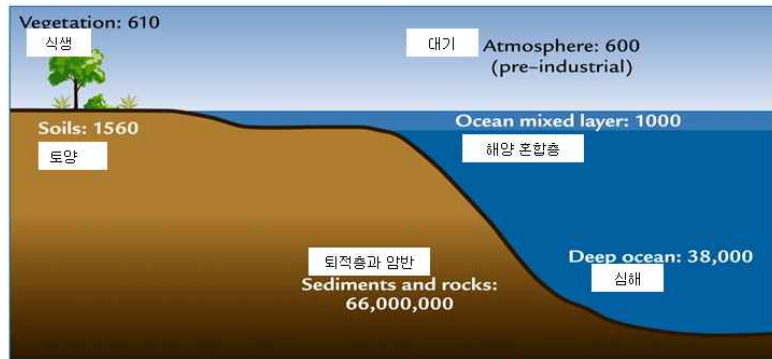


< 제2장 전 지구의 탄소 순환 >

1. 탄소의 순환

가. 탄소의 주요 저장고 (Pools)



A Major carbon reservoirs (gigatons)

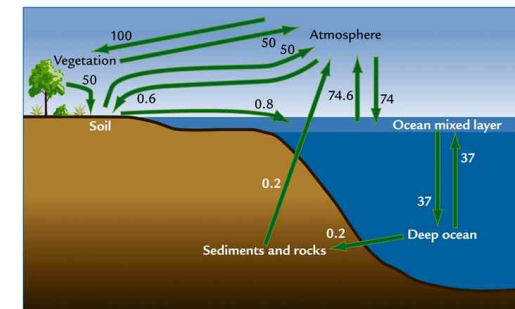
단위: Gt C/Year

<그림 1> 주요 탄소 저장고

✓ 이 그림은 탄소의 주요 저장고를 보여주고 있다. 탄소의 가장 큰 저장고로는 퇴적층과 암반이고, 그 다음은 해양이다. 대기에 저장되어 있는 탄소의 주요 형태는 이산화탄소이고 이의 양은 퇴적층이나 해양에 비해 매우 적은 양이지만, 대기의 탄소는 식생, 토양 및 해양혼합층과 활발한 교환을 한다.

나. 탄소의 주요 흐름 (산업혁명 이전시대)

✓ 앞에서 설명한 것처럼 대기중의 탄소는 식생, 토양, 해양의 혼합층과 활발한 물질교환을 한다. 탄소의 거대한 저장고인 퇴적층과 암반과 대기중 탄소가 교환하는 탄소의 양은 매우 적다. 그러므로 탄소의 순환에 있어서는 식생 및 토양, 그리고 해양이 주요한 역할을 하는 것이다.



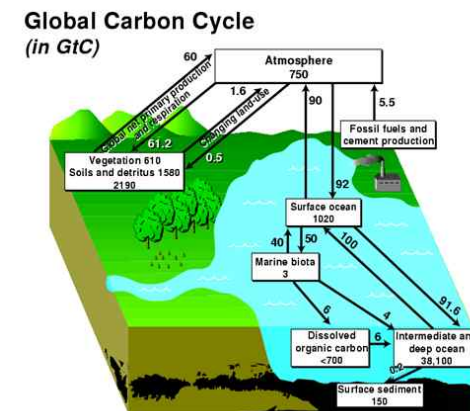
B Carbon exchange rates (gigatons/year)

단위: Gt C/Year

<그림 2> 탄소 변환률

다. 산업혁명 이후의 변화된 탄소 순환

이러한 탄소 순환이 산업혁명 이후 인간의 활동에 의해 크게 변화되었다. 가장 큰 변화로는 대기중 탄소의 저장량이 커졌다는 점이다. 이의 원인으로는 화석연료의 연소 및 토지이용의 변화를 들 수 있다. 이런 인간의 활동에 의한 이산화탄소 및 메탄 등의 온실효과 기체의 대기중 농도 증가로 인해 대기와 육상생태계, 대기와 해양생태계 간의 탄소 교환의 크기



단위: Gt C/Year

<그림 3> 산업혁명 이후의 탄소 순환 (FLOW)가 더 커졌다고 말할 수 있다.

1) 저장고 (Pool or Reservoir)

- ✓ 대기중에서의 탄소; 주로 이산화탄소의 형태로 존재
- ✓ 육상생태계에서의 탄소; 식생과 토양 및 분해유기물로 존재
- ✓ 해양에서의 탄소; 주요 저장형태는 Dissolved organic carbon (DOC)이며 그 크기가 매우 큼. 육상생태계는 대략 2000 Gt, 대기에서는 약 750 Gt임을 감안하면 해양은 표층에서 약 1000 Gt이고 심저해의 경우 거의 4000 Gt에 이른다.

