

## IPCC 배출시나리오에 따른 지구 규모의 탄소 이동 연구

권 오 열

서울산업대학교 환경공학과

(2006년 8월 24일 접수; 2007년 1월 31일 채택)

### Global Carbon Cycle Under the IPCC Emissions Scenarios

O-Yul Kwon

Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul 139-743, Korea

(Manuscript received 24 August, 2006; accepted 31 January, 2007)

Increasing carbon dioxide emissions from fossil fuel use and land-use change has been perturbing the balanced global carbon cycle and changing the carbon distribution among the atmosphere, the terrestrial biosphere, the soil, and the ocean. SGCM(Simple Global Carbon Model) was used to simulate global carbon cycle for the IPCC emissions scenarios, which was six future carbon dioxide emissions from fossil fuel use and land-use change set by IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change). Atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations for four scenarios were simulated to continuously increase to 600~1050ppm by the year 2100, while those for the other two scenarios to stabilize at 400~600ppm. The characteristics of these two CO<sub>2</sub>-stabilized scenarios are to suppress emissions below 12~13 Gt C/yr by the year 2050 and then to decrease emissions up to 5 Gt C/yr by the year 2100, which is lower than the current emissions of 6.3±0.4 Gt C/yr. The amount of carbon in the atmosphere was simulated to continuously increase for four scenarios, while to increase by the year 2050~2070 and then decrease by the year 2100 for the other two scenarios which were CO<sub>2</sub>-stabilized scenarios. Even though the six emission scenarios showed different simulation results, overall patterns were such similar that the amount of carbon was in the terrestrial biosphere to decrease first several decades and then increase, while in the soil and the ocean to continuously increase. The ratio of carbon partitioning to the atmosphere for the accumulated total emissions was higher for the emission scenario having higher atmospheric CO<sub>2</sub>, however that was decreasing as time elapsed. The terrestrial biosphere and the soil showed reverse pattern to the atmosphere.

Key Words : Carbon cycle, Carbon dioxide, SGCM, IPCC emissions scenarios

#### 1. 서 론

금세기 최대의 관심사 중의 하나는 지구온난화로 인한 기후변화일 것이다. 19세기 중반부터 시작된 산업화와 폭발적인 인구증가로 인한 화석연료의 사용증가와, 경작지 및 주거지 확대에 의한 삼림파괴는 대기 중으로 온실효과를 일으키는 CO<sub>2</sub>의 배출을 급격하게 증가시켜 왔다. 이 결과로 19세기 중반까지 280ppm에 머물던 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 1958년에 315ppm정도, 그리고 최근에는 375ppm 정도로 증가

한 것으로 하와이의 마우나로아 측정결과는 보여주고 있다<sup>1)</sup>. 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가속도가 현재와 같이 진행된다면 과거 안정적이던 280ppm의 2배(소위 CO<sub>2</sub> doubling)인 560ppm은 금세기 중반에 도달하게 되고 이때 지구의 표면공기온도는 1.5~4.5°C 정도 상승한다고 한다<sup>2)</sup>.

대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 변화는 화석연료 사용량과 삼림파괴에 의한 CO<sub>2</sub>의 배출량에 직접적인 영향을 받지만, 지구 규모에서 볼 때 대기와 토양을 포함한 육상생태계, 해양 등의 탄소 저장고 사이의 상호 작용에 의한 탄소 이동에도 영향을 받는다<sup>3)</sup>. 탄소저장고 사이에는 광합성이나 호흡과 같은 육상식물과 대기의 상호작용, 육상식물에서 토양으로의 유기탄

Corresponding Author : O-Yul Kwon, Department of Environmental Engineering, Seoul National University of Technology, Seoul, 139-743, Korea  
Phone: +82-2-970-6616  
E-mail: oykwon@snut.ac.kr

소 이동, 미생물의 토양유기탄소 분해 등을 통한 토양과 대기의 상호작용, 그리고 해양과 대기의 경계면에서 일어나는 CO<sub>2</sub>의 교환작용 등을 통해서 탄소가 이동하는 과정이 지속된다. 현재 화석연료와 삼림파괴로부터 6.3±0.4 Gt C(1Gt C= 10<sup>15</sup> g의 탄소)의 CO<sub>2</sub>가 배출되고 이 중 절반이 대기 중에 누적되고 나머지 절반이 토양을 포함한 육상생태계와 해양으로 흡수되고 있다<sup>3)</sup>. 향후 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도가 증가하고 기온 상승으로 인한 기후변화는 비록 흡수 메커니즘에 대한 불확실성은 인정할지라도 현재의 흡수원 양상은 지속적으로 변화할 것으로 보인다<sup>4~6)</sup>.

현재까지 탄소의 순환 또는 탄소순환과 기후변화의 상관성을 이해하기 위한 무수한 모델링 연구가 행하여져 왔는데, 예를 들어 보면, 육상생태계 각 구성성분 사이의 탄소순환을 모사하는 LPJ-DGVM<sup>7)</sup>, 대기-해양과 해양 내 순환을 모사하는 HILDA<sup>8,9)</sup>, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도에 따른 탄소저장고의 민감도 등에 대한 연구<sup>5,10,11)</sup> 등이 있다. 이러한 연구에 적용된 모델들은 대기-육상생태계, 또는 대기-해양 접합 모델로서 대기-육상생태계-해양의 상호작용을 나타내는 데에는 한계가 있었다. Kwon 등<sup>12)</sup>은 대기-육상생태계-해양의 상호작용을 모사할 수 있는 8상자의 단순탄소순환모델(Simple Global Carbon Model, 이하 SGCM)을 개발하였다. SGCM은 토양을 포함한 육상생태계의 탄소순환에 대기 CO<sub>2</sub> 농도의 fertilization 효과와 온도효과를 반영하고 있으며, 해양의 탄소순환에는 탄산염 평형의 무기화학이 포함되어 있다. SGCM은 대기 중 CO<sub>2</sub> 관측자료 및 지표면 온도로 모델계수를 보정하였으며<sup>12)</sup>, 토양과 대기 중 탄소동위원소 <sup>13</sup>C과 <sup>14</sup>C 자료를 이용하여 검증하였다<sup>13)</sup>.

본 연구에서는 IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change)에서 작성한 배출시나리오(이하 IPCC 배출시나리오라 함)<sup>14)</sup>에 따른 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 변화와, 대기-토양을 포함한 육상생태계-해양 사이의 탄소 이동 특성을 분석하고자 한다.

IPCC의 배출시나리오에 대한 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 변화는 Bern-CC 모델<sup>11)</sup>과 ISAM 모델<sup>15)</sup>에 의해 분석되었다<sup>14)</sup>. 그러나 대기를 제외한 육상생태계와 해양의 탄소저장량 변화와 저장고 사이의 이동을 모사한 결과는 나와 있지 않다. 따라서 본 연구에서는 SGCM 모델을 이용하여 IPCC 배출시나리오에 따른 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 변화를 모사하고 그 결과를 기존의 Bern-CC와 ISAM 모델의 모사 결과와의 비교를 통하여 검증한 후에, 각 저장고의 탄소 저장량의 변화와 저장고 사이의 탄소이동 특징을 분석하고자 한다.

## 2. 모델 및 배출시나리오 기술

### 2.1. SGCM 모델의 개요

SGCM 모델은 대기, 육상 및 해양의 탄소 pool에 저장된 탄소량을 모사하는데, 육상은 육상식물과 토양 및 표면층, 그리고 해양은 온해 및 냉해표면수, 그리고 중·심해로 나누어져서 총 8개의 상자와 각 상자간의 탄소이동을 나타내는 19개의 플럭스로 구성된 상자모델로서 개략적인 구조도는 다음 Fig. 1과 같다.

