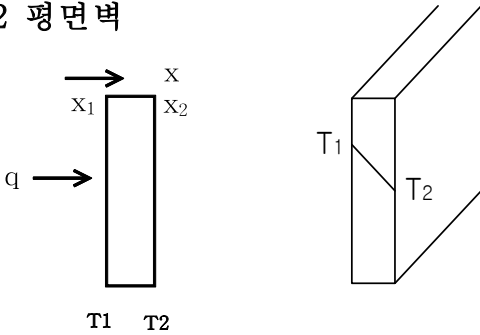


## Chapter 2 정상상태의 전도 - 1차원

### 2.2 평면벽



Approach #1: Fourier 공식 (1)  $q = -kA \frac{dT}{dx}$  에서

1)  $k = \text{constant}$ 의 경우  $x$ 에 관하여 한번 적분하면,

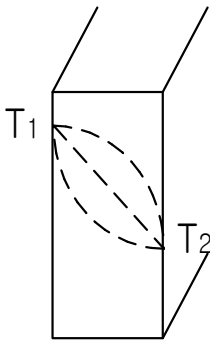
$$q \int_{x_1}^{x_2} dx = -A \int_{T_1}^{T_2} k dT \Rightarrow q = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

여기에서  $\Delta x$  : 벽면 두께,  $T_1, T_2$  : 두 표면에서의 온도

2)  $k = \text{non-constant}$ 의 경우, 즉  $k = k_0(1 + \beta T)$ 일 때  $x$ 에 관하여 한번 적분하면,

$$q \int_{x_1}^{x_2} dx = -A \int_{T_1}^{T_2} k dT = -Ak_0 \int_{T_1}^{T_2} (1 + \beta T) dT$$

$$\Rightarrow q = -\frac{k_0 A}{\Delta x} \left[ (T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2} (T_2^2 - T_1^2) \right]$$



Approach #2: 1차원 열전도방정식 (2) -  $\frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \dot{q} = \rho c \frac{\partial T}{\partial \tau}$  에서

$$\dot{q} = 0 (\text{no heat generation}), \frac{\partial T}{\partial \tau} = 0 (\text{steady-state}) \text{ 라고 하면 } \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) = 0$$

1)  $k = \text{constant}$ 의 경우,  $x$ 에 관하여 두 번 적분하면,  $T(x) = C_1 x + C_2$

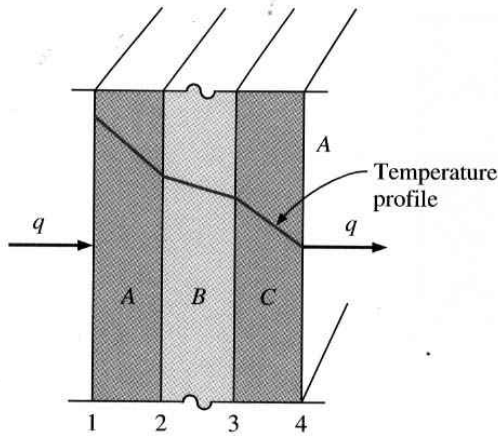
두 개의 경계조건  $x=0$ 에서  $T = T_1 : C_2 = T_1$

$$x = \Delta x \text{에서 } T = T_2 : C_1 = \frac{T_2 - T_1}{\Delta x}$$

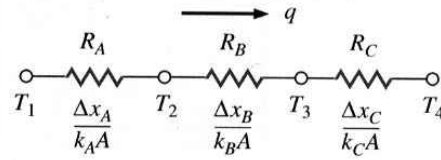
$$T = \left( \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \right) x + T_1 : \text{온도분포}$$

$$\text{Thus, } \frac{dT}{dx} = \left( \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} \right) \Rightarrow q = -kA \frac{dT}{dx} \Rightarrow q = -kA \frac{(T_2 - T_1)}{\Delta x}$$

◦ 복합벽(Multi-layer wall)의 경우



(a)



(b)

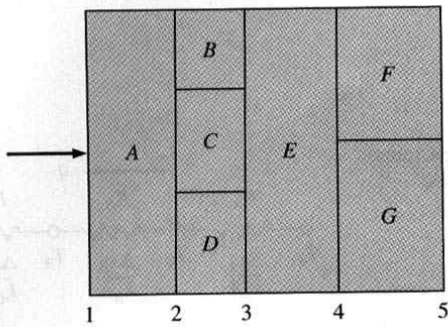
$$q = -k_A A \frac{T_2 - T_1}{\Delta x_A} = -k_B A \frac{T_3 - T_2}{\Delta x_B} = -k_C A \frac{T_4 - T_3}{\Delta x_C}$$

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x_A}{k_A A}} = \frac{T_2 - T_3}{\frac{\Delta x_B}{k_B A}} = \frac{T_3 - T_4}{\frac{\Delta x_C}{k_C A}}$$

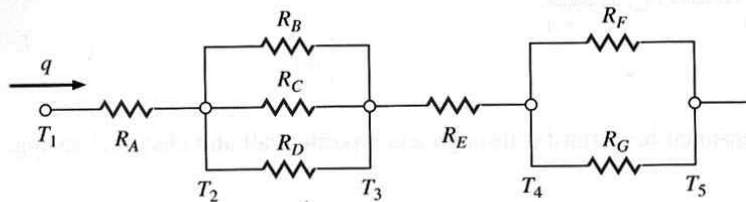
$$q = \frac{T_1 - T_4}{\left(\frac{\Delta x_A}{k_A A}\right) + \left(\frac{\Delta x_B}{k_B A}\right) + \left(\frac{\Delta x_C}{k_C A}\right)} \dots \dots \dots (2.3)$$

Fourier 방정식은 Ohm 법칙의 전기회로 이론과 유사 :

열유동 = 열 포텐셜의 차이 / 열저항  $\Rightarrow q = \frac{\Delta T_{all}}{\sum R_{th}} \dots \dots \dots (2.5)$



(a)



(b)

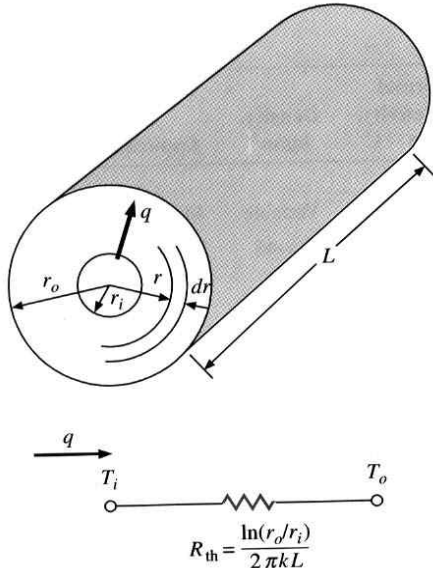
$$q = \frac{T_1 - T_5}{R_A + \frac{R_B R_C R_D}{R_C R_D + R_B R_D + R_B R_C} + R_E + \frac{R_F R_G}{R_F + R_G}}$$

### 2.3 단열과 R값 ( $m^2 \cdot ^\circ C/W$ )

$$R = \frac{\Delta T}{(q/A)} \quad \text{Thus, } R_{th} = \frac{R}{A} \text{ 이다}$$

### 2.4 방사형의 계

◦ 중공원통(hollow cylinder)



