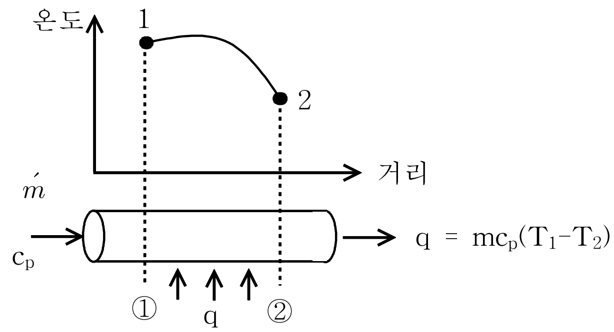
Chapter 1. 서론

- 열역학(thermodynamics)
  평형 상태에서의 처음과 마지막의 상태량을 취급
  단위 : J

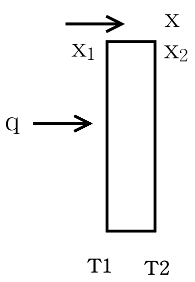


- 열전달(heat transfer) : q (W = J/s))

물체 사이의 온도차에 의해서 일어나는 에너지 이동을 취급
상태량의 변화를 시간의 함수로 나타냄
단위: W = J/s

1. 전도열전달(conduction heat transfer) : 고체 또는 정지 유체에서의 열전달

예) 제빙 (freezing of water), 피부화상 (burning of skin)



$\frac{q}{A} \sim \frac{\partial T}{\partial x}$, $\therefore q = -kA\frac{\partial T}{\partial x}$: Fourier의 열전도법칙

$x_2 > x_1$ 일 때 $T_1 > T_2$ 이므로 (-) : 열역학 제2법칙을 만족하기 위함

$\frac{\partial T}{\partial x}$ = 열유동 방향에서의 온도구배(temperature gradient)

k : 열전도도(thermal conductivity, W/m·K) -열이 얼마나 빨리 흐르는가 나타냄

$q = -kA\frac{\triangle T}{\triangle x} = -kA\frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1}$: 열전도성이 클수록 △T는 작아짐

1.2 열전도도(thermal conductivity), k

Fourier 법칙으로부터 실험적으로 구하고, 재료에 따라 값이 좌우됨.
주어진 재료에서 k ~ f(T)

◦열전도의 기전(mechanism)

- 가스(기체) : 기체분자의 운동에너지는 기체의 온도에 좌우됨

$k_{gas} \sim \sqrt{T_{abs}}$

- 액체 : 기체와 열전달 기전이 동일하나 훨씬 복잡

$k_{liquid} \sim$ weak f(T)

- 고체 : 격자 진동, 자유전자의 이동

$k_{solid} \sim$ weak f(T)

※ 대체로 good electrical conductor(or insulator) → good heat conductor(or insulator)

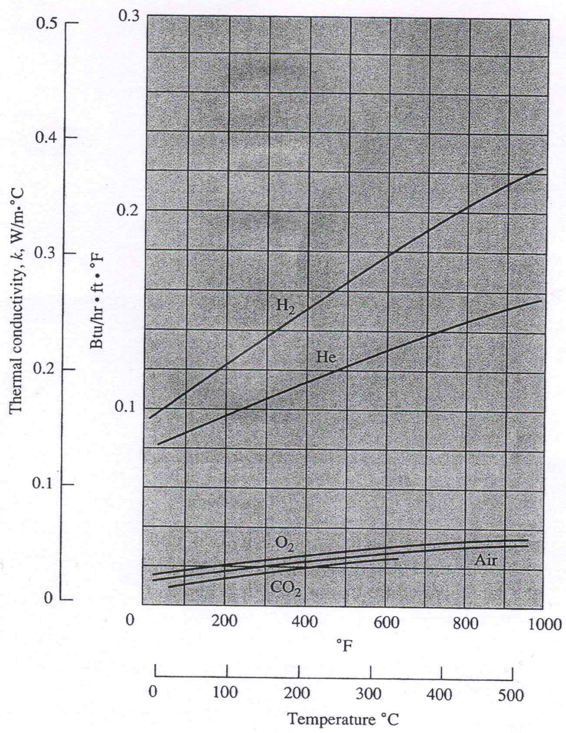


Figure 1-4 | Thermal conductivities of some typical gases [1 W/m·°C = 0.5779 Btu/h·ft·°F].

