

기후변화개론

06. 기후변화의 부문별 영향 - 육상생태계



1. 온도의 증가에 따른 육상생태계의 변화

지구 온도는 최근 꾸준히 증가하고 있습니다. 대기 중 온도의 지속적 증가는 대기 중 온실효과 기체의 농도 증가와 긴밀히 연결되어 있습니다. 100년간 전 지구의 대기온도는 약 0.6 °C 가량 증가한 것으로 관측되었습니다. 또한, 2007년 초 발표된 IPCC 4차 보고서의 정책결정자를 위한 요약본에 따르면 온실가스의 지속적 배출이 있을 경우 전지구적으로 향후 20년간 평균 10년마다 약 0.2°C의 온도 증가가 있을 것으로 예측하였습니다. 만약 온실가스 배출을 2000년 수준으로 동결시킨다 하더라도 향후 20년간 10년마다 약 0.1°C의 온도 증가가 있을 것이라고 합니다. 1990년에 발표된 IPCC 일차 보고서에서는 1990년에서 2005년까지 0.15~0.3°C의 증가를 예측하였었는데 관측치는 이와 유사한 10년 당 0.2 °C의 증가가 있었습니다. 이 결과는 현재 모형에 의한 온도의 예측이 상당히 정확한 수준이라는 것을 보여줍니다.

온도는 모든 생명체의 생물학적 반응의 기본이 됩니다. 모든 생명체는 생물학적 활동이 가능한 최고 및 최저 온도 범위가 있으며 생명체의 활동의 최적온도도 가지고 있습니다. 즉, 온도 변화에 따라 생명체의 동식물의 호흡, 식물의 광합성 및 증산, 동물의 성장 및 생식 등과 같은 생리활동과 동식물의 이동 및 분포가 결정되는 것입니다. 기온 또한 대기 중의 습도 및 풍속과도 긴밀히 연결되어 복잡하게 육상생태계에 영향을 줍니다.

이번에는 온도의 증가가 산림에 어떠한 영향을 미치는지 알아보겠습니다. 식물은 동물과 달리 이동성이 매우 떨어지며 이 때문에 변화하는 기후에 적응하는 것이 쉽지 않습니다. 온도의 점진적 변화에 맞추어 식생이 적응하는 방법은 식생대가 낮은 속도로 북상하거나 남하하는 방법뿐입니다. 화분분석법에 의한 연구결과에 따르면, 식생은 종에 따라 100년에 약 40km~200km까지도 이동할 수 있다고 하며, 만약 이와 같은 식생대의 자생적인 이동속도가 기후변화의 속도보다 매우 느릴 경우 해당 식생은 그 지역에서 살아남을 수 없습니다. 그렇다면 직접적인 온도 증가에 따라 산림에 어떠한 영향을 미치게 될지 알아보겠습니다. 직접적인 온도 증가에 따른 영향으로는 식생대의 이동과 식생대의 교체로 나누어 생각할 수가 있습니다. 우선 식생대의 이동의 대표적인 예로써 대나무의 북방한계선 북상을 들 수 있으며, 식생대 교체의 대표적 예로는 침엽수림이 활엽수림이나 혼효림으로 교체되는 것을 들 수 있습니다. 온도의 증가로 인해 침엽수림이 혼효림, 나아가 활엽수림으로 숲이 바뀌어가게 되는 것입니다. 반대로, 온도변화에 따른 간접적인 영향에는 무엇이 있는지 알아보겠습니다. 온도 증가로 인하여 병충해가 극심해져 산림의 쇠퇴를 가져올 수도 있으며, 온도 증가로 인하여 대기 중 습도가 감소하고 이러한 건조는 산불의 발발을 빈번하게 만들어 산림의 쇠퇴를 가져올 수도 있습니다.

툰드라 및 고위도 산악지대는 특히 온도에 의한 영향을 민감하게 받는 취약지역이며, 온도의 증가에 따라 이 지역에 새로운 식생대가 생길 수도 있습니다. 또한, 이 지역의 토양은 영구동토층이라고 하는데 이 층이 녹음으로 인해 땅의 불안정성이 높아지고 지하부 얼음이 녹아 지표의 지형이 무너져 생긴 Thermokarst라는 새로운 지형이 생기기도 합니다. 산악 지역에서 눈사태나 산사태가 일어날 확률이 높아짐으로 인해 생태계의 전반적인 안정성에 위

