Clean Technol., Vol. 27, No. 3, September 2021, pp. 269-274

청정에너지기술

바이오에너지의 탄소부채 최소화를 위한 수학적 계획법

최수형*

전북대학교 화학공학부
54896 전북 전주시 덕진구 백제대로 567

(2021년 7월 28일 접수; 2021년 8월 23일 수정본 접수; 2021년 8월 23일 채택)

A Mathematical Programming Method for Minimization of Carbon Debt of Bioenergy

Soo Hyoung Choi*

Division of Chemical Engineering, Jeonbuk National University
567 Baekje-Daero Deokjin-Gu, Jeonju, 54896, Korea

(Received for review July 28, 2021; Revision received August 23, 2021; Accepted August 23, 2021)

요 약

바이오에너지는 탄소중립을 추구하는 방안 중 하나로 간주되고 있다. 그러나 수확된 식물 바이오매스를 연소하면 필연적으로 대기 중 이산화탄소는 일정기간 동안 화석을 연소할 때보다 더 많아진다. 본 논문에서는 이 탄소부채의 총량과 상환기간을 예측하고 최소화하는 방법을 제안한다. 사례연구로는 현재 사용되고 있는 화석연료를 바이오매스로 일시에 전환할 경우에 대한 탄소순환 영향평가를 수행한다. 이를 통해 탄소중립 개념의 근본적인 취약성을 지적한다. 바이오에너지의 지속가능성을 위한 실행방안으로는 숲 면적 감소분에 비례하는 추가식림 및 숲 질량 증가분에 비례하는 추가수확 공식을 제안하였다. 최적화 결과, 탄소부채 상환기간은 약 70년, 대기 중 이산화탄소는 최대 50% 이상, 정상상태에서 3% 증가가 예상된다. 이는 이론적으로 예측한 최상의 결과이며 실제로는 이보다 나쁠 것으로 추정된다. 따라서 바이오매스는 진정으로 탄소 중립적이지 않으며, 화석연료의 대체에너지원으로서 부적합하다. 본 연구에서 제안된 방법은 이미 사용 중인 바이오에너지의 현재 및 미래 탄소부채 최소화를 통해 탄소중립으로의 접근에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

주제어 : 바이오에너지, 탄소부채, 탄소순환, 탄소중립, 최적화

Abstract : Bioenergy is generally considered to be one of the options for pursuing carbon neutrality. However, for a period of time, combustion of harvested plant biomass inevitably causes more carbon dioxide in the atmosphere than combustion of fossil fuels. This paper proposes a method that predicts and minimizes the total amount and payback period of this carbon debt. As a case study, a carbon cycle impact assessment was performed for immediate switching of the currently used fossil fuels to biomass. This work points out a fundamental vulnerability in the concept of carbon neutrality. As an action plan for the sustainability of bioenergy, formulas for afforestation proportional to the decrease in the forest area and surplus harvest proportional to the increase in the forest mass are proposed. The results of optimization indicate that the carbon debt payback period is about 70 years, and the carbon dioxide in the atmosphere increases by more than 50% at a maximum and 3% at a steady state. These are theoretically predicted best results, which are expected to be worse in reality. Therefore, biomass is not truly carbon neutral, and it is inappropriate as an energy source alternative to fossil fuels. The method proposed in this work is expected to be able to contribute to the approach to carbon neutrality by minimizing present and future carbon debt of the bioenergy that is already in use.

