

ORIGINAL ARTICLE

탄소순환모델을 이용한 지구 규모의 탄소 수지 연구

권오열* · 정재형¹⁾

서울과학기술대학교 에너지환경공학과, ¹⁾창원시정연구원 도시정책연구소

Global Carbon Budget Study using Global Carbon Cycle Model

O-Yul Kwon*, Jaehyung Jung¹⁾

Dep. of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science & Technology, Seoul 01811, Korea

¹⁾Urban Policy Research Office, Changwon Research Institute, Changwon 51500, Korea

Abstract

Two man-made carbon emissions, fossil fuel emissions and land use emissions, have been perturbing naturally occurring global carbon cycle. These emitted carbons will eventually be deposited into the atmosphere, the terrestrial biosphere, the soil, and the ocean. In this study, Simple Global Carbon Model (SGCM) was used to simulate global carbon cycle and to estimate global carbon budget. For the model input, fossil fuel emissions and land use emissions were taken from the literature. Unlike fossil fuel use, land use emissions were highly uncertain. Therefore land use emission inputs were adjusted within an uncertainty range suggested in the literature. Simulated atmospheric CO₂ concentrations were well fitted to observations with a standard error of 0.06 ppm. Moreover, simulated carbon budgets in the ocean and terrestrial biosphere were shown to be reasonable compared to the literature values, which have considerable uncertainties. Simulation results show that with increasing fossil fuel emissions, the ratios of carbon partitioning to the atmosphere and the terrestrial biosphere have increased from 42% and 24% in the year 1958 to 50% and 30% in the year 2016 respectively, while that to the ocean has decreased from 34% in the year 1958 to 20% in the year 2016. This finding indicates that if the current emission trend continues, the atmospheric carbon partitioning ratio might be continuously increasing and thereby the atmospheric CO₂ concentrations might be increasing much faster. Among the total emissions of 399 gigatons of carbon (GtC) from fossil fuel use and land use during the simulation period (between 1960 and 2016), 189 GtC were reallocated to the atmosphere (47%), 107 GtC to the terrestrial biosphere (27%), and 103GtC to the ocean (26%). The net terrestrial biospheric carbon accumulation (terrestrial biospheric allocations minus land use emissions) showed positive 46 GtC. In other words, the terrestrial biosphere has been accumulating carbon, although land use emission has been depleting carbon in the terrestrial biosphere.

Key words : Carbon cycle, Global carbon budget, SGCM, Carbon partitioning

1. 서론

21세기 최대의 관심사인 지구온난화로 인한 기후변화는 인류의 미래 생존에 큰 영향을 미칠 것임을 인지하고

국제사회는 이에 대한 대책을 마련하고 있다. 지구온난화는 지구과학적으로 다양한 원인이 복잡하게 작용하여 나타나고 있으나, 가장 대표적인 요인은 19세기 중반부터 시작된 인구증가 및 산업혁명으로 인하여 화석연료

Received 17 July, 2018; Revised 27 August, 2018;

Accepted 4 September, 2018

*Corresponding author: O-Yul Kwon, Department of Environmental Energy Engineering, Seoul National University of Science and Technology, Seoul 01811, Korea
Phone : +82-2-970-6616
E-mail : oykwon@seoultech.ac.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

사용이 증가하고, 경작지와 주거지를 위한 토지이용 확대에 알려지고 있다. 화석연료 사용과 토지이용으로 인하여 지구온난화의 대표적인 기체인 CO₂의 대기 중 배출량은 지속적으로 증가하여 왔다(IPCC, 2014). 하와이의 마우나로아(Mauna Loa)에서 측정된 대기 중 이산화탄소 농도 측정 자료를 살펴보면 1958년에 315 ppm에서 2016년 402.9 ppm으로 증가하였으며, 2015년 대비 2016년 CO₂ 농도증가는 약 3.5 ppm으로 1958년 측정 이래 1년간 가장 빠른 증가 속도를 기록하였다(NOAA, 2017). CO₂ 농도가 현재의 증가속도를 유지하면 과거 안정화 상태의 농도인 280 ppm의 2배인 560 ppm(소위 CO₂ doubling 농도)은 금세기 중반이면 나타나고 이에 따라 지구 표면 공기온도는 1.5~4.5°C 범위로 상승한다고 한다(Manabe et al., 1991; NOAA, 2017).

화석연료 사용과 토지이용으로 인하여 대기 중으로 배출된 CO₂는 식물의 광합성과 호흡 등과 같은 대기-육상생태권 사이의 상호작용, 대기와 해양 사이의 이산화탄소 평형 등에 의하여 일부는 대기권에 체류하고 나머지는 육상생태권과 해양으로 흡수된다. 지난 몇십년 동안 지구 규모에서의 육상생태권, 해양, 대기 상호간 탄소순환 및 탄소물질수지에 대한 많은 연구가 진행되고 있다(Booth et al., 2017).

육상생태권의 탄소 순환과 탄소물질수지 연구(Melton and Arora, 2016; Haverd et al., 2018)는 대기권과의 상호작용을 통하여 주로 기후변화에 따른 식생의 변화를, 해양의 탄소 흡수 연구(Ilyina et al., 2013; Law et al., 2017)는 해양 순환과 대기-해양 간의 탄소 평형을 바탕으로 한 탄소 이동을 연구하였다. 최근의 육상생태-대기 상호작용모델이나 해양-대기 상호작용 모델 연구는 정밀한 그리드 격자와 상세한 프로세스 메커니즘을 포함하고 있는 복잡모델로서 탄소순환에 대한 이해의 폭을 넓혀가고 있으며, 기후모델과 결합하여서 기후변화와 탄소순환 사이의 상호 작용에 대한 연구가 이루어지고 있다(Smith et al., 2017; Lade et al., 2018). 그러나 육상생태-대기 상호작용 모델은 식생 분포가 매우 복잡하고 식생이 기후에 민감하며 해양-대기 상호작용 모델은 육상생태권의 탄소수지를 중립으로 가정하므로, 지구 규모의 탄소 물질수지 평형을 계산하기에는 한계가 있다.