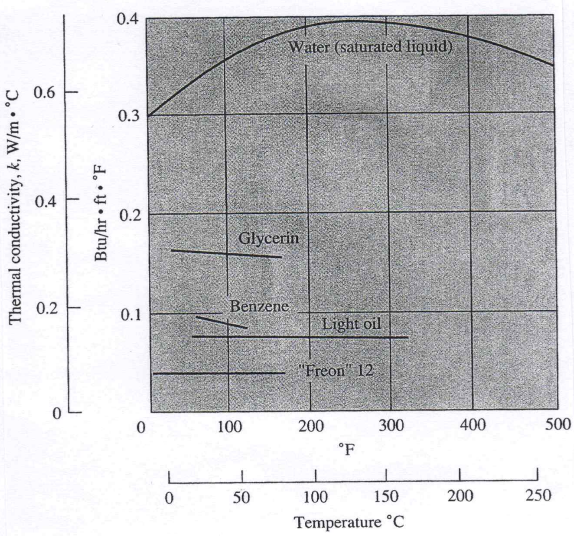


Figure 1-5 | Thermal conductivities of some typical liquids.

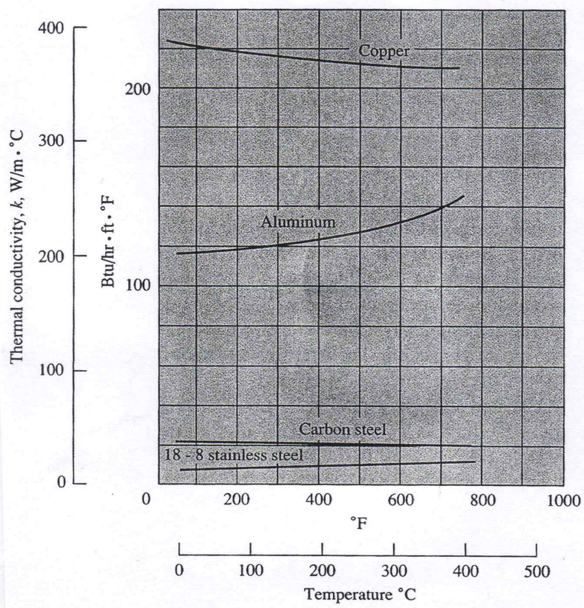
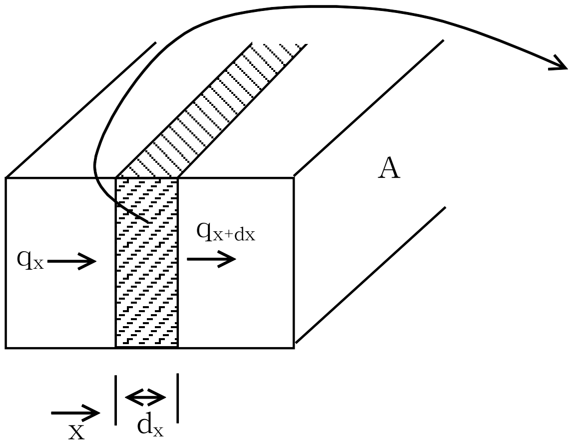


Figure 1-6 | Thermal conductivities of some typical solids.

<평면좌표계> - 1차원



$q = \dot{q}\,dV = \dot{q}A\,dx$

$\dot{q}$: 단위 체적당 발생열 (W/m^3)

<에너지 평형>

(1차원 열전도식)

들어오는열 = 나가는열

들어오는 전도열 + 내부발생열 = 나가는 전도열 + 내부축적열

$q_x + q_g = q_{x+dx} + q_i$ · (1.1)

여기서 $q_x = -kA\dfrac{\partial T}{\partial x}$

$q_g = \dot{q}A\,dx,\quad q_i = mc\dfrac{\partial T}{\partial t},$ 여기에서 $m = \rho A dx,$