Keywords : Bioenergy, Carbon debt, Carbon cycle, Carbon neutrality, Optimization

* To whom correspondence should be addressed.
E-mail: soochoi@jbnu.ac.kr; Tel: +82-63-270-2432; Fax: +82-63-270-2306

doi: 10.7464/ksct.2021.27.3.269 pISSN 1598-9712 eISSN 2288-0690

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licences/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

탄소중립이 전 세계적으로 시급한 과제가 되었다. 이는 이산화탄소 배출 및 포집의 균형을 이루어 순수 배출량을 0으로 만드는 것이다[1]. 화학산업은 탄소 포집 및 활용(CCU), 에너지원 및 원료 대체를 통해 배출을 줄이고 있다[2]. 탄소중립을 달성하기 위해서는 이러한 노력을 더욱 강화해야 한다. 탄소중립의 궁극적인 목표는 대기 중 온실가스를 적정수준으로 유지하는 것이다. 따라서 탄소중립의 영향을 정확하게 평가하려면 지구를 탄소순환 시스템으로 보아야 한다[3]. Yi et al. [4]은 석탄기반 화학산업의 탄소순환을 검토하고 재생에너지를 이용하는 이산화탄소 변환을 제안하였다. Kätelhön et al. [5]은 탄소 포집 및 활용을 통한 기후변화 완화를 평가하기 위하여 제품사용주기를 분석하였다. Gabrielli et al. [6]은 바이오매스 사용을 포함한 탄소중립 화학산업 달성방안을 검토하였다. González-Garay et al. [7]은 공정시스템공학(PSE) 및 전주기 분석(LCA)에 기초를 둔 태양광 기반 탄소중립 화학산업으로의 접근법을 제안하였다. 그러나 이들 연구는 우리의 목표, 즉 대기 중 이산화탄소의 적정 정상상태 수준을 얼마나 빨리 달성할 수 있는지는 말하지 않는다.

2015년에 체결된 파리협약에 의하면 2100년까지의 지구평균기온 상승을 산업혁명 이전보다 1.5 ℃ 높은 수준으로 제한하는 것을 목표로 온실가스 배출을 빠르게 줄여서 2050년부터는 포집과 균형을 맞추어야 한다[8]. UN (United Nations) 산하기관인 IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)는 자료와 지침이 포함된 평가보고서를 발행함으로써 이 프로젝트를 선도하고 있다[9]. NASA (National Aeronautics and Space Administration) 또한 기후 문제를 적극적으로 다루고 있다[10]. 특히 교육목적으로 GLOBE (Global Learning and Observations to Benefit the Environment) 프로그램을 지원하고 있다[11]. 이 프로그램 내 프로젝트 중 하나로 탄소순환 모델이 제공되었다[12]. 현재 인터넷 상에서 온라인 시연이 가능하다[13]. 파리협약을 추구하려면 탄소순환 해석이 필수적이다. 따라서 이 모델을 개선한 GLOBE+ 모델을 발표한 바 있다[14].

기후변화 완화에 기여하기 위한 하나의 접근법으로서, 많은 석탄 화력발전소가, 특히 유럽에서, 목재펠릿을 대체연료로 채택하고 있다[15]. 목질 바이오매스는 일반적으로 청정 재생에너지원으로 간주된다. 그러나 온실가스 배출을 줄이는 데 효과적인지는 의문이다[16]. 가장 중요한 점은 삼림벌채가 불가피하다는 것으로서 심각한 우려를 불러일으키고 있다[15]. 잠재적인 해법으로 석탄 및 바이오매스 동시연소 기술도 연구되고 있다[17]. 그러나 지속가능성은 지구전체의 탄소순환이 정상상태에 이를 수 있을 경우에만 달성된다. 따라서 궁극적으로는 모든 화석연료를 활성적으로 순환되는 탄소의 총량을 증가시키지 않는 에너지원으로 대체해야 한다. 목재펠릿은 이 필요조건을 만족시킨다. 그러나 파리협약은 만족시키기 훨씬 더 어려운 충분조건이다.

