

탄소순환 모델기반 탄소중립 평가방법

최수형[†]

전북대학교 화학공학부, 청정에너지연구센터
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
(2021년 12월 31일 접수, 2022년 2월 3일 수정본 접수, 2022년 2월 6일 채택)

A Carbon Cycle Model Based Method for Carbon Neutrality Assessment

Soo Hyoung Choi[†]

Division of Chemical Engineering, Clean Energy Research Center, Jeonbuk National University
567 Baekje-Daero, Deokjin-Gu, Jeonju, 54896, Korea
(Received 31 December 2021; Received in revised from 3 February 2022; Accepted 6 February 2022)

요 약

탄소중립을 달성하기 위한 다양한 정책 및 프로젝트의 실효성을 평가하기 위하여 탄소순환 모델에 기반을 둔 방법을 제안한다. 제안된 모델은 산업혁명 이후 인류에 의한 탄소배출 및 삼림파괴 데이터로부터 대기 중 이산화탄소 농도 증가와 지구평균기온 상승을 적절히 재현함으로써 유효성이 검증되었다. 사례연구로는 삼림벌채, 재식림 및 추가식림에 대한 탄소순환 영향평가를 수행하였다. 대기 중 이산화탄소의 증가는 화석연료사용뿐 아니라 삼림벌채의 영향도 크며, 벌채 직후 재식림을 해도 초기농도로의 복귀는 매우 오래 걸린다는 것이 확인되었다. 제안된 방법은 궁극적으로 미래의 잠재적 기후제어 시뮬레이션에 활용됨으로써 다양한 기후공학 기술의 안전성 검증에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

Abstract – A carbon cycle model based method is proposed in order to evaluate the effectiveness of various policies and projects to achieve carbon neutrality. The proposed model was validated by properly reproducing the increase in the concentration of carbon dioxide in the atmosphere and the rise of the global average temperature from the data of anthropogenic carbon emissions and deforestation since the industrial revolution. As a case study, a carbon cycle impact assessment was performed for deforestation, reforestation, and afforestation. It was verified that the increase of carbon dioxide in the atmosphere is attributed not only to fossil fuel usage, but also to deforestation, and that even if deforestation is immediately followed by reforestation, it takes very long to return to the initial concentration. The proposed method is expected to be eventually applicable to simulation of potential climate control in the future, contributing to safety verification of various climate engineering techniques.

Key words: Carbon cycle, Carbon neutrality, Impact assessment, Global warming, Climate change

1. 서 론

전 세계 많은 나라들이 탄소중립을 선언했다[1]. 이산화탄소 배출과 포집의 균형을 맞추겠다는 것이다[2]. 2015년에 체결된 파리협약에 의하면 2100년까지의 지구평균기온 상승을 산업혁명 이전보다 1.5 °C 높은 수준으로 제한할 수 있도록 2050년까지 이를 달성해야 한다[3]. 따라서 한국 포함 대부분 국가가 2050년, 중국은 2060년을 목표연도로 제시하였다[1]. 탄소중립의 궁극적인 목표는

대기 중 온실가스를 적정수준으로 유지하는 것이다. 대기 중 이산화탄소의 정상상태 농도는 해수표면 온도에 의존한다. 따라서 탄소중립 추진정책의 영향을 정확하게 평가하려면 지구를 탄소순환 시스템으로 보아야 한다[4]. 탄소중립의 지속가능성은 지구전체의 탄소순환이 정상상태에 이를 수 있을 경우에만 달성된다. 즉, 순환탄소 총량 증가를 멈춰야 한다. 산림바이오매스는 이 조건을 만족시키지만 벌채가 초래하는 탄소부채(carbon debt)로 인해 화석연료의 대안이 되지 못한다[5]. 목재활용이 탄소저장이라는 주장도 탄소포집 중단 사실을 호도하고 있다[6]. 화석연료와 함께하는 탄소 포집 및 저장은 탄소 중립적이더라도 지속가능하지 않다. 이마저도 투자를 통해 간접적으로 실행하는 탄소상쇄(carbon offset)[1] 프로그램은 실효성조차 보장하기 어렵다. 본 논문에서는 이와 같은 탄소중립 개념의 취약성을 지적하고 이를 극복할 수 있는 엄밀한 평가모

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: soochoi@jbnu.ac.kr

‡이 논문은 광운대학교 교재교육 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

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.

