# Final Report

열유체시스템설계

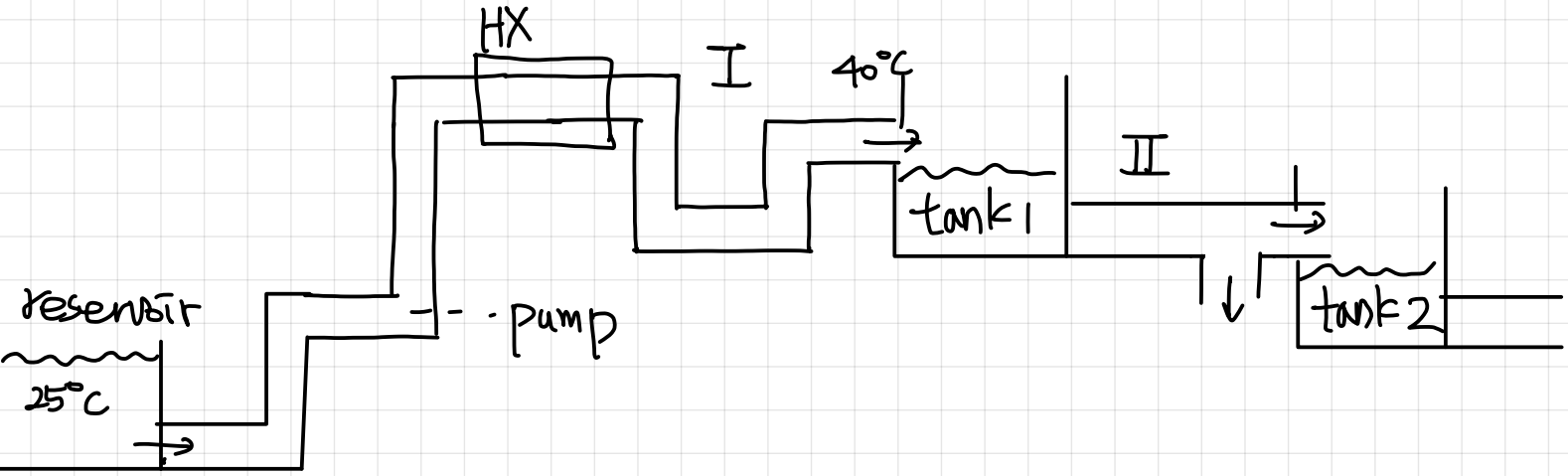

2016121150

윤준영

열유체시스템설계 Final

2016121150 윤준영

다음 그림과 같은 시스템을 설계하려고 한다. Reservoir의 25°C 물을 펌프로 끌어당겨 Heat exchanger를 이용하여 40°C까지 가열한 후 Tank 1으로 운송하는 시스템을 설계하여라.




1) I부분에서 일어나는 부손실로 인한 손실계수를 구하고, 파이프의 지름을 결정하여라.

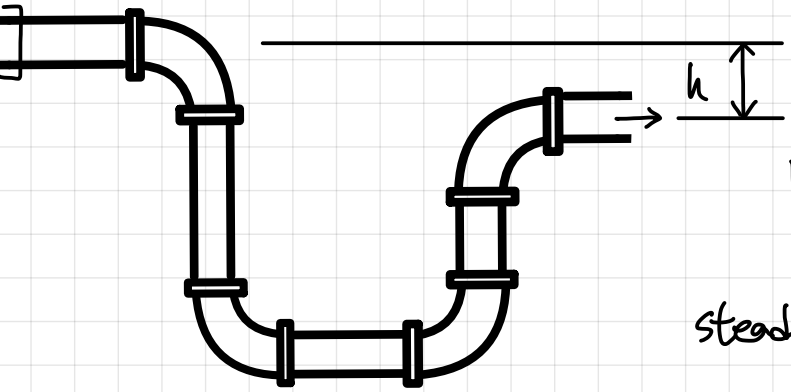
2) I부분의 부손실을 고려해 나타낼수 있는 등가길이를 계산하여라.

3) II부분은 병렬관계로 이루어져있다. Hardy Cross Method를 사용하여 각 부분의 유량을 결정하여라.

4) Cavitation이 일어나지 않는 reservoir의 수위 대비 펌프의 높이를 결정하여라.

