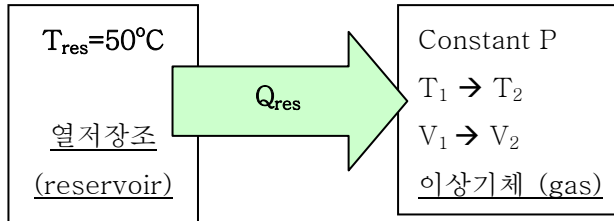


3.1. 이상기체 ( $C_p=7R/2$ )이 일정압력  $P=0.1013\text{MPa}$  에서  $T_1=15\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_1=60\text{m}^3$  에서  $T_2=30\text{ }^\circ\text{C}$ ,  $V_2$  로 가열된다. 이때, 열원은  $50\text{ }^\circ\text{C}$  저장조이다. 각 계에 대한 엔트로피를 구하시오.



본공정은 3개의 계 (열저장조, 이상기체, 그리고 이 둘을 포함하는 전체계) 로 구성된다. 각각의 계의 엔트로피변화량을  $\Delta S_{res}$ ,  $\Delta S_{gas}$ ,  $\Delta S_{univ}$  라고 하자. 엔트로피를 구하기 위하여 전달된 열량 (Q) 를 구하여야 한다. 따라서 다음과 같은 세개의 에너지 수지식을 세워야 한다.

- (1) 열저장조의 에너지수지식.
- (2) 이상기체가 담고있는 계의 에너지수지식.
- (3) 상기의 두계를 포함하는 전체계의 에너지수지식.

**(1) 열저장조의 에너지 수지식:**

열저장조의 에너지 수지식은 열량 손실만 있으므로 다음과 같다.

$$dU_{res} = -dQ_{res} \tag{식(1-1)}$$

**(2) 이상기체계의 에너지 수지식:**

이상기체가 있는 닫힌계의 에너지수지식을 세우면,

$$dU_{gas} = dQ_{gas} - dW_{EC,gas}$$

따라서 이상기체가 받은 열량은

$$dQ_{gas} = dU_{gas} + PdV \tag{식(1-2)}$$

그런데, 부피변화 ( $dV$ ) 를 모르기 때문에 수추팽창일 ( $dW_{EC,gas} = PdV$ ) 을 계산할 수 가 없다. 하지만, 일정한 압력하에서 이상기체의 부피가 증가한다고 문제에서 주어지므로, 엔탈피 정의식으로부터, 다음과 같은 관계식이 얻어진다.

$$\begin{aligned} H &= U + PV \\ dH &= dU + PdV + VdP \end{aligned} \tag{식(1-3)}$$

일정압력에서,  $VdP = 0$  이므로

$$dH = dU + PdV$$

식(1-3) 과 식(1-2) 로부터,

$$dQ_{gas} = dH = nC_p dT \tag{식(1-4)}$$

정압열용량이 온도에 따라 변하지 않는 상수로 가정하면, 이상기체가 받은 열량은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}\Delta Q_{gas} &= n \int_{T_1}^{T_2} C_p dT \\ &= n C_p (T_2 - T_1) \\ &= n \frac{7 \cdot 8.314 J}{2 mol \cdot K} \cdot (30 - 15) K = n \cdot 436.5 J\end{aligned}$$

식(1-5)

본 이상기체의 몰수를 계산하면,

$$n = \frac{PV}{RT} = \frac{0.1013 \times 10^6 Pa \cdot 60 m^3}{8.314 \cdot 288.15 K} = 2.537 \times 10^3 mol$$

따라서 이 이상기체가 받은 총열량은 식(1-5)로부터,

$$\Delta Q_{gas} = n 436.5 = 1107.4 kJ$$

식(1-6)

**(3) 저장조의 엔트로피 변화량:**

열저장조에서 준 열량과 이상기체가 받은 열량은 같으므로,

$$\Delta Q_{res} = \Delta Q_{gas}$$

식(1-7)

식(1-6) 와 식(1-7) 로부터,

$$\Delta S_{res} = \frac{\Delta Q_{res}}{T_{res}} = \frac{-1107.4 kJ}{(273.15 + 50) K} = -3.427 kJ / K$$