협을 받으며, 툰드라 및 알파인 지역의 생태계의 구조 및 기능의 변화는 기후변화 자체에 또다시 크나큰 피드백을 주게 됩니다. 또한, 툰드라 및 알파인 지역은 그 온도가 낮음으로 인하여 토양에 많은 양의 탄소가 분해되지 않은 채로 저장되어 있는 커다란 탄소의 저장고로서의 역할을 합니다. 그러나 기온이 지속적으로 상승함으로써 토양 내의 미생물의 생물학적 과정은 활발하게 이루어지게 되고 오랫동안 저장되어있던 토양 탄소가 미생물의 분해작용으로 인해 대기 중으로 방출됨으로써 새로운 탄소의 방출원으로 작용할 수도 있게 됩니다. 이런 의미에서 툰드라 및 알파인 지역의 기후변화에 따른 변화는 면밀하고 지속적으로 모니터링해야 하고 이의 영향을 최소화하기 위한 여러 조치 및 정책들을 고민해야 합니다.

동물은 온도 증가로 인하여 어떠한 영향을 받는지 알아보겠습니다. 온도 증가에 따른 직접적인 영향으로는 동물의 종조성의 변화를 들 수 있습니다. 이는 온도의 증가에 따라 동물이 북쪽으로 극향이동을 하게 되는 것을 의미합니다. 또한, 동물은 그 성장 속도가 빨라질 수 있으며, 동물의 생리변화로 교미와 알 낳는 시기가 빨리지고 동면시간이 줄어들고 철새의 이동 시기가 변화하는 것을 들 수 있습니다. 동물에 있어 온도 증가에 따른 간접적인 영향으로는 온도의 증가에 따라 고유의 서식처의 크기가 변화할 수 있습니다. 극지방의 북극곰이나 남극의 펭귄은 온도 증가에 의해 서식처가 줄어들어 개체군의 크기가 감소할 수 있으며, 빙하가 서식처인 극지방의 동물의 경우 온도 증가에 의해 빙하가 녹음으로 인해 번식시기나 이동시기가 변화될 수 있습니다. 동물은 식물에 비해 이동성이 높으므로 온도의 증가에 따른 영향에 보다 적극적으로 대처할 수 있습니다. 동물의 생리를 변화시킴으로써 그 서식처에 적응하고 살고 동물 생리의 변화만으로 그 지역에 적응할 수 없을 경우는 서식처를 이동함으로써 적응하게 됩니다. 만약 이동할 마땅한 서식처가 없을 경우 그 동물은 결국 멸종할 수도 있습니다. 이런 의미에서 기후변화는 생물다양성에 영향을 주게 됩니다.

기후변화에 의해 영향받는 동물을 살펴보겠습니다. Great Tits라고 불리우는 새는 온도의 변화로 인해 너무 일찍 부화하였습니다. 이 아기새의 먹이는 나무의 새싹입니다. 그러나 시기가 너무 일러서 아직 새싹은 싹을 틔우지 못한 상태이므로 새가 먹을 것이 없습니다. 이 아기새는 어떻게 될지 한번 생각해 봅시다.

온도 증가는 생물의 다양성에는 어떠한 영향을 주게 될지 알아보겠습니다. 기후변화로 인한 산림의 주요 식생의 위협은 산림 내의 생물다양성에 심각한 영향을 줄 수 있습니다. 나무는 다양한 초본식물, 새, 멧돼지, 사슴 등의 동물, 토양에서의 미생물, 지의류 등의 서식처를 제공해 주고 있습니다. 그리고 식생의 기후변화에 따른 생존전략은 점진적 이동이라고 할 수 있습니다. 만약 식생의 이동속도가 충분히 빠르지 못하여 생장에 바람직한 기후대로 이동할 수 없게 된다면 그 식생은 생존에 위협을 받게 될 것입니다. 이와 관련하여, 전 지구 순환모형을 이용한 식생대의 이동에 관한 예측을 보면 너도밤나무의 이동가능속도는 100년에 약 20km인데 반해 현재 기후대의 이동속도는 100년에 약 500 km정도로 너도밤나무의 주 서식처인 북반구 고위도에서는 너도밤나무의 생장이 제한을 받게 됩니다. 그러므로 이로 인한 종 유실 및 생물다양성의 감소가 일어날 것이라는 보고가 있습니다. 기후변화는 이동성이 상대적으로 제한되어 있는 생물종의 멸종에 큰 영향을 줍니다. 예를 들어 작은 섬이라던가 인간의 정주에 의해 조각난 상태로 존재하는 도시 내 작은 숲 등에는 이동 가능한 지역의 부재로 인하여 종 소멸의 확률이 더 크다고 할 수 있습니다. 기후변화가 생물다양성에

