

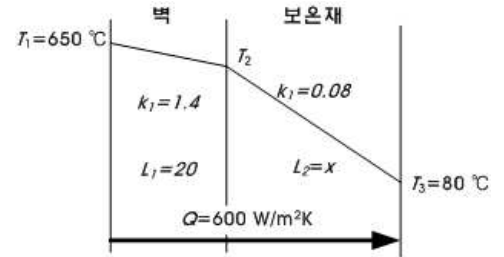
【전열공학 이해】

1. 금속의 열전도율을 측정하고자 한다. 금속의 두께는 40 mm, 한 변이 60 cm인 사각형 금속판의 한 면을 20 °C로 냉각한 상태에서 180 kW/m²의 열량을 가하였더니 가열면의 온도가 120 °C로 상승하였다. 이 금속의 열전도율은 얼마인가?

【풀이 1】

열전도율에 관한 식 $\kappa \frac{T_1 - T_2}{l}$, $k = \frac{Q \cdot l}{T_1 - T_2} = 72 \text{ W/mK}$

2. 두께 20 cm, 열전도율 $k_1=1.4 \text{ W/mK}$ 인 벽에 $k_2 = 0.08 \text{ W/mK}$ 인 보온재를 설치하여 벽을 통과하는 열량을 단위 면적당 600 W/m² 이하로 하고자 한다. 고온 벽 온도를 650 °C, 외벽 온도를 80 °C인 경우, 보온재의 두께를 얼마로 해야 하는가?



【풀이 2】

우선 T_2 를 계산한 다음에 두께 L_2 를 계산한다.

벽에서의 온도차를 계산하기 위해서 $T_1 - T_2 = Q \frac{L_1}{k_1}$ 를 이용하면 $T_2 = T_1 - Q \frac{L_1}{k_1} = 564 \text{ °C}$

보온재 두께 L_2 는 $L_2 = \frac{k_2 \cdot (T_2 - T_3)}{Q} = 0.065 \text{ m}$

따라서, 보온재의 두께는 65 mm 이상으로 한다.

3. 온도 200 °C인 흑체로부터 방사되는 단위면적, 단위 시간당의 열에너지는 얼마인가? 또한, 방사율 0.88인 회색체인 경우의 열에너지는 얼마인가?

【풀이 3】

200 °C는 473.15 K이므로 $E = 5.67 \times 10^{-8} \times 473.15^4 = 2,841.7 \text{ W/m}^2$

$E = \epsilon \cdot E_B = 0.88 \times 2.84 \text{ kW/m}^2 = 2.50 \text{ kW/m}^2$

4. 벽면온도가 20 °C로 유지되는 넓은 실내에 직경 15 cm인 쇠구슬이 설치되어 있다. 쇠구슬의 온도 527 °C. 방사율이 0.75일 때, 열방사에 의해 쇠구슬이 잃는 열량은 얼마인가?

【풀이 4】

$A = 4\pi r^2 = 0.283 \text{ m}^2$

$Q = \sigma \cdot \epsilon \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) = 5.67 \times 10^{-8} \times 0.75 \times 0.283 \times (800^4 - 293^4) = 4.84 \text{ kW}$

5. 표면온도가 28 °C인 평판을 따라 45 °C인 물이 흐르고 있다. 열전달율이 450 W/m²K일 때, 열유속은 얼마인가?

【풀이 5】 $q = h \cdot (T_1 - T_2) = 450 \times (45 - 28) = 7.65 \text{ kW/m}^2$

6. 물탱크의 벽이 내측으로부터 두께 5 mm 철판, 60 mm 발포 스티로폼, 10 mm 염화비닐 적층구조로 제작

되었다. 물탱크 내부의 물과 철판, 염화비닐과 외부 공기 사이의 열전달율이 300 W/m²K, 80 W/m²K이고, 수온 60 °C, 외부 공기 온도 20 °C일 때, 적층판을 통과하는 열유속은 얼마인가? 단, 철판, 발포 스티로폼, 염화비닐의 열전도율은 각각 60 W/mK, 0.03 W/mK, 0.5 W/mK이다.

【풀이 6】

$$\frac{1}{h} + \frac{L_1}{k} + \frac{L_2}{k_2} + \frac{L_3}{k_3} + \frac{1}{h_A} = 18.6 \text{ W/m}^2$$

7. 유속 10 m/s인 층류 흐름의 공기 흐름 방향과 평행되게 평판이 놓여 있다. 한쪽 끝에서 60 mm 위치에 있는 국소 열전달율과 한쪽 끝에서 60 mm까지의 평균 열전달율은 얼마인가? 단, 공기 흐름의 무한거리까지의 온도는 $T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 평판 표면 온도는 80 °C, 50 °C인 공기의 열물성치인 다음과 같다. 비열 $C_p = 1.008 \text{ kJ/kgK}$, 점성계수 $\mu = 19.3 \times 10^{-6} \text{ Pas}$, 열전도율 $k = 2.80 \times 10^{-2} \text{ W/mK}$, 밀도 $\rho = 1.093 \text{ kg/m}^3$

【풀이 7】

열전달율을 계산하기 위해서는 Nu 수를 계산해야 하며, 이를 위해서는 우선 Re 수, Pr 수를 계산해야 한다. 이 경우, 대표 길이는 판의 한쪽 끝에서 면을 따른 거리, 대표 온도는 표면 온도와 주류 온도의 평균온도이므로 한쪽 끝에서 60 mm 위치의 Re 수 및 Pr 수는 다음과 같다.

$$Re = \frac{vx}{\nu} = \frac{\rho vx}{\mu} = \frac{1.093 \times 10 \times 0.06}{19.3 \times 10^{-6}} = 3.40 \times 10^4$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu}{k} = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{1.008 \times 10^3 \times 19.3 \times 10^{-6}}{2.80 \times 10^{-2}} = 0.695$$

$$Nu_z = \frac{h_z x}{k} = 0.332 Pr^{1/3} Re^{1/2} = 54.2$$

$$\text{국소열전달율 } h_z = \frac{Nu_z k}{x} = \frac{54.2 \times 2.80 \times 10^{-2}}{0.06} = 25.3 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Nu_m = \frac{h_m x}{k} = 0.664 Pr^{1/3} Re^{1/2} = 108.4$$

$$\text{평균 열전달율 } h_m = \frac{Nu_m k}{x} = 50.6 \text{ W/m}^2\text{K}$$

【유체역학】

1. 체적 5.5 m³인 어느 기름의 무게가 4500 kgf일 때, 이 기름의 비중량, 밀도, 비중은 얼마인가?

【풀이 1】

$$\text{비중량} = W = \frac{4,500}{5.5} = 818.2 \text{ kgf/m}$$

$$\text{밀도 } \rho = \frac{\gamma}{g} = \frac{818.2}{9.8} = 83.5 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

$$\text{비중 } S = \frac{\gamma}{\gamma} = \frac{818.2}{1,000} = 0.82$$

2. 10 mm의 간극을 가지는 평행 평판 사이에 점성계수가 14.7 poise인 액체가 채워져 있다. 아래 평판을 고정하고 위 평판을 2 m/s로 움직일 때, 액체 속에 일어나는 전단응력은 얼마인가?

【풀이 2】

$$\mu = 14.7 \text{ poise} = \frac{14.7}{9.8} = 0.15 \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

$$\tau = \mu \cdot \left(\frac{du}{dy} \right) = 0.15 \times \left(\frac{2}{0.01} \right) = 30 \text{ kgf}/\text{m}^2$$

3. 어떤 액체의 동점성계수와 밀도가 $5.6 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$ 와 $19.6 \text{ kgf} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$ 이다. 이 액체의 점성계수는 몇 $\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ 인가?

【풀이 3】

$$\mu = \rho \cdot \nu = 5.6 \times 10^{-4} \times 19.6 = 0.0109 \text{ kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$$

4. 개방된 탱크에 비중이 3인 액체 0.2 m 위에 물 0.2 m가 있다. 이 때, 탱크 밑면에 작용하는 압력은 몇 kg/cm^2 인가? 또한, 탱크의 넓이가 2 m²일 때, 밑면에 작용하는 힘은 얼마인가?

