린더-피스톤 장치에 초기 부피가 0.1 m^3 이며 150 kPa , $25 \text{ }^\circ\text{C}$ 인 질소가 들어 있다. 피스톤이 움직이면서 압력이 1 MPa , 온도가 $150 \text{ }^\circ\text{C}$ 가 되도록 질소를 압축하였다. 압축 과정 동안 질소로부터 열이 전달되었으며, 질소에 가한 일은 20 kJ 이었다. 열전달량을 구하라.

상태1: 초기상태 ($P_1 = 150 \text{ kPa}$, $T_1 = 25 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_1 = 0.1 \text{ m}^3$)

상태2: 최종상태 ($P_2 = 1000 \text{ kPa}$, $T_2 = 150 \text{ }^\circ\text{C}$)

열역학 제1법칙 (운동에너지, 위치에너지 변화 무시)

$$Q_{12} = \Delta U + W_{12} = m(u_2 - u_1) + W_{12} = mC_{v0}(T_2 - T_1) + W_{12}$$

$$C_{v0} = \frac{du}{dT}$$

$$PV = mRT \rightarrow m = \frac{PV}{RT} = \frac{150 \cdot 0.1}{0.2968 \cdot 298.15} = \underline{0.1695 \text{ kg}} \left(R = \frac{8.3145}{28.013} = 0.2968 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} \right)$$

$$Q_{12} = 0.1695 \cdot 0.745 \cdot (150 - 25) - 20 = \underline{-4.215 \text{ kJ}}$$

TABLE A.5 Properties of Various Ideal Gases at 25°C , 100 kPa^* (SI Units)

Gas	Chemical Formula	Molecular Mass (kg/kmol)	R (kJ/kg-K)	ρ_0 (kg/m ³)	C_{p0} (kJ/kg-K)	C_{v0} (kJ/kg-K)	$k = \frac{C_p}{C_v}$
Hydrogen	H ₂	2.016	4.1243	0.0813	14.209	10.085	1.409
Methane	CH ₄	16.043	0.5183	0.648	2.254	1.736	1.299
Methanol	CH ₃ OH	32.042	0.2595	1.31	1.405	1.146	1.227
Neon	Ne	20.183	0.4120	0.814	1.03	0.618	1.667
Nitric oxide	NO	30.006	0.2771	1.21	0.993	0.716	1.387
Nitrogen	N ₂	28.013	0.2968	1.13	1.042	0.745	1.400
Nitrous oxide	N ₂ O	44.013	0.1889	1.775	0.879	0.690	1.274

열역학특론

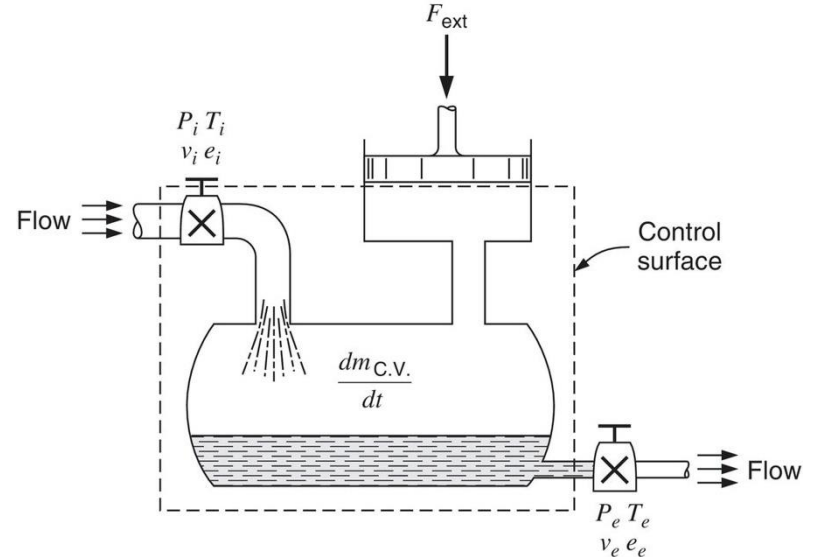
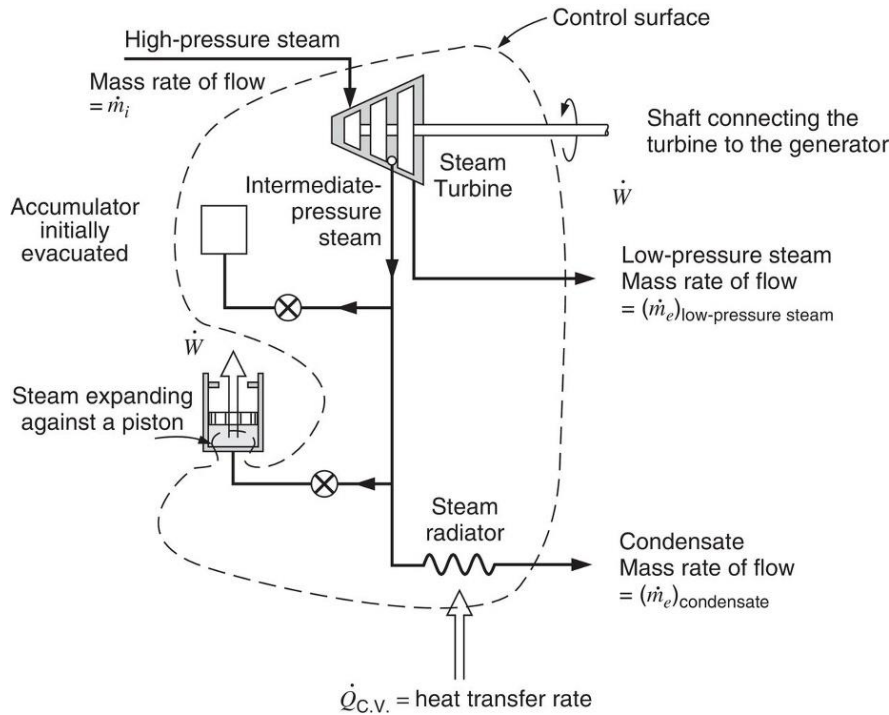
4장 - 검사 체적에 대한 에너지 방정식

조병남

NaTE (Nanofluids & Thermal Energy) Lab.

질량 보존

- 검사 체적 (Control volume)
 - ✓ 해석하고자 하는 공간 (관심 영역)
 - ✓ 검사면으로 둘러 싸여 있음
 - 일, 열, 질량이 검사면을 통과 할 수 있음

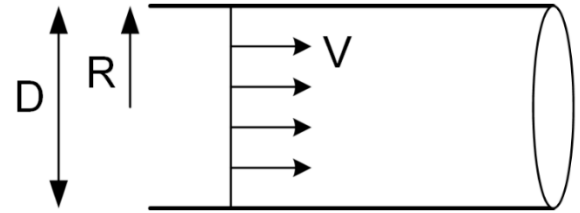


질량 보존

➤ 질량 유량 (Mass flow rate, \dot{m})

- ✓ 단위 시간당 흐르는 물체의 질량
 - 체적 유량: 단위 시간당 흐르는 물체의 부피

$$\dot{m} = \rho AV = \frac{AV}{v} \quad \left(A = \pi R^2 = \frac{\pi}{4} D^2 \right)$$



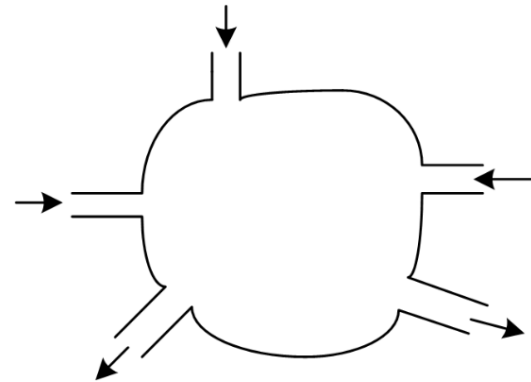
➤ 질량 보존 (Conservation of mass)

- ✓ 검사 체적 내의 질량 변화는 들어오는 질량과 나가는 질량의 차와 같다
- ✓ 연속 방정식 (Continuity equation)

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e$$

- ✓ 정상 상태 조건에서

$$\sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e$$



질량 보존

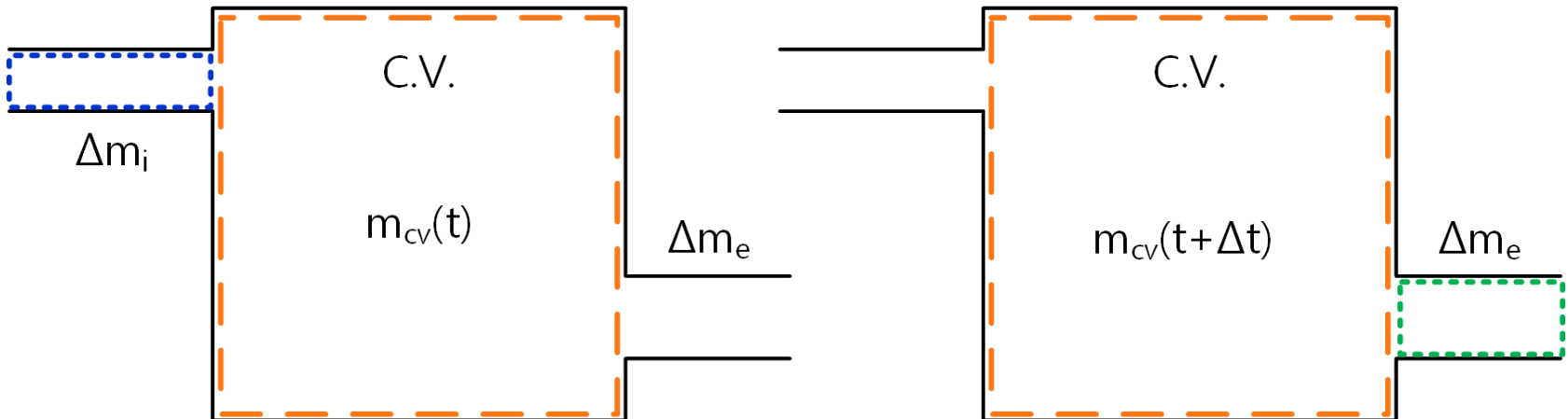
➤ 질량 보존 (Conservation of mass)

✓ 시스템의 질량 at 시간 (t)와 (t + Δt)

$$m = m_{cv}(t) + \Delta m_i = m_{cv}(t + \Delta t) + \Delta m_e$$

$$\rightarrow m_{cv}(t + \Delta t) - m_{cv}(t) = \Delta m_i - \Delta m_e$$

$$\rightarrow \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{m_{cv}(t + \Delta t) - m_{cv}(t)}{\Delta t} = \frac{dm_{cv}}{dt} = \dot{m}_i - \dot{m}_e \quad \rightarrow \frac{dm_{cv}}{dt} = \sum \dot{m}_i - \sum \dot{m}_e$$



유동일

➤ 유동일 (Flow work, flow energy)

✓ 질량의 유입/유출이 있는 경우, 유체를 검사 체적의 안으로 또는 밖으로 밀어내기 위한 일이 필요하고 이것을 유동일 이라고 함.

