

# 기후변화개론

## 01. 기후변화 원인, 현상 및 복사평형



## 1. 기후의 정의

기후란 최소 30년 이상의 일정한 기간에 걸쳐 평균화된 날씨라고 정의할 수 있습니다. 이러한 기후는 항상 변화해왔고, 앞으로도 변할 것입니다. 과거의 지구 기후를 명확하게 파악하면 기후가 변화한다는 것을 증명할 수 있습니다.

## 2. 과거기후를 추정할 수 있는 대리변수

과거기후를 추정할 수 있는 대리변수에는 여러가지가 있습니다. 그 중 나무의 나이테, 빙하 속에 갇힌 공기방울 그리고 호수나 해양의 저질이 대표적이라 할 수 있습니다. 그럼 과거기후를 추정할 수 있는 3가지 대리변수를 하나씩 알아보겠습니다.

첫 번째 대리변수인 나무의 나이테를 살펴보겠습니다. 나무는 온도가 높고 비가 많이 오면 부피생장을 활발히 하고, 춥고 건조하면 부피생장이 느리기 때문에, 나이테 간격이 넓은 시점이 좁은 시점에 비해 기온이 높고 강수량이 높은 날씨였을 것이라 추측할 수 있습니다. 두 번째 대리변수인 빙하 속에 갇힌 공기방울에 대해 알아보면, 눈은 공기 중 수증기가 응결 후 결빙하면서 생긴 현상이고 빙하는 이러한 눈이 추운 지역에서 겨울과 봄을 반복하면서 해마다 층처럼 지표에 쌓여 있는 것을 말합니다. 눈이 형성될 때 공기에 대한 정보를 저장하기 때문에 빙하 속 공기방울에 포함된 산소나 수소의 동위원소 분석을 통하여 당시 기후를 추측할 수 있습니다. 마지막으로 호수나 해양의 저질은 표면에서 대기와 반응하고 이 반응물이 오랜 시간에 걸쳐 바닥으로 이동하여 빙하처럼 켜켜이 쌓이게 된 것을 말합니다. 이때 식물성 플랑크톤에 의해 형성되는 탄산칼슘과 같은 물질들도 무게로 인해 저질로 이동하게 되는데, 이러한 저질에 쌓인 물질층 역시 당시 대기조성에 관한 정보를 포함하게 되므로 기후를 추측할 수 있는 것입니다. 이처럼 기후 대리변수를 이용하여 과거의 기후를 추정할 수 있는데, 관련 학문분야를 고기후학, 다시말해 Paleoclimatology라고 합니다.

## 3. 기후변화의 원인 및 지구와 태양간의 복사평형

세르비아의 천문학자 밀란코비치는 싸이클 이론을 통해 지구기후변화에 영향을 주는 천문학적 요인을 세 가지로 정리하였는데 그 중 첫 번째는 지구 공전궤도의 이심률 변화입니다. 지구 공전궤도는 타원형인데 이 타원의 모양이 거의 원형에서 완만한 타원 모양까지 약 100,000년을 주기로 변화합니다. 이 공전궤도가 타원에 가까우면 타원의 단반경의 길이가 짧아지면서 급격한 계절변화가 생기는 것입니다. 두 번째는 자전축 경사도의 변화입니다. 지구 자전축의 경사는 22.1도에서 24.5도까지 약 41,000년을 주기로 변화합니다. 이 때 자전축 경사가 증가하면 계절에 따른 태양복사에너지의 진폭이 증가하게 됩니다. 마지막으로 세차운동입니다. 세차운동이란 지구의 자전축이 팽이처럼 약 26,000년마다 한 바퀴 도는 현상을 말합니다.