**(4) 이상기체 계의 엔트로피 변화량:**

이상기체계의 온도는 일정하지 않고 15°C 에서 30°C 로 변하므로, 식(1-4)에서부터 엔트로피를 구한다.

$$\begin{aligned}dS_{gas} &= \frac{dQ_{gas}}{T} = n C_p \frac{dT}{T} \\ \Delta S_{gas} &= n \int_{T_1}^{T_2} C_p \frac{dT}{T} \\ &= n C_p \ln \frac{T_2}{T_1}\end{aligned}$$

따라서 알고있는 온도, 몰수, 정압열용량을 대입하여 계산하면,

$$\begin{aligned}\Delta S_{gas} &= 2.537 \times 10^3 mol \cdot \frac{7}{2} \cdot 8.314 \frac{J}{mol K} \ln \frac{(273.15 + 30) K}{(273.15 + 15) K} \\ &= +3.746 kJ / K\end{aligned}$$

**(5) 두계를 포함하는 전체계의 엔트로피 변화량:**

$$\begin{aligned}\Delta S_{univ} &= \Delta S_{gas, total} + \Delta S_{res} \\ &= -3.427 + 3.746 = 0.32 kJ / K\end{aligned}$$

따라서 전체 계 관점에서 보면, 엔트로피가 증가하므로, 비가역 특성을 보여준다.

**3.3. 이상기체 1몰( $C_p=5R/2$ )이  $P_1=5 \text{ bar}$ ,  $T_1=25 \text{ }^\circ\text{C}$  상태에 놓여있다.**

(a) 가열기에 의해 5kJ 이 가해졌고  $\Delta V = 0$  일때, 내부에너지변화량, 엔트로피변화량, 압력변화량, 온도변화량은?

에너지 수지식을 세워보면,

$$dU = dQ - PdV \quad \text{식(3-1)}$$

부피변화가 없으므로,

$$dU = dQ$$

따라서,  $\Delta U = \Delta Q = 5kJ$  이다. 내부에너지 변화에 따른 온도변화는 정적열용량을 이용하여 구할 수 있다.

$$dU = C_v dT$$

이상기체에 대한 정적열용량은 다음과 같다.

$$C_v = C_p - R$$

정적열용량이 온도에 따라 일정하다고 하면,

$$\begin{aligned} \Delta U &= \int_{T_1}^{T_2} C_v dT \\ &= C_v \Delta T \end{aligned} \quad \text{식(3-2)}$$

따라서 온도변화량은

$$\begin{aligned} \Delta T &= \frac{\Delta U}{C_v} \\ &= 5 \times 10^3 \frac{J}{mol} \frac{2 \text{ mol} \cdot K}{3 \cdot 8.314 J} \\ &= 401 K \end{aligned}$$

엔트로피변화량은 이 계의 온도가 변하고 있으므로,

$$\begin{aligned} dS &= \frac{dQ}{T} = \frac{dU}{T} = \frac{C_v dT}{T} \\ \Delta S &= C_v \ln \frac{T_2}{T_1} \\ &= \frac{3 \cdot 8.314 J}{2 \text{ mol} \cdot K} \ln \frac{(426 + 273.15)}{(25 + 273.15)} \\ &= 10.63 J / \text{mol} / K \end{aligned}$$

5kJ 이 가해진후 부피변화가 없는 상태에서 압력변화는 이상기체상태방정식에서 구할수 있다.

$$V = \frac{nRT_1}{P_1} = \frac{nRT_2}{P_2}$$

따라서 나중압력은

$$\begin{aligned} P_2 &= P_1 \frac{T_2}{T_1} \\ &= 5 \text{ bar} \cdot \frac{(426 + 273.15)}{298.15} = 11.72 \text{ bar} \end{aligned}$$

즉, 본계에 열이 가해져서 내부에너지와 엔트로피가 상승하고, 부피변화가 없으므로 가압되었다.

(b)  $\Delta Q=0, W_s=0, \Delta V \neq 0, \Delta T=401K$  일때, 부피변화, 내부에너지 변화, 엔트로피변화, 압력변화는?

