

# 食品工學 計算法

卞 裕 亮  
〈延世大 工大 食品工學科 教授〉

### 3-5. 非뉴우튼 流體의 전열

流體의 열전달에서는 대부분 뉴우튼 유체에 대해 다루고 있으나 식품공업에서 취급하는 유체식품은 대부분 비뉴우튼 유체이다. 비뉴우튼 유체를 취급하는 장치를 설계하기 위해서는 유체식품의 流動상수 즉 rheological constant를 실험적으로 측정하여 알아야 한다. 비뉴우튼 유체는 대부분 의가소성(pseudo plastic)유체로서 지수법칙으로 표현됨으로 이 유체에 대해서만 다룬다.

지수법칙 유체(power law fluid)가 관 속을 층류로 흐를 때  $Gz > 20$ 이고  $n > 0.10$ 인 자연 대류를 무시할 수 있는 高粘度 유체에 다음 식이 적용될 수 있다.

$$(Nu)_a = \frac{h_a D}{k} = 1.75 \left( \frac{3n+1}{4n} \right)^{1/3} (Gz)^{1/3} \left( \frac{m_b}{m_w} \right)^{0.14} \quad (3-39)$$

여기서  $G_z = WC_p / kL$ 로써 Graetz number이다. 여기서  $W$ 는 질량속도(kg/s),  $L$ 은 관의 길이이다.  $m_w$ 는 관벽 온도  $T_w$ 에서의 점조도지수(consistency index)이며  $m_b$ 는 평균 벌크온도에서의 점조도지수이다. 유동거동지수(flow behavior index)  $n$ 은 온도의 영향을 거

의 받지 않으나  $m$ 은 온도의 영향을 크게 받으며,  $\log m$ 에 대해  $1/T$ 를 plot하면 직선을 나타내는 경우가 많다. 식 (3-39)에서 얻어지는  $h_a$ 는 산술평균온도차  $\Delta T_a$ 이고, 길이  $L$ 의 관 전체에 걸쳐 사용되는 평균값이다.

$$\Delta T_a = \frac{(T_w - T_{bi}) + (T_w - T_{bo})}{2} \quad (3-40)$$

여기서  $T_{bi}$ 와  $T_{bo}$ 는 각각 입구와 출구에서 벌크온도이다.

Heat flux  $q$ 는

$$q = h_a A \Delta T_a = h_a (\pi DL) \Delta T_a \quad (3-41)$$

한편 지수법칙 유체가 난류로 관속을 흐를 경우에는 다음의 실험식이 제안되어 있다.

$$\frac{h_L D}{k} = 0.0041 \left( \frac{D^n \bar{V}^{2-n} \rho}{m 8^{n-1}} \right)^{0.99} \left[ \frac{m C_p}{k} \left( \frac{8 \bar{V}}{D} \right)^{n-1} \right]^{0.4} \quad (3-42)$$

여기서  $h_L$ 는 대수평균온도차를 기준으로 한 열이동계수이다.

[예제 3-17] 비뉴우튼 유체가 안지름 1.0 in 인 관을 600 lb/h의 유량으로 흐르면서 관 외부의 수증기에 의하여 가열된다. 유체는 100°F에서 관입구로 들어오며, 관의 길이는 5 ft이고 관벽의 온도  $T_w$ 는 200°F로 일정하다. 유체의 평균 물리적 성질은  $\rho = 65 \text{ lb/ft}^3$ ,  $C_p = 0.5 \text{ Btu/lb} \cdot \text{°F}$ ,  $k = 0.7 \text{ Btu/ft} \cdot \text{h} \cdot \text{°F}$ 이다. 유체는

지수법칙 유체로서  $n=0.4$ 이고  $100^\circ\text{F}$  및  $200^\circ\text{F}$ 에서  $m$ 는 각각 94 및  $42 \text{ lb}\cdot\text{s}^{n-2}\cdot\text{ft}^{-1}$ 이며,  $\log m$ 대  $T$ 를 그리면 거의 직선이 된다. 유체가 층류로 흐를 경우 출구에서 유체의 벌크 온도를 구하라.

