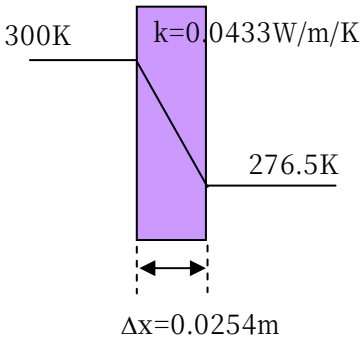
4.1-1. 냉장실의 열손실 flux (W/m^2) 계산.



전도에 의한 냉장실의 열손실량은 Fourier's law 에 의해, 냉장실 문두께에 따른 온도기울기에 비례하므로,

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dx} = k\frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = 0.0433\frac{W}{mK}\frac{(300-276.5)K}{0.0254m} = 39.78\frac{W}{m^2}$$

4.2-4 열전도도가 온도에 따라 변하는 변수라고 한다면, 열플럭스식은 어떻게 되겠는가?

전도에 의한 열전달식은

$$\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dx}$$

여기에서 열전도계수는 온도에 따른 함수이다.

$$k = a + bT + cT^3$$

k 가 온도에 따라 변하고, 열유속 (q) 와 단면적 (A) 는 상수라고 할 때, 양변에 dx를 곱하여 양변을 적분한다.

$$\frac{q}{A}dx = -kdT$$

$$\frac{q}{A}\int_{x1}^{x2} dx = -\int_{T1}^{T2} kdT$$

위 적분식은 다음과 같이 정리된다.

$$\frac{q}{A}[x]_{x1}^{x2} = -\int_{T1}^{T2}(a + bT + cT^3)dT$$

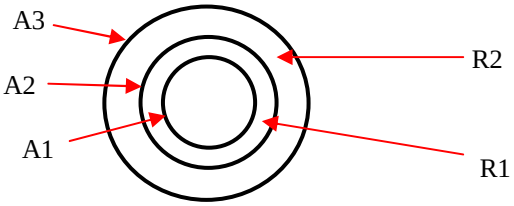
$$\frac{q}{A}(x_2 - x_1) = -\left[aT + \frac{b}{2}T^2 + \frac{c}{4}T^4\right]_{T1}^{T2}$$

$$\frac{q}{A}(x_2 - x_1) = -a(T_2 - T_1) - \frac{b}{2}(T_2^2 - T_1^2) - \frac{c}{4}(T_2^4 - T_1^4)$$

윗식은 좀더 간략화된다.

$$\frac{q}{A} = -\left[a + \frac{b}{2}(T_2 + T_1) + \frac{c}{4}(T_2^2 + T_1^2)(T_2 + T_1)\right]\frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

4.3-4 수증기 파이프라인에서의 총괄열전달 계수



a) 열전달속도 (q, J/s) 를 구하시오.

이 파이프에서의 열전달은 단지 열전도에 따른 2가지 저항만 고려한다. 따라서 열전달속도 (q) 는 다음과 같다.

$$q = U\Delta T \qquad (4.3\text{-}4\text{-}1)$$

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{\Delta r_1}{k_1 A_{lm1}} + \frac{\Delta r_2}{k_2 A_{lm2}}} \qquad (4.3\text{-}4\text{-}2)$$

여기에서 외부와 내부의 온도차 $\Delta T = 121.1 - 26.7 = 94.4K$ 이고, 파이프 내부에서 외부까지 3개의 단면적은 다음과 같다.

$$A_1 = 2\pi r_1 L = 2 \cdot 3.14 \cdot \frac{52.5}{2} \times 10^{-3} m \cdot 30.5m = 5.03m^2$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L = 2 \cdot 3.14 \cdot (\frac{52.5}{2} + 3.91) \times 10^{-3} m \cdot 30.5m = 5.777m^2$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L = 2 \cdot 3.14 \cdot (\frac{52.5}{2} + 3.91 + 25.4) \times 10^{-3} m \cdot 30.5m = 10.642m^2$$

위에서 구한 열전달면적 3개로부터 2개의 저항값을 구할 수 있다.

$$R_1 = \frac{\Delta r_1}{k_1 A_{lm1}} = \frac{3.91 \times 10^{-3} m}{45 \frac{W}{mK} \cdot \frac{5.777 - 5.03}{\ln \frac{5.777}{5.03}} m^2} = 1.6106 \times 10^{-5} \frac{K}{W}$$

$$R_2 = \frac{\Delta r_2}{k_2 A_{lm2}} = \frac{25.4 \times 10^{-3} m}{0.182 \frac{W}{mK} \cdot \frac{10.642 - 5.777}{\ln \frac{10.642}{5.777}} m^2} = 1.7525 \times 10^{-2} \frac{K}{W}$$

따라서 총괄열전달 계수 U 는

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{1.6106 \times 10^{-5} + 1.7525 \times 10^{-2}} \frac{W}{K} = 57.009 \frac{W}{K} \qquad (4.3\text{-}4\text{-}3)$$

식 (4.3-4-1) 과 식 (4.3-4-3) 으로부터,

$$q = U\Delta T = 57.009 \frac{W}{K} 94.4K = 5381.6W$$

b) 열손실에 따른 수증기응축량을 구하시오.