미치는 영향은 생각보다 매우 복잡한 문제입니다. 식물이나 동물이 온도에 의해 활동영역이나 분포범위가 영향을 받게 되긴 하나 단순히 온도라는 하나의 요소만으로 결정되는 것은 아닙니다. 외래종의 경우는 원래 생존전략이 씨를 많이 퍼뜨려 자손을 많이 번식하여 그 지역에 정착하는 특징을 가지고 있는데 기후변화가 일어날 경우 외래종의 이러한 생존전략에 더 유리하게 작용하여 그 지역의 토착종에게 더욱더 부정적인 영향을 줄 수도 있습니다. 그리고 잡초나 병충해가 기후변화로 인해 더 왕성하게 일어날 수도 있습니다.

다음은 기온증가에 따른 생태계의 영향에 대해 말해보겠습니다. 이 그림은 다양한 전지구 연평균기온의 상승별로 생태계에 대한 영향변화를 정리한 것입니다. 빨간 곡선은 관측된 온도변화이며, 두 개의 회색 곡선은 시간에 따른 지구평균온도변화입니다. 그리고 발생 가능한 미래 진화의 예들을 보여주고 있습니다. 화이트 셰이딩부분은 중립적이거나, 약간 부정적이거나, 긍정적인 영향을 나타내고 있습니다. 노란색 셰이딩부분은 몇몇 시스템에 미치는 부정적 영향 또는 낮은 수준의 위험을 나타내고 있습니다. 빨간색은 규모면에서 더 넓고 큰 부정적인 영향을 나타내고 있습니다.

2. 대기 중 이산화탄소 농도증가에 따른 육상생태계의 변화

대기 중 이산화탄소의 역할에 대해 알아보겠습니다. 대기 중 이산화탄소는 육상생태계의 구조와 기능에 중요한 역할을 합니다. 그 이유는 식물의 광합성, 발산, 호흡 과정에 직접적으로 관여하기 때문입니다. 그렇다면 대기 중 이산화탄소 농도의 변화는 언제부터 관측하였을까요? Keeling이라는 미국의 과학자가 하와이에서 두번째로 높은 산인 Mauna Loa에서 1958년부터 대기 중 이산화탄소 농도를 측정하기 시작하였습니다. 또한, 대기 중 이산화탄소의 농도는 산업혁명 이전에 280 ppm이었다가 2005년까지 379 ppm으로 증가되었다고 IPCC 4차 평가보고서가 최근 보고하였습니다.

대기 중 이산화탄소 농도 증가에 대해 알아보시다. 다음은 킬링 커브 그래프로, 대기 중 이산화탄소의 농도가 꾸준히 증가하고 있음을 처음으로 관측한 것입니다. 이산화탄소 증가의 이유는 산업혁명 이후 과도한 화석연료 연소, 시멘트 생성과정에서 다량 방출 그리고 산림벌채, 산림의 농경지 전용 등과 같은 토지이용의 변화 때문입니다. 킬링커브 그래프에 대해 좀 더 설명을 드리면 북반구 대기 중의 이산화탄소 농도가 증가와 감소가 반복적으로 일어나고 있음을 볼 수 있습니다. 이는 매년 여름에 감소하고 겨울이면 증가하는 계절변화에 의한 결과입니다. 여름철에는 식물들의 활발한 광합성에 의해 이산화탄소 농도 감소하고 겨울철에는 식물들의 웅대한 호흡작용의 효과로 증가하는 것입니다.

대기 중 이산화탄소 농도 증가가 육상생태계에는 어떠한 영향을 미치는지 알아보겠습니다. 먼저, 잎이나 식물개체에서 일어나는 일로서 “광합성 증가”에 대해 설명해 드리겠습니다. 식물의 광합성의 원료는 이산화탄소이고 원료가 증가함으로 인해 광합성 총량은 증가할 수 있습니다. 이를 이산화탄소 시비라고 합니다. 그러나 식물은 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 따라 무제한으로 광합성량이 증가하는 것이 아니고 어느 농도 시점 이후에는 더 이상 광합성이 증가하지 않게 됩니다. 잎이나 식물개체에서 일어나는 또 다른 일로는 식물체의 물 이용의 변화를 들 수 있습니다. 식물은 기공을 통해 이산화탄소와 물을 교환합니다. 이산화