수확된 식물 바이오매스는 흔히 그 탄소는 원래 대기 중에 있던 것이므로 연소하더라도 탄소중립이라고 말한다. 그러나 수확 후 연소하지 않고 보존한다면 기술적으로는 음의 탄소배출이 된다. 마치 탄소 포집 및 저장(CCS)처럼 순환탄소 총량을 감소시키기 때문이다. 따라서 탄소중립은 삼림벌채를 장려하는 오해의 소지가 있는 개념이 될 수 있다. 환경 관점에서 보면 목재를 태우는 것은 나무를 베고 석탄을 때는 것과 같다[14]. 한편 화석연료는 양의 탄소배출로 순환탄소 총량을 증가시키지만, 증가된 이산화탄소는 숲 성장에 도움을 준다[18]. 바이오매스를 연소하면 오랜 기간 동안 화석을 연소할 때보다 대기 중 이산화탄소가 더 증가하는 탄소부채가 발생한다[14]. 본 연구에서는 현재 사용되고 있는 화석연료를 일시에 전부 바이오에너지로 대체할 경우 감당해야 할 탄소부채의 규모와 상환기간을 예측하고 이들을 최소화하는 방안을 찾고자 한다.

2. 수학적 모델링 및 프로그래밍

2.1. 탄소순환모델

수확된 식물 바이오매스를 연료로 사용하면 대기 중 이산화탄소는 필연적으로 일정기간동안 화석연료를 사용할 때보다 많아진다. 이 기간을 탄소부채 상환기간(y)이라 하고, 초과된 이산화탄소 질량을 해당기간 동안 적분한 값을 탄소부채 총량(PgC y)이라 정의하자. 이들을 정확히 예측하려면 지구전체의 탄소순환모델이 필요하다. 본 연구에서는 GLOBE+ [14] 모델을 사용하되 바이오매스 채취 및 연소에 비교적 민감하게 영향을 받는 대기, 식물, 토양, 대양표면 영역만을 고려한다. 심해와 암석층은 상대적으로 훨씬 느린 천년단위의 시간척도로 변화한다[3]. 따라서 바이오에너지의 탄소부채 최소화 문제는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\min_{h,s} \int_0^{\infty} \max\left[C_a(t) - \underline{C}_a(t),\, 0\right] dt$$

subject to

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

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

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

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

$$\dot{A}_v = \left[\int_0^t s(t-\tau)\,\dot{g}(\tau)\,d\tau - h(t)\right]\frac{A_v}{C_p} \quad (5)$$

$$\dot{\underline{C}}_a = f_{rp}(\underline{C}_p) + f_{rs}(\underline{C}_s) - f_p(\underline{C}_a, \underline{C}_p, 1) - f_a(\underline{C}_a, \underline{C}_{so}) + q \quad (6)$$

$$\dot{\underline{C}}_p = f_p(\underline{C}_a, \underline{C}_p, 1) - f_{rp}(\underline{C}_p) - f_l(\underline{C}_p) \quad (7)$$

$$\dot{\underline{C}}_s = f_l(\underline{C}_p) - f_{rs}(\underline{C}_s) - f_t(\underline{C}_s) \quad (8)$$

$$\dot{\underline{C}}_{so} = f_a(\underline{C}_a, \underline{C}_{so}) + f_t(\underline{C}_s) \quad (9)$$

$$0 \le q \le h \le s \quad (10)$$

각 변수 및 함수의 정의는 다음과 같다.

C_a = mass of carbon in the atmosphere ($=\underline{C}_a$ if $h=s=0$), PgC

C_p = mass of carbon in plants ($=\underline{C}_p$ if $h=s=0$), PgC

C_s = mass of carbon in soils ($=\underline{C}_s$ if $h=s=0$), PgC

C_{so} = mass of carbon in the surface ocean ($=\underline{C}_{so}$ if $h=s=0$), PgC

A_v = normalized vegetated land area

f_p = rate of photosynthesis, PgC y^{-1}

f_{rp} = rate of plant respiration, PgC y^{-1}

f_l = rate of litterfall, PgC y^{-1}

f_{rs} = rate of soil respiration, PgC y^{-1}

f_t = rate of transfer from soils to the surface ocean by the river flow, PgC y^{-1}

f_a = net rate of absorption from the atmosphere to the surface ocean, PgC y^{-1}

q = rate of fuel combustion, PgC y^{-1}

h = rate of plant harvesting, PgC y^{-1}

s = target rate of biomass production when planting seedlings, PgC y^{-1}

g = normalized tree mass growth function ($g(0)=0,\ g(\infty)=1$)