【풀이 4】

$$P = P_0 + \gamma \cdot h = 1000 \times 3 \times 0.2 + 1000 \times 0.2 = 800 \text{ kg}/\text{m}^2 = 0.08 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

$$F = P \cdot A = 0.08 \times 2 = 0.16 \text{ kg}/\text{cm}^2$$

5. 우유를 지름 2.5 mm 스트로우를 이용하여 수직방향 200 mm만큼 빨아들이기 위해 필요한 힘은 몇 N인가? 단, 우유의 비중량은 $9400 \text{ N}/\text{m}^2$ 이다.

【풀이 5】

$$p = -\gamma \cdot h = -9400 \times 0.2 = -188 \text{ N}/\text{m}^2$$

$$F = P \cdot A = 188 \times \left(\frac{\pi \cdot 0.0025^2}{4} \right) = 9.23 \times 10^{-4} \text{ N}$$

6. 깊이 5 m인 밀폐 탱크에 물이 4.5 m 차 있다. 수면에는 $3 \text{ kg}/\text{cm}^2$ 의 증기압이 작용하고 있을 때, 탱크 밑면에 작용하는 압력은?

【풀이 6】

$$P + \gamma \cdot h = 3 \times 10^4 + 1000 \times 4.5 = 34500 \text{ kg/m}^2 = 3.45 \text{ kg/cm}^2$$

7. 밀변의 지름이 10 cm인 직립 원통의 용기에 높이 20 cm 가량 물이 들어 있다. 밀변이 받는 전압력은 얼마인가?

【풀이 7】

$$F = P \cdot A = \gamma \cdot h \cdot A = 1000 \times 0.2 \times \left(\frac{\pi \cdot 0.1^2}{4} \right) = 1.57 \text{ kg}$$

8. 단면이 30 cm × 50 cm인 사각형 덕트(duct) 속에 공기가 흐르고 있다. 덕트 속에 흐르는 공기의 유량이 0.45 m³/s일 때, 덕트 내의 공기 평균 유동 속도 u 와 질량 유량 m 은 얼마인가? 단, 공기의 밀도는 1.225 kg/m³이다.

【풀이 8】

$$Q = A \cdot u, \quad u = \frac{Q}{A} = \frac{0.45}{0.3 \times 0.5} = 3 \text{ m/s}$$

$$m = \rho \cdot A \cdot u = 1.225 \times 0.3 \times 0.5 \times 3 = 0.55125 \text{ kg/s}$$

9. 안지름 60 cm인 파이프에 평균 속도 3 m/s로 물이 흐를 때, 체적 유량은 몇 m³/s인가?

【풀이 9】

$$\text{체적 유량 } Q = A \cdot u = \left(\frac{\pi}{4} \right) \times 0.6^2 \times 3 = 0.8478 \text{ m}^3/\text{s}$$

10. 안지름이 100 mm인 파이프에 비중 0.8인 기름이 평균 속도 2 m/s로 흐를 때, 중량 유량은 얼마인가? 단, 물의 비중량은 1000 kg/m³로 한다.

【풀이 10】

$$Q = A \cdot u = \left(\frac{\pi}{4} \right) \times 0.08^2 \times 4 \times 0.9 \times 1000 = 18.09 \text{ kg/s}$$

11. 어떤 수평관 속에서 물이 평균 속도 2.8 m/s, 압력 0.46 kg/cm²의 상태로 흐르고 있다. 이 물의 유량이 0.84 m³/s인 경우의 물의 동력은 몇 PS인가?

【풀이 11】

$$H = \left(\frac{P}{\gamma} \right) + \left(\frac{u^2}{2g} \right) + z = \left(\frac{0.46 \times 10^4}{1000} \right) + \left(\frac{2.8^2}{2 \times 9.8} \right) + 0 = 5 \text{ m}$$

$$PS = \frac{\gamma \cdot Q \cdot H}{75} = 56 \text{ PS}$$

12. 비중 0.9인 기름이 직경 50 mm인 관은 원관 속을 60 l/min로 흐르고 있다. 이 때의 레이놀즈수는 얼마인가? 단, 이 기름의 점성계수는 $5 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s/m}^2$ 이다.

【풀이 12】

$$Q = 60 \text{ l/min} = 0.001 \text{ m}^3/\text{s}, \quad u = \frac{Q}{A} = \frac{0.001}{\pi \cdot 0.025^2} = 0.51 \text{ m/s}$$

$$= \frac{\gamma}{g} = \frac{1000}{g}$$

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot u}{\mu} = \frac{1000 \cdot S \cdot D \cdot u}{\mu \cdot g} = \frac{1000 \times 0.9 \times 0.05 \times 0.51}{5 \times 10^{-3} \times 9.8} = 468.4$$

13. 비중량 1200 kg/m³, 점성계수 10⁻⁴kg · s/m²인 유체가 지름 10 cm인 관 속을 평균 유속 10 m/s로 흐를 때의 레이놀즈수는 얼마인가?

【풀이 13】

$$Re = \frac{\rho \cdot D \cdot u}{\mu} = \frac{1000 \cdot S \cdot D \cdot u}{\mu \cdot g} = \frac{1200 \times 0.1 \times 10}{9.8 \times 10^{-4}} = 1,224,490$$

14. 점성계수 0.1 kg · s/m², 비중 0.9인 액체를 160 l/min의 비율로 지름 10 cm인 파이프를 이용하여 20 km 떨어진 곳까지 이송하고자 할 때, 소요 동력은 몇 PS인가?

【풀이 14】

$$\text{평균 유속 } u = Q / A = 0.34 \text{ m/s}$$

$$Re = \rho \cdot D \cdot u / \mu = (0.9 \times 10^3 \times 0.1 \times 0.34) / (0.1 \times 9.8) = 31.2 = \text{층류}$$

$$\text{층류에 대한 마찰 손실 계수 } f = 64 / Re = 64 / 31.2 = 2.05$$

$$\text{마찰 손실 } h = f \cdot (L / D) \cdot (u^2 / 2 \cdot g) = 2.05 \times (20 \times 10^3 / 0.1) \times (0.9 \times 10^3 \times 0.34^2 / 19.6) = 2.18 \times 10^6 \text{ kg/m}^2$$

$$\therefore \text{소요 동력} = \Delta p \cdot Q / 75 = (2.18 \times 10^6 \times 160 \times 10^{-3}) / (75 \times 60) = 77.5 \text{ PS}$$

15. 지름 50 mm, 길이 800 m인 매끈한 원관으로 유량 135 l/min로 기름을 수송할 때 펌프의 압력은 얼마로 해야 하는가? 기름의 비중은 0.92이고, 점성계수는 0.56 poise이다.

【풀이 15】

$$\text{평균 유속 } u = Q / A = (0.135 / 60) / (\pi \times 0.025^2) = 1.146 \text{ m/s}$$

$$\text{점성계수 } \mu = 0.56 \text{ poise} = 0.56 \times (1/98) = 5.714 \times 10^{-3} \text{ kg} \cdot \text{s/m}^2$$

$$\rho = \gamma / g = 1000 \cdot S / g = 1000 \times 0.92 / 9.8 = 93.88 \text{ kg} \cdot \text{s}^2/\text{m}^4$$

$$Re = \rho \cdot D \cdot u / \mu = (93.88 \times 0.05 \times 1.146) / (5.714 \times 10^{-3}) = 941.4 = \text{층류}$$

$$\Delta p = (128 \cdot \mu \cdot L \cdot Q) / (\pi \cdot d^4) = (128 \times 5.714 \times 10^{-3} \times 800 \times 0.315 / 60) / (\pi \times 0.05^4) = 0.419 \times 10^4 \text{ kg/m}^2 = 0.419 \text{ kg/cm}^2$$

16. 내경 15 cm, 길이 1000 m인 원관 속에서 물이 매초 50 l 흐르고 있을 때의 마찰 손실은 얼마인가? 단, 관마찰계수 f = 0.03이다.