최근의 연구는 화석연료사용과 토지이용으로 인한 인위적인 CO₂ 배출 뿐만 아니라 자연현상인 산불 및 엘리

노와 라니냐 현상 등도 지구탄소순환시스템의 중요한 인자로 해석하고 있다(Chiodi and Harrison, 2014; Santin et al., 2015; Wang et al., 2018). 다양한 연구에도 불구하고 토지 이용으로 인한 대기 중 이산화탄소 배출량에 대한 불확실성, 탄소순환에 대한 메커니즘의 이해 부족, 그리고 측정 자료의 부족 등으로 배출량과 흡수량 사이의 불일치(imbalance), 즉 “missing sink”에 대한 논란이 계속되고 있다(Michalak, 2017; Sun et al., 2017; Houghton et al., 2018).

Kwon and Schnoor(1994)는 대기권-육상생태권-해양권의 상호작용을 모사하기 위한 8상자의 단순지구규모 탄소모델(Simple Global Carbon Model, SGCM)을 개발하였다. SGCM은 화석연료사용과 토지이용으로 인한 대기 중 탄소배출량(carbon source)이 대기, 육상생태권 및 해양으로 탄소가 재배분(흡수)되는 양(carbon sink)과 일치하는 평형상태 모델이다. SGCM은 최근의 복잡모델과 같은 정밀한 탄소순환 메커니즘을 나타내고 있지는 않지만, 토양이 포함된 육상생태권의 탄소순환에 대기 CO₂ 농도에 대한 퇴비효과(fertilization) 및 온도효과를 반영하였으며, 해양권의 탄소순환에는 탄산염의 평형 화학이 포함되어 있다. SGCM은 대기 중 CO₂ 관측 자료를 이용하여 모델계수를 보정하였다(Kwon and Schnoor, 1994).

본 연구의 목적은 최근 증가하고 있는 화석연료 사용과 토지이용으로 인하여 CO₂ 형태로 대기 중으로 배출된 탄소가 재분배되는 과정에서 대기권, 해양권 및 육상생태권의 역할을 분석하고자 함이다. 이를 위하여 대기 중 CO₂ 농도의 연도별 관측자료가 존재하는 1958년부터 2016년까지에 대하여 대기권-토양을 포함한 육상생태권-해양권 사이의 탄소 이동을 SGCM 모델을 이용하여 모사하였다. 기존의 연구(Kwon and Schnoor, 1994)가 대기 중 CO₂ 농도를 모사하는데 초점을 두어서 대기-해양-육상생태권 사이의 탄소 이동에 대한 신뢰성이 부족하였다. 따라서 본 연구에서는 모사 결과의 타당성 검토를 위하여, 지구 규모의 탄소 물질 수지에 관한 다양한 연구결과를 종합적으로 정리한 대표적 문헌자료인 global carbon budget(Le Quéré et al., 2017)에 나타난 대기-해양-육상생물권 사이의 탄소 물질수지와 비교분석하였다.

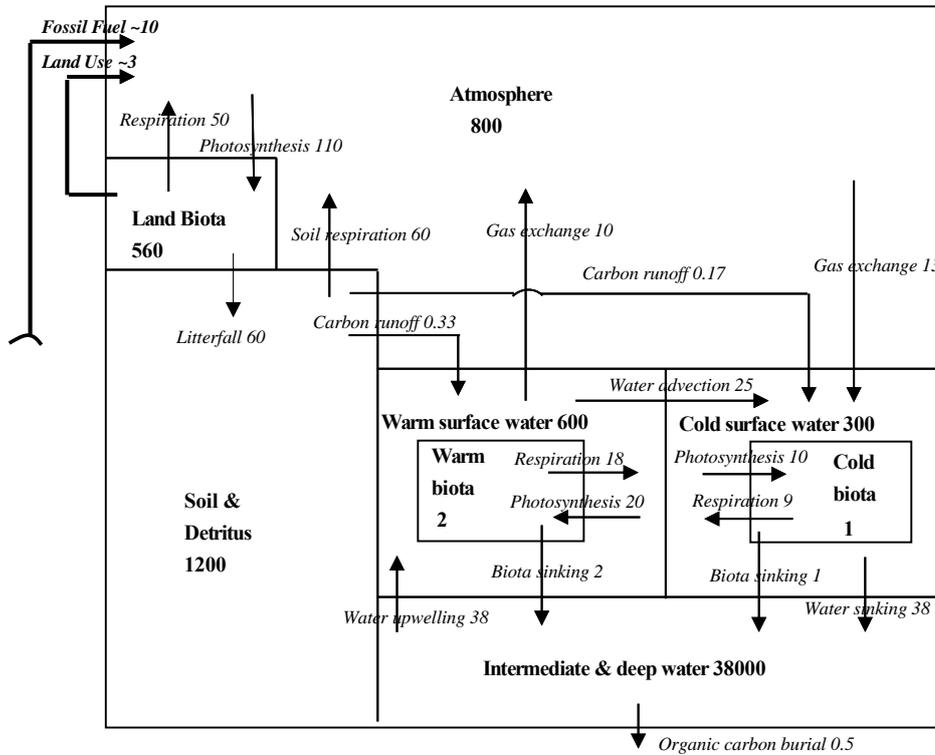


Fig. 1. The diagram of eight box carbon model. Units are Gt C (gigatons as carbon) for carbon reservoirs and Gt C/yr for fluxes.