탄소유량함수 및 매개변수 모델식들은 다음과 같다[12-14].

$$f_p(C_a,C_p,A_v)=k_p\eta_C(C_a)\eta_T(C_a)\left(\frac{C_p}{C_p^\circ}\right)^{\alpha}\left(\frac{A_v}{A_v^\circ}\right)^{1-\alpha} \quad (11)$$
$$k_p=110\ \text{PgC y}^{-1},\ C_p^\circ=560\ \text{PgC},\ A_v^\circ=1$$

$$\eta_C(C_a)=1.5\frac{p_a(C_a)-40}{p_a(C_a)+80} \quad (12)$$

$$p_a(C_a)=\frac{280\ \text{ppm}}{750\ \text{PgC}}C_a \quad (13)$$

$$\eta_T(C_a)=\frac{[60-T_g(C_a)]\,[T_g(C_a)+15]}{1350} \quad (14)$$

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

$$f_{rp}(C_p)=k_{rp}\frac{C_p}{C_p^\circ},\ k_{rp}=55\ \text{PgC y}^{-1} \quad (16)$$

$$f_l(C_p)=k_l\frac{C_p}{C_p^\circ},\ k_l=55\ \text{PgC y}^{-1} \quad (17)$$

$$f_{rs}(C_s)=k_{rs}\frac{C_s}{C_s^\circ},\ k_{rs}=55\ \text{PgC y}^{-1},\ C_s^\circ=1500\ \text{PgC} \quad (18)$$

$$f_t(C_s)=k_t\frac{C_s}{C_s^\circ},\ k_t=0.8\ \text{PgC y}^{-1} \quad (19)$$

$$f_a(C_a,C_{so})=k_{ao}[p_a(C_a)-p_a^*(C_a,C_{so})],\ k_{ao}=0.278\ \text{PgC y}^{-1}\,\text{ppm}^{-1} \quad (20)$$

$$p_a^*(C_a,C_{so})=280(\text{ppm mM}^{-1})K_{CO_2}\frac{[HCO_3^-]^2}{[CO_3^{2-}]} \quad (21)$$

$$K_{CO_2}=0.0255+0.0019T_g(C_a) \quad (22)$$

$$[HCO_3^-]=\frac{[CO_2]_i-\sqrt{[CO_2]_i^2-A_T(2[CO_2]_i-A_T)(1-4K_{CO_3^{2-}})}}{1-4K_{CO_3^{2-}}} \quad (23)$$

$$K_{CO_3^{2-}}=0.000545+0.000006T_g(C_a) \quad (24)$$

$$[CO_2]_i=\frac{C_{so}}{(12\ \text{g mol}^{-1})(36.2\ \text{PkL})} \quad (25)$$

$$[CO_3^{2-}]=\frac{A_T-[HCO_3^-]}{2} \quad (26)$$

매개변수들의 정의는 다음과 같다[14].

η_C = CO_2 effect factor on photosynthesis

η_T = temperature effect factor on photosynthesis

p_a = concentration of CO_2 in the atmosphere, ppm

p_a^* = equilibrium concentration of CO_2 in the atmosphere, ppm

T_g = global temperature, ℃

A_T = total alkalinity of seawater = 2.222 mM [19]

초기조건은 현재상태에서 탄소연소를 중단할 경우의 정상상태로 두는 것이 이상적이다. 본 연구에서는 이에 가까울 것으로 예상되는 산업혁명 이전상태를 사용한다[12].