기후변화의 두 번째 원인은 지구복사평형의 변화입니다. 지구복사평형을 이해하기 전에 복사에 관한 기초지식부터 살펴보겠습니다. 복사란 한 물체에서의 에너지가 매질을 통해 다른 물체로 전달되는 과정을 말합니다. 그리고 열복사란 한 물체가 가지고 있는 열로 인해

전자기 복사가 다른 물체로 전달되는 과정을 말합니다. 그런데 여기에서 모든 전자기 복사 에너지를 흡수하는 이상적인 물체가 있습니다. 이것을 바로 흑체라고 합니다. 그럼 흑체의 복사와 관련한 기초적인 두 가지 법칙인 빈의 법칙과 스테판-볼츠만의 법칙을 통해서 흑체에 대해 알아보시다. 빈의 법칙은 흑체에서 방출되는 에너지가 갖는 파장은 흑체의 온도에 반비례한다는 법칙입니다. 즉, 물체의 온도가 높을수록 더 짧은 파장의 복사에너지를 방출한다는 법칙입니다.

그럼 예를 들어서, 태양의 표면온도가 6000도 켈빈이라고 할 때, 복사에너지의 파장의 길이는 얼마일지 알아보겠습니다. 빈의 법칙 식에  $T$  대신 6000을 대입하면 됩니다. 6000분의 2897은  $0.482\mu\text{m}$  마이크로미터입니다. 또한, 스테판-볼츠만 법칙은 흑체의 단위 표면적 및 단위 시간당 복사하는 총 에너지 양은 흑체의 열역학적 온도의 네제곱에 비례한다는 법칙입니다. 즉, 물체의 표면 온도가 높으면 높을수록 복사에너지가 커진다는 법칙입니다. 스테판-볼츠만 법칙의 식은  $\epsilon = \sigma T^4$ 입니다.  $\sigma$ 는 절대온도의 4승입니다.  $\epsilon$ 는 표면의 투과율이며, 만약 1이라면 흑체입니다. 그리고  $\sigma$ 는 스테판 볼츠만 상수인데,  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$ 입니다. 그럼 예를 들어서, 지구를 흑체라 가정하고 지구 표면의 온도를 288K라고 할 때, 지구가 방출하는 최대복사에너지의 양은 얼마일지 스테판-볼츠만 법칙의 식을 활용하여 계산해 보겠습니다. 먼저 지구를 흑체라 가정했기 때문에  $\epsilon$ 는 1이며,  $T$ 에 288을 대입하고  $\sigma$ 에 스테판-볼츠만 상수를 넣으면 390이 나옵니다.

다음으로 복사 평형에 대해 살펴보겠습니다. 복사 평형을 계산하는 식부터 보면, 순복사량  $R_n$ 은 들어오는 태양에너지  $S$ 에서 반사되는 태양에너지  $\alpha S$ 를 빼고 나가는 지구 복사에너지  $L_u$ 를 뺀 후, 재복사되는 지구복사에너지  $L_d$ 를 더하면 됩니다. 이것을 계산하면  $R_n$ 은 391이 나오며, 스테판 볼츠만의 법칙을 이용해 지구 표면온도를 계산하면 약 288K로 나옵니다. 그리고  $\alpha$ 란 알비도를 지칭하며, 알비도란 그리스어로 하얀 정도를 의미합니다. 들어오는 복사에너지 중 반사되는 에너지와의 비율로, 지구 복사에 있어 중요한 알비도의 수치들은 화면과 같으며 두꺼운 구름, 얇은 구름, 눈, 사막, 초원, 침엽수림, 툰드라가 있습니다. 그리고 재복사되는 지구복사에너지를  $L_d$ 라고 했습니다. 이것을 온실효과라고 하며 지구가 복사방출한 에너지를 지구방향으로 재복사하는 부분을 말합니다. 온실효과를 가져오는 기체들은 이산화탄소, 수증기 등의 온실가스입니다. 이들은 태양으로부터 지구에 들어오는 짧은 파장의 태양 복사에너지는 통과시키는 반면 지구로부터 나가려는 긴 파장의 복사에너지는 흡수하여 지구 대기의 온도를 상승시키는 작용을 합니다. 지구대기에 존재하는 이러한 온실가스 덕분에 현재 지구의 평균대기 온도가 형성될 수 있었으며, 만약 온실가스가 없었다면 지구대기는 생물이 살기 힘들 정도로 추운 온도가 유지되었을 것입니다. 문제는 이런 온실효과 자체가 아니라 산업혁명 이후 이러한 온실가스의 대기 농도가 현저히 증가되어 태양과 지구간의 복사 평형이 교란되기 시작했다는 데에 있습니다.