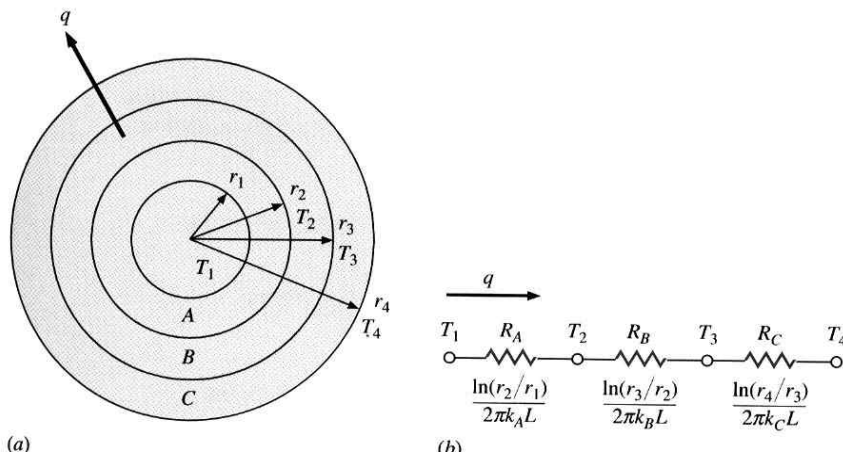
$q \rightarrow$  반경방향 :  $L \gg$  직경,  $A_r = 2\pi rL$ ,  $k = \text{constant}$

$$q = -kA_r \frac{dT}{dr} = -k2\pi rL \frac{dT}{dr}, \quad r \text{ 과 } T \text{ 의 변수를 분리하고}$$

두경계조건 :  $r = r_i$ 에서  $T = T_i$ ,  $r = r_o$ 에서  $T = T_o$  을 적용하여 적분하면  $\Rightarrow q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r} = -k2\pi L \int_{T_i}^{T_o} dT$

$$q = \frac{2\pi kL(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)} = \frac{(T_i - T_o)}{\ln(r_o/r_i)/2\pi kL}, \quad \text{여기에서 열저항 } R_{th} = \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi kL}$$

◦ 복합원통(multi-layered cylinder)



$$q = \frac{\Delta T_{all}}{\sum R_{th}} = \frac{T_1 - T_4}{R_A + R_B + R_C} = \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(\frac{r_2}{r_1})}{2\pi k_A L} + \frac{\ln(\frac{r_3}{r_2})}{2\pi k_B L} + \frac{\ln(\frac{r_4}{r_3})}{2\pi k_C L}}$$

• 구(sphere)의 경우

단면적  $A_r = 4\pi r^2$ ,  $k = \text{constant}$  일 때  $q = -kA_r \frac{dT}{dr} = k4\pi r^2 \frac{dT}{dr}$

$r$ 과  $T$ 의 변수를 분리하여 적분하면  $\Rightarrow q \int_{r_i}^{r_o} \frac{dr}{r^2} = - \int_{T_i}^{T_o} 4\pi k dT$  Thus,  $q = \frac{4\pi k(T_i - T_o)}{1/r_i - 1/r_o}$

예제 2-2 복합원통계

내부지름이 2 cm이고 외부지름이 4 cm인 스테인레스강(18% Cr, 8% Ni,  $k = 19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )으로 된 관 주위를 3 cm 두께의 석면( $k = 0.2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )을 씌워 단열하였다. 관 내벽의 온도가  $600^\circ\text{C}$ 이고 석면의 바깥 면 온도가  $100^\circ\text{C}$ 일 때 관의 단위길이당 열손실을 계산하고, 관과 단열재 경계면에서의 온도를 구하여라.

■ 풀이

이 문제의 열회로는 그림과 같고 열손실은 다음과 같다.

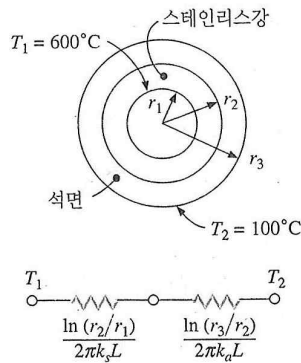
$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(T_1 - T_2)}{\ln(r_2/r_1)/k_s + \ln(r_3/r_2)/k_a} = \frac{2\pi(600 - 100)}{(\ln 2)/19 + (\ln \frac{5}{2})/0.2} = 680 \text{ W/m}$$

이 열손실은 두 재료 경계면에서의 온도를 구하는데 사용된다.

$$\frac{q}{L} = \frac{T_a - T_2}{\ln(r_3/r_2)/2\pi k_a} = 680 \text{ W/m}$$

여기서  $T_a$ 는 경계면에서의 온도이고, 다음과 같다.

$$T_a = 595.8^\circ\text{C}$$



[그림 예제 2.2]

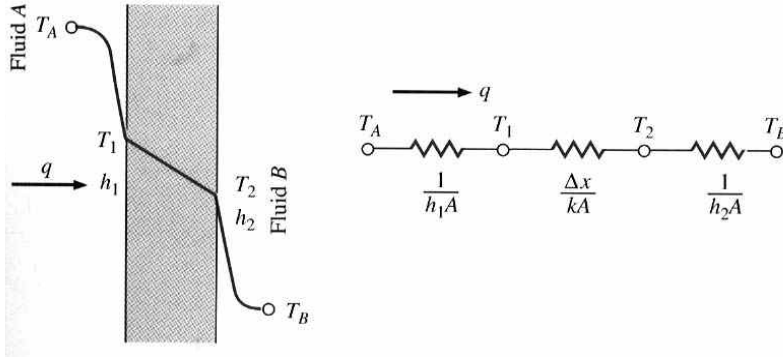
분명히 가장 큰 열저항은 단열재에서 초래되고, 온도 강하도 단열재를 통하는 동안 가장 크게 나타난다.

2.5 총괄열전달계수,  $U(\text{W/m}^2 \cdot \text{K})$

• 대류 경계조건

$$q_{conv} = hA(T_w - T_\infty) : q_{conv} = \frac{T_w - T_\infty}{\frac{1}{hA}}, \left( \frac{1}{hA} = \text{대류 열저항} \right)$$

◦ 평판벽 :

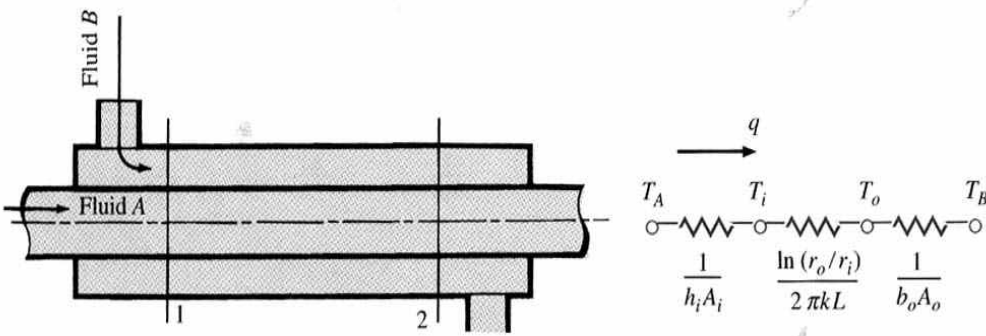


$$q = \frac{\Delta T_{all}}{\sum R_{th}} = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_1 A} + \frac{\Delta x}{k A} + \frac{1}{h_2 A}} = \frac{A \Delta T_{all}}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}}$$

$$= UA \Delta T_{all}$$

따라서, 총괄열전달계수  $U = \frac{1}{\frac{1}{h_1} + \frac{\Delta x}{k} + \frac{1}{h_2}} = \frac{1}{R}$  이 된다.

◦ 중공원통(hollow cylinder) :



$$q = \frac{T_A - T_B}{\frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o A_o}} \quad : \quad q = UA(T_A - T_B) = U_i A_i (T_A - T_B) = U_o A_o (T_A - T_B)$$

Note: 튜브 내·외벽면의 기준에 따라 U값이 다르다

$$\text{따라서, } U_o = \frac{1}{\frac{A_o}{A_i} \frac{1}{h_i} + \frac{A_o \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{1}{h_o}}, \quad U_i = \frac{1}{\frac{1}{h_i} + \frac{A_i \ln(r_o/r_i)}{2\pi k L} + \frac{A_i}{A_o} \frac{1}{h_o}}$$

## 예제 2-5 원통에서의 총괄열전달계수

내부지름이 2.5 cm인 원통 안에 50°C의 물이 흐르고, 이때 대류열전달계수  $h_i = 3500 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 이다. 원통의 벽은 두께가 0.8 mm이고 열전도계수는  $16 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다. 원통의 외부는  $h_o = 7.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  자연대류에 의하여 열손실이 발생한다. 총괄열전달계수 및 단위길이당 열손실을 구하여라. 단, 원통 주위 공기의 온도는 20°C이다.