2. 재료 및 방법

2.1. SGCM 모델의 개요

SGCM 모델은 지구 규모의 탄소 저장고 사이의 탄소 이동을 수식화한 모델로서, 대기, 육상 생물, 토양 및 표면층, 온해 표면수, 냉해 표면수, 중 심해수, 온해 생물 및 심해 생물의 8개 저장고와, 저장고 사이의 이동을 나타내는 19개의 플럭스로 구성된 상자모델이다. 모델의 개략적인 구조도는 Fig. 1과 같다.

상자모델의 일반적인 물질수지식은 다음과 같다.

$$V_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = \sum_j F_{ji} - \sum_j F_{ij} \quad (1)$$

여기서 V_i 는 i 번째 상자의 부피, $[L^3]$; C_i 는 i 번째 상자의 탄소농도, $[M/L^3]$; F_{ij} 는 i 번째 상자에서 j 번째 상자로의 질량 이동, $[M/T]$.

SGCM 모델에서는 Fig. 1에 나타나 있듯이 시스템 내의 자연적인 탄소순환 이외에 화석연료사용으로 인한 대기 중으로의 배출(fossil fuel use)과 토지 이용(land use)과 같은 인간의 행위에 의한 강제적 탄소 이동도 포함된다. 따라서 대기권 상자의 물질수지식은 다음과 같다.

$$V_i \cdot \frac{dC_i}{dt} = \sum_j F_{ji} - \sum_j F_{ij} + Fos(t) + Luse(t) \quad (2)$$

여기서 $Fos(t)$ 는 화석연료 사용으로 인한 CO_2 배출량, $[M/T]$; $Luse(t)$ 는 토지이용으로 인한 CO_2 배출량, $[M/T]$.

따라서 SGCM 모델은 탄소 저장고 사이의 자연적 탄소순환에 의한 이동과 화석연료 사용 및 토지이용에

의한 강제적인 탄소 이동으로 구성된 8개의 물질수지식으로 이루어져 있다.

탄소 저장고 사이의 자연적 탄소순환에 의한 이동은 각 이동의 특성을 고려하여 다음과 같이 수식화 하였다.

광합성에 의해 대기권에서 육상식물로의 탄소 이동(photosynthesis)은 대기 중 CO₂ 농도와 온도영향을 고려하여 다음과 같이 나타내었다.

$$k_{ph} \cdot \frac{C_{atm}}{K_M + C_{atm}} \cdot \theta_{ph}^{\Delta T} \cdot C_{lb} \cdot V_{lb} \quad (3)$$

여기서 k_{ph} 는 광합성 속도상수, [T⁻¹]; $\frac{C_{atm}}{K_M + C_{atm}}$ 는 속도상수의 Michaelis-Menton 효과; C_{atm} 는 대기 중 CO₂ 농도, ppm; K_M 은 반수 포화농도, ppm; θ_{ph} 는 광합성의 온도조정계수, 무단위; ΔT 는 초기온도 대비 온도변화량, °C; C_{lb} 는 육상식물상자의 탄소농도, [M/L³]; 그리고 V_{lb} 는 육상식물상자의 부피, [L³].

마찬가지로 육상식물이 호흡에 의해 배출된 CO₂의 대기권 이동(respiration)과 낙엽 등으로 인하여 유기탄소가 토양으로 이동(litterfall) 하는 것에도 Michaelis-Menton 식과 온도 영향을 반영하였다.

토양 미생물이 토양 유기탄소를 분해하여 발생하는 CO₂의 대기권으로의 이동(soil respiration)은 온도 상승이 미생물의 증식에 미치는 영향을 고려하여 온도효과만을 반영하였다.

$$k_{sr} \cdot \theta_{sr}^{\Delta T} \cdot C_{soil} \cdot V_{soil} \quad (4)$$

여기서 k_{sr} 은 토양호흡의 속도상수, [T⁻¹]; θ_{sr} 는 토양호흡의 온도조정계수, 무단위; C_{soil} 은 토양상자의 탄소농도, [M/L³]; 그리고 V_{soil} 은 토양상자의 부피, [L³].

대기와 해양표면수 사이의 CO₂ 분압 차에 의한 탄소 이동(gas exchange)은 다음과 같이 나타내었다.

$$k_l \cdot S \cdot |P_{atm} - P_{ocean}| \cdot A_{ocean} \quad (5)$$

여기서 k_l 은 기체전달속도, [L/T]; S 는 CO₂ 용해도, [M/L³/ppm]; P_{atm} 는 대기권 CO₂ 분압, ppm; P_{ocean} 은 알

칼리도, 수은, 염도 및 총무기탄소의 함수인 해양표면수의 CO₂ 분압, ppm; 그리고 A_{ocean} 은 해양의 표면적, [L²].

이 외의 상자 사이의 탄소 이동인 해양 순환에 의한 이동(cold surface water sinking, deep water upwelling, surface water advection), 해양생물과 해양 사이의 탄소 이동(ocean biota primary production, ocean biota respiration, organic carbon sinking, organic carbon burial) 등은 상자 내 탄소농도와 선형관계를 가정하여 1차반응식으로 나타내었다.

$$k_{ij} \cdot C_i \cdot V_i \quad (6)$$

여기서 k_{ij} 는 질량이동 속도상수, [T⁻¹]; 그리고 V_i 는 i 번째 상자의 부피이다.