【풀이 16】

$$u = Q / A = (4 \times 0.05) / (\pi \times 0.15^2) = 2.83 \text{ m/s}$$

$$h = f \cdot (L / d) \cdot (u^2 / 2g) = 0.03 \times (1000 / 0.15) \times (2.83^2 / 2 \times 9.8) = 81.72 \text{ m}$$

17. 내경 300 mm인 원관으로 유량 90 m³/min을 1 km 떨어진 곳으로 보낼 때 압력 손실수두는 얼마인가? 단, 마찰 손실 계수 f = 0.03이다.

【풀이 17】

Darcy-Weisbach 공식 $h = f \cdot (L / D) \cdot (u^2/2g)$ 에서

평균 속도 $u = Q / A = (90 / 60) / (\pi \times 0.15^2) = 21.2 \text{ m/s}$

$h = f \cdot (L / d) \cdot (u^2/2 \cdot g) = 0.03 \times (1000 / 0.3) \times (21.2^2 / 19.6) = 2293 \text{ m}$

18. 지름 10 cm, 길이 100 m인 수평 원관 속을 10 l/s인 유량으로 기름($\nu = 1 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, $S = 0.8$)을 수송하기 위해서는 관 입구와 관 출구 사이에 얼마의 압력차를 주어야 하는가?

【풀이 18】

평균 유속 $u = Q / A = 1.27 \text{ m/s}$

레이놀즈수 $Re = u \cdot d / \nu = 1.27 \times 0.1 / 1 \times 10^{-4} = 1270 < 2100$, 따라서, $f = 64 / Re = 0.05$

손실 수두 $h_L = f \cdot (L / d) \cdot (u^2 / 2g) = 0.05 \times (100 / 0.1) \times (1.27^2 / 2 \times 9.8) = 4.11 \text{ m}$

\therefore 압력차 $\Delta p = \gamma \cdot h_L = (1000 \times 0.8) \times 4.11 = 3288 \text{ kgf/m}^2$

19. 관마찰계수 $f = 0.022$ 인 지름 50 mm 관에 물이 흐르고 있다. 글로브 밸브($K = 10$)와 표준 T($K = 1.8$)가 결합되어 있을 경우, 관의 상당 길이는 몇 m인가?

【풀이 19】

$h_L = f \cdot (L_e / d) \cdot (u^2 / 2g) = 10 \cdot (u^2 / 2g) + 1.8 \cdot (u^2 / 2g)$

$\therefore L_e = 11.8 \cdot d / f = 11.8 \times 0.05 / 0.022 = 26.8 \text{ m}$

【열전도】

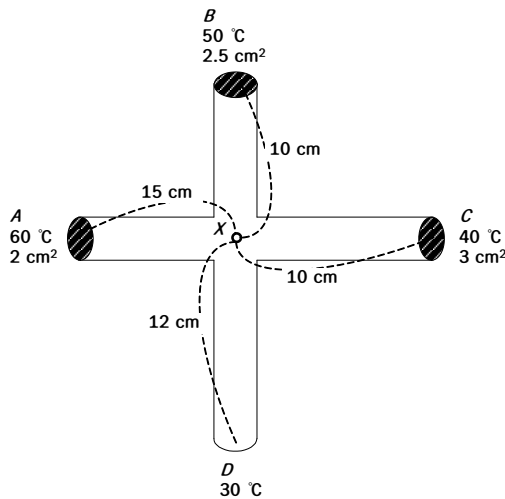
1. 두께 10 mm, 표면적 25 m², 열전도율 0.1 W/m · K인 콘크리트 벽이 있다. 콘크리트 벽 내외 표면에서의 온도차가 35 °C일 때, 콘크리트 벽을 통해 통과되는 열유속 및 방열량은 얼마인가?

【풀이 1】

$$\text{열유속} = \lambda \cdot \Delta T = \frac{0.1}{0.01} \times 35 = 350 \text{ W/m}$$

$$\text{방열량} \quad Q = q \cdot A = 350 \times 25 = 8,750 \text{ W}$$

2. 그림에서와 같이 동일한 재료인 단열재로 구성된 것으로, AX, BX, CX, DX의 길이는 각각 15 cm, 10 cm, 10 cm, 12 cm, AX, BX, CX의 단면적은 각각 2 cm², 2.5 cm², 3 cm²이다. A, B, C, D의 온도는 각각 60 °C, 50 °C, 40 °C, 30 °C로 유지될 때, 단열재 표면으로부터의 방열은 없는 것으로 가정한다. 이와 같이 정상 상태가 유지될 때의 X점에서의 온도가 42 °C였다면, DX의 단면적은 얼마인가?



예제 2

【풀이 2】

A, B, C, D로부터 X로 흐르는 열량 Q , Q_B , Q_C , Q_D 의 대수합은 정상상태에서 X에서 0이 된다.

$$\therefore Q_A + Q_B + Q_C + Q_D = 0$$

여기서, 재료의 열전도율을 λ 라 하고, DX의 단면적을 A_D 라 하면 다음 식이 성립된다.

$$\frac{2 \cdot \lambda(60 - 42)}{15} + \frac{2.5 \cdot \lambda(50 - 42)}{10} + \frac{3 \cdot \lambda(40 - 42)}{10} + \frac{A_D \cdot \lambda(30 - 42)}{10} = 0$$

$$\therefore A_D = 3.8 \text{ cm}^2$$

3. 그림에서와 같이 정상 열전도 과정에서 열유속과 경계층 온도 T_2 , T_3 를 계산하시오.

【풀이 3】

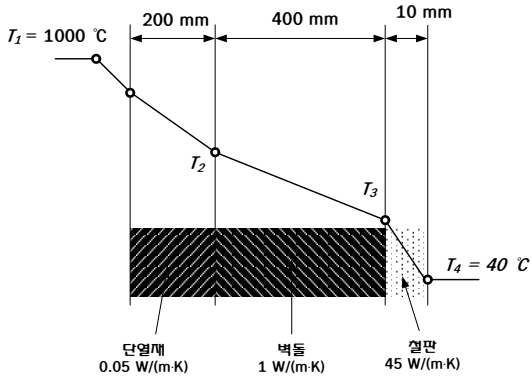
식 (3.13)을 이용하여

$$= \frac{T_1 - T_4}{\frac{1}{\lambda} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3}} = \frac{1000 - 40}{\frac{0.5}{0.05} + \frac{0.4}{1} + \frac{0.01}{45}} = 218 \text{ W/m}^2$$

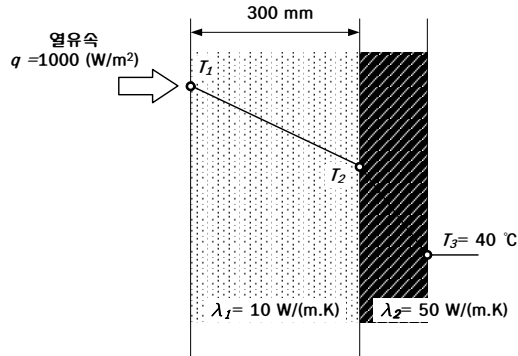
식 (3.11)을 이용하면

$$T_2 = T_1 - \frac{q \cdot L_1}{\lambda_1} = 1000 - \frac{218 \times 0.2}{0.05} = 128 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_3 = T_2 - \frac{q \cdot L_2}{\lambda_2} = 128 - \frac{218 \times 0.4}{0.05} = 40.8 \text{ }^{\circ}\text{C}$$



예제 3



예제 4

4. 그림과 같은 정상 열전도에서의 온도 T_1 , T_2 의 온도를 계산하시오.