이 문제에서는 식 (2.14)에서 설명한 바와 같이 연속적으로 세 개의 저항을 생각할 수 있다.  $L = 1.0 \text{ m}$ ,  $d_i = 0.025 \text{ m}$ ,  $d_o = 0.025 + (2)(0.0008) = 0.0266 \text{ m}$  이므로 저항은 다음 식과 같이 구할 수 있다.

$$R_i = \frac{1}{h_i A_i} = \frac{1}{(3500)\pi(0.025)(1.0)} = 0.00364 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_t = \frac{\ln(d_o/d_i)}{2\pi k L}$$

$$= \frac{\ln(0.0266/0.025)}{2\pi(16)(1.0)} = 0.00062 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_o = \frac{1}{h_o A_o} = \frac{1}{(7.6)\pi(0.0266)(1.0)} = 1.575 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

분명히 외부대류저항이 가장 크게 나타나고 있으며, 이 저항은 전체 저항에서 지배적인 값을 보여준다. 다른 저항은 상대적으로 작기 때문에 무시될 수도 있다. 따라서 총괄열전달계수를 원통벽 바깥면의 면적에 대하여 구한다.

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R} = U_o A_o \Delta T \quad (a)$$

$$U_o = \frac{1}{A_o \sum R} = \frac{1}{[\pi(0.0266)(1.0)](0.00364 + 0.00062 + 1.575)}$$

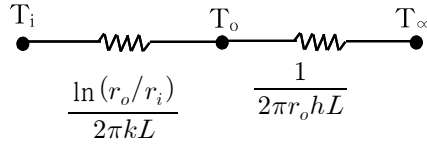
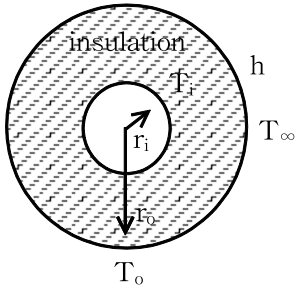
$$= 7.577 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$$

이 값은 원통 외부의 대류열전달계수  $h_o = 7.6 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 와 거의 같다. 식 (a)로부터 얻은 열손실은 다음과 같다.

$$q = U_o A_o \Delta T = (7.577)\pi(0.0266)(1.0)(50 - 20) = 19 \text{ W (단위길이당)}$$

이 예제는 많은 실제 열전달 문제가 이와 같이 연속적인 열저항의 결합으로 작용하는 복합적 형태로 나타난다는 점에 중점을 두고 있다. 한 가지 열전달 형태가 복합된 열전달 문제를 지배하는 경우는 흔히 있다. 여기 예제에서도 총 열전달은 거의 50°C로 유지되는 원통의 바깥벽으로부터 자연대류 열손실만 계산함으로써 구할 수 있다. 왜냐하면 원통 내부에서의 대류저항 및 벽의 전도저항이 매우 작기 때문에 원통벽 내부면과 외부면 사이의 온도 차이가 매우 작게 된다.

## 2.6 단열의 임계두께(critical thickness)

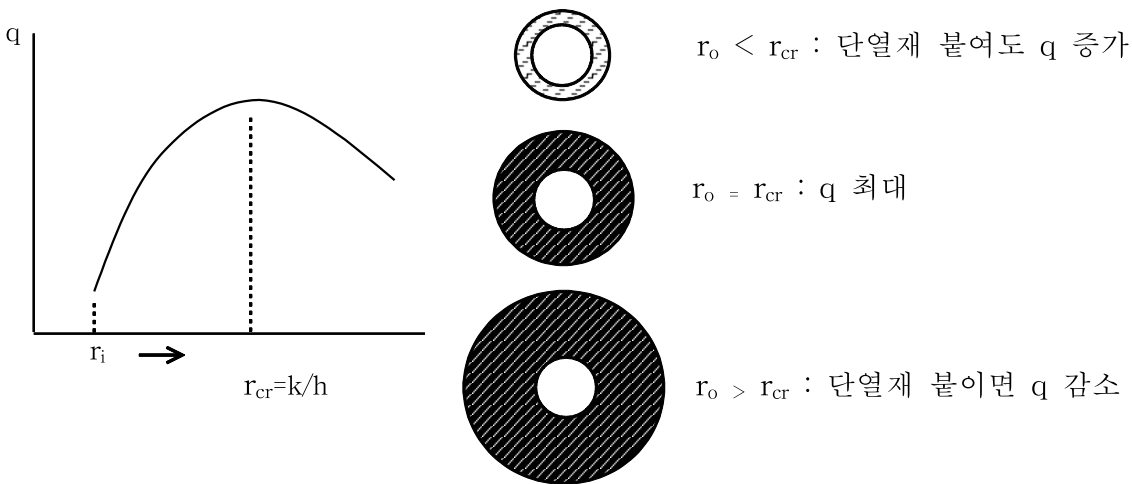


$$\text{따라서 } q = \frac{(T_i - T_\infty)}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{2k\pi L} + \frac{1}{2\pi r_o h L}} = \frac{2\pi L(T_i - T_\infty)}{\frac{\ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{1}{r_o h}}$$

q가 최대인 외부반지름  $r_o$ 은 다음과 같이 구한다.

$$\frac{dq}{dr_o} = 0 = \frac{-2\pi L(T_i - T_\infty) \left( \frac{1}{kr_o} - \frac{1}{hr_o^2} \right)}{\left[ \frac{\ln(r_o/r_i)}{k} + \frac{1}{r_o h} \right]^2} \Rightarrow r_o = r_{cr} = \frac{k}{h} \text{ (임계단열두께)}$$

Note : 분수함수 미분  $\Rightarrow q = \frac{f}{g}$  이다 따라서  $q' = \frac{d}{dr_o} \left( \frac{f}{g} \right) = \frac{f'g - fg'}{g^2}$



\* 단열재를 두껍게 하면 단열재에 의한 열저항이 증가하여 전도열전달은 감소하나, 오히려 외부표면적이 증가하여 대류에 의한 열전달은 증가하는 상반된 현상이 일어난다.

## 예제 2-6 임계단열두께

석면( $k = 0.17 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )으로 둘러싸인 지름이 5 cm이고 벽온도가  $200^\circ\text{C}$ 인 관이  $h = 3.0 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 인  $20^\circ\text{C}$ 의 실내에 노출되어 있을 때 단열의 임계반지름을 구하여라. 또 임계반지름의 단열재로 싸여 있을 때와 단열재가 없을 때 관으로부터의 열손실을 계산하여라.

식 (2.18)로부터  $r_o$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$r_o = \frac{k}{h} = \frac{0.17}{3.0} = 0.0567 \text{ m} = 5.67 \text{ cm}$$

단열재 내부반지름은  $5.0/2 = 2.5 \text{ cm}$ 이고, 열전달은 식 (2.17)로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\frac{q}{L} = \frac{2\pi(200 - 20)}{\frac{\ln(5.67/2.5)}{0.17} + \frac{1}{(0.0567)(3.0)}} = 105.7 \text{ W/m}$$

단열재가 없을 때 관의 바깥표면으로부터의 대류열전달은

$$\frac{q}{L} = h(2\pi r)(T_i - T_o) = (3.0)(2\pi)(0.025)(200 - 20) = 84.8 \text{ W/m}$$

단열두께가 3.17 cm ( $5.67 - 2.5$ )만큼 증가함으로써 열손실이 25% 정도 증가함을 알 수 있다.

한편, 열전도계수가  $0.04 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 인 섬유유리를 단열재로 사용할 경우 임계단열 두께는 다음과 같다.