델을 제시하고자 한다.

약 5,550만년전, 지구평균기온이 5-8 °C 상승한 시기가 있었다. 팔레오세-에오세 최대온난기(Paleocene-Eocene Thermal Maximum, PETM)라 불린다. 이 시기에 바다로부터 대기로 방출된 탄소기반 온실가스는 0.3-1.7 PgC/y (PgC = 탄소 10¹⁵ 그램 = GtC)로 추정된다[7]. 이 수치는 현재 인간이 배출하고 있는 10 PgC/y와 자주 비교된다. 이를 근거로 현재의 지구온난화가 PETM 때보다 훨씬 빠르게 진행하며 더욱 심각할 것이라고 주장한다. 그러나 이 비교는 일종의 속임수다. 전자는 지구온난화의 결과이고 후자는 원인이기 때문이다. NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration)에 의하면 산업혁명 이후 대기 중 이산화탄소 농도 증가로 인해 해양 산성화가 진행되어 최근 200여년 동안 표면해수의 pH가 0.1만큼 떨어졌다[8]. 이처럼 현재의 바다는 PETM 때와는 반대로 대기로부터 탄소를 흡수하고 있다. 온실가와 지구온난화의 원인 및 결과 관계를 규명하려면 지구탄소순환의 엄밀한 분석이 필요하다.

탄소순환 모델은 오래전부터 제안되어왔다[9-11]. 옛 모델[9]은 식물의 탄소동화작용 능력을 과대평가해서 화석연료 사용에 거리낌이 없도록 오도했다. 이후 대기 이산화탄소 농도 증가에 의한 식물성장촉진이 제한적임을 반영한 탄소순환 모델이 NASA (National Aeronautics and Space Administration)가 지원하는 GLOBE (Global Learning and Observations to Benefit the Environment) 프로그램에서 제안되었다[12,13]. 이 모델은 식물의 탄소동화작용 총량이 녹지면적에 비례한다고 가정했다. 식물의 실제 총량은 반영되지 않았다. 결과적으로 화석연료 사용에 의한 대기 이산화탄소 농도 증가는 과장하고 삼림벌채에 의한 증가는 축소하는 오류를 범했다. 본 논문의 이전 연구에서는 이 모델의 오류들을 수정하고 적용범위를 화석연료 연소에서 산림바이오매스 활용까지 확대했으며, 새 모델을 GLOBE+라 명명했다[14].

지구온난화의 원인은 여전히 논쟁 중이다. UN (United Nations) 산하조직 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)[15]에 따르면 최근의 지구온난화는 오로지 인간 탓이다. 그러나 Ollila [16]가 제안한 탄소순환 모델에 따르면 인류가 발생시킨 CO₂ 분율은 IPCC가 보고한 수치보다 훨씬 낮다. 한편, GLOBE 탄소순환 모델

에 적용된 온실효과 모델에 의하면 원인이 무엇이든 대기 CO₂ 농도가 100 ppm 증가할 때마다 지구온도는 1 °C 상승한다. 또한 GLOBE 모델에 적용된 해수면 물질전달 모델에 의하면 지구온도가 1 °C 상승하면 대기 CO₂ 평형농도는 약 10 ppm 증가한다. 따라서 CO₂에 의한 온실효과는 지구온도를 추가로 상승시키는 양의 되먹임(positive feedback) 루프를 형성한다. 지구온도 상승은 온실효과 의 주 역할을 하는 수증기의 발생도 증가시킨다. 이 또한 양의 되먹임 루프를 형성한다. 단, 이 경우에는 햇빛을 반사하는 구름의 양도 증가하므로 지구온도상승을 억제하는 음의 되먹임(negative feedback) 루프도 형성된다. 이로 인해 인간의 탄소배출이 지구온도를 얼마나 상승시키는지는 의견이 분분하다. 본 논문에서는 일단 원인보다 결과에 초점을 맞춘 GLOBE의 온실효과 모델을 사용한다.