일반적인 상자모델의 물질수지식은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = \sum_j F_{ji} - \sum_j F_{ij} + \sum_e F_{ei}(Input) - \sum_e F_{ie}(Output) \quad (1)$$

여기서  $V_i$ 는  $i$ 번째 상자의 체적, [L<sup>3</sup>];  $C_i$ 는  $i$ 번째 상자의 탄소농도, [M/L<sup>3</sup>];  $F_{ij}$ 는  $i$ 번째 상자에서  $j$ 번째 상자로의 질량 플럭스, [M/T];  $F_{ei}$ 는 모델시스템 외부로부터  $i$ 번째 상자로의 유입질량플럭스 (예로서, 화석연료 사용으로 인한 CO<sub>2</sub>의 대기권 유입플럭스), [M/T];  $F_{ie}$ 는  $i$ 번째 상자에서 모델시스템 외부로의 유출플럭스 (예로서, 심해 유기탄소의 침강에 의한 해저면 퇴적).

대부분의 플럭스는 상자모델링의 일반적인 형태인 1차반응식으로 표현하였으나, 대기-해양간 CO<sub>2</sub> 플럭스와 대기-육상식물간의 탄소교환인 광합성과 호흡에는 대기 중 CO<sub>2</sub>농도와 온도에 영향을 고려하여 비선형식으로 나타내었다.

대기 중 CO<sub>2</sub>를 유기탄소로 전환하는 육상식물의 광합성(photosynthesis) 플럭스는 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 영향에 대한 Michaelis-Menton 식과 온도효과에 대한 지수함수를 고려하여 다음과 같이 수식화되었다.

$$k_{ph} \cdot \frac{C_{atm}}{K_M + C_{atm}} \cdot \theta_{ph}^{\Delta T} \cdot C_b \cdot V_b \quad (2)$$

여기서  $k_{ph}$ 는 광합성의 최대속도상수, [T<sup>-1</sup>];  $\frac{C_{atm}}{K_M + C_{atm}}$ 는 속도상수에 대한 Michaelis-Menton 효과;  $C_{atm}$ 는 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도, ppm;  $K_M$ 은 1/2 포화농도, ppm;  $\theta_{ph}$ 는 광합성의 온도변환계수, 무단위;  $\Delta T$ 는 초기온도에 대한 온도변화량, °C;  $C_b$ 는 육상식물상자의 탄소농도, [M/L<sup>3</sup>]; 그리고  $V_b$ 는 육상식물상자의 체적, [L<sup>3</sup>].

육상식물이 CO<sub>2</sub>를 배출하는 호흡(respiration)과 낙엽 등으로 인한 유기탄소의 토양으로의 이동(litterfall) 등도 광합성과 마찬가지로 Michaelis-Menton 식과 지수함수적 온도효과를 고려하였다.

토양 유기탄소가 주로 토양미생물에 의하여 CO<sub>2</sub>

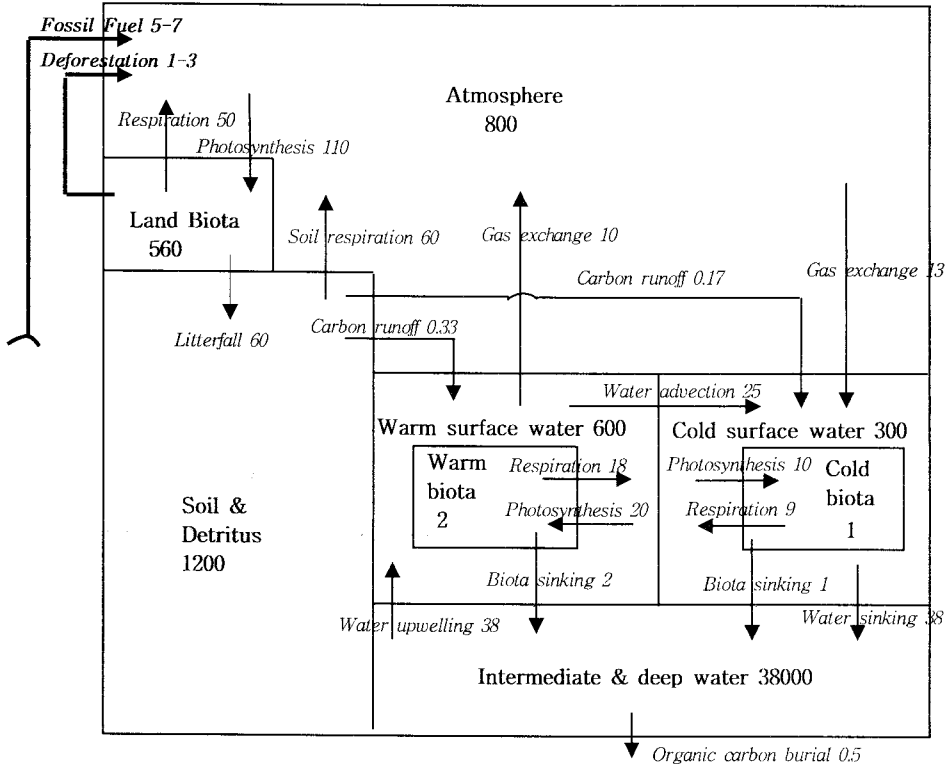


Fig. 1. The schematic diagram of eight box carbon model with roughly estimated reservoirs and fluxes. Carbon reservoirs are gigatons as carbon ((Gt C) and fluxes are Gt C/yr.

로 산화되는 토양호흡(soil respiration) 플럭스도 온도효과를 반영하여 다음과 같다.

$$k_{sr} \cdot \theta_{sr}^{\Delta T} \cdot C_{soil} \cdot V_{soil} \quad (3)$$

여기서  $k_{sr}$ 은 토양호흡의 최대속도상수, [T<sup>-1</sup>];  $\theta_{sr}$ 은 토양호흡의 온도변환계수, 무단위;  $C_{soil}$ 은 토양상자의 탄소농도, [M/L<sup>3</sup>]; 그리고  $V_{soil}$ 은 토양상자의 체적, [L<sup>3</sup>].

대기와 해양간의 분압차에 의한 CO<sub>2</sub> 기체교환(gas exchange)에 의한 플럭스는 다음과 같이 표시된다.

$$k_f \cdot S \cdot (P_{atm} - P_{ocean}) \cdot A_{ocean} \quad (4)$$

여기서  $k_f$ 는 기체전달속도, [L/T]; S는 온도와 염도의 함수로서의 CO<sub>2</sub> 용해도, [M/L<sup>3</sup>/ppm];  $P_{atm}$ 는 대기 중 CO<sub>2</sub> 분압, ppm;  $P_{ocean}$ 은 해양표면수의 CO<sub>2</sub> 분압, ppm; 그리고  $A_{ocean}$ 은 해양의 표면적, [L<sup>2</sup>].

해양 내 순환에 의한 탄소이동 플럭스(cold surface water sinking, deep water upwelling, surface water advection)와 해양 식물성플랑크톤의 생성, 활동과 소멸 플럭스(ocean biota primary pro-

duction, ocean biota respiration, organic carbon sinking, organic carbon burial), 그리고 토양유기탄소의 해양유입 플럭스(runoff)들은 상자내의 탄소농도와 선형관계에 있는 것으로 가정하여 다음과 같이 나타내었다.

$$k_{ij} \cdot C_i \cdot V_i \quad (5)$$

여기서  $k_{ij}$ 는 질량플럭스 속도상수, [T<sup>-1</sup>]; 그리고  $V_i$ 는 i번째 상자의 체적이다.