이상태에 대한 에너지 수지식은 식(3-1)와 같이,

$$dU = dQ - PdV$$

단열이므로, 엔트로피변화량은  $\Delta S = 0$  이고,

$$dU = -PdV \tag{3-3}$$

내부에너지 변화량은 식(3-2) 처럼 정적열용량으로 구할 수 있으므로,

$$\begin{aligned} \Delta U &= C_v \Delta T \\ &= 5kJ/mol \end{aligned}$$

식(3-3) 으로부터 단열과정에 대한 다음과 같은 식이 만족한다 (교재 74 쪽 참조).

$$C_v dT = -\frac{RT}{V} dV$$

변수분리후 적분하여 정리하면,

$$\begin{aligned} C_v \frac{dT}{T} &= -R \frac{dV}{V} \\ C_v \ln \frac{T_2}{T_1} &= -R \ln \frac{V_2}{V_1} \\ \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{C_v} &= \left(\frac{V_2}{V_1}\right)^{-R} \\ V_2 &= V_1 \left(\frac{T_2}{T_1}\right)^{-\frac{C_v}{R}} \end{aligned} \tag{3-4}$$

초기부피는 이상기체방정식으로부터 구할 수 있다.

$$V_1 = \frac{nRT_1}{P_1} = \frac{1mol \cdot 8.314J}{molK} \cdot \frac{298.15K}{0.5 \times 10^6 Pa} = 4.9576 \times 10^{-3} m^3$$

따라서 나중부피는 식(3-4) 으로부터,

$$V_2 = 4.9576l \left(\frac{699.15}{298.15}\right)^{-1.5} = 1.38l$$

따라서 부피변화량은  $\Delta V = 1.38 - 4.9576 = -3.577l$  이다.

압력변화는 이상기체방정식으로부터 구한다.

$$P_2 = \frac{nRT_2}{V_2}$$

따라서  $P_2 = 1mol \cdot 8.314 \frac{J}{molK} \cdot \frac{699.15K}{1.38 \times 10^{-3} m^3} = 4.21MPa = 42.1bar$  이고, 압력변화는  $\Delta P = 37.1bar$

즉 본 계에 온도상승이 되면서 내부에너지가 증가했지만, 단열이므로 엔트로피변화는 없다. 내부에너지 증가 원인은 실린더가 압축되면서 부피가 감소하고 압력이 증가하면서 온도상승에 기인한다.

(c)  $\Delta Q=0, W_s \neq 0, \Delta V=0, \Delta U=5kJ$  일때, 축일은?

이상태의 에너지수지식은 다음과 같다.

$$dU = dQ - PdV + W_s$$

단열이고 부피변화가 없으므로,

$$dU = W_s = +5kJ$$

즉, 교반기에 의한 축일의 공급으로 인하여 내부에너지가 증가하고, 온도가 올라간다.

(d)  $\Delta Q=0, W_s=0.7 \times 55J/s, \Delta V=0$  일때, 온도의 변화속도는?

이상태의 에너지수지식은 다음과 같다.

$$d\dot{U} = d\dot{Q} - Pd\dot{V} + \dot{W}_s$$

모든 값들은 시간에 따른 속도로 표현된다. 단열이고 부피변화가 없으므로,

$$\Delta\dot{U} = \dot{W}_s = +38.5J/s$$

내부에너지는 정적열용량으로 구하면,

$$\Delta\dot{U} = nC_v\Delta\dot{T} = +38.5J/s$$

$$\Delta\dot{T} = 3.09K/s$$

부피가 일정한 상태에서 엔트로피 변화량은 다음과 같이 구한다.

$$dS = nC_v \frac{dT}{T}$$

$$\begin{aligned} d\dot{S} &= nC_v \frac{dT}{dT} = nC_v \frac{dT}{dt} \cdot \frac{1}{T} \\ &= 1mol \cdot \frac{3}{2} \cdot 8.314 \frac{J}{molK} \cdot 3.09 \frac{K}{s} \cdot \frac{1}{298.15K} \\ &= 0.13 \frac{J}{K \cdot s} \end{aligned}$$

이는 단열상태이지만, 축일에 의해 공급된 에너지로 온도가 높아지고, 이러한 온도상승에 의한 초기 엔트로피 증가량을 의미한다.