2. 탄소순환

지구탄소순환은 Fig. 1과 같은 박스 모델로 나타낼 수 있다. 그림에서 박스는 탄소 저장소를 나타내고, 화살표는 탄소흐름을 나타낸다. 단순성을 위해 모델식은 활성 탄소순환을 형성하는 채색된 박스들과 실선 화살표들만 고려한다. 점선 화살표로 나타난 탄소흐름은 다른 흐름들보다 훨씬 느리다고 볼 수 있으므로 무시한다. 본 논문에서는 GLOBE + 모델[14]의 적용범위를 산림바이오매스의 연소 및 제품화 뿐 아니라 수확순실 및 단순벌채도 고려할 수 있도록 확장한 모델을 제안한다. 함수형태의 모델식은 다음과 같다.

$$\dot{C}_a = f_{rp}(C_p) + f_{rp}(C_s) - f_p(C_a, C_p, A_v) - f_a(C_a, C_{so}) + r_v + q \quad (1)$$

$$\dot{C}_p = f_p(C_a, C_p, A_v) - f_{rp}(C_p) - f_i(C_p) - h \quad (2)$$

$$\dot{C}_s = f_i(C_p) - f_{rs}(C_s) - f_t(C_s) + u_l \quad (3)$$

$$\dot{C}_{so} = f_a(C_a, C_{so}) + f_t(C_s) + f_{up}(C_{do}) - f_{dw}(C_{so}) \quad (4)$$

$$\dot{C}_{do} = f_{dw}(C_{so}) - f_{up}(C_{do}) - f_s(C_{do}) \quad (5)$$

$$\dot{C}_r = f_s(C_{do}) - r_v \quad (6)$$

$$\dot{A}_v = -f_a(h, s, C_p, A_v) \quad (7)$$

$$q = u_j + u_b \quad (8)$$

$$h = u_b + u_p + u_i \quad (9)$$

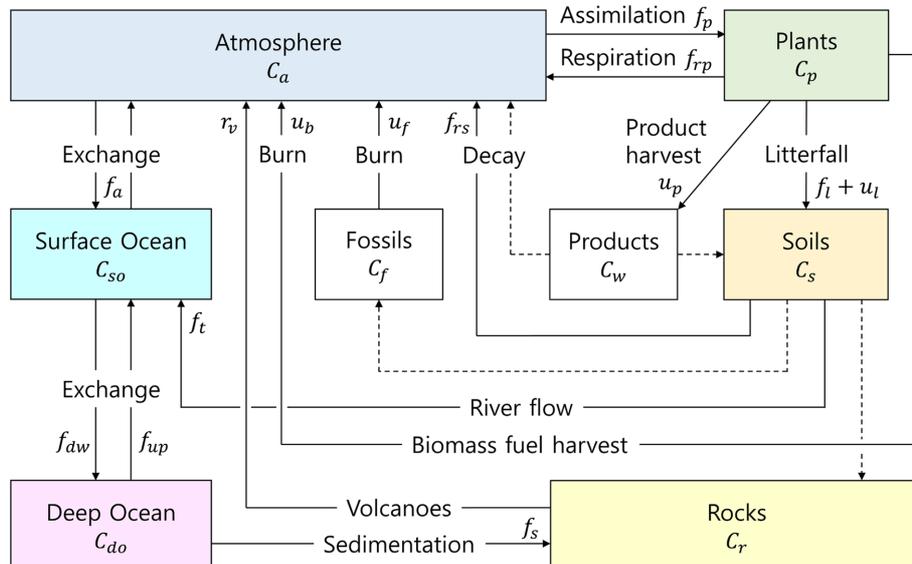


Fig. 1. Carbon cycle model [14].

각 변수 및 함수의 정의는 다음과 같다.

C_a = mass of carbon in the atmosphere, PgC

C_p = mass of carbon in plants, PgC

C_s = mass of carbon in soils, PgC

C_{so} = mass of carbon in the surface ocean, PgC

C_{do} = mass of carbon in the deep ocean, PgC

C_r = mass of carbon in rocks, PgC

A_v = normalized vegetated land area

f_p = rate of photosynthesis, PgC/y

f_{rp} = rate of plant respiration, PgC/y

f_l = rate of litterfall, PgC/y

f_{rs} = rate of soil respiration, PgC/y

f_t = rate of transfer from soils to the surface ocean by the river flow, PgC/y

f_a = net rate of absorption to the surface ocean, PgC/y

f_{up} = rate of upwelling from the deep ocean, PgC/y

f_{dw} = rate of down-welling from the surface ocean, PgC/y

f_s = rate of sedimentation to the crust, PgC/y

f_d = net rate of deforestation, y^{-1}

r_v = rate of volcano emission, 0.1 PgC/y

q = rate of fuel combustion, PgC/y

h = rate of plant harvesting, PgC/y

s = target rate of biomass production intended when planting seedlings, PgC/y

u_f = rate of fossil fuel combustion, PgC/y

u_b = rate of biomass combustion, PgC/y

u_p = rate of product harvest, PgC/y

u_l = rate of harvest loss, PgC/y

탄소유량함수 및 매개변수 모델식들은 다음과 같다[12-14].