$C_a(0)$ = 750 PgC, $C_p(0)$ = 560 PgC, $C_s(0)$ = 1500 PgC, $C_{so}(0)$ = 890 PgC, $A_v(0)$ = 1

식물질량 성장모델로는 Chapman-Richards growth function [20]을 채택하고 매개변수들은 광합성 모델과의 관계식으로부터 구한다[14].

$$g(t)=(1-e^{-kt})^p,\ p=\frac{1}{1-\alpha},\ k=\frac{k_p}{pC_p^\circ} \quad (27)$$

여기서 α는 Equation (11)의 매개변수로서 이론적으로는 $\alpha=2/3$, 실제 추정치는 $\alpha=0.732$이다[14]. 이는 탄소 포집 능력의 척도이므로 본 연구에서는 보수적인 이론값을 적용한다.

2.2. 사례연구

바이오에너지가 지속가능하려면 최소한 수확한 나무의 그루수만큼 묘목을 심어야 하며 탄소부채를 줄이려면 수확한 나무보다 많은 묘목을 심어야 한다. 본 연구에서는 현재 사용 중인 화석연료 전부를 일시에 바이오매스로 대체할 경우 예상되는 탄소부채의 규모를 확인하고 이를 최소화하는 식림방안을 찾고자 한다. 현재 전 세계의 화석연료 사용량은 약 10 PgC y^{-1}이며[14] 추가식림 가능 여유면적은 약 25%이다[21]. 따라서 다

음과 같은 최적화 문제를 제안한다.

$$\min_{\gamma,\eta} \int_0^{\infty} \max\left[C_a(t) - \underline{C}_a(t),\, 0\right] dt$$

subject to

$$\cdots \qquad (1)\text{-}(9)$$

$$h = q\left[1 + \eta \max(C_p / C_p(0) - 1,\, 0)\right],\ \eta \geq 0 \qquad (28)$$

$$s = h\left[1 + \gamma \max(1 - A_v,\, 0)\right],\ \gamma \geq 0 \qquad (29)$$

$$A_v \leq A_v^* \qquad (30)$$

여기서 $q = 10\ \mathrm{PgC\ y^{-1}}$, $A_v^* = 1.25$이다. 결정변수들은 다음과 같다.

γ = afforestation factor

η = surplus harvest factor

즉, $\gamma > 0$은 바이오매스 수확 후 묘목을 벌채된 나무의 그루 수만큼 외에도 숲 면적 감소율에 비례하여 더 심는 것을 뜻하며, $\eta > 0$은 바이오매스를 연료용 외에 제품용으로 숲 질량 증가율에 비례하여 추가로 수확하여 저장함을 의미한다.

본 연구에서 Equation (1) ~ (9)는 5차 Runge-Kutta 방법을 쓰는 MATLAB ode45 [22] 도구를 이용해서 수치적으로 푼다. 이 때 상대허용오차는 10^{-6}, 절대허용오차는 10^{-8}을 적용하였다. 풀이 중 Equation (5)의 convolution integral은 global adaptive quadrature 방법을 이용하는 MATLAB integral [23] 함수를 써서 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 식림계획

바이오매스 연료의 탄소부채를 줄이려면 벌채된 숲을 빨리 복원시켜야 한다. 또한 여유공간이 있으면 추가식림을 통해 숲을 늘려야 한다. 따라서 결정변수 중 γ는 클수록 좋을 것으로 예상된다. 이를 확인하기 위한 탄소순환 시뮬레이션 결과는 Figure 1 및 2와 같으며 주요수치들은 Table 1에 요약하였다. 그림에서 각 곡선은 범례에서 정의한 공식에 따라 표준화된 값을 나타낸다. 실선은 화석연료를 계속 사용하는 경우이다(case 0). 모든 영역에서 탄소가 시간에 따라 계속 증가함을 알 수 있다. 만약 화석연료를 전부 바이오매스로 대체하고 식림은 최소로만 한다면, 즉 $\gamma = 0$이면, 예측되는 결과는 Figure 1의 파선과 같다(case 1). 탄소부채 규모가 커서 상환은 214년 걸리고 숲 면적은 46% 줄어들 것으로 예상된다. 숲을 복원하려면 $\gamma > 0$이 필요하다. 예를 들어 $\gamma = 2$이면 결과는 Figure 1의 쇄선과 같다(case 2). 탄소부채가 약 1/4로 줄어들고 상환기간은 약 80년으로 예상된다. 숲 면적은 약 15% 증가할 것으로 예상된다. 만약 $\gamma = 4$이면 결과는 Figure 2의 파선과 같다(case 3). 탄소부채와 상환기간이 더 줄어들 것으로 예상되지만 숲 면적이 39% 증가해야 하므로 실행 불가능하다. 숲 면적이 25% 증가하는 조건