따라서 상기의 플럭스식을 조합하여 각 상자에 대한 물질수지식을 얻을 수 있는데 예를 들면 대기상자에 대한 물질수지식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} V_{atm} \frac{dC_{atm}}{dt} = & F(t) + D(t) - k_{ph} \frac{C_{atm}}{K_M + C_{atm}} \theta_{ph}^{\Delta T} C_{lb} A_{lb} \\ & + k_{br} \frac{C_{atm}}{K_M + C_{atm}} \theta_{br}^{\Delta T} C_{lb} A_{lb} + k_{sr} \theta_{sr}^{\Delta T} C_{soil} V_{soil} \\ & + k_f S_w (P_w - P_{atm}) A_w - k_f S_c (P_{atm} - P_c) A_c \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $F(t)$  is는 화석연료 사용으로 인한 대기

중 탄소 유입플럭스,  $[M/T]$ ;  $D(t)$  is는 삼림파괴로 인한 대기 중 탄소 유입플럭스,  $[M/T]$ ; 그리고 아래 첨자  $atm$ 은 대기 atmosphere,  $ph$ 는 광합성,  $br$ 은 육상 식물의 호흡,  $lb$ 는 육상식물,  $sr$ 은 토양호흡,  $soil$ 은 토양,  $wo$ 는 온해표면수,  $co$ 는 냉해표면수를 나타낸다.

Fig. 1에서 화석연료사용으로 인한 대기 중으로의 배출플럭스(Fossil Fuel)와 삼림파괴(Deforestation)는 인간의 활동에 의한 인위적인 탄소이동으로서 전체 시스템내의 자연적인 탄소순환을 교란하여 탄소의 이동량 및 저장량을 변화시키게 된다. 결국 화석연료사용량의 증가와 삼림의 제거는 대기 중 온실기체인  $CO_2$ 의 농도를 증가시키는 추진력이 된다. 따라서 본 모델은 8개의 상미분방정식으로 구성된 물질수지식을 수치해석적인 방법으로 풀게 된다.

SGCM 모델 식은 1958년부터 2000년까지 43년 동안 하와이 마우나로아지역에서 측정된  $CO_2$  농도를 이용하여 보정하였으며, 모델식에 적용된 각종 상수를 구하게 된 경위는 Kwon 등<sup>12)</sup>에 나타나 있다.

Fig. 2는 2000년까지의 화석연료사용으로 인한  $CO_2$ 의 대기배출량을 적용하여 모델 보정한 결과를 나타내고 있는데 점선은 관측된 대기 중  $CO_2$ 농도를, 실선은 모델시뮬레이션 결과를 보여주고 있으며 통계적오차는 표준오차가 약 0.08ppm, RMSE가 약 0.45ppm 정도이다.

### 2.2. IPCC 배출시나리오

IPCC<sup>14)</sup>는 2100년까지의 대기 중  $CO_2$  배출시나리오를 작성하기 위하여 기존 자료를 토대로 40개의 배출시나리오를 선정하고, 이를 A1, A2, B1 및 B2의 4개 계열(scenario family)로 분류하였으며, A1계열을 다시 A1F1, A1T 및 A1B의 3그룹으로 세분화하여 총 6그룹(scenario group)으로 분류하였다.

배출시나리오의 분류는 지정학적 변화, 경제발전,

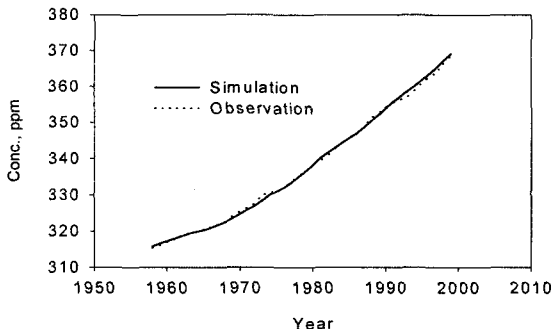


Fig. 2. The result of model simulation versus observation in the atmospheric  $CO_2$  concentration.

기술변화 등의 향후 100여 년 동안의 변화를 종합적으로 판단한 결과로서 엄청난 불확실성을 내포하고 있음에도 불구하고, 현재까지의 지식으로 우리가 접근할 수 있는 최선의 결과로서 제시된 시나리오라고 IPCC는 언급하고 있다.

4개 계열과 6개 그룹에 대한 배출시나리오는 다음의 Fig. 3과 같이 표시된다.

A1계열은 경제성장속도가 매우 빠르고 급세기 중반에 인구수가 정점에 다다른 다음부터 감소하며 신기술과 보다 효율적인 기술이 급속히 도입되는 시나리오로서, 중요한 사항은 지역간의 개인소득차가 매우 줄어들면서 지역간의 통합과 문화 및 사회적 상호교류가 증대된다는 점이다. A1계열은 에너지시스템에서의 기술변화방향에 따라 3그룹으로 세분화되는데 화석연료에 집중되는 A1F1그룹, 비화석연료원에 집중되는 A1T그룹과 양자간의 균형을 이루는 A1B그룹으로 분류된다.

A2계열은 매우 이산화된 세계를 나타낸다. 중요한 점은 지역별 자립과 정체성의 보존이다. 출산형태는 지역간에 아주 천천히 닮아가므로서 지속적으로 지구의 인구는 증가하게 된다. 경제발전은 지역별로 행하여지고 1인당 경제성장과 기술변화는 더욱 분열되고 느리게 진행되는 계열이다.

B1계열은 인구증가에서는 A1계열과 같으나 1·2차 산업이 퇴조하고 서비스 및 정보산업이 발전하고 청정 및 자원절약기술이 도입되는 방향으로 경제구조가 급격히 변화하는 통합된 세계를 나타낸다. 추가적인 기후협약이 없이 진보된 평등개념을 도입하여 경제, 사회 및 환경적지속성에 대한 지구적 해법을 찾는데 중점을 두고 있다.

B2계열은 경제, 사회 및 환경적 지속성에 대하여 개별적 해법을 찾는데 중점을 두는 세계이다. A2보다는 낮은 속도지만 인구는 계속 증가하고 경제발전은 중간정도이며 B1과 A1보다는 속도는 느리지만 더욱 다양한 기술변화를 추구하는 세계이다. 이 계열도 환경보전과 사회적 평등을 지향하지만 그것은 개별 및 지역단위에서 이루어진다.

### 3. 시뮬레이션 결과 및 고찰

#### 3.1. 배출시나리오별 대기 $CO_2$ 농도

Fig. 4는 IPCC 6개 시나리오그룹에 대한 대기 중  $CO_2$  농도시뮬레이션 결과이다.