SGCM의 전체 모델식과 모델 보정의 구체적인 내용은 Kwon and Schnoor(1994)에 자세히 나타나 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1. SGCM 모델의 보정

SGCM 모델은 연도별 화석 연료 사용과 토지이용으로 인하여 대기 중으로 유입된 CO₂를 입력자료로 하고 관측된 대기 중 CO₂를 바탕으로 모델의 계수를 보정하였다. 1958~1990년까지의 자료를 이용한 기존의 연구에서는 화석연료 사용으로 인한 CO₂ 배출은 관측자료를 이용하였으나(Kwon and Schnoor, 1994), 토지이용으로 인한 대기 중 CO₂ 배출은 자료의 불확실성을 고려하여 추정된 연평균값 1.2 GtC/yr로 고정하였다. 그러나 1958~2016년까지의 자료를 이용한 본 연구에서는 기존의 연구에서 보정된 모델 계수는 조정하지 않고(Kwon and Schnoor, 1994), 토지이용으로 인한 대기 중 CO₂ 배출을 문헌에서 제시한 불확실성 범위 내에서 조정하여 대기 중 CO₂ 농도를 적합화하였다. 적합화 과정은 모사기간의 첫 해인 1958년부터, 계산된 CO₂ 농도가 관측된 CO₂ 농도에 근접하도록 토지이용에 의한 CO₂ 배출량을 입력하는 과정을 2016년까지 년도 순으로 수행하였다. 적합화 과정에서 입력된 토지이용에 의한 CO₂ 배출량이 문헌에서 제시한 불확실성 범위를 초과하지 않는 범위에서, 계산된 CO₂ 농도와 관측된 CO₂ 농도의 차이를 0.5 ppm 이내로(예외적으로 1993년은 0.78 ppm임) 최소화

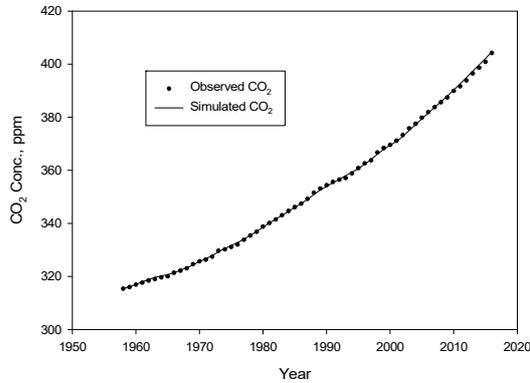


Fig. 2. Best fit of atmospheric CO₂ concentration.

되도록 시행착오법에 의하여 반복 실행하였다. 본 연구에 사용된 화석연료 사용으로 인한 CO₂ 배출량 자료는 $\pm 1\sigma$ 신뢰수준에서 약 $\pm 5\%$ 이다(Le Quéré et al., 2017). Fig. 2는 2016년까지의 모델 적합화한 결과를 나타내고 있는데 점선은 하와이 마우나로아(Mauna Loa)에서 관측된 대기 중 CO₂ 농도이며, 실선은 모사 결과로서 두 자료 사이의 통계적 오차는 표준오차가 0.06 ppm이다.

Fig 3은 SGCM 모델의 적합화 결과로 모사된 탄소의 발생원과 흡수원을 나타내고 있다. Fig. 3의 하단은 탄소의 발생원으로서 화석연료는 1958년 2.2 GtC/yr에서 1980년 약 5 GtC/yr로 가파르게 증가하다가, 2000년까지는 약 6 GtC/yr로 완만하게 증가하였다. 이후 2011년까지 빠르게 증가한 후 최근 5년간 약 9 GtC/yr로 정체되고 있다. 반면에 토지이용으로 인한 배출은 앞에서 언급하였듯이 문헌에 제시된 값의 범위 내에서 조정하였으며, 그 결과 모사 기간 동안 0~2 GtC/yr로 발생하는 것으로 모사되었다.

Fig. 3 상단은 탄소의 흡수원으로서, 대기는 1960년에 약 2 GtC/yr에서 현재의 5.5 GtC/yr, 육상생태권은 0.5 GtC/yr에서 3 GtC/yr, 그리고 해양은 1.5에서 2.5 GtC/yr로 증가하고 있다.

Fig. 4는 토지이용으로 인한 CO₂ 배출량에 대한 SGCM 모델의 결과와 문헌에 나타난 결과를 비교하였다. 그림에 나타난 상자수염은 global carbon budget(Le Quéré et al., 2017)에 보고된 2개의 bookkeeping model과 12개 지구식생모델(Dynamic Global Vegetation

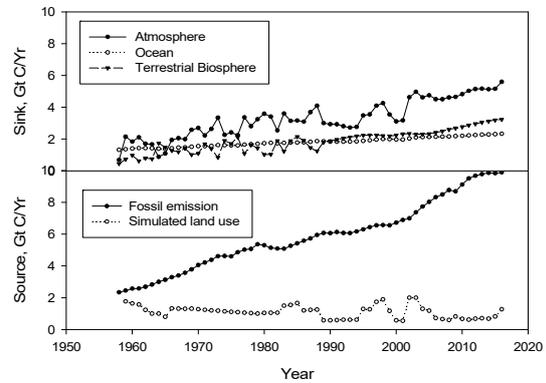


Fig. 3. Global carbon emission sources (lower part) and sinks (upper part).

