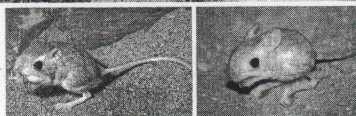
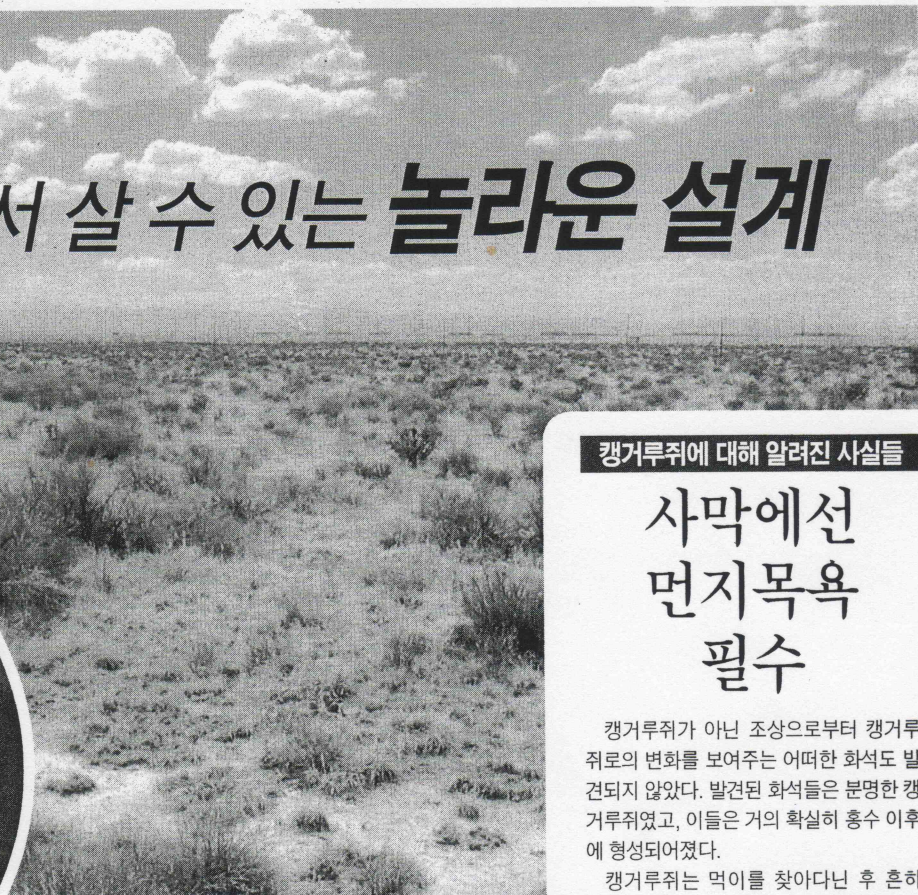


창조의 신비  
캥거루쥐(Kangaroo rats)

# 물 없이 사막에서 살 수 있는 놀라운 설계



### 물 없이 사막 생존 가능

그런데 어떻게 캥거루쥐는 마실 물 없이 살아 갈 수 있을까? 캥거루쥐가 사막에서 물 없이는 며칠만에 죽어버리는 다른 포유동물들과 다른 점은 무엇인가? 그 해답은 캥거루쥐의 신장에 있다. 연구 결과에 의하면, 캥거루쥐는 모든 포유류 중에서 가장 농축된 뇨를 만들어 낸다는 것이다. 캥거루쥐는 하루에 단지 몇 방울 정도의 소변만을 배설한다.

이름에 '캥거루'가 붙여진 것처럼 캥거루쥐(Kangaroo rats)는 뒷다리를 이용해 강충강충 뛰면서 균형을 잡는다. 하지만 이것으로 캥거루와의 유사성은 끝이다. 캥거루쥐는 그 이름과 강충거리는 걸음걸이에도 불구하고, 캥거루보다 낙타(camell)와 공통점이 더 많다. 캥거루쥐는 설치류(rodent)다. 그러나 캥거루쥐는 지구상에 존

## 땀샘은 발바닥에만 발달 하루 소변량 고농축된 몇 방울 뿐 콧속엔 습기손실 막는 냉각시스템 보유

재하는 다른 설치류와 확연히 다르다. 낙타는 사막에서 공을 세울 수 있는 단 한 종류의 포유류다. 그러나 이 캥거루쥐는 '사막에 있는 배'처럼 쓸모없어 보인다. 이 불품없는 창조물은 북아메리카 사막 지역에 산다. 캥거루쥐는 매우 큰 머리와 눈, 짧은 앞다리 그리고 긴 뒷다리를 가지고 있다. 몸통의 길이는 10~16cm 정도이다. 캥거루쥐는 한번의 점프로 1.8m까지 뛰어오를 수 있다. 캥거루쥐는 낮에는 굴 속에서 산다. 밤에는 씨앗, 잎사귀, 다른 채소들을 찾으러 다닌다. 먹이는 뺨에 있는 주머니에 담아 그들의 땅속 집으로 운반한다. 가끔씩 벌레들을 잡아 먹기도 한다.

