

기후변화개론

02. 전 지구의 탄소 순환



1. 탄소의 순환

탄소는 전지구를 순환하면서 저장고에 머물기도 하고, 저장고와 저장고 사이를 이동하기도 합니다. 탄소의 순환은 어떻게 이루어지고 있는지 알아보겠습니다. 우선 산업혁명 이전시를 살펴봅시다. 탄소의 주요 저장고를 보면 탄소의 가장 큰 저장고는 퇴적층과 암반이고, 그 다음은 해양입니다. 대기에 저장되어 있는 탄소의 주요 형태는 이산화탄소이고 이의 양은 퇴적층이나 해양에 비해 적은 양이지만, 대기의 탄소는 식생, 토양 및 해양 혼합층과 활발한 교환을 합니다. 앞에서 설명한 것처럼 대기중의 탄소는 식생, 토양, 해양의 혼합층과 활발한 물질교환을 합니다. 탄소의 거대한 저장고인 퇴적층과 암반은 대기 중 탄소와의 교환 양이 매우 적습니다. 그러므로 탄소의 순환에 있어서는 식생 및 토양, 그리고 해양 혼합층이 주요한 역할을 합니다.

산업혁명 이후에 전지구의 탄소 순환은 어떻게 변했는지 알아보도록 하겠습니다. 가장 큰 변화로는 대기 중 탄소의 저장량이 커졌다는 점입니다. 이의 주요 원인으로는 화석연료의 연소와 토지이용의 변화를 들 수 있습니다. 화석연료는 산업혁명 이후 인간에 의해 빠르게 채굴되어 광범위하게 사용되기 시작했고 인구급증에 따른 식량부족을 해소하기 위해 숲의 농경지화 현상이 가속화되어 식물에 의해 흡수되는 이산화탄소량이 크게 줄게 되었습니다. 즉, 산업혁명 이후에는 인간의 산업 활동 및 식생파괴에 의해 이산화탄소 및 메탄 같은 온실기체의 대기 중 농도가 증가하였고, 이로 인해 대기과 육상생태계, 대기과 해양생태계 간의 탄소 교환의 크기가 더 커졌다고 말할 수 있습니다. 산업혁명 이후 탄소순환의 변화를 저장고와 흐름의 측면에서 살펴보도록 하겠습니다. 대기 중 탄소는 주로 이산화탄소 형태로 존재하는데 그 농도가 증가에 의해 저장고의 크기가 증가하였고, 산림벌채 특히 열대우림 파괴로 인하여 육상생태계의 식생 및 토양 내 탄소 저장고 크기는 감소하였으며, 해양에서의 탄소 저장고의 크기는 큰 변화는 없습니다. 해양에서의 주요 탄소 저장형태는 용존유기 탄소입니다.

흐름의 변화에서, 흐름을 크게 둘로 나누면, 하나는 육지와 대기와의 교환이고 다른 하나는 해양표층과 대기와의 교환입니다. 또한 화석연료 연소 및 토지이용의 변화로 인하여 육상생태계에서 대기로 이동하는 흐름의 크기가 크게 증가되었습니다. 특히 대기중 이산화탄소 농도의 증가로 인하여 해양 표층과 대기와의 교환속도도 빨라졌습니다. 해양과 대기간의 교환은 해양에 녹아있는 이산화탄소 양과 용해도 계수에 의해 결정됩니다. 여기서 Henry's law이 이용이 되는데 이 법칙은 기체가 용매에 얼마나 녹을까는 그 기체의 가용성 및 그 기체의 부분압에 비례한다는 법칙이며 온도, 염도, 생물학적인 활성도, pH 등과 연관됩니다.

2. 육지와 대기와의 탄소교환

광합성은 광합성은 지구상에서 일어나는 가장 중요한 과정이라고 말할 수 있습니다. 왜냐하면 식물이 잎에서 빛에너지를 받아들여 물을 분해하고, 물 분해의 부산물과 이산화탄소를 결합시켜 유기물을 합성하기 때문입니다. 광합성에 영향을 미치는 요인은 이산화탄소 농도, 물, 온도입니다. 첫 번째 요인은 이산화탄소 농도입니다. 이산화탄소 농도는 식물 잎 내부의