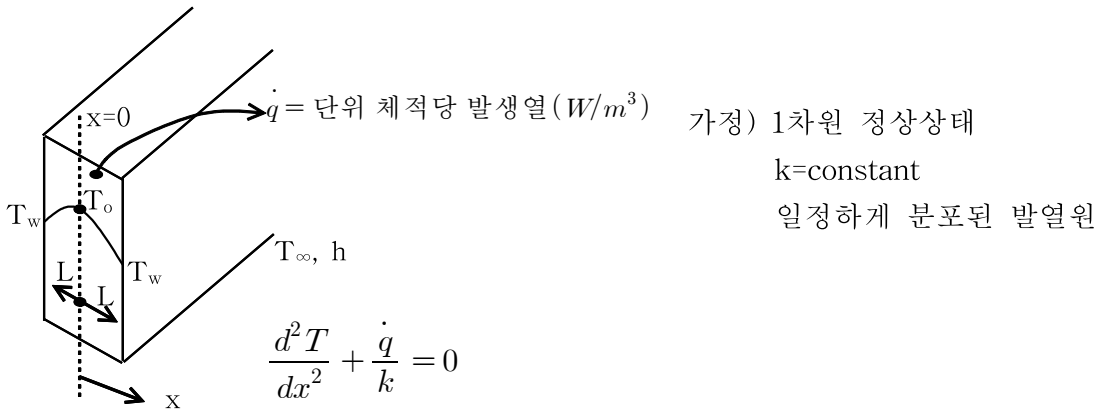
$$r_o = \frac{k}{h} = \frac{0.04}{3.0} = 0.0133 \text{ m} = 1.33 \text{ cm}$$

그러므로 임계반지름이 관의 외부반지름(2.5 cm)보다 작은 섬유유리 단열재인 경우는 관 외부에 붙이면 열손실을 줄여준다. 실제로 관의 단열 문제에서는 단열면 외부 표면에서 대류열전달과 더불어 복사열전달의 영향도 받는다.



## 2.7 열원계

◦ 발열원( $\dot{q}$ )이 있는 평판벽



두 번 적분 :  $T = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + C_1x + C_2 \dots \dots \dots (A)$

at  $x=+L$  :  $T_w = -\frac{\dot{q}}{2k}L^2 + C_1L + C_2$

$x=-L$  :  $T_w = -\frac{\dot{q}}{2k}L^2 - C_1L + C_2$

경계조건 : ① at  $x=\pm L$ ,  $T=T_w \Rightarrow C_1=0$

②  $x=0$ ,  $T=T_0 \Rightarrow C_2=T_0$

이제  $C_1, C_2$ 를 식(A)에 대입하면  $\Rightarrow T - T_0 = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 \dots \dots \dots (B)$

식(B)에  $x=\pm L$ 에서  $T=T_w$ 를 적용하면  $\Rightarrow T_w - T_0 = -\frac{\dot{q}}{2k}L^2 \dots \dots \dots (C)$

$(B) - (C) = T - T_w = -\frac{\dot{q}}{2k}(x^2 - L^2) \dots \dots \dots (D)$

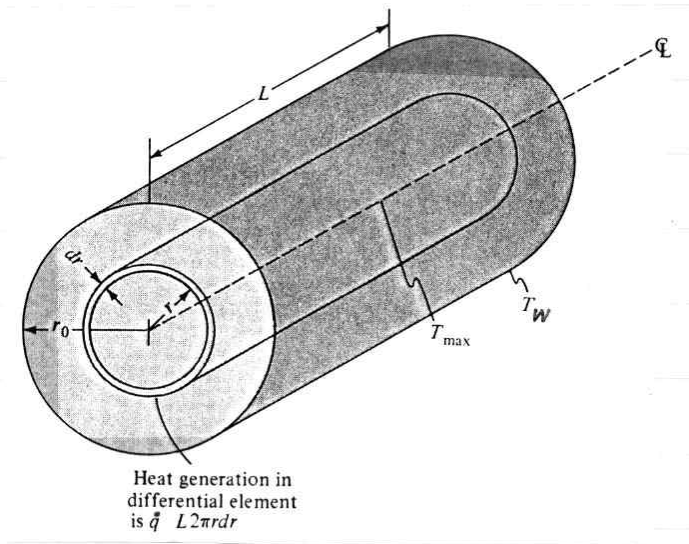
$\frac{(B)}{(C)} = \frac{T - T_0}{T_w - T_0} = \frac{x^2}{L^2}$  ,  $\frac{(D)}{(C)} = \frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = 1 - \frac{x^2}{L^2}$

식(C)로부터 중심부의 온도를 구하면  $\Rightarrow T_0 = \frac{\dot{q}L^2}{2k} + T_w$

**Note:** 평판벽에서 발생된 열과 벽의 양면에서 전도에 의한 열전달량이 같아야 한다.

따라서  $\dot{q}A2L = 2(-kA \frac{dT}{dx}|_{x=L})$

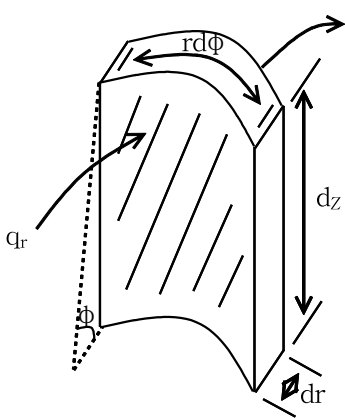
## 2.8 열원을 갖는 원통(Solid Cylinder)



가정) 1차원 정상상태, 충분히 긴 원통  
 반경=R, k=constant, 균일하게 분포된 발열원

$$\text{식(1.3b)} \Rightarrow \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q}}{k} = 0 \quad \text{또는} \quad \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) + \frac{\dot{q}}{k} r = 0$$

∴ 식(1.3b)유도 :



$$A = r d\phi dz$$

$$V = r d\phi dz dr$$

$$q_r = -Ak \frac{dT}{dr} = -rd\phi dz \cdot k \frac{dT}{dr}$$

$$q_r + \dot{q} V = q_{r+dr} \quad \text{에서}$$

$$\left( -rd\phi dz k \frac{dT}{dr} \right) + \dot{q} r d\phi dz dr = \left[ -rd\phi dz k \frac{dT}{dr} + \frac{d}{dr} \left( -rd\phi dz k \frac{dT}{dr} \right) dr \right]$$

$$\frac{d}{dr} \left( rd\phi dz k \frac{dT}{dr} \right) dr = -\dot{q} r d\phi dz dr$$

$$\text{정리하면} \Rightarrow \frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{\dot{q}}{k} r \Rightarrow \frac{d^2 T}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dT}{dr} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$

$$\frac{d}{dr} \left( r \frac{dT}{dr} \right) = -\frac{\dot{q}}{k} r \quad \text{를 적분하면}$$

$$r \frac{dT}{dr} = -\frac{\dot{q}}{2k} r^2 + C_1 \quad \dots \dots \dots (A)$$

$$T = -\frac{\dot{q} r^2}{4k} + C_1 \ln r + C_2 \quad \dots \dots \dots (B)$$

경계조건 1) 내부 발생열 = 표면에서의 열손실

$$\dot{q}(\pi R^2 L) = -k(2\pi RL) \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R} \Rightarrow \frac{dT}{dr} \Big|_{r=R} = -\frac{\dot{q}R}{2k} \dots \dots \dots (C)$$

$$\frac{\text{식(A)}}{r} \Rightarrow \frac{dT}{dr} = -\frac{\dot{q}}{2k}r + \frac{C_1}{r} \dots \dots \dots (D)$$

$$\text{식(C)} = \text{식(D)} \Big|_{r=R} \Rightarrow C_1 = 0$$

경계조건 2)  $T = T_w$  at  $r=R \Rightarrow$  식(B)에 적용

$$T = T_w = -\frac{\dot{q}R^2}{4k} + C_2, \text{ 따라서 } C_2 = T_w + \frac{\dot{q}R^2}{4k}$$

$$C_1, C_2 \text{를 식(B)에 대입, } T - T_w = \frac{\dot{q}}{4k}(R^2 - r^2) \dots \dots \dots (E)$$

$$\text{중심부}(r=0)\text{에서의 온도}(T_0)\text{를 식(E)로부터 } \Rightarrow T_0 = \frac{\dot{q}R^2}{4k} + T_w \dots \dots \dots (F)$$

$$\text{- 무차원 온도함수 : } \text{식(E)/식(F)} \Rightarrow \frac{T - T_w}{T_0 - T_w} = 1 - \left(\frac{r}{R}\right)^2$$