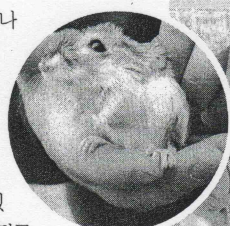
사람은 매우 많은 수분을 섭취한다. 음식물에서도 많은 수분을 얻는다. 그래서 사람의 소변은 매우 묽다. 반대로 캥거루쥐는 매우 적은 수분을 섭취한다. 따라서 낙타보다도 더 농축된 뇨를 만든다(낙타도 물 없이도 살 수 있도록 소변을 농축시킨다). 이것은 캥거루쥐가 소변으로 인해 수분을 거의 잃어버리지 않는다는 것을 의미한다. 과학자들은 캥거루쥐의 신장 기능에 대해 경탄해 왔다. 이 장기에 대한 연구는 (특별히 '헨레의 고리[Loop of Henle]'가 농축 과정을 가능하게 함) 사람의 신장이 어떻게 기능하는지에 대한 더 많은 이해를 가져왔다. 캥거루쥐의 '헨레의 고리'는 다른 어떤 포유류들보다도 더 길다.

### 에어컨과 똑같은 콧속 냉각 시스템

캥거루쥐의 행동과 서식지는 그것의 생리학적 특성들을 보완해주고 있다. 캥거루쥐의 야행성 생활은 체온을 낮게 유지할 수 있게 해 수분의 손실을 최소화하므로 해준다. 낮 동안에 이 땅속 은신처에 숨어 사막의 뜨거운 열기로부터 몸을 피한다. 땅속 굴의 높은 습도도 호흡을 통해 수분 손실을 방지해 준다.

게다가 캥거루쥐는 콧속 통로에 습기 손실을 감소시키는 냉각 시스템을 가지고 있다. 캥거루쥐는 콧속 통로의 온도를 중심부의 체온보다 낮게 유지한다. 폐에서 내쉬는 공기는 코를 통과하면서 냉각된다. 이것은 수증기가 코 안쪽에 응축됨으로써 폐로부터 나가는 수증기를 잡아챌 수 있게 한다. 코에서 응축된 수증기는 몸으로 다시 재흡수 된다. 에어컨이 실내 공기를 건조하게 만드는 것과 같은 원리이다.

캥거루쥐의 체온은 언제나 주변 환경보다 높다. 이는 몸에서 땀의 증발로 냉각될 필요를 감소시킨다. 왜냐하면 이 동물은 열을 방출할 수 있기 때문이다. 캥거루쥐는 오직 발바닥에만 땀샘이 있다. 캥거루쥐는 사막을 서식지로 살아갈 수 있는 믿기 힘든 특성들을 가진 놀라운 창조물이다. 그들의 창조는 확실히 경이로운 것이다.



### 캥거루쥐에 대해 알려진 사실들

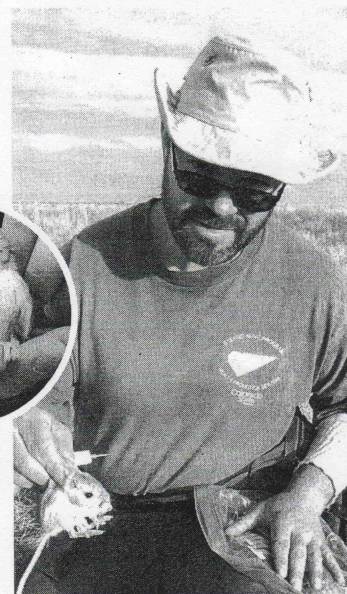
## 사막에선 먼지목욕 필수

캥거루쥐가 아닌 조상으로부터 캥거루쥐로의 변화를 보여주는 어떠한 화석도 발견되지 않았다. 발견된 화석들은 분명한 캥거루쥐였고, 이들은 거의 확실히 홍수 이후에 형성되어졌다.

캥거루쥐는 먹이를 찾아다니는 후 흔히 '먼지 목욕'을 한다(코끼리도 먼지 목욕을 한다). 그들은 정기적으로 먼지목욕을 해야만 한다. 그렇지 않으면 털이 엉켜져 등에 쓰림(sore)이 일어날 수 있다.

캥거루쥐는 그들의 뒷다리를 땅에 대고 두드리는 '발 드럼(footdrum)'을 한다. 이것은 그들의 적, 특히 뱀에게 겁을 주어 단념시키게 하거나, 자신의 영역을 알리는 행동으로 여겨진다.

캥거루쥐는 다른 포유동물보다 많은 안면 근육을 가지고 있다. 야간 사진은 42쌍의 안면근육이 야행성 캥거루쥐가 어둠 속에서 길을 '느낀' 수 있도록 돕는 데에 사용되고 있음을 보여주고 있다. 그들은 뒷다리로 강충거림으로서 사막 표면에 입 주위의 털을 접촉시키고 있다. 이것은 그들 주변에 먹이를 찾는 것을 가능하게 한다.

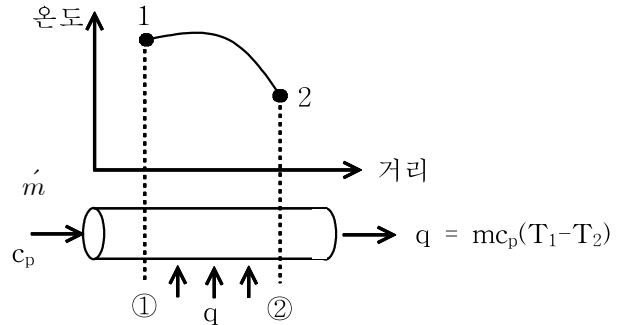




# Chapter 1. 서론

## - 열역학(thermodynamics)

평형 상태에서의 처음과 마지막의 상태량을 취급  
단위 : J

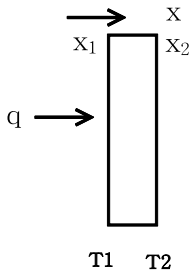


## - 열전달(heat transfer) : q (W = J/s)

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)



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

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

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

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

$$q = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} = -kA \frac{T_2 - T_1}{x_2 - x_1} \text{ : 열전도성이 클수록 } \Delta T \text{는 작아짐}$$

## 1.2 열전도도(thermal conductivity), k

Fourier 법칙으로부터 실험적으로 구하고, 재료에 따라 값이 좌우됨.