[풀이] 식(3-39)에서  $h_a$ 를 구하려면 출구 유체 온도를 알아야 하기 때문에 이 문제는 시행착오법으로 풀어야 한다. 먼저  $T_{b0}=130^\circ\text{F}$ 로 가정하면 평균벌크온도  $T_b=(130+100)/2=115^\circ\text{F}$

$100^\circ\text{F}$ 와  $200^\circ\text{F}$ 에서 주어진  $m$ 값에 대해  $\log T$ 를 그린다. 두 점을 연결한 직선으로 부터  $T_b=115^\circ\text{F}$ 에서의  $m_b$ 를 읽으면 83이다.

식(3-39)의 각 항을 계산하면

$$\frac{3n+1}{4n} = \frac{3(0.4)+1}{4(0.4)} = 1.375$$

$$G_z = \frac{WC_p}{kL} = \frac{600(0.5)}{0.7(5.0)} = 85.8$$

$$\frac{h_a(1.0/12)}{0.7} = 1.75(1.375)^{1/3}(85.8)^{1/3} \\ (83/42)^{0.14}$$

$h_a$ 에 대해 풀면

$$h_a = 79.2 \text{ Btu/ft}^2\cdot\text{h}\cdot^\circ\text{F} (450 \text{ W/m}^2\cdot\text{K})$$

열수지에 의하여 전열속도  $q$ 는

$$q = mC_p(T_{b0} - T_{bi})$$

이는 식(3-41)과 같아야 한다. 따라서

$$q = mC_p(T_{b0} - T_{bi}) = h_a(\pi DL)\Delta T_a$$

(3-40)에서

$$\Delta T_a = \frac{(200-100) + (200-T_{b0})}{2} \\ = 150 - 0.5T_{b0}$$

이를 앞 식에 대입하면

$$600(0.5)(T_{b0}-100) = 79.2(\pi \times 1/12 \times 5) \\ (150 - 0.5T_{b0})$$

$$T_{b0} = 129^\circ\text{F} (327.1 \text{ K})$$

계산한  $129^\circ\text{F}$ 는 처음 가정한  $130^\circ\text{F}$ 에 거의 근사한 값이므로 더 이상 계산을 반복할 필요가 없다. 그러나 만약 차이가 많을 경우에는

가정값과 계산값이 거의 같아질 때까지 동일 계산을 반복한다.

## 3-6. 傳熱裝置

### 3-6-1. 熱交換器

일반적으로 두 流體 사이의 열교환은 열교환기로 한다. 가장 간단한 二重管式 열교환기(double pipe heat exchanger)에서 傳熱速度는 다음 식으로 주어진다.

$$q = UA\Delta T_{lm} \quad (3-43)$$

여기서

$$\Delta T_{lm} = (\Delta T_2 - \Delta T_1) / \ln(\Delta T_2 / \Delta T_1) \quad (3-44)$$

$\Delta T_{lm}$ 은 대수평균온도차이고,  $\Delta T_1$ 과  $\Delta T_2$ 는 열교환기의 양끝에서의 高溫 유체와 低溫 유체 사이의 온도차이다. 식(3-39)는 순수한 向流 및 並流인 경우에 적용된다.

多管式 열교환기(shell and tube heat exchange)에서는 十字流가 생기므로 식(3-44)의 대수평균온도차에 補正係수  $F_T$ 를 곱해 주어야 한다.  $F_T$ 를 구하는 도표는 열이동에 관한 참고서적에 많이 나와 있다.