탄소를 받아들인다라 기공을 열면 식물체 내부의 물은 기공을 통해 증산이 됩니다. 즉 식물은 기공을 통해 식물체 내부의 이산화탄소와 물의 양을 조절하게 되는 것입니다. 대기 중 이산화탄소 농도가 높으면 한번 기공을 열어서 많은 양의 이산화탄소가 들어오므로 기공을 여는 횟수가 감소하게 되는데 이는 식물체 내부의 물이 대기로 날아가는 것을 방지할 수 있으므로 식물의 물이용 효율이 대기 중 이산화탄소 농도 증가에 따라 증가할 수 있다는 것을 의미합니다. 그렇다면, 식물의 광합성 산물 저장 패턴은 어떻게 변화하는지 알아보겠습니다. 대기 중 이산화탄소 농도가 높아지면 광합성 산물이 증가하여 잎의 크기가 커집니다. 잎의 크기가 커지면 더 활발한 광합성이 일어나는 양의 피드백이 이루어집니다. 그러나 광합성이 원활히 일어나려면 이산화탄소뿐만 아니라 토양에서의 무기영양분의 공급도 원활히 이루어져야 합니다. 이런 무기영양분의 공급을 원활히 하기 위하여 식물은 뿌리부분에 더 많은 투자를 하게 되어 뿌리가 깊어지고 넓게 퍼지게 됩니다.

이번에는 식물군 구성의 변화에 대해 알아보겠습니다. C3 식물은 탄소고정이 캘빈회로에 의해서만 일어나며 광합성의 첫 번째 산물이 3탄소화합물인 대부분의 식물을 C3식물이라고 합니다. 대부분의 나무, 쌀, 밀, 감자, 콩 등이 이에 해당합니다. 또한, C4 식물은 광합성의 첫 단계로 엽육세포에서 이산화탄소를 3탄소화합물에 결합시켜 4탄소화합물을 만들고 이를 유관속초로 이동시켜 다시 3탄소화합물과 이산화탄소로 분리시켜 여기서 나오는 이산화탄소를 다시 이용하여 또 다른 포도당을 합성합니다. 이러한 경로를 이용하여 광합성을 하는 식물을 C4식물이라고 부르고 여기에 속하는 식물은 옥수수, 잔디, 사탕수수 등이 있습니다. 그리고 C3 식물에 비하여 이산화탄소를 효율적으로 사용할 수 있습니다. 이런 식물 생리적인 차이로 인해 대기 중 이산화탄소 농도가 높아졌을 경우 C3 식물이 C4 식물에 비해 더 민감하게 반응할 수 있습니다. 앞서 설명한 바와 같이 대기 중 이산화탄소 농도가 높아지면 기공을 여는 횟수가 감소함으로 인해 물이용 효율이 증가될 수 있는데, 만약 건조한 지역에서 자라는 C4 식물이 C3와 경쟁하고 있다고 할 때 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 C3 식물에게 유리하게 작용할 수도 있습니다.

이제 전체 생태계에서의 반응을 살펴보겠습니다. 현재 생태계 수준에서의 연구는 GPP, NPP, NEP와 같은 지표가 대기 중 이산화탄소 농도 변화에 따라 어떤 영향을 받는지에 집중되어 있습니다. GPP는 총 일차생산을 말하는데, 생태계 전체가 광합성과정을 통해 생산한 유기물의 총량을 말하며 흔히 탄소 단위로 표현됩니다. NPP는 순 일차생산으로 총 일차생산량에서 식물의 호흡을 뺀 나머지입니다. NEP는 생태계 전체를 볼 때, 식물에 의한 광합성량에서 동물로부터 나오는 호흡량을 빼면 되고, 역시 탄소 단위로 표현됩니다.

생태계 수준의 반응에 대해 자세히 알아보겠습니다. 대기 중 이산화탄소 농도의 증가는 쉽게 생각하면 NPP의 증가를 가져올 수 있으나 광합성은 대기 중 이산화탄소 농도나 빛의 세기 이외에도 땅에서의 무기 영양분의 공급이 뒷받침되어야 하는 것이므로 아직 일반화된 연구결과가 도출되지 않고 있습니다. 이에 대한 가설에는 두 가지가 있는데, 첫 번째 가설은 토양이 비옥하고 무기영양분의 공급이 원활한 시스템에서는 NPP의 증가가 예상된다는 것입니다. 두 번째 가설은 토양이 비옥하지 않고 무기영양분 공급이 잘 이루어지지 않는 경우는 NPP의 변화가 예상되지 않는다는 것입니다. 이러한 가설을 검증하려면 생태계 수준의 실험적 연구가 뒷받침되어야 합니다. 이 연구의 검증 방법으로는 세 가지가 있습니다. 먼저 마이

