열전달
Heat Transfer

이동현상이론 (MSA0013)

창원대학교 신소재공학부
정영웅

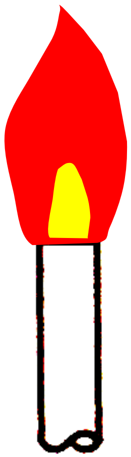
yjeong@changwon.ac.kr
https://youngung.github.io
https://github.com/youngung

Introduction

- There are a few mechanisms behind the phenomenon of heat transfer
  - Conduction (전도) – heat transport by vibrations of molecules, particles and even electrons – the molecules, particles themselves are not moving.
  - Convection (대류) – fluid에 직접 이동하여 열을 전달
  - Radiation (복사) – 전도나 대류와 달리, 열을 전달하는 매질이 없다.

http://study.zum.com/book/14625

Introduction



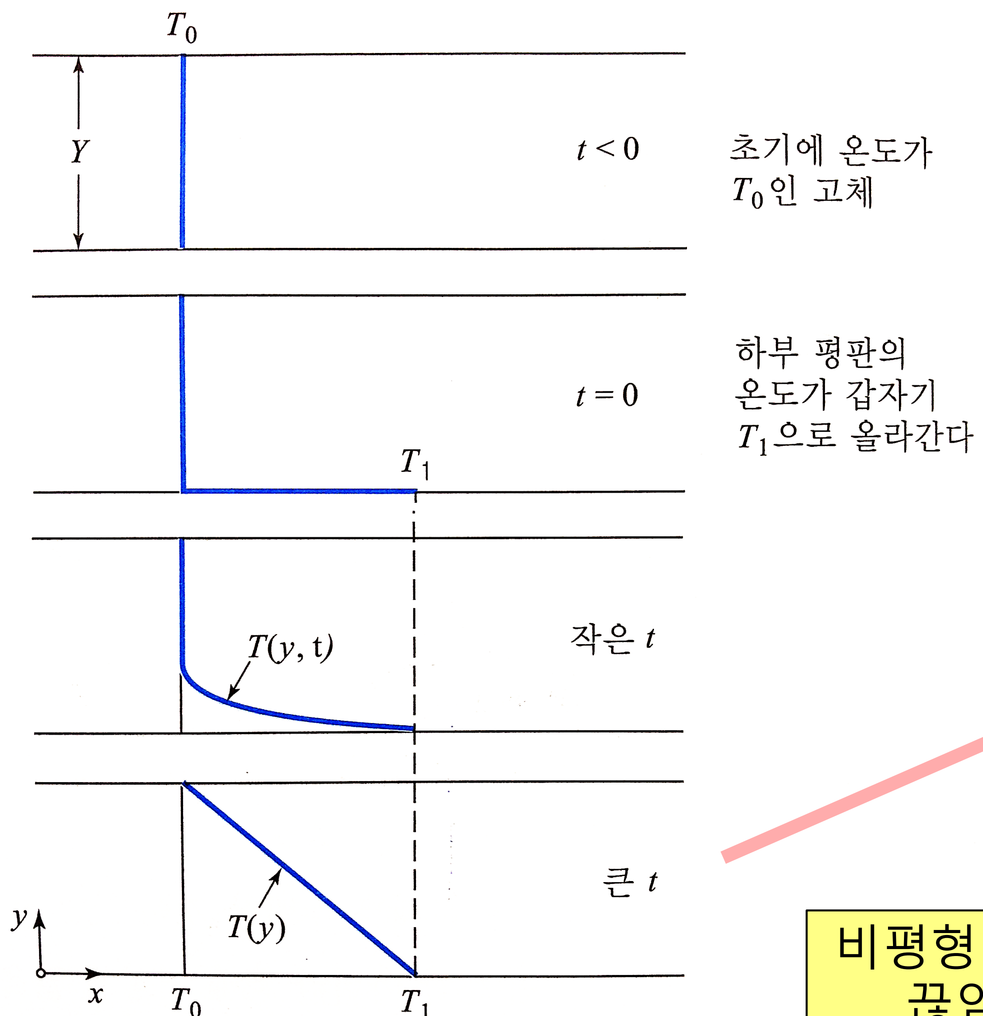
불꽃으로부터 금속 막대 끝으로
열적 대류(thermal convection)에 의한 열 전달