✓ 검사면에서 발생

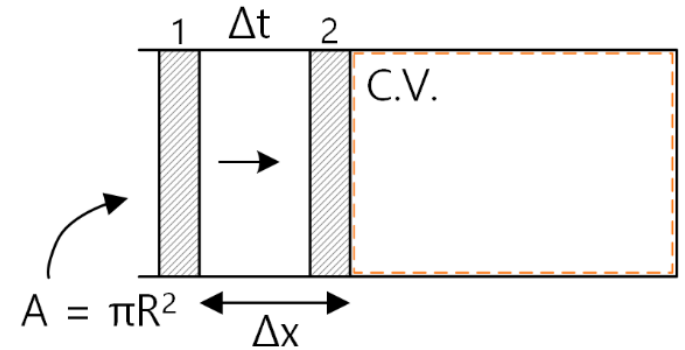
✓ 피스톤이 1번 위치에서 2번 위치로 이동

- 유체를 검사 체적으로 밀어 넣음

$$\Delta m = \rho \Delta V = \rho A \Delta x = \frac{A \Delta x}{v}$$

$$(\div \Delta t) \rightarrow \frac{\Delta m}{\Delta t} = \dot{m} = \frac{\rho A \Delta x}{\Delta t} = \rho A V = \frac{A V}{v}$$

(V : volume, V : velocity)



✓ 경계 이동에 의한 일 (boundary work)

$$\delta W = P \Delta V = P(A \cdot \Delta x) = P \cdot (v \Delta m) = P v \cdot \Delta m$$

- 단위 질량당 유동일 (Pv : flow work)

문제

(문제 11) 500 L의 단단한 탱크(tank)에 200 °C의 포화 액체와 포화 증기 상태의 물이 들어 있으며, 건도는 33 %이다. 탱크의 천정에 달려있는 밸브를 열어 포화 증기가 0.005 kg/s의 일정한 유량으로 흘러 나간다. 증기가 흘러 나가는 동안 탱크 바닥을 가열하여 온도를 200 °C로 유지하였다. 초기 물의 양의 30 %가 탱크를 빠져나갔을 때, 밸브를 닫는다.

(1) 초기 상태의 물의 질량을 구하라?

$$V = 500 \text{ L} = 0.5 \text{ m}^3 \quad \dot{m}_{out} = 0.005 \text{ kg/s}$$

초기상태: $T_1 = 200 \text{ }^\circ\text{C}$ (포화 상태)

$$v_f = 0.001156 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_g = 0.12736 \text{ m}^3/\text{kg} \quad v_{fg} = 0.12620 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_1 = v_f + x_1 \cdot v_{fg} = 0.001156 + 0.33 \cdot 0.12620 = 0.04280 \text{ m}^3/\text{kg}$$

$$v_1 = \frac{V_1}{m_1} \rightarrow m_1 = \frac{V_1}{v_1} = \frac{0.5}{0.04280} = \underline{11.68 \text{ kg}}$$

$$(m_{1,vap} = m_1 \cdot x_1 = 3.854 \text{ kg}, \quad m_{1,liq} = m_1 \cdot (1 - x_1) = 7.826 \text{ kg})$$

TABLE B.1.1 Saturated Water (continued)

Temp. (°C)	Press. (kPa)	Specific Volume, m ³ /kg			Internal Energy, kJ/kg		
		Sat. Liquid v_f	Evap. v_{fg}	Sat. Vapor v_g	Sat. Liquid u_f	Evap. u_{fg}	Sat. Vapor u_g
195	1397.8	0.001149	0.13990	0.14105	828.36	1764.43	2592.79
200	1553.8	0.001156	0.12620	0.12736	850.64	1744.66	2595.29
205	1723.0	0.001164	0.11405	0.11521	873.02	1724.49	2597.52
210	1906.3	0.001173	0.10324	0.10441	895.51	1703.93	2599.44
215	2104.2	0.001181	0.09361	0.09479	918.12	1682.94	2601.06
220	2317.8	0.001190	0.08500	0.08619	940.85	1661.49	2602.35

문제

(문제 11) 500 L의 단단한 탱크(tank)에 200 °C의 포화 액체와 포화 증기 상태의 물이 들어 있으며, 건도는 33 %이다. 탱크의 천정에 달려있는 밸브를 열어 포화 증기가 0.005 kg/s의 일정한 유량으로 흘러 나간다. 증기가 흘러 나가는 동안 탱크 바닥을 가열하여 온도를 200 °C로 유지하였다. 초기 물의 양의 30 %가 탱크를 빠져나갔을 때, 밸브를 닫는다.

(2) 밸브를 열어 놓은 시간을 구하라?

$$V = 500 \text{ L} = 0.5 \text{ m}^3 \quad \dot{m}_{out} = 0.005 \text{ kg/s}$$

$$\frac{dm_{c.v.}}{dt} = \dot{m}_{in} - \dot{m}_{out} = -0.005 \text{ kg/s}$$

$$\rightarrow \int dm_{c.v.} = - \int 0.005 dt \quad \rightarrow m_{c.v.,2} - m_{c.v.,1} = -0.005t$$

$$\rightarrow m_2 - m_1 = 0.7m_1 - m_1 = -0.3m_1 = -0.005t$$

$$t_1 = \frac{0.3 \cdot 11.68}{0.005} = 700.8 \approx \underline{701 \text{ (s)}}$$

검사 체적의 에너지 방정식

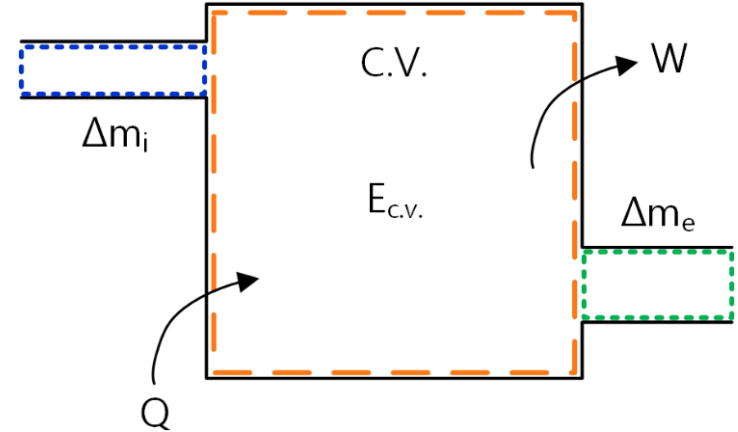
▶ 검사 질량의 에너지 방정식 (with 유입/유출)

$$\Delta E = E_2 - E_1 = Q_{12} - W_{12}$$

✓ 시간 (t)와 (t+Δt)에서 검사 질량의 에너지

$$E(t) = E_{cv}(t) + \Delta m_i \cdot \left(u + \frac{V^2}{2} + gz \right)_i$$

$$E(t + \Delta t) = E_{cv}(t + \Delta t) + \Delta m_e \cdot \left(u + \frac{V^2}{2} + gz \right)_e$$



✓ 시간 (t)와 (t + Δt) 사이에서 검사 질량의 에너지 방정식

$$E_{cv}(t + \Delta t) - E_{cv}(t) = \delta Q - \delta W + \Delta m_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \Delta m_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\div \Delta t \text{ and } \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \rightarrow \quad \underline{\underline{\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)}}$$

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{E_{cv}(t + \Delta t) - E_{cv}(t)}{\Delta t} = \frac{dE_{cv}}{dt} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta Q}{\Delta t} = \dot{Q} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\delta W}{\Delta t} = \dot{W} \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_i}{\Delta t} = \dot{m}_i \quad \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta m_e}{\Delta t} = \dot{m}_e$$

검사 체적의 에너지 방정식

▶ 검사 체적의 에너지 방정식

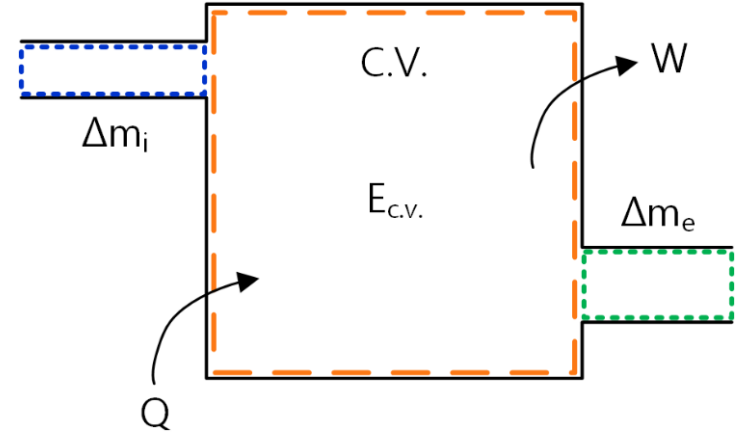
✓ 질량의 유입/유출이 있는 경우의 일

- 입구와 출구에서 유동일을 항상 고려해야 함

$$W = W_{cv} + \text{flow work}$$

✓ 유동일의 부호

- 입구: 에너지가 검사 체적으로 전달 (일 < 0)
- 출구: 에너지가 검사 외부로 전달 (일 > 0)



$$W = W_{cv} - \Delta m_i \cdot P_i v_i + \Delta m_e \cdot P_e v_e \quad \rightarrow \quad \dot{W} = \dot{W}_{cv} - \dot{m}_i \cdot P_i v_i + \dot{m}_e \cdot P_e v_e$$

✓ 검사 체적의 에너지 방정식

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(u_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\rightarrow \frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(u_i + P_i v_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(u_e + P_e v_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\rightarrow \frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

검사 체적의 에너지 방정식

➤ 정상상태 과정 (Steady-state process)

✓ 연속 방정식

$$\frac{dm_{cv}}{dt} = 0 \rightarrow \sum \dot{m}_i = \sum \dot{m}_e \quad \text{for single inlet and outlet: } \dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$$

✓ 에너지 방정식

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = 0 \rightarrow \dot{Q} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = 0$$

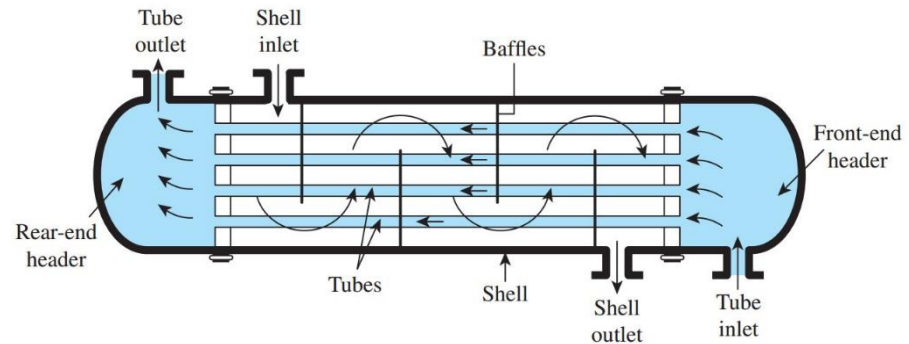
$$\div \dot{m} \rightarrow \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i h_{tot,i} - \dot{m}_e h_{tot,e} = 0 \quad \left(h_{tot} \equiv h + \frac{V^2}{2} + gz \right)$$

$$\rightarrow q_{cv} + h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i = h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e + w_{cv}$$