$$f_p(C_a, C_p, A_v) = k_p \eta_C(C_a) \eta_T(C_a) \left(\frac{C_p}{C_p^o}\right)^\alpha \left(\frac{A_v}{A_v^o}\right)^{1-\alpha} \quad (10)$$

$$k_p = 110 \text{ PgC/y}, C_p^o = 560 \text{ PgC}, A_v^o = 1, 0 < \alpha < 1$$

$$\eta_C(C_a) = 1.5 \frac{p_a(C_a) - 40}{p_a(C_a) + 80} \quad (11)$$

$$p_a(C_a) = \frac{280 \text{ ppm}}{750 \text{ PgC}} C_a \quad (12)$$

$$\eta_T(C_a) = \frac{[60 - T_g(C_a)][T_g(C_a) + 15]}{1350} \quad (13)$$

$$T_g(C_a) = 15 + 0.01[p_a(C_a) - 280] \quad (14)$$

$$f_{rp}(C_p) = k_{rp} \frac{C_p}{C_p^o}, k_{rp} = 55 \text{ PgC/y} \quad (15)$$

$$f_l(C_p) = k_l \frac{C_p}{C_p^o}, k_l = 55 \text{ PgC/y} \quad (16)$$

$$f_{rs}(C_s) = k_{rs} \frac{C_s}{C_s^o}, k_{rs} = 55 \text{ PgC/y}, C_s^o = 1,500 \text{ PgC} \quad (17)$$

$$f_t(C_s) = k_t \frac{C_s}{C_s^o}, k_t = 0.8 \text{ PgC/y} \quad (18)$$

$$f_a(C_a, C_{so}) = k_{ao}[p_a(C_a) - p_a^*(C_a, C_{so})] \quad (19)$$

$$k_{ao} = 0.278 \text{ PgC/(y ppm)}$$

$$p_a^*(C_a, C_{so}) = 280 \text{ (ppm/mM)} K_{CO_2} \frac{[\text{HCO}_3^-]^2}{[\text{CO}_3^{2-}]} \quad (20)$$

$$K_{CO_2} = 0.0255 + 0.0019 T_g(C_a) \quad (21)$$

$$[\text{HCO}_3^-] = \frac{[\text{CO}_2]_i - \sqrt{[\text{CO}_2]_i^2 - A_T(2[\text{CO}_2]_i - A_T)(1 - 4K_{CO_3^{2-}})}}}{1 - 4K_{CO_3^{2-}}} \quad (22)$$

$$K_{CO_3^{2-}} = 0.000545 + 0.000006 T_g(C_a) \quad (23)$$

$$[\text{CO}_2]_i = \frac{C_{so}}{(12 \text{ gC/mol})(36.2 \text{ PkL})} \quad (24)$$

$$[\text{CO}_3^{2-}] = \frac{A_T - [\text{HCO}_3^-]}{2} \quad (25)$$

$$f_{dw}(C_{so}) = k_{dw} \frac{C_{so}}{C_{so}^o}, k_{dw} = 90.1 \text{ PgC/y}, C_{so}^o = 890 \text{ PgC} \quad (26)$$

$$f_{up}(C_{do}) = k_{up} \frac{C_{do}}{C_{do}^o}, k_{up} = 90 \text{ PgC/y}, C_{do}^o = 38,000 \text{ PgC} \quad (27)$$

$$f_s(C_{do}) = k_s \frac{C_{do}}{C_{do}^o}, k_s = 0.1 \text{ PgC/y} \quad (28)$$

$$f_d(h, s, C_p, A_v) = \left[h(t) - \int_0^t s(t-\tau) g(\tau) d\tau \right] \frac{A_v}{C_p} \quad (29)$$

$$g(t) = (1 - e^{-kt})^p \quad (30)$$

$$p = \frac{1}{1 - \alpha} \quad (31)$$

$$k = \frac{k_p}{p C_p^o} \quad (32)$$

매개변수들의 정의는 다음과 같다[14].