주어진 재료에서  $k \sim f(T)$

◦ 열전도의 기전(mechanism)

- 가스(기체) : 기체분자의 운동에너지는 기체의 온도에 좌우됨

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

- 액체 : 기체와 열전달 기전이 동일하나 훨씬 복잡

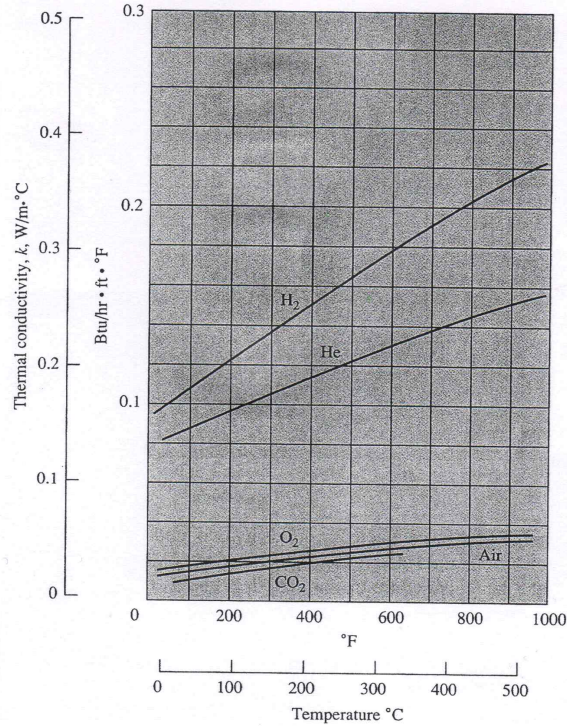
$$k_{\text{liquid}} \sim \text{weak } f(T)$$

- 고체 : 격자 진동, 자유전자의 이동

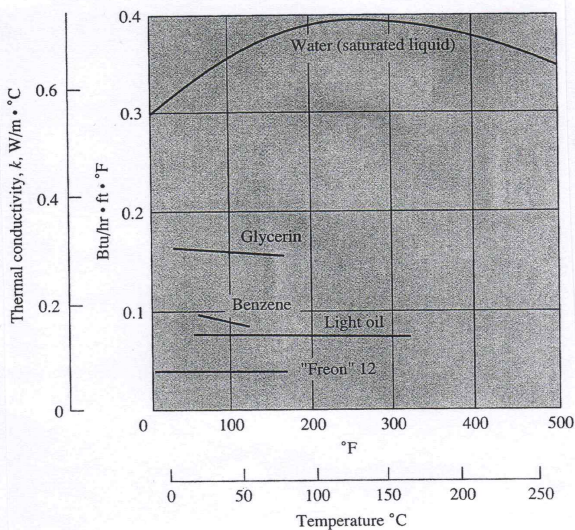
$$k_{\text{solid}} \sim \text{weak } f(T)$$

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

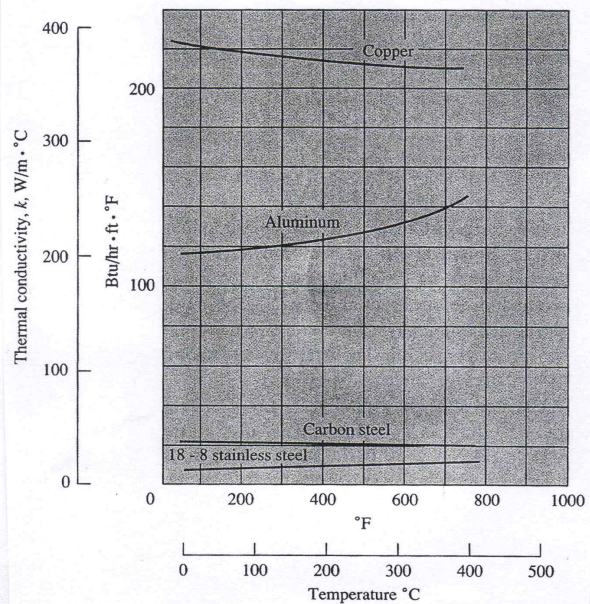
**Figure 1-4 I** Thermal conductivities of some typical gases  
[1 W/m · °C = 0.5779 Btu/h · ft · °F].



**Figure 1-5 I** Thermal conductivities of some typical liquids.



**Figure 1-6 I** Thermal conductivities of some typical solids.



[표] 여러 가지 재료에 대한 0°C일 때의 열전도계수

재료	열전도계수 $k$	
	W/m · °C	Btu/h · ft · °F
금속		
순은	410	237
순동	385	223
순알루미늄	202	117
순니켈	93	54
순철	73	42
탄소강(1%C)	43	25
순연(純鉛)	35	20.3
스테인레스강 (18% Cr, 8% Ni)	16.3	9.4
비금속		
다이아몬드	2300	1329
석영(축방향)	41.6	24
고토(苦土)	4.15	2.4
대리석	2.08~2.94	1.2~1.7
모래	1.83	1.06
창유리	0.78	0.45
단풍나무 또는 참나무	0.17	0.096
톱밥	0.059	0.034
유리솜	0.038	0.022
얼음	2.22	1.28
액체		
수은	8.21	4.74
물	0.556	0.327
암모니아	0.540	0.312
윤활유, SAE 50	0.147	0.085
프레온 12, CCl <sub>2</sub> F <sub>2</sub>	0.073	0.042
기체		
수소	0.175	0.101
헬륨	0.141	0.081
공기	0.024	0.0139
포화수증기	0.0206	0.0119
이산화탄소	0.0146	0.00844