5) 25°C의 물을 40°C까지 가열하기 위한 Heat exchanger를 설계하여라.

1) I부분은 장애물로 인해 다음과 같이 우회하여야 한다. 이 때 손실계수 K와 PVC 파이프의 지름을 결정하여라.




fluid - water.

$\dot{m} = 5\,kg/s$

$h = 0.5m$, $L = 5m$

steady, incompressible.

Properties : Water : $\rho = 1000 kg/m^3$, $\mu = 0.89 \times 10^{-3} N \cdot s/m^2$

PVC : $\varepsilon$ = smooth

Modified Bernoulli Equation.

$$\therefore \frac{P_1}{\rho g} + \frac{V_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 + \frac{fL}{D_h}\frac{V^2}{2g} + \sum K \frac{V^2}{2g}$$

let $P_1 = P_2$, $V_1 = V_2$

$$\sum K = K_{inlet} + 5 \times K_{elbow} + K_{exit} = 0.5 + 4 \times (0.31) + 1 = 2.74$$

$$V = \frac{Q}{A} = \frac{\dot{m}/\rho}{\pi D^2/4} = \frac{4\dot{m}}{\rho \pi D^2} = \frac{0.006366}{D^2}$$

$$\therefore 0.5 = \left(\frac{5f}{D} + 3.05\right)\frac{1}{2g}\frac{(0.006366)^2}{D^4}$$

$$\Rightarrow f = 4.84 \times 10^6 D^5 - 0.55D$$

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} = \frac{(1000)\left(\frac{0.006366}{D^2}\right)D}{0.89 \times 10^{-3}} = \frac{7153}{D}, \quad \varepsilon = 0.$$

guess $D = 0.05$, get $f = 1.485$, $Re = 143060$

Moody chart → $f = 0.0167$

guess $D = 0.03$, get $f = 0.101$, $Re = 238433$

Moody chart → $f = 0.0151$

⋮

$D = 0.0224$ 이하 수렴, $f = 0.0149$, $Re = 317911$

$f$(Moody) $= 0.0143$.

$D_{opt} = 0.0225$, ⇒ $D = 0.02664m$ 인 **1-nominal sch 40 pipe 사용**

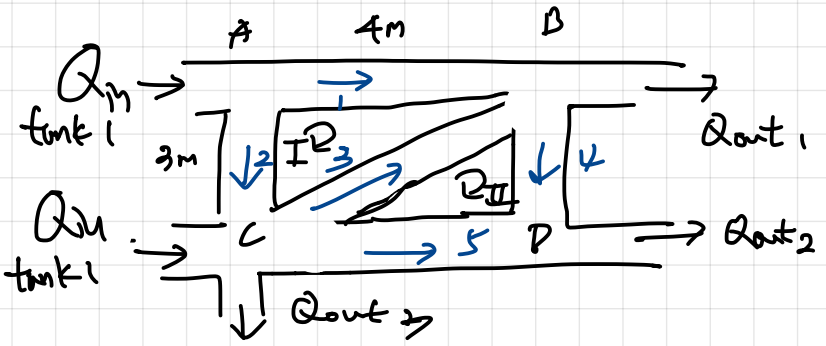
2) 1)에서의 $L_{eq}$를 구하여라.

$$\Sigma K = \frac{f L_{eq}}{D_h}, \quad L_{eq} = \frac{\Sigma K \times D_h}{f} = \frac{2.74 \times 0.0264}{0.0148}$$

↖ from Moody chart

$$\boxed{L_{eq} = 4.932\,m}$$

3) II 부분을 대칭과 같이 tank 1에서 내보낸 $Q_{in}$과 tank 2로 들어가는 $Q_{out1}$, 그리고 방류된 $Q_{out2}$, $Q_{out3}$이 같다. 각각의 유량을 구하여라.




given : all pipes are 1-nominal sch 40, PVC pipe. , $Q_{in} = 0.0025\,m^3/s$

$Q_{out1} = 0.001\,m^3/s$

$Q_{out2} = 0.002\,m^3/s$

$Q_{out3} = 0.002\,m^3/s$

assume : steady, incompressible flow.

