

# 食品工學 計算法

卜 裕 亮

〈延世大 工大 食品工學科 教授〉

## 제 3 장 열이동

식품의 건조, 냉동, 살균, 조리 등에서와 같이 대부분의 식품가공 공정에서는 열이동을 고려하지 않으면 안되는 조작이 많다.

열이동(heat transfer)이란 열이 이동하는 과정으로서 전도(conduction), 대류(convective) 및 복사(radiation)의 3개의 메카니즘으로 大別된다. 또한 열이동은 온도분포가 시간에 따라 변하지 않고 일정한 定常狀態傳熱과 시간에 따라 변하는 非定常狀態傳熱로 나누어진다.

### 3-1. 定常狀態傳熱

#### 3-1-1. 傳導에 의한 열이동

傳導에 의한 열의 이동은 다음의 푸우리에 法則(Fourier's law)에 따른다.

$$q = -kA \frac{dT}{dx} \quad (3-1)$$

여기서  $q$ 는  $x$ 방향으로의 열이동 속도 [ $\text{Js}^{-1} = \text{W}$ ],  $A$ 는 열이동 방향에 수직인 단면적 [ $\text{m}^2$ ],  $T$ 는 온도 [ $\text{K}$ ],  $k$ 는 열전도도(thermal conductivity) [ $\text{W/m}\cdot\text{K}$ ],  $x$ 는 열이동 거리 [ $\text{m}$ ]이

다.  $k$ 는 물질 固有의 物性값으로 온도에 따라 변하지만 온도차가 크지 않을 때는 일정하다고 볼 수 있다.

단면적  $A$ 와 열전도도  $k$ 가 일정한 그림 3-1 과 같은 평판 또는 벽을 통한 전도는 식(3-1) 을 이용하면 다음과 같아진다.

$$q = kA(T_1 - T_2) / \Delta x \quad (3-2)$$

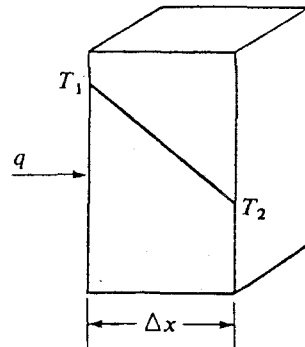


그림 3-1. 單-평판을 통한 열이동

또한

$$q = \frac{T_1 - T_2}{\Delta x / kA} = \frac{T_1 - T_2}{R} = \frac{\text{추진력}}{\text{저항}} \quad (3-3)$$

여기서  $R = \Delta x / kA$ 로서 열이동 저항 [ $\text{K/W}$ ]이다.

한편 그림 3-2와 같이 多層壁을 통한 열의

$$A_{lm} = \frac{(2\pi Lr_2) - (2\pi Lr_1)}{\ln(2\pi Lr_2/2\pi Lr_1)} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)} \quad (3-6)$$

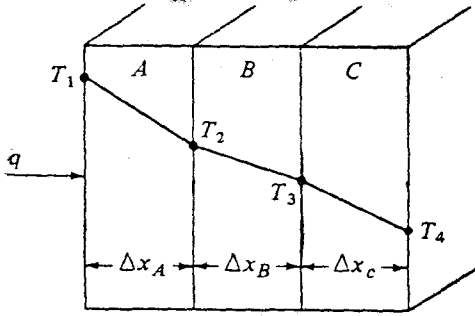


그림 3-2 多層壁를 통한 열이동

이동은 다음 식으로 주어진다.

$$q = \frac{T_1 - T_4}{\Delta x_A/k_A A + \Delta x_B/k_B A + \Delta x_C/k_C A} = \frac{T_1 - T_4}{R_1 + R_2 + R_3} = \frac{T_1 - T_4}{\sum R} \quad (3-4)$$

그림 3-3과 같이 길이  $L$ 인 원통을 통해 열이 반지름 방향으로 이동될 때 열이동 斷面은  $(2\pi rL)$ 로서 안쪽에서 바깥쪽으로 갈수록 커짐으로 다음과 같은 對數平均面積(log mean area)  $A_{lm}$ 을 이용한다.