$q_{x+dx} = q_x + q_{dx} = q_x + \dfrac{\partial q}{\partial x}dx = -kA\dfrac{\partial T}{\partial x} - A\dfrac{\partial}{\partial x}(k\dfrac{\partial T}{\partial x})dx$

이제 위의 것들을 식(1.1)에 대입하면,

$$-kA\frac{\partial T}{\partial x} + \dot{q}A\,dx = \left[-kA\frac{\partial T}{\partial x} - A\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x})dx\right] + \rho cA\frac{\partial T}{\partial t}dx$$

$$\frac{\partial}{\partial x}(k\frac{\partial T}{\partial x}) + \dot{q} = \left[\rho c\frac{\partial T}{\partial t}\right] \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.2)$$

(3차원 열전도식)

k = constant일 경우

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.3a)$$

$\alpha = k/\rho c$: 열확산계수(thermal diffusivity, m^2/s)

☞ α값이 클수록 열은 더욱 빨리 물질 속으로 확산됨. 높은 α값은 높은 열전도도 (k)로부터 얻을 수 있거나 낮은 ρc (thermal heat capacity : 열용량(J/m^3K))값으로부터 얻을 수 있다. ρc값이 작다는 것은 어떤 물체의 단위 체적당 온도를 증가시키는데 보다 적은 에너지가 사용된다는 의미로서, 결과적으로 보다 많은 에너지가 열전달에 사용되어 질 수 있다는 것이다.

- Steady-state one-dimensional conduction without heat sources

☞ $$\frac{d^2T}{dx^2} = 0$$

- Steady-state one-dimensional conduction without heat sources in cylindrical coordinates

☞ $$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} = 0$$

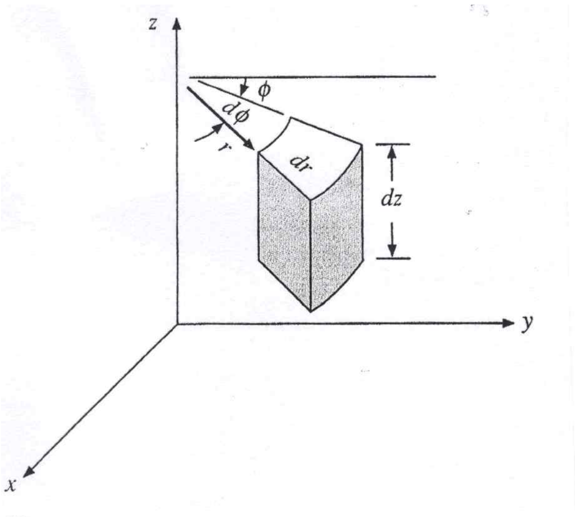
- Steady-state one-dimensional conduction with heat sources

☞ $$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{\dot{q}}{k} = 0$$

- Steady-state two-dimensional conduction without heat sources

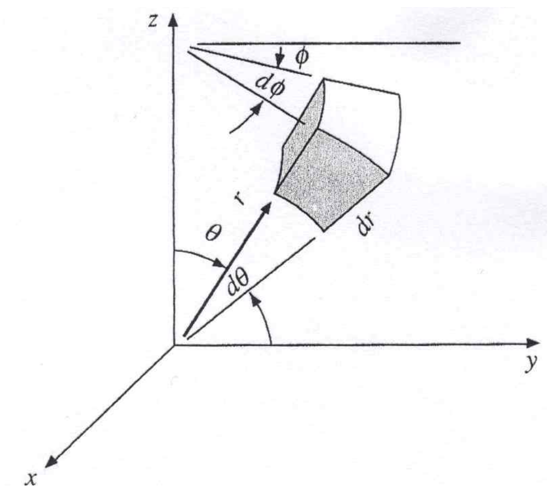
☞ $$\frac{d^2T}{dx^2} + \frac{d^2T}{dy^2} = 0$$

<원통좌표계>



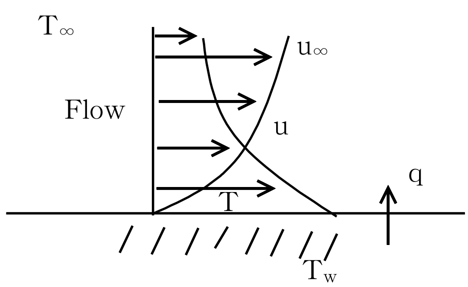
$$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r}\frac{\partial T}{\partial r} + \frac{1}{r^2}\frac{\partial^2 T}{\partial \phi^2} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} + \frac{\dot{q}}{k} = \frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad \cdots\cdots\cdots\cdots\cdots \quad (1.3b)$$