Hardy cross method :

$$A: 0.0025 = Q_1 + Q_2, \quad B: Q_1 + Q_3 = Q_4 + 0.001$$

$$C: 0.0005 + Q_2 = Q_3 + Q_5, \quad D: Q_4 + Q_5 = 0.002$$

$$I: C_1 f_1 Q_1^2 - C_3 f_3 Q_3^2 - C_2 f_2 Q_3^2 = 0$$

$$II: C_3 f_3 Q_3^2 + C_4 f_4 Q_4^2 - C_5 f_5 Q_5^2 = 0$$

$$\Rightarrow Q_2 = 0.0025 - Q_1$$

$$Q_5 = 0.002 - Q_4$$

$$Q_3 = 0.0005 + Q_2 - Q_5 = 0.0005 + 0.0025 - Q_1 - 0.002 + Q_4 = 0.001 - Q_1 + Q_4$$

$$Re = \frac{4\rho Q}{\pi D \mu} = \frac{4(1000)Q}{\pi(0.0264)(0.89\times10^{-3})} = 5.37\times10^7 Q$$

⇒ after iterations.

$$\boxed{\begin{aligned} Q_1 &= -0.00188\,m^3/s, & Q_3 &= 0.00438\,m^3/s \\ Q_2 &= 0.00438\,m^3/s, & Q_4 &= 0.0015\,m^3/s \\ & & Q_5 &= 0.0005\,m^3/s \end{aligned}}$$

4) Cavitation을 방지하기 위한 $Z_s$를 구하시오.

given : 1-nominal sch 40 PVC pipe, $L = 10m$, 2 elbows,

$Q = \frac{\dot{m}}{\rho} = 0.005 m^3/s$, $T_{tank} = 25°C$, $NPSH_r = 1m$, $P_{tank} = P_{atm}$

$V = \frac{0.006366}{D^2} = \frac{0.006366}{(0.02664)^2} = 8.97 m/s$

$Re = \frac{7153}{D} = \frac{7153}{0.02664} = 268506$ (from (1))

$NPSH_a = \frac{P_1}{\rho g} - Z_s - (\Sigma \frac{fL}{D} + \Sigma K + 1)\frac{V^2}{2g} - \frac{P_v}{\rho g}$ (suction lift)

$P_v @ 25°C = 3.16 kPa$

$\Sigma K = 2 \times 0.31 + 0.05 = 0.67$

$f(268506, 0) = 0.0148$

$NPSH_a = \frac{101.3 \times 10^3}{(1000)(9.81)} - Z_s - \left(\frac{(0.0148)(10)}{0.02664} + 1.67\right)\frac{(8.97)^2}{2(9.81)} - \frac{3.16 \times 10^3}{(1000)(9.81)}$

$= -19.6277 - Z_s > NPSH_r = 1m$

$Z_s < -20.63$, suction head를 설계하여 cavitation이 발생하지 않도록.

5) Design Heat Exchanger to heat water 25°C to 40°C.

Ethylene glycol을 이용하여 물을 25°C에서 40°C까지 데우는 shell-tube heat exchanger를 설계하시오.

A. Properties

Ethylene glycol (tube): $\dot{m}_w = 5kg/s$, $T_1 = 80°C$, $\rho = 1077 kg/m^3$, $C_p = 2650 J/kg \cdot K$, $k_f = 0.261 W/m \cdot K$, $\alpha = 9.21 \times 10^{-8} m^2/s$, $\nu = 8.69 \times 10^{-6} m^2/s$, $Pr = 94.41$

Water (shell): $\dot{m}_c = 5kg/s$, $t_1 = 25°C$, $\rho = 1000 kg/m^3$, $C_p = 4178 J/kg \cdot K$

$k_f = 0.628\ W/m\cdot K$ $\quad \alpha = 1.51 \times 10^{-7}\ m^2/s$

$\nu = 6.58 \times 10^{-7}\ m^2/s$ $\quad Pr = 4.35$

B. Tubing Sizes : 3/4 nomin 15 BWG 사용. (Copper)

$ID_t = 0.0154\ m$, Number of tube $N_t = 200$

$OD_t = 0.0191\ m$, Number of passes $N_p = 8$

* Passes 가 높으면 압력강하 높아지만 난류유동 되어 압력강하가 증가해 낮아 많은 passes 수 사용하여 열교환기의 효율을 높일 수 있다.

C. Shell Data 19 1/4" shell (triangular pitch), $L = 5m$

$D_s = 0.489\ m$.