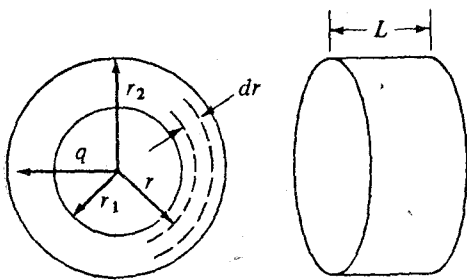


그림 3-3 원통을 통한 열이동

$$q = kA_{lm} \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} = \frac{T_1 - T_2}{(r_2 - r_1)/(kA_{lm})} = \frac{T_1 - T_2}{R} \quad (3-5)$$

여기서

[예제 3-1] 두께가 10 cm인 코르크(cork) 판의 한쪽면은  $-12^\circ\text{C}$ , 다른 쪽면은  $21^\circ\text{C}$ 이다. 만약 이 온도 범위에서 코르크의 평균 열전도도가  $0.042\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ 라면 코르크판  $1\text{m}^2$ 를 통한 열이동속도는 얼마인가?

[풀이]  $T_1 = 21^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = -12^\circ\text{C}$ ,  $A = 1\text{m}^2$   
 $k = 0.042\text{W/m}\cdot^\circ\text{C}$ ,  $\Delta x = 0.1\text{m}$

따라서  $q = (0.042)(1)(21 + 12)/0.1 = 13.9\text{W}$

[예제 3-2] 식품 냉장고를 콘크리트벽 3 cm, 단열재 8cm, 건축용 벽돌 6cm의 3層壁으로 保温하였다. 냉장고 內壁面이  $-40^\circ\text{C}$ , 外壁面이  $30^\circ\text{C}$ 일 때 壁面  $1\text{m}^2$ 當의 열이동량을 구하라. 단 콘크리트, 단열재 및 건축용 벽돌의 열전도도는 각각 0.8, 0.06 및  $0.6\text{W/m}\cdot\text{K}$ 이다.

[풀이] 식 (3-4)를 이용하여 계산한다.

$$R_1 = \Delta x_A/k_A A = (0.03)/(0.8)(1) = 0.0375 \text{ K/W}$$

$$R_2 = (0.08)/(0.06)(1) = 1.333 \text{ K/W}$$

$$R_3 = (0.06)/(0.6)(1) = 0.1 \text{ K/W}$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3 = 0.0375 + 1.333 + 0.1 = 1.471 \text{ K/W}$$

$$Q = [(30 + 273.2) - (-40 + 273.2)]/1.471 = 47.59\text{W}$$

따라서 外壁으로부터 內壁으로의 열이동량은  $47.6\text{W}$ 이다.

[예제 3-3] 안쪽 반지름이 0.5cm, 바깥쪽 반지름이 2.0cm인 벽이 두꺼운 고무 튜브를 물중탕(water bath)의 일시적인 냉각코일로 사용하고저 한다. 튜브의 내부로 얼음물이 빠

른 속도로 흐르며 內壁의 온도는 274.9K이고 外壁의 온도는 297.1K이다. 냉각코일에 의하여 물중탕으로부터 14.65W의 열을 제거하여야 한다면 고무튜브는 몇 m가 필요할까? 단 고무튜브의 열전도도는 0.151W/m·K이다.

[풀이] 식 (3-5)를 사용한다.

$$A_1 = 2\pi L r_1 = 2\pi(1)(0.005) = 0.0314\text{m}^2$$

$$A_2 = 2\pi L r_2 = 2\pi(1)(0.02) = 0.1257\text{m}^2$$

$$A_{lm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)} = \frac{0.1257 - 0.0314}{\ln(0.1257/0.0314)}$$

$$= 0.0680\text{m}^2$$

$$q = k A_{lm} \frac{T_1 - T_2}{r_2 - r_1} = (0.151)(0.0682)$$

$$\left( \frac{274.9 - 297.1}{0.02 - 0.00} \right) 5 = -15.2\text{W}$$

여기서 부호가 -인 것은 外壁  $r_2$ 에서부터 內壁  $r_1$ 으로 열이 이동한다는 것을 나타낸다.