Model; DGVM)의 산출값을 통계처리하여 나타내었다. 상자의 중앙은 평균값, 상자의 양 극단은 $\pm 25\%$, 수염은 $\pm 45\%$ 를 나타낸다. 토지이용으로 인한 CO₂ 배출량은 일부 배출량이 음수인 흡수원인 경우와 일부 3 GtC/yr에 이르는 극단적인 경우를 제외하고 대체적으로 약 0.5~2.5 GtC/yr의 범위에 있다. 본 SGCM 모델의 경우 모델 보정 단계에서 문헌의 범위 내에서 조정하였기 때문에 문헌의 범위 내에 있기는 하지만 1990년 전후, 2000년, 2010년 전후의 낮은 배출량(약 0.5 GtC/yr)과 그 사이의 다소 큰 배출량(약 2 GtC/yr)과 같은 변동성을 나타내고 있다.

Fig. 5는 해양의 탄소 흡수량을 나타내고 있다. 그림의 상자수염은 global carbon budget(Le Quéré et al., 2017)에 보고된 8개 모델의 산출값을 통계처리하여 나타내었다. 본 자료는 1990년대의 관측자료값인 2.2 ± 0.4 GtC/yr을 만족하는 8개의 지구해양지화학모델의 결과로서 상자의 중앙은 평균값, 상자의 양 극단은 $\pm 25\%$ 를 의미한다. 평균값으로 보면 흡수량이 일정하게 증가하지는 않으나 전체 값들은 0.8 GtC/yr 내외에서 2.2 GtC/yr 내외로 증가하고 있음을 보여주고 있다. 반면에 본 SGCM 모델의 모사 결과는 1.2에서 2.0 GtC/yr로 증가하고 있어서 문헌에 나타난 흡수량의 증가 속도보다는 약간 느리게 나타나고 있다. 연대별로 살펴보면 1960~1970년대까지는 문헌값에 비하여 높고 1980~2000년대까지는 문헌값과 유사하게 나타났으며, 2010년대에는 낮게 나타나고 있다. 그러나 문헌에 보고된 자료는 1990년대에

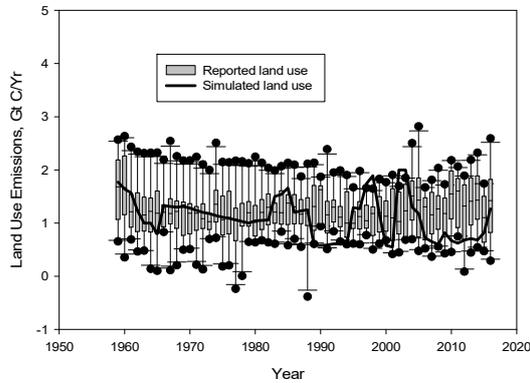


Fig. 4. Simulated land use emissions compared with literature-reported land use emissions.

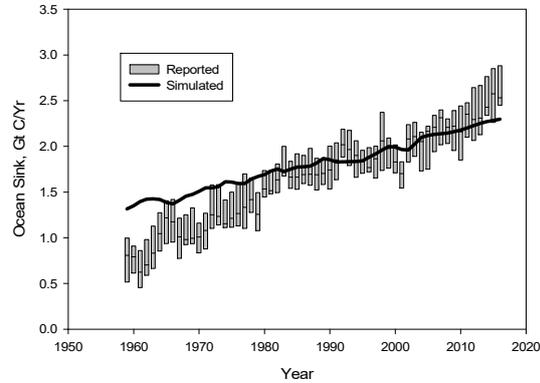


Fig. 5. Simulated ocean sinks compared with literature-reported ocean sinks.

측정된 자료를 기초로 하여 모델 산정된 자료임을 고려할 때, 1990년대의 SGCM 모사결과는 충분히 좋은 결과라고 판단된다.

Fig. 6은 토양 및 육상생물을 포함한 권역에서의 탄소의 흡수량을 나타내고 있다. 그림의 상자수염은 global carbon budget(Le Quéré et al., 2017)에 보고된 15개 지구식생모델의 산출값을 통계처리하여 나타내었다. 상자의 중앙은 평균값, 상자의 양 극단은 $\pm 25\%$, 수염은 $\pm 45\%$ 를 나타낸다. 육상생물권의 탄소 이동량에 대한 문헌 결과는 다른 권역에 비하여 넓은 범위를 제시하고 있으며 1958~2016년까지 -2 GtC/yr에서 약 6 GtC/yr 사이의 범위에서 느리게 증가하고 있다. 흡수량이 음인

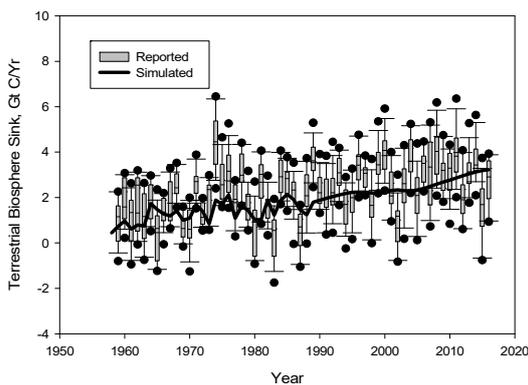


Fig. 6. Simulated terrestrial biospheric sinks compared with literature-reported terrestrial biospheric sinks (negative values mean sources).

경우는 일부 모델의 경우 토양 및 육상생물권이 탄소 흡수원이 아니라 발생원으로서의 기능을 하는 것으로 모사한 결과이다. 따라서 육상생물권은 다른 권역에 비하여 탄소 이동량의 불확실성이 매우 큰 편으로 나타나고 있다. Le Quéré et al.(2017)에 의하면 1959년부터 2016년까지 연평균 지구식생모델의 평균값에 대한 표준편차는 ± 0.8 GtC/yr로 나타난다. 본 SGCM 모델의 육상생물권의 탄소흡수량은 문헌의 범위 내에서 $0.5 \sim 3.0$ GtC/yr로 증가하는 것으로 모사되었다.