**3.4. 압축공기 저장탱크의 부피=2.5m<sup>3</sup>, 압력=15bar 상태에서 단열폭발한다. 대기압=1bar 이고, 정압열용량=7R/2 이다.**

(a) 공기저장탱크가 대기에게 준 일은 얼마인가?

저장탱크의 에너지수지식을 세우면,

$$dU = dQ - PdV$$

이 과정은 단열팽창과정이고, 압력이 15bar 에서 1bar 로 변한다.

$$dU = -PdV$$

식(4-1)

엔탈피정의식으로부터,

$$dH = dU + PdV + VdP$$

$$dU = dH - PdV - VdP$$

식(4-2)

식(4-2) 를 식(4-1) 에 대입하면,

$$dH = VdP$$

$$nC_p dT = nRT \frac{dP}{P}$$

변수분리법을 이용하여 적분하고 정리하면,

$$C_p \frac{dT}{T} = R \frac{dP}{P}$$

$$C_p \ln \frac{T_2}{T_1} = R \ln \frac{P_2}{P_1}$$

식(4-3)

같은 방법으로 식(4-1) 은 다음과 같이 정리된다.

$$dU = -PdV$$

$$nC_v dT = -nRT \frac{dV}{V}$$

$$C_v \ln \frac{T_2}{T_1} = -R \ln \frac{V_2}{V_1}$$

식(4-4)

식(4-3) 은 엔탈피로부터 유도된 이상기체 단열상태의 달한계에 대한 에너지 수지식이고, 식(4-4)은 내부에너지로부터 유도된 이상기체 단열상태의 달한계에 대한 에너지 수지식이다. 두식 모두 온도변화의 로그항을 포함하므로, 다음과 같은 식이 파생된다.

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = \frac{R}{C_p} \ln \frac{P_2}{P_1}$$

$$\ln \frac{T_2}{T_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{V_2}{V_1}$$

식(4-5)

$$\text{따라서, } \frac{R}{C_p} \ln \frac{P_2}{P_1} = -\frac{R}{C_v} \ln \frac{V_2}{V_1}$$

식(4-5) 식을 정리하면, 주어진 초기/나중 압력과 초기부피를 이용하여 나중부피를 계산할 수 있다.

$$\ln \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{C_p}} = \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{-\frac{1}{C_v}}$$

$$\left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{\frac{1}{C_p}} = \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^{-\frac{1}{C_v}}$$

식(4-6)

$$\left( \frac{V_2}{V_1} \right) = \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{-\frac{C_v}{C_p}}$$

식(4-6) 은 또한 교재 75-76 쪽에서도 보여주고 있다. 주어진 값을 대입하여 나중부피를 구하면,

$$V_2 = V_1 \left( \frac{P_2}{P_1} \right)^{-\frac{C_v}{C_p}}$$

$$= 2.5m^3 \cdot \left( \frac{1 \times 10^5 Pa}{15 \times 10^5 Pa} \right)^{-\frac{5R}{7R}}$$

$$= 17.3m^3$$

식(4-1)에서 보여주듯이, 압축가스저장탱크가 대기에게 준 일은 수축팽창일로서 내부에너지 변화량에 해당한다.

$$\begin{aligned} dW_{EC} &= dU = nC_v dT \\ \Delta W_{EC} &= nC_v (T_2 - T_1) \end{aligned} \quad \text{식(4-7)}$$

그런데 저장탱크에 있는 기체의 몰수 (n) 와 온도 (T<sub>1</sub>, T<sub>2</sub>) 를 아직 알지 못하므로, 이상기체방정식을 통하여 이들 값을 알아내야 한다.

$$\begin{aligned} P_1 V_1 &= nRT_1 \\ P_2 V_2 &= nRT_2 \end{aligned} \quad \text{식(4-8)}$$

식(4-8) 을 식(4-7) 에 대입하여 정리하면,

$$\Delta W_{EC} = \frac{C_v}{R} (P_2 V_2 - P_1 V_1) \quad \text{식(4-9)}$$

주어진 값들을 대입하면 수축팽창일을 다음과 같이 얻어진다.