<구좌표계>



$$\frac{1}{r}\frac{\partial^2}{\partial r^2}(rT)+\frac{1}{r^2\sin\theta}\frac{\partial}{\partial\theta}(\sin\theta\frac{\partial T}{\partial\theta})+\frac{1}{r^2\sin^2\theta}\frac{\partial^2 T}{\partial\phi^2}+\frac{\dot{q}}{k}=\frac{1}{\alpha}\frac{\partial T}{\partial t} \quad \cdot\cdot\cdot\cdot\cdot \quad (1.3c)$$

2. 대류열전달(convection heat transfer) : 유체유동에 의한 열전달



뉴톤의 냉각법칙 $q=hA_s(T_w-T_\infty)$

h : 대류열전달계수($W/m^2\cdot ℃$) or ($W/m^2\cdot K$) → 실험적으로 구하고 Table 1.3 참조

A_s : 열전달이 일어나는 표면적(m^2)

◦ **강제대류** : 가열된 평면 위에 외부 바람이 있는 경우

◦ **자연대류** : 가열된 평면 위에 외부 바람이 없는 경우(still air)

Table 1-3 | Approximate values of convection heat-transfer coefficients.

Mode	h W/m²·°C	h Btu/h·ft²·°F
Free convection, $\Delta T = 30°C$		
Vertical plate 0.3 m [1 ft] high in air	4.5	0.79
Horizontal cylinder, 5-cm diameter, in air	6.5	1.14
Horizontal cylinder, 2-cm diameter, in water	890	157
Heat transfer across 1.5-cm vertical air gap with $\Delta T = 60°C$	2.64	0.46
Fine wire in air, $d = 0.02$ mm, $\Delta T = 55°C$	490	86
Forced convection		
Airflow at 2 m/s over 0.2-m square plate	12	2.1
Airflow at 35 m/s over 0.75-m square plate	75	13.2
Airflow at Mach number = 3, $p = 1/20$ atm, $T_\infty = -40°C$, across 0.2-m square plate	56	9.9
Air at 2 atm flowing in 2.5-cm-diameter tube at 10 m/s	65	11.4
Water at 0.5 kg/s flowing in 2.5-cm-diameter tube	3500	616
Airflow *across* 5-cm-diameter cylinder with velocity of 50 m/s	180	32
Liquid bismuth at 4.5 kg/s and 420°C in 5.0-cm-diameter tube	3410	600
Airflow at 50 m/s across fine wire, $d = 0.04$ mm	3850	678
Boiling water		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
Condensation of water vapor, 1 atm		
Vertical surfaces	4000–11,300	700–2000
Outside horizontal tubes	9500–25,000	1700–4400

∘ 정상흐름의 에너지 방정식 (Energy Equation for the Steady Flow Condition)

$$q + \dot{m}_i(i + V^2/2 + gz)_i = \dot{m}_e(i + V^2/2 + gz)_e + W_k$$

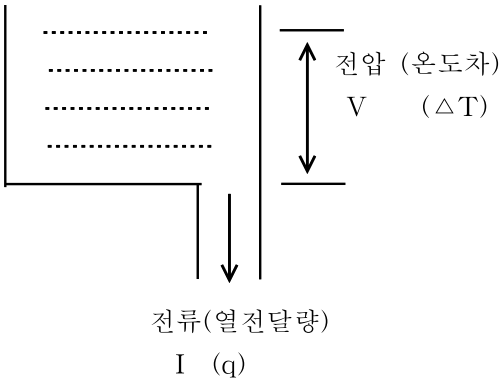
여기에서 q = 검사체적에 가해진 일

W_k = 과정 중 외부에 한 일

i = 엔탈피 $= u + pv$

u = 내부 열에너지

◦ 열전달과 전류의 흐름은 유사하다



V = I·R

전도 : $\triangle T_{all} = q \bullet \dfrac{\triangle x}{kA}$

대류 : $\triangle T_{film} = q \bullet \dfrac{1}{hA_s}$

◦ 파이프 유동에서의 대류열전달 (Convection Energy Balance on a Pipe Flow)

The heated wall at T_w loses heat to the cooler fluid, which consequently rises in temperature as it flows from the inlet at T_i to the exit at T_e.