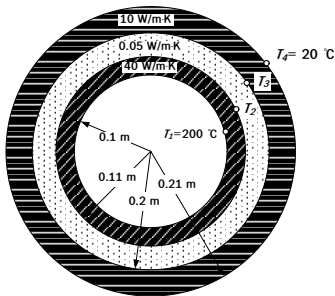
【풀이 4】

식 (3.15)를 이용하여 온도를 계산하면 다음과 같다.

$$T_2 = 40 + \frac{1000 \times 0.005}{50} = 40.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$T_1 = 40.1 + \frac{1000 \times 0.003}{10} = 43.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$$

5. 그림과 같은 적층 원통의 정상 열전도 과정에서 단위 길이당의 열유량 Q' 과 경계층의 온도 T_2 , T_3 을 계산하시오.



예제 5

【풀이 5】

식 (3.20)을 이용하여 계산하면

$$= \frac{1}{40} \ln \frac{0.11}{0.1} + \frac{200-20}{0.05} \ln \left(\frac{0.2}{0.11} \right) + \frac{1}{10} \ln \left(\frac{0.21}{0.2} \right)$$

$$= 94.5 \text{ W/m}$$

식 (3.17)을 이용하여 각각의 온도를 계산하면 다음과 같다.

$$T = T_1 \frac{Q'}{2\pi\lambda_1} \times \ln \frac{r_2}{r_1} = 200 - \frac{94.5}{2\pi \times 40} \times \ln \left(\frac{0.11}{0.1} \right) = 199.96 \text{ } ^\circ\text{C}$$

$$T_3 = T_2 \frac{Q'}{2\pi\lambda_2} \times \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) = 199.96 - \frac{94.5}{2\pi \times 0.05} \times \ln \left(\frac{0.2}{0.11} \right) = 20.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

6. 100 °C로 일정하게 온도가 유지되고 있는 반무한 물체의 표면온도가 10 °C로 저하되었다. 표면으로부터 10 cm 떨어진 장소의 10분후의 온도는 얼마인가? 단, 이 물체의 열확산율은 4 mm²/s이다.

【풀이 6】

식 (3.24)으로부터 10분 후에 온도 변화가 있는 두께는

$$\delta = \sqrt{12 \cdot a \cdot t} = \sqrt{12 \times 4 \times 10^{-6} \times 10 \times 60} = 0.170 \text{ m} = 17 \text{ cm}$$

$x = 0.1 \text{ m} < \delta = 0.17 \text{ m}$ 이므로 식 (3.25)을 이용하여

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \cdot \left[-\left(\frac{x}{\delta} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{x}{\delta} \right) \right] = 10 + (100 - 10) \cdot \left[-\left(\frac{0.1}{0.17} \right)^2 + 2 \cdot \left(\frac{0.1}{0.17} \right) \right] = 84.7 \text{ } ^\circ\text{C}$$

7. 100 °C로 일정하게 온도가 유지되고 있는 두께 20 cm의 평판 양면의 온도가 10 °C로 저하되었다. 평판의 중심에서 20 분후의 온도는 얼마인가? 단, 이 물체의 열확산율은 4 mm²/s이다.

【풀이 7】

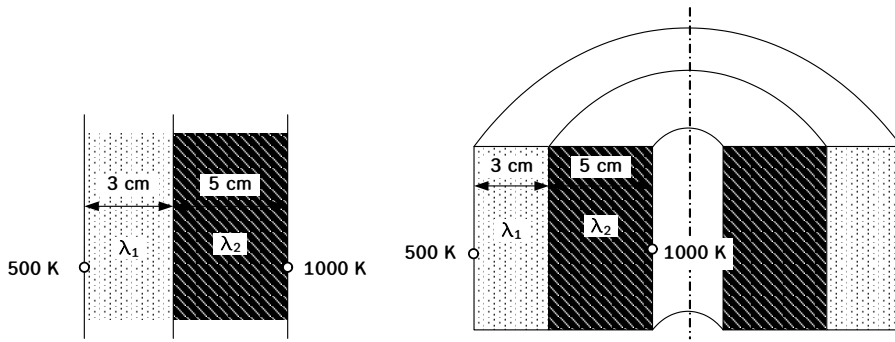
$$0.05 \frac{L^2}{\alpha} = 0.05 \times \frac{0.2^2}{4 \times 10^{-6}} = 500 \text{ s}$$

$t = 20 \times 60 = 1,200 \text{ s} > 500 \text{ s}$ 이므로 식 (3.26)을 이용하면

$$T = T_0 + (T_1 - T_0) \times \frac{4}{\pi} \cdot e^{-\frac{\pi^2 \alpha t}{L^2}} \cdot \sin \frac{\pi \cdot x}{L}$$

$$= 10 + (100 - 10) \times \frac{4}{\pi} \times e^{-\frac{\pi^2 \times 4 \times 10^{-6} \times 20 \times 60}{0.2^2}} \times \sin \frac{\pi \times 0.1}{0.2} = 454.1 \text{ } ^\circ\text{C}$$

8. 동일한 두께의 다층 평판과 다층 원판에서의 열전도율을 비교하기 위해 그림 (a)와 같이 고내벽 온도 1,000 K의 내화 벽돌(두께 5 cm, 열전도율 λ_1)이 있고, 그 외측에 보온재(두께 3 cm, 열전도율 λ_2)을 시공하였다. 보온재의 외벽 온도는 500 K이다. 또한 그림 (b)와 같이 내벽 온도 1,000 K인 원통 내화 벽돌(내경 4 cm, 외경 14 cm, 열전도율 λ_1)이 있고, 그 외측에 보온재(두께 3 cm, 열전도율 λ_2)을 시공하였다. 보온재의 외벽 온도는 500 K이다. $\lambda_1 = 2 \cdot \lambda_2$ 일 때, 각각의 내화 벽돌 외부의 온도는 얼마인가? 단, 내화 벽돌 외벽과 보온재 사이에서의 열저항은 없고, 내화 벽돌 내벽 온도 및 보온재 외벽 온도는 일정한 것으로 가정한다.



예제 8

【풀이 8】

(a)의 경우 : 열유속
$$= \lambda_1 \cdot (T_1 - T) = \lambda_2 \cdot (T - T_2)$$

$\lambda_1 = 2 \cdot \lambda_2$ 를 대입하면
$$\frac{2 \times (1000 - T)}{5} = \frac{T - 500}{3}$$

$\therefore T = 773 \text{ K}$

(b)의 경우 : 단위 길이당 전열량
$$\frac{Q}{L} = \frac{2\pi\lambda_1 \cdot (T_1 - T)}{\ln \frac{r}{r_1}} = \frac{2\pi\lambda_2 \cdot (T - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r}}$$

$\lambda_1 = 2 \cdot \lambda_2$ 를 대입하면
$$\frac{2 \times (1000 - T)}{\ln \frac{7}{2}} = \frac{T - 500}{\ln \frac{10}{7}}$$

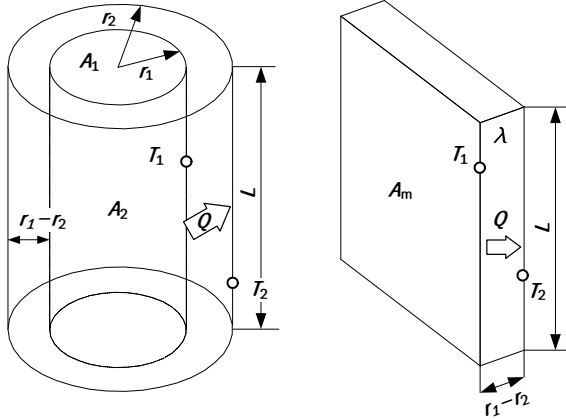
$\therefore T = 681.4 \text{ K}$

9. 공기 중에 놓여진 원관의 내부를 과열증기가 흐르고 있다. 이 원관(외경 110 mm, 길이 30 m)에서의 열손실을 감소시키기 위해서 원관의 외측에 단열재(열전도율 0.12 W/m · K)를 5 cm 두께로 보온하고자 한다. 이 때, 보온층의 내외측의 온도가 각각 100 °C 및 30 °C로 유지되고 있다면, 보온재의 표면으로부터 단위 시간당 손실되는 열량은 얼마인가?