[예제 3-18] 우유가 안지름이 2.5 cm인 Pipe cooler를 통하여  $0.4 \text{ kg/s}$ 의 유량으로 흐르고 있다. 우유의 초기 온도는  $49^\circ\text{C}$ 이며  $18^\circ\text{C}$ 까지 냉각시키려고 한다. Pipe cooler는  $10^\circ\text{C}$ 의 항온수조에 담겨 있을 때 필요한 pipe의 길이는 얼마인가? 총괄열전달계수는  $9.00 \text{ W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ 이며 우유의 비열은  $3,890 \text{ J/kg}\cdot^\circ\text{C}$ 이다.

[풀이] 우유에서 뺏어야 하는 熱量

$$q = C_p W \Delta T \\ = 3,890 \times 0.4 \times (49 - 18) = 4,824 \text{ J/s}$$

또한 pipe cooler의 전열속도식은

$$q = UA\Delta T_{lm}$$

여기서

$$\Delta T_{lm} = \frac{(49-18) - (18-10)}{\ln[(49-18)/(18-10)]} = 19.6^\circ\text{C}$$

따라서

$$48,240 = 900 \times A \times 19.6$$

$$A = 2.73 \text{ m}^2$$

$A = \pi DL$ 이므로 필요한 pipe의 길이는

$$L = 2.73 / (\pi \times 0.025) = 34.8 \text{ m}$$

[예제 3-19] 식물유 1,000 kg/h를 이중관식 열교환기에서 60°C에서 30°C까지 냉각시킨다. 냉각수는 向流로 흐르며 20°C에서 들어와 40°C로 나간다. 필요한 냉각수량과 전열면적을 구하라. 총괄열이동계수는 50 W/m<sup>2</sup>·°C, 식물유와 냉각수의 비열은 각각 2.0×10<sup>3</sup>, 4.2×10<sup>3</sup> J/kg·°C이다.

[풀이] 식물유로부터 빼어야 하는 열량

$$q = (2.0 \times 10^3)(1,000/3,600)(60-30) \\ = 16,670 \text{ J/s (W)}$$

이 열을 냉각수가 가지고 나가므로 냉각수량을  $F$  kg/s라 하면

$$16,670 = (4.2 \times 10^3)(F)(40-20)$$

$$F = 0.1984 \text{ kg/s} = 714.3 \text{ kg/h}$$

열교환기에서

$$\Delta T_1 = 60 - 40 = 20$$

$$\Delta T_2 = 30 - 20 = 10$$

$$\Delta T_{lm} = (20-10) / \ln(20/10) = 14.43$$

$$A = q / U \Delta T_{lm} = 16,670 / (50)(14.43) \\ = 23.10 \text{ m}^2$$

즉, 필요한 내각수량은 714 kg/h이고, 전열면적은 23.1 m<sup>2</sup>이다.

### 3-6-2. 교반탱크에서의 傳熱

탱크에서 액체를 가열할 때는 보통 원통형의 용기 내에 임펠러를 설치하여 액체를 교반하면서 탱크 주위에 설치된 재킷(jacket)이나 탱크 내에 설치된 코일에 가열 매체를 통한다.

재킷을 설치한 용기 내에서 뉴우턴 유체를 교반할 때 표면열이동계수는 다음식으로 구한다.

$$\frac{hD_t}{k} = a \left( \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} \right)^b \left( \frac{C_p \mu}{k} \right)^{1/3} \left( \frac{\mu}{\mu_w} \right)^m \quad (3-45)$$

여기서  $h$ 는 탱크 내의 교반 액체에 대한 표면열이동계수,  $D_t$ 는 탱크의 안지름,  $D_a$ 는 교반기의 지름,  $N$ 는 교반기의 회전수,  $\mu_w$ 는 벽면 온도에서의 점도이다.  $\mu$  이외의 액체의 물리적 성질은 유체의 평균 온도에서 구한다. 식(3-45)의 상수,  $a$ ,  $b$  및  $m$ 은 교반형식에 따라 달라지는 값으로 다음과 같다.