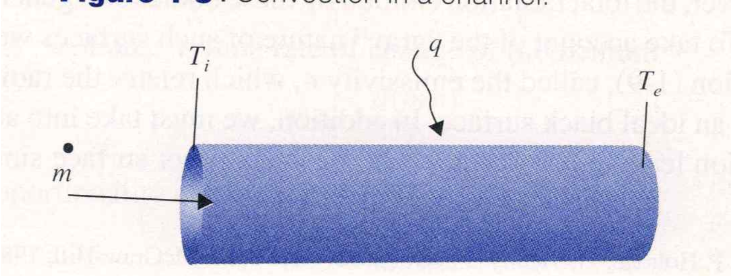


Figure 1-8 | Convection in a channel.

The energy balance on the fluid is

☞ $q = \dot{m}(i_e - i_i) = \dot{m}c(T_e - T_i) = hA_s(T_{w,avg} - T_{fluid,avg})$

where $\dot{m}$ is the fluid mass flow rate (kg/s). i_e and i_i are the fluid enthalpy at the exit and inlet, respectively. A_s is the surface area of the flow channel in contact with the fluid and h is the convective heat transfer coefficient(W/m^2·°C). The fluid temperatures T_e, T_i, and T_{fluid} are called bulk or energy average temperatures.

The mass flow rate in a flow channel is determined from

☞ $\dot{m} = \rho u_{avg} A_c$

where $A_c = \pi d^2/4$ is the cross-sectional area. On the other hand, the surface area for the convection in this case would be $A_s = \pi d L$

등가 바람 냉각온도: 체감 온도
(Equivalent Wind Chill Temperature)

체감효과에 의해 바람부는 날에는 온도계가 가리키는 것보다 차가운 공기가 더 차게 느껴진다는 사실은 잘 알려져 있다. 이 효과는 공기의 속도가 증가함에 따라 대류열전달계수가 증가하기 때문이다. ℃단위로 등가 바람 냉각온도(Equivalent Wind Chill Temperature)는 다음과 같이 주어진다.

$$T_{equiv} = 33.0-(33.0-T_{ambient})(0.475-0.0126V+0.240V^{1/2})$$

여기서 V는 바람의 속도(km/h)이고 $T_{ambient}$ 는 고요한 공기온도 즉, 6.5 km/h이내의 속도를 갖는 가벼운 바람에서의 주위의 공기온도이다.

공기속도 15 km/h(4.17 m/s) 공기온도= −15 ℃일 때, 체감온도= −25.3 ℃
공기속도 30 km/h(8.33 m/s) 공기온도= −15 ℃일 때, 체감온도= −34.8 ℃
공기속도 45 km/h(12.5 m/s) 공기온도= −15 ℃일 때, 체감온도= −39.9 ℃
공기속도 60 km/h(16.7 m/s) 공기온도= −15 ℃일 때, 체감온도= −42.7 ℃

Note: 사람은 쉬고있을 때 60-80 W의 에너지를 발산하며, 운동을 할 때는 300-400 W의 에너지를 발산한다.

3. Radiation Heat Transfer

열은 전도나 대류형태로 매질을 통하여 전달되지만 진공 중에서도 전달될 수 있다. 이러한 현상을 전자기복사(electromagnetic radiation)라고 한다.

◈ 이상적인 복사체 혹은 흑체 (Blackbody)

절대온도의 4제곱에 비례하는 율로 열을 복사하고 또한 표면적에 비례한다.

$$q_{black} = \sigma A\ T^4$$

여기서 σ는 Stefan-Boltzmann 상수이다 [$5.669\times 10^{-8}\,(W/m^2K^4)$]

◈ 회색 (Gray 혹은 Real) 표면

광택나는 페인트를 칠한 표면이나 연마한 금속판과 같은 물체는 흑체에 비하여 적은 열을 복사하지만 복사열량은 T^4에 비례한다. 따라서 이러한 회색 표면의 성질을 고려하기 위해서 방사율(emissivity) ε이라는 인자를 다음과 같이 정의한다.

$$\varepsilon = \frac{q}{q_{black}} = \frac{q}{\sigma A T^4}$$

방사율은 복사면의 재질, 온도, 표면 조건에 영향을 받으며, 흑체의 방사율은 1.0이다.