3.2. CO₂ 배출에 따른 탄소저장량 변화

Fig. 7은 화석연료 사용과 토지이용으로 인한 대기 중으로의 CO₂ 배출이 대기권, 해양권, 육상생물권에 재 배분되는 비율을 나타낸다. 대기권과 육상생물권은 2000년까지는 다소 변동성이 크게 나타나고 있지만 전체적인 경향을 선형회귀식으로 분석한 결과, 대기권은 1958년 42%에서 2016년 50%까지로 서서히 증가하고 있으며, 육상생물권은 1958년 24%에서 2016년 30%로 증가하여서 대기권과 유사한 증가속도를 보여주고 있다. 반면에 해양권은 1958년 34%에서 2016년 20%로 배분비율이 낮아지고 있음을 보여주고 있다. 이것은 대기 중으로의 CO₂ 배출에 대하여 육상생물권은 광합성 및 호흡에 의하여 빠르게 반응하는 반면에 해양은 해수와 대기의 CO₂ 평형, 해수 대순환에 의해 비교적 느리게 진행되는 결과라고 할 수 있다. 따라서 화석연료 사용으로 인한 대기 중으로의 CO₂ 배출량이 지속된다면 대기 중 탄소

배분율은 지속 증가하여 CO₂의 농도 증가가 더욱 가속화 될 것으로 추정된다.

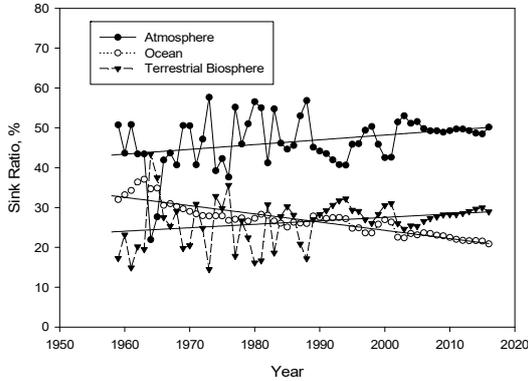


Fig. 7. Simulated global carbon sink ratio change among atmosphere, terrestrial biosphere and ocean with time elapsed.

Fig. 8과 Fig. 9는 1960년을 기준으로 년도별 탄소 누적 배출량과 권역별 누적 흡수량을 나타내고 있다.

Fig. 8은 화석연료 사용과 토지이용으로 인한 CO₂의 누적 배출량과 이에 따른 권역별 누적 흡수량을 나타내고 있다. 1960년을 기준으로 2016년까지 화석연료 사용과 토지이용으로 인한 대기 중 누적 배출량은 399 GtC으로 지속 증가하여 왔다. 권역별 누적 흡수량도 지속 증가하여서 대기권에 189 GtC, 육상생물권과 해양권에 각각 107 GtC과 103 GtC의 비슷한 규모의 양이 축적되었

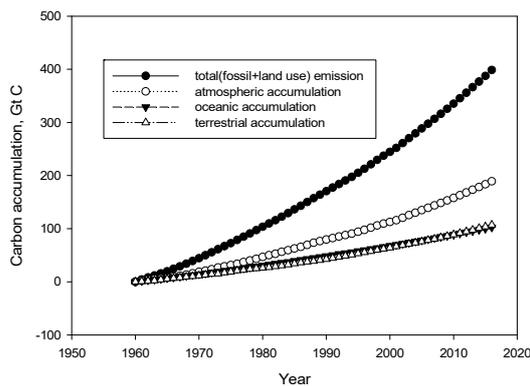


Fig. 8. Simulated carbon accumulations in the atmosphere, the terrestrial biosphere and the ocean due to total emissions (fossil fuel use + land use).

다. Fig. 9는 화석연료 사용으로 인한 CO₂ 누적 배출량과 이에 따른 권역별 누적 흡수량을 나타내었다. 화석연료 사용으로 인한 대기 중으로의 누적 배출량은 338 GtC으로서, 이 중 189 GtC이 대기권, 46 GtC이 육상생물권, 그리고 103 GtC이 해양권에 축적된 것으로 조사되었다. 이 경우 육상생물권의 누적 흡수량은 육상생물권이 대기권으로부터 흡수한 양에서 토지이용으로 인한 배출량을 뺀 양으로서 육상생물권의 탄소저장고의 변동량을 의미한다. 즉, 육상생물권은 모사기간 중 육상생물권의 누적 흡수량은 107 GtC이며, 토지 이용으로 인한 누적 배출량은 61 GtC으로서 이 기간 동안의 육상생물권의 순 탄소 변동량은 46 GtC이 증가하였다.

Table 1은 1960년을 기준으로 화석연료 사용과 토지 이용으로 인한 탄소의 누적 배출량이 권역별로 누적된 흡수량을 배분 비율과 함께 매 10년 단위로 나타내었다. 화석연료 사용과 토지이용으로 인한 누적 배출량의 경우, 대기권의 누적 흡수율은 1970년 43%에서 2016년 47%로서 증가, 육상생물권은 25%에서 27%로 증가한 반면에 해양권은 32%에서 26%로 감소하였다. 화석연료 사용으로 인한 누적 배출량의 경우, 대기권은 59%에서 56%로 감소, 토양은 -3%(실질적인 누적 배출량임)에서 14%로 증가, 해양권은 44%에서 30%로 감소하였다.