A1F1그룹은 대기 중  $CO_2$  농도가 빠르게 증가하여서 2100년경에는 6개 그룹 중에서 가장 높은 850~1050ppm의 범위를 예측하고 있다. A2그룹의 경우 2100년경의  $CO_2$  배출량이 30 Gt C 안팎으로 A1F1그룹과 비슷하지만 예측되는 대기 중  $CO_2$  농

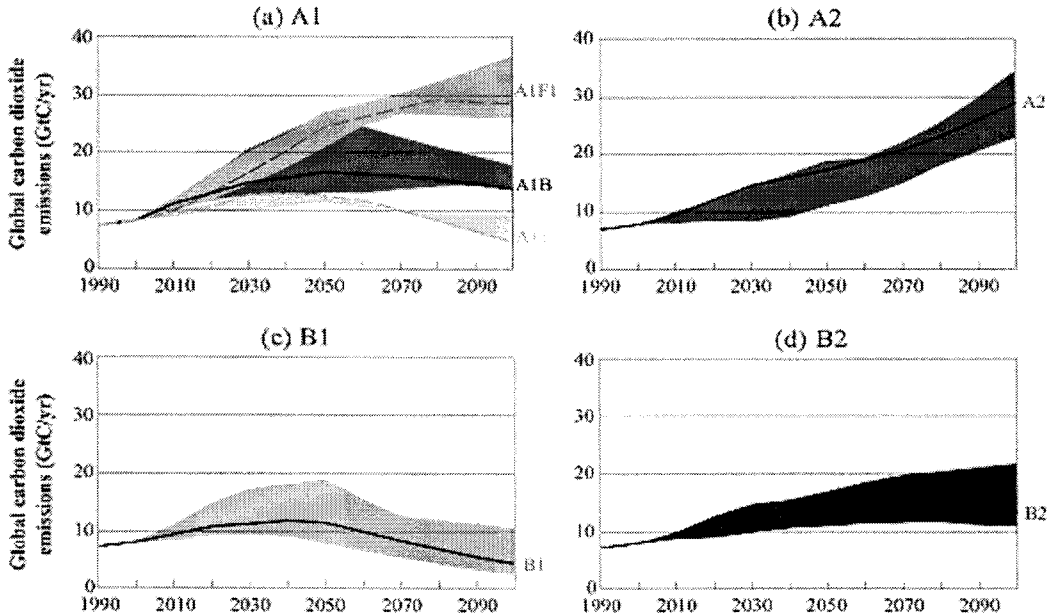


Fig. 3. Total global annual CO<sub>2</sub> emissions from all sources (energy, industry, and land-use change) from 1990 to 2100 (in gigatons of carbon (Gt C/yr) for the families and six scenario groups. The 40 SRES scenarios are presented by the four families (A1, A2, B1, and B2) and six scenario groups. For each of the six scenario groups an illustrative scenario is provided, including the four illustrative marker scenarios (A1, A2, B1, B2, solid lines) and two illustrative scenarios for A1FI and A1T (dashed lines). -- source IPCC<sup>14)</sup>

도는 650~850ppm 정도로서 A1FI그룹에 비하면 낮은 농도를 나타내고 있다. 이것은 두 그룹의 시간에 따른 배출시나리오의 차이로서 설명될 수 있는데 A1FI그룹은 2050년까지 배출량이 급격히 증가한 후에 점진적으로 증가속도가 둔화되는 구조인 반면에 A2그룹은 2100년까지 증가속도가 지속적으로 증가하고 있다.

CO<sub>2</sub> 배출량이 현재의 7 Gt C/년에서 2050년까지 지속 증가한 후에 2100년까지 15 Gt C/년 내외로 안정이 되는 A1B 그룹과 B2 그룹의 경우 약간의 차이는 있지만 2100년경에 600~800ppm에 이를 것으로 모델 예측되고 이후에도 증가속도는 둔화되겠지만 지속 증가할 것으로 예측된다.

2050년까지 배출량이 12~13Gt C/년 정도로 증가한 이후부터 점차 감소하여 현재 배출량보다 적은 5Gt C/년 정도를 배출하는 A1T 및 B1그룹의 경우 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도는 400~600 ppm 사이에서 안정화되는 것으로 모델 예측되고 있다.

Fig. 5는 6개의 illustrative scenario에 대한 배출량 시나리오를 화석연료 사용에 의한 배출량과 삼림파괴로 인한 배출량으로 구분하여 나타내었다. IPCC 배출시나리오에서는 각 시나리오 그룹 내에서

대표적 배출시나리오를 정하고 이를 illustrative scenario라고 명하였으며, 다양한 연구 분야에 적용하는 상징적인 배출시나리오라 할 수 있다.

삼림파괴로 인한 배출량은 원래는 삼림파괴(deforestation)와 조림(reforestation), 그리고 토지이용의 변화(land-use change)로 인한 육상식물의 탄소량을 모두 포함하는 양으로 정의하고 있으나, 본 연구에서는 삼림파괴로 인한 배출량으로 단순화하였다. Fig. 5의 삼림파괴로 인한 배출량에서 +값은 삼림파괴로 인한 배출량을 의미하며, -값은 오히려 삼림의 양이 늘어나는 흡수량을 의미하는데, 2100년까지의 시나리오에서 최대 1.5Gt C/년에서 최소 -2.1Gt C/년으로서 화석연료 사용으로 인한 배출량에 비하면 상당히 작은 편이다. 삼림파괴로 인한 배출량은 A1B, A1T, B1 및 B2 시나리오의 경우 현재의 약 1.1Gt C/년에서 2020-30년까지 점진적으로 감소한 이후에는 ±0.5Gt C/년 정도를 유지하고, 화석연료로 인한 배출량이 계속적으로 크게 늘어나는 시나리오인 A1FI은 2020-30년까지 현재의 수준을 증가하여 최고 1.6Gt C/년까지 배출한 후에 급격하게 줄어드는 시나리오이며 A2는 현재의 수준을 2050년까지 유지한 후에 서서히 감소하는 시나리오