Number of baffles $N_b = 8$, $B = 0.5m$ (간격)

tube pitch $P_T = 0.0254\ m$

$C = P_T - OD_t = 0.0254 - 0.0191 = 0.0063m$

D. Flow area

tube $A_t = N_t \pi (ID_t^2)/4N_p = 200\pi(0.0154)^2/4(8) = 0.004657m^2$

shell $A_s = D_s CB/P_T = (0.489)(0.0063)(0.5)/(0.0254) = 0.00604m^2$

E. Fluid Velocities

tube velocity $V_t = \dot{m}/\rho A = 5/(1077)(0.004657) = 0.9970 m/s$

shell velocity $V_s = \dot{m}/\rho A = 5/(1000)(0.0604) = 0.08244 m/s$

tube mass velocity $G_t = \dot{m}/A = 5/0.004657 = 1073.74\ kg/m/s$

shell mass velocity $G_s = \dot{m}/A = 5/0.00604 = 82.4488\ kg/m/s$

F. Shell equivalent Diameters

$$D_e = (3.46P_T^2 - \pi OD_t^2)/(\pi OD_t) = \frac{(3.46)(0.0254)^2 - \pi(0.0191)^2}{\pi(0.0191)^2} = 0.01810m$$

G. Reynolds Numbers

tube $Re_t = V_t ID_t/\nu = \frac{(0.9970)(0.0154)}{8.69 \times 10^{-6}} = 1767$

shell $Re_s = V_s D_e/\nu = \frac{(0.08244)(0.01810)}{6.58 \times 10^{-7}} = 2268$

H. Nusselt Numbers

tube $Re_t < 2200 \rightarrow$ Laminar

$$Nu_t = 1.86\left(\frac{ID_t Re_t Pr}{L}\right)^{1/3} = 1.86\left(\frac{(0.0154)(1767)(94.41)}{5}\right)^{1/3} = 14.89$$

shell $Nu_s = 0.36\, Re_s^{0.55} Pr^{1/3} = 0.36\,(2268)^{0.55}(4.35)^{1/3} = 41.192$

I. Convecton Coefficient

$$h_i = \frac{Nu_t k_f}{ID_t} = \frac{(14.89)(0.261)}{(0.0154)} = 252.42\ W/m^2\cdot K$$

$$h_t = h_i\, ID_t / OD_t = \frac{(252.42)(0.0154)}{(0.0191)} = 203.53\ W/m^2\cdot K$$

$$h_o = Nu_s k_f / D_e = \frac{(41.192)(0.628)}{(0.0181)} = 1429.09$$

J. Exchanger Coefficient

$$\frac{1}{U_o} = \frac{1}{h_t} + \frac{1}{h_o} \rightarrow U_o = 1/(1/h_t + 1/h_o) = 1/(1/203.53 + 1/1429.09)$$

$$= 178.15\ W/m^2\cdot K$$

K. Outlet Temperature Calculations

$$R = \frac{\dot{m}_c C_{pc}}{\dot{m}_w C_{pw}} = \frac{(5)(4178)}{(5)(2650)} = 1.5766$$

$$A_o = N_t \pi OD_t L = 200\pi(0.0191)(5) = 60.004\ m^2$$

$$\frac{U_o A_o}{\dot{m}_c C_{pc}} = \frac{(178.15)(60.004)}{(5)(4178)} = 0.5117$$

$$\sqrt{R^2+1} = 1.867$$

$$C_1 = \exp\left(\frac{U_o A_o}{\dot{m}_c C_{pc}}\sqrt{R^2+1}\right) = \exp(0.5117 \times 1.867) = 2.600$$

$$C_2 = (R+1-\sqrt{R^2+1}) = 2.(2.5766 - 1.867) = 0.7096$$

$$C_3 = (R+1+\sqrt{R^2+1}) = 1.5766+1+\sqrt{1.867} = 4.4436$$

$$S = \frac{2(1-C_1)}{C_2 - C_1 C_3} = \frac{2(1-2.600)}{0.7096-(2.6)(4.4436)} = 0.2951$$

$\therefore t_2 = (T_1 - t_1)S + t_1 = (80-25)\,0.2951 + 25 = \boxed{41.23\,^\circ C\ (t_2)}$