수증기 120 °C 포화기체가 포화액체로 응축될 때의 잠열은 부록 937쪽에서 구할 수 있다.

$$\Delta H^{vap} = (2706.3 - 503.71) kJ / kg = 2202.59 kJ / kg$$

열전달에 의한 열손실량만큼 수증기가 응축한다면, 다음과 같은 관계식을 사용할 수 있다.

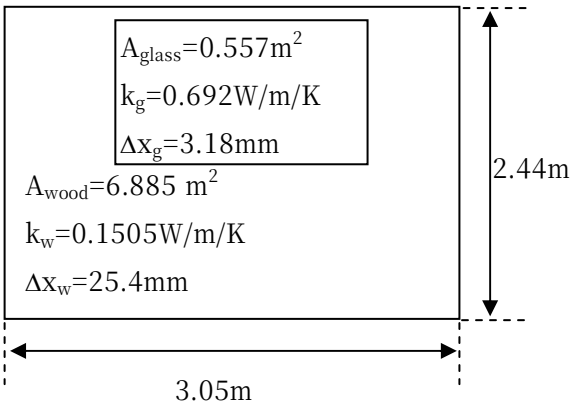
$$q[\frac{kJ}{hr}] = \Delta H^{vap}[\frac{kJ}{kg}] \cdot \dot{m}[\frac{kg}{hr}]$$

$$\dot{m} = \frac{q}{\Delta H^{vap}} = 5381.6\frac{J}{s} \cdot \frac{3600s}{hr} \cdot \frac{kJ}{1000J} \cdot \frac{kg}{2202.59kJ} = 8.8kg/hr$$

4.3-6 대류와 전도에 의한 열손실 계산

목재벽과 유리창을 각각 구별하여 열손실을 계산하기 위해, 목재벽의 단면적과 유리창의 단면적을 구한다.

전체 벽면적에서 유리창의 면적을 뺀 부분이 그림에서 처럼 목재벽의 넓이이다.



T_{in}=300K
T_{out}=266.5K
$\Delta T = T_{in} - T_{out}$=33.5K
$h_{in} = h_{out}$=8.5W/m^2/K

$$A_{wood} = 3.05 \times 2.44m^2 - 0.557m^2 = 6.885m^2$$

a) 목재벽으로 부터의 열손실양.

이 열전달에 있어서 3개의 저항이 존재한다: 벽외부에서의 공기 대류저항, 벽자체의 전도저항, 벽내부에서의 공기 대류저항. 따라서, 평면에 대한 총괄 열전달 계수식은 단면적이 일정하므로,

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{\frac{1}{h_{out}A_w} + \frac{\Delta x_w}{k_w A_w} + \frac{1}{h_{in}A_w}} \qquad (4.3\text{-}6\text{-}1)$$

문제에서 주어진 값들을 대입하여 총괄열전달계수를 구한다.

$$U_w = \frac{A_w}{\frac{1}{h_{out}} + \frac{\Delta x_w}{k_w} + \frac{1}{h_{in}}} = \frac{6.885m^2}{\frac{m^2K}{8.5W} + \frac{0.0254m^2K}{0.1505W} + \frac{m^2K}{8.5W}} = 17.039\frac{W}{K}$$

목재벽을 통한 열손실량 q 는 다음과 같다.

$$q_w = U_w \Delta T = 17.039\frac{W}{K} \cdot 33.5K = 570.82W$$

b) 유리벽의 열손실량을 구하시오.

위와 같은 방법으로, 먼저 총괄열전달계수를 구하고, 열손실량을 구한다.

$$U_g = \frac{1}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{1}{\frac{1}{h_{out}A_g} + \frac{\Delta x_g}{k_g A_g} + \frac{1}{h_{in}A_g}} = \frac{A_g}{\frac{1}{h_{out}} + \frac{\Delta x_g}{k_g} + \frac{1}{h_{in}}}$$

$$U_g = \frac{A_g}{\frac{1}{h_{out}} + \frac{\Delta x_g}{k_g} + \frac{1}{h_{in}}} = \frac{0.557m^2}{\frac{m^2K}{8.5W} + \frac{0.00318m^2K}{0.692W} + \frac{m^2K}{8.5W}} = 2.3219\frac{W}{K}$$

유리벽을 통한 열손실량 q 는 다음과 같다.