◦ 열원이 균일하게 분포된 hollow cylinder의 경우

두 경계조건:  $T = T_i$  at  $r=r_i$ (내부면),  $T = T_0$  at  $r=r_o$ (외부면)

온도분포는  $T = \frac{-\dot{q}r^2}{4k} + C_1 \ln r + C_2$  이며 두 경계조건을 적용한다:

$$r = r_i \quad ; \quad T = T_i = \frac{-\dot{q}r_i^2}{4k} + C_1 \ln r_i + C_2$$

$$r = r_o \quad ; \quad T = T_0 = \frac{-\dot{q}r_o^2}{4k} + C_1 \ln r_o + C_2 \text{을 풀어서}$$

$$\text{온도함수를 구한다 } \Rightarrow T = T_o + \frac{\dot{q}}{4k}(r_o^2 - r^2) + C_1 \ln\left(\frac{r}{r_o}\right)$$

$$\text{여기에서 } C_1 = \frac{(T_i - T_o) + \dot{q}(r_i^2 - r_o^2)/4k}{\ln(r_i/r_o)}$$

## 예제 2-7 대류 속에 놓인 열원

200 A의 전류가 지름이 3 mm인 스테인레스강 철선( $k = 19 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )을 통해서 흐르고 있다. 이 강철선의 비저항(resistivity)은  $70 \mu\Omega \cdot \text{cm}$ 이고 길이는 1 m이다.  $110^\circ\text{C}$ 로 유지되는 액체 속에 강철선이 잠겨 있을 때 이 선 중심에서의 온도를 계산하여라. 단, 강철선과 액체 사이의 대류열전달계수는  $4 \text{ kW/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 라고 가정하여라.

### 풀이

스테인레스강 철선에 전류가 통하여 생긴 모든 열은 대류에 의하여 액체 속으로 전달된다.

$$P = I^2 R = q = hA (T_w - T_\infty) \quad (a)$$

강철선의 저항은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$R = \rho \frac{L}{A} = \frac{(70 \times 10^{-6})(100)}{\pi(0.15)^2} = 0.099 \Omega$$

여기서  $\rho$ 는 스테인레스강 철선의 비저항이다. 강철선의 표면적은  $\pi dL$ 이기 때문에 식 (a)로부터

$$(200)^2(0.099) = 4000\pi(3 \times 10^{-3})(1)(T_w - 110) = 3960 \text{ W}$$

그러므로

$$T_w = 215^\circ\text{C} \quad [419^\circ\text{F}]$$

이다. 단위체적당 발생된 열량  $\dot{q}$ 는 다음 식에서 계산할 수 있다.

$$P = \dot{q} V = \dot{q} \pi r^2 L$$

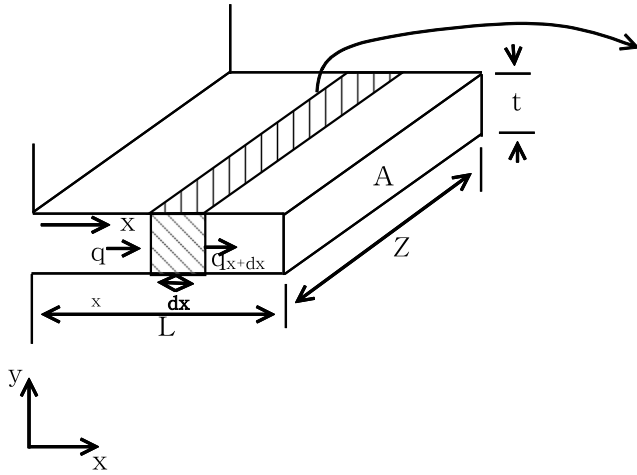
그러므로

$$\dot{q} = \frac{3960}{\pi (1.5 \times 10^{-3})^2 (1)} = 560.2 \text{ MW/m}^3 \quad [5.41 \times 10^7 \text{ Btu/h} \cdot \text{ft}^3]$$

마지막으로, 강철선의 중심온도는 식 (2.26)으로부터 계산된다.

$$T_0 = \frac{\dot{q} r_o^2}{4k} + T_w = \frac{(5.602 \times 10^8)(1.5 \times 10^{-3})^2}{(4)(19)} + 215 = 231.6^\circ\text{C} \quad [449^\circ\text{F}]$$

## 2.9 전도-대류계



$$dq_{conv} = hPdx(T - T_{\infty}), \quad P = \text{perimeter}$$

$$Pdx = \text{heat transfer area}$$

<가정>

- 1차원 핀
- $T_0$  = 핀 바닥면 온도
- $T_{\infty}$  = 주위 유체 온도
- fin의 x방향 면적 = 균일
- x방향의 열전달이 y, z 방향보다 훨씬 큼

<검사체적의 열평형>

$$q_x = q_{x+dx} + dq_{conv}$$

$$q_x = q_x + \frac{dq_x}{dx}dx + hPdx(T - T_{\infty})$$

$$-kA \frac{dT}{dx} = -kA \frac{dT}{dx} + \frac{d}{dx}(-kA \frac{dT}{dx})dx + hPdx(T - T_{\infty})$$

$$-kA \frac{d^2T}{dx^2} + hP(T - T_{\infty}) = 0 \Rightarrow \frac{d^2T}{dx^2} - \frac{hP}{kA}(T - T_{\infty}) = 0$$

$T - T_{\infty} = \theta$ 로 대입하고  $m^2 = \frac{hP}{kA}$ 으로 놓으면,  $\frac{d^2\theta}{dx^2} - m^2\theta = 0$ 의 상미분방정식이 된다.

이 미분방정식의 일반해 :  $\theta = C_1e^{-mx} + C_2e^{mx} \dots \dots \dots (2.31)$

- 경계조건에 의해  $C_1$ 과  $C_2$  계산 :

◦ 경계조건 1)  $x=0$ 에서  $T=T_0$ 을 변형하여  $\Rightarrow T - T_{\infty} = T_0 - T_{\infty} \Rightarrow \theta = \theta_0$

◦ 경계조건 2)

경우① : 핀이 매우길 때 (핀 끝의 온도 = 주위 유체의온도) :  $T = T_{\infty}$ 이므로  $\theta = 0$  at  $x = \infty$

경우② : 핀 끝에서 대류에 의한 열손실:  $x=L$ 에서  $hA\theta_L = -kA \frac{d\theta}{dx}|_{x=L}$  여기서  $\theta_L = T_L - T_{\infty}$

(핀 끝에서 전도 열손실 = 대류 열손실)

경우③ : 핀 끝이 단열된 경우 :  $x=L$ 에서  $\frac{dT}{dx}|_{x=L} = 0 \Rightarrow \frac{d\theta}{dx}|_{x=L} = 0$

- 경우① :  $x=0$ 에서  $\theta = \theta_0$       $\theta = C_1e^{-mx} + C_2e^{mx}$ 에 대입하면  $\theta_0 = C_1 + C_2$ 이 되고

$x = \infty$ 에서  $\theta = 0$       $0 = C_2e^{\infty}$ 이 되어서 두 식에서  $C_2 = 0$ ,  $C_1 = \theta_0$ 를 얻고

$$\therefore \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{T - T_{\infty}}{T_0 - T_{\infty}} = e^{-mx} \text{ 를 구한다.}$$

- 경우③ :  $x=0$ ,  $\theta=\theta_0$  과  $x=L$ ,  $\frac{d\theta}{dx}|_{x=L}=0$ 에서  $\theta_0=C_1+C_2$

$0=m[-C_1e^{-mL}+C_2e^{mL}]$  두식에서 상수  $C_1, C_2$ 를 구하면

$$\therefore \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{e^{-mx}}{1+e^{-2mL}} + \frac{e^{mx}}{1+e^{2mL}} \dots \dots \dots (2.33a)$$

정리하면  $\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\cosh[m(L-x)]}{\cosh mL} \dots \dots \dots (2.33b)$

- 경우② :  $x=0$ ,  $\theta=\theta_0$ 와  $x=L$ ,  $h\theta_L = -k\frac{d\theta}{dx}|_{x=L}$ 를 적용한 결과