$T_2 = T_1 - R(t_2 - t_1) = 80 - 1.5766(41.23-25) = \boxed{54.41\ (t_2)}$

L. LMTD

$$LMTD = \frac{(T_1 - t_2) - (T_2 - t_1)}{\ln[(T_1-t_2)/(T_2-t_1)]} = \frac{(80-41.23) - (54.41-25)}{\ln[(80-41.23)/(54.41-25)]}$$

$= 33.876$

M. Heat balance

Warmer: $q_w = \dot{m} C_p \Delta T = (650)(5)(80 - 54.41) = 339033\ W$

Cooler: $q_c = \dot{m} C_p \Delta T = (5)(4178)(41.23-25) = 339033\ W$

$$F = \frac{\sqrt{R^2+1}\,\ln[(1-S)/(1-RS)]}{(R-1)\ln\left[\frac{2-S(R+1-\sqrt{R^2+1})}{2-S(R+1+\sqrt{R^2+1})}\right]} = \frac{(1.867)\ln[(1-0.2951)/(1-(1.5766)(0.2951))]}{(0.5766)\ln\left[\frac{2-0.2951(2.5766-1.867)}{2-0.2951(2.5766+1.867)}\right]}$$

$= 0.9362$

$q = U_o A_o F(LMTD) = (178.15)(60.004)(0.9362)(33.876) = 339033\ W$

$q_w = q_c = q$ 이므로 계산이 정확하다고 할 수 있다.

N. Fouling factors.

$R_{di} = 0.000176\ m^2 \cdot K/W$, $R_{do} = 0.0002\ m^2 \cdot K/W$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{U_o} + R_{di} + R_{do} \rightarrow U = 1/(1/U_o + R_{di} + R_{do})$$

$U = 1/(1/178.15 + 0.000376) = 166.97\ W/m^2 \cdot K$

P. Friction Factors.

$\varepsilon = 0.000015\ m$

$f_t = 64/Re = 64/1767 = 0.03622$

$f_s = \exp(0.576 - 0.19 \ln Re_s) = \exp(0.576 - 0.19 \ln 2268)$

$= 0.4098$

Q. Pressure Drop.

$$\Delta P_t = \frac{\rho V_t^2}{2}\left(\frac{f_t L}{ID_t}+4\right)N_p = \frac{(1077)(0.9970)^2}{2}\left(\frac{(0.03622)(5)}{0.0154}+4\right)8 = 67488Pa$$

$$= 67.49\ kPa$$

$$\Delta P_s = \frac{\rho V_s^2}{2}\frac{D_s}{D_e}f_s(N_b+1) = \frac{(1000)(0.08242)^2}{2}\frac{0.0489}{0.01810}(0.4698)(8+1)$$

$$= 338.65Pa = 3.39\ kPa$$

R. After 1year.

$T_2 = 55.30°C$ , $t_2 = 40.67°C$

⇒ $T_2 = 54.41°C$, $t_2 = 41.23°C$, $\Delta P_t = 67.49kPa$, $\Delta P_s = 3.39kPa$.
after 1year $T_2 = 55.30°C$, $t_2 = 40.67°C$

설계결과 오염계수를 고려하여도 1년 후에도 작동온도를 만족시키는 것을 확인할 수 있었다.

Tube fluid와 shell fluid 모두 질량유량이 5kg/s로 설계하여 열전달이 잘 되는 것을 확인할 수 있었다. Np 값을 올리게 되면 압력강하가 크게 일어나 Np 값은 크게 올리지 못하는 경우로 많다. 본 설계에서는 압력강하를 크게 일으키는 유체의 속도가 작기 때문에 Np를 8까지 올려 열교환기의 효율을 높일 수 있었다. 설계적사 가정하였던 유체의 압력강하는 3.39kPa로 Np가 8인점에 비해 작게 설계되었다. 또한 속도가 낮아 Reynolds number 또한 낮게 나타나 두 유체 모두 층류유동을 하는 것을 알 수 있었다. Moody chart를 보면 층류유동에서 천이영역으로 넘어가는 영역 ($Re = 2000 \sim 4000$)에서 friction factor가 층류유동보다 작아지는 것을 알 수 있다. 이를 이용하면 압력강하를 더 낮출 수 있을 것으로 예상할 수 있는데, 이를 이용하여 레이놀즈 수를 높여보았으나 큰 효과는 얻지못했다. 따라서 이 부분은 더 연구가 필요해 보인다.