달궈진 금속 막대의 한쪽 끝에서 다른 끝으로
열적 전도(thermal conduction)에 의한 열 전달

대류: 유체의 흐름을 통한 전달

전도: 전자(혹은 이온 등의 미세한 입자들)의 운동 에너지 전달

평행 평판 사이의 고체 평판에 대한 정상 상태 온도 분포의 발달



운동량 전달때와 마찬 가지로,
우리는 정상 상태에서의
열전달 현상에 초점 둔다

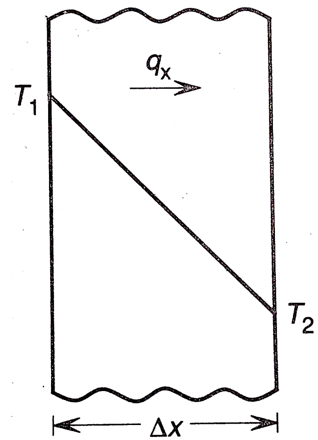
비평형 상태인 온도 분포가 계속되기 위해서는
끊임없이 외부의 열이 공급되어야 한다.

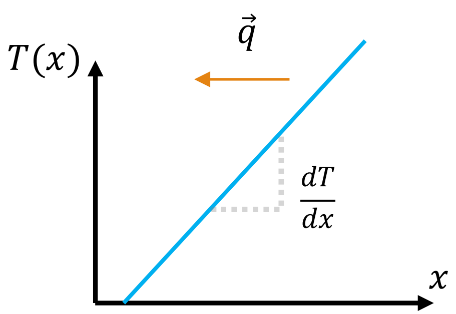
Fourier 법칙

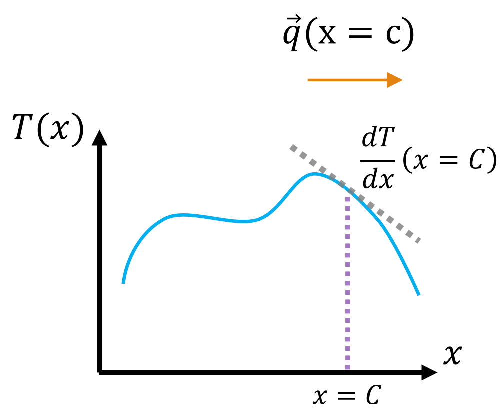
푸리에 법칙: 매질을 통한 열 전달 mechanism인 전도에서, 열 이동률은 온도구배와 통과 면적에 의해 설명된다.