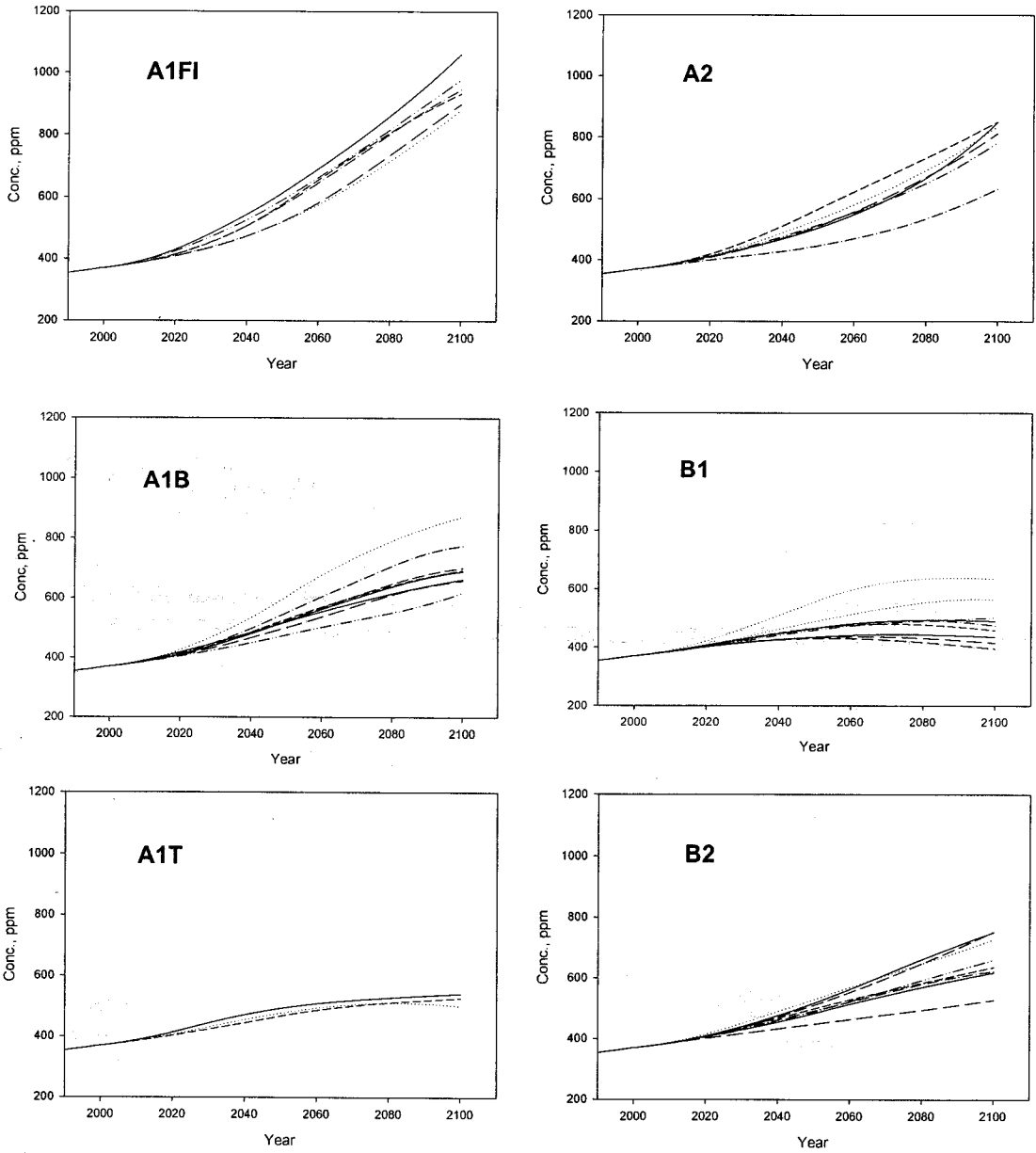


Fig. 4. Simulated atmospheric CO<sub>2</sub> concentrations of six scenario groups.

이다.

Fig. 6은 6개의 illustrative scenario에 대한 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도를 시뮬레이션한 결과이다. A1F1과 A2 시나리오의 경우는 배출량의 지속적 증가로 인하여 앞에서 설명한 것처럼 850ppm 이상까지 지속적으로 증가하고 있는 반면, A1B의 경우는 배출량이 2050년의 16 Gt C/년을 정점으로 이 후 감소함에도 불구하고 지속적으로 증가하여 2100년경에 650ppm 정도를 나타내고 있으며, 상당 기간이 더

지난 후에 안정화될 것으로 모사되었다. B2의 경우는 CO<sub>2</sub>의 배출량의 증가속도는 낮지만 꾸준히 증가하므로써 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도도 2100년의 500ppm 정도까지 완만하게 지속적으로 증가한다. 2030년 12 Gt C/년의 배출량을 정점으로 이 후 서서히 배출량이 감소하는 A1T 시나리오는 2080년 510ppm을 정점으로 서서히 낮아지고 있고, A1T 보다 10년 후인 2040년에 12 Gt C/년의 배출량을 정점으로 이 후 서서히 배출량이 감소하는 B1 시나리오는 2070년

IPCC 배출시나리오에 따른 지구 규모의 탄소 이동 연구

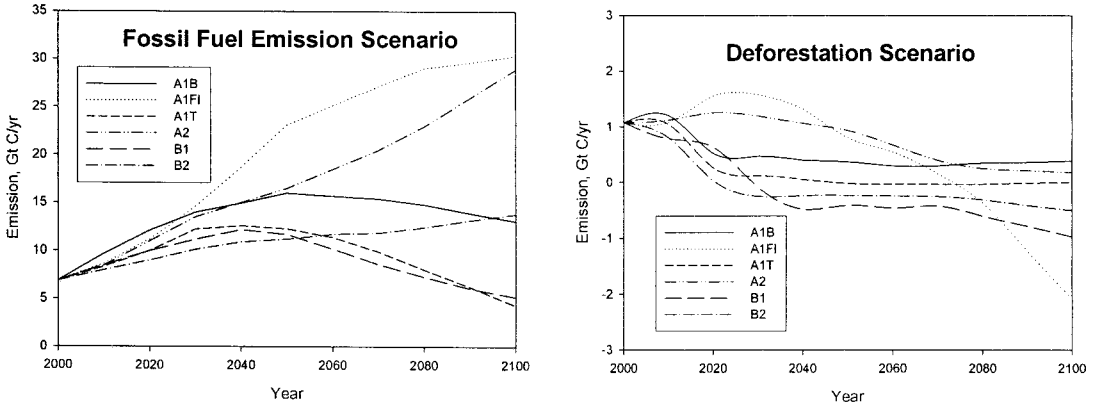


Fig. 5. IPCC six illustrative emissions scenarios.

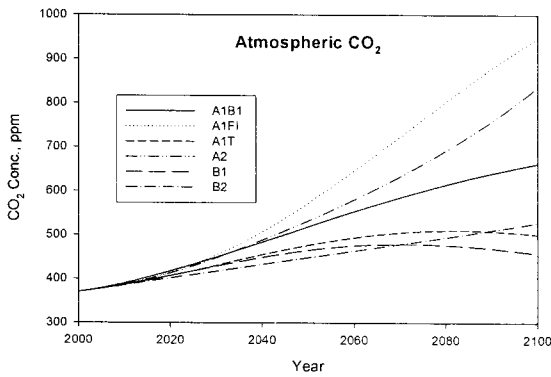


Fig. 6. Simulated Atmospheric CO<sub>2</sub> concentration for six IPCC emission scenarios.

480ppm을 정점으로 서서히 낮아지고 있다. 여기서 주목할 만한 점은 연료사용과 삼림파괴로 인한 배출량을 감소시키는 경우에도 대기 중의 CO<sub>2</sub> 농도는 감소 시점 이후에 장기간 증가한 후에 낮아진다는

것이다(A1B, A1T 및 B1 시나리오). 이것은 탄소 배출량에 대한 탄소흡수원(대기, 육상식물, 토양, 해양)의 대응속도가 다르기 때문에 배출량에 직접 영향을 받는 대기가 가장 민감하게 반응하고 다른 흡수원은 대기와 반응하기 때문에 배출량과는 간접적으로 영향을 받게 된다. 따라서 배출량이 감소하더라도 대기를 제외한 다른 탄소흡수원들이 배출량의 100% 이상을 흡수하지 못하면 대기 중의 탄소 누적량은 증가하게 되어, 결과적으로 CO<sub>2</sub> 농도는 지속적으로 증가하게 된다. 보다 더 자세한 내용은 3.2절에서 분석하였다.

Fig. 7은 IPCC의 6개의 illustrative scenario에 대한 SGCM 결과와 문헌<sup>3)</sup>에 나타난 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 모델 시뮬레이션 결과 중 2050년과 2100년의 농도를 비교한 것이다. Bern-CC 모델<sup>11)</sup>과 ISAM 모델<sup>15,16)</sup>은 탄소순환 및 기후모델로서 화학, radiative forcing, 기후, 그리고 탄소순환 모듈로 구성된 매우 유사한 형태의 탄소순환 및 기후모델이다. 2050년의

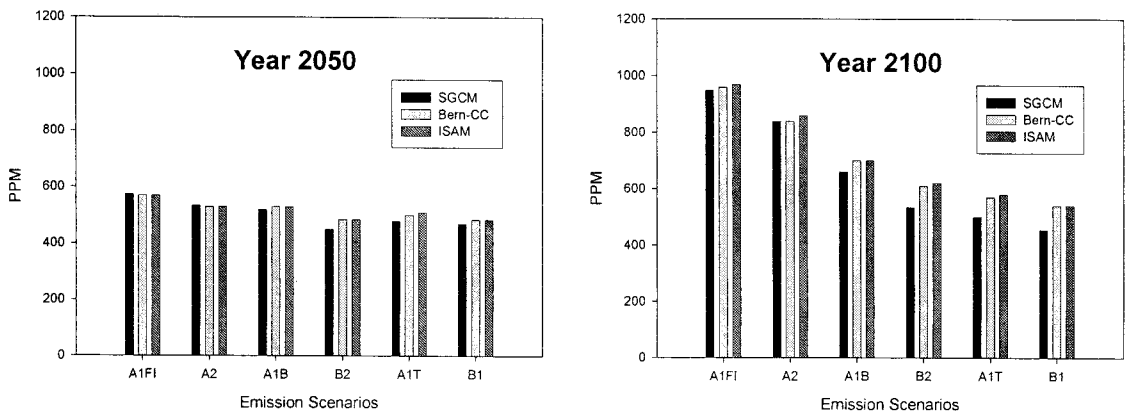


Fig. 7. Simulated atmospheric CO<sub>2</sub> for different models.