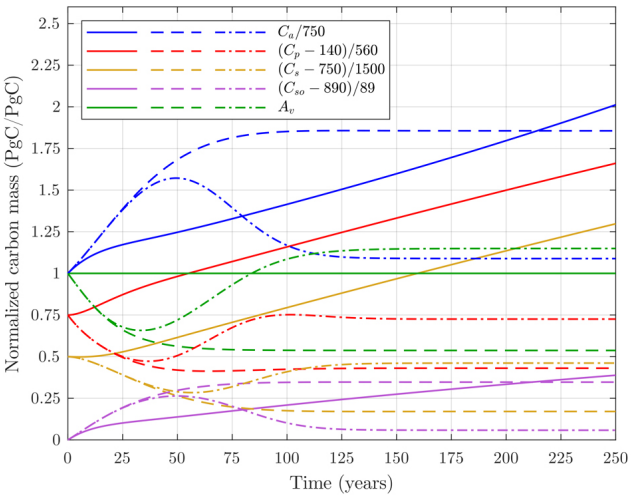

Figure 1. Carbon cycle predictions for cases 0 (solid), 1 (dashed), and 2 (dash-dotted).

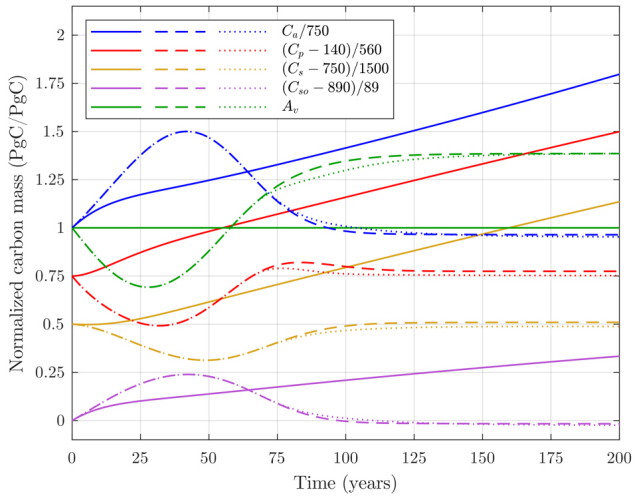

Figure 2. Carbon cycle predictions for cases 0 (solid), 3 (dashed), and 4 (dotted).

은 $\gamma = 2.81$이다(case 5). 이는 숲의 면적이 초기에 비해 35% 줄어들면 나무를 한 그루 벨 때마다 두 그루 심는 정책을 시행하는 것에 해당한다($1 + 2.81 \times 0.35 = 1.98$). 이 경우 예상되는 탄소부채 상환기간은 72년이다. 이 기간 동안 대기 중 이산화탄소는 최대 54% 증가하며, 이후 시간이 더 지나 정상상태가 되면 3% 증가수준이 지속된다.