고무튜브 1m當 15.2W의 열이 제거되므로 필요한 길이는

$$\dots = 14.65/15.2 = 0.964\text{m}$$

여기서 고무의 열전도도는 아주 낮다는 것을 유의할 필요가 있으며 따라서 일반적으로 냉각코일로는 금속튜브가 사용된다. 그리고 이 경우 액체 필름의 저항은 아주 작기 때문에 무시하였다.

[예제 3-4] Steam cooker에 수증기를 공급하는 2B鋼管(外徑 60.5mm, 內徑 52.9mm)을 마그네시아 5cm와 석면 1cm로 保温하였다. 鋼管 1m當의 熱損失량을 구하라. 또 鋼管和 마그네시아 및 마그네시아와 석면의 경계면 온도를 구하라. 鋼管 內壁面의 온도는 160°C, 保温材外壁面은 30°C이고, 鋼管, 마그네시아, 석면의 열전도도는 각각 50, 0.06, 0.08W/m·K이다.

[풀이]

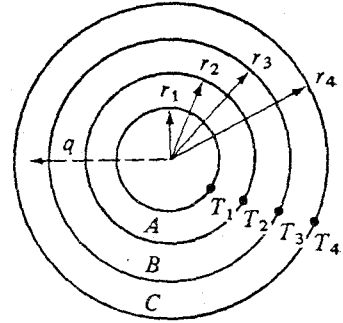


그림 3-4 多層 원통을 통한 半徑 方向으로의 열이동

그림 3-4에서 A를 管壁, B를 마그네시아층, C를 석면층이라 하면

$$r_1 = 0.0529/2 = 0.02645\text{m}$$

$$r_2 = 0.0605/2 = 0.03025\text{m}$$

$$r_3 = 0.03025 + 0.05 = 0.08025\text{m},$$

$$r_4 = 0.08025 + 0.01 = 0.09025\text{m}$$

$$A_1 = 2\pi L r_1 = 2\pi(1)(0.02645) = 0.1661$$

$$A_2 = 2\pi L r_2 = 2\pi(1)(0.03025) = 0.1900$$

$$A_3 = 2\pi L r_3 = 2\pi(1)(0.08025) = 0.5040$$

$$A_4 = 2\pi L r_4 = 2\pi(1)(0.09025) = 0.5668$$

$$A_{Alm} = \frac{A_2 - A_1}{\ln(A_2/A_1)}$$

$$= \frac{0.1900 - 0.1661}{\ln(0.1900/0.1661)} = 0.1778\text{m}^2$$

$$A_{Blm} = 0.3220\text{m}^2, \quad A_{Clm} = 0.5350\text{m}^2$$

$$R_A = (r_2 - r_1)/k_A A_{Alm}$$

$$= (0.03025 - 0.02645)/(50)(0.1778)$$

$$= 4.272 \times 10^{-4}\text{K/W}$$

$$R_B = (0.05)/(0.06)(0.3220)$$

$$= 2.588\text{K/W}$$

$$R_C = (0.01)/(0.08)(0.5350)$$

$$= 0.2336\text{K/W}$$

$$R = R_A + R_B + R_C = 2.822\text{K/W}$$

$$q = \Delta T/R = 130/2.822 = 46.07\text{W}$$

鋼管 1m當의 熱損失은 46.1W이다.

定常狀態에서는  $q=q_A=q_B=q_C$ 이므로 온도  $T_2$ 를 구하기 위하여

$$q=(T_1-T_2)/R_A$$

$$\text{즉 } 46.1=\{(160+273.2)-T_2\}/4.272\times 10^{-4}$$

$$T_2=433.18\text{K}(159.98^\circ\text{C})$$

같은 방법으로  $q=(T_2-T_3)/R_B$

$$46.1=(433.18-T_3)/2.588,$$

$$T_3=313.9\text{K}(40.7^\circ\text{C})$$

즉, 관벽과 마그네시아 경계면의 온도는  $159.98^\circ\text{C}$ , 마그네시아와 석면의 경계면 온도는  $40.7^\circ\text{C}$ 이다.

