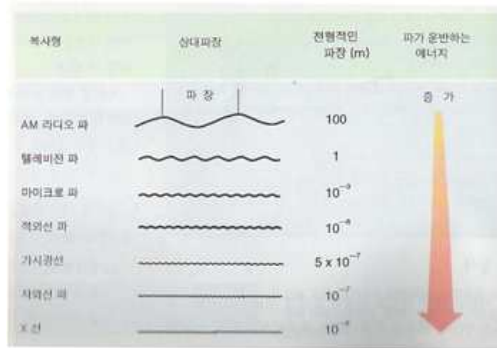


< 제3장 기후변화(지구온난화)란? >

1. 전 지구적 복사균형

가. 기초 지식

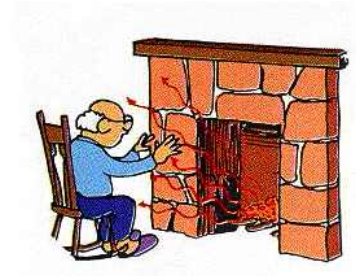
- ✓ 온도: 일정한 기준치에 대해 상대적으로 얼마나 뜨거운지 차가운지를 나타내는 양
- ✓ 기온: 공기의 평균 운동 에너지의 측정
- ✓ 열: 한 물체와 다른 물체 사이의 온도차 때문에 이동과정에 있는 에너지
- ✓ 켈빈온도: 절대 0도를 기준, $K = ^\circ C + 273.15$
- ✓ 화씨온도: 물이 어는 점 $32^\circ F$, 끓는 점 $212^\circ F$
 - $^{\circ}C = (^{\circ}F - 32) \times 5/9$
- ✓ 파장: 파동에서 나타나는 마루에서 다른 마루사이의 거리
 - 파장이 긴 파는 짧은 파보다 에너지를 적게 전달함



<그림 1> 복사유형에 따른 파장의 길이

나. 복사란?

- ✓ 열이 매질을 통하지 않고 고온의 물체에서 저온의 물체로 이동하는 것을 열의 복사라고 한다.
- ✓ 고온의 물체는 전자기파의 형태로 열을 방출해서 온도가 내려가고 저온의 물체는 이 전자기파를 흡수하여 온도가 올라간다. 이 때 저온의 물체는 에너지의 일부를 반사하기도 하고 투과시키기도 한다. 이렇게 열이 빛의 형태로 전달되는 것을 열복사라고 한다. 그리고 적외선, 가시광선, 적외선 등의 전자기파를 열복사선이라고 한다. 이 때 열복사선의 열은 분자들이 충돌하거나 이동하는 일없이 흡수나 방출에 의해 전달된다.
- ✓ 모든 물체는 열복사를 하고 있는데 그 양은 물체의 온도나 표면의 성질에 따라 다르다.
- ✓ 특히 들어오는 열복사선을 모두 흡수하고, 모두 방출하는 이상적인 물체를 흑체라고 한다.



<그림 2> 복사의 개념

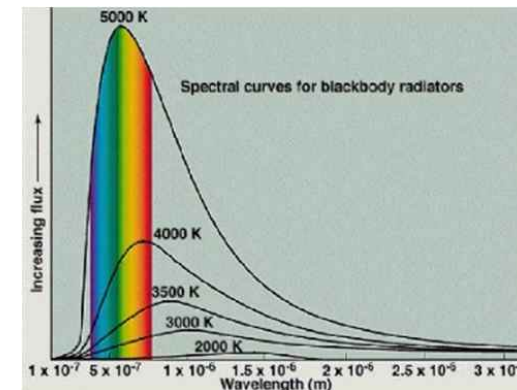
다. 복사의 주요 법칙 1

1) 빈의 법칙

- ✓ 한 물체가 방출하는 최대 복사에너지의 파장은 물체의 온도에 비례
- ✓ 온도가 높을수록 파장이 짧음

$$\lambda_{\max} (\mu m) = \frac{2897}{T}$$

- ✓ 태양의 경우 $T = 6000$
 - 파장의 길이는? (답: 480 nm)



<그림 4> 온도에 따른 흑체의 방출 스펙트럼

2) 스테판-볼츠만의 법칙 (Stefan-Boltzman's law)

- ✓ 물체의 단위표면에서 방출하는 최대복사량 (L)은 물체의 온도(T)의 4승에 비례
- ✓ 온도가 높은 물체는 낮은 물체보다 많고 강력한 복사에너지를 방출

$$L = \epsilon \sigma T^4$$

ϵ : 표면의 투과율, 만약 1이라면 흑체
 σ : 스테판 볼츠만 상수 : $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