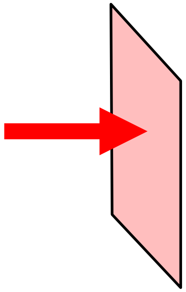
$$q_x \propto -A_x \frac{dT}{dx}$$

q_x: x 방향으로의 열 전달률 (J/s)
dT/dx: 온도의 x 방향으로의 구배 (Gradient)
A_x: x방향으로의 단면적







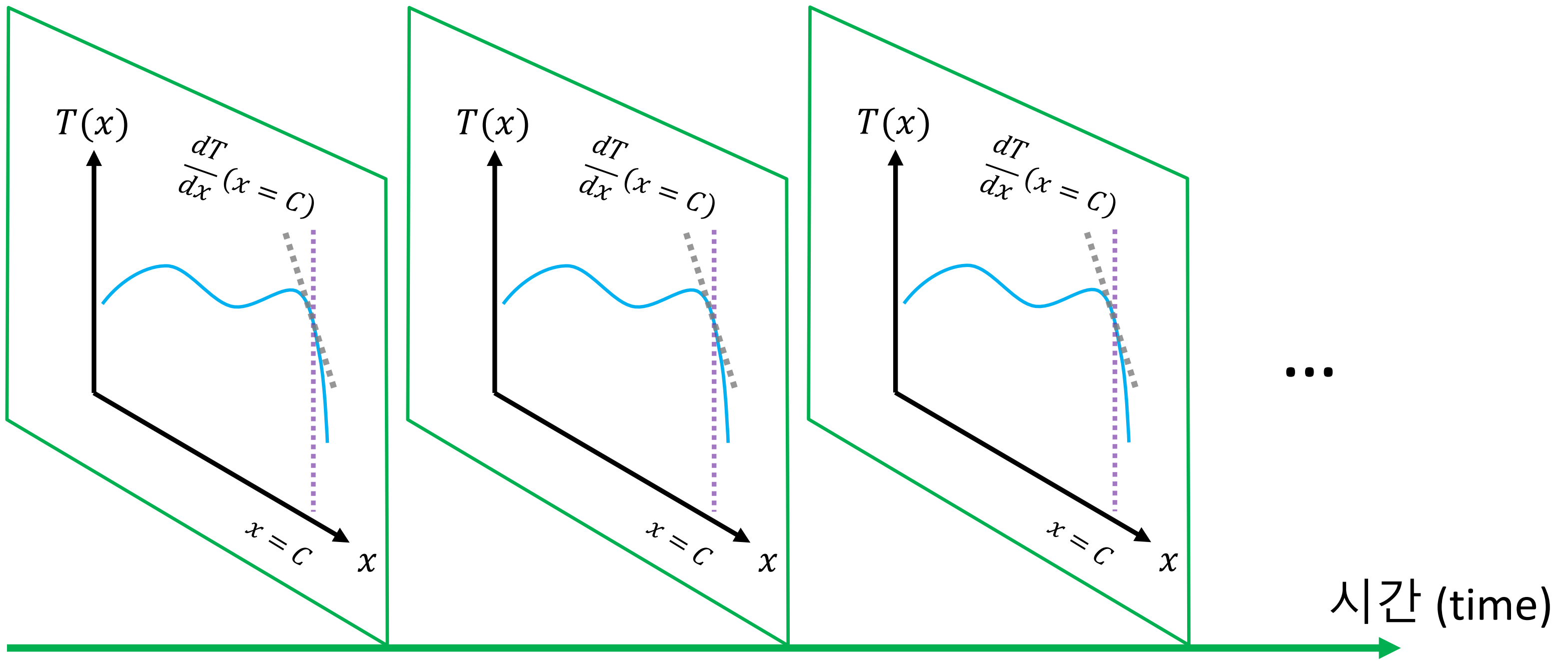


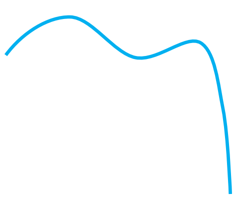
$\frac{dT}{dx}$ is constant along x-axis

Thus, $\vec{q}$ should be constant along x-axis

$\frac{dT}{dx}$ varies along x-axis
Thus, $\vec{q}$ should be a function of x position

정상 상태와 비정상 상태





온도 구배가 시간에 따라
바뀌지 않은 상태: 정상상태

정상상태: 시간에 따라 물리 현상, 성질, 주변 환경 등이 바뀌지 않는 상태

예를 들어, 압력 p가 시간에 따라 변하지 않는다는 것은

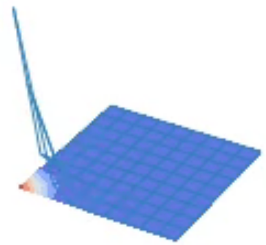
$$\frac{dT}{dt}=0$$

Fourier 법칙

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx}$$

q_x: x 방향으로의 열 전달률 (J/s)
dT/dx: 온도의 x 방향으로의 구배 (Gradient)
A_x: x방향으로의 단면적
k: 열이 전도되는 매질의 열전도도 (물질의 고유한 성질)

1차원, 즉 특정 선방향에서만 살펴본 온도 구배에서는 확연하게 나타나지 않지만, 2차원 이상에서의 온도 구배를 살펴보면, 온도 구배 또한 방향을 가진 물리량임을 알 수 있다. 기울기의 가파름과 그리고 방향을 가지고 있으니, 여러분들이 친숙한 벡터 (vector) 라고 불리는 형식의 물리량임을 알 수 있다.



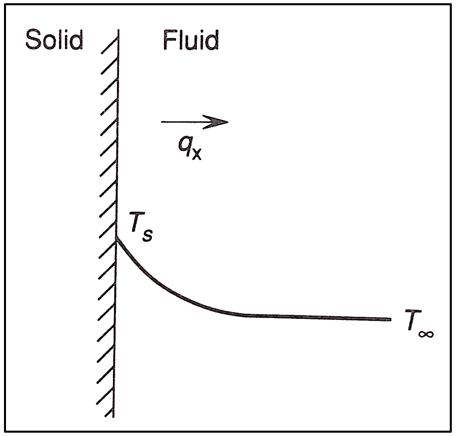
열 전달률 또한 방향을 가진 물리량으로써, 시간당 전달되는 에너지의 크기(세기)와 방향을 가지고 있으니, 마찬가지로 vector 임을 알 수 있다.