$\theta_0=C_1+C_2$ ,  $h[C_1e^{-mL}+C_2e^{mL}] = km[C_1e^{-mL}-C_2e^{mL}]$ 로부터  $C_1$ 과  $C_2$ 를 구하고

공식(2.31)에 대입하면  $\frac{\theta}{\theta_0} = \frac{\cosh m(L-x) + (\frac{h}{mk})\sinh m(L-x)}{\cosh mL + (\frac{h}{mk})\sinh mL}$  을 구한다

◦ 핀 바닥면에서부터 핀 끝까지의 열전달

$q = -kA\frac{d\theta}{dx}|_{x=0}$  : 핀 바닥면에서의 전도 열전달 =  $\int_0^L hP\theta dx$  : 핀 전체에서의 대류 열전달

- 경우① :  $q = -kA\frac{d\theta}{dx}|_{x=0} = -kA\frac{d}{dx}(\theta_0 e^{-mx})|_{x=0} = -kA(-m\theta_0 e^{-m(0)}) = \sqrt{hPkA}\theta_0$

여기에서  $m^2 = \frac{hP}{kA}$

- 경우② :  $q = -kA\frac{d\theta}{dx}|_{x=0} = -kA\frac{d}{dx}\left(\theta_0 \frac{\cosh m(L-x) + (\frac{h}{mk})\sinh m(L-x)}{\cosh mL + (\frac{h}{mk})\sinh mL}\right)$

$$= +kA\theta_0 \frac{m\left[\sinh m(L-x) + (\frac{h}{mk})\cosh m(L-x)\right]}{\cosh mL + (\frac{h}{mk})\sinh mL} \Big|_{x=0}$$

$$= \sqrt{hPkA}\theta_0 \left[ \frac{\sinh mL + (\frac{h}{mk})\cosh mL}{\cosh mL + (\frac{h}{mk})\sinh mL} \right]$$

- 경우③ :  $q = \sqrt{hPkA}\theta_0 \tanh mL$

## 2-10 핀(fin)

A. 핀 효율(fin efficiency)  $\eta_f = \frac{\text{실제로 발생하는 열전달량}}{\text{핀 전체가 바닥면 온도와 같다고 가정할 때의 열전달량}}$

$$\text{핀 전체가 바닥면에서의 온도와 같을 때의 열전달량} \Rightarrow \int_0^L hP(T_0 - T_\infty)dx = hP\theta_0 L$$

$$\text{Reminder: } m^2 = \frac{hP}{kA}$$

$$\circ \text{ 경우③ (핀 끝이 단열됨)} : \eta_f = \frac{\sqrt{hkPA}\theta_0 \tanh mL}{hP\theta_0 L} = \frac{\tanh mL}{mL}$$

- Z(폭)  $\gg$  t(두께)인 사각형 핀의 경우 다음과 같이 변형:

$$mL = \sqrt{\frac{hP}{kA}} L = \sqrt{\frac{h}{k} \frac{(2Z+2t)}{Zt}} L \approx \sqrt{\frac{2h}{kt}} L = \sqrt{\frac{2h}{kLt}} L^{3/2}$$

$$\therefore mL = \sqrt{\frac{2h}{kA_m}} L^{3/2}, \quad A_m = Lt$$

$\circ$  경우② (핀 끝에서 대류에 의한 열전달) :

핀 끝이 단열된 경우③의 모든 공식에서 핀의 길이  $L$ 을 수정길이  $L_c$ 로 바꾸어서 사용한다.

$$\therefore mL_c = \sqrt{\frac{2h}{kA_m}} L_c^{3/2}, \quad A_m = L_c t, \quad \eta_f = \frac{\tanh mL_c}{mL_c}, \quad q = \sqrt{hPkA}\theta_0 \tanh mL_c$$

1) 평판에 돌출한 두께가  $t$ 이고 길이가  $L$ 인 직사각형 단면의 핀 :  $L_c = L + t/2$

2) 평판에 돌출한 지름이  $d$ 이고 길이가  $L$ 인 원통형 핀 :  $L_c = L + \frac{\pi d^2/4}{\pi d} = L + d/4$

B. 핀 효율도(fin effectiveness)  $\eta_e = \frac{\text{핀이 부착된 경우의 열전달량}(q)}{\text{핀이 부착되지 않는 경우의 열전달량}(q)} = \frac{\eta_f A_f h \theta_o}{h A_b \theta_o}$

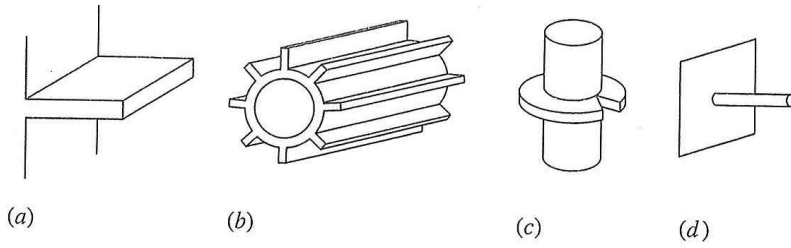
여기에서  $A_f$ : 핀의 전체 표면적 (=  $PL$ ),  $A_b$ : 핀 바닥면에서의 단면적 (=  $A$ )

$\circ$  경우③ (핀 끝이 단열됨) :

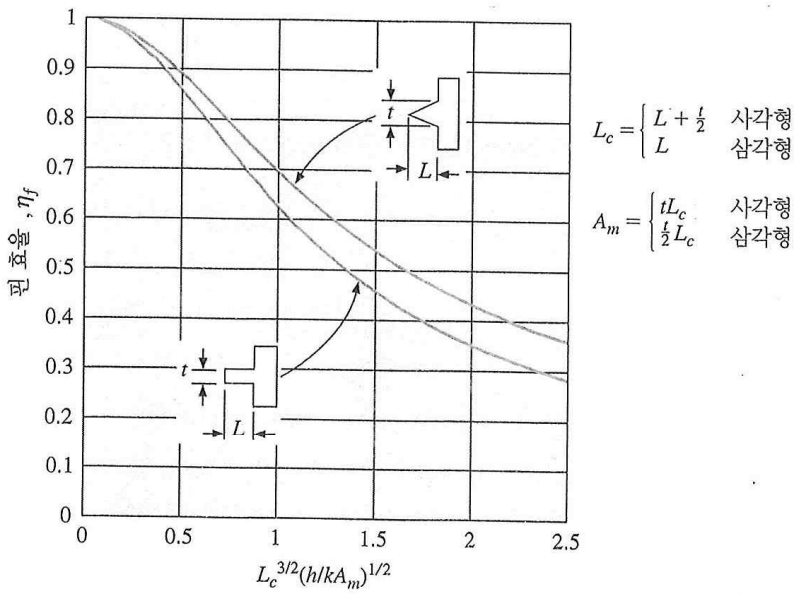
$$\eta_e = \frac{\text{핀이 부착된 경우의 열전달량}}{\text{핀이 부착되지 않는 경우의 열전달량}} = \frac{\sqrt{hPkA}\theta_o \tanh mL}{h A_b \theta_o} = \frac{\sqrt{hPkA}\theta_o \tanh mL}{h A \theta_o} = \frac{\tanh mL}{\sqrt{hA/kP}}$$

$\circ$  핀이 반드시 열전달 촉진에 도움이 되지 않는 경우도 있다.