# 꿈의 나노 물질 그래핀, 전자산업 패러다임을 바꾼다

김형자 | 과학칼럼니스트

탄소나노튜브, 나노기술과 연관돼 누구나 한번쯤 들어봤을 만한 용어다. 튜브 모양의 이 탄소 덩어리는 나노 분야에서 가장 촉망 받는 소재이다. 그런데 최근 탄소나노튜브가 그간 누려온 맹주의 자리를 위협받고 있다. 형태가 약간만 바뀌어도 전기적 성질이 바뀌는 등 시간이 지나면서 여러 한계가 드러나자 이를 극복할 새로운 형태의 물질을 만들려는 연구가 세계적으로 진행되고 있기 때문이다. 그것은 나노전자소자의 다음 시대를 이끌어갈 소재, 바로 그래핀이다.

## 과학자들이 그래핀에 열광하는 이유

그래핀(graphene)은 연필심에 쓰이는 흑연의 구성 물질이다. 흑연을 뜻하는 그래파이트(graphite)와 화학에서 탄소 이중결합을 가진 분자를 뜻하는 접미사 -ene을 결합해 만든 용어다. 나노미터(nm)의 세상을 보는 전자현미경으로 연필심을 확대해 보면 커커이 쌓인 얇은 판이 관찰된다. **탄소원자들이 무수히 연결돼 6각형의 벌집 모양으로 수없이 쌓아올린 3차원 구조이다. 그래핀은 여기서 가장 얇게 한 겹을 떼어낸 것이라고 보면 된다. 즉 탄소 원자 한 층으로 되어 있는, 두께 0.35nm의 2차원 평면 형태의 얇은 막 구조이다. 현재 세상에서 가장 얇은 물질이다.**

그래핀은 지난 2004년, 영국 맨체스터 대학의 연구팀이 상온에서 처음으로 제작했다. 그래핀의 탄생 배경은 꽤 흥미롭다. 스키타테이프의 접착력을 이용해 매우 간단하게 발견되었기 때문이다. 흑연 결정을 넓

게 펼친 뒤 스키타테이프를 붙였다 떼면 얇은 단원자층의 탄소 덩어리가 떨어져 나오는데 이것이 바로 그래핀이다. 그래핀이 겹겹이 쌓이면 흑연이 되고, 김밥처럼 말리면 탄소나노튜브가 된다.

반도체나 디스플레이를 만드는 데 쓰이는 실리콘, 태양전지나 평면 디스플레이를 만드는 데 쓰이는 투명전극인 산화인듐주석(ITO)은 늘리거나 구부리면 쉽게 깨지거나 전기전도성을 잃는다. 그래서 대부분의 전자기기는 이를 보호하기 위해 단단한 케이스가 필요하다. 실리콘이나 산화인듐주석과 비슷한 수준의 전기전도성을 가지면서 동시에 변형에 잘 견디는 조건을 모두 만족시키는 유연한 소재가 바로 그래핀이다.

그래핀은 전문용어여서 일반인들은 선뜻 이해되지 않을 것이다. 하지만 이 기술이 미래에 어떤 기기에 적용될지를 살펴보면 얼마나 대단한 기술인지 알 수 있다. 그래핀은 무엇보다 투명 플렉시블 디스플레이



에 적용이 가능하다. 예를 들어 대형 TV를 주머니에 끼고 집까지 걸거나 말아서 들고 다니다가 캠핑 텐트 안에서 집에서와 똑같은 화질로 드라마를 시청할 수 있다는 얘기가.

그렇다면 세계 과학자들은 왜 그래핀에 열광하는 것일까. 그 이유는 우수한 성질을 지닌 그래핀의 특징 때문이다. **그래핀은 상온에서 단위면적당 구리보다 약 100배 많은 전류를, 실리콘보다 100배 이상 빠르게 전달할 수 있을 뿐만 아니라 열전도성이 최고인 다이아몬드보다 2배 이상 높고, 기계적 강도는 강철보다 200배 이상 강하다. 게다가 신축성이 좋아 늘리거나 접어도 전기전도성을 잃지 않는다.**

탄소가 마치 그물처럼 연결돼 벌집 구조를 만드는 그래핀은 이때 생긴 공간적 여유로 신축성이 생겨 구조가 변해도 비교적 잘 견딜 수 있다. 육각형의 탄소 구조가 가지는 전자배치 특성 때문에 전도성을 잃지 않아 화학적으로 안정한 것이다. 이 말은 곧 미래 기술로 각광받는 휘어지는 디스플레이나 입을 컴퓨터에 적용될 수 있다는 얘기가.