η_C = factor of CO₂ effect on photosynthesis

η_T = factor of temperature effect on photosynthesis

p_a = concentration of CO₂ in the atmosphere, ppm

p_a^* = equilibrium concentration of CO₂ in the atmosphere, ppm

T_g = global temperature, °C

A_T = total alkalinity of seawater, 2.222 mM [17]

g = Chapman-Richards growth function [18]

위에서 식 (11)-(14), (17), (19)-(28)은 GLOBE 모델[12,13], 식 (10), (18), (30)-(32)는 GLOBE+ 모델[14]에 속하며, 식 (15), (16), (29)는 이후에 제안되었다[5,6]. 또한 도 기호로 표시된 기준 값들과 속도상수들은 모두 GLOBE 모델[12,13]에 속하며, 약 1750년, 즉 산업혁명 직전의 추정치에 해당한다[14]. 탄소순환 동역학은 주어진 초기값들로부터 식 (1)-(7)을 적분함으로써 예측할 수 있다. 단, 지구온도는 본 모델이 에너지수지는 다루지 않고 질량수지에만 기반을 두고 있으므로 대기 CO₂ 농도와의 관계식 (14)로 추정한다.

본 연구에서는 문제풀이 도구로 MATLAB을 사용한다. 상미분 방정식 (1)-(7)은 5차 Runge-Kutta 방법을 쓰는 ode45 [19] 도구를 이용해서 수치적으로 푼다. 이때 상대허용오차는 10⁻⁶, 절대허용오차는 10⁻⁸을 적용한다. 풀이 중 식 (29)의 convolution integral은 global adaptive quadrature 방법을 이용하는 integral [20] 함수를 써서 계산한다.

3. 모델검증

산업혁명 이후 화석연료사용 및 삼림파괴 결과를 재현해보자. 1750년 이후 이산화탄소 배출량[21]과 전체 숲 면적[22] 데이터를 표준화한 후 Fig. 2에 각각 검정색 및 초록색 점들로 표시했다. 이 데이터를 탄소순환 모델에 입력해서 대기 CO₂ 농도와 지구평균기온의 변화를 예측하려고 한다. 측정된 대기 CO₂ 농도[21]와 지구평균기온[23]은 Fig. 2에 각각 빨간색 및 오렌지색 점들로 표시했다. 단, 지구평균기온은 1880년 이후 측정치를 1750년부터 1900년까지 0.3 °C 상승했다는 추정[24]을 반영해서 조절한 결과다. 제안된 모델은 원래 숲 면적이 아니라 벌채 및 식림 데이터를 요구한다. 삼림파괴는 대부분 벌채 때문이므로 다음과 같은 식을 제안한다.

$$h = \frac{f_d C_p}{A_v}, s = 0 \tag{33}$$

여기서 f_d 는 측정된 A_v 데이터로부터 식 (7), 즉 $f_d = -\dot{A}_v$ 로 계산하고, 식 (29)-(32)는 사용하지 않는다. 또한 채취된 탄소는 GLOBE 모델[12,13]에서 제안된 바와 같이 대기와 땅으로 절반씩 이동한다고 가정한다.

$$u_b = u_l = \frac{h}{2}, u_p = 0 \tag{34}$$

시뮬레이션 결과는 Fig. 2에 파선, 실선, 쇄선으로 나타내었다. GLOBE+ 모델식 (10)에 $\alpha = 0, 2/3, 1$ 을 적용한 결과로서 $\alpha = 0$ 은 GLOBE, $\alpha = 1$ 은 개념적으로 옛 모델[9]에 해당한다. 각 그래프는 범례의 공식에 따라 표준화한 결과로서, 파란색은 대기, 갈색은 식물, 금색은 토양, 남색은 표면해수, 보라색은 심해의 탄소 질량을 나타낸다. 파란색 실선과 빨간색 점들이 매치됨에 따라 $\alpha = 2/3$ 를

사용하는 GLOBE+ 모델의 유효성이 검증되었다.