[예제 3-5] 제빵용 오븐(oven)의 벽을 두께 10cm이고 열전도도가  $0.22\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 인 保温벽돌로 건조하였다. 강철보강판이 벽돌을 관통하여 설치되어 있으며, 보강판의 總斷面積은 오븐 내부 벽면 넓이의 1%이다. 만약 강철의 열전도도가  $45\text{W}/\text{m}\cdot^\circ\text{C}$ 라면 (a) 벽면을 통한 총열손실량에 대한 保温벽돌과 강철을 통한 열손실량의 각각의 비율을 계산하라. (b) 오븐의 內壁 온도가  $230^\circ\text{C}$ , 外壁 온도가  $25^\circ\text{C}$ 일 때 오븐 벽  $1\text{m}^2$ 마다 열손실량을 계산하라.

[풀이] (a) 벽면  $1\text{m}^2$ 를 통한 열손실량을 생각하면

$$\text{벽돌에 대하여 } q_b=k_b A_b \Delta T/\Delta x$$

$$q_b=(0.22)(0.99)(230-25)/0.1=446\text{W}$$

$$\text{강철에 대하여 } q_s=k_s A_s \Delta T/\Delta x$$

$$q_s=(45)(0.01)(230-25)/0.1=923\text{W}$$

$$\text{따라서 } q_b/q_s=0.483$$

강철을 통한 열손실량비율

$$=(1/1.483)\times 100=67.4\%$$

(b) 벽면이 나란히 연결된 경우 총열손실량  $q_T$

$$q_T=q_b+q_s=446+923=1369\text{W}$$

는

즉, 오븐 벽면  $1\text{m}^2$ 마다 총열손실량은 1369W이다.

어떤 경우에는 熱傳導體 내부에서 열이 발생되는 경우가 있다. 식품가공에서 중요한 예는 과일과 채소의 호흡열로서 발생 열량은  $0.3\sim 0.6\text{W}/\text{kg}$ 범위이다. 그림 3-5에 평판 내부에 열이 발생되는 경우를 나타내었다. 열은  $x$ 방향으로만 이동되고 다른 면은 保温되었다고 가정한다.  $x=L$ 과  $x=-L$ 에서 온도  $T_w$ 는

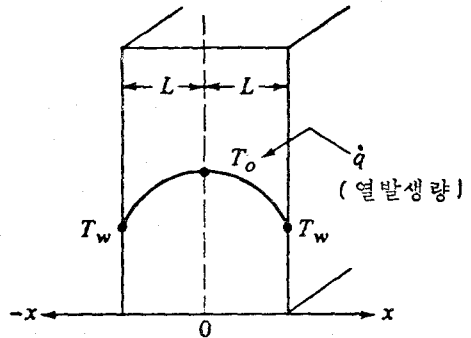


그림 3-5 内部에서 열이 발생되는 평판

일정하고, 단위 부피당 열발생량을  $\dot{q}(\text{W}/\text{m}^3)$ , 熱傳導體의 열전도도를  $k(\text{W}/\text{m}\cdot\text{K})$ 라 하면 다음 식이 성립된다.

$$d^2 T/dx^2 + \dot{q}/k=0 \quad (3-7)$$

이를 적분하면 溫度分布는

$$T=-\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + T_0 \quad (3-8)$$

중심 온도는

$$T_0=\frac{\dot{q}L^2}{2k} + T_w \quad (3-9)$$

정상상태에서 兩面을 통한 총손실량  $\dot{q}_T$ 는 총 열발생량과 같다.

$$\dot{q}_T=\dot{q}(2LA) \quad (3-10)$$

한편 반지름이  $R$ 인 원통 내부에서 균일하게 열이 발생되고 반지름 방향으로만 열이 이동

된다고 하면 温度分布는 다음 식으로 주어진다.