2) 흐름 (Fluxes)

- ✓ 화석연료 연소 (fossil fuel combustion)
- ✓ 토지이용의 변화 (land use change)
- ✓ 해양 표층과 대기와의 교환 (Ocean-atmosphere exchange)
 - 해양과 대기간의 교환은 해양에 녹아있는 이산화탄소 양과 solubility coefficient에 의해 결정됨
 - Henry's law; 기체가 용매에 얼마나 녹을까는 그 기체의 가용성 및 그 기체의 부분압에 비례한다는 법칙
 - 온도, 염도, 생물화학적 활성도, pH 등과 연관됨
 - 육지와 대기와의 교환 (Land-atmosphere exchange)

2. 육지와 대기와의 탄소교환

가. 광합성

- 지구상에서 일어나는 가장 중요한 과정 중 하나
- 식물의 잎(엽록체)에서 빛에너지를 받아들여 물을 분해하고 물분해의 부산물과 이산화탄소를 결합시켜 유기물(탄수화물)을 합성하는 과정
- 광합성에 영향을 미치는 요인
- 이산화탄소 농도
 - 식물 잎 내부의 이산화탄소 농도가 높으면 높을수록 광합성량은 많아지게 된다. 이런 현상을 CO₂ fertilization effect (이산화탄소 시비효과)라고 한다. 그러나 이산화탄소 농도가 높다고 하여 광합성량이 무제한적으로 증가하는 것은 아니고 포화점 이상을 지나면 더 이상 광합성량이 증가하지 않게 된다. 이 때의 이산화탄소 농도를 보상점이라고 부른다.
- 물
 - 식물이 기공을 열고 있을때는 이산화탄소의 유입이 일어날 뿐만 아니라 식물 내부에 있던 물이 증발한다. 즉, 기공의 개폐는 식물이 이산화탄소 유입을 위해 또 수분증발을 막기 위해

적절히 조절하게 된다.

- 온도
 - 모든 생물학적 과정은 온도에 반응하여 변하며 광합성 과정도 마찬가지이다. 특정 온도 이하에서는 광합성이 일어나지 않으며 온도가 너무 높아도 광합성 과정이 일어나지 않게 된다.

나. 식물호흡

- ✓ 식물호흡은 광합성의 반대과정으로서 광합성을 통해 생성된 탄수화물을 연소하여 식물의 기초대사와 생장에 이용할 에너지를 생성하는 과정임
- ✓ 식물호흡을 통하여 식물은 이산화탄소와 물을 방출하게 됨
- ✓ 광합성과 식물호흡은 양적으로 균형상태에 있는가?
 - 대답은 no! 만약 항상 광합성량=식물호흡량 이라면 식물은 생장할 수 없게 된다.
 - 식물은 어렸을때 광합성량>식물호흡량 이므로 유기물을 몸안에 계속 축적하여 생장을 할 수 있게 되고 점점 나이가 들어가면서 광합성량은 식물의 호흡량과 거의 같아지는 시기에 생장을 멈추고 정상상태(steady state)에 들어섰다고 할 수 있다.

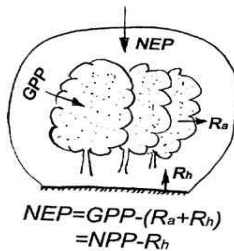
다. Litter fall 과 토양호흡

- ✓ 지상위에 있는 유기물이 토양으로 유입되는 과정
 - 낙엽이나 낙지를 통해
 - 뿌리를 통해
- ✓ 토양 호흡
 - (a) 토양내의 유기물이 미생물의 분해 과정을 통해 다시 이산화탄소를 방출하는 과정
 - (b) 토양내의 뿌리가 호흡하여 생기는 이산화탄소 방출
 - (c) 토양동물의 호흡으로 인한 이산화탄소 방출
 - 위의 세가지 과정으로 인한 이산화탄소 방출과정을 모두 일컬어서 토양 호흡 ((a) + (b) + (c))이라고 함
 - 이 중 가장 중요한 과정은 1)번 과정으로서 이 과정은 유기탄소의 무기화 과정 (carbon mineralization) 이라고 불리기도 함