산업적 활용에 대한 기대도 크다. 기존 실리콘 반도체를 대체하거나 휘어지는 액정화면이 가능해 손목시계형 등 다양한 모양의 휴대전화를 만들 수 있다. 또 태양전지와 두루마리 컴퓨터, 접어서 들고 다니는 전자종이 등에도 사용할 수 있다. 과학자들은 그래핀으로 일반 반도체보다 저장 용량이 큰 컴퓨터

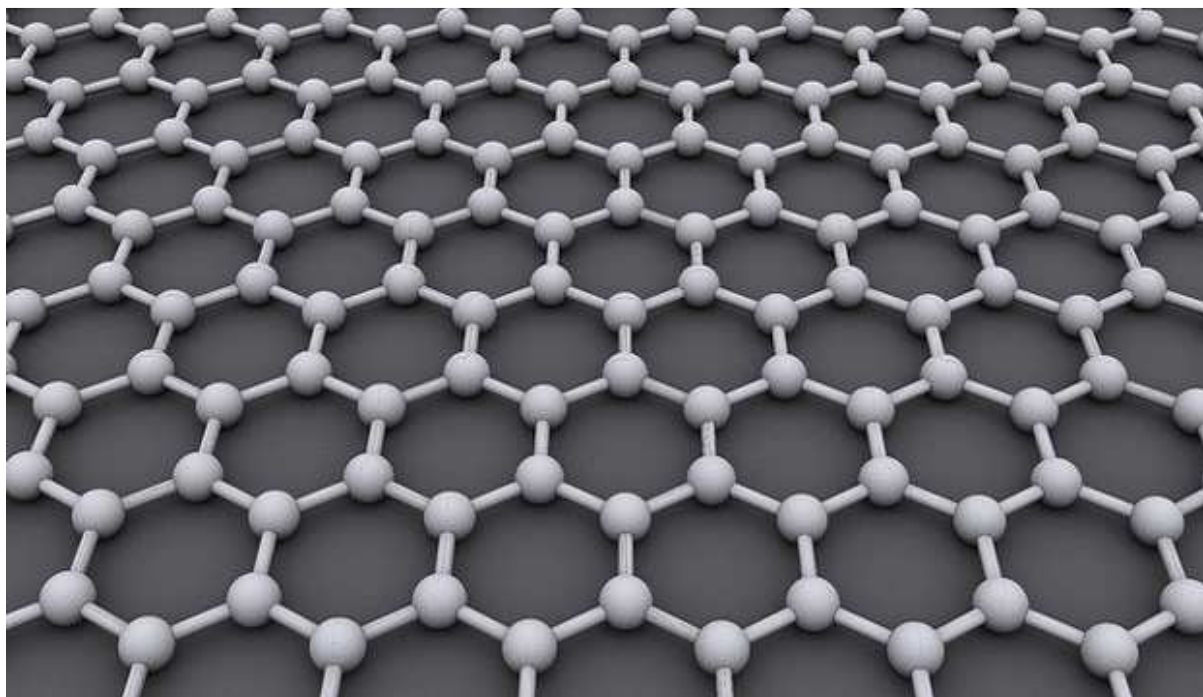
칩과 전자소자 등 초고속 나노 메모리를 만들 수 있을 것으로 기대한다.

그래핀은 차세대 전자소재로 평가받는 탄소나노튜브보다 더 우수한 물질이다. 그래핀을 말아서 원통형으로 만든 구조가 탄소나노튜브이기 때문에 두 물질의 화학적 성질은 매우 비슷하다. 하지만 그래핀을 감는 방향에 따라 반도체와 도체의 특성이 달라지는 탄소나노튜브와 달리 그래핀은 금속성을 균일하게 갖기 때문에 산업적으로 응용하기에 좋다.

그래핀 분야에서 우리나라 과학자들의 연구 성과는 두각을 나타낸다. 지난 2005년 그래핀을 분리한 후 물리학계의 오랜 숙제인 '반정수 양자홀 효과'를 실험으로 증명했으며, 지난 1월 니켈을 촉매로 하고 1,000도의 고온에서 메탄과 수소가스를 사용하는 화학증기증착법을 통해 가로 세로 각각 2cm의 그래핀을 만드는 데 성공했다. 이러한 여세를 몰아 국내 기업들도 그래핀 상용화를 위해 매진하고 있다. 그 이유 중 하나는 액정표시장치(LCD) 등 평면 디스플레이를 만드는 데 쓰이는 산화인듐주석의 나날이 치솟는 가격 때문이다. 산화인듐주석의 가격이 2001년에 비해 10배나 오른 상태다. 이를 대체할 소재로 그래핀을 정한 것이다. 그래핀이 상용화돼 얇고 구부러지는 전자태그가 모든 사물에 부착된다면 언제 어디서나 네트워크로 연결된 유비쿼터스 시대를 앞당기게 될 것이다. **TTA**

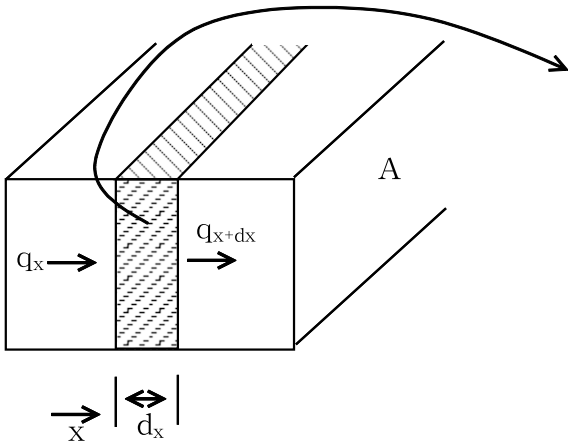








<평면좌표계> - 1차원



$$q = \dot{q}dV = \dot{q}Adx$$

$\dot{q}$  : 단위 체적당 발생열 ( $W/m^3$ )

<에너지 평형>

(1차원 열전도식)