4. 사례연구

대기 중 이산화탄소의 증가는 화석연료사용뿐 아니라 삼림파괴의 영향도 크다. 벌채에 의해 숲 면적이 10% 감소했다고 가정하자 ($\Delta A_v = -0.1$). 벌채는 다음과 같이 순간적으로 이루어지는 것으로 모델링한다.

$$h = -\Delta A_v C_p(0)\delta(t) \tag{35}$$

벤 나무는 모두 제품으로 보존한다고 가정한다.

$$u_b = u_l = 0, u_p = h \tag{36}$$

이 경우 탄소순환 시뮬레이션 결과는 Fig. 3과 같다. 실선은 벌채하지 않을 경우, 파선은 단순벌채($s = 0$), 쇄선은 벌채 후 벤 나무 그루수만큼 묘목을 심을 경우($s = h$), 점선은 나무 한 그루 벨 때마다 두 그루의 묘목을 심을 경우($s = 2h$)의 결과를 나타낸다. 숲 면적이 10% 계단감소하면 대기 중 이산화탄소는 약 20년 후 최대 5.9% 증가했다가 이후 서서히 감소한다. 벌채 후 즉시 재식림하면 숲 면적은 벌채된 면적의 90%를 회복($A_v = 0.99$)하는 데 약 50년 걸릴 것으로 예상된다. 대기 중 이산화탄소는 15년 후 최대 5.1% 증가했다가 감소해서 50년 뒤 때 초기상태를 회복하며, 100년이 되면 1.2% 감소상태가 된다. 벌채 직후 2배 식림하는 경우 숲 면적은 24년 후 초기상태를 회복하며 궁극적으로 10% 늘게 된다. 대기 중 이산화탄소는 13년 후 최대 4.7% 증가했다가 감소해서 31년 되면 초기상태를 회복하고 90년이 되면 6.0% 감소한 최저상태가 되며, 이후 심해의 영향으로 매우 느리게 조금씩 증가한다.

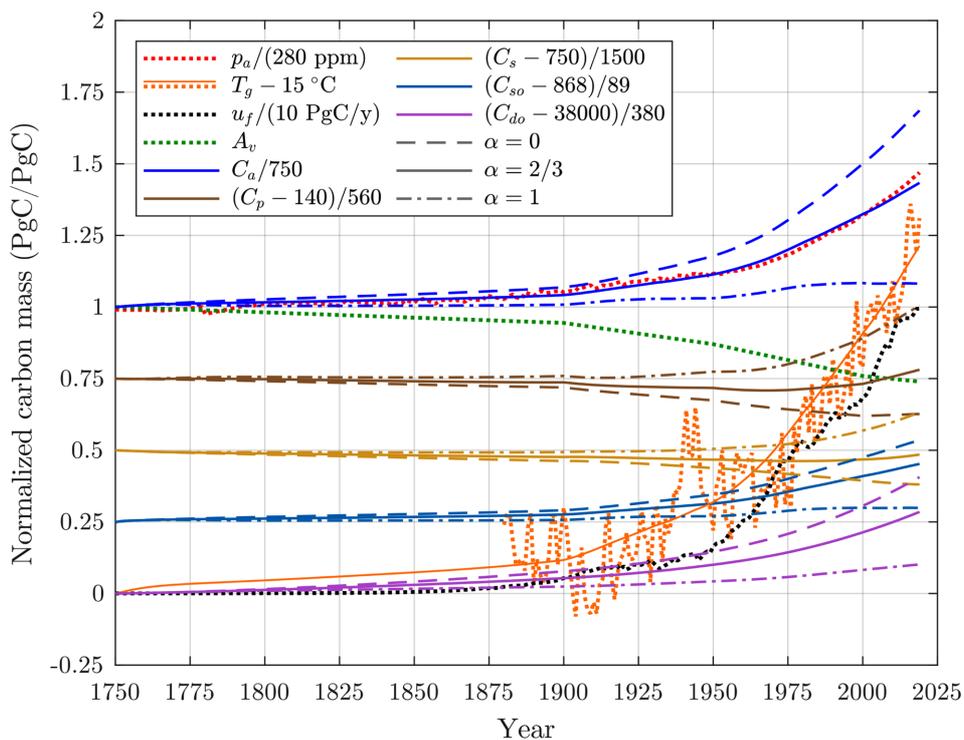


Fig. 2. Predicted (solid) and measured (dotted) impacts of fossil fuel combustion (black) and deforestation (green).