온도 구배의 방향과 열 전달률의 방향이 서로 '반대방향' 이므로 Fourier 법칙에서 보이는 바와 같이 – 기호가 필요하다.

Newton's law of cooing

- The rate of heat loss of a body is directly proportional to the difference in the temperatures between the body and its surroundings provided the temperature difference is small and the nature of radiating surface remains the same.

Fourier's law가 잘 맞는 경우에, Newton's law는 열전도에 따른 cooling 현상에 적절하다.
그리고 대류에서도 (근사적으로) 쓰인다. 그리고 열 복사에는 적합하지 않은 모형이다.



T_s: Solid-Fluid 계면에서의 온도
T_∞: 계면에서 무한대로 떨어진 곳의 온도

$$q_x \propto A_s(\Delta T)$$

$$q_x = hA_s\Delta T$$

q_x: x 방향으로의 열 전달률 (J/s)
$\Delta T(=\mathrm{T_s}-\mathrm{T_\infty})$: 온도 차이
A_x: x방향으로의 단면적
h: 열전달 계수

Wikipedia
https://en.wikipedia.org/wiki/Newton%27s_law_of_cooling

Comparison

Fourier 법칙; 고체의 열전도

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx}$$

전도에서, 열전달 방향은
온도 구배의 반대방향

열전도도 k 는 물질의
고유한 성질 – 물질마다
고유한 값을 가진다.

Newton 법칙; 유체에 의한 열 전달 (대류)

$$q_x = hA_s\Delta T$$

대류에서 열전달은
고체와 주위의 온도
차이에 의해 발생한다.

열전달 계수 h는
1. 고체 표면의 기하학적 형태
2. 대류 현상의 매질로 작용하는 유체의 성질

에 따라서 달라진다.

열전도도의 온도 의존성

$$q_x = -kA_x \frac{dT}{dx}$$

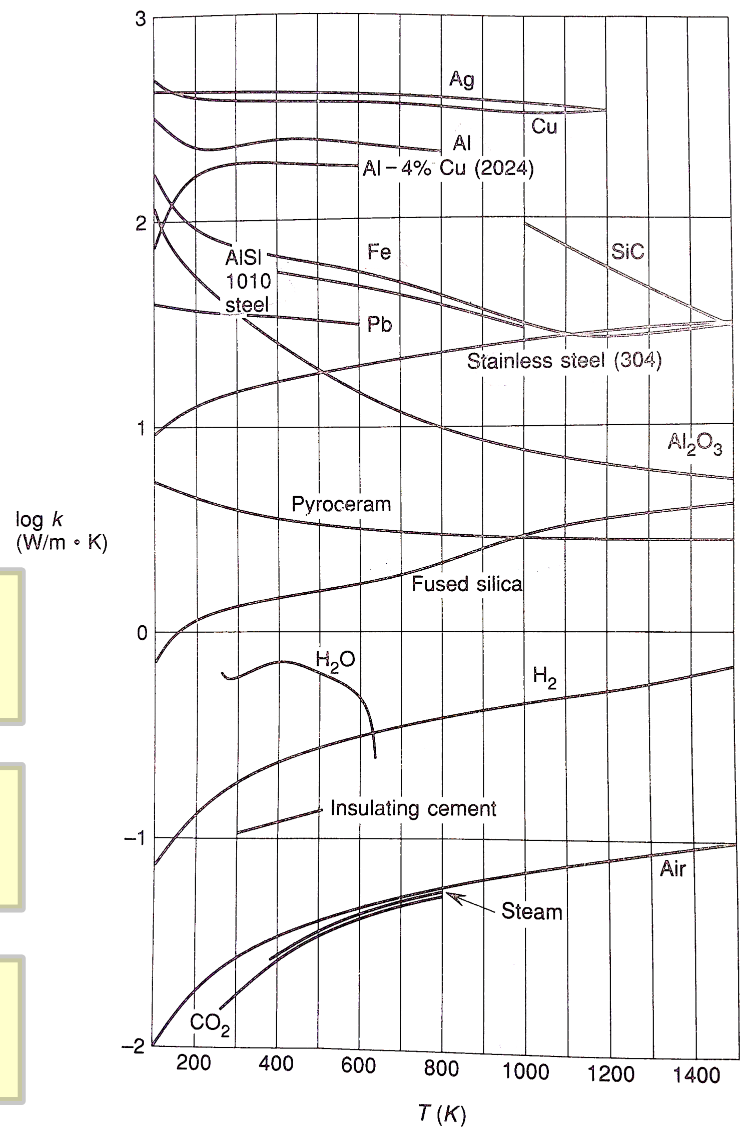
Units of thermal conductivity in SI:

$W/(m \cdot K)$
$J/(s \cdot m \cdot K)$

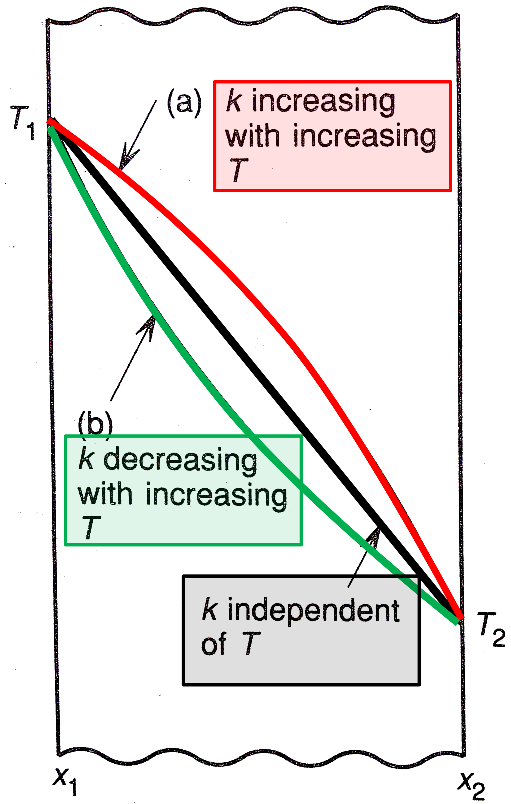
$$q_x(공간) = -kA_x \frac{dT(공간)}{dx}$$

$$q_x(x) = -kA_x \frac{dT(x)}{dx}$$

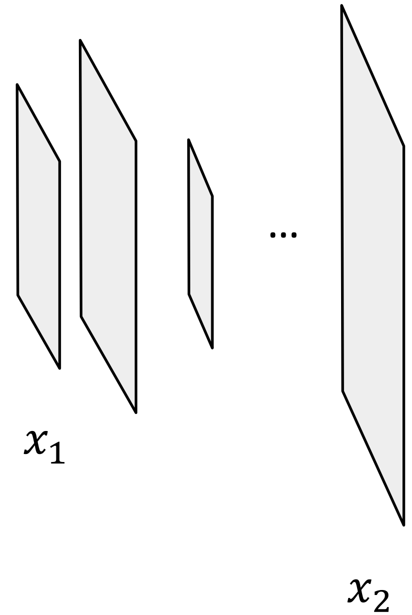
$$q_x(x) = -k(T)A_x \frac{dT(x)}{dx}$$



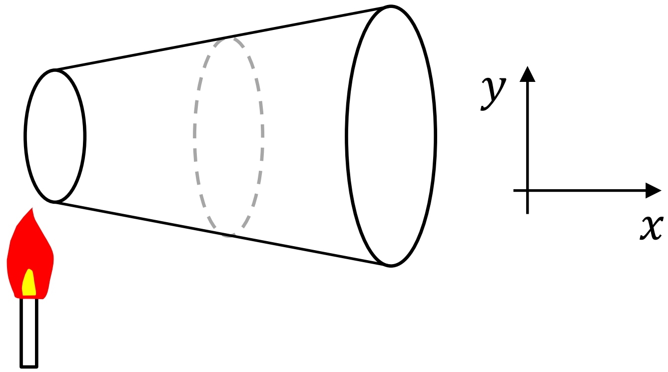
온도 의존성 열전도도 + 공간 의존적 열전달 면적



k 의 온도 의존성으로 인한
온도 구배의 변화



열 전달 단면적의 공간 의존성: $A_x(x)$



온도 의존성 열전도도 + 공간 의존적 열전달 면적

$$q_x(x) = -k(T)A_x \frac{dT(x)}{dx}$$

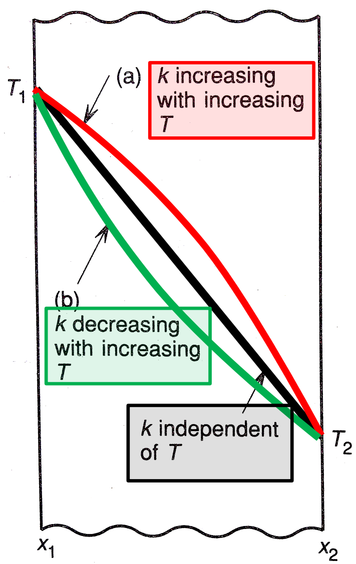
공간 의존 항들은 왼쪽

온도 의존 항들은 오른쪽

$$\frac{q_x(x)}{A_x} dx = -k(T)\, dT$$

경계 조건 고려하여 적분

$$\int_{x_1}^{x_2} \frac{q_x}{A_x} dx = \int_{T_1}^{T_2} -k(T) dT$$



정상 상태에서, q_x 불변

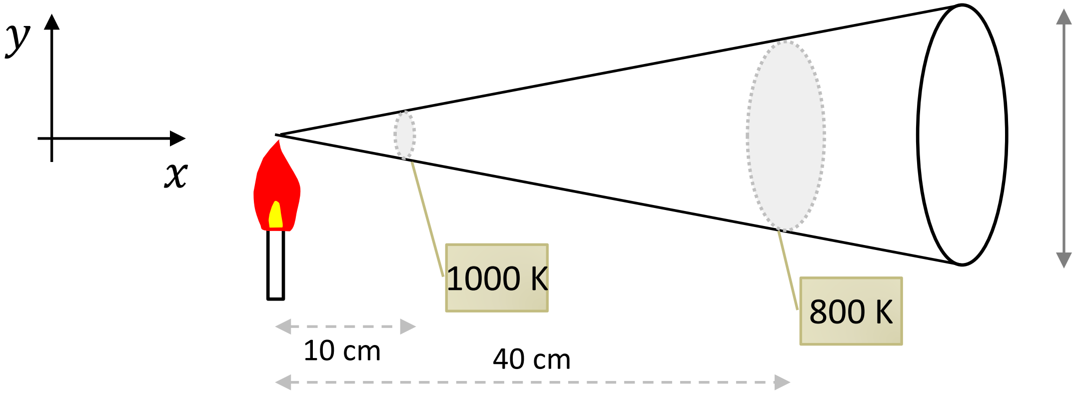
$$q_x \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A_x} = \int_{T_1}^{T_2} -k(T) dT$$

평균 열전도도 k_m 을 사용한다면…

$$q_x \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A_x} = -k_m \cdot (T_2 - T_1)$$

예제 6.1

대류가 발생하지 환경에서 (표면이 절연체로 둘러싸임) 원추형(cone) 전도체에 열 전도 현상이 x방향으로 발생하고 있다. – 아래의 그림 참조.