들어오는열 = 나가는열

들어오는 전도열 + 내부발생열 = 나가는 전도열 + 내부축적열

$$q_x + q_g = q_{x+dx} + q_i \quad \dots \dots \dots (1.1)$$

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

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

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

이제 위의 것들을 식(1.1)에 대입하면,

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

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

(3차원 열전도식)

k = constant일 경우

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

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

☞  $\alpha$ 값이 클수록 열은 더욱 빨리 물질 속으로 확산됨. 높은  $\alpha$ 값은 높은 열전도도(k)로부터 얻을 수 있거나 낮은  $\rho c$  (thermal heat capacity : 열용량( $J/m^3K$ ))값으로부터 얻을 수 있다.  $\rho c$ 값이 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

$$\Rightarrow \frac{d^2 T}{dx^2} = 0$$

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

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

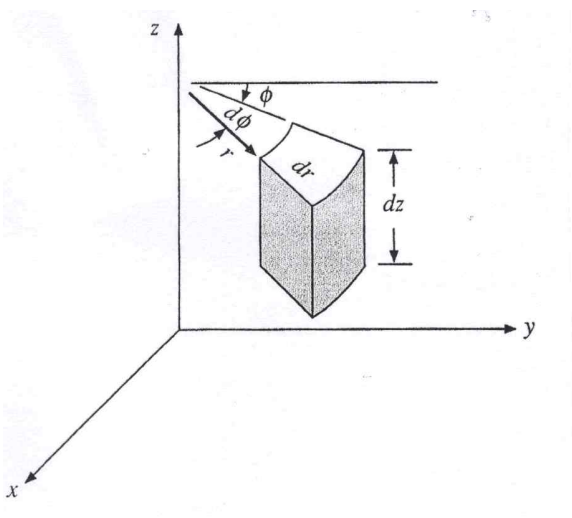
- Steady-state one-dimensional conduction with heat sources

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

- Steady-state two-dimensional conduction without heat sources

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

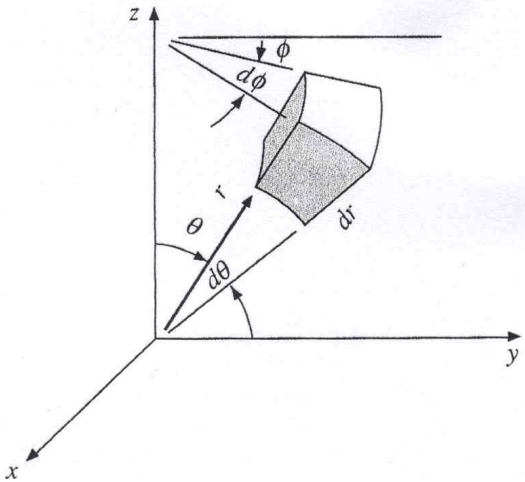
<원통좌표계>



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

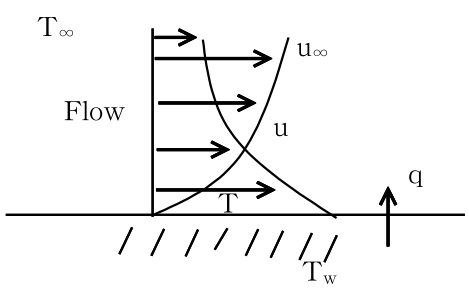


<구좌표계>



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

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



뉴턴의 냉각법칙  $q = hA_s(T_w - T_\infty)$

$h$  : 대류열전달계수 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ) 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	<i>h</i>	
	W/m <sup>2</sup> · °C	Btu/h · ft <sup>2</sup> · °F
<i>Free convection, ΔT = 30°C</i>		
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 ΔT = 60°C	2.64	0.46
Fine wire in air, $d = 0.02$ mm, ΔT = 55°C	490	86
<i>Forced convection</i>		
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, $T_{\infty} = -40^{\circ}\text{C}$ , 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
<i>Boiling water</i>		
In a pool or container	2500–35,000	440–6200
Flowing in a tube	5000–100,000	880–17,600
<i>Condensation of water vapor, 1 atm</i>		
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

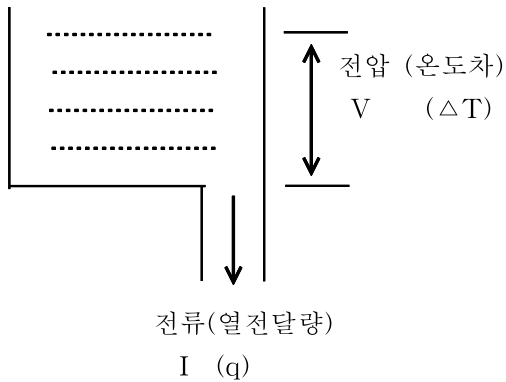
$W_k$  = 과정 중 외부에 한 일

$i$  = 엔탈피 =  $u + pv$

$u$  = 내부 열에너지



- 열전달과 전류의 흐름은 유사하다



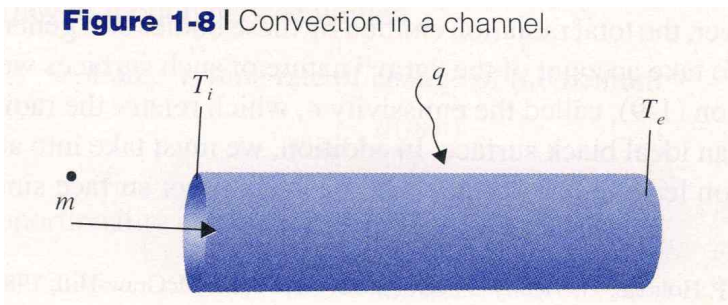
$$V = I \cdot R$$

$$\text{전도} : \Delta T_{all} = q \cdot \frac{\Delta x}{kA}$$

$$\text{대류} : \Delta T_{film} = q \cdot \frac{1}{hA_s}$$

- 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  $T_e$ .