3.2. 수확계획

숲에서 벤 나무를 연소시키지 않고 제품형태로 저장하면 일종의 탄소 포집 및 저장으로 볼 수 있다. 이를 근거로 일부에서는 목재활용을 환경친화정책으로 홍보하기도 한다. 이를 확인하기 위한 시뮬레이션 결과를 Figure 2에 파선(case 3)과 점선(case 4)으로 나타내었다. 실행가능 여부에 관계없이 결정변수 중 η는 탄소부채에 영향을 주지 못한다는 것을 Table 1에서 수치로 확인할 수 있다. 다만 $\eta > 0$이면 추가수확이 순환탄소 총량을 줄이기 때문에 궁극적으로는 대기 중 이산화탄소를 약간

Table 1. Results of simulation with selected values of decision variables

Case	γ	η	Carbon debt (PgC y)	Payback period (y)	$\frac{\max C_a}{C_a(0)}$	$\frac{C_a(\infty)}{C_a(0)}$	$\max A_v$	$A_v(\infty)$
0	-	-	0	0	∞	∞	1.000	1.000
1	0	0	45,035	214.1	1.857	1.856	1.000	0.537
2	2	0	11,363	79.59	1.572	1.089	1.149	1.149
3	4	0	7,643	64.12	1.500	0.964	1.385	1.385
4	4	4	7,643	64.12	1.500	0.947	1.393	1.393
5	2.81	0	9,398	71.56	1.537	1.030	1.250	1.250

줄일 수 있다. 이 역시 Table 1에서 확인할 수 있다. 그러나 이 때 숲의 면적도 미세하게 증가하므로 앞서 구한 $\gamma=2.81$ 조건에서는 실행 불가능하다. 따라서 탄소부채 최소화를 위해서는 $\eta=0$, 즉 벌채를 최소화하는 것이 최적조건이 된다.

4. 결 론

바이오에너지를 사용하면 필연적으로 발생하는 탄소부채를 예측하고 이를 최소화하는 수학적 계획법을 제안하였다. 지구탄소순환 모델에 기초를 두며 사례연구로는 현재 사용 중인 화석연료를 일시에 전부 바이오매스로 대체하는 문제를 다루었다. 만약 바이오매스 수확 후 같은 양에 해당하는 만큼만 재식림하면 탄소부채 청산은 200년 이상 걸리고 숲의 면적은 거의 절반으로 줄어들 것으로 예상된다. 따라서 추가식림이 필요하며, 본 연구에서는 숲 면적 감소율에 비례하는 모델을 제시하였다. 추가 숲 조성가능 여유공간을 최근 보고된 25%로 가정하고 최적화를 수행한 결과, 묘목은 기본 재식림 외에도 숲이 초기에 비해 35% 줄어들면 100% 추가로 심어야 한다는 결론을 얻었다. 이 경우 탄소부채 상환기간은 70년 정도로 예상된다. 대기 중 이산화탄소는 최대 50% 이상, 정상상태에서 3% 증가한다. 만약 광합성 모델 매개변수에 이론값 대신 실제 추정치를 적용하면 예측결과는 더 나빠진다. 따라서 바이오에너지는 엄밀하게 따지면 탄소 중립적이지 않으며, 사실상 청정에너지도, 재생에너지도 아니다. 한편 바이오매스의 수확은 최소화해야 하는 것으로 확인되었다. 숲 질량 증가율에 비례하는 추가수확 모델에 의하면 목재활용을 통한 탄소 포집 및 저장 효과는 먼 미래에 나타나며 그마저도 미미할 것으로 예상된다. 바이오매스는 화석연료의 바람직한 대체에너지원이 아니지만 이미 널리 사용되고 있다. 본 연구에서 제안된 방법은 기존 및 향후 탄소부채를 최소화함으로써 탄소중립 추구에 기여할 수 있을 것으로 예상된다.