- ✓ 만약 지구표면을 완전 흑체라 가정 ($\epsilon=1$)하고 표면 온도가 15°C (288 K)라 한다면 방출되는 최대복사량 L은 390 W m^{-2} 가 됨

라. 복사량 균형

- ✓ 지구는 태양에너지를 $1.8 \times 10^{14} \text{ KW}$ 만큼 받으며 다시 이에 해당하는 긴 파장의 빛을 방출함으로써 현재의 온도를 유지하게 됨
- ✓ 복사균형식 (radiation balance equation)
 - $R_n = S - \alpha S + L_d - L_u$
 - R_n : 지구표면에서의 순복사량의 균형(W m^{-2}), 만약 평형상태라면 이는 0 이 되어야 함
 - S : 지구표면에 도달하는 태양복사에너지 (W m^{-2})
 - α : 지구표면의 반사율, 알비도 (albedo) (단위없음)
 - L_d : 대기에 의해 표면으로 방출되는 장파복사
 - L_u : 표면에서 대기로 방출되는 장파복사
- ✓ 알비도 (들어오는 복사량 중 반사되는 복사량의 비율, 단위는 없으며 복사체의 표면 반사율에 해당됨, 이 단어는 라틴어의 "Albus", 즉 하얗다 (White)에서 유래됨)

- 두꺼운 천둥 구름: 0.92
- 얇고 높은 구름: 0.36
- 눈(fresh/old): 0.95/0.40
- 사막: 0.20-0.45
- 초지(long/short): 0.16/0.26
- 침엽수림: 0.05-0.15
- 툰드라: 0.18-0.25

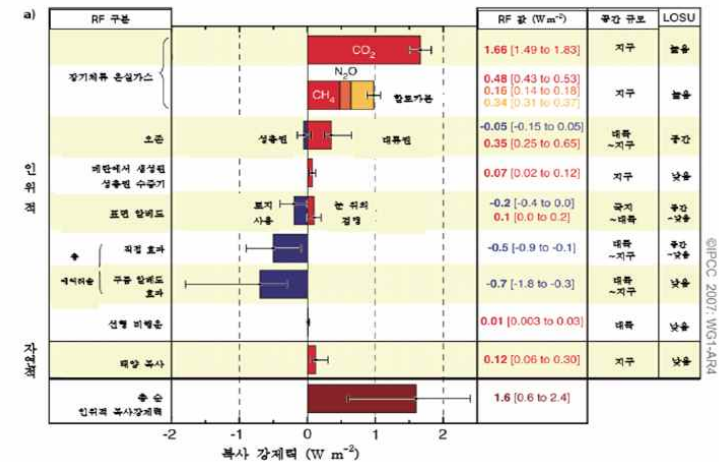
- ✓ 지구와 태양간의 복사균형
 - 즉, 아래 그림에서 보는 바와 같이 온실효과 가스에 의해 지구는 태양과 복사균형 관계에 있다.
- ✓ $R_n = S - \alpha S + L_d - L_u$
- ✓ R_n 은 대략 391 (324+67) → 지구의 평균온도는 288 K (스테판-볼츠만의 법칙이용)
- ✓ 그러나 대기중에 인간의 활동에 의한 온실효과기체의 농도가 증가됨으로 인해 온실효과는 증대되었다. 이는 복사량 균형식에서 " L_d " 부분이 증가되었다는 것.
- ✓ 복사강제력(radiative forcing)

- 정의: 기후시스템에 있어서 들어오는 복사에너지와 나가는 복사에너지 간의 차이
- 복사강제력(radiative forcing)이 양수라면: 들어오는 복사에너지가 더 많으므로 시스템을 온난화시킴
- 복사강제력(radiative forcing)이 음수라면: 나가는 복사에너지가 더 많으므로 시스템을 냉각시킴

2. 대기의 변화가 전지구 에너지 균형에 미치는 잠재적 영향

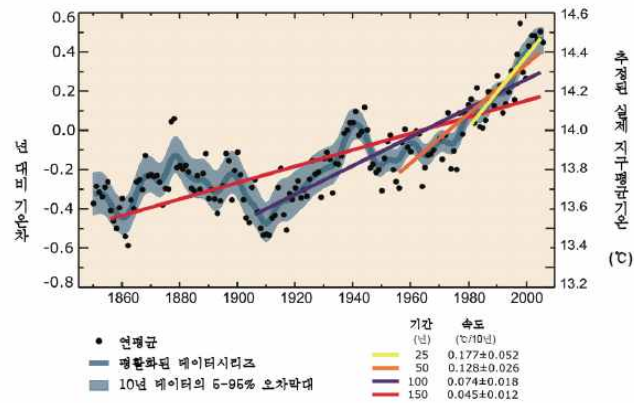
가. 대기중 복사강제력(radiative forcing)의 변화를 가져오는 물질들