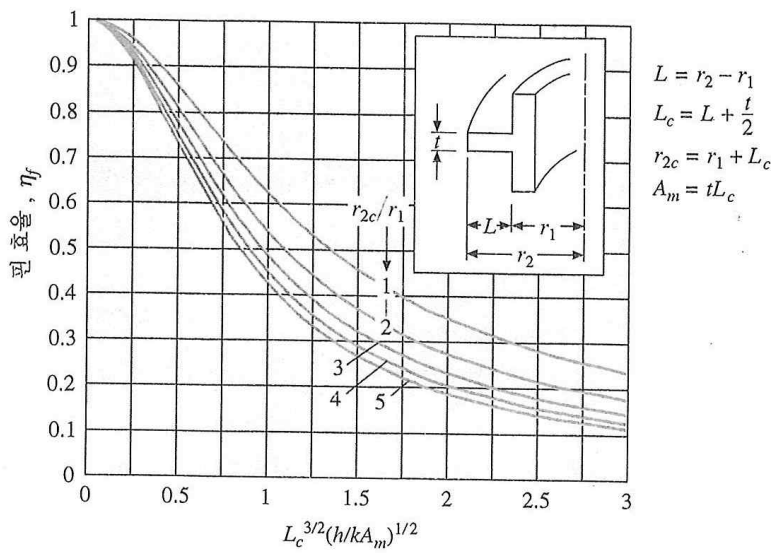
- 핀 효율도 ( $\eta_e$ )가 낮은 경우 : 고속으로 흐르는 액체 혹은 비등 혹은 응축 현상이 일어나는 경우.



[그림 2.10] 여러 가지 형태의 핀 (a) 평판벽면에 돌출한 직사각형 단면의 끝은 핀, (b) 원통형 튜브에 돌출한 직사각형 단면의 끝은 핀, (c) 원통 표면에 붙어 있는 원판형 핀, (d) 평판에 돌출한 원통형 핀



[그림 2.11] 사각형 및 삼각형 핀의 효율



[그림 2.12] 원통면에 붙어 있는 원판형 핀의 효율



## 예제 2-9 평판형 알루미늄 핀

두께가 3.0 mm이고 길이가 7.5 cm인 알루미늄 핀( $k = 200 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )이 그림 2.9와 같이 벽으로부터 돌출되어 있다. 핀의 바탕온도는  $300^\circ\text{C}$  이고 주위유체의 온도는  $50^\circ\text{C}$  이며  $h = 10 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  일 때 핀의 단위 폭당 열손실을 계산 하여라.

이 문제는 앞에서 경우 2에 해당한다. 따라서 구하는 열손실은 수정길이  $L_c$ 를 사용하여 식 (2.36)에 의해서 주어진 단 열된 끝을 가진 핀으로부터 전달되는 열전달을 계산하면 된다.

$$L_c = L + t/2 = 7.5 + 0.15 = 7.65 \text{ cm [3.01 in]}$$

$$m = \sqrt{\frac{hP}{kA}} = \left[ \frac{h(2z + 2t)}{ktz} \right]^{1/2} \approx \sqrt{\frac{2h}{kt}}$$

$z \gg t$  인 경우. 따라서

$$m = \left[ \frac{(2)(10)}{(200)(3 \times 10^{-3})} \right]^{1/2} = 5.774$$

식 (2.36)에서 끝이 단열된 핀에 대하여

$$q = (\tanh mL_c) \sqrt{hPkA} \theta_0$$

이며, 1 m의 폭에 대해서는

$$A = (1)(3 \times 10^{-3}) = 3 \times 10^{-3} \text{ m}^2 [4.65 \text{ in}^2]$$

이고, 열손실은 다음과 같다.

$$q = (5.774)(200)(3 \times 10^{-3})(300 - 50) \tanh [(5.774)(0.0765)]$$

$$= 359 \text{ W/m [373.5 Btu/h} \cdot \text{ft]}$$

## 예제 2-10 원판형 알루미늄 핀

길이 1.5 cm이고 두께가 1 mm인 원판형 알루미늄 핀( $k = 200 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ )이 지름이 2.5 cm인 원통에 달려 있다.

원통벽의 온도는  $170^\circ\text{C}$ 이고 주위유체의 온도는  $25^\circ\text{C}$ 이다. 열전달계수가  $130 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$ 일 때 핀으로부터의 열손실을 구하여라.

풀이:

그림 2.12에 주어진 핀효율 곡선을 이용하여 아래와 같이 열손실을 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 L_c &= L + t/2 = 1.5 + 0.05 = 1.55 \text{ cm} \\
 r_1 &= 2.5/2 = 1.25 \text{ cm} \\
 r_{2c} &= r_1 + L_c = 1.25 + 1.55 = 2.80 \text{ cm} \\
 r_{2c}/r_1 &= 2.80/1.25 = 2.24 \\
 A_m &= t(r_{2c} - r_1) = (0.001)(2.8 - 1.25)(10^{-2}) = 1.55 \times 10^{-5} \text{ m}^2 \\
 L_c^{3/2} \left( \frac{h}{kA_m} \right)^{1/2} &= (0.0155)^{3/2} \left[ \frac{130}{(200)(1.55 \times 10^{-5})} \right]^{1/2} = 0.396
 \end{aligned}$$

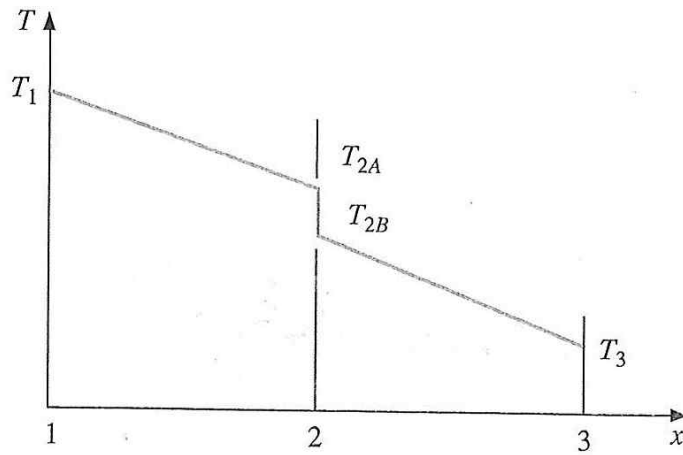
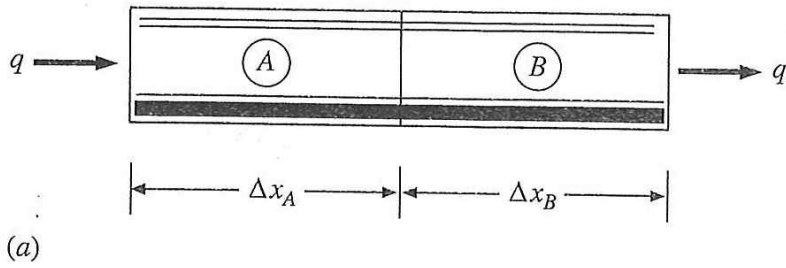
그림 2.12로부터  $\eta_f = 82\%$ 이다. 핀의 모든 부분에서의 온도가 바탕온도와 같을 경우 열전달은

$$\begin{aligned}
 q_{\max} &= 2\pi(r_{2c}^2 - r_1^2)h(T_0 - T_\infty) \\
 &= 2\pi(2.8^2 - 1.25^2)(10^{-4})(130)(170 - 25) \\
 &= 74.35 \text{ W [253.7 Btu/h]}
 \end{aligned}$$

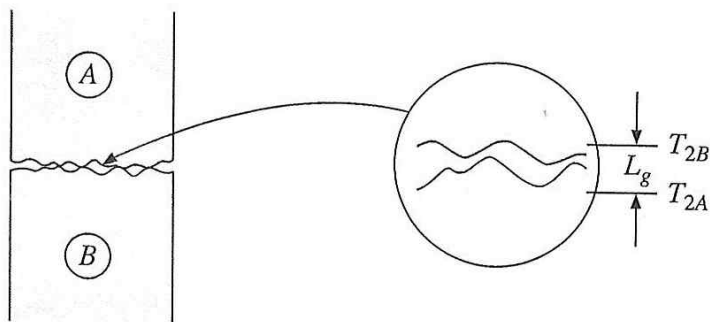
이다. 구하려고 하는 열손실은 위에서 구한 열전달률과 핀의 효율을 곱하면 된다.