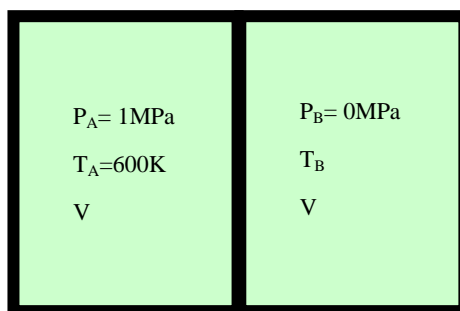
$$\begin{aligned} \Delta W_{EC} &= \frac{5}{2} (1 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot 17.3 \text{ m}^3 - 15 \times 10^5 \text{ Pa} \cdot 2.5 \text{ m}^3) \\ &= -5.05 \times 10^6 \text{ J} \end{aligned}$$

즉 외부로 5.05MJ 의 일을 공급하였다.

(b) 가스저장탱크가 폭발하면서 발생한 에너지는 TNT 의 폭발에 견주어보면,

$$m_{TNT} = 5.05 \text{ MJ} \cdot \frac{1 \text{ kg}(TNT)}{4.5 \text{ MJ}} = 1.12 \text{ kg}(TNT)$$

3.6 단열상태에 있는 두 계가 하나의 계로 될 때 최종 온도, 최종압력 그리고 엔트로피 변화량은?



(a) 이상기체이면서  $C_p = 7R/2$ .

이문제는 결국 이상기체가 단열상태에서 부피가 두배로 되었을 때의 최종온도, 압력, 엔트로피변화량을 구하는 것이다. 부피가 두배로 되면서 압력은 반으로 감소하고 내부에너지 변화는 없다.

즉, 닫혀있는 전체 계의 에너지 수지식은 단열이며, 어떤 부피변화도 없으므로,

$$\begin{aligned} dU &= dQ - PdV \\ dU &= 0 \end{aligned}$$

따라서 온도변화는  $T_{final} = 600 \text{ K}$

등온에서의 압력변화는 부피변화와 역관계로서 이상기체방정식으로부터 구한다.

$$PV = nRT$$

$$P_1V_1 = P_2V_2$$

$$P_2 = \frac{P_1V_1}{V_2}$$

따라서 주어진 값을 대입하면,

$$P_2 = 1MPa \frac{V_1}{2V_1} = 0.5MPa$$

달려있는 전체계의 엔트로피 수지식은 등온팽창 혹은 등온감압과정이므로, 엔트로피 증가를 가져올 것이다.

$$dS = \frac{P}{T} dV$$

$$= R \frac{dV}{V}$$

따라서,

$$dS = R \ln \frac{V_2}{V_1} = 5.763 \frac{J}{mol \cdot K}$$

**(b) 기체가 수증기일 때, 단, 나중압력은 0.5 MPa 로 간주한다.**

수증기표에 의하면, 1MPa, 300 °C 와 350 °C 에서 부피, 내부에너지와 엔트로피는 다음과 같다.

$$T_1 = 300^\circ C, V_1 = 0.2580m^3 / kg, U_1 = 2793.6kJ / kg, S_1 = 7.12kJ / kg / K$$

$$T_2 = 350^\circ C, V_2 = 0.2825m^3 / kg, U_2 = 2875.7kJ / kg, S_2 = 7.31kJ / kg / K$$

따라서 T=600K (=327°C) 에서는 선형내삽을 통하여 근사값을 이용해야 한다. 예로서, 부피에 대해서 기울기가 같다는 선형내삽식을 이용하면,

$$\frac{V_2 - V_1}{T_2 - T_1} = \frac{V - V_1}{T - T_1}$$

$$V = V_1 + \frac{T - T_1}{T_2 - T_1} (V_2 - V_1)$$

이식을 이용하여 T=600K (=327°C) 에서 부피, 내부에너지 그리고 엔트로피값은

$$T = 327^\circ C, V = 0.2712m^3 / kg, U = 2837.9kJ / kg, S = 7.22kJ / kg / K$$

나중온도는 수증기의 경우도 초기온도와 같다. T<sub>final</sub>=600K.