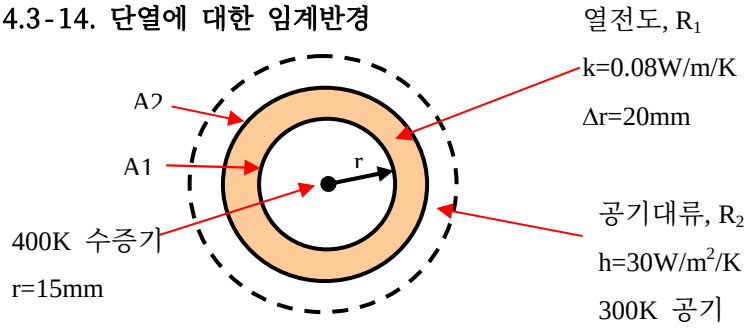
$$q_g = U_g \Delta T = 2.3219\frac{W}{K} \cdot 33.5K = 77.78W$$

c) 총열손실량을 구하시오.

총열손실량 q 는 목재벽과 유리벽으로부터의 열손실량의 합이므로,

$$q = q_w + q_g = 570.82W + 77.78W = 648.6W$$

4.3-14. 단열에 대한 임계반경



a) 노출된 파이프 단위길이당 열손실량은?

이 문제에서는 단열이 되지않은 노출된 파이프의 열손실을 구하는 것이다. 따라서 열은 공기대류에 의해 1개의 저항을 통하여 전달된다. 따라서 총괄열전달계수는

$$U = \frac{1}{R} = \frac{1}{\frac{1}{hA_1}} = hA_1 \qquad (4.3\text{-}14\text{-}1)$$

이 파이프의 길이를 L 이라고 할 때, 파이프의 면적은 다음과 같다.

$$A_1 = 2\pi rL = 0.0942L$$

따라서 식 (4.3-14-1) 은 다음과 같이 구할 수 있다.

따라서 열손실량은 다음과 같다.

$$q = U\Delta T = 30\frac{W}{m^2K}0.0942L \cdot m^2 \cdot 100K = 282.6L \cdot W$$

따라서 단위길이당 열손실량 (q/L) 은

$$\frac{q}{L} = 262.6\frac{W}{m}$$

b) 임계반경을 구하시오

임계반경은 교재 260쪽에 설명되어있다. 임계반경은 단열재의 두께가 열전달량에 미치는 영향을 보기위해 구하는 것으로, 단열재의 열전도도를 단열재 주변 유체의 열대류계수로 나눈것이다.

$$r_{critical} = \frac{k_{insulation}}{h_{out}}$$

이 값은 열전달 속도가 최대일때의 임계반경값으로, 단열을 원한다면, 이 임계값보다 두껍게 단열재를 감아야 한다.

$$r_{critical} = \frac{k_{insulation}}{h_{out}} = \frac{0.08\frac{W}{mK}}{30\frac{W}{m^2K}} = 2.667mm$$

현재 단열재의 두께는 20mm 이므로 충분한 단열이 예상된다.

c) 파이프의 표면온도가 일정할 때, 단열된 파이프의 열손실은?

이 문제에서의 열전달은 단열재전도와 공기대류에 의한 2개의 저항을 통하여 전달된다. 따라서 총괄열전달계수는

$$U = \frac{1}{R_1 + R_2} = \frac{1}{\frac{\Delta r}{kA_{lm}} + \frac{1}{hA_2}} \qquad (4.3\text{-}14\text{-}1)$$

이 파이프의 길이를 L 이라고 할 때, 단열재에 내부와 외부에 대한 면적은 다음과 같다.

$$A_1 = 2\pi rL = 0.0942L$$

$$A_2 = 2\pi r_2 L = 2\pi(0.015 + 0.02)L = 0.2198L$$

$$A_{lm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln\frac{A_2}{A_1}} = \frac{0.2198L - 0.0942L}{\ln\frac{0.2198L}{0.0942L}} = 0.14824L$$

따라서 식 (4.3-14-1) 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$U = \frac{1}{\frac{0.02m}{0.08\frac{W}{mK}0.14824L\cdot m^2} + \frac{1}{30\frac{W}{m^2K}0.2198L\cdot m^2}} = 0.54404L\frac{W}{K}$$

열손실량은 다음과 같다.

$$q = U\Delta T = 0.54404L\frac{W}{K}\cdot 100K = 54.404L\cdot W$$

따라서 단위길이당 열손실량 (q/L) 은 $\frac{q}{L} = 54.404\frac{W}{m}$

즉, 단열재를 감음으로서 열손실량을 약 1/5 로 줄일 수 있다.