【풀이 9】

$$Q = \frac{2\pi\lambda L \cdot (T_1 - T_2)}{\ln \frac{d_2}{d_1}} = \frac{2\pi \times 0.12 \times 30 \times (100 - 30)}{\ln \frac{105}{55}} = 2.45 \text{ kW}$$

10. 그림과 같이 반내경 r_1 , 반외경 r_2 , 길이 L 인 원통벽의 내측 및 외측의 면적 및 온도를 각각 A_1 , A_2 및 T_1 , T_2 이다. 원통벽을 열전도 형식으로 이동하는 열량 Q 를 산출하는 과정에서 두께가 $r_2 - r_1$ 이면서 높이가 L 인 평형 평판벽을 통과하는 열량으로 환산하여 산출하기 위해서는 평행 평판벽의 표면적 A_m 의 크기를 A_1 과 A_2 를 이용하여 나타내시오.



예제 10

【풀이 10】

$2\pi \cdot r_1 \cdot L$, $A_2 = 2\pi \cdot r_2 \cdot L$ 에서

$$A_2 - A_1 = 2 \cdot \pi \cdot L \cdot (r_2 - r_1)$$

$$\therefore r_2 - r_1 = \frac{A_2 - A_1}{2 \cdot \pi \cdot L} \quad ①$$

$$\text{또한 } \frac{r_2}{r_1} = \frac{A_2}{A_1} \quad ②$$

$$\text{원통벽을 열전도 형식으로 이동하는 열량 } Q_1 = \frac{2\pi\lambda \cdot L \cdot (T_1 - T_2)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad ③$$

$$\text{평판벽을 열전도 형식으로 이동하는 열량 } Q_2 = \frac{\lambda \cdot (T_1 - T_2) \cdot A_m}{r_2 - r_1} \quad ④$$

여기서, $Q_1 = Q_2$ 일 때, 식 ③과 식 ④에 의해

$$\frac{2\pi L}{\ln \frac{r_2}{r_1}} = \frac{A_m}{r_2 - r_1} \quad ⑤$$

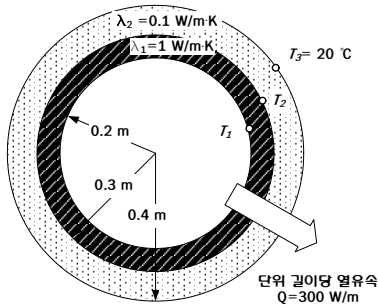
$$\therefore A_m = \frac{2\pi L \cdot (r_2 - r_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}} \quad ⑥$$

식 ⑥에 식 ① 및 식 ②를 대입하면 다음과 같다.

$$A_m = \frac{2\pi L \cdot \frac{A_2 - A_1}{2\pi L}}{\ln \frac{A_2}{A_1}} = \frac{A_2 - A_1}{\ln \frac{A_2}{A_1}} \quad ⑦$$

식 ⑦의 A_m 을 대수 평균 면적(logarithmic-mean area)라고 한다.

11. 그림과 같이 내부 발열 300 W/m 의 정상 열전도 상태에서 경계층 온도 T_1 , T_2 를 계산하시오.



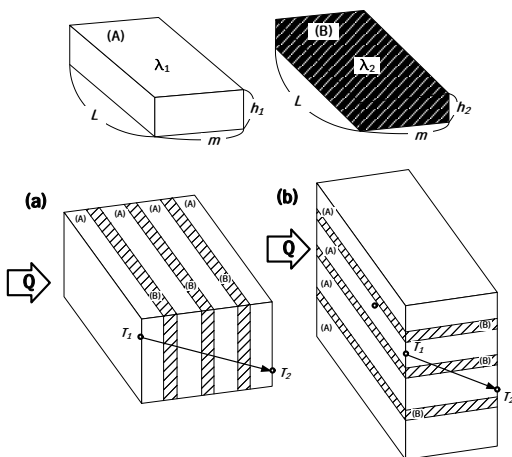
예제 11

【풀이 11】

식 (3.22)를 이용하여 계산하면

$$\begin{aligned}
 & T_3 + \frac{Q'}{2\pi\lambda_2} \cdot \ln \frac{r_3}{r_2} \\
 &= 20 + \frac{300}{2\pi \times 0.1} \times \ln \frac{0.4}{0.3} = 157 \text{ } ^\circ\text{C} \\
 & T_1 = T_3 + \frac{Q'}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{\lambda_1} \cdot \ln \left(\frac{r_2}{r_1} \right) + \frac{1}{\lambda_2} \cdot \ln \left(\frac{r_3}{r_2} \right) \right] \\
 &= 20 + \frac{300}{2\pi} \times \left[\frac{1}{1} \cdot \ln \left(\frac{0.3}{0.2} \right) + \frac{1}{0.1} \cdot \ln \left(\frac{0.4}{0.3} \right) \right] = 177 \text{ } ^\circ\text{C}
 \end{aligned}$$

12. 그림과 같이 가로, 세로의 길이는 동일하나 두께가 다른 2종류의 단열재 A, B가 있다. 각 단열재의 열전도율을 각각 λ_1 , λ_2 이고, 이 단열재를 이용하여 그림 (a), (b)와 같이 4장의 단열재 A와 3장의 단열재 B를 이용하여 다층 평면벽을 구성하였다. 다층 평면벽의 내외 온도차가 T_1 , T_2 (, $T_1 > T_2$)일 때, 다층 평면벽 (a), (b)의 단열성능을 비교하기 경우, 어떤 쪽의 다층 평면벽이 우수한지 비교하시오.



예제 12

【풀이 12】

(a)의 경우

$$\text{벽의 두께} \quad \cdot h + 3 \cdot h_2 \quad \text{①}$$

$$\text{열유속} \quad q = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \frac{h_i}{\lambda_i}} = \frac{T_1 - T_2}{4 \times \frac{h_1}{\lambda_1} + 3 \times \frac{h_2}{\lambda_2}} \quad \text{②}$$

겉보기 열전도율을 λ 라고 하면

$$q = \frac{(T_1 - T_2) \cdot \lambda}{4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2} \quad \text{③}$$

식 ②, ③을 정리하면 다음과 같다.

$$\frac{1}{4 \cdot h_1 + \frac{3 \cdot h_2}{\lambda_2}} = \frac{\lambda}{4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2} \quad \text{④}$$

$$\therefore \lambda = \frac{\lambda_1 \cdot \lambda_2 \cdot (4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2)}{4 \cdot h_1 \cdot \lambda_2 + 3 \cdot h_2 \cdot \lambda_1} \quad \text{⑤}$$

(b)의 경우

$$\text{벽 A만을 통과하는 열유속} \quad q = \frac{\lambda_1}{m} \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{⑥}$$

$$\text{벽 B만을 통과하는 열유속} \quad q_B = \frac{\lambda_2}{m} \cdot (T_1 - T_2) \quad \text{⑦}$$

면적 $(4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2) \cdot L$ 을 통과하는 열량 Q는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q &= q_A \cdot 4(h_1 \cdot L) + q_B \cdot 3 \cdot (h_2 \cdot L) \\ &= \left(\frac{4 \cdot \lambda_1 \cdot h_1 \cdot L}{m} + \frac{3 \cdot \lambda_2 \cdot h_2 \cdot L}{m} \right) \cdot (T_1 - T_2) \end{aligned} \quad \text{⑧}$$

식 ⑧에 식 ⑥, ⑦을 대입하여 정리하면 다음과 같다.

$$Q = (T_1 - T_2) \cdot L \cdot \left(\frac{4 \cdot \lambda_1 \cdot h_1 + 3 \cdot \lambda_2 \cdot h_2}{m} \right) \quad \text{⑨}$$

겉보기 열전도율을 λ 라고 하면

$$Q = \frac{\lambda}{m} \cdot (T_1 - T_2) \times (4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2) \cdot L \quad \text{⑩}$$

식 ⑨와 식 ⑩을 치환시켜 정리하면 다음과 같다.

$$4 \cdot \lambda_1 \cdot h_1 + 3 \cdot \lambda_2 \cdot h_2 = \lambda \cdot (4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2) \quad \text{⑪}$$

$$\therefore \lambda = \frac{4 \cdot \lambda_1 \cdot h_1 + 3 \cdot \lambda_2 \cdot h_2}{4 \cdot h_1 + 3 \cdot h_2} \quad \text{⑫}$$

【대류】

1. 표면 온도 28 °C인 평판을 따라 온도가 45 °C인 물이 흐르고 있다. 열전달율이 450 W/(m² · K)일 때, 열유속은 얼마인가?