다. 광합성과 호흡이 관련된 생태계생태학 용어정리

- 1) 생태계 연구에서 사용하는 용어들

- ✓ GPP (Gross Primary Production); 총 일차생산
 - 식물은 빛과 이산화탄소, 물을 이용하여 유기물을 생산하는 생산자(producer)임
 - GPP는 생태계 전체가 광합성과정을 통해 생산한 유기물의 총량을 일컬으며 흔히 탄소 단위로 표현함
- ✓ NPP (Net Primary Production); 순 일차생산
 - 총 일차생산량에서 식물의 호흡량을 뺀 나머지
 - $NPP = GPP - \text{Autotrophic Respiration (식물호흡 } R_a)$
- ✓ NEP (Net Ecosystem Production); 순 생태계생산
 - 생태계 전체를 볼 때, 식물에 의한 광합성량에서 동물로부터 나오는 호흡량을 빼면 되고 역시 탄소 단위로 표현됨
- ✓ $NEP = NPP - \text{Heterotrophic Respiration (동물호흡 } R_h)$
- ✓ Pool or Reservoir; 저장고
- ✓ Sink; 대기로부터 이산화탄소를 net로 흡수하는 저장고
- ✓ Source; 대기로 이산화탄소를 net로 방출하는 저장고
- ✓ LAI (Leaf Area Index); 잎면적 지수



<그림 4> NEP 도출 공식

3. 해양과 대기와의 탄소교환

가. 화학적 과정

- ✓ 탄산염류에 이산화탄소가 녹아있고 김이 빠지듯이 해양에도 이산화탄소가 녹는다
- ✓ 해양에 대기중 이산화탄소가 녹는 과정은 carbonate chemistry (탄산 화학)에 의해 결정되는데 이 과정에 영향을 주는 요인은 다음과 같다
 - 대기중 및 해양 내의 이산화탄소의 농도

- 해수 내에 탄소가 존재하는 3가지 형태: CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-}
- 해수의 온도
- 해수내의 용해 탄소의 농도
- 해수의 알칼리도

나. 생물학적 과정

- ✓ 해양에 있는 식물 플랑크톤(phytoplankton)은 육상에서의 식물과 마찬가지로 광합성을 통해 이산화탄소를 흡수하고 호흡을 통해 다시 방출한다. 차이점이라면 해양식물(phytoplankton)은 해양내에 용해되어있는 탄산을 이용한다는 점이다
- ✓ 광합성과 동시에 phytoplankton은 해양에 용해되어있는 탄산을 딱딱한 탄산칼슘 껍질 (Calcium carbonate shell)로 만들 수도 있다
- ✓ 분해되지 않은 유기물 잔해와 무기질의 탄산칼슘 껍질 등은 얇은 바다에서 해저로 이동하게 되는 데, 이 과정은 전지구 탄소 순환에 있어서 매우 중요하다
- ✓ 전지구 탄소 순환 중 해저 (deep ocean)는 매우 큰 저장고 중의 하나이며 이런 큰 저장고로 이동되는 과정을 biological pumping이라고 부른다
- ✓ 이 biological pump는 매우 중요한 과정! 왜냐하면 만약 이 과정이 없다면 지구상의 대기중 이산화탄소 농도는 500 ppm까지도 올라갈 수 있었으며 만약 biological pumping이 어떠한 제한조건도 없이 최대의 속도로 일어난다면 대기중 이산화탄소 농도는 140 ppm까지도 떨어질 수 있기 때문이다
- ✓ Biological pumping에 영향을 미치는 요소들 : 질소나 인 등의 영양소

4. 인간활동에 의한 탄소순환의 교란

- ✓ 증적암 층에 저장된 탄소를 대기중으로 방출하는 과정
 - 화석연료 (석탄, 석유, 천연가스 등)의 인간에 의한 연소과정
 - 화석연료는 매우 오래전에 살았던 육상이나 해양 식물들이 아주 오랜 세월(7천만년에서 1억 만년 정도)을 거치면서 화석화 된 것임
 - 이런 오래된 “탄소”를 인간은 산업혁명 이후 에너지원으로서 짧은 시간 안에 태워버림
 - 이는 아주 오래된 탄소를 또 새로이 대기중으로 추가하는 결과를 낳음
- ✓ 토지이용의 변화
 - 산림벌채 및 태우기
 - 산림벌채가 시작되면 육상식물은 미생물에 의해 분해되도록 지표 위에 노출되거나 혹은 인위적으로 불태우게 된다
 - 이 경우 많은 양의 탄소가 다시 대기중으로 유입되게 됨
 - 농경활동 및 토양의 교란

- 원래 산림이었던 토지를 농지로 변환할 경우 저장되어 있던 탄소의 약 절반 가량은 분해되어 대기로 돌아가게 됨
- 적극적인 농경활동은 토양의 탄소 저장고 크기를 감소시킴