정상상태 과정의 예

➤ 열교환기 (Heat exchanger)

- ✓ 하나의 유체에서 다른 유체로 열이 전달되는 관 또는 관 시스템
- ✓ 일반적으로 운동에너지와 위치에너지 변화 무시 (예외의 경우도 있을 수 있음)
- ✓ 일은 발생하지 않음

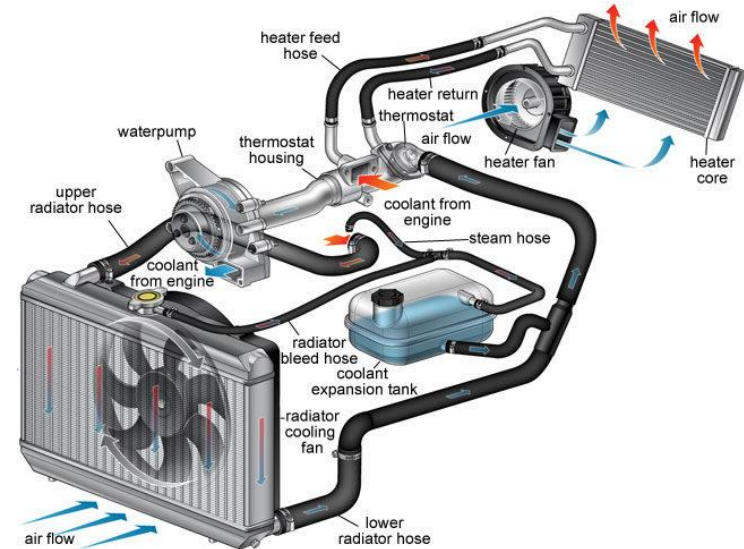


➤ 노즐 (Nozzle)

- ✓ 유체의 속도를 높여주는 장치
 - 단면적 변화를 이용
- ✓ 위치에너지 변화와 일은 없음
- ✓ 열전달은 없거나 무시하는 경우가 많음

➤ 디퓨저 (Diffuser)

- ✓ 유체의 속도를 줄여주는 장치 (노즐의 반대)
- ✓ 유체의 압력이 증가
- ✓ 일반적으로 열전달, 일, 위치에너지 변화 무시



예제

(예제 4.4) 0.6 MPa, 200 °C의 수증기가 50 m/s의 속도로 단열된 노즐로 들어가서 0.15 MPa, 600 m/s의 속도로 분사된다. 출구의 수증기가 과열 증기이면 온도를 구하고 포화 상태이면 건도를 구하라.

(풀이) 검사 체적: 노즐

입구: $P_i = 600 \text{ kPa}$, $T_i = 200 \text{ }^\circ\text{C}$, $V_i = 50 \text{ m/s}$

출구: $P_e = 150 \text{ kPa}$, $V_e = 600 \text{ m/s}$

(가정) 정상상태, 위치에너지 변화 무시, 일 없음, 열전달 없음.

입구에서 수증기의 상태 (과열증기)

$$h_i = 2850.12 \text{ (kJ/kg)}$$

질량 보존 법칙: $\dot{m}_i = \dot{m}_e$

에너지 방정식

$$\frac{dE_{cv}}{dt} = \dot{Q}_{cv} - \dot{W}_{cv} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\rightarrow \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} \right) - \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} \right) = 0 \quad \rightarrow h_e = h_i + \frac{V_i^2}{2} - \frac{V_e^2}{2}$$

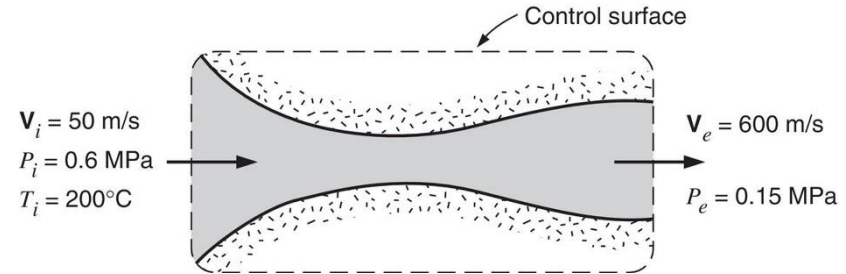


TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
500 kPa (151.86°C)				600 kPa (158.85°C)				
Sat.	0.37489	2561.23	2748.67	6.8212	0.31567	2567.40	2756.80	6.7600
200	0.42492	2642.91	2855.37	7.0592	0.35202	2638.91	2850.12	6.9665
250	0.47436	2723.50	2960.68	7.2708	0.39383	2720.86	2957.16	7.1816
300	0.52256	2802.91	3064.20	7.4598	0.43437	2801.00	3061.63	7.3723
350	0.57012	2882.59	3167.65	7.6328	0.47424	2881.12	3165.66	7.5463
400	0.61728	2963.19	3271.83	7.7937	0.51372	2962.02	3270.25	7.7078

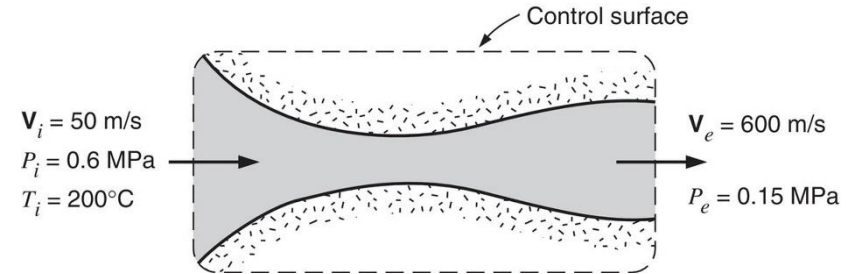
예제

(예제 4.4) 0.6 MPa, 200 °C의 수증기가 50 m/s의 속도로 단열된 노즐로 들어가서 0.15 MPa, 600 m/s의 속도로 분사된다. 출구의 수증기가 과열 증기이면 온도를 구하고 포화 상태이면 건도를 구하라.

(풀이) 검사 체적: 노즐

입구: $P_i = 600 \text{ kPa}$, $T_i = 200 \text{ °C}$, $V_i = 50 \text{ m/s}$

출구: $P_e = 150 \text{ kPa}$, $V_e = 600 \text{ m/s}$



(가정) 정상상태, 위치에너지 변화 무시, 일 없음, 열전달 없음.

입구에서 수증기의 상태 (과열증기) $h_i = 2850.12 \text{ (kJ/kg)}$

$$h_e = h_i + \frac{V_i^2}{2} - \frac{V_e^2}{2} = 2850.12 + \frac{50^2}{2} \times \frac{1}{1000} - \frac{600^2}{2} \times \frac{1}{1000} = 2671.37 \text{ (kJ/kg)}$$

At 150 kPa, $h_f < h_e < h_g$ (포화 상태)

$$x_e = \frac{h_e - h_f}{h_{fg}} = \frac{2671.37 - 467.08}{2226.46} = \underline{0.990}$$

TABLE B.1.2 Saturated Water Pressure Entry (continued)

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
50	81.33	340.47	2305.40	2645.87	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.77	384.36	2278.59	2662.96	1.2129	6.2434	7.4563
100	99.62	417.44	2258.02	2675.46	1.3025	6.0568	7.3593
125	105.99	444.30	2241.05	2685.35	1.3739	5.9104	7.2843
150	111.37	467.08	2226.46	2693.54	1.4335	5.7897	7.2232
175	116.06	486.97	2213.57	2700.53	1.4848	5.6868	7.1717

정상상태 과정의 예

➤ 스로틀 (Throttle)

- ✓ 유체가 흐르는 유동 통로 면적이 갑자기 축소되면서 유체의 압력이 급격히 감소
- ✓ 운동/위치 에너지 변화 무시, 일 없음, 단열.
 - 예: 모세관 (capillary tube), 팽창밸브

➤ 터빈 (Turbine)

- ✓ 고압의 유체가 분사되면서 압력이 떨어지는 동안 축일 (shaft work)을 생성하는 장치
- ✓ 위치 에너지 변화 무시, 단열.
 - 예: 증기 터빈, 가스 터빈, 액체 터빈

➤ 압축기/펌프 (Compressor/Pump)

- ✓ 축일을 입력하여 유체의 압력을 높이는 장치
- ✓ 작동 유체가 저압으로 들어가, 고속 유동으로 변화, 다시 감속되어 압력 상승
- ✓ 위치 에너지 변화 무시, 입구 운동 에너지 무시, 단열로 가정.

예제

(예제 4.5) 어떤 공장의 압축기에서 100 kPa, 280 K의 이산화탄소가 저속으로 유입되어 1100 kPa, 500 K의 상태로 25 m/s로 토출된다. 출구를 나온 이산화탄소는 등압의 냉각기에(열교환기)에서 350 K로 냉각된다. 압축기 입력 동력은 50 kW이다. 냉각기의 열전달률을 구하라.

(풀이) (압축기) 정상 상태, 위치 에너지 무시, 단열, 압축기 입구 운동에너지 무시

이상 기체 ⇨ From A.8

입구: $P_1 = 100 \text{ kPa}$, $T_1 = 280 \text{ K}$, $h_1 = 198.0 \text{ kJ/kg}$

출구: $P_2 = 1100 \text{ kPa}$, $T_2 = 500 \text{ K}$, $h_2 = 401.52 \text{ kJ/kg}$

질량 보존: $\dot{m}_{c,i} = \dot{m}_{c,e} = \dot{m}$

에너지 방정식

$$\frac{dE_c}{dt} = \dot{Q}_c - \dot{W}_c + \dot{m}_{c,i} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) - \dot{m}_{c,e} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right)$$

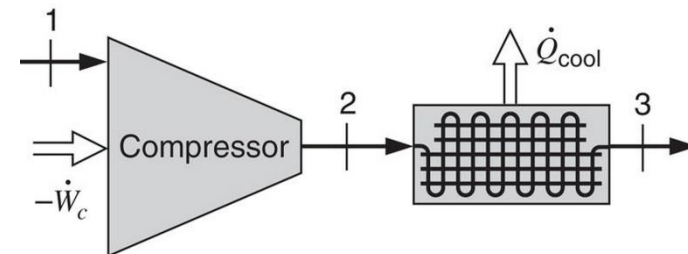
$$\rightarrow -w_c + h_1 - h_2 - \frac{V_2^2}{2} = 0$$

$$w_c = h_1 - h_2 - \frac{V_2^2}{2} = 198.0 - 401.52 - \frac{25^2}{2 \times 1000}$$

$$= \underline{\underline{-203.8 \text{ (kJ/kg)}}}$$

TABLE A.8 Ideal Gas Properties of Various Substances, Entropies at 0.1-MPa (1-Bar) Pressure, Mass Basis (continued)

T (K)	Carbon Dioxide (CO ₂) R = 0.1889 kJ/kg·K M = 44.010 kg/kmol			Water (H ₂ O) R = 0.4615 kJ/kg·K M = 18.015 kg/kmol		
	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s _T ⁰ (kJ/kg·K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s _T ⁰ (kJ/kg·K)
200	97.49	135.28	4.5439	276.38	368.69	9.7412
250	126.21	173.44	4.7139	345.98	461.36	10.1547
300	157.70	214.38	4.8631	415.87	554.32	10.4936
350	191.78	257.90	4.9972	486.37	647.90	10.7821
400	228.19	303.76	5.1196	557.79	742.40	11.0345
450	266.69	351.70	5.2325	630.40	838.09	11.2600
500	307.06	401.52	5.3375	704.36	935.12	11.4644



Compressor section

Cooler section

예제

(예제 4.5) 어떤 공장의 압축기에서 100 kPa, 280 K의 이산화탄소가 저속으로 유입되어 1100 kPa, 500 K의 상태로 25 m/s로 토출된다. 출구를 나온 이산화탄소는 등압의 냉각기에(열교환기)에서 350 K로 냉각된다. 압축기 입력 동력은 50 kW이다. 냉각기의 열전달률을 구하라.