지름: 5 cm
전도체의 길이: 1 m

Observation 1: 열원으로부터 10 cm 떨어진 곳의 온도를 측정하였더니 온도가 1000 K 였다.

Observation 2: 열원으로부터 40 cm 떨어진 곳의 온도를 측정하였더니 온도가 800 K 였다.

위 전도체는 a) Fourier 법칙을 따르며; b) 열전도도의 온도 의존성이 없이 5 $W/(m \cdot K)$ 이고; c) 원뿔의 단면적은 열원으로부터의 거리(δ)와 다음과 같은 관계가 있다.

$$A_x|_{x=\delta} = \pi\delta^2$$

Q1. 이를 바탕으로 해당 원뿔상에서 거리에 따른 온도 변화를 나타내시오. 즉 온도를 거리(x)에 대한 함수로 표현하시오.

$$q_x \int_{x_1}^{x_2} \frac{dx}{A_x} = -k_m \cdot (T_2 - T_1) \rightarrow q_x \int_{10\ cm}^{40\ cm} \frac{dx}{\pi x^2} = -k_m \cdot (800\ K - 1000\ K)$$

$$\rightarrow q_x \cdot (-1)\frac{1}{\pi}\left(\frac{1}{40} - \frac{1}{10}\right)[1/cm] = -5\left[\frac{J}{s \cdot m \cdot K}\right] \cdot (800\ K - 1000\ K)$$

$$\rightarrow q_x = \left(\frac{4000\pi}{3}\right)\left[\frac{J}{s}\right]$$

과제

일반적으로 냉장고의 냉동실은 높이 0.3 m, 폭 0.25 m 두께 0.25 m 두께 0.5 m의 직사각형 형태로 설계된다. 만약 내부와 외부의 온도가 각각 -10degree C, 33 degree C 일 때, 손실열이 400W가 되기 위한 스티로폼 단열재 (k=0.30 W/(m K))의 두께를 구하여라.