이산화탄소 농도가 높으면 높을수록 광합성량은 많아지게 되는데 이를 이산화탄소 시비효과라고 합니다. 하지만, 이산화탄소 농도가 높다고 하여 광합성량이 무제한적으로 증가하는 것은 아닙니다. 포화점 이상을 지나면 더 이상 광합성량이 증가하지 않게 되기 때문입니다. 이 때의 이산화탄소 농도를 보상점이라고 부릅니다. 다음으로, 물은 식물의 뿌리로부터 흡수하여 식물의 기공을 통해 증발하게 됩니다. 이 기공을 열고 있을 때는 이산화탄소의 유입이 일어날 뿐만 아니라 식물 내부에 있던 물이 증발합니다. 즉, 식물이 기공을 너무 많이 열면 이산화탄소는 충분히 유입되나 수분을 잃게 되고, 수분증발을 막기 위해 기공을 닫고만 있으면 식물체 내 이산화탄소 농도가 부족할 수 있습니다. 그런 이유 때문에, 식물은 기공의 개폐를 적절히 조절하게 되는 것입니다. 셋째, 온도는 모든 생물학적 과정을 조절하는 주요한 요인입니다. 광합성 과정도 온도에 따라 민감하게 변화합니다. 특정 온도 이하에서는 광합성이 일어나지 않으며 온도가 너무 높아도 광합성 과정이 일어나지 않게 됩니다.

식물호흡은 광합성의 반대과정으로서 광합성을 통해 생성된 탄수화물을 연소하여 식물의 기초대사와 생장에 이용할 에너지를 생성하는 과정입니다. 식물은 식물호흡을 통하여 이산화탄소와 물을 방출하게 됩니다. 그럼, 식물이 광합성한 양과 호흡한 양은 서로 같을까요? 대답은 no입니다. 만약 항상 광합성량과 식물호흡량이 같다면 식물은 생장할 수 없게 되기 때문입니다. 식물은 어렸을 때 광합성량이 식물호흡량보다 크므로 유기물을 몸 안에 계속 축적하여 생장을 할 수 있게 되고 점점 나이가 들어가면서 광합성량은 식물의 호흡량과 거의 같아지는 시기에 생장을 멈추고 정상상태에 들어섰다고 할 수 있습니다.

낙엽과정은 지상 위에 있는 유기물이 토양으로 유입되는 과정으로 낙엽이나 낙지, 뿌리를 통해 일어납니다. 이렇게 땅 속으로 유입된 유기물은 토양의 미생물에 의해서 분해되기 시작합니다. 토양 호흡은 토양 내의 유기물이 미생물의 분해 과정을 통해 다시 대기 중 이산화탄소로 방출되는 과정과 토양 내의 뿌리가 호흡하면서 생기는 이산화탄소 방출, 그리고 토양 소동물의 호흡으로 인한 이산화탄소 방출 등을 묶어서 말하는 것입니다. 이 중 가장 중요한 것은 1번 과정으로, 이 과정을 유기탄소의 무기화 과정이라고 부르기도 합니다.

3. 해양과 대기와의 탄소교환

탄산염류에 이산화탄소가 녹고 김이 빠지듯 해양에도 이산화탄소가 녹습니다. 해양에 대기 중 이산화탄소가 녹는 과정은 탄산 화학에 의해 결정되는데 과정에 영향을 주는 요인은 다양합니다. 먼저 대기 중 및 해양 내의 이산화탄소의 농도, 해수의 온도, 해수 내의 용해탄소의 농도, 해수의 알칼리도 등이 있습니다. 특히, 해수의 알칼리도에 따라 이산화탄소는 이산화탄소, 하이드로젠 카보나이트, 탄산이온 등의 형태로 존재하게 됩니다.

생물학적 과정에서 식물성 플랑크톤은 육상에서의 식물과 마찬가지로 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하고 호흡을 통해 다시 방출합니다. 차이점이라면 식물성 플랑크톤은 해양 내에 용해되어있는 탄산을 이용한다는 점입니다. 광합성과 동시에 식물 플랑크톤은 해양에 용해되어있는 탄산을 딱딱한 탄산칼슘 껍질로 만들 수도 있습니다. 분해되지 않은 유기물 잔해와 무기질의 탄산칼슘 껍질 등은 얕은 바다에서 해저로 이동하게 되는데, 이 과정은 전지구 탄소 순환에 있어서 매우 중요합니다. 앞서 살펴본 대로 전 지구 탄소 순환 중 해저는

매우 큰 탄소의 저장고 중의 하나입니다. 생물학적 펌핑이란, 해수혼합층에서 해저 층으로 탄소가 이동되는 과정을 말합니다. 이 생물학적 펌핑은 매우 중요한 과정입니다. 왜냐하면 이 과정이 없다면 지구상의 대기 중 이산화탄소 농도는 500 ppm까지도 올라갈 수 있었으며, 만약 생물학적 펌핑이 어떠한 제한조건도 없이 최대의 속도로 일어난다면 대기 중 이산화탄소 농도는 140 ppm까지도 떨어질 수 있기 때문입니다.