The energy balance on the fluid is

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

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 ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ ). 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

$$\Rightarrow \dot{m} = \rho u_{avg} A_c$$

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  $A_s = \pi dL$

## 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. °C단위로 등가 바람 냉각온도(Equivalent Wind Chill Temperature)는 다음과 같이 주어진다.

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

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

공기속도 15 km/h(4.17 m/s) 공기온도= -15 °C일 때, 체감온도= -25.3 °C

공기속도 30 km/h(8.33 m/s) 공기온도= -15 °C일 때, 체감온도= -34.8 °C

공기속도 45 km/h(12.5 m/s) 공기온도= -15 °C일 때, 체감온도= -39.9 °C

공기속도 60 km/h(16.7 m/s) 공기온도= -15 °C일 때, 체감온도= -42.7 °C

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

#### ◆ 회색 (Gray 혹은 Real) 표면

광택나는 페인트를 칠한 표면이나 연마한 금속판과 같은 물체는 흑체에 비하여 적은 열을 복사하지만 복사열량은  $T^4$ 에 비례한다. 따라서 이러한 회색 표면의 성질을 고려하기 위해서 방사율(emissivity)  $\varepsilon$ 이라는 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.

$$q = F_\varepsilon F_G \sigma A (T_1^4 - T_2^4)$$

여기서  $F_\varepsilon$ 는 방사율함수.  $F_G$ 는 기하학적 투영인자 (view factor)함수이다.

#### ◆ 밀폐공간 내에서의 복사

표면온도가  $T_1$ , 방사율이  $\varepsilon_1$ , 표면적이  $A_1$ 인 작은 물체가 온도가  $T_2$ 인 매우 큰 표면으로 완전히 둘러싸여 있을 때의 순 열전달률은 다음과 같다.

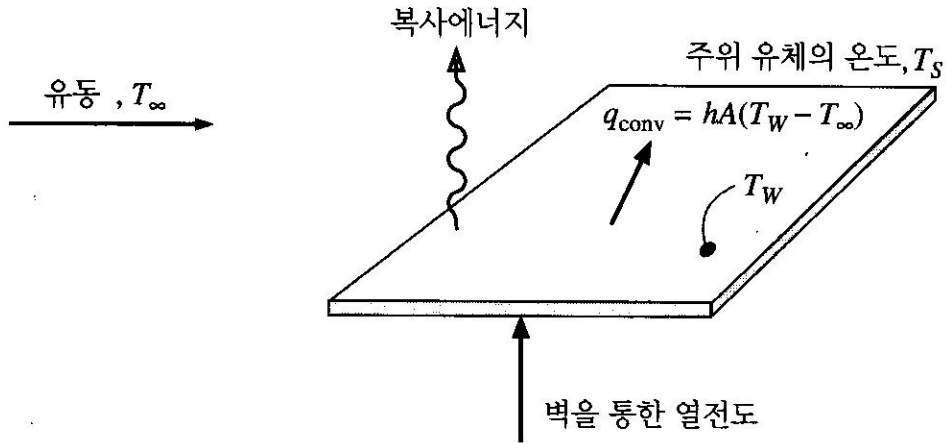
$$q = \varepsilon_1 \sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)$$

**Table A-10** | Normal total emissivity of various surfaces.<sup>†</sup>

Surface	T, °F	Emissivity $\epsilon$
<b>Metals and their oxides</b>		
Aluminum:		
Highly polished plate, 98.3% pure	440–1070	0.039–0.057
Commercial sheet	212	0.09
Heavily oxidized	299–940	0.20–0.31
Al-surfaced roofing	100	0.216
Brass:		
Highly polished:		
73.2% Cu, 26.7% Zn	476–674	0.028–0.031
62.4% Cu, 36.8% Zn, 0.4% Pb, 0.3% Al	494–710	0.033–0.037
82.9% Cu, 17.0% Zn	530	0.030
Hard-rolled, polished, but direction of polishing visible	70	0.038
Dull plate	120–660	0.22
Chromium (see nickel alloys for Ni-Cr steels), polished	100–2000	0.08–0.36
Copper:		
Polished	242	0.023
	212	0.052
Plate, heated long time, covered with thick oxide layer	77	0.78
Gold, pure, highly polished	440–1160	0.018–0.035
Iron and steel (not including stainless):		
Steel, polished	212	0.066
Iron, polished	800–1880	0.14–0.38
Cast iron, newly turned	72	0.44
turned and heated	1620–1810	0.60–0.70
Mild steel	450–1950	0.20–0.32
Iron and steel (oxidized surfaces):		
Iron plate, pickled, then rusted red	68	0.61
Iron, dark-gray surface	212	0.31
Rough ingot iron	1700–2040	0.87–0.95
Sheet steel with strong, rough oxide layer	75	0.80
Lead:		
Unoxidized, 99.96% pure	240–440	0.057–0.075
Gray oxidized	75	0.28
Oxidized at 300°F	390	0.63
Magnesium, magnesium oxide	530–1520	0.55–0.20
Molybdenum:		
Filament	1340–4700	0.096–0.202
Massive, polished	212	0.071
Monel metal, oxidized at 1110°F	390–1110	0.41–0.46
Nickel:		
Polished	212	0.072
Nickel oxide	1200–2290	0.59–0.86
Nickel alloys:		
Copper nickel, polished	212	0.059
Nichrome wire, bright	120–1830	0.65–0.79
Nichrome wire, oxidized	120–930	0.95–0.98
Platinum, polished plate, pure	440–1160	0.054–0.104
Silver:		
Polished, pure	440–1160	0.020–0.032
Polished	100–700	0.022–0.031



#### 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.

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

- $T_s$  : 주위 유체온도,
- $T_w$  : 평판 표면온도,
- $T_\infty$  : 유동 유체온도

## \*\* 열전달 연습문제 \*\*

### 예제 1-1 구리판을 통한 전도

두께 3 cm인 구리판 한쪽 면의 온도는 400°C이고 다른쪽 면의 온도는 100°C이다. 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.