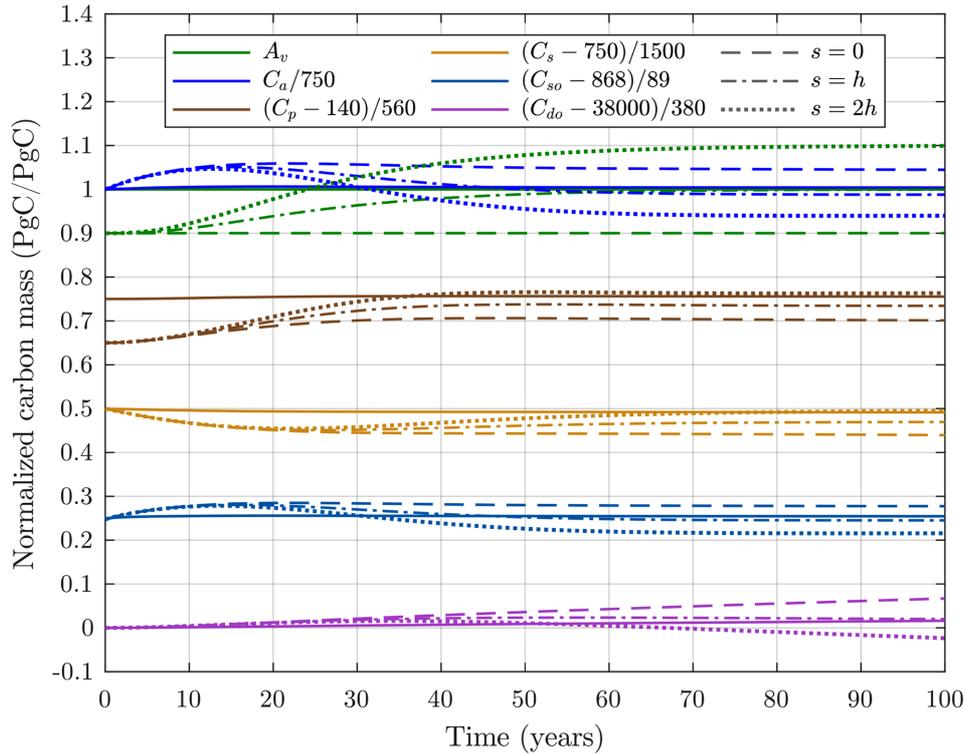


Fig. 3. Predicted carbon cycle impacts of 10% deforestation ($s = 0$), reforestation ($s = h$), and afforestation ($s = 2h$).

5. 결 론

지구온난화의 주원인은 여전히 불명확하지만 GLOBE+ 모델을 사용하면 인간의 탄소배출에 의한 대기 CO₂ 농도와 지구평균기온의 상승을 어느정도 정확하게 예측할 수 있음을 확인했다. 이 모델은 현재 전 세계가 추구하고 있는 탄소중립 달성을 위한 각종 정책 및 프로젝트의 영향평가에 활용할 수 있을 것으로 예상된다. 사례 연구로는 현재 전 세계가 우려하고 있는 삼림파괴 문제를 다루었다. 숲 면적이 10% 줄면 대기 CO₂는 최대 6% 증가하고, 반대로 10% 늘면 대기 CO₂는 장기적으로 6% 감소할 것으로 예측되었다. 벌채 후 재식림에 의한 초기농도 회복은 매우 느리다. 따라서 벌채는 탄소배출로 간주해야 한다. 제안된 모델은 향후 에너지수지가 추가되면 기후제어 시뮬레이션에 활용할 수 있을 것으로 기대된다. 이를 통해 지구온난화 및 기후변화를 완화시키기 위해 제안되고 있는 각종 기술들에 대해 엄밀한 영향평가를 수행함으로써 기후공학의 안전성을 검증해야 한다. 인간이 기후를 바꾸려고 시도하면 폰노이만 [25]이 경고한 대로 “꽤 환상적인 효과”를 거둘 수 있기 때문이다.

감 사

본 논문은 UCLA의 Vasilios I. Manousiouthakis 교수와의 공동연구에 기초한 추가연구 결과로서 전북대학교에서 지원하였습니다.