【풀이 1】

$$= h \cdot (T_w - T_f) = 450 \times (45 - 28) = 7.65 \text{ kW/m}^2$$

2. 5 mm의 철판, 60 mm의 발포 스티로폼, 10 mm의 염화비닐의 적층 구조로 제작된 수조에 유체가 담겨져 있다. 유체와 철판, 염화비닐과 공기 사이의 열전달율이 각각 300 W/(m² · K), 8 W/(m² · K)이고, 유체 온도 60 °C, 대기온도가 20 °C일 때, 적층 평판을 통과하는 열유속은 얼마인가? 단, 철판, 발포 스티로폼, 염화비닐의 열전도율이 각각 60 W/(m · K), 0.03 W/(m · K), 0.5 W/(m · K)이다.

【풀이 2】

$$q = \frac{(T_A - T_B)}{\frac{1}{\kappa_A} + \frac{L_1}{\lambda_1} + \frac{L_2}{\lambda_2} + \frac{L_3}{\lambda_3} + \frac{1}{\kappa_B}} = \frac{60 - 20}{\frac{1}{300} + \frac{0.005}{60} + \frac{0.06}{0.03} + \frac{0.01}{0.5} + \frac{1}{8}} = 18.6 \text{ W/m}^2$$

3. 유속 10 m/s의 층류 흐름의 공기 흐름 중에 흐름과 평행되게 평판이 놓여져 있다. 한쪽 끝에서 60 mm에 있는 국소 열전달율과 한쪽 끝에서 60 mm되는 위치까지의 평균 열전달율을 구하고자 한다. 단, 공기 흐름의 무한 위치까지의 온도는 $T_\infty = 20 \text{ °C}$, 평판 표면 온도는 80 °C, 50 °C 공기의 물성치는 다음과 같다. 비열 $C_p = 1.008 \text{ kJ/(kg · K)}$, 점성계수 $\mu = 19.3 \times 10^{-6} \text{ Pa · s}$, 열전도율 $\lambda = 2.80 \times 10^{-2} \text{ W/(m · K)}$, 밀도 $\rho = 1.093 \text{ kg/m}^3$

【풀이 3】

열전달율을 계산하기 위해서는 Nu 수를 계산해야 하며, 이를 위해 Re 수와 Pr 수를 계산해야 한다. 대표 길이는 판의 한쪽 끝에서 표면을 따라 거리, 대표 온도는 표면 온도와 유체 온도의 평균값이기 때문에 한쪽 끝에서 60 mm되는 위치의 Re 수는 다음과 같다.

$$Re = \frac{u \cdot x}{\nu} = \frac{\rho \cdot u \cdot x}{\mu} = \frac{1.093 \times 10 \times 0.06}{19.3 \times 10^{-6}} = 3.40 \times 10^4$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{\mu}{\rho \cdot C_p} = \frac{C_p \cdot \mu}{\kappa} = \frac{1.008 \times 10^3 \times 19.3 \times 10^{-6}}{2.80 \times 10^{-2}} = 0.695$$

$$\text{식 (4.32)에 의해 } Nu_x = \frac{h_x \cdot x}{\kappa} = 0.332 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2} = 54.2$$

$$\text{국소 열전달율 } h_x = \frac{Nu_x \cdot \kappa}{x} = \frac{54.2 \times 2.80 \times 10^{-2}}{0.06} = 25.3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

$$\text{식 (4.34)에 의해 } Nu_m = \frac{h_m \cdot x}{\kappa} = 0.664 \cdot Pr^{1/3} \cdot Re^{1/2} = 108.4$$

$$\text{평균 열전달율 } h_m = \frac{Nu_m \cdot \kappa}{x} = 50.6 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

4. 내경 $d = 0.01 \text{ m}$, 길이 $L = 1 \text{ m}$, 온도 $T = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 로 유지되는 원관 내부로 온도 $T_m = 20 \text{ }^\circ\text{C}$, 유속 $u = 1 \text{ m/s}$ 인 공기가 흐르고 있다. 이 때, 열전달율은 얼마인가. 또한 물을 흘리는 경우의 열전달율은 얼마인가? 단, 공기의 동점성계수는 $0.175 \times 10^{-4} \text{ m}^2/\text{s}$, 물의 동점성계수는 $0.668 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ 이다.

【풀이 4】

(1) 공기의 경우

$$Re_d = \frac{u \cdot d_1}{\nu_1} = \frac{1 \times 0.01}{0.175 \times 10^{-4}} = 571$$

원관내 임계 레이놀즈수 2,300보다 낮기 때문에 층류이므로

$$= 3.65 + \frac{0.190 \cdot [Re_d \cdot Pr \cdot (d/L)]^{4/5}}{1 + 0.117 \cdot [Re_d \cdot Pr \cdot (d/L)]^{7/15}} = 3.65 \cdot \frac{0.190 \cdot \left[571 \times 0.708 \times \frac{0.01}{0.1}\right]^{4/5}}{1 + 0.117 \cdot \left[571 \times 0.708 \times \frac{0.01}{1}\right]^{7/15}} = 4.12$$

$$d_m = \frac{\lambda}{d} \cdot Nu_d \cdot \frac{0.0272}{0.01} \times 4.12 = 11.25 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

(2) 물의 경우

$$Re_d = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{1 \times 0.01}{0.668 \times 10^{-6}} = 15,000$$

난류이므로

$$Nu_m = 0.023 \times Re_d^{0.8} \cdot Pr^{1/3} = 0.023 \times 15000^{0.8} \times 4.41^{1/3} = 82.6$$

$$h_m = \frac{\lambda}{d} \cdot Nu_m = \frac{0.628}{0.01} \times 82.6 = 5,180 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

유체를 물로 하면 열전달율은 약 500배 증가한다.

5. 유속 40 cm/s 인 수중에 흐름과 직각 방향으로 외경 35 mm 인 직관이 있다. 관 상부에서의 수온이 $25 \text{ }^\circ\text{C}$, 관 외면의 평균 온도가 $75 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때, 관 외면의 열전달율은 얼마인가? 단, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 물의 열전달율은 $0.642 \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$, Pr 수는 3.57 이다.

【풀이 5】

대표 길이는 관경, 대표 온도는 유체와 관 외면의 평균 온도이기 때문에 이에 대한 동점성계수 및 점성계수는 다음과 같다.

$$\nu = 0.554 \times 10^{-6} \text{ (m}^2/\text{s}), \mu = 0.548 \times 10^{-3} \text{ (Pa} \cdot \text{s)}$$

$$Re = \frac{u \cdot d}{\nu} = \frac{0.4 \times 0.035}{0.554 \times 10^{-6}} = 2.53 \times 10^4$$

Re 수가 $4,000 < Re < 40,000$ 이므로 식 (4.47)은 표 4.4에 의해

$$Nu_m = 0.193 \cdot Re^{0.618} \cdot Pr^{1/3} = 0.193 \times (2.53 \times 10^4)^{0.618} \times 3.57^{1/3} = 155.2$$

$$\text{따라서, 열전달율은 다음과 같다. } h_m = \frac{Nu_m \cdot d}{\kappa} = \frac{155.2 \times 0.642}{0.035} = 2.85 \times 10^3 \text{ W/(m}^2 \cdot \text{K)}$$

6. 표면 온도 $80 \text{ }^\circ\text{C}$, 직경 20 cm 인 관이 실내에 수평으로 놓여져 있다. 실온이 $20 \text{ }^\circ\text{C}$ 일 때, 관 표면으로부터 자연 대류에 의한 방열량은 단위 길이당 얼마인가? 단, 온도 $50 \text{ }^\circ\text{C}$ 에서의 공기 밀도는 $\rho = 1,093 \text{ kg/}$, 비열 $C = 1.008 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{K)}$, 열전도율 $\lambda = 2.80 \times 10^{-2} \text{ W/(m} \cdot \text{K)}$ 이다.