(압축기) 압축기 입력 동력: 50 kW

$$w_c = 203.8 \text{ (kJ/kg)}$$

$$\dot{W}_c = \dot{m}w_c \rightarrow \dot{m} = \frac{\dot{W}_c}{w_c} = \frac{-50}{-203.8} = 0.245 \text{ kg/s}$$

(열교환기) 정상상태, 위치/운동 에너지 변화 무시, 일 없음.

입구: $h_2 = 401.52 \text{ kJ/kg}$, $h_3 = 257.9 \text{ kJ/kg}$

질량 보존: $\dot{m}_{h,i} = \dot{m}_{h,e} = \dot{m}$

에너지 방정식

$$\frac{dE_h}{dt} = \dot{Q}_h - \dot{W}_h + \dot{m}_{h,i} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - \dot{m}_{h,e} \left(h_3 + \frac{V_3^2}{2} + gz_3 \right)$$

$$\rightarrow q_h + h_2 - h_3 = 0 \quad q_h = h_3 - h_2 = 257.9 - 401.52 = \underline{-143.6 \text{ kJ/kg}}$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}q_h = 0.245 \text{ (kg/s)} \times -143.6 \text{ (kJ/kg)} = \underline{35.18 \text{ (kW)}}$$

TABLE A.8 Ideal Gas Properties of Various Substances, Entropies at 0.1-MPa (1-Bar) Pressure, Mass Basis (continued)

T (K)	Carbon Dioxide (CO ₂) R = 0.1889 kJ/kg-K M = 44.010 kg/kmol			Water (H ₂ O) R = 0.4615 kJ/kg-K M = 18.015 kg/kmol		
	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s _T ⁰ (kJ/kg-K)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s _T ⁰ (kJ/kg-K)
200	97.49	135.28	4.5439	276.38	368.69	9.7412
250	126.21	173.44	4.7139	345.98	461.36	10.1547
300	157.70	214.38	4.8631	415.87	554.32	10.4936
350	191.78	257.90	4.9972	486.37	647.90	10.7821
400	228.19	303.76	5.1196	557.79	742.40	11.0345
450	266.69	351.70	5.2325	630.40	838.09	11.2600
500	307.06	401.52	5.3375	704.36	935.12	11.4644

예제

(예제 4.6) 소형 액체 펌프가 저수조 아래 15 m에 있다. 펌프는 10 °C, 90 kPa의 물을 1.5 kg/s로 흡입한다. 출구 배관의 직경은 0.04 m이며 계기압 400 kPa의 저수조에 연결되어 있다. 입출구 속도는 같으며 단열 과정이며, 물의 온도는 10 °C로 일정하다는 가정하에 펌프 동력을 구하라.

(가정) 정상상태, 단열, 입출구 속도 동일, 비체적 일정

입구/출구 온도 동일 : 내부에너지 동일, 비체적 동일

$$h_i - P_i v = h_e - P_e v \rightarrow h_i - h_e = P_i v - P_e v$$

비체적: 압축 액체 $v = 0.001001 \text{ (m}^3/\text{kg)}$

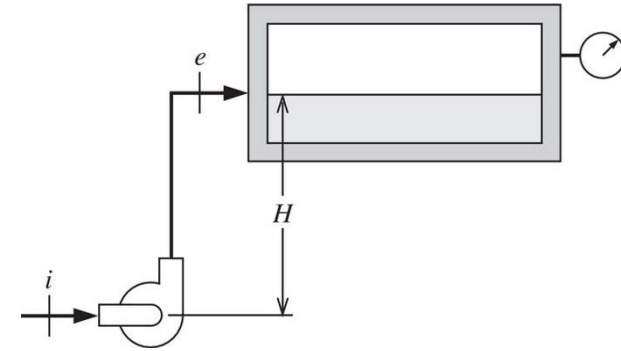
질량 보존: $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$

에너지 방정식

$$\frac{dE}{dt} = \dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right)$$

$$\rightarrow \dot{W} = \dot{m}(h_i + gz_i - h_e - gz_e) = \dot{m}(P_i v - P_e v + gz_i - gz_e)$$

$$= 1.5 \times \left[(90 - 501.3) \times 0.001001 + \frac{9.81 \times (0 - 15)}{1000} \right] = -0.838 \text{ (kW)} = \underline{\underline{-838 \text{ (W)}}}$$



열역학특론

5장 - 열역학 제2법칙

(The second law of Thermodynamics)

조병남

NaTE (Nanofluids & Thermal Energy) Lab.

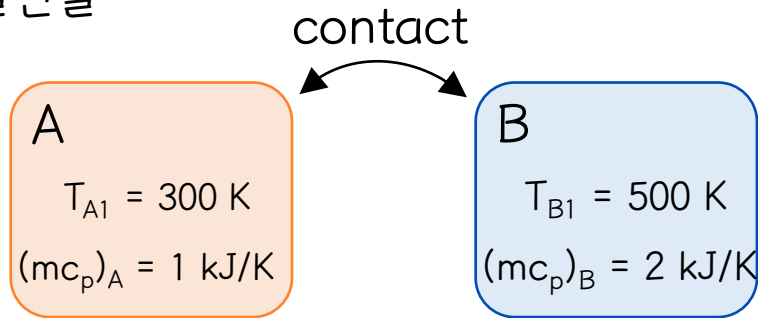
열역학 제1법칙

➤ 열역학 제1법칙

- ✓ 에너지는 보존된다.
- ✓ 에너지는 생성되거나 파괴될 수 없다. But 형태가 변화할 수 있다.

➤ 열역학 제2법칙

- ✓ 과정은 어떤 특정한 방향으로만 진행됨
 - 예1: 뜨거운 커피에서 주위로의 열전달 (주위에서 커피로 열전달 불가능)
 - 예2: 연료를 소모해서 언덕을 올라간 자동차 (언덕 아래로 내려가도 연료 회복 불가능)
- ✓ 열전달



Case 1: $T_{A2} = 400 \text{ K}$, $T_{B2} = 450 \text{ K}$ (가능)

Case 2: $T_{A2} = 450 \text{ K}$, $T_{B2} = 425 \text{ K}$ (불가능)

✓ 압축기 (using R-134a)

- 입구 상태: 300 kPa (포화 증기)
 - 출구 상태 1: 1200 kPa, 50 °C, $w = 28.15 \text{ kJ/kg}$
 - 출구 상태 2: 1400 kPa, 60 °C, $w = 35.39 \text{ kJ/kg}$

열기관과 냉동기

➤ 열기관

- ✓ 열에너지 (thermal energy, heat)를 기계적인 일로 변환하는 장치
- ✓ 에너지 방정식 및 열효율

$$Q_H = Q_L + W \quad \text{or} \quad \dot{Q}_H = \dot{Q}_L + \dot{W} \quad \eta = \frac{\text{output}}{\text{input}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L}{\dot{Q}_H}$$

➤ 냉동기

- ✓ 저온의 물체에서 열을 흡수하여 고온의 다른 물체로 운반
- ✓ 에너지 방정식 및 성능 계수

$$Q_H = Q_L + W \quad \text{or} \quad \dot{Q}_L + \dot{W} = \dot{Q}_H \quad COP_R = \beta_R = \frac{\text{desired}}{\text{input}} = \frac{Q_L}{W} = \frac{Q_L}{Q_H - Q_L} = \frac{1}{Q_H/Q_L - 1}$$

➤ 열펌프

- ✓ 저온의 물체에서 열을 흡수하여 고온의 물체에 열을 주는 장치
- ✓ 에너지 방정식 및 성능 계수

$$Q_H = Q_L + W \quad \text{or} \quad \dot{Q}_L + \dot{W} = \dot{Q}_H \quad COP_H = \beta_H = \frac{\text{desired}}{\text{input}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{Q}_H - \dot{Q}_L} = \frac{1}{1 - \dot{Q}_L/\dot{Q}_H}$$

$$\beta_H = \frac{\dot{Q}_H}{\dot{W}} = \frac{\dot{W} + \dot{Q}_L}{\dot{W}} = 1 + \frac{\dot{Q}_L}{\dot{W}} = 1 + \beta_R$$

열역학 제2법칙

➤ 열저장조 (Thermal reservoir)

- ✓ 온도 변화 없이 무한정으로 열교환 가능 (온도 일정)
- ✓ 고온 저장조, 저온 저장조
- ✓ 예: 해양(ocean), 대기(atmosphere)

➤ 열역학 제2법칙

✓ Nicolas Leonard Sadi Carnot (1796-1832)

- 프랑스 물리학자
- 저서: Reflections on the motive power of fire (1824)

✓ Rudolf Clausius (1822-1888)

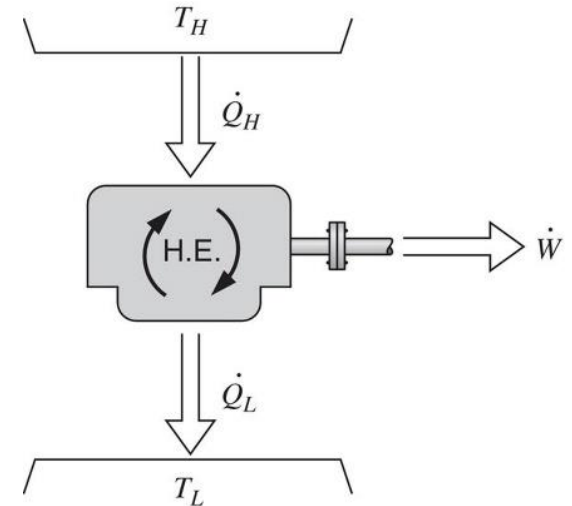
- 독일 물리학자, 공학자
- 논문: On the moving force of heat and the laws of heat which may be deduced therefrom (1850)
 - The Mechanical theory of heat (1851)
- 열역학 제2법칙 발견