4. 결론

SGCM 모델을 이용하여 1958~2016년까지 59년

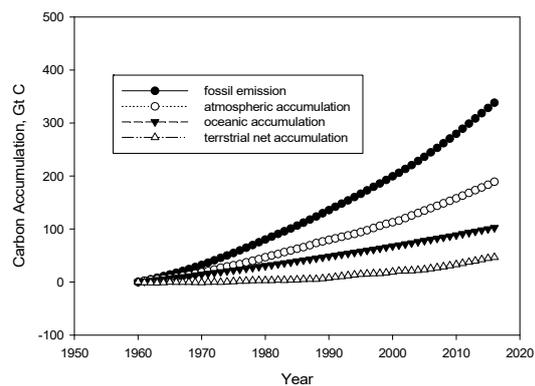


Fig. 9. Simulated carbon accumulations in the atmosphere, the terrestrial biosphere and the ocean due to fossil fuel use emissions only.

Table 1. Cumulative carbon sources and sinks with flow ratios in parenthesis at every 10 years since the year 1960

Unit : GtC

	Emission and sink	Cumulative carbon Vs. 1960					
		1970	1980	1990	2000	2010	2016
	Total	44(100%)	104(100%)	171(100%)	244(100%)	336(100%)	399(100%)
Fuel + deforestation	Atmosphere	19(43%)	47(45%)	79(46%)	112(46%)	158(47%)	189(47%)
	Soil	11(25%)	26(25%)	43(25%)	64(26%)	89(26%)	107(27%)
	Ocean	14(32%)	31(30%)	49(29%)	68(28%)	89(26%)	103(26%)
	Fuel	32(100%)	81(100%)	136(100%)	199(100%)	279(100%)	338(100%)
Fuel	Atmosphere	19(59%)	47(58%)	79(58%)	112(56%)	158(57%)	189(56%)
	Soil	-1((-3%))	3(4%)	8(6%)	19(10%)	32(11%)	46(14%)
	Ocean	14(44%)	31(38%)	49(36%)	68(34%)	89(32%)	103(30%)

동안 화석연료 사용과 토지 이용으로 인하여 대기 중으로 배출된 탄소가 대기권, 육상생태권 및 해양권으로 이동하는 탄소 물질 수지를 모사하였다.

SGCM 모델에서 계산된 대기권의 탄소 저장량을 CO₂ 농도로 환산하여 하와이 마우나로아(Mauna Loa) 측정소에서 관측된 값과 비교함으로써 모델 보정하였다. 이 과정에서 화석연료 사용은 문헌의 자료를 그대로 이용하였으나 토지 이용으로 인한 탄소 배출은 문헌에 나타난 불확실성 범위 내에서 조정하였다. 모델 보정 후 대기권, 해양권 및 육상생물권으로의 탄소 물질 이동량을 계산한 결과, 많은 모델연구 결과(Le Quéré et al., 2017)와 통계적으로 의미있는 범위 내에서 모사되었다. 따라서 SGCM 모델은 8-상자로 구성된 간단한 모델임에도 불구하고 지구 규모의 탄소 순환과 탄소 물질수지를 잘 모사할 수 있음을 확인하였으며, 향후 CO₂ 배출전망에 따른 대기 중 CO₂ 농도예측과 기후모델과 결합하여 지구온변화 등의 시나리오 분석에 적용될 수 있을 것이다.

모사기간 동안의 화석연료 사용과 토지 이용으로 인한 대기 중으로의 총 배출량을 분석한 결과, 1958년 2.5 GtC/yr에서 2016년 11 GtC/yr로 증가하였다. 년도별 총 배출량이 대기권, 육상생물권 및 해양권으로 재배분된 비율을 살펴보면 1958년에 대기권 42%, 육상생물권 24%, 해양권 34%로 분배 흡수되었으나 2016년에는 대기권은 50%로 증가, 육상생물권은 30%로 증가한 반면에 해양권은 20%로 배분비율이 낮아지고 있음을 보여주고 있다. 이것은 대기권과 육상생물권으로의 탄소 이동

속도가 해양에 비하여 빠르다는 것을 의미하여 향후 현재와 같은 속도로 배출이 지속될 경우 대기 중 CO₂의 농도는 훨씬 빠르게 증가하여 기후변화가 가속될 것으로 추정된다. 특히 2015년 파리협정에 의한 신기후체제 하에서 국가별로 설정한 자발적 감축계획(INDC)에 의하면 2030년까지 CO₂를 포함한 온실가스 배출량이 현재의 배출량을 초과하여 기후변화가 가속될 것으로 우려된다. 따라서 지구의 평균기온을 산업화 이전의 온도 대비 1.5~2.0℃ 상승 이하로 억제하기 위한 파리협정의 목표를 달성하기 위해서는 더욱 과감한 배출량 감축이 필요한 것으로 보고하고 있다(UNFCCC, 2016).

모사기간(1960~2016년) 동안의 화석연료 사용과 토지 이용으로 인한 이산화탄소의 누적 배출량 399 GtC은 대기권에 189 GtC(47%), 육상 생물권에 107 GtC(27%), 해양권에 103 GtC(26%)이 축적되었다. 특히, 육상생물권의 토지 이용에 따른 CO₂ 배출을 고려한 순 축적량도 46 GtC으로 나타나서 육상생물권의 탄소 저장량은 늘어난 것으로 모사되었다.

감사의 글

이 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원으로 수행되었습니다(과제번호 : 2018-0798).