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

### 예제 1-2 대류

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

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

### 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.

$$\begin{aligned} q_{\text{cond}} &= q_{\text{conv}} + q_{\text{rad}} \\ -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} &= 2.156 + 0.3 = 2.456 \text{ kW} \\ \Delta T &= \frac{(-2456)(0.02)}{(0.5)(0.75)(43)} = -3.05^\circ\text{C} \quad [-5.49^\circ\text{F}] \end{aligned}$$

앞의 식에서 k에 대한 값은 표 1.1에서 인용하였다. 그러므로 평판 안쪽 표면에서의 온도는  $T_i = 250 + 3.05 = 253.05^\circ\text{C}$



**Table A-2** | Property values for metals<sup>†</sup> (Continued).

Metal	Properties at 20°C				Thermal conductivity $k$ , W/m · °C									
	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ kJ/kg · °C	$k$ W/m · °C	$\alpha \times 10^5$ m <sup>2</sup> /s	−100°C −148°F	0°C 32°F	100°C 212°F	200°C 392°F	300°C 572°F	400°C 752°F	600°C 1112°F	800°C 1472°F	1000°C 1832°F	1200°C 2192°F
Nickel steel														
Ni ≈ 0%	7,897	0.452	73	2.026										
20%	7,933	0.46	19	0.526										
40%	8,169	0.46	10	0.279										
80%	8,618	0.46	35	0.872										
Invar 36% Ni	8,137	0.46	10.7	0.286										
Chrome steel														
Cr = 0%	7,897	0.452	73	2.026	87	73	67	62	55	48	40	36	35	36
1%	7,865	0.46	61	1.665		62	55	52	47	42	36	33	33	
5%	7,833	0.46	40	1.110		40	38	36	36	33	29	29	29	
20%	7,689	0.46	22	0.635		22	22	22	22	24	24	26	29	
Cr-Ni (chrome-nickel): 15% Cr,														
10% Ni	7,865	0.46	19	0.527										
18% Cr, 8% Ni (V2A)	7,817	0.46	16.3	0.444		16.3	17	17	19	19	22	27	31	
20% Cr, 15% Ni	7,833	0.46	15.1	0.415										
25% Cr, 20% Ni	7,865	0.46	12.8	0.361										
Tungsten steel														
W = 0%	7,897	0.452	73	2.026										
1%	7,913	0.448	66	1.858										
5%	8,073	0.435	54	1.525										
10%	8,314	0.419	48	1.391										
Copper:														
Pure	8,954	0.3831	386	11.234	407	386	379	374	369	363	353			
Aluminum bronze														
95% Cu, 5% Al	8,666	0.410	83	2.330										

**Table A-2** | Property values for metals.<sup>†</sup>

Metal	Properties at 20°C				Thermal conductivity $k$ , W/m · °C									
	$\rho$ kg/m <sup>3</sup>	$c_p$ kJ/kg · °C	$k$ W/m · °C	$\alpha \times 10^5$ m <sup>2</sup> /s	−100°C −148°F	0°C 32°F	100°C 212°F	200°C 392°F	300°C 572°F	400°C 752°F	600°C 1112°F	800°C 1472°F	1000°C 1832°F	1200°C 2192°F
Aluminum:														
Pure	2,707	0.896	204	8.418	215	202	206	215	228	249				
Al-Cu (Duralumin), 94–96% Al, 3–5% Cu, trace Mg	2,787	0.883	164	6.676	126	159	182	194						
Al-Si (Silumin, copper-bearing), 86.5% Al, 1% Cu	2,659	0.867	137	5.933	119	137	144	152	161					
Al-Si (Alusil), 78–80% Al, 20–22% Si	2,627	0.854	161	7.172	144	157	168	175	178					
Al-Mg-Si, 97% Al, 1% Mg, 1% Si, 1% Mn	2,707	0.892	177	7.311		175	189	204						
Lead	11,373	0.130	35	2.343	36.9	35.1	33.4	31.5	29.8					
Iron:														
Pure	7,897	0.452	73	2.034	87	73	67	62	55	48	40	36	35	36
Wrought iron, 0.5% C	7,849	0.46	59	1.626		59	57	52	48	45	36	33	33	33
Steel (C max ≈ 1.5%):														
Carbon steel														
C ≈ 0.5%	7,833	0.465	54	1.474		55	52	48	45	42	35	31	29	31
1.0%	7,801	0.473	43	1.172		43	43	42	40	36	33	29	28	29
1.5%	7,753	0.486	36	0.970		36	36	36	35	33	31	28	28	29

### 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.

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

### 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 표 1.3에서  $h = 6.5 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ 이다. 그리고 관의 표면적은  $\pi dL$ 이므로 단위길이당 대류손실은

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

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.  $T_1 = 50^\circ\text{C} = 323^\circ\text{K}$ 이고  $T_2 = 20^\circ\text{C} = 293^\circ\text{K}$ 이므로

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

따라서 총 열손실은 다음과 같다.

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

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