#### 4. 온실가스

온실가스란 태양으로부터 방출되는 짧은 파장의 자외선 복사는 통과를 시키고 지구로부터 방출되는 긴 파장의 적외선을 통과시키지 못함으로써 지구대기의 온실효과를 가져오는 기체를 말합니다. 보통 대칭의 분자구조를 가지고 있는 기체인 질소와 산소는 온실가스가 아니고, 비대칭 분자구조를 가진 기체인 이산화탄소, 아산화질소가 온실가스가 됩니다. 여기에서 중요한 점은 GWP로 Global Warming Potential의 줄임말이며, 이산화탄소의 온실가스 효과를 1이라고 보았을 때 상대적인 온실가스 효과 잠재력을 말합니다.

그렇다면 과거의 대기는 어떻게 조성되어 있었을지 살펴보겠습니다. 과거 65만년 동안의 주요 온실가스 농도의 변화를 보여주는 그래프를 보시면 주요 온실가스인 이산화탄소, 메탄, 아산화질소의 농도는 과거 65만년 동안 증가와 감소를 거듭하여 왔으나 최근 몇 백 년 사이 전래 없이 증가했습니다. 과거의 대기 조성과 기후변화를 확인할 수 있는 자료가 또 있습니다. 바로 남극의 빙하기록입니다. 남극의 빙하기록은 지난 빙하기와 간빙기 사이클을 포괄할 수 있는 오래된 과거 대기의 조성을 추정할 수 있습니다. 그럼 빙하에 대해 자세히 알아보겠습니다. 빙하는 시간이 지날수록 계속 위로 쌓이는 것으로 가장 위에 있는 빙하는 최근 빙하, 가장 깊이 있는 빙하는 과거의 빙하라고 말할 수 있으며, 빙하의 두께는 거의 2km에 달합니다. 이러한 빙하에 있는 CO<sub>2</sub>와 CH<sub>4</sub>농도, 그리고 중수소의 농도는 과거 기후에 대해 많은 정보를 줍니다. 그리고 빙하에 중수소 함량이 높다는 것은 그 시기에 지구의 온도가 높았음을 의미합니다. 중수소는 보통 수소에 비해 증발하는 데 많은 에너지를 소비하기 때문에 지구의 온도가 높은 경우에는 중수소가 해양으로부터 증발되어 극지방에 가서 응결되었을 확률이 높습니다. 또한, 빙하분석에 의하면 지구의 온도와 이산화탄소 및 메탄의 농도는 매우 높은 연관성을 가지고 있음이 확인되었습니다.

그럼 이제 주요 온실기체에 대해 알아보시다. 첫 번째 알아볼 기체는 이산화탄소입니다. 이산화탄소는 온실가스기체 중 가장 중요합니다. 그 이유는 양적으로 가장 크기 때문이며, 식물의 광합성, 발산, 호흡 과정에 직접적으로 관여하기 때문입니다. 그런데 대기 중 이산화탄소 농도가 변화되었다는 것을 어떻게 알게 되었을지 알아보겠습니다.