나중압력을 0.5 MPa 로 간주하면, 이상태의 엔트로피를 수증기표로부터 구하면,

$$S_{final} = 7.5334 \frac{kJ}{kgK}$$

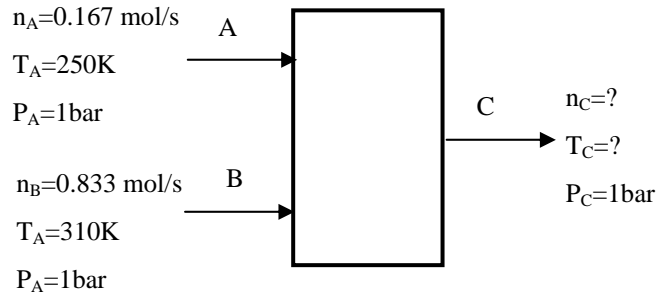
따라서 엔트로피 증가는

$$\Delta S = S_{final} - S$$

$$= 7.5334 - 7.2209 = 0.3125 \frac{kJ}{K \cdot kg}$$



**3.13 다음 혼합공정에 대하여 답하라.**



(a) 먼저 질량보존에 의한 물질수지식으로부터,

$$n_C = n_A + n_B = 0.167 + 0.833 = 1 \text{ mol/s}$$

두번째로 열린계 에너지보존에 대한 에너지수지식으로부터, 단열, 일/위치/운동에너지 변화가 없을 때,

$$\left[ \frac{dm(H + gh + v^2/2)}{dt} \right] = \dot{m}[H + gh + v^2/2]_1 - \dot{m}[H + gh + v^2/2]_2 + \dot{Q} - [\dot{W}_s + \dot{W}_{EC}] \quad \text{식(13-1)}$$

$$0 = n_A H_A + n_B H_B - n_C H_C$$

엔탈피는 정압열용량을 이용하여 구할 수 있으므로,

$$\begin{aligned} n_C H_C &= n_A H_A + n_B H_B \\ n_C \cdot C_P \cdot (T_C - T_0) &= n_A \cdot C_P \cdot (T_A - T_0) + n_B \cdot C_P \cdot (T_B - T_0) \end{aligned}$$

윗식에서  $T_0$  는 기준온도를 의미한다.

$$\begin{aligned} 1 \cdot (T_C - T_0) &= 0.167 \cdot (250 - T_0) + 0.833 \cdot (310 - T_0) \\ T_C &= 0.167 \cdot 250 + 0.833 \cdot 310 \\ &= 300K \end{aligned}$$

(b) 탱크내부의 엔트로피 생성속도.

단열상태에서 엔트로피 수지식을 세워보면,

$$0 = S_{in} \dot{m}_{in} - S_{out} \dot{m}_{out} + \frac{\dot{Q}}{T_{sys}} + \dot{S}_{gen}$$

따라서 엔트로피 생성속도는

$$\begin{aligned} \dot{S}_{gen} &= S_C n_C - (S_A n_A + S_B n_B) \\ &= S_C (n_A + n_B) - (S_A n_A + S_B n_B) \\ &= n_A (S_C - S_A) + n_B (S_C - S_B) \end{aligned} \quad \text{식(13-2)}$$

본 혼합공정은 정압상태에서 온도의 변화를 유발함으로 엔트로피 변화량은 정압열용량으로부터 구한다.

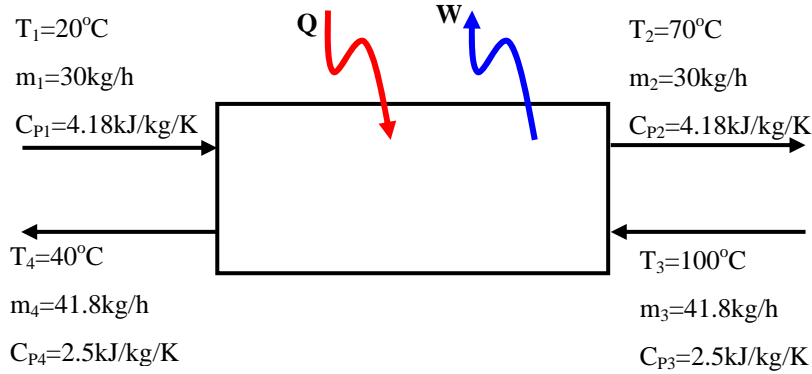
$$\begin{aligned} (S_C - S_A) &= C_P \ln \frac{T_C}{T_A} = 5.31 \frac{J}{\text{molK}} \\ (S_C - S_B) &= C_P \ln \frac{T_C}{T_B} = -0.95 \frac{J}{\text{molK}} \end{aligned}$$