$$T = \frac{\dot{q}}{4k}(R^2 - r^2) + T_w \quad (3-11)$$

여기서  $r$ 은 중심에서부터 거리[m]이다. 중심 온도  $T_0$ 는

$$T_0 = \frac{\dot{q}R}{4k} + T_w \quad (3-12)$$

[예제 5-6] 신선한 식품을 평판모양의 용기에 포장하여 278.0K인 냉장고에 저장하였다. 용기의 上部표면만 278.0K의 공기에 노출되어 있다. 평판의 두께는 152.4mm, 노출 표면적은 0.186m<sup>2</sup>, 식품의 밀도는 641kg/m<sup>3</sup>, 호흡열은 0.070kJ/kg·h이고 열전도도는 0.346 W/m·K이다. 推算하기 위하여 표면 온도가 278K라 가정하고 정상상태에서 식품 内部의 최고 온도와 총열방출량을 계산하라. (註: 이 문제에서 식품 내부에서 공기는 순환되지 않는다고 가정한다. 왜냐하면 호흡하는 동안 공기 순환은 온도를 감소시키므로 공기가 순환되지 않는다고 가정하므로써 신중한 값을 얻을 수 있다.)

[풀이] 식 (3-9)를 이용한다, 호흡열이

0.070kJ/kg·h의 단위로 주어졌으므로 [W/m<sup>3</sup>]의 단위로 환산한다.

$$\begin{aligned} \dot{q} &= (0.070\text{kJ/kg}\cdot\text{h})(1000\text{J/1kJ}) \\ & (1\text{h}/3,600\text{s})(641\text{kg/m}^3) \\ & = 12.46\text{W/m}^3 \end{aligned}$$

$$T_0 = \frac{(12.46)(0.1524^2)}{(2)(0.346)} + 278 = 278.42\text{K}$$

다른 면은 保温되어 있고 표면으로부터 열이 방출되므로. (3-1)에서

$$\begin{aligned} q_T &= \dot{q}(LA) \\ & = (12.46)(0.1524)(0.186) = 0.353\text{W} \end{aligned}$$

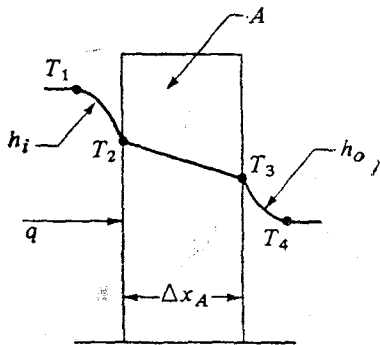
### 3-2. 표면열이동계수와 총괄열이동 계수

고체 표면에서 유체로의 열이동 또는 유체로부터 고체로의 열이동은 다음 식으로 표현된다.

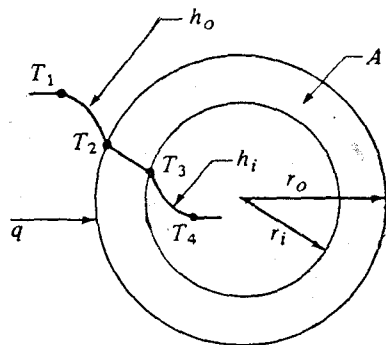
$$q = hA(T_w - T_f) \quad (3-13)$$

여기서  $T_w$ 는 고체의 표면온도 [K],  $T_f$ 는 유체 온도[K]이며,  $h$ 는 표면열이동계수(surface heat transfer coefficient)[W/m<sup>2</sup>·K]이다.

표면열이동계수  $h$ 는 傳熱장치의 형태, 유체



(a) 평판벽



(b) 원통벽

그림 3-6 대류와 전도가 복합된 열이동

의 성질, 流速, 온도차 등의 함수로서 이값을 구할 수 있는 여러가지 실험적 관계식이 발표되어 있으며 이에 대해서는 뒤에서 다룬다.

傳熱장치에서는 고체벽을 통한 傳導傳熱과 고체와 접하고 있는 유체로의 對流傳熱을 함께 고려할 필요가 있다.