◈ 두 면 간의 순 복사열전달

방사율에 부가해서 고려해야 할 사항은 전자기복사가 일직선으로 이동하는 동안 일부는 주위에 흡수되기 때문에 한 표면을 떠난 에너지의 전부가 다른 표면에 도달한다고 볼 수가 없다. 이 상의 두 효과를 고려하여 순 복사열전달률은 다음과 같이 구한다.

$$q = F_\epsilon F_G \sigma A\,({T_1}^4 - {T_2}^4)$$

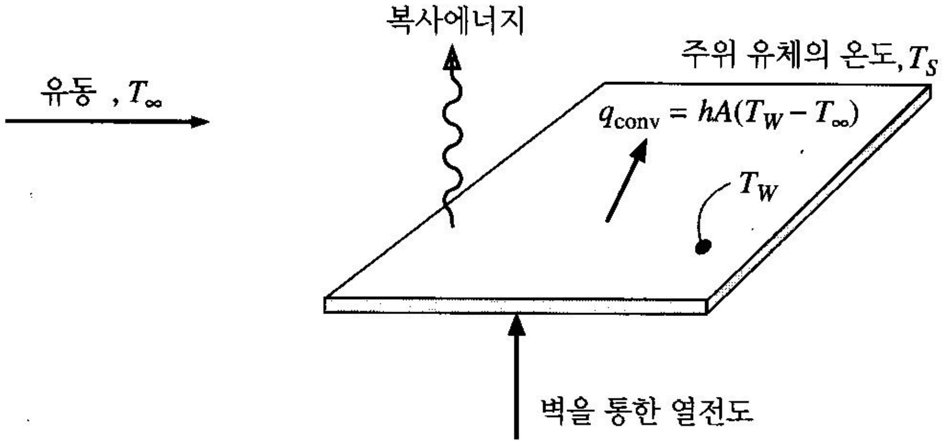
여기서 F_ε는 방사율함수. F_G는 기하학적 투영인자 (view factor)함수이다.

◈ 밀폐공간 내에서의 복사

표면온도가 T_1, 방사율이 ε_1, 표면적이 A_1인 작은 물체가 온도가 T_2인 매우 큰 표면으로 완전히 둘러싸여 있을 때의 순 열전달률은 다음과 같다.

$$q = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

4. 3가지 모드의 열전달이 동시에 발생하는 경우



평판을 통하여 전도된 열은 대류와 복사에 의하여 판의 표면으로부터 주위로 전달될 것이며 에너지의 균형 관계로부터 다음 식으로 나타낼 수 있다.

$$-kA\frac{dT}{dy}\Big|_{wall} = hA(T_w - T_\infty) + F_\varepsilon F_G \sigma A(T_w^4 - T_s^4)$$

T_s : 주위 유체온도,
T_w : 평판 표면온도,
T_∞ : 유동 유체온도

** 열전달 연습문제 **

예제 1-1 구리판을 통한 전도

두께 3 cm인 구리판 한쪽 면의 온도는 400°C이고 다른쪽 면의 온도는 100°C 이다. 이 판을 통하여 얼마의 열전달이 일어나는가

■ **풀이**

부록 A로부터 250°C의 구리의 열전도계수는 370 W/m · °C이다. Fourier의 법칙 $\frac{q}{A} = -k\frac{dT}{dx}$을 적분하면 다음과 같다.

$$\frac{q}{A} = -k\frac{\Delta T}{\Delta x} = \frac{-(370)(100-400)}{3\times 10^{-2}} = 3.7\ \mathrm{MW/m^2} \quad [1.173\times 10^6\ \mathrm{Btu/h\cdot ft^2}]$$