크로코즘은 인위적으로 밀폐된 이산화탄소 농도가 높은 온실을 만들어 놓고 그 안에 식물을 관리하며 식물의 변화를 연구하는 방법입니다. 반개방 온실은 온실에서 식물생장이 실제와 많이 달라지므로 온실의 윗부분을 뚫어 자연적인 채광이 되도록 하고 온실 내부의 이산화탄소 농도를 높게 유지하는 연구방법입니다. FACE는 자연생태계에 원모양으로 막대기를 꽂고 그 막대기에서 높은 농도의 이산화탄소가 24시간 방출됨으로써 이산화탄소 농도 증가에 따른 생태계의 반응을 가장 인위적이지 않은 방법으로 볼 수 있는 실험 방법입니다.

육상생태계가 이산화탄소 농도에 반응할 때 토양에서 중요한 점은 무엇이 될지 알아보겠습니다. 지하부는 낙엽을 통해 유입된 유기물을 미생물이 분해하는 장소이며 이 과정에서 식물의 생장에 필요한 무기양분이 생성되기 때문에 매우 중요하다 할 수 있습니다. 그렇다면 증가된 이산화탄소농도에 따라 토양은 어떤 반응을 보일지 살펴보겠습니다. 토양의 분해 활동이 촉진되며, 광합성량이 증가되어 지하부에 저장되는 탄소량이 많아지게 되면 뿌리에 의한 호흡량이 증가되는 반응을 보입니다.

이산화탄소 농도의 증가는 메탄 가스의 발생을 촉진시킬 수 있습니다. 광합성량이 증가하게 되면 습지의 토양내로 유입되는 탄소의 양도 많아져서 메탄을 발생시키는 박테리아의 성장이 촉진되어 메탄발생이 증가될 수도 있습니다. 그리고 이산화탄소 농도 증가로 인해 습지 내의 식물 생장이 촉진되면 식물의 줄기나 잎을 통로로 삼아 습지 내의 토양에서 생성된 메탄이 대기 중으로 발생하는 것이 촉진될 수 있습니다. 이에 대한 과학적 증거는 많은 실험적 결과가 이산화탄소 농도를 2배로 증가시킨 실험조건에서 메탄의 발생이 증가되었음을 보여줍니다.

식물이 이산화탄소를 원료로 삼아 광합성을 하기는 하지만 이와 같은 광합성의 증가가 제한 없이 계속 일어나지는 않습니다. 그럼, 광합성의 증가를 제한하는 요인들을 살펴보면 대기 중 이산화탄소 농도가 높은 환경에서 자란 식물의 경우 이 식물의 광합성 산물은 탄소와 다른 영양염류의 비율이 상대적으로 높아지게 됩니다. 이런 광합성 산물이 낙엽을 통해 토양생태계로 유입이 되면 토양생태계는 영양염류의 상대적 결핍현상을 겪게 됩니다. 이렇게 되면 대기 중 이산화탄소 농도가 높아졌다 하더라도 광합성량이 지속적으로 증가하게 되기는 쉽지 않습니다. 또 하나 생각해야 할 주제는 광합성과 타과정과의 상호작용입니다. 실제로 식물의 광합성은 실험실 조건에서 일어나는 것이 아니라 자연 및 인간 생태계의 여러 작용들과 상호작용을 하면서 일어납니다. 그렇기 때문에 식물이 탄소의 안전한 저장고가 될 수 있는지의 여부는 광합성 과정과 타과정과의 상호작용을 고려해서 이루어져야 하는 것입니다. 대표적인 사례로 중요한 환경문제 중 하나인 산성비는 산림생태계에 추가로 질소를 유입시키는 결과를 낳게 되고 이의 결과 광합성 증가를 제한하는 요소 중 하나인 상대적인 질소의 부족량을 극복함으로써 대기 중 이산화탄소 농도 증가가 산림생태계의 광합성량을 증가시킬 수도 있습니다. 반면 기후변화로 인해 일어나게 될 가뭄 및 홍수 빈도의 증가가 이산화탄소 효과에 변화를 가져올 수도 있습니다.

참고 문헌

1. 글로벌 동향브리핑 (2002.12)
2. IPCC AR4 SPM 번역본 (2007)