결과에서는 3개의 모델이 대체로 비슷한 결과를 보여주고 있는데, A1FI, A2, A1B에서는 3 모델 사이에 2% 이내의 오차를 보여 주고 있으나 B2, A1T와 B1에서는 SGCM 모델이 Bern-CC와 ISAM 모델에 비하여 5% 정도 낮게 예측하고 있다. 2100년의 경우, A1FI, A2, A1B 시나리오에서는 3모델 사이의 오차가 3% 미만인 반면에 B2, A1T, B1에서는 SGCM 모델이 Bern-CC와 ISAM 모델에 비하여 15% 정도 낮게 예측하고 있다. 전체적으로 보면 2050년에는 예측결과치가 매우 유사한 반면에 2100년에는 고농도를 나타내는 배출시나리오에서는 유사한 결과를 예측하는 반면에 상대적으로 낮은 농도를 나타낼수록 SGCM 모델의 예측치가 낮아진다. 이것은 Bern-CC와 ISAM모델의 구조와 SGCM 모델의 구조가 다른데서 오는 차이로서, IPCC의 모델 계수에 대한 불확실성 해석에 의하면 2100년 값이 ISAM 모델이 -12~+10%, Bern-CC 모델이 -14~31%의 불확실도를 내포하고 있는 것으로 나타났다<sup>2)</sup>. 따라서 본 연구의 SGCM 모델의 예측치는 비교모델의 불확실성 범위 내에서 충분한 예측도를

갖고 있는 것으로 판단된다.

### 3.2. 배출시나리오별 탄소저장량 변화

Fig. 8은 IPCC 시나리오별 탄소 저장량의 변화를 모사한 그림이다.

대기 중 탄소저장량의 변화는 당연히 대기 중 CO<sub>2</sub>의 농도와 같은 모습을 나타내기 때문에 배출시나리오별 탄소저장량의 변화 특징은 Fig. 6에 대하여 설명한 것과 동일하다. A1FI와 A2는 급격하게 증가하고, A1B와 B2는 거의 선형적으로 서서히 증가하는 반면에 A1T와 B1은 서서히 증가한 후 2050-70년을 전후로 감소하는 모습을 보인다.

육상식물의 탄소저장량의 변화는 A1B, A1T, B1과 B2의 경우 2020년까지 서서히 감소한 후 증가하는 것으로 나타났으나, A1FI와 A2는 2050년까지 감소가 이어진 후 증가하게 되며 특히 A1FI의 경우는 급격히 증가하는 것으로 모사되었다. 육상식물의 탄소저장량의 변화는 SGCM 모델의 개요에서 설명한 것처럼, 육상식물의 순생산량(광합성량 - 식물호흡량)에 의한 증가와 낙엽과 삼림파괴로 인한 감소의

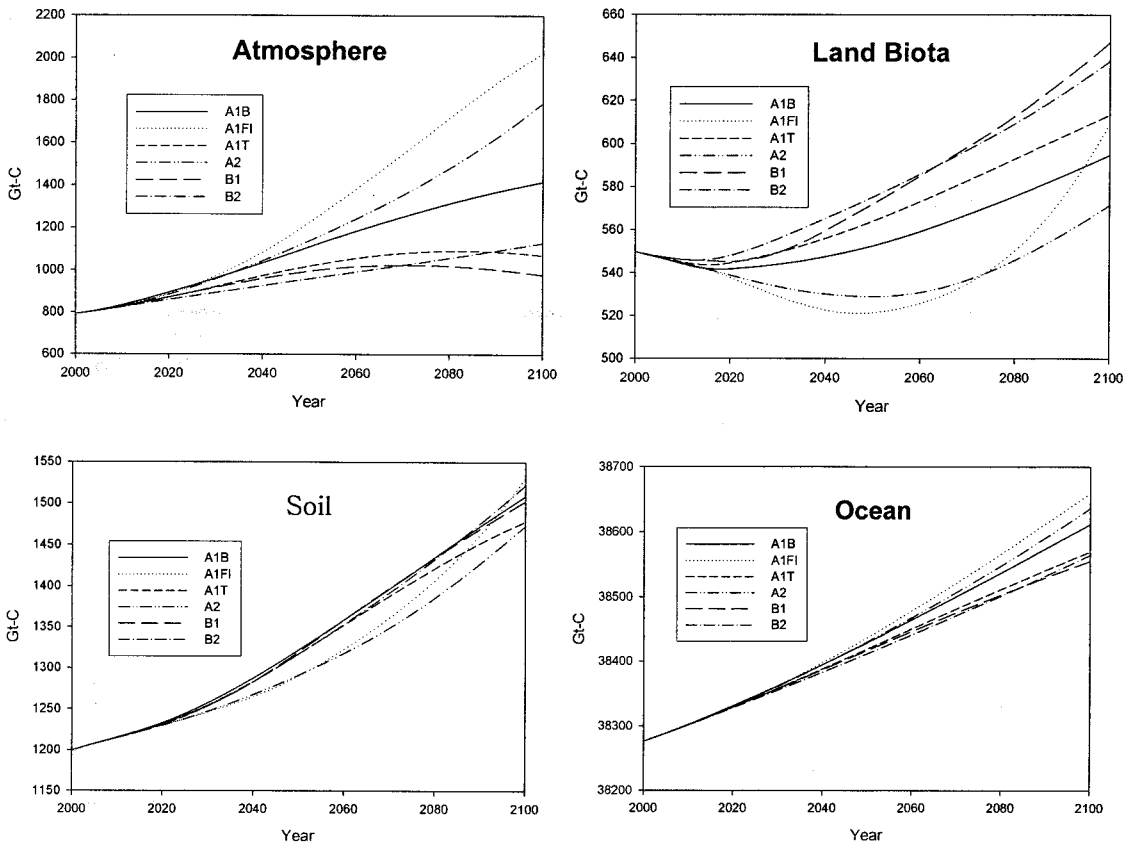


Fig. 8. Simulated carbon reservoir changes for six scenarios.



경쟁관계가 육상식물의 탄소저장량의 변화로 나타나게 되는데, 광합성량과 식물호흡량은 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도 증가와 이로 인한 지표면온도 상승으로 인한 fertilization 효과와 온도효과 (2.1절 식 2 참조)에 영향을 받으며, 낙엽은 육상식물의 양에 비례하는 함수이기 때문에 매우 복잡한 메카니즘에 의해 결정된다. 6개의 시나리오에서 초기에 육상식물의 탄소저장량이 감소하고 있다는 것은 Fig. 5의 삼림파괴로 인한 배출량 시나리오에 나타나 있듯이 삼림파괴로 인한 배출량이 광합성에 의한 순생산량을 초과하고 있다는 것을 의미하고 탄소저장량의 증가는 그 반대의 의미를 내포하고 있다. 특히 A1FI 시나리오는 화석연료의 사용량도 지속적으로 증가하지만 삼림파괴로 인한 배출량도 2030년까지 증가한 후 2050년까지 서서히 감소한 이후에 급격하게 감소하여 오히려 강한 흡수원으로 작용하는데, 이것은 육상식물의 탄소저장량 변화에 그대로 반영되어서 다른 시나리오와 달리 2050년까지 지속적으로 감소한 후에 급격하게 증가하는 것으로 모사되었다.