✓ William Thomson Lord Kelvin (1824-1907)

- 영국 과학자

✓ Max Planck (1858-1947)

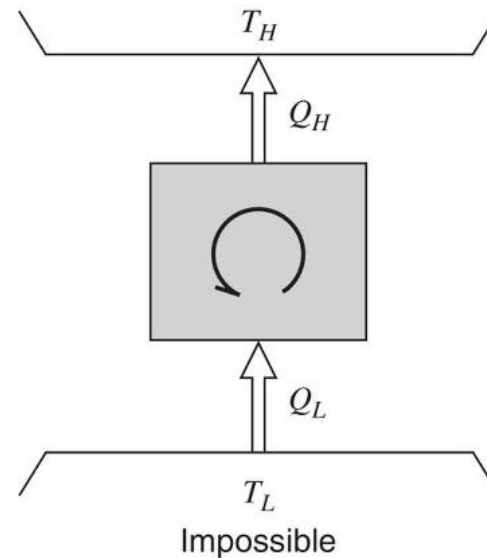
- 독일 물리학자 (1918년 노벨상 수상)



열역학 제2법칙

➤ Clausius 서술 (Clausius statement)

- ✓ 저온 물체에서 고온 물체로 열을 전달하는 것 이외의 다른 어떠한 효과도 내지 않으면서 사이클로 작동하는 장치는 만들 수 없다
- ✓ It is **impossible** for any system to operate in such a way that the sole result would be an energy transfer by heat from a cooler to a hotter body
- ✓ Heat will **NOT** flow from a cold object to a hot object without the expenditure of external work
- ✓ (열펌프, 냉동기) 입력일 없이 작동되는 냉동기를 만들 수 없음
 - 성능 계수가 무한대가 될 수 없음

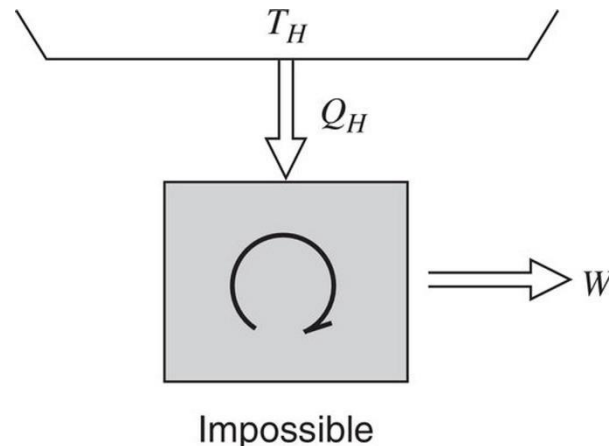


$\beta = \infty$ Impossible
Conclusion: $\beta < \infty$

열역학 제2법칙

➤ Kelvin-Planck 서술 (Kelvin-Planck statement)

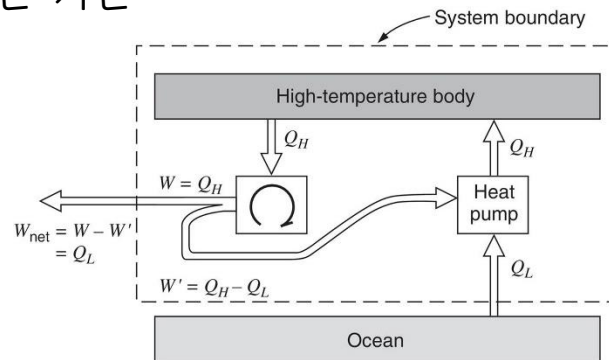
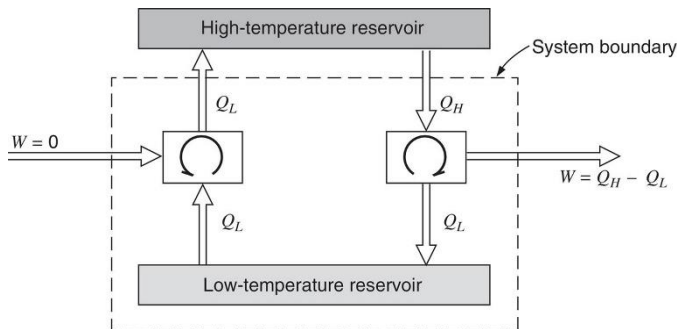
- ✓ 하나의 저장조와 열교환을 하여, 추를 들어 올리는 것 이외에 어떠한 효과도 내지 않으면서 사이클로 작동하는 장치는 만들 수 없다
- ✓ It is **impossible** for any system to operate in a thermodynamic cycle and deliver a net amount of energy by work to its surroundings while receiving energy by heat transfer from a single thermal reservoir
- ✓ It is **impossible** to construct an engine which will work in a complete cycle and produce no effect except to raise a weight and exchange heat with a single reservoir
- ✓ (열기관) 고온에서 열을 받아서 같은 양의 일을 하는 열기관은 만들 수 없음
 - 열효율이 100 %가 될 수 없음



$\eta_{\text{thermal}} = 1$ Impossible
Conclusion: $\eta_{\text{thermal}} < 1$

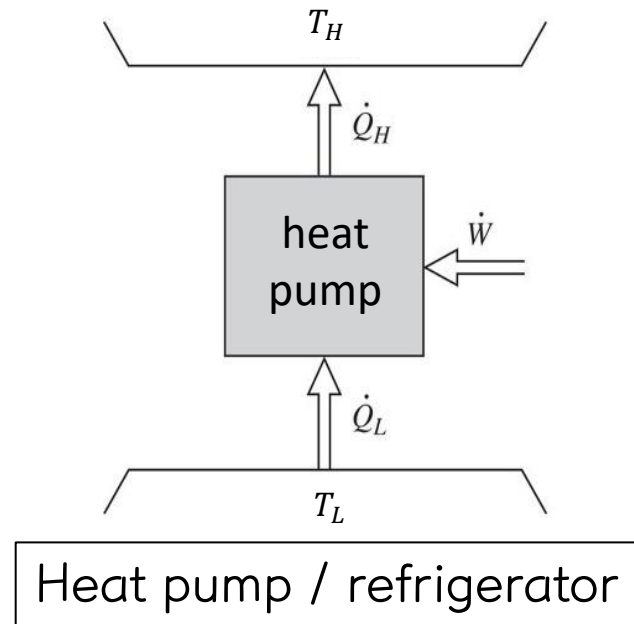
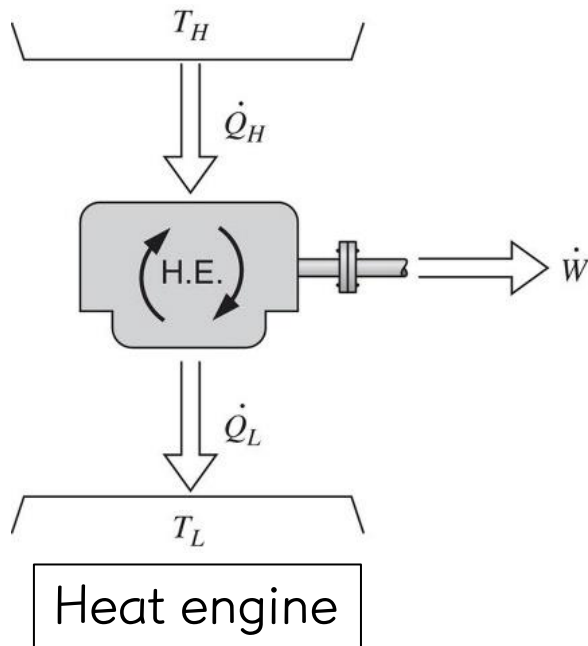
열역학 제2법칙

- Clausius 서술 vs Kelvin-Planck 서술
 - ✓ 두 서술 모두 부정하는 서술 (증명 불가능, but 실험적으로 검증)
 - ✓ 두 서술이 동등(equivalent)한 서술
 - Clausius 서술에 위배되는 것은 Kelvin-Planck 서술에도 위배 (vice versa)
 - ✓ 제2종 영구 기관을 만드는 것이 불가능 함을 설명
- 영구 기관 (Perpetual-motion machine)
 - ✓ 제1종 영구 기관
 - 에너지 공급없이 외부로 일을 하는 기관 (열역학 제1법칙 위배)
 - ✓ 제2종 영구 기관
 - 열원에서 받은 열을 모두 다른 에너지로 변환하는 기관 (열역학 제2법칙 위배)
 - ✓ 제3종 영구 기관
 - 마찰이 없어 영구히 운전하지만 일을 생산하지 않는 기관



Carnot 정리

- Carnot 정리 (Carnot theorem developed in 1824 by Sadi Carnot)
 - ✓ 모든 열기관은 동일한 열저장조에서 작동하는 가역 열기관 (reversible heat engine) 보다 효율이 낮다 (비가역 열기관은 가역 열기관보다 효율이 낮다)
 - ✓ Corollary of Carnot theorem
 - 동일한 열저장조에서 작동하는 모든 가역 열기관의 효율은 동일
 - 동일한 열저장조에서 작동하는 모든 가역 열펌프/냉동기의 성능 계수는 동일



Carnot 사이클

➤ Carnot 사이클

- ✓ 이상적인 가역 열기관
- ✓ 모든 과정이 가역 과정 (사이클 작동 따라서 사이클로 가역 사이클)
- ✓ 효율이 가장 높은 열기관 사이클

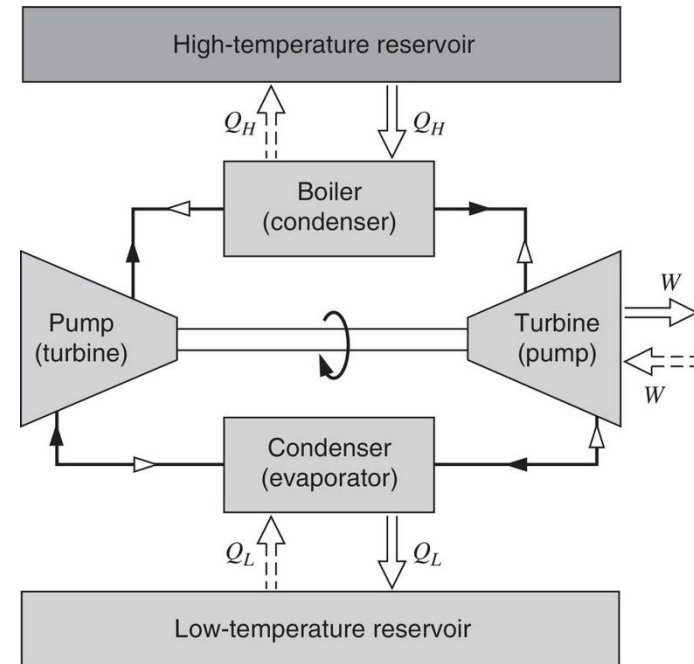
2개의 가역 등온 과정과 2개의 가역 단열 과정으로 구성된 이상적인 사이클이며, 효율이 가장 높은 열기관이고 그 효율은 온도만의 함수로 표현할 수 있다.