① Paddle agitator with no baffles

$$a = 0.36, \quad b = 2/3, \quad m = 0.21$$

$$Re' = 300 \sim 3 \times 10^5$$

② Flat-blade turbine with no baffles

$$a = 0.54, \quad b = 2/3, \quad m = 0.14$$

$$Re' = 30 \sim 3 \times 10^5$$

③ Flat-blade turbine with baffles

$$a = 0.74, \quad b = 2/3, \quad m = 0.14$$

$$Re' = 500 \sim 3 \times 10^5$$

④ Anchor agitator with baffles

$$a = 1.0, \quad b = 1/2, \quad m = 0.18 \quad Re' = 10 \sim 300$$

$$a = 0.36, \quad b = 2/3, \quad m = 0.18$$

$$Re' = 300 \sim 4 \times 10^4$$

⑤ Helical ribbon with no baffles

$$a = 0.633, \quad b = 1/2, \quad m = 0.18, \quad Re' = 8 \sim 10^5$$

식품 가공에 사용되는 재킷이 설치된 용기 총괄열이동계수는 표 3-2와 같다.

표 3-2. 재킷이 설치된 용기에서 총괄열이동계수

응축유체	가열유체	탱크재질	$U$ (W/m <sup>2</sup> ·°C)
수증기	뜨거운 액체	철	1,800
수증기	진한 액체	철	900
수증기	페이스트	스테인레스강	300
수증기	끓는 물	구리	1,800

[예제 3-20] Jacked pan에서 50 kg의 pea soup

를 가열하기 시작했을 때 필요한 수증기 량을 구하라. 수우프의 초기온도는 18°C이며 수증기의 압력은 100 kPa gauge이다. Pan의 전열 면적은 1 m<sup>2</sup>, 총괄열이동계수는 300 W/m<sup>2</sup>·°C이다.

[풀이] 수증기표에서 100 kPa gauge의 수증기의 포화온도는 120°C이고, 잠열은 2,202 kJ/kg이다.

$$q = UA\Delta T$$

$$= 300 \times 1 \times (120 - 18) = 30,600 \text{ J/s}$$

$$\text{수증기 소요량} = q/\lambda$$

$$= 30,600 / 2,202 = 1.4 \times 10^{-2} \text{ kg/s} = 50 \text{ kg/h}$$

[예제 3-21] 예제 3-19의 jacketed pan에서 pea soup을 90°C까지 가열하는데 걸리는 시간을 구하라. 수우프의 비열은 3.95 kJ/kg·°C이다.

[풀이] 교반되는 용기 중에서 액체를 가열할 때 온도변화는 다음 식으로 주어진다.

$$\frac{T - T_\infty}{T_0 - T_\infty} = \exp\left(-\frac{hA}{C_p \rho V} t\right) \quad (3-46)$$

여기서  $T_\infty = 120^\circ\text{C}$  (가열매체의 온도)

$$T_0 = 18^\circ\text{C} \text{ (수우프의 초기 온도)}$$

$$T = 90^\circ\text{C} \text{ (} t \text{ 시간 후의 수우프의 온도)}$$

$$h = 300 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}, C_p = 3.95 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$$

$$\rho V = 50 \text{ kg}, A = 1 \text{ m}^2,$$

$$t = \frac{-3.95 \times 10^3 \times 50}{300 \times 1} \ln\left(\frac{90 - 120}{18 - 120}\right)$$

$$= 803 \text{ s} = 13.3 \text{ min}$$

[예제 3-22] 지름 1.83 m인 방해판(baffle)이 설치된 교반 용기에서 어떤 액체를 가열한다. 액체의 온도는 300 K, 교반기는 flat blade turbine이며 지름 0.61 m, 100 rpm으로 회전한다. 재킷에 더운물을 통하여 가열하며 용기 벽면의 온도는 355.4 K로서 일정하다. 액체의 물리적 성질은 다음과 같다.  $\rho = 961 \text{ kg/m}^3$ ,  $C_p = 2,500 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ ,  $k = 0.173 \text{ W/m} \cdot \text{K}$ ,  $\mu(300\text{K})$

$= 1,000 \text{ CP}$ ,  $\mu(355.4\text{K}) = 84 \text{ CP}$  재킷 벽면에 대한 표면열이동계수를 구하라.