그림 3-6과 같이 평판벽 또는 원통벽을 사이에 두고 온도가 높은 유체( $T_1$ )에서 온도가 낮은 유체( $T_2$ )로 열이동 될때 정상상태에서 열이동 속도는 식 (3-13)과 식 (3-2)를 사용하여 평판벽인 경우 다음과 같이 주어진다.

$$q = h_i A (T_1 - T_2) = \frac{k_A A}{\Delta x_A} (T_2 - T_3) = h_o A (T_3 - T_4) \quad (3-14)$$

$1/h_i A$ ,  $\Delta x_A/k_A A$  및  $1/h_o A$ 를 傳熱저항으로 생각하면 傳熱저항이 直列로 연결된 형식이므로

$$q = \frac{T_1 - T_4}{1/h_i A + \Delta x_A/k_A A + 1/h_o A} \quad (3-15)$$

식(3-15)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$q = UA(T_1 - T_4) \quad (3-16)$$

여기서는

$$U = \frac{1}{1/h_i + \Delta x_A/k_A + 1/h_o} \quad (3-17)$$

$U$ 는 총괄열이동계수(overall heat transfer coefficient) [ $W/m^2 \cdot K$ ]이다.

한편 원통벽인 경우에도 식(3-16)과 유사한 형태로 나타낼 수 있으며, 내부 면적  $A_i$ 를 기준으로 한 총괄열이동계수로 나타내면 다음과 같다.

$$q = U_i A_i (T_1 - T_4) \quad (3-18)$$

$$U_i = \frac{1}{1/h_i + (r_o - r_i) A_i / k_A A_{Am} + A_i / A_o h_o} \quad (3-19)$$

[예제 5-7] 외부에 재킷이 설치된 스테인레스강으로 만든 탱크 안의 설탕 용액을 재킷에 게이지 압력  $200kPa$ 의 수증기를 통하여 가

열한다. 수증기 응축측과 설탕 용액측의 표면 열이동계수는 각각  $12,000$  및  $3,000 W/m^2 \cdot ^\circ C$ 이고, 스테인레스강의 두께는  $1.6mm$ , 열전도도는  $21 W/m \cdot ^\circ C$ 이다. 傳熱면적이  $1.4m^2$ 이고 설탕 용액의 온도가  $83^\circ C$ 일 때 1分當 수증기 소요량을 계산하라.

[풀이] 수증기포에서 게이지압  $200kPa$ 인 수증기의 포화온도는  $134^\circ C$ , 응축잠열은  $2,164 kJ/kg$ 이다.

식 (3-17)에서 스테인레스강에 대하여

$$\Delta x_A / k_A = 0.0016 / 21 = 7.6 \times 10^{-5}$$

$$U = \frac{1}{1/12000 + 7.6 \times 10^{-5} + 1/3000} = 2032 W/m^2 \cdot ^\circ C$$

$$q = UA \Delta T = (2032)(1.4)(134 - 83)$$

$$= 1.45 \times 10^5 W$$

수증기 소요량 = 傳熱量 / 응축잠열

$$= 1.45 \times 10^5 / (2.164 \times 10^6) = 0.067 kg/s$$

$$= 4.02 kg/min$$

[예제 5-8]  $267^\circ F$ 의 포화 수증기가  $3/4in.$  鋼管(內徑  $0.824in.$ , 外徑  $1.050in.$ ) 속을 흐른다.

파이프의 외부는  $1.5in.$  두께로 保温하였다. 내부 수증기측과 외측의 표면열이동계수는 각각  $h_i = 1000 Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$  및  $h_o = 2 Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$ 이다. 금속과 保温材의 평균 열전도도는 각각  $45 W/m \cdot K$  또는  $26 Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$  및  $0.064 W/m \cdot K$  또는  $0.037 Btu/h \cdot ft^2 \cdot ^\circ F$ 이다.

(a) 외부 온도가  $180^\circ F$ 일 때 파이프 1ft마다 열손실을 계산하라.

(b) 내부면적  $A_i$ 을 기준으로한  $U_i$ 를 사용하여 (a)의 계산을 반복하라.