$$q_{\text{act}} = (0.82)(74.35) = 60.97 \text{ W [208 Btu/h]}$$

2-11 접촉 열저항



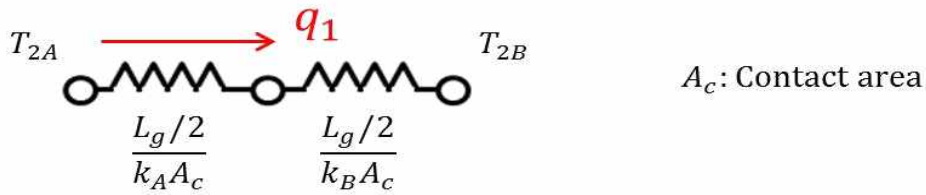
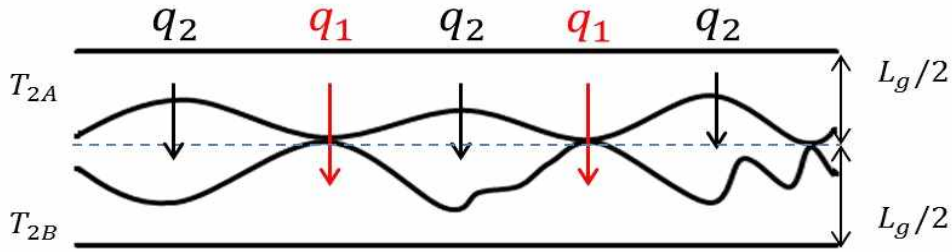
[그림 2.15] 접촉 열저항의 효과. (a) 물리적 상태, (b) 온도분포



[그림 2.16] 접촉 열저항을 설명하기 위한 접촉부의 조도모형

Note : 평면 2에서의 온도강하는 접촉 열저항 때문이다.

# 1. Solid-to-Solid Conduction

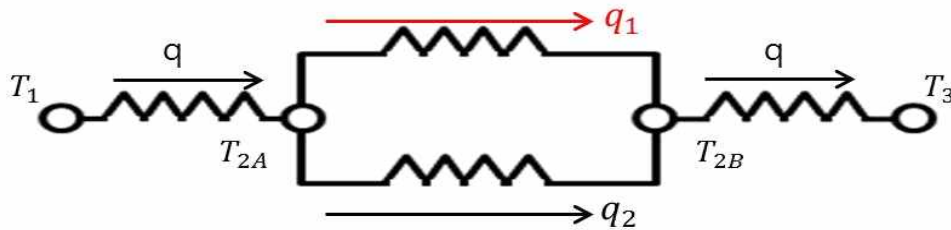


$$q_1 = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{\frac{L_g}{2k_A A_c} + \frac{L_g}{2k_B A_c}}$$

# 2. Conduction through entrapped gases

$$q_2 = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{\frac{L_g}{k_f A_v}} \quad A_v: \text{Void area}$$

$$\therefore q = q_1 + q_2$$



◦ 접촉하는 두 고체에서의 에너지 평형식

$$q = k_A A \frac{T_1 - T_{2A}}{\Delta x_A} = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{1/h_c A} = k_B A \frac{T_{2A} - T_3}{\Delta x_B} = \frac{T_1 - T_3}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A}}$$

여기에서,  $\frac{1}{h_c A}$ : 접촉 열저항,  $h_c$ : 접촉계수 (표2-3)

◦ 접촉부에서의 전도 열전달

1) 접촉점에서의 고체간의 열전달  $q_1$     2) 접촉부 내의 미세한 빈 공간내의 유체를 통한 열전달  $q_2$

$$q = q_1 + q_2 = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{\frac{L_g/2}{k_A A_c} + \frac{L_g/2}{k_B A_c}} + \frac{T_{2A} - T_{2B}}{\frac{L_g}{k_f A_v}} = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{\frac{1}{h_c A}}$$

-  $L_g$ : 빈 공간의 두께,  $k_f$ : 빈 공간내 유체의 열전도도

$A_c$ : 고체 간의 접촉면적,  $A_v$ : 빈 공간의 유체와의 접촉면적,  $A$ : 막대의 총단면적(=  $A_c + A_v$ )

따라서, 접촉계수  $h_c = \frac{1}{L_g} \left[ \frac{A_c}{A} \frac{2k_A k_B}{(k_A + k_B)} + \frac{A_v}{A} k_f \right]$

$k_f \ll k_A, k_B$  이므로 대부분의 접촉 열저항은 빈 공간의 유체 접촉면적( $A_v$ )에 의해 결정된다.

Note:  $\frac{T_1 - T_3}{\frac{\Delta x_A}{k_A A} + \frac{1}{h_c A} + \frac{\Delta x_B}{k_B A}} = \frac{T_{2A} - T_{2B}}{\frac{1}{h_c A}}$

◦ 접촉 열저항을 줄이는 3가지 방법

1) 빈 공간내의 유체의 압력을 다음의 조건이 되도록 높인다.

(mean free path of the molecules < characteristic dimension of the void space(빈 공간))

2) 접촉점에서의 압력을 증가하여 접촉 면적을 증가시킨다.

3) Dow 340와 같은 “Thermal Grease or Thermally Conductive Paste”를 접촉면에 바른다 - 접촉 열저항을 75%까지 줄일 수 있다. 최근에는 인체대에서 Graphene을 Paste형태로 만들어서 사용함.

[표 2.3] 대표적인 표면에서의 접촉 열저항

표면상태	조도		온도, °C	압력, atm	1/h <sub>c</sub>	
	μin	μm			h · ft <sup>2</sup> · °F/Btu,	m <sup>2</sup> · °C/W × 10 <sup>4</sup>
416 스테인레스강, 연삭가공, 공기	100	2.54	90-200	3~25	0.0015	2.64
304 스테인레스강, 연삭가공, 공기	45	1.14	20	40~70	0.003	5.28
416 스테인레스강, 연삭가공, 0.001-in 황동 끼움쇠 달림, 공기	100	2.54	30-200	7	0.002	3.52
알루미늄, 연삭가공, 공기	100	2.54	150	12~25	0.0005	0.88
알루미늄, 연삭가공, 0.001-in 황동끼움쇠 달림, 공기	10	0.25	150	12~25	0.0001	0.18
알루미늄, 연삭가공, 0.001-in 황동끼움쇠 달림, 공기	100	2.54	150	12~200	0.0007	1.23
구리, 연삭가공, 공기	50	1.27	20	12~200	0.00004	0.07
구리, 밀링가공, 공기	150	3.81	20	10~50	0.0001	0.18
구리, 밀링가공, 진공	10	0.25	30	7~70	0.0005	0.88

### 예제 2-12 접촉 열저항의 영향

길이가 10 cm이고 지름이 3 cm인 2개의 304스테인레스강 막대의 접촉표면이 연삭가공 되었고 조도(roughness)는 약 1 μm이다. 이 두 막대를 공기 속에서 50 atm으로 압축하여 접촉시켰고 접촉한 두 막대의 양쪽 끝의 온도차가 100 °C일 때 축방향의 열전달과 접촉면에서의 온도강하를 구하여라.

#### 풀이

총 열유동은 3개의 열저항을 가진다. 즉, 각 막대에서의 전도 열저항 및 접촉 열저항이다. 각 막대에서의 열저항은

$$R_{th} = \frac{\Delta x}{kA} = \frac{(0.1)(4)}{(16.3)\pi(3 \times 10^{-2})^2} = 8.679^\circ\text{C/W}$$

접촉 열저항은 표 2.2로부터 다음과 같이 계산된다.

$$R_c = \frac{1}{h_c A} = \frac{(5.28 \times 10^{-4})(4)}{\pi(3 \times 10^{-2})^2} = 0.747^\circ\text{C/W}$$

따라서 총 열저항은

$$\sum R_{th} = (2)(8.679) + 0.747 = 18.105$$

총 열유동은

$$q = \frac{\Delta T}{\sum R_{th}} = \frac{100}{18.105} = 5.52 \text{ W} \quad [18.83 \text{ Btu/h}]$$

접촉표면을 가로지르는 온도강하는 총 열저항에 대한 접촉저항의 비로 구할 수 있다.

$$\Delta T_c = \frac{R_c}{\sum R_{th}} \Delta T = \frac{(0.747)(100)}{18.105} = 4.13^\circ\text{C} \quad [39.43^\circ\text{F}]$$

이 문제에서 접촉저항은 총 열저항의 약 4%로 나타난다.