- ✓ 지금까지 알려진 대기의 여러 물질들은 복사강제력의 총합은 약 1.6 W/m^2 로써 지구는 들어오는 복사에너지가 나가는 복사에너지보다 많은 상태라고 할 수 있다. 이 때문에 지구의 기온이 상승하고 있다고 볼 수 있다.
- ✓ 지구를 덥게 만드는 물질들: 이산화탄소, 메탄, 아산화질소, 할로겐족 수소화합물, 대기중 오존
- ✓ 지구를 냉각시키는 물질들: 대기중 에어로졸 (황화합물, 연료 연소시 숯검댕 등)



<그림 5> 복사강제력(radiative forcing)을 가져오는 물질들

나. 지구 대기온도의 변화



<그림 6> 150년간의 지구평균기온의 변화를 보여주는 그림

- ✓ <그림 6>은 과거 150년간의 지구평균기온의 변화를 보여주는 그림이다.
- ✓ 보는 바와 같이 최근에 가까워질 수록 온도증가의 기울기가 급격히 상승하고 있음을 볼 수 있다. 최근 25년간의 기온증가 속도는 10년에 약 0.177도로써 과거 150년간의 평균 증가속도인 10년당 0.045도에 비하여 거의 4배가량 증가했음을 알 수 있다.
- ✓ 이는 기후변화는 명백히 일어나고 있으며 이러한 기후변화의 원인이 인간에 의한 온실가스 농도의 변화와 밀접히 관련되어 있음을 보여준다.

라. 지구복사량 균형의 피드백 과정

- ✓ 만약 현재까지 알려진 복사강제력에 의해 지구표면의 온도를 예측하면 그 상승 폭은 약 1.2도 정도라고 한다.
- ✓ 그러나 실제로는 1.2도가 아니라 이보다 2배 많은 약 2.5 oC가량 증가될 것으로 예측되는데, 이는 지구 복사량 균형의 피드백 과정 때문으로 생각된다.
- ✓ 피드백의 종류로는 여러가지가 있으나 그 중 대표적인 피드백 과정을 몇가지 소개하겠다.
 - 대기중의 수증기 (양의 피드백)
- ✓ 지표가 더워짐으로 인해 더 많은 수증기가 증발산되고 대기중의 수증기는 또한 온실효과기체이므로 지구복사량 균형에 있어서 양의 피드백을 가져온다
- ✓ 구름
 - 양의 피드백: 구름양이 많으면 더 많은 수증기가 포함되었다는 의미이므로 양의 피드백

- 음의 피드백: 두꺼운 구름은 태양 복사에너지가 지표에 도달하는 것을 방해하므로 음의 피드백
- ✓ 얼음의 알bedo (양의 피드백)
 - 지구가 온난화됨으로써 얼음은 녹게되고 얼음이 녹게되면 지구평균 알비도가 저하됨으로 더 많은 태양에너지가 지표에 도달하게 됨
- ✓ 육상생태계 (음의 피드백)
 - 육상생태계에 더 많은 양의 biomass가 축적되면 더 활발한 증발산량에 의해 대기중 수증기 양이 많아져서 양의 피드백

마. 온실가스 이외에 기후에 영향주는 요인과 피드백 과정

- ✓ 밀란코비치 이론(Milankovitch theory)
 - 빙하기와 간빙기의 도래에는 확실한 주기가 있는데, 이 이유를 밝히려는 이론임
 - 세르비아의 수학자 밀란코비치는 지구의 공전축의 각도가 주기를 가지고 변동하기 때문에 이와같은 빙하기와 간빙기의 규칙성이 나타나는 것이라 설명함
 - 즉, 수학자인 밀란코비치는 지구가 받는 순 에너지량의 변화를 측의 기울기, 타원모양의 변화, 그리고 경사도의 변화로 계산하였음
 - 이 이론은 지구대기의 조성과는 무관하게 기후에 영향을 주는 매우 주요한 요인을 설명하는 이론임
- ✓ 태양에너지의 세기 변동
 - 태양 흑점의 활동도에 따라 태양에너지의 세기가 변동하여 지구 온도에 영향을 줌
- ✓ 화산활동 및 해양에서 다량 방출되는 메탄가스 등
- ✓ 이처럼 온실가스 이외에도 기후에 영향을 주는 요인들은 매우 많다
- ✓ 요인들은 지구온도를 증가시키는 것일 수도 있고, 감소시키는 것일 수도 있다. 중요한 것은 여러 과학적인 논의가 아직 진행되고 있기는 하지만 현재 관찰되는 기후의 변화에는 온실가스 농도의 증가가 주요한 원인이라는 사실에는 변함이 없다.