토양의 탄소저장량은 온도상승효과로 인한 토양 호흡(미생물의 토양 유기탄소 분해)의 증가에 의한 토양 탄소의 감소와, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도의 증가에 기인한 육상식물의 증가(fertilization effect)에 비례하여 발생하는 낙엽(litter fall)이 토양으로 유입되는 유기탄소의 증가 사이의 경쟁에 의해서 변화하게 된다. 토양의 탄소저장량의 변화는 2000년의 1200 Gt에서 2100년의 1470~1530 Gt의 범위 내에서 모든 시나리오가 증가를 나타내고 있으나 육상식물의 탄소저장량 변화와 마찬가지로 대기 중 탄소저장량이 가장 크게 증가하는 A1FI와 A2 시나리오가 가장 적게 증가하였다.

해양의 탄소저장량도 모든 시나리오에서 시간이

경과할수록 저장량이 증가하고 있으나 육상식물 및 토양과는 반대로 대기와 같이 A1FI와 A2 시나리오에서 증가량이 가장 많은 것으로 모사되었다.

Table 1은 2050년 및 2100년까지의 배출시나리오에 따른 탄소의 발생원 및 흡수원에 대한 누적량과 이동 비율을 나타내고 있다.

2050년까지 화석연료와 삼림파괴로 인한 총 배출량은 A1B 803 Gt-C, A1FI 654 Gt-C, A2 569 Gt-C, A1T 500 Gt-C, B1 485 Gt-C, B2 444 Gt-C의 순으로 배출된다. 각 배출시나리오 별 배출량을 100%로 할 때 각 흡수원으로의 이동율을 살펴보면 탄소의 이동은 배출시나리오 A1B, A1FI 및 A2 시나리오가 거의 유사한 모습을 보여서 대기 중으로 61~66%, 육상식물로 -1~-4%(음수는 탄소의 배출을 의미함), 토양 중으로 14~18%, 해양으로 21~27%가 이동하며, 배출시나리오 A1T, B1 및 B2 시나리오의 경우 대기 중으로 38~45%, 육상식물로 3~6%, 토양 중으로 23~26%, 해양으로 28~30%가 이동하는 것으로 예측되었다. 탄소 이동을 중 특이한 것은 A2 시나리오의 경우 배출량이 A1FI와 A1T의 중간 정도 수준임에도 불구하고 대기로의 탄소이동율은 A1FI의 66%에는 미치지 못하지만 A1T의 45% 보다 훨씬 큰 61%를 나타내고 있다. A2가 A1T보다 상대적으로 큰 대기 중으로의 탄소 이동율은 역으로 육상식물과 토양 중으로 상대적으로 적은 탄소이동율을 나타내게 되는 데 A2의 경우 육상식물로는 -4%의 이동(즉, 육상식물의 유기탄소량 감소)과 토양으로의 16% 이동이 그치는 반면, A1T 시나리오에서는 육상식물로 3%, 토양으로 23%가 이동하는 것으로 예측되었다. 이것은 A1T가 2030년부터 배출량을 감소시키는 시나리오인 반면에 A2는 배출량이 지속적으로 증가하는 시나리오이기 때문에 나타나는 현상이다. 왜냐하면 연료와 삼

Table 1. Cumulative carbon source and sinks with flow ratios in parenthesis for six scenarios at year 2050 and 2100 (Unit : Gt)

Year	Source and Sink	Emission scenarios					
		A1B	A1FI	A1T	A2	B1	B2
2050	Fuel+Deforestation	803(100%)	654(100%)	500(100%)	569(100%)	485(100%)	444(100%)
	Atmosphere	501(62%)	433(66%)	227(45%)	346(61%)	203(42%)	167(38%)
	Land Biota	-6(-1%)	-29(-4%)	14(3%)	-21(-4%)	22(5%)	25(6%)
	Soil	141(18%)	90(14%)	117(23%)	91(16%)	120(25%)	117(26%)
	Ocean	167(21%)	160(24%)	142(28%)	153(27%)	140(29%)	135(30%)
2100	Fuel+Deforestation	1865(100%)	2004(100%)	913(100%)	1649(100%)	865(100%)	1035(100%)
	Atmosphere	1072(57%)	1232(61%)	279(31%)	996(60%)	186(22%)	337(33%)
	Land Biota	52(3%)	59(3%)	63(7%)	21(1%)	97(11%)	88(9%)
	Soil	359(19%)	331(17%)	278(30%)	273(17%)	303(35%)	322(31%)
	Ocean	382(21%)	382(19%)	293(32%)	359(22%)	279(32%)	288(28%)

림파괴로 인한 탄소배출은 대기 중으로 직접 배출되기 때문에 대기 중의 탄소량 변화가 가장 빠르게 나타난다. 다음에 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도와 CO<sub>2</sub> 농도증가에 다른 온도상승으로 인한 육상식물의 광합성이나 호흡에 의한 육상식물의 탄소량 변화와 이에 따른 낙엽 등에 의한 토양 탄소량 등이 변화하고, 기체교환에 의한 대기 중 탄소의 해양으로의 이동은 가장 느린 과정이다. 2050년까지의 연료와 삼림파괴로 인한 배출량은 B1시나리오가 485 Gt-C, A1T 시나리오가 803 Gt-C로서 그 차이가 318 Gt-C에 달하지만, 해양으로의 이동량은 최저 140 Gt-C(B1 시나리오)에서 최대 167 Gt-C(A1B 시나리오)로 최대와 최고 사이의 이동량 차가 27 Gt-C의 작은 양을 나타낸다는 것은 해양으로의 탄소 이동이 매우 느리게 일어남을 알 수 있다.

2100년까지의 누적 탄소배출량에 따른 흡수원의 탄소 이동을 살펴보면, 누적배출량이 1649~2004 Gt-C에 이르는 A1B, A1FI 및 A2 시나리오와 누적배출량이 절반 정도인 865~1035 Gt-C의 A1T, B1 및 B2 시나리오 그룹으로 구분되어 탄소이동 특성도 대비되어 나타나고 있다. 즉, A1B, A1FI 및 A2 시나리오 그룹은 대기 중으로 57~61%, 육상식물로 1~3%, 토양 중으로 17~19%, 해양으로 19~22%가 이동하며, 배출시나리오 A1T, B1 및 B2 시나리오의 경우 대기 중으로 22~33%, 육상식물로 7~11%, 토양 중으로 30~35%, 해양으로 28~32%가 이동하는 것으로 예측되었다. 2050년까지의 결과와 비교하여 보면 탄소의 이동형태가 시나리오 그룹별로 비슷한 양상으로 보여주시는 하나, 대기 중으로의 이동율은 2050년까지의 이동율에 비해서 다소 낮아지고 있는 반면에 육상식물과 토양 중으로의 이동율은 다소 증가하고 있음을 나타내고 있다. 그러나 해양으로의 이동율은 시나리오별로 약간 감소(A1FI, A2, B2), 약간 증가(A1T, B1) 또는 변함이 없었다(A1B).