✓ Carnot 사이클의 기본 과정

- 고온 열저장조와 열교환 (가역 등온 과정, Q_H to C.V.)
- 작동 유체의 온도 감소 (가역 단열 과정, $T_H \Rightarrow T_L$)
- 저온 열저장조와 열교환 (가역 등온 과정, Q_L from C.V.)
- 작동 유체의 온도 상승 (가역 단열 과정, $T_L \Rightarrow T_H$)

✓ Carnot 사이클 효율

$$\eta_{carnot} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



열역학 온도 척도

➤ 절대 온도 (Absolute temperature)

✓ 열기관의 효율 (가역 기관)

- 열저장조의 온도가 효율에 영향

$$\eta = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = f(T_H, T_L) \quad \rightarrow \quad \frac{Q_L}{Q_H} = f_1(T_H, T_L)$$

$$\eta_A = \frac{W_1}{Q_1} = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = g(T_H, T_m) \quad \rightarrow \quad \frac{Q_2}{Q_1} = g_1(T_H, T_m)$$

$$\eta_B = \frac{W_2}{Q_2} = \frac{Q_2 - Q_3}{Q_2} = 1 - \frac{Q_3}{Q_2} = h(T_m, T_L) \quad \rightarrow \quad \frac{Q_3}{Q_2} = h_1(T_m, T_L)$$

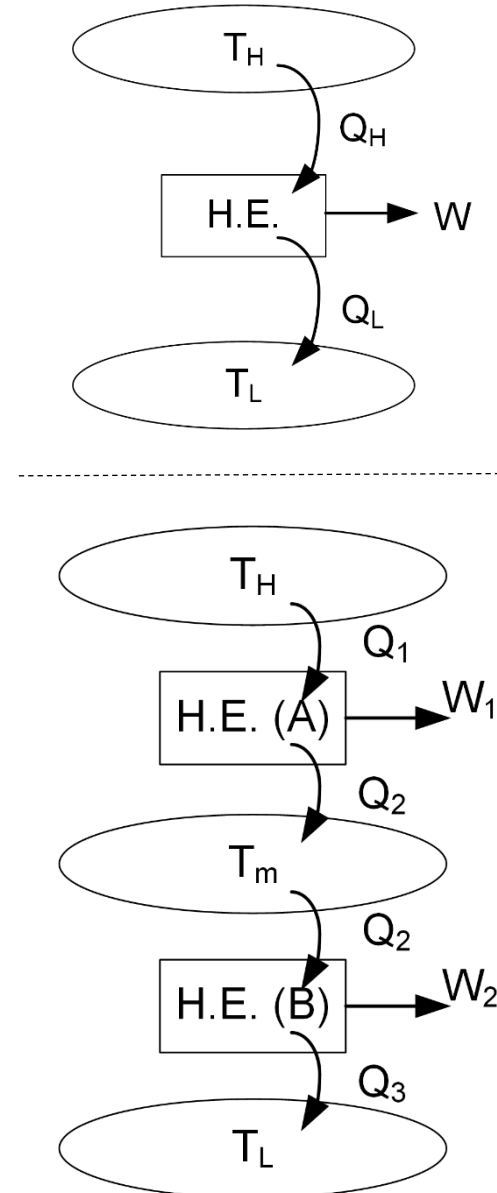
$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{Q_3}{Q_1} = \frac{Q_2}{Q_1} \times \frac{Q_3}{Q_2} = g_1(T_H, T_m) \times h_1(T_m, T_L) = \underline{f_1(T_H, T_L)}$$

$$\frac{Q_L}{Q_H} = \frac{Q_3}{Q_1} = f_1(T_H, T_L) = \frac{\phi(T_L)}{\phi(T_H)} \xrightarrow[\text{Kelvin proposed}]{\text{the simplest function}} = \underline{\frac{T_L}{T_H}}$$

- 가역 열기관 = Carnot 사이클

절대온도

$$\eta_{\text{carnot}} = \frac{W}{Q_H} = \frac{Q_H - Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{Q_L}{Q_H} = 1 - \frac{T_L}{T_H}$$



예제

(예제 5.3) 고온 550 °C에서 1 MW의 열전달률로 열을 받고, 300 K의 주위로 열을 방출하는 열기관을 고려한다. 열기관에서 생산되는 동력은 450 kW이다.

주위의 에너지 방출량, 엔진의 효율을 구하라. 그리고 두 개의 같은 저장조 사이에서 작동하는 Carnot 열기관과 비교하라.

$$\dot{W} = \dot{Q}_H - \dot{Q}_L \rightarrow \dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 450 = 550 \text{ kW}$$

$$\eta = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H} = \frac{450}{1000} = 0.451$$

Carnot cycle

$$\eta_{carnot} = 1 - \frac{T_L}{T_H} = 1 - \frac{300}{(550 + 273.15)} = 0.6355$$

$$\eta_{carnot} = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_H}$$

$$\rightarrow \dot{W} = \eta_{carnot} \times \dot{Q}_H = 0.6355 \times 1000 = 635.5 \text{ kW}$$

$$\rightarrow \dot{Q}_L = \dot{Q}_H - \dot{W} = 1000 - 635.5 = 364.5 \text{ kW}$$

문제

(문제 12) 피스톤-실린더 안에 있는 공기가 Carnot 사이클 과정을 겪는다. 공기는 이상기체로 가정할 수 있고, 공기의 분자량은 28.97 kg/kmol 이며, 정압 비열은 $1.005 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$, 정적 비열은 $0.718 \text{ kJ/kg}\cdot\text{K}$ 로 일정하다.

오른쪽 표의 상태량을 이용하여 물음에 답하라.

(1) 사이클 과정을 P-v 선도에 그려라.

(2) 각 과정에서 단위 질량당 일과 열을 구하라.

상태	온도 (K)	압력 (kPa)	비체적 (m^3/kg)
1	600	2500	0.068877
2	600	2200	0.078269
3	300	194.22	0.443292
4	300	220.70	0.390097

과정	열 (kJ/kg)	일 (kJ/kg)
1-2	22.01	22.01
2-3	0	215.4
3-4	-11.01	-11.01
4-1	0	-215.4

(3) 사이클의 열효율을 구하라. (답: 50 %)

열역학특론

7장 - 검사 체적에 대한 엔트로피 해석 (Entropy analysis for a control volume)

조병남

NaTE (Nanofluids & Thermal Energy) Lab.

Clausius 부등식

▶ 검사 질량의 엔트로피 방정식

$$S_2 - S_1 = \int_1^2 \left(\frac{\delta Q}{T} \right) + S_{gen} \quad ds = \frac{\delta q}{T} + \delta s_{gen} \quad \dot{S} = \frac{dS_{c.m.}}{dt} = \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

▶ 검사 체적의 엔트로피 방정식

엔트로피 변화량 = 유입량 - 유출량 + 생성량

$$\dot{S} = \frac{dS_{c.v.}}{dt} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

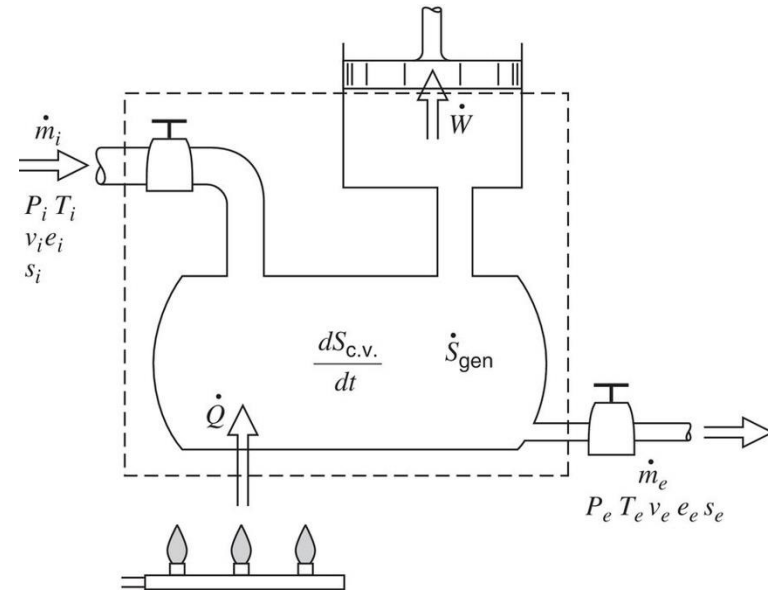
단위 : kW/K

✓ If steady-state (정상상태)

$$\frac{dS_{c.v.}}{dt} = 0 = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen}$$

✓ If steady-state + one inlet and one outlet + one heat transfer

$$\frac{dS_{c.v.}}{dt} = 0 = \dot{m} s_i - \dot{m} s_e + \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} \quad \rightarrow \quad s_i - s_e + \frac{q}{T} + s_{gen} = 0$$



예제

(예제 7.2) 노즐을 통과하는 가역 단열 수증기 유동이 있다. 1MPa, 300 °C의 수증기가 30 m/s의 속도로 노즐로 들어간다. 노즐 출구에서 수증기 압력이 0.3 MPa이다. 가역 단열, 정상상태 과정으로 가정하고 노즐 출구에서의 수증기의 속도를 구하라.

(풀이) 정상상태, 단열 (등엔트로피), No work, 입구 1개, 출구 1개, 위치 에너지 무시

(입구 상태)

$$P_i = 1000 \text{ kPa} \quad T_i = 300 \text{ }^\circ\text{C} \text{ (과열 증기)}$$

$$h_i = 3051.15 \text{ kJ/kg} \quad s_i = 7.1228 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(출구 상태)

$$P_e = 300 \text{ kPa}, \quad s_e = 7.1228 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$T_e = 159.6 \text{ }^\circ\text{C} \quad h_e = 2781.03 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

연속 방정식

$$\dot{m}_i - \dot{m}_e = \frac{dm}{dt}$$

에너지 방정식

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} \right) = \frac{dE}{dt}$$

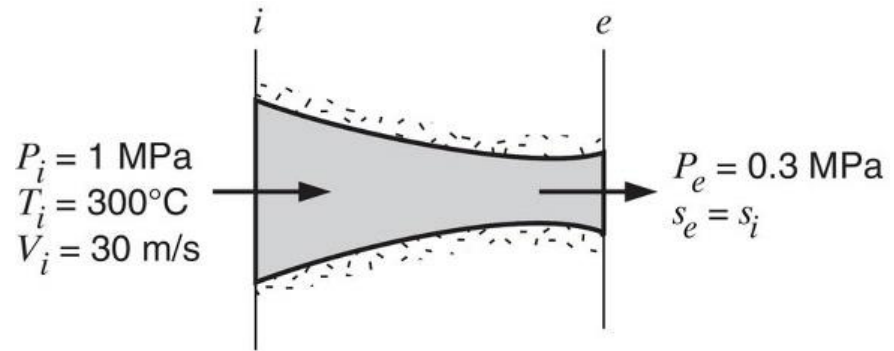


TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	800 kPa (170.43°C)			
					v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
Sat.	0.24043	2576.79	2769.13	6.6627	0.19444	2583.64	2778.08	6.5864
200	0.26080	2630.61	2839.25	6.8158	0.20596	2621.90	2827.86	6.6939
250	0.29314	2715.46	2949.97	7.0384	0.23268	2709.91	2942.59	6.9246
300	0.32411	2797.14	3056.43	7.2327	0.25794	2793.21	3051.15	7.1228
350	0.35439	2878.16	3161.68	7.4088	0.28247	2875.18	3157.65	7.3010

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	300 kPa (133.55°C)			
					v (m³/kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
Sat.	0.60582	2543.55	2725.30	6.9918	0.46246	2553.55	2738.53	6.8958
150	0.63388	2570.79	2760.95	7.0778	0.47084	2564.48	2752.82	6.9299
200	0.71629	2650.65	2865.54	7.3115	0.53422	2646.83	2860.51	7.1706

예제

(예제 7.2) 노즐을 통과하는 가역 단열 수증기 유동이 있다. 1MPa, 300 °C의 수증기가 30 m/s의 속도로 노즐로 들어간다. 노즐 출구에서 수증기 압력이 0.3 MPa이다. 가역 단열, 정상상태 과정으로 가정하고 노즐 출구에서의 수증기의 속도를 구하라.