[풀이] 다음 값이 주어졌다.

$$D_i = 1.83 \text{ m}, D_a = 0.61 \text{ m}, N = 100/60 \text{ rps}$$

$$\mu(300\text{K}) = 1,000 \text{ CP} = 1.00 \text{ Pa} \cdot \text{s} = 1.00 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

$$\mu_w(355.4\text{K}) = 84 \text{ CP} = 0.084 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$= 0.084 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$$

먼저 300 K에서 레이놀드수를 계산한다.

$$Re' = \frac{D_a^2 N \rho}{\mu} = \frac{(0.61)^2 (100/60) (961)}{1.00} = 596$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{(2,500)(1.00)}{0.173} = 14,450$$

식(3-40)을 사용하며 방해판을 설치하였고 교반기는 flat blade turbine이므로  $a = 0.74$ ,  $b = 2/3$ ,  $m = 0.14$ 이다.

$$\frac{hD_i}{k} = 0.74 (Re')^{2/3} (Pr)^{1/3} (\mu/\mu_w)^{0.14}$$

$$\frac{h(1.83)}{0.173} = 0.74 (596)^{2/3} (14,450)^{1/3} (1000/84)^{0.14}$$

$$h = 170.6 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \text{ (} 30.0 \text{ Btu/ft}^2 \cdot \text{h} \cdot ^\circ\text{F)}$$

### 3-7. 복사 전열

복사에 의한 열전달은 열이 복사에너지로 전달되는 현상이다. 물체는 표면에서 복사에너지를 방출하며, 복사에너지는 다른 물체에 닿으면 반사, 흡수 및 투과한다.

두 물체 사이의 복사전열은 다음 식으로 주어진다.

$$q = F_{12} A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (3-47)$$

여기서  $T_1, T_2$ 는 물체 1과 2의 온도(K),  $A_1$ 은 물체 1의 표면적(m<sup>2</sup>),  $\sigma$ 는 Stefan-Boltzmann 상수로서  $5.6703 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ ,  $F_{12}$ 는 view factor로서 표면 1에서 모든 방향으로 방출된 복사에너지 중에서 표면 2에 도달하는 비율이다.  $F_{12} A_1 = F_{21} A_2$ 이다. 물체 1이 물체 2로 둘러싸여 있는 경우와 물체 1과 2가 평행

할 경우에는 각각 아래 식이 성립된다. 그 이외의 경우는 간단하지 않으며 여러가지 참고서적을 보기 바란다.

$$\frac{1}{F_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left( \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \right) \quad (3-48)$$

$$\frac{1}{F_{12}} = \frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{1}{\varepsilon_2} - 1 \quad (3-49)$$

여기서  $\varepsilon$ 은 복사능(emissivity)이다.

[예제 3-23] 벽온도가 230°C인 oven 중에서 표면적이 0.06m<sup>2</sup>인 파자를 굽는다. 파자의 복사능이 0.5, 표면온도 100°C일 때 복사에 의한 열이동량을 구하라.

[풀이] 식(3-48)에서  $A_1 \ll A_2$ 이므로  $F_{12} = \varepsilon_1 = 0.5$ . 따라서

$$\begin{aligned} q &= \varepsilon_1 A_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4) \\ &= 0.5 \times 0.06 \times 5.67 \times 10^{-8} (503.2^4 - 373.2^4) \\ &= 76.07 \text{ J/s} \end{aligned}$$

복사는 일반적으로 대류와 함께 일어나므로 복합적으로 생각하여야 한다.