【풀이 6】

우선 $\nu \cdot Pr$ 을 계산하여 층류인지 난류인지를 확인한다. 기체의 체적 팽창율 β 는 절대 온도의 역수이기 때문에

$$\beta = \frac{1}{T} = \frac{1}{323} = 3.096 \times 10^{-3} \text{ (1/K)}$$

대표길이는 관경이기 때문에

$$\begin{aligned} Gr &= \frac{g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot \Delta T}{\nu^3} = \frac{g \cdot d^3 \cdot \beta \cdot (T - T_A) \cdot \rho^2}{\mu^2} \\ &= \frac{9.81 \times 0.2^3 \times 3.096 \times 10^{-3} \times (80 - 20) \times 1093}{(19.3 \times 10^{-6})^2} = 4.676 \times 10^7 \end{aligned}$$

$$Pr = \frac{\nu}{\alpha} = \frac{C_P \cdot \mu}{\kappa} = \frac{1.008 \times 10^3 \times 19.3 \times 10^{-6}}{2.80 \times 10^{-2}} = 0.695$$

$$Gr \cdot Pr = 4.676 \times 10^7 \times 0.695 = 3.25 \times 10^7 < 10^8$$

따라서, 경계층은 층류이기 때문에 식 (4.54)에 의해

$$Nu_m = 0.53 \cdot (Gr \cdot Pr)^{1/4} = 0.53 \times (3.25 \times 10^7)^{1/4} = 40.02$$

$$h_m = \frac{Nu_m \cdot \kappa}{d} = \frac{40.02 \times 2.80 \times 10^{-2}}{0.23} = 5.60 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

단위 길이당 방열량은 다음과 같다.

$$q = h_m \cdot A \cdot (T_W - T_A) = h_m \cdot \pi \cdot d \cdot (T_W - T_A) = 5.60 \times \pi \times 0.2 \times (80 - 20) = 211 \text{ (W/m)}$$

7. 바닥 두께 2 mm인 알루미늄 평판으로 제작된 그릇으로 물을 끓이려고 할 때, 불꽃과 닿는 바닥 면의 표면 온도를 구하시오. 단, 불꽃의 온도는 1,200 °C, 물의 온도는 99 °C, 알루미늄의 열전도율은 240 W/m · K, 그릇과 불꽃 사이의 열전달율은 200 W/m · K, 그릇과 끓는 물 사이의 열전달율은 10,000 W/m² · K이다.

【풀이 7】

바닥 판을 통과하는 열유속을 열관류의 계산 방법으로 고려한다. 또한 불꽃의 열전달율을 구하면 표면 온도를 계산할 수 있다. 그릇의 바닥을 통과하는 열유속은 식 (7.3)에 의해

$$q = T_A - T_B = \frac{1}{h_A} + \frac{L}{\lambda} + \frac{1}{h_B} = \frac{1,200 - 99}{\frac{1}{10000} + \frac{0.002}{240} + \frac{1}{200}} = 2.16 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

불꽃측의 열전달은

$$q = h \cdot (T_A - T_W)$$

$$T_W - T_A = \frac{q}{h} = 1,200 - \frac{2.16 \times 10^5}{200} = 120 \text{ }^\circ\text{C}$$

8. 벽면 온도가 $T_W = 60 \text{ }^\circ\text{C}$ 이고, 길이 $L = 0.1 \text{ m}$ 인 수직 평판이 있다. 여기에 팬을 작동시켜 평판을 따라 냉각시키고자 하는 경우의 열전달율과 팬을 정지시킨 경우의 열전달율은 얼마인가? 단, 풍속 $u = 1 \text{ m/s}$, 공기 온도 $T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ 이다.

【풀이 8】

(1) 강제 대류의 열전달율

팬이 작동되고 있을 경우는 강제 대류이다. 공기의 물성치는 공기 온도와 벽면 온도의 산술 평균 온도차

$(T_w + T_\infty) / 2 = (20 + 60) / 2 = 40 \text{ } ^\circ\text{C}$ 인 경우에 대해 정리하면, 동점성계수 $\nu = 0.175 \times 10^{-4} \text{ (m}^2/\text{s)}$, 열전도율 $\lambda = 0.0272 \text{ (W/m} \cdot \text{K)}$, 프란틀수 $Pr = 0.708$ 이 된다.

$$\text{레이놀즈수를 계산하면 } Re_L = \frac{u \cdot L}{\nu} = \frac{1 \times 0.1}{0.175 \times 10^{-4}} = 5,710$$

평판인 경우, 임계 레이놀즈수 3.2×10^5 보다 낮기 때문에 층류이다. 따라서, 이를 정리하면 다음과 같다.

$$Nu_m = 0.664 \cdot Re_L^{1/2} \cdot Pr^{1/3} = 0.664 \times 5,710^{1/2} \cdot 0.708^{1/3} = 44.7$$

$$h_m = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu_m = \frac{0.0272}{0.1} \times 44.7 = 12.2 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

(2) 자연 대류의 열전달을

팬이 정지되어 있는 경우에는 자연 대류이므로 Gr_L 을 계산하면

$$Gr_L = L^3 \cdot g \cdot \beta \cdot (T_w - T_\infty) / \nu^2 = \frac{0.1^3 \times 9.81 \times (1/313.15) \times (60 - 20)}{(0.175 \times 10^{-4})^2} = 4.09 \times 10^6$$

$$Gr_L \cdot Pr = 4.09 \times 10^6 \times 0.708 = 2.90 \times 10^6$$

이는 10^9 보다 작기 때문에 층류이다.

$$Nu_m = 0.56 \cdot (Gr_L \cdot Pr)^{1/4} = 0.56 \times (4.09 \times 10^6 \times 0.708)^{1/4} = 23.1$$

$$h_m = \frac{\lambda}{L} \cdot Nu_m = \frac{0.0272}{0.1} \times 23.1 = 6.28 \text{ (W/m}^2 \cdot \text{K)}$$

팬이 정지함에 따라 열전달율은 강제 대류인 경우에 비해 약 50 % 정도 감소된다는 것을 알 수 있다.

【복사】

1. 연소 가스실의 불꽃 평균 온도가 1,000 °C일 때, 불꽃 연소 온도를 몇 °C로 상승시키면 불꽃으로부터 방사 전열량이 2배가 되겠는가? 단, 주위 연소실 벽의 온도는 400 °C로 화염의 방사율 및 연소실 벽의 방사율은 일정한 것으로 가정한다.

【풀이 1】

연소 가스실 및 연소실 벽의 평균 온도를 각각 T_1 (K)라고 할 때, 피연물의 단위 면적당 단위 시간의 방사 수열량 Q 는 다음과 같다.

$$Q = \alpha \cdot \left[\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ (W/m}^2\text{)} \quad ①$$

α 는 불꽃, 피연물의 방사율이나 표면 상태와 관련된 정수로서 온도와는 상관없이 일정한 것으로 가정한다.