References

- Wallach, O., “Race to Net Zero: Carbon Neutral Goals by Country,” [https://www.visualcapitalist.com/race-to-net-zero-carbon-](https://www.visualcapitalist.com/race-to-net-zero-carbon-neutral-goals-by-country/)
- Wikipedia, “Carbon Neutrality,” https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_neutrality (2021).
- UNFCCC, “The Paris Agreement,” <https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement> (2021).
- Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Höglberg, P., Linder, S., Mackenzie, F. T., Moore III, B., Pedersen, T., Rosenthal, Y., Seitzinger, S., Smetacek, V. and Steffen, W., “The Global Carbon Cycle: A Test of Our Knowledge of Earth as a System,” *Science*, **290**(5490), 291-296(2000).
- Manousiouthakis, V. I. and Choi, S. H., “A Carbon Cycle Optimization Method for Fossil and Biomass Energy Utilization,” *Korean J. Chem. Eng.*, **38**(10), 2003-2008(2021).
- Choi, S. H., “A Mathematical Programming Method for Minimization of Carbon Debt of Bioenergy,” *Clean Technol.*, **27**(3), 269-274(2021).
- Wikipedia, “Paleocene-Eocene Thermal Maximum,” https://en.wikipedia.org/wiki/Paleocene%E2%80%93Eocene_Thermal_Maximum (2021).
- NOAA, “Ocean Acidification,” <https://www.noaa.gov/education/resource-collections/ocean-coasts/ocean-acidification> (2020).
- Eriksson, E. and Welanders, P., “On a Mathematical Model of the Carbon Cycle in Nature,” *Tellus*, **8**(2), 155-175(1956).
- Gowdy, C. M., Mulholland, R. J., and Emanuel, W. R., “Modeling the Global Carbon Cycle,” *Int. J. Syst. Sci.*, **6**(10), 965-976 (1975).
- Kamiuto, K., “A Simple Global Carbon-cycle Model,” *Energy*, **19**(8), 825-829(1994).
- Sallade, S., Ollinger, S., Albrechtova, J., Martin, M., Gengarely,

- L., Schloss, A., Bourgeault, J., Freuder, R., Lhoptakova, Z., Randolph, G., Semorakova, B., Wicklein, H., and Donahue, K., "GLOBE Carbon Cycle;" http://globecarboncycle.unh.edu/DownloadActivities/Model/GlobalCarbonCycleModeling_Feedbacks.zip (2012).
13. GLOBE, "GLOBE Program's Work;" <https://exchange.iseesystems.com/directory/globeprogram> (2017).
 14. Choi, S. H. and Manousiouthakis, V. I., "On the Carbon Cycle Impact of Combustion of Harvested Plant Biomass vs. Fossil Carbon Resources;" *Computers & Chem. Eng.*, **140**, 106942(2020).
 15. IPCC, "The Intergovernmental Panel on Climate Change;" <https://www.ipcc.ch/> (2021).
 16. Ollila, A., "Anthropogenic Carbon Dioxide (CO₂) Amounts and Fluxes between the Atmosphere, the Ocean, and the Biosphere;" *Physical Science International Journal*, **8**(1), 1-17(2015).
 17. Sauvage, J., Spivacka, A. J., Murray, R. W. and D'Hondt, S., "Determination of in Situ Dissolved Inorganic Carbon Concentration and Alkalinity for Marine Sedimentary Porewater;" *Chemical Geology*, **387**, 66-73(2014).
 18. Pommerening, A. and Muszta, A., "Relative Plant Growth Revisited: Towards a Mathematical Standardisation of Separate Approaches;" *Ecological Modelling*, **320**, 383-392(2016).
 19. Mathworks, "Ode45;" <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html> (2021).
 20. Mathworks, "Integral;" <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/integral.html> (2021).
 21. Ritchie, H., Roser, M. and Rosado, P., "CO₂ and Greenhouse Gas Emissions;" *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/co2-and-other-greenhouse-gas-emissions> (2020).
 22. Ritchie, H., "The World Has Lost One-third of Its Forest, But an End of Deforestation is Possible;" *Our World in Data*, <https://ourworldindata.org/world-lost-one-third-forests> (2021).
 23. NOAA National Centers for Environmental Information, "Climate at a Glance: Global Time Series;" <https://www.ncdc.noaa.gov/cag/global/time-series> (2021).
 24. Arctic News, "Pre-industrial;" <https://arctic-news.blogspot.com/p/pre-industrial.html> (2021).
 25. Von Neumann, J., "Can We Survive Technology?;" *John von Neumann Collected Works*, ed. A. Taub, **6**, 504-519(1955).

Authors

Soo Hyoung Choi: Professor, Division of Chemical Engineering, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Korea; soochoi@jbnu.ac.kr