[풀이] (a) 파이프의 內徑을  $r_i$ , 外徑을  $r_1$  그리고 保温材의 外徑을  $r_o$ 라 하면 파이프에 1ft에 대한 면적은 다음과 같다.

$$A_i = 2\pi L r_i = 2\pi(1)(0.412/12)$$

$$=0.2157\text{ft}^2$$

$$A_1=2\pi Lr_1=2\pi(1)(0.525/12)$$

$$=0.2750\text{ft}^2$$

$$A_0=2\pi Lr_0=2\pi(1)(2.025/12)$$

$$=1.060\text{ft}^2$$

鋼管과 保温材의 대수평균면적은

$$A_{A1m}=\frac{A_1-A_i}{\ln(A_1/A_i)}$$

$$=\frac{0.2750-0.2157}{\ln(0.2750/0.2157)}=0.245$$

$$A_{B1m}=\frac{A_0-A_1}{\ln(A_0/A_1)}$$

$$=\frac{1.060-0.2750}{\ln(1.060/0.2750)}=0.583$$

(3-15)식으로부터 각 전열저항을 구하면,

$$R_i=\frac{1}{h_i A_i}=\frac{1}{1000(0.2157)}=0.00464$$

$$R_A=\frac{r_1-r_i}{k_A A_{A1m}}=\frac{(0.525-0.412)/12}{26(0.245)}$$

$$=0.00148$$

$$R_B=\frac{r_0-r_1}{k_B A_{B1m}}=\frac{(2.025-0.525)}{0.037(0.583)}=5.80$$

$$R_0=\frac{1}{h_0 A_0}=\frac{1}{2(1.060)}=0.472$$

$$\therefore q=\frac{T_i-T_0}{R_i+R_A+R_B+R_0}$$

$$=\frac{267-80}{(0.00464+0.00148+5.80+0.472)}$$

$$=\frac{267-80}{6.278}=29.8\text{Btu/h}$$

(b) (3-18)식에서,

$$q=U_i A_i (T_i - T_0) = \frac{T_i - T_0}{\sum R}$$

$$U_i = \frac{1}{A_i \sum R} = \frac{1}{0.2157(6.278)}$$

$$=0.738 \frac{\text{btu}}{\text{h} \cdot \text{ft}^2 \cdot ^\circ\text{F}}$$

$$\therefore q=U_i A_i (T_i - T_0)$$

$$=0.738(0.2157)(267-80)$$

$$=29.8\text{Btu/h}(8.73\text{W})$$

(예제 5-9) 두께가 1.6mm인 두개의 창 유리 사이에 0.8mm의 공기막이 있을 때 이들 창 유리를 통한 열 전달속도를 구하라.

21°C인 한쪽면의 열전달계수는 2.84 W/m<sup>2</sup>.

K이고

-15°C인 반대면의 열전달계수는 11.4 W/m<sup>2</sup>·K이다.

유리와 공기 열전도도는 각각 0.52 W/m·K, 0.031 W/m·K이다.

[풀이] 열전달에 대한 다섯가지의 저항이 있는

R<sub>1</sub>, R<sub>5</sub>는 공기에 노출된 각 유리면에서의 대류저항이고

R<sub>2</sub>, R<sub>4</sub>는 각기 창 유리의 전도저항이며

R<sub>3</sub>는 유리 사이에 있는 공기막의 전도저항이다.

$$\frac{1}{U} = R_1 + R_2 + R_3 + R_4 + R_5 \text{에서}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{K_1} + \frac{X_2}{K_2} + \frac{X_3}{K_3} + \frac{1}{h_2}$$

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{2.84} + \frac{1.6 \times 10^{-3}}{0.52} + \frac{0.8 \times 10^{-3}}{0.031}$$

$$+ \frac{1.6 \times 10^{-3}}{0.52} + \frac{1}{11.4}$$

$$=0.4717$$

$$U = 2.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$$

$$\therefore \frac{q}{A} = U \Delta T = 2.12(21 - (-15))$$

$$=76.32 \text{ W/m}^2$$