가.탄소 수지의 변화

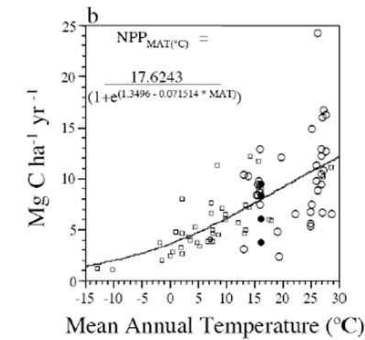
- ✓ 전지구의 탄소순환은 source와 sink간의 균형을 이루어 왔다.
- ✓ 문제는 산업혁명이후에 인간에 의해 이 탄소 순환이 교란되기 시작했다는 점이다. 만약 우리가 모든 탄소의 방출원과 저장고를 알고 있다면 source - sink 값은 "0"이 되어야 할 것이다. 즉, 현재 알려진 탄소 배출원과 탄소 저장고만을 고려한다면 대기중에서의 이산화탄소 농도의 증가는 현재 관찰된 수준보다 더 높아야 함에도 불구하고 그렇지 않은 이유는 2.3 Gt 만큼의 탄소가 우리가 알지 못하는 저장고로 계속 sink되고 있다는 근거가 된다.
- ✓ 이런 missing sink에 대한 의견들이 분분히 제기되고 있는데 육상생태계에 그 해답의 열쇠가 있다는 설이 가장 유력하다.

대기중에 새롭게 유입된 양 (sources)	화석연료의 연소	6.3 +- 0.6
	토지이용 변화	1.6 +- 1.0
탄소 순환에서의 sinks	해양-대기간의 교환	-2.3 +- 0.8
	해양-육상간의 교환	-0.7 +- 1.0
	대기에서의 증가분	-3.3 +- 0.2
	missing sink??	-2.3 +- 1.8

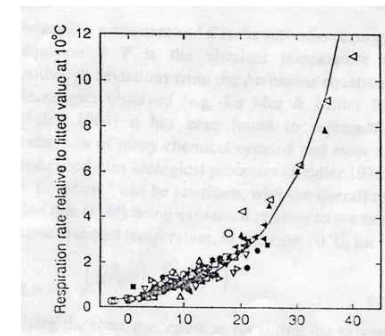
<표 2> 탄소순환의 sources와 sinks

나.우리가 모르는 탄소의 저장고 (Missing sink)

- ✓ 최근의 연구에 의하면 이 missing sink는 북반구 육상생태계 어디에인가에 있다는 설이 유력하다.
- ✓ 식물의 광합성에 의한 NPP는 온도에 따라 선형적으로 증가한다고 알려져 있는 반면, 합성된 유기물의 분해과정은 온도에 대해 지수함수적으로 반응한다고 알려져 있다. 이 사실은 missing sink가 육상생태계에 있을 수도 있다는 하나의 가능한 메커니즘을 보여준다.

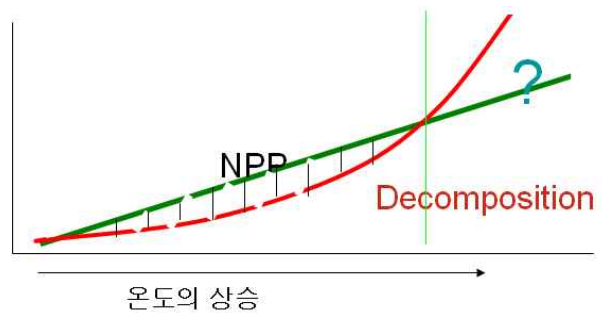


<그림 5> 평균온도에 따른 NPP



<그림 6> 10°C 상승시 마다의 호흡율

- ✓ <그림 7>에서 NPP > Decomposition일때 육상생태계는 대기중 이산화탄소에 대한 순 sink (net sink)이고, Decomposition > NPP 의 경우 이제 육상생태계는 대기중 이산화탄소를 저장하지 못하고 방출하게 되는 순 source가 된다. 근데 대기중 이산화탄소 농도의 증가나 지구온난화에 따른 온도의 증가로 인해 NPP가 분해량보다 크게 유지되는 동안에는 육상생태계가 대기중 이산화탄소의 저장고로 작용할 수 있다는 설명이 가능하다. 즉 <그림 7>의 빗금친 부분만큼의 이산화탄소의 MISSING SINK라고 생각할 수 있다는 뜻이다.



<그림 7> missing sink 부분