2050년까지의 누적 탄소이동율과 2100년까지의 누적 탄소이동율을 비교한 결과, 시간이 경과할수록 이동속도가 빠른 대기 중으로 이동율은 감소하는 반면에 이동속도가 상대적으로 느린 육상식물과 토양식물로의 이동율은 증가하는 경향을 보이는 것으로 모사되었다. 6개의 시나리오에 대한 발생원과 흡수원 사이의 탄소이동량을 살펴보면 더욱 이해하기 쉬운데, 2100년까지의 연료 및 삼림파괴로 인한 탄소배출량은 최대 2004 Gt-C(A1FI 시나리오)에서 최소 865 Gt-C(B1)으로서 차이가 1139 Gt C이며, 흡수원에 누적되는 탄소량은 시나리오별 최대와 최소의 차이가 대기 중 1046 Gt C(A1FI와 B1의 차이),

육상식물은 76 Gt C(B1과 A2의 차이), 토양은 58 Gt C(A1FI와 A2의 차이), 그리고 해양은 103 Gt C(A1FI와 B1의 차이)이다. 이것의 의미는 다른 흡수원에 비하여 대기가 배출량의 변화에 가장 민감하게 반응한다는 것을 나타낸다.

#### 4. 결 론

SGCM 모델을 이용하여 IPCC의 대기 중 CO<sub>2</sub> 배출시나리오에 따른 탄소순환을 시뮬레이션한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

6개 배출시나리오 그룹 중에서 2100년까지 대기 CO<sub>2</sub> 농도를 400~500ppm 정도에서 안정화시킬 수 있는 배출시나리오 그룹은 A1T 및 B1 그룹으로 나타났다. 이 그룹의 배출시나리오 특성은 2050년까지 12~13 Gt C/년 이내에서 억제하고 2100년까지 현재 수준이하인 5 Gt C/년으로 배출하는 시나리오이다. 그 이외의 시나리오들은 2050년에서 2100년 사이에 15 Gt C/년 정도를 유지하거나 지속 증가하는 시나리오로서 이 경우 대부분 2100년에 600ppm 이상의 CO<sub>2</sub> 농도를 나타내고 있으며 지속 증가형을 보여주고 있다. 따라서 2100년까지 대기 중 CO<sub>2</sub>를 500ppm 이하로 안정화시키기 위해서는 CO<sub>2</sub> 배출을 줄이기 위한 엄청난 노력이 요구됨을 알 수 있다.

IPCC의 6개의 illustrative scenario에 대한 2100년까지의 대기 중 CO<sub>2</sub>의 변화를 비교하여 본 결과, SGCM의 모사 결과가 다른 연구자의 결과와 15% 이내의 차이를 나타내었는데, 이는 사용 모델의 불확실성의 범위 내로서 SGCM의 모사능력이 충분한 것으로 판단된다.

환경 중 탄소이동에 의한 탄소저장량의 변화를 살펴 본 결과 각 시나리오별로 규모의 차이는 있지만 다음과 같은 추이를 보이는 것으로 모사되었다. 대기 중은 2100년까지 A1B, A1FI, A2 및 B2는 지속 증가하는 반면에 A1T 및 B1은 2050-70년을 전후로 감소하는 것으로 나타났으며, 육상식물생태계는 삼림파괴의 영향으로 일정기간 감소한 후에 다시 증가하는 것으로 나타났고, 토양과 해양은 지속적으로 증가하는 것으로 나타났다.

각 배출시나리오에 따라 배출되는 시간경과 탄소 누적량에 대하여, 대기 중 CO<sub>2</sub> 농도가 고농도인 시나리오일수록 대기로의 이동율은 크지만 시간이 경과함에 따라 그 율은 낮아지는 것으로 나타났으며, 육상식물생태계와 토양으로의 이동율은 반대 현상을 나타내는 것으로 모사되었다.

#### 참 고 문 헌

- 1) Keeling, C. D., Whorf, T. P., 2005, Atmospheric

- CO<sub>2</sub> records from sites in the SIO air sampling network. In trends: A compendium of data on global change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A.
- 2) Manabe, S., Stouffer, R. J., Spelman, M. J., Bryan, K., 1991, Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO<sub>2</sub>, Part I, Annual mean response, *J. Clim.*, 4, 785-818.
  - 3) Prentice, I. C., Farquhar, G. D., Fasham, M. J., 2001, The carbon cycle and atmospheric CO<sub>2</sub>. In: *Climate change 2001: The scientific basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (eds Houghton JT, Ding Y, Griggs D, Noguer M, van der Linden P, Dai X, Maskell K, Johnson CA), pp. 183-237. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, U.S.A.
  - 4) Joos, F., Plattner, G. K., Stocker, T. F., Marchal, O., Schmittner, A., 1999, Global warming and marine carbon cycle feedbacks on future atmospheric CO<sub>2</sub>, *Science*, 284, 464-467.
  - 5) Cramer, W., Bondeau, A., Woodward, F. I., Prentice, I. C., Betts, R. A., Brovkin, V., Cox, P. M., Fisher, V., Foley, J. A., Friend, A. D., Kucharik, C., M. Lomas, R., Ramankutty, N., Sitch, S., Smith, B., White, A., Young-Molling, C., 2001, Global response of terrestrial ecosystem structure and function CO<sub>2</sub> and climate change: Results from six dynamic global vegetation models, *Global Change Biol.*, 7, 357-373.
  - 6) Cox, P., Betts, R., Jones, C., Spall, S., Totterdell, I., 2000, Will carbon-cycle feedbacks accelerate global warming in the 21st century?, *Nature*, 408, 184-187.
  - 7) Sitch, S., Smith, B., Prentice, I. C., Arneth, A., Bondeau, A., Cramer, W., Kaplan, J. O., Levis, S., Lucht, W., Sykes, M. T., Thonicke, K., Venevsky, S., 2003, Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biol.*, 9, 161-185.
  - 8) Joos, F., Bruno, M., Fink, R., Stocker, T. F., Siegenthaler, C. Le Quere, C., Sarmiento, J. L., 1996, An efficient and accurate representation of complex oceanic and biospheric models of anthropogenic carbon uptake, *Tellus, Ser. B*, 48, 397-417.
  - 9) Siegenthaler, U. Joos, F., 1992, Use of a simple model for studying oceanic tracer distributions and the global carbon cycle, *Tellus, Ser. B*, 44, 186-207.
  - 10) Gerber, S., Joos, F., Prentice, C., 2004, Sensitivity of a dynamic global vegetation model to climate and atmospheric CO<sub>2</sub>, *Global Change Biol.*, 10, 1223-1239.
  - 11) Joos, F., Prentice, I. C., Sitch, C. S., Meyer, R., Hooss, G., Plattner, G. K., Gerber, S., Hasselmann, K., 2001, Global warming feedbacks on terrestrial carbon uptake under the IPCC emissions scenarios, *Global Biogeochemical Cycles* 15(4), 891-907.
  - 12) Kwon, O.-Y., Schnoor, J., 1994, Simple global carbon: The atmosphere-terrestrial biosphere-ocean interaction, *Global Biogeochemical Cycles*, 8(3), 295-305.
  - 13) 권오열, 1996, 지구규모의 탄소 순환 및 물질수지 연구, *한국환경과학회지*, 5(4), 429-440.
  - 14) Nakicenovic, N., Alcamo, J., Davis, G., de Vries, B., Fenham, J., Gaffin, S., Gregory, K., Grübler, A., Jung, T. Y., Kram, T., La Rovere, E. L., Michaelis, L., Mori, S., Morita, T., Pepper, W., Pitcher, H., Price, L., Riahi, K., Roehrl, A., Rogner, H-H., Sankovski, A., Schlesinger, M., Shukla, P., Steven Smith, Swart, S., van Rooijen, S., Victor, N., Dadi, Z., 2000, Emission scenarios, IPCC special report, Cambridge Univ. Press, New York.
  - 15) Jain, A. K., 2000, The web interface of integrated science assessment model (ISAM).
  - 16) Jain, A.K., Khesghi, H. S., Wuebbles, D. J., 1994, Integrated science model for assessment of climate change. Lawrence Livermore National Laboratory, UCRL-JC-116526.