식(3-47)은 고체 주위의 벽 면적이 아주 클 때 대류전열식과 같은 형식으로 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$q_{rad} = h_r A_1 (T_1 - T_2) \quad (3-50)$$

여기서  $T_1$ 은 고체 표면의 온도,  $T_2$ 는 공기와 주위 벽면의 온도이다.  $h_r$ 는 복열이동계수로서 다음 식으로 표현된다.

$$h_r = \frac{\varepsilon_1 \sigma (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \quad (3-51)$$

복사와 대류가 복합적으로 일어날 경우 총전열속도  $q$ 는

$$q = q_{conv} + q_{rad} = (h_c + h_r) A_1 (T_1 - T_2) \quad (3-52)$$

[예제 3-24] [예제 2-23]에서 복사와 대류에 의하여 열이동이 된다고 생각하고 복합열이동계수와 복합열이동량을 구하라. 대류열이동계수를 85 W/m<sup>2</sup>·K이라 생각한다.

[풀이] 식(3-51)에서

$$\begin{aligned} h_r &= \frac{(5.67 \times 10^{-8})(0.5)(503.2^4 - 373.2^4)}{503.2 - 373.2} \\ &= 9.753 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \end{aligned}$$

$$h = h_c + h_r = 8.5 + 9.753 = 18.25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

$$\begin{aligned} q &= (18.25)(0.06)(503.2 - 373.2) \\ &= 142.2 \text{ W(J/s)} \end{aligned}$$

### 3-8. 保温과 熱損失.

전열장치나 배관의 보온은 에너지 절약을 위하여 필수적이다. 보온을 했을 때와 안했을 때의 열손실량의 계산에 대한 보기를 몇가지 나타내었다.

[예제 3-25] 가스가열식 炊飯裝置가 保温되지 않은 경우와 두께 5cm의 保温材로 保温된 경우 열손실량을 구하라. 장치의 표면은 평면이며, 온도 100°C, 복사능 0.5, 면적 1m<sup>2</sup>이다. 보온재는 열전도도 0.05 W/m·K, 복사능 0.9, 실온은 20°C이다.

[풀이] (1) 보온하지 않은 경우

$$T_1 = 373.2 \text{ K}, T_2 = 293.2 \text{ K}, L = 1 \text{ m},$$

$$T_f = (T_1 + T_2)/2 = 333.2 \text{ K}$$

333.2 K에서 공기의 物性은

$$\rho = 1.026 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 2.01 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$C_p = 1.009 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$$

$$k = 2.87 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$$

$$\beta = 3.67 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

$$Gr = \frac{gL^3 \rho^2 \beta \Delta T}{\mu^2}$$

$$= \frac{(9.8)(1)^3 (1.026)^2 (3.67 \times 10^{-3})}{(2.01 \times 10^{-5})^2}$$

$$= 7.497 \times 10^9$$

$$Pr = \frac{C_p \mu}{k} = \frac{(1.009 \times 10^3)(2.01 \times 10^{-5})}{2.87 \times 10^{-2}}$$

$$= 0.7067$$

$$Gr \cdot Pr = (7.497 \times 10^9)(0.7067) = 5.298 \times 10^9$$

표 3-1(제 7 회)에서

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0.13(Gr \cdot Pr)^{1/3} \\
 &= 0.13(5.298 \times 10^9)^{1/3} = 2.247 \times 10^2 \\
 h_c &= Nu k / L = (2.247 \times 10^2)(2.87 \times 10^{-2}) / (1) \\
 &= 6.449 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 h_r &= \frac{\sigma \varepsilon_1 (T_1^4 - T_2^4)}{T_1 - T_2} \\
 &= \frac{(5.67 \times 10^{-8})(0.5)(373.2^4 - 293.2^4)}{373.2 - 293.2} \\
 &= 4.203 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 h &= h_c + h_r = 0.6449 + 4.203 \\
 &= 10.65 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 q &= h A_1 (T_1 - T_2) \\
 &= (10.65)(1)(373.2 - 293.2) \\
 &= 8.520 \times 10^2 \text{ W}
 \end{aligned}$$