불꽃 온도를 T_1 에서 T_1' 으로 상승시켜 방사 전열량이 2배가 된다고 가정하면

$$2 \cdot Q = \alpha \cdot \left[\left(\frac{T_1'}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \text{ (W/m}^2\text{)} \quad ②$$

따라서, 식 ① 및 식 ②에 의해

$$\left(\frac{T_1}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 = \frac{1}{2} \cdot \left[\left(\frac{T_1'}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_2}{100} \right)^4 \right] \quad ③$$

$T_1 = 1000 + 273.15$, $T_2 = 400 + 273.15$ 를 대입하면

$$T_1' = 1449 \text{ K} = 1226 \text{ }^\circ\text{C}$$

따라서, $1226 - 1000 = 226 \text{ }^\circ\text{C}$ 만큼 상승시키면 된다.

2. 소성로의 고내 온도가 1300 °C일 때, 석탄이 소성된다. 소성로에는 직경 10 cm의 관찰구를 통해 고내의 연소 상태를 확인할 수 있도록 되어 있다. 소성로 외부의 온도 20 °C에서 관찰구를 열어 놓은 경우, 관찰구를 통해 방사되는 손실 열량은 얼마인가?

【풀이 2】

이와 같은 고온의 고내로부터 방사는 완전 흑체의 방사로 가정할 수 있기 때문에 관찰구의 방사율은 $\epsilon = 1$ 로 가정할 수 있다.

따라서, 주위 온도 20 °C로부터 고내 내부로 전달되는 열량은 다음과 같다.

$$Q = 5.67 \times 1 \times \left[\left(\frac{1300 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273.15}{100} \right)^4 \right] \times \pi \times \left(\frac{0.1}{2} \right)^2 = 2724 \text{ W}$$

3. 1000 °C인 가열로 내에 길이 1 m, 직경 2 cm의 철봉을 투입한다. 철봉의 초기 온도가 20 °C에서 500 °C로 될 때까지의 시간은 얼마가 걸리겠는가? 단, 철의 밀도는 $7.86 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 비열은 $0.640 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ 이다.

【풀이 3】

1000 °C인 가열로 내에 투입된 공업 재료는 방사열 에너지를 수수하여 온도가 상승되는 것으로 고려할 수 있다.

$$\text{철봉의 표면적 } A = \pi \times 0.02 \times 1 + 2 \cdot \pi \cdot \left(\frac{0.02}{2} \right)^2 = 0.0635 \text{ m}^2$$

1000 °C인 철봉의 방사율은 표 7.1에서와 0.14 ~ 0.38이므로 평균값 0.26을 방사율로 가정하였다. 따라서, 고 내에 투입된 철봉에서의 수열량 Q' 는 다음과 같다.

$$Q' = 5.67 \times 0.26 \left[\left(\frac{1000 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{20 + 273.15}{100} \right)^4 \right] \times 0.0635 = 2453 \text{ W}$$

500 °C된 경우의 방사에 의한 수열량 Q'' 는 다음과 같다.

$$Q'' = 5.67 \times 0.26 \left[\left(\frac{1000 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{500 + 273.15}{100} \right)^4 \right] \times 0.0635 = 2125 \text{ W}$$

따라서, 이러한 과정의 평균 수열량은 다음과 같다.

$$Q = \frac{Q' + Q''}{2} = \frac{2453 + 2125}{2} = 2289 \text{ W}$$

$$\text{철봉의 열용량 } \pi \times \left(\frac{0.02}{2} \right)^2 \times 1 \times 7.86 \times 10^3 \times 0.640 = 1580 \text{ J/K}$$

따라서, 철봉이 500 °C될 때 까지의 시간을 t 라 하면 다음 식이 성립된다.

$$1580 \cdot (500 - 20) = 2289 \times t$$

$$\therefore t = 331 \text{ sec} = 5.5 \text{ min}$$

4. 방사율 0.9, 온도 1200 °C인 평면벽과 방사율 0.8, 온도 120 °C인 평면벽이 매우 좁은 간격으로 평행되게 놓여져 있다. 두 평판의 면적이 각각 10 m²일 때, 하루에 얼마만큼의 열량이 방사에 의해 전달되는가?

【풀이 4】

방사에 의한 전열량을 Q (kW/day)라고 하면 다음과 같다.

$$Q = \frac{1}{\frac{1}{0.9} + \frac{1}{0.8} - 1} \left[\left(\frac{1200 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{120 + 273.15}{100} \right)^4 \right] \times 10$$

$$= 1.95 \times 10^3 \text{ kW/s} = 1.68 \times 10^8 \text{ kW/day}$$

5. 177 °C의 온도로 물을 끓이고 있는 보일러가 있다. 보일러 바닥은 불꽃 바닥과 접해 있고, 불꽃 바닥 온도는 1327 °C이다. 이러한 상태에서 보일러의 전흡수 열량의 85 %는 방사에 의해, 15 %는 대류에 의해 이루어지고 있다. 보일러 내면에 평균 두께 3 mm인 스케일이 일정하게 부착되어 있다고 하면 보일러의 증발 능력은 얼마나 저하되겠는가? 단, 보일러의 수열면 방사율은 0.9, 스케일의 열전도율은 1.74 kW/m · K이다.

【풀이 5】

보일러의 전흡수열량 Q 는 방사에 의한 열량 Q_r 과 열전달에 의한 전열량 Q_c 의 합과 동일하므로 스케일 부착 전후의 상태는 첨자 1, 2, 불꽃 바닥 및 보일러 벽의 온도를 T_a , T_w 로 표시한다.

불꽃 바닥면이 보일러의 하면을 완전히 뒤덮고 있다고 하면 형태계수는 1로 고려하면 된다. 따라서, 스케일이 부착되기 전의 단위 면적당 단위 시간의 방사 전열량 Q_1 은 다음과 같다.

$$Q_{r1} = \epsilon \times 5.67 \cdot \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_1}{100} \right)^4 \right]$$

$$= 0.9 \times 5.67 \cdot \left[\left(\frac{1327 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{177 + 273.15}{100} \right)^4 \right] = 3.32 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

$$Q_{c1} = \frac{15}{85} \cdot Q_r = 0.586 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

따라서,

$$Q_{r1} + Q_{c1} = 3.32 \times 10^5 + 0.586 \times 10^5 = 3.906 \times 10^5$$

이 때, 불꽃으로부터 보일러 바닥으로의 열전달을 h 라 하고, 보일러 바닥면의 온도를 177°C 라 가정하면

$$h \cdot (T_g - T_{w1}) = Q_{c1}$$

$$\therefore h = \frac{Q_{c1}}{T_g - T_{w1}} = \frac{0.586 \times 10^5}{1327 - 177} = 50.96 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

스케일이 부착된 후의 전흡수 열량을 Q_2 라 하고, 보일러 벽면 온도를 T_2 , 스케일의 두께 및 열전도율을 L , λ 라 하고, 이 때 불꽃으로부터 보일러 바닥면으로의 열전달을 h 는 변화되지 않는 것으로 가정하면 다음과 같다.

$$Q_2 = h \cdot (T_g - T_2) + \epsilon \cdot 5.67 \cdot \left[\left(\frac{T_g}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2}}{100} \right)^4 \right] = \frac{\lambda}{L} \cdot (T_{w2} - 177)$$

$$\therefore 50.96 \cdot (1327 - T_{w2}) + 0.9 \times 5.67 \cdot \left[\left(\frac{1327 + 273.15}{100} \right)^4 - \left(\frac{T_{w2} - 273.15}{100} \right)^4 \right] = \frac{1.74}{0.003} \cdot (T_{w2} - 177)$$

이 식은 T_{w2} 에 대해 4차 방정식이므로 풀 수 없다. 따라서, T_{w2} 를 적당하게 가정하여 이 식을 만족할 때까지 Try and Error를 반복하면 $T_{w2} = 721^\circ\text{C}$ 이 된다.

$$\therefore Q_2 = \frac{1.74}{0.003} \cdot (721 - 177) = 3.16 \times 10^5 \text{ W/m}^2$$

따라서, 증발 능력은 다음과 같다.

$$\frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} = \frac{3.906 \times 10^5 - 3.16 \times 10^5}{3.906 \times 10^5} = 0.191 = 19.1 \%$$

따라서, 약 19 % 정도 저하된다.