4. 인간활동에 의한 탄소순환의 교란

화석연료의 연소는 석탄, 석유, 천연가스 등의 연료가 인간에 의해 연소되는 과정으로, 총 적암 측에 저장된 탄소를 대기 중으로 방출하는 과정입니다. 화석연료는 매우 오래 전에 살았던 육상이나 해양 식물들이 아주 오랜 세월을 거치면서 화석화된 것입니다. 이런 오래된 탄소를 인간은 산업혁명 이후 에너지원으로서 짧은 시간 안에 태워버렸습니다. 이것은 아주 오래된 탄소를 대기 중으로 추가하는 결과를 낳게 되었습니다. 탄소 중립이란 어떠한 대상 혹은 행위가 탄소를 배출할 만큼 탄소를 흡수하여, 대상 또는 행위의 전과정에서 순 배출된 탄소가 0이 된다는 개념입니다. 사례로 살펴보면 일년생 작물이 있을 때, 작물이 살아 있을 때는 광합성으로 탄소를 몸 안에 저장하게 됩니다. 이 작물이 죽으면 토양으로 돌아가 미생물에 의해 저장되었던 탄소가 다시 대기 중으로 돌아갑니다. 그러면 대기에 실제로 배출된 탄소의 양은 0이 되고, 이것을 탄소 중립이라고 부르는 것입니다.

화석연료란 것도 사실 알고 보면 아주 오랜 옛날 광합성 산물인 식물의 생체가 지질층에 축적되어 압력과 고온을 받음으로써 생성된 탄소 덩어리입니다. 하지만 인간이 산업혁명 이후 이러한 탄소덩어리를 채굴하여 태움으로써 대기중에 탄소를 "순" 배출하는 결과를 낳았습니다. 즉 아주 긴 시간규모로 보았을 때 화석연료의 연소도 탄소중립이라 볼 수 있지만 인간의 산업혁명 이후의 시간규모에서 본다면 화석연료의 연소는 대기 중으로 탄소를 "순" 배출하는 탄소 양성적 반응이라고 할 수 있습니다. 탄소 음성적 반응은 어떠한 대상 혹은 행위가 탄소를 대기로부터 "순" 흡수하여 대기중의 탄소양을 감소시키는 과정을 말합니다. 예를 들면, 산에 나무를 심어 몇 십 년 동안 베거나 훼손시키지 않는 경우를 '탄소 음성적 반응'이라고 할 수 있습니다.

토지이용의 변화도 이런 교란의 일부분이라고 할 수 있습니다. 산림벌채 및 태우기로 산림벌채가 시작되면 육상식물 죽어서 미생물에 의해 자연적으로 분해되거나 혹은 인간이 인위적으로 불태우게 되는데 이 경우 많은 양의 탄소가 대기 중으로 유입됩니다. 또, 농경활동 및 토양의 교란이 발생하기도 하는데 원래 산림이었던 토지를 농지로 변환할 경우 저장되어 있던 탄소의 약 절반 가량은 분해되어 대기로 돌아가게 됩니다. 주변에서 흔히 볼 수 있는 적극적인 농경활동은 토양의 탄소 저장고 크기를 감소시키고 있습니다.

화전이란 산림의 식물을 태우거나 잘라서 농경지로 전환하는 방법을 말합니다. 과거 농경기술이 발달되기 이전에는 유기물이 풍부한 산림토양에 몇 년 간 농사를 지은 후 지력이 쇠퇴하면 또 다른 곳으로 이전하여 농사를 지었던 방법을 썼기 때문입니다. 이런 화전은 대부분 소규모로 이루어졌습니다. 그러나 근대에 들어 화전은 대부분 열대우림에 집중되어 있으며 2004년 통계에 의하면 브라질에서만 매년 500,000 헥타르의 산림이 불타고 있다고 보고

되고 있습니다. 특히 이러한 대규모 산불에 의한 산림의 제거는 손쉽게 산림을 목초지로 전환하여 가축을 방목하고 이를 고기로 만들어 수출하려는 업자들에 의해 이루어지고 있습니다. 즉, 현대 인간의 육식에 대한 집착은 열대우림의 파괴와 직접적 연계성이 있다고 하겠습니다.

참고 문헌

1. Oak Ridge National Laboratory, 1997
2. 웹 참조-<http://en.wikipedia.org/wiki/Slash-and-burn>