예제 1-2 대류

가로 세로가 50 × 75 cm인 250°C로 가열된 평판에 20°C의 공기를 불어주고 있다. 대류열전달계수가 25 W/m^2 · °C 일 때 열전달을 계산하여라.

$$\begin{aligned} q &= hA\,(T_w - T_\infty) \\ &= (25)(0.50)(0.75)(250-20) \\ &= 2.156\ \mathrm{kW} \quad [7356\ \mathrm{Btu/h}] \end{aligned}$$

예제 1-3 전도, 대류 및 복사

예제 1-2에서 평판이 두께 2 cm이고 탄소함유량이 1%인 강철로 되어 있으며 복사에 의해서 300 W의 열이 손실된다면 평판의 안쪽 표면에서의 온도는 얼마인가?

■ **풀이**

평판을 통하여 전도되는 열량은 대류와 복사로 인해서 손실되는 열량의 합과 같아야 한다.

$$q_{\mathrm{cond}} = q_{\mathrm{conv}} + q_{\mathrm{rad}}$$

$$-kA\frac{\Delta T}{\Delta x} = 2.156 + 0.3 = 2.456\ \mathrm{kW}$$

$$\Delta T = \frac{(-2456)(0.02)}{(0.5)(0.75)(43)} = -3.05°\mathrm{C} \quad [-5.49°\mathrm{F}]$$

앞의 식에서 k에 대한 값은 표 1.1에서 인용하였다. 그러므로 평판 안쪽 표면에서의 온도는 $T_i = 250 + 3.05 =$ 253.05 °C

예제 1-5 복사

온도가 각각 800°C와 300°C인 대단히 큰 두 개의 흑체 평판 사이에서 복사열전달이 일어나고 있다. 단위 면적당 열전달을 계산하여라.

■ **풀이**

식 (1.10)을 이 문제에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q/A &= \sigma(T_1^4 - T_2^4) \\ &= (5.669 \times 10^{-8})(1073^4 - 573^4) \\ &= 69.03\ \mathrm{kW/m^2} \quad [21{,}884\ \mathrm{Btu/h \cdot ft^2}] \end{aligned}$$

예제 1-6 대류와 복사에 의한 총 열손실

공기와 벽의 온도가 모두 20°C인 큰 방 안에 표면온도가 50°C이고 지름이 5 cm인 강철관이 수평으로 놓여 있다. 강철관 표면의 방사율을 0.8이라 하고 표 1.3의 값을 사용하여 관의 단위길이당 총 열손실을 구하여라.

■ **풀이**

총 열손실은 대류와 복사열전달에 의한 것을 합한 것이다. 문제의 조건에 맞는 자유대류 열전달계수는 표1.3에서 $h = 6.5\ \mathrm{W/m \cdot {}^\circ C}$이다. 그리고 관의 표면적은 πdL이므로 단위길이당 대류손실은

$$\begin{aligned} q/L]_{\mathrm{conv}} &= h(\pi d)(T_w - T_\infty) \\ &= (6.5)(\pi)(0.05)(50 - 20) = 30.63\ \mathrm{W/m} \end{aligned}$$

이다. 큰 방 안에 놓여 있는 관은 커다란 밀폐공간으로 둘러싸여 있는 물체로 볼 수 있기 때문에 복사열전달은 식 (1.12)를 사용하여 계산할 수 있다. $T_1 = 50°C = 323°K$이고 $T_2°C = 20°C = 293°K$이므로

$$\begin{aligned} q/L]_{\mathrm{rad}} &= \epsilon_1(\pi d_1)\sigma(T_1^4 - T_2^4) \\ &= (0.8)(\pi)(0.05)(5.669 \times 10^{-8})(323^4 - 293^4) \\ &= 25.04\ \mathrm{W/m} \end{aligned}$$

따라서 총 열손실은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} q/L]_{\mathrm{tot}} &= q/L]_{\mathrm{conv}} + q/L]_{\mathrm{rad}} \\ &= 30.63 + 25.04 = 55.67\ \mathrm{W/m} \end{aligned}$$

이 예제를 통해서 대류와 복사는 거의 같은 양으로 존재하며, 이들을 무시한다는 것은 큰 오류를 범할 수 있다는 사실을 알 수 있다.