(풀이) 정상상태, 단열 (등엔트로피), No work, 입구 1개, 출구 1개

연속 방정식 $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$

에너지 방정식 $h_i + \frac{V_i^2}{2} = h_e + \frac{V_e^2}{2}$

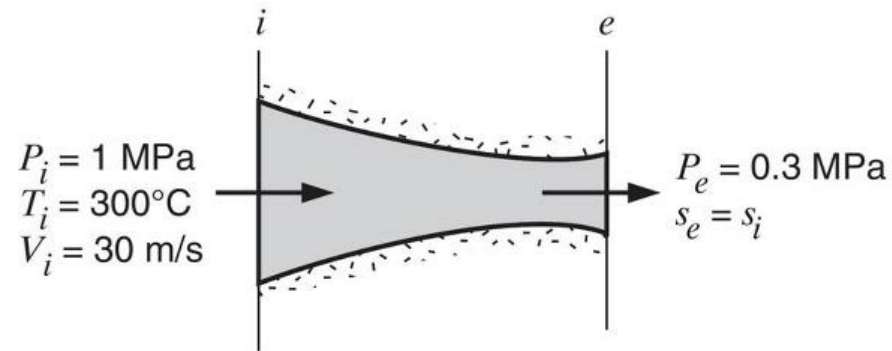
(입구 상태) $h_i = 3051.15 \text{ kJ/kg}$

(출구 상태) $h_e = 2781.03 \text{ kJ/kg} \cdot K$

$$V_e^2 = 2000 \times (h_i - h_e) + V_i^2$$

$$\rightarrow V_e = \sqrt{2000 \times (h_i - h_e) + V_i^2} = \sqrt{2000 \times (3051.15 - 2781.03) + 30^2}$$

$$\underline{V_e = 735.6 \text{ m/s}}$$



문제

(문제 19) 입구와 출구를 각각 하나씩 갖고 있는 시스템을 고려한다. 이 시스템에서는 열전달이 4 곳에서 이루어지고 있다. (a) 생성일, (b) 엔트로피 생성률을 구하라.

(풀이) 가정: 정상상태, 운동/위치에너지 무시

(입구 상태) $P_i = 1000 \text{ kPa}$, $T_i = 400 \text{ }^\circ\text{C}$

$$h_i = 3263.88 \text{ kJ/kg}$$

$$s_i = 7.4650 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

(출구 상태) $P_e = 100 \text{ kPa}$ (포화증기)

$$h_e = 2675.46 \text{ kJ/kg}$$

$$s_e = 7.3593 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

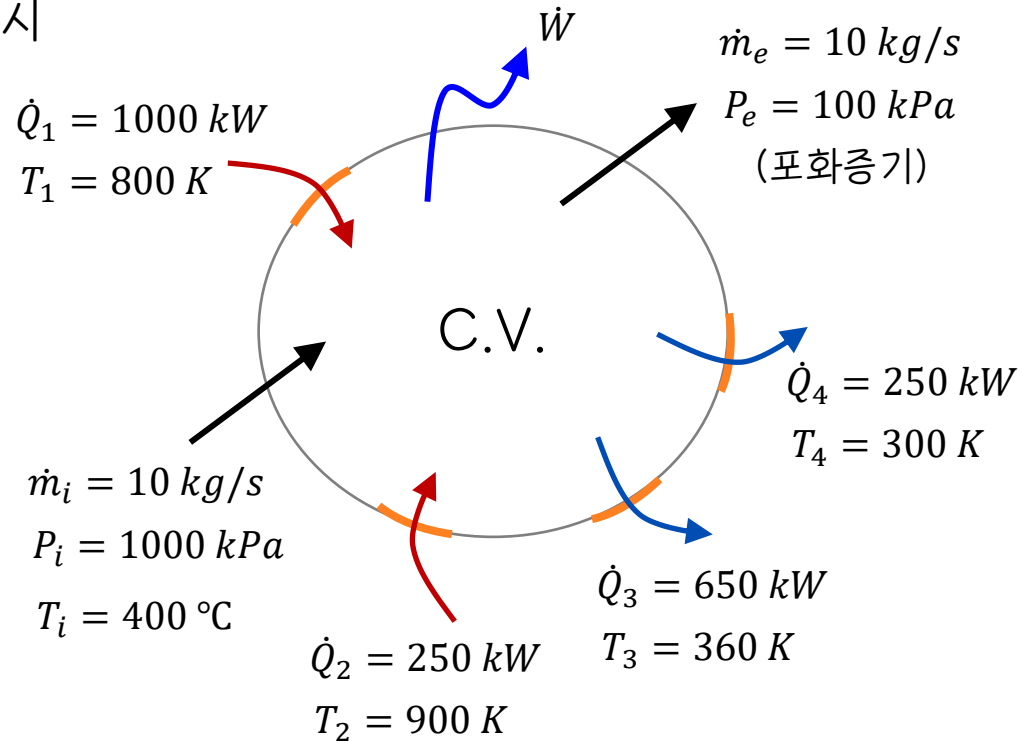


TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
800 kPa (170.43°C)				1000 kPa (179.91°C)				
Sat.	0.24043	2576.79	2769.13	6.6627	0.19444	2583.64	2778.08	6.5864
200	0.26080	2630.61	2839.25	6.8158	0.20596	2621.90	2827.86	6.6939
250	0.29314	2715.46	2949.97	7.0384	0.23268	2709.91	2942.59	6.9246
300	0.32411	2797.14	3056.43	7.2327	0.25794	2793.21	3051.15	7.1228
350	0.35439	2878.16	3161.68	7.4088	0.28247	2875.18	3157.65	7.3010
400	0.38426	2959.66	3267.07	7.5715	0.30659	2957.29	3263.88	7.4650

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
100 kPa (99.62°C)				200 kPa (120.23°C)				
Sat.	1.69400	2506.06	2675.46	7.3593	0.88573	2529.49	2706.63	7.1271
150	1.93636	2582.75	2776.38	7.6133	0.95964	2576.87	2768.80	7.2795
200	2.17226	2658.05	2875.27	7.8342	1.08034	2654.39	2870.46	7.5066
250	2.40604	2733.73	2974.33	8.0332	1.19880	2731.22	2970.98	7.7085
300	2.63876	2810.41	3074.28	8.2157	1.31616	2808.55	3071.79	7.8926

문제

(문제 19) 입구와 출구를 각각 하나씩 갖고 있는 시스템을 고려한다. 이 시스템에서는 열전달이 4 곳에서 이루어지고 있다. (a) 생성일, (b) 엔트로피 생성률을 구하라.

(풀이) 가정: 정상상태, 운동/위치에너지 무시

(입구) $h_i = 3263.88 \text{ kJ/kg}$
 $s_i = 7.4650 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(출구) $h_e = 2675.46 \text{ kJ/kg}$
 $s_e = 7.3593 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

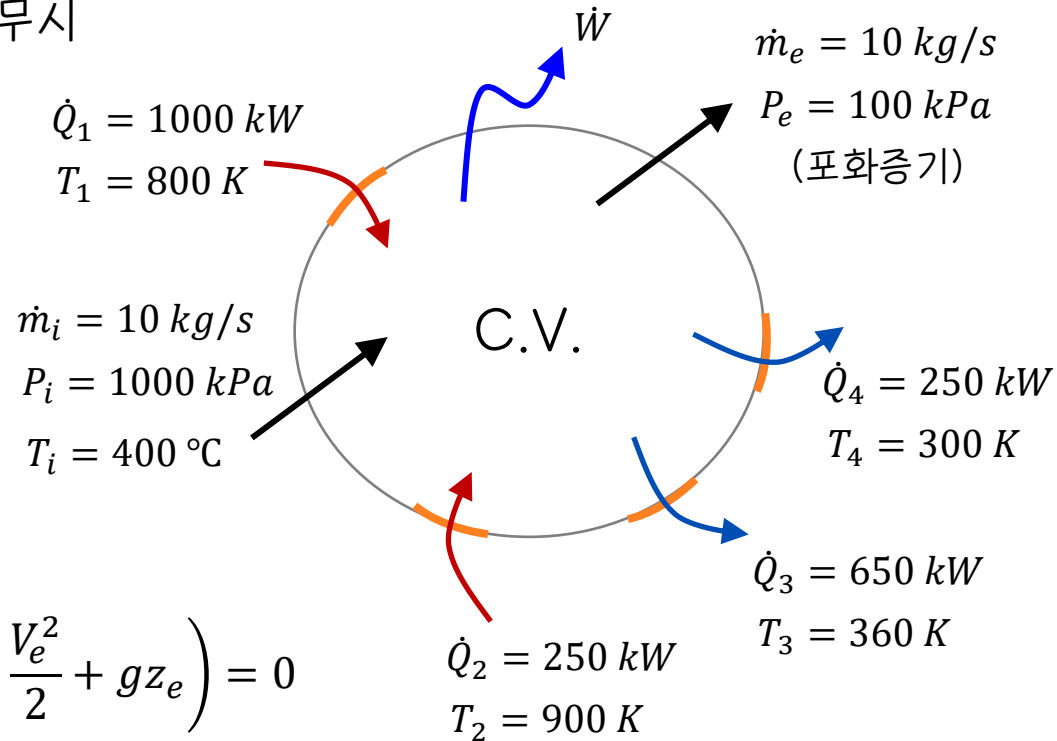
연속방정식 $\dot{m}_i = \dot{m}_e = \dot{m}$

에너지 방정식

$$\dot{Q} - \dot{W} + \dot{m}_i \left(h_i + \frac{V_i^2}{2} + gz_i \right) - \dot{m}_e \left(h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = 0$$

$$\dot{W} = \dot{Q} + \dot{m}_i h_i - \dot{m}_e h_e$$

$$\dot{W} = (1000 + 250 - 650 - 250) + 10 \times 3263.88 - 10 \times 2675.46 = \underline{6234 \text{ kW}}$$



문제

(문제 19) 입구와 출구를 각각 하나씩 갖고 있는 시스템을 고려한다. 이 시스템에서는 열전달이 4 곳에서 이루어지고 있다. (a) 생성일, (b) 엔트로피 생성률을 구하라.