따라서 총 엔트로피 생성량은 식(13-2) 으로부터,

$$\begin{aligned}\dot{S}_{gen} &= n_A(S_C - S_A) + n_B(S_C - S_B) \\ &= 0.167 \cdot 5.31 - 0.833 \cdot 0.95 \\ &= 0.092 \frac{J}{K \cdot s}\end{aligned}$$

식(13-3)

3.28 다음 열교환기에 대하여 답하십시오. 단, 압력은 대기압상태이다.



(a) 물과 유기물의 흐름에 대한 각각의 에너지 수지식을 세우시오.

차가운 물이 뜨거운 물로 되면서 받은 열량은 물의 엔탈피변화를 가져온다. 즉 에너지수지식으로부터,

$$\begin{aligned}\Delta \dot{H}_{water} &= \dot{m}_{water} \cdot C_{P,water} \Delta T = +Q_{water} \\ &= 30 \frac{kg}{h} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kgK} \cdot (70 - 20)K \\ &= 6270kJ/h\end{aligned}$$

유기물이 차갑게 되면서 잃은 열량은 유기물의 엔탈피감소에 기인한 것이다. 이에 대한 에너지 수지식은

$$\begin{aligned}\Delta \dot{H}_{organic} &= \dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic} \Delta T = +Q_{organic} \\ &= 41.8 \frac{kg}{h} \cdot 2.5 \frac{kJ}{kgK} \cdot (40 - 100)K \\ &= -6270kJ/h\end{aligned}$$

(b) 이 열교환기 공정에 대한 엔트로피수지식을 세우시오. 그리고 생성되는 엔트로피는 없고, 정상상태로 가정하여 공급되는 열량을 계산하십시오.

$$\frac{dS}{dt} = \dot{m}_{water} \cdot (S_1 - S_2) + \dot{m}_{organic} \cdot (S_3 - S_4) + \frac{\dot{Q}}{T_{sur}} + d\dot{S}_{gen}$$

정상상태, 생성엔트로피가 없다면,

$$0 = \dot{m}_{water} \cdot (S_1 - S_2) + \dot{m}_{organic} \cdot (S_3 - S_4) + \frac{\dot{Q}}{T_{sur}} \quad \text{식(28-1)}$$

정압엔트로피변화는 정압열용량으로부터 구한다.

$$\Delta S = C_P \ln \frac{T_2}{T_1} \quad \text{식(28-2)}$$

식(28-2) 를 식(28-1) 에 대입하면,

$$\begin{aligned}
 0 &= -\dot{m}_{water} \cdot C_{P,water} \ln \frac{T_2}{T_1} - \dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic} \ln \frac{T_4}{T_3} + \frac{\dot{Q}}{T_{sur}} \\
 \dot{Q} &= T_{sur} \cdot \left( \dot{m}_{water} \cdot C_{P,water} \ln \frac{T_2}{T_1} + \dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic} \ln \frac{T_4}{T_3} \right) \\
 &= 298K \cdot \left( 30 \frac{kg}{h} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kgK} \cdot \ln \frac{343.15}{293.15} + 41.8 \frac{kg}{h} \cdot 2.5 \frac{kJ}{kgK} \cdot \ln \frac{313.15}{373.15} \right) \\
 &= 426 \frac{kJ}{h}
 \end{aligned}$$

(c) 이 열교환기 공정의 전체 에너지수지식을 세우고, 정상상태에서 외부로 나갈수 있는 최대 일을 계산하시오.