감 사

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

References

1. Wikipedia, “Carbon neutrality,” https://en.wikipedia.org/wiki/Carbon_neutrality (2021).
2. Olah, G. A., Prakash, G. K. S., and Goeppert, A., “Anthropogenic Chemical Carbon Cycle for a Sustainable Future,” *J. Am. Chem. Soc.*, **133**(33), 12881-12898 (2011).
3. Falkowski, P., Scholes, R. J., Boyle, E., Canadell, J., Canfield, D., Elser, J., Gruber, N., Hibbard, K., Högberg, 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).
4. Yi, Q., Li, W., Feng, J., and Xie, K., “Carbon Cycle in Advanced Coal Chemical Engineering,” *Chem. Soc. Rev.*, **44**(15), 5409-5445 (2015).
5. Kätelhön, A., Meys, R., Deutz, S., Suh, S., and Bardow, A., “Climate Change Mitigation Potential of Carbon Capture and Utilization in the Chemical Industry,” *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, **116**(23), 11187-11194 (2019).
6. Gabrielli, P., Gazzani, M., and Mazzotti, M., “The Role of Carbon Capture and Utilization, Carbon Capture and Storage, and Biomass to Enable a Net-Zero-CO_2 Emissions Chemical Industry,” *Ind. Eng. Chem. Res.*, **59**(15), 7033-7045 (2020).
7. González-Garay, A., Mac Dowell, N., and Shah, N., “A Carbon Neutral Chemical Industry Powered by the Sun,” *Discov. Chem. Eng.*, **1**, 2 (2021).
8. UNFCCC, “The Paris Agreement,” https://unfccc.int/process-and-meetings/the-paris-agreement/the-paris-agreement (2021).
9. IPCC, “Reports,” https://www.ipcc.ch/reports/ (2021).
10. NASA, “Global Climate Change,” https://climate.nasa.gov/ (2021).
11. GLOBE, “The GLOBE Program,” https://www.globe.gov/ (2021).
12. Sallade, S., Ollinger, S., Albrechtova, J., Martin, M., Gengarelly, 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/globeprogam (2019).
14. Choi, S. H., and Manousiouthakis, V. I., “On the Carbon Cycle Impact of Combustion of Harvested Plant Biomass vs. Fossil Carbon Resources,” *Comput. Chem. Eng.*, **140**, 106942 (2020).
15. Beeler, C., and Morrison, J., “The UK’s move away from coal means they’re burning wood from the US,” https://www.pri.org/stories/2018-06-20/uk-s-move-away-coal-means-they-re-burning-wood-us (2018).
16. Bat’a, R., Fuka, J., Lešáková, P., and Heckenbergerová, J., “CO_2 Efficiency Break Points for Processes Associated to Wood and Coal Transport and Heating,” *Energies*, **12**(20), 3864 (2019).
17. Xu, Y., Yang, K., Zhou, J., and Zhao, G., “Coal-Biomass Co-Firing Power Generation Technology: Current Status, Challenges and Policy Implications,” *Sustainability*, **12**(9), 3692 (2020).
18. Zhu, Z., Piao, S., Myneni, R. B., Huang, M., Zeng, Z., Canadell, J. G., Ciais, P., Sitch, S., Friedlingstein, P., Arneth, A., Cao, C., Cheng, L., Kato, E., Koven, C., Li, Y., Lian, X., Liu, Y., Liu, R., Mao, J., Pan, Y., Peng, S., Peñuelas, J., Poulter, B., Pugh, T. A. M., Stocker, B. D., Viovy, N., Wang, X., Wang, Y., Xiao, Z., Yang, H., Zaehle, S., and Zeng, N., “Greening of the Earth and its Drivers,” *Nat. Clim. Chang.*, **6**(8), 791-796 (2016).
19. 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,” *Chem. Geol.*, **387**, 66-73 (2014).
20. Pommerening, A., and Muszta, A., “Relative Plant Growth Revisited: Towards a Mathematical Standardisation of Separate Approaches,” *Ecol. Modell.*, **320**, 383-392 (2016).
21. Bastin, J.-F., Finegold, Y., Garcia, C., Mollicone, D., Rezende, M., Routh, D., Zohner, C. M., and Crowther, T. W., “The Global Tree Restoration Potential,” *Science*, **365**(6448), 76-79 (2019).
22. Mathworks, “ode45,” https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/ode45.html (2021).
23. Mathworks, “integral,” https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/integral.html (2021).