(풀이) 가정: 정상상태, 운동/위치에너지 무시

(입구) $h_i = 3263.88 \text{ kJ/kg}$
 $s_i = 7.4650 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

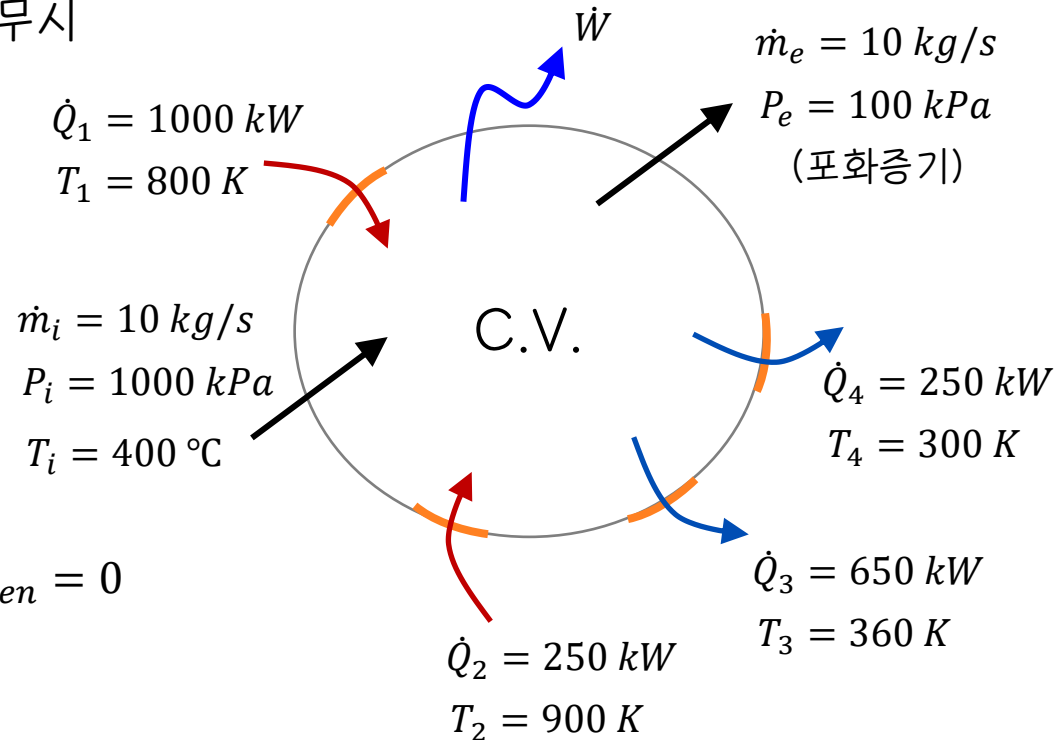
(출구) $h_e = 2675.46 \text{ kJ/kg}$
 $s_e = 7.3593 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

엔트로피 방정식

$$\frac{dS_{c.v.}}{dt} = \sum \dot{m}_i s_i - \sum \dot{m}_e s_e + \sum \frac{\dot{Q}}{T} + \dot{S}_{gen} = 0$$

$$\dot{S}_{gen} = -\sum \dot{m}_i s_i + \sum \dot{m}_e s_e - \sum \frac{\dot{Q}}{T} + 0$$

$$\dot{S}_{gen} = -10 \times 7.4650 + 10 \times 7.3593 - \left(\frac{1000}{800} + \frac{250}{900} - \frac{650}{360} - \frac{250}{300} \right) = \underline{0.05411 \text{ kW/K}}$$



문제

(문제20) 2000 kPa, 400 °C, 60 m/s의 수증기가 잘 단열된 터빈으로 들어가서, 300 kPa, 90 m/s로 나온다. 터빈 판매자는 정상상태 운전에서 520 kJ/kg의 일을 얻을 수 있다고 한다.

이 판매자의 말은 사실인가?

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
2000 kPa (212.42°C)				
Sat.	0.09963	2600.26	2799.51	6.3408
250	0.11144	2679.58	2902.46	6.5452
300	0.12547	2772.56	3023.50	6.7663
350	0.13857	2859.81	3136.96	6.9562
400	0.15120	2945.21	3247.60	7.1270
450	0.16353	3030.41	3357.48	7.2844

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
300 kPa (133.55°C)				
Sat.	0.60582	2543.55	2725.30	6.9918
150	0.63388	2570.79	2760.95	7.0778
200	0.71629	2650.65	2865.54	7.3115

단열 효율

➤ Isentropic efficiency

- ✓ 등엔트로피 과정과 실제 과정의 비
- ✓ 터빈 효율

$$\eta_t = \frac{w_{t,a}}{w_{t,s}}$$

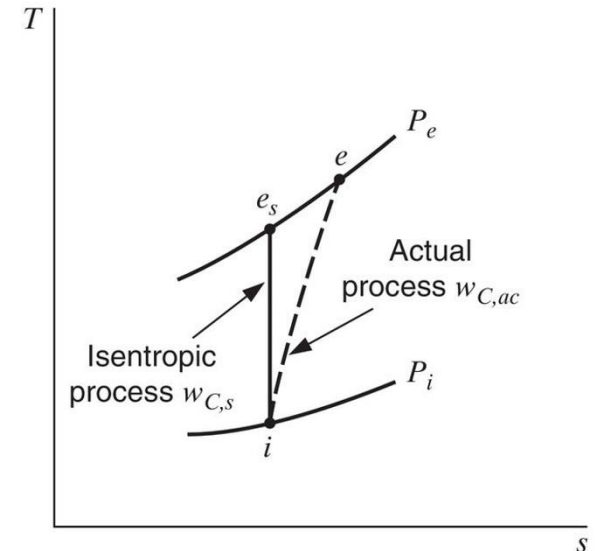
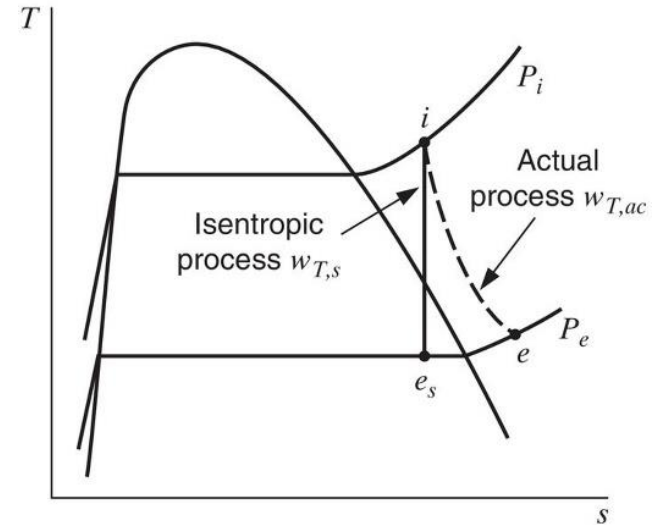
- ✓ 압축기/펌프 효율

$$\eta_c = \frac{w_{c,s}}{w_{c,a}} \quad \eta_p = \frac{w_{p,s}}{w_{p,a}}$$

- ✓ 노즐 효율

- 유체의 운동에너지 증가

$$\eta_n = \frac{ke_a}{ke_s} = \frac{V_a^2/2}{V_s^2/2}$$



단열 효율

(문제 21) 8000 kPa, 400 °C의 증기가 단열된 터빈으로 들어가서 100 kPa의 조건으로 나온다. 정상 상태 운전에서 얻을 수 있는 단위 질량당 최대 일은 얼마인가?

(입구) $P_1 = 8000 \text{ kPa}$ $T_1 = 400 \text{ }^\circ\text{C}$
 $h_1 = 3138.28 \text{ kJ/kg}$ $s_1 = 6.3633 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(출구) $P_2 = 100 \text{ kPa}$ $T_2 = \quad \text{ }^\circ\text{C}$
 $h_2 = \quad \text{ kJ/kg}$ $s_2 = \quad \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$

(가정) 운동/위치 에너지 변화는 무시 (정상상태, 단열)

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water (continued)

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
8000 kPa (295.06°C)				
Sat.	0.02352	2569.79	2757.94	5.7431
300	0.02426	2590.93	2784.98	5.7905
350	0.02995	2747.67	2987.30	6.1300
400	0.03432	2863.75	3138.28	6.3633
450	0.03817	2966.66	3271.99	6.5550

단열 효율

(문제 21) 8000 kPa, 400 °C의 증기가 단열된 터빈으로 들어가서 100 kPa의 조건으로 나온다. 정상상태 운전에서 얻을 수 있는 단위 질량당 최대 일은 얼마인가?

등엔트로피 과정: $s_2 = s_1 = 6.3633 \text{ kJ/kg} \cdot K$

$$x_2 = \frac{s_2 - s_f}{s_{fg}} = \frac{6.3633 - 1.3025}{6.0568} = \underline{0.8356}$$

$$\begin{aligned} h_2 &= h_f + x_2 h_{fg} \\ &= 417.44 + 0.8356 \times 2258.02 = 2304.24 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

$$w_{t,s} = h_1 - h_2 = 3138.28 - 2304.24 = \underline{834 \text{ kJ/kg}}$$

출구 상태가 120 °C의 과열증기 상태일 때, 터빈 효율을 구하라.

보간법을 이용하여 출구에서의 엔탈피를 구하면,

$$h_2 = 2716.28 \text{ kJ/kg}$$

$$w_{t,a} = h_1 - h_2 = 3138.28 - 2716.28 = \underline{422 \text{ kJ/kg}}$$

$$\eta_t = \frac{w_{t,a}}{w_{t,s}} = \frac{422}{834} = 0.506 = \underline{50.6 \%}$$

TABLE B.1.2 Saturated Water Pressure Entry (continued)

Press. (kPa)	Temp. (°C)	Enthalpy, kJ/kg			Entropy, kJ/kg-K		
		Sat. Liquid h_f	Evap. h_{fg}	Sat. Vapor h_g	Sat. Liquid s_f	Evap. s_{fg}	Sat. Vapor s_g
50	81.33	340.47	2305.40	2645.87	1.0910	6.5029	7.5939
75	91.77	384.36	2278.59	2662.96	1.2129	6.2434	7.4563
100	99.62	417.44	2258.02	2675.46	1.3025	6.0568	7.3593

TABLE B.1.3 Superheated Vapor Water

Temp. (°C)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg-K)
100 kPa (99.62°C)				
Sat.	1.69400	2506.06	2675.46	7.3593
150	1.93636	2582.75	2776.38	7.6133
200	2.17226	2658.05	2875.27	7.8342
250	2.40604	2733.73	2974.33	8.0332