(2) 보온한 경우

보온재의 표면온도를 40°C라 가정하면

$$\begin{aligned}
 q &= k A \Delta T / L \\
 &= (0.05)(1)(373.2 - 313.2) / 0.05 \\
 &= 60.00 \text{ W}
 \end{aligned}$$

가정한 보온재 표면 온도를 사용하여 복사, 자연대류에 의한 열손실량  $q$ 를 (1)에서와 동일방법으로 계산하여 보온재를 통한 전도에 의한 열이동량과 일치되면 표면온도의 가정이 맞게 된다. 시행착오에 의해 계산을 하여야 하나 여기서는 생략한다. 보온재의 표면온도를 실온과 같은 20°C라 하면 보온재를 통한 전도에 의한 열이동량  $q = (0.05)(1)(373.2 - 293.2) / (0.05) = 80.00 \text{ W}$ 이다. 보온재를 통한 熱損失은 이보다 적을 것이다.

따라서

보온재가 없는 경우 열손실 = 852 W  
 보온재가 있는 경우 열손실 = 80 W 이하

[예제 3-26] 예제 3-4에 나타난 수증기를 공급하는 鋼管을 보온하지 않은 경우 1 m當 열손실을 구하라. 鋼管은 수평으로 설치되어 있

고 외부 표면온도는 160°C, 복사능은 0.5, 실온은 20°C이다.

[풀이]  $T_w = 433.2 \text{ K}$ ,  $T_b = 293.2 \text{ K}$   
 $L = 0.0605 \text{ m}$ ,  $g = 9.8 \text{ m/s}^2$   
 $T_f = (433.2 + 293.2) / 2 = 363.2 \text{ K}$   
 363.2 K에서 공기의 물성은 다음과 같다.  
 $\rho = 0.942 \text{ kg/m}^3$   
 $\mu = 2.15 \times 10^{-5} \text{ Pa} \cdot \text{s}$   
 $C_p = 1.011 \times 10^3 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$   
 $k = 3.09 \times 10^{-2} \text{ W/m} \cdot \text{K}$   
 $\beta = 3.67 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$   
 $Gr = g L^3 \rho^2 \beta \Delta T / \mu^2$   
 $= (9.8)(0.0605)^3 (0.942)^2 (3.67 \times 10^{-3})(433.2 - 293.2) / (2.15 \times 10^{-5})^2$   
 $= 2.140 \times 10^6$   
 $Pr = C_p \mu / k$   
 $= (1.011 \times 10^3)(2.15 \times 10^{-5}) / (3.09 \times 10^{-2})$   
 $= 0.7034$   
 $Gr \cdot Pr = (2.140 \times 10^6)(0.7034) = 1.506 \times 10^6$

표 3-1에서

$$\begin{aligned}
 Nu &= 0.53(Gr \cdot Pr)^{1/4} \\
 &= 0.53(1.506 \times 10^6)^{1/4} = 18.57 \\
 h_c &= Nu k / L = (18.57)(3.09 \times 10^{-2}) / (0.0605) \\
 &= 9.485 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 h_r &= \frac{\sigma \varepsilon (T_w^4 - T_b^4)}{(T_w - T_b)} \\
 &= \frac{(5.6703 \times 10^{-8})(0.5)(433.2^4 - 293.2^4)}{(433.2 - 293.2)} = 5.565 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 h &= h_c + h_r = 9.485 + 5.565 \\
 &= 15.05 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} \\
 q &= h A_1 (T_w - T_b) \\
 &= (15.05)(0.1901)(433.2 - 293.2) \\
 &= 4.005 \times 10^2 \text{ W}
 \end{aligned}$$

따라서 열손실은 401 W이다. [예제 3-4]에서 보온한 경우의 열손실은 46.1 W이다.