REFERENCES

Booth, B. B. B., Harris, G. R., Muprhy, J. M., House, J. I., Jones, C. D. J., Sexton, D., Sitch, S., 2017, Narrowing

- the range of future climate projections using historical observations of atmospheric CO₂, *J. Clim.*, 30, 3039-3053.
- Chiodi, A. M., Harrison, D. E., 2014, Comment on Qain et Al. 2014: La Niña and El Niño composite of atmospheric CO₂ change, *Tellus B: Chem. Phys. Meteorol.*, 66(1), 20428.
- Haverd, V., Smith B., Nieradzic, L., Briggs, P. R., Woodgate, W., Trudinger, C. M., Canadell, J. G., 2018, A new version of the CABLE land surface model incorporating land use and land cover change, woody vegetation demography, and a novel optimization-based approach to plant coordination of photosynthesis, *Geosci. Model. Dev.*, 11, 2995-3026.
- Houghton, R. A., 2007, Balancing the global carbon budget, *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 35, 313-347.
- Houghton, R. A., Baccini, A., Walker, W. S., 2018, Where is the residual terrestrial carbon sink?, Wiley Online Library, 14313.
- Ilyina, T., Six, K., Segsneider, J., Maier-Reimer, E., Li, H., Nunez-Riboni, I., 2013, The global ocean biogeochemistry model HAMOCC: Model architecture and performance as component of the MPI-Earth System Model in different CMIP5 experimental realizations, *J. Adv. Model. Earth Syst.*, 5, 287-315.
- IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change), 2014, IPCC fifth assessment report.
- Kwon, O. Y., Schnoor, J., 1994, Simple global carbon: the atmosphere-terrestrial biosphere-ocean interaction, *Global Biogeochem. Cycles*, 8(3), 295-305.
- Lade, S. J., Dinges, J. F., Fetzer, I., Anderies, J. M., Beer, C., Cornell, S. E., Gasser, T., Norberg, J., Richardson, K., Rockström, J., Steffen, W., 2018, Analytically tractable climate-carbon cycle feedbacks under 21st century anthropogenic forcing, *Eath Syst. Dynam.*, 9, 507-503.
- Law, R. M., Ziehn, T., Matear, R. J., Lenton, A., Chambelain, M. A., Stevens, L. E., Wang, A. P., Sribinovsky, J., Bi, D., Yan, H., Vohralik, P. F., 2017, The carbon cycle in the Australian Community Climate and Earth System Simulator (ACCESS-ESM1) - Part 1: Model description and pre-industrial simulation, *Geosci. Model. Dev.*, 10, 2567-2590.
- Le Quéré, C., Andrew, R. M., Friedlingstein, P., Sitch, S., Pongratz, S., Manning, A. C., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Canadell, J. G., Jackson, R. B., Boden, T. A., Tans, P. P., Andrews, O. D., Arora, V. K., Bakker, D. C. E., Barbero, L., Becker, M., Betts, R. A., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Cosca, M. C. E., Cross, J., Currie, K., Gasser, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Houghton, R. A., Hunt, C. W., Hurtt, G., Ilyina, T., Jain, A. K., Kato, E., Kautz, M., Keeling, R. F., Goldewijk, K. K., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lima, I., Lombardozzi, D., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Naber, J. E. M. S., Nakaoka, S., Nojiri, Y., Padín, X. A., Peregon, A., Pfeil, B., Pierrot, D., Poulter, B., Rehder, G., Reimer, J., Rödenbeck, C., Sxhwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Tian, H., Tilbrook, B., van der Laan-Luijkx, I. T., van der Werf, G. R., van Heuven, S., Viovy, N., Vuichard, N., Walker, A. P., Watson, A. J., Wiltshire, A. J., Zaehe, S., Zhu, D., 2017, Global Carbon Budget, *Earth Syst. Sci. Data*.
- Manabe, S., Stouffer, R. J., Spelman, M. J., Bryan, K., 1991, Transient responses of a coupled ocean-atmosphere model to gradual changes of atmospheric CO₂, Part I, annual mean response, *J. Clim.*, 4, 785-818.
- Melton, J. R., Arora, V. K., 2016, Competition between plant functional types in the Canadian Terrestrial Ecosystem Model (CTEM) v. 2.0, *Geosci. Model. Dev.*, 9, 323-361.
- Michalak, A. M., 2017, From the missing sink to process understanding: the expanding role of top-down studies in carbon cycle science, Fourth International Conference on Earth System Modelling, Germany, 174.
- NOAA (National Ocean and Atmosphere Administration), 2017, <http://www.noaa.gov/climate>.
- Santin, C., Doerr, S. H., Preston, C. M., Podríguez, G. G., 2015, Pyrogenic organic matter production from wildfires: a missing sink in the global carbon cycle, *Glob. Change Biol.*, 21, 1621-1633.
- Smith, C. J., Forster, P. M., Allen, M., Leach, N., Millar, R., Passerello, G. A., Regayre, L. A., 2017, A simple emission-based impulse response and carbon cycle model, *Geosci. Model. Dev.*, 1-45.
- Sun, M. A., Kim, Y. M., Lee, J. H., Boo, K. O., Byun, Y.

- H., Cho, C. H., 2017, Response of terrestrial carbon cycle: climate variability in carbon tracker and CMIP5 earth system models, *Atmos.*, Korean Meteorological Society, 27(3), 301-316.
- UNFCCC (United Nations Framework Convention on Climate Change), 2016, Aggregate effect of the intended nationally determined contributions: an update
- Wang, J., Zeng, N., Wang, M., Jiang, F., Wang, H., Jiang, Z., 2018, Contrasting terrestrial carbon cycle responses to the 1997/98 and 2015/16 extreme El Niño events, *Earth Syst. Dynam.*, 9, 1-14.