첫 번째 경로는 미국의 과학자 C.D.Keeling의 연구를 통해서였습니다. C.D.Keeling은 하와이에서 두 번째로 높은 산인 Mauna Loa에서 1958년부터 대기 중 이산화탄소 농도를 측정했는데, 이때 하와이 산꼭대기에서 측정을 한 이유는 산업에서의 이산화탄소 배출원과 멀리 떨어져 있으며, 이산화탄소는 대기 중에서 매우 잘 혼합되는 기체이므로 전지구의 평균적 변화를 알 수 있기 때문입니다. 두 번째 경로는 남극지방의 빙하 분석에 의해서였습니다. 이 자료에 의하면 대기 중 이산화탄소 농도의 급격한 증가가 화석연료의 연소가 시작된 산업혁명 시기인 1800년대와 일치하고 있습니다. 산업혁명 이후의 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 단순한 상관성이지만 인과관계는 아닙니다. 그렇다면 인과관계를 뒷받침하는 증거는 무엇일지 알아보겠습니다. 첫 번째는 대기 중 이산화탄소 농도는 북반구가 남반구보다 더 높으며 농도의 차이는 이산화탄소 배출과 연관이 되어 있습니다. 두 번째는 화석연료에 포함된 탄소는 <sup>13</sup>C 양이 <sup>12</sup>C보다 적은데, 산업혁명 이후 대기의 <sup>13</sup>C/<sup>12</sup>C 비율은 계속 감소되어 왔습니다. 이는 화석연료의 연소 때문에 화석연료 내의 탄소가 대기 중으로 자꾸 유입이 되어 대기 중의 <sup>13</sup>C 양이 희석되고 있음을 의미합니다. 화석연료에 포함된 탄소는 <sup>14</sup>C를 가지고



있지 않은데 반해 대기는  $^{14}\text{C}$ 를 포함하고 있는데, 산업혁명 이후 대기 중  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  비율이 꾸준히 감소되어 왔습니다. 화석연료의  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  비율은 보통 대기 중의  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  비율보다 적고, 화석연료의  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  비율도 보통 대기 중의  $^{14}\text{C}/^{12}\text{C}$  비율보다 적습니다.

다음으로 알아볼 기체는 메탄입니다. 메탄이 발생하는 원천은 메탄생성 박테리아에 의한 혐기성 발효인데, 자연적 원천과 인위적 원천으로 나뉩니다. 자연적 원천은 습지, 흰개미, 대양 등에서 발생하는 것이고, 인위적 원천은 석탄, 석유 및 천연가스, 벼와 논, 가축 분뇨 등 유기물의 분해, 반추동물에 의한 메탄 발생, 하수 처리장, 매립지, 생물자원의 연소 등에서 발생하는 것을 말합니다. 메탄의 주요 저장고는 대기와 토양이 있는데, 대기에서는 대류권에 있는 하이드록실 라디칼에 의해 제거되어, 메틸 라디칼과 물로 바뀝니다. 토양에서는 메탄이용 세균에 의해 메탄이 제거 됩니다. 질소산화물의 주요 원천은 탈질 및 질화과정에 의해 생성되며, 자연적 원천과 인위적 원천으로 나뉘어집니다. 자연적 원천으로는 토양 즉 열대 및 온대 산림, 사바나, 온대 초지와 대양이며, 인위적 원천으로는 농경지, 생물자원의 연소, 산업공정이 있습니다. 질소산화물의 주요 저장고는 성층권인데, 성층권에서의 자외선 복사에 의해 매년 배출량의 2/3가량이 제거되고 있습니다. 할로겐탄소수소화합물족에는 프레온가스, 수소불화탄소, 과불화탄소, 육불화황이 있으며, 자연적 원천은 없고 모두 산업공정에서 발생합니다. 주요저장고는 대류권으로서, 대류권에는 제거기작이 없고 이들 화합물은 화학적으로 매우 안정하여 평균 수명이 50~150년 사이에서 수백년까지 이릅니다. 유일한 제거기작으로는 프레온가스가 성층권까지 도달하여 자외선에 의해 광분해 되는 것뿐입니다.

#### 참고 문헌

1. 웹 참조-[http://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%B9%88%EC%9D%98\\_%EB%B2%95%EC%B9%99](http://ko.wikipedia.org/wiki/%EB%B9%88%EC%9D%98_%EB%B2%95%EC%B9%99)
2. 웹 참조-<http://oceanworld.tamu.edu/resources/oceanography-book/radiationbalance.htm>
3. Houghton et al. (1992)
4. 기후변화 이해하기 I, 국립기상연구소 (2009)