위치에너지, 운동에너지의 변화를 무시하면, 다음과 같은 전체 에너지수지식을 유도할 수 있다.

$$\frac{dH}{dt} = \dot{m}_{water} \cdot (H_1 - H_2) + \dot{m}_{organic} \cdot (H_3 - H_4) + \dot{Q} - \dot{W} \quad \text{식(28-3)}$$

정상상태에서 4 개 흐름을 통한 엔탈피변화는 앞서 (a) 에서 구하였고, 외부에서 공급되는 열량은 (b) 에서 구하였으므로,

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{water} \cdot (H_2 - H_1) + \dot{m}_{organic} \cdot (H_4 - H_3) &= +\dot{Q} - \dot{W} \\
 + 6270 \frac{kJ}{h} - 6270 \frac{kJ}{h} &= 426 \frac{kJ}{h} - \dot{W} \\
 \dot{W} &= 426 \frac{kJ}{h}
 \end{aligned}$$

(d) 유기물의 유량과 온도가 그대로 유지되고, 물의 유입온도와 유량도 그대로 유지된다. 하지만, 물의 유출온도는 모른다. 이공정에서 열전달이 없으며, 단지 가역과정으로 대체하면, 얻어지는 최대일은 얼마인가?

열공급이 없고 가역상태에서, 식(28-2) 을 이용하여 식(28-1)을 재정리하면,

$$\begin{aligned}
 0 &= \dot{m}_{water} \cdot (S_1 - S_2) + \dot{m}_{organic} \cdot (S_3 - S_4) \\
 0 &= -\dot{m}_{water} \cdot C_{P,water} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} - \dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic} \cdot \ln \frac{T_4}{T_3}
 \end{aligned}$$

따라서 유출되는 물의 온도는 다음과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned}
 \dot{m}_{water} \cdot C_{P,water} \cdot \ln \frac{T_2}{T_1} &= -\dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic} \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} \\
 \ln \frac{T_2}{T_1} &= \frac{-\dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic}}{\dot{m}_{water} \cdot C_{P,water}} \cdot \ln \frac{T_4}{T_3} \\
 T_2 &= T_1 \cdot \left( \frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{-\dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic}}{\dot{m}_{water} \cdot C_{P,water}}}
 \end{aligned}$$

주어진 값들을 대입하면,

$$\begin{aligned}
 T_2 &= T_1 \cdot \left( \frac{T_4}{T_3} \right)^{\frac{-\dot{m}_{organic} \cdot C_{P,organic}}{\dot{m}_{water} \cdot C_{P,water}}} \\
 &= 293.15K \cdot \left( \frac{313.15}{373.15} \right)^{\frac{-41.8 \times 2.5}{4.18 \times 30}} \\
 &= 339.26K \\
 &= 66^\circ C
 \end{aligned}$$

식(28-3)으로부터 전체 에너지수지식을 세우면, 정상상태 단열이므로,

$$\frac{dH}{dt} = \dot{m}_{water} \cdot (H_1 - H_2) + \dot{m}_{organic} \cdot (H_3 - H_4) + \dot{Q} - \dot{W}$$

따라서 이 공정이 밖으로 배출할 수 있는 최대일은

$$\begin{aligned}
 \dot{W} &= \dot{m}_{water} \cdot (H_1 - H_2) + \dot{m}_{organic} \cdot (H_3 - H_4) \\
 &= 30 \frac{kg}{h} \cdot 4.18 \frac{kJ}{kgK} (20 - 66) + 41.8 \frac{kg}{h} \cdot 2.5 \frac{kJ}{kgK} (100 - 40) \\
 &= 501.6 \frac{kJ}{h}
 \end{aligned}$$

**(e) 가역과정에서 얻는 일의 양과 비가역과정에서 얻는 일을 비교하여 설명하시오.**

가역과정은 (d) 에서 구한 결과이고, 비가역과정은 (c) 에서 구한 결과이다. 두값을 비교하면, 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{W}_{rev} &= 501.6 \frac{kJ}{h} \\
 \dot{W}_{irrev} &= 426 \frac{kJ}{h}
 \end{aligned}$$

즉 가역과정에서 뽑아낼 수 있는 일은 어떤 열공급도 없이, 501.6kJ/h 이다. 하지만, 이러한 가역과정은 현실적으로 불가능하며, 단지 이상적인 가상의 상태이며, 실제로 모든 공정은 비가역적으로 일어나고, 엔트로피는 증가한다.