

가스공급속도 및 광도조절을 이용한 담수미세조류 *Parachlorella* sp.의 바이오매스 생산성 향상

Improving Biomass Productivity of Freshwater microalga, *Parachlorella* sp. by Controlling Gas Supply Rate and Light Intensity in a Bubble Column Photobioreactor

김지훈¹, 임경준², 홍성주³, 장희수⁴, 장현진⁵, 윤석민², 이승환⁶, 이철균³, 이창수^{2*}
 Z-Hun Kim¹, Kyung Jun Yim², Seong-Joo Hong³, Huisoo Jang⁴, Hyun-Jin Jang⁵, Suk Min Yun²,
 Seung Hwan Lee⁶, Choul-Gyun Lee³, and Chang Soo Lee^{2*}

¹㈜휴에버그린팜, 인천광역시, 21447, 대한민국

²국립낙동강생물자원관 미생물연구실, 상주시, 37242, 대한민국

³인하대학교 생명공학과 & 산학융합 인터랙티브 바이오공정 혁신 교육연구단, 인천광역시, 22212, 대한민국

⁴인하대학교 산업과학기술연구소, 인천광역시, 22212, 대한민국

⁵제주대학교 식품영양학과, 제주시, 63243, 대한민국

⁶전남대학교 생물공학과, 광주광역시, 61186, 대한민국

¹Huevergreenpharm Inc., Incheon, 21447, Korea

²Microbial Research Department, Nakdonggang National Institute of Biological Resources, Sangju, 37242, Korea

³Department of Biological Engineering & Industry-Academia Interactive R&E Center for Bioprocess Innovation, Inha University, Incheon, 22212, Korea

⁴Industrial Science and Technology Research Institute, Inha University, Incheon, 22212, Korea

⁵Department of Food Science and Nutrition, Jeju National University, Jeju, Korea

⁶Department of Biotechnology and Bioengineering, Chonnam National University, Gwangju, 61186, Korea

(Received 10 May 2023, Revised 8 Jun 2023, Accepted 8 Aug 2023)

Abstract The objective of the present study was to improve the biomass productivity of newly isolated freshwater green microalga *Parachlorella* sp. This was accomplished by culture conditions optimization, including CO₂ concentration, superficial gas velocity, and light intensity, in 0.5 L bubble column photobioreactors. The supplied CO₂ concentration and gas velocity varied from 0.032% (air) to 10% and 0.02 m/s - 0.11 m/s, respectively, to evaluate their effects on growth kinetics. Next, to maximize the production rate of *Parachlorella* sp., a lumostatic operation based on a specific light uptake rate (q_e) was applied. From these results, the optimal CO₂ concentration in the supplied gas and the gas velocity were determined to be 5% and 0.064 m/s, respectively. For the lumostatic operation at 10.2 μmol/g/s, biomass productivity and photon yield showed significant increases of 83% and 66%, respectively, relative to cultures under constant light intensity. These results indicate that the biomass productivity of *Parachlorella* sp. can be improved by optimizing gas properties and light control as cell concentrations vary over time.

Keywords : *Parachlorella*, microalgae, CO₂ concentration, gas velocity, lumostatic operation

서 론

미세조류는 단세포 광합성 미생물로 바다, 강, 호

수, 연못 등의 다양한 수계환경에서 서식하고 있는 생물체이다. 미세조류는 육상식물에 비해 10배 이상 성장속도가 빨라 배가속도가 6시간에 이를 만큼 생

* Corresponding author
 Phone: +82-54-860-0840 Fax: +82-54-530-0849
 E-mail: cslee@nnibr.re.kr

This is an open-access journal distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>)

장성이 높다[1,2]. 또한 20만에서 80만종이 지구상에 서식하고 있어 생물 다양성이 풍부하여 생물자원으로서의 활용가능성이 무궁무진하다. 특히 담수미세조류는 해수중에 비해 생장성이 빠른 편이고 오염원 제거, 바이오에너지 생산 등에 직접 사용이 가능하고 염도와 관련된 공정을 크게 고려하지 않아도 된다. 이러한 장점으로 인해 담수미세조류는 바이오에너지 생산, 온실가스인 이산화탄소 저감, 폐수처리 공정, 건강기능성 식품 및 의약품 등 다양한 산업분야에 활용되고 있다[3-5].

미세조류의 산업적 활용성을 높이기 위해서는 생장성이 우수하고 유용물질의 생산이 가능한 종을 지속적으로 발굴할 필요가 있다. 또한 발굴된 미세조류의 생장특성을 이해한 최적 배양조건연구로 바이오매스와 목적 산물의 생산성 향상이 중요하다[6]. 예를 들어, 미세조류 광배양시 광합성에 적합한 생장온도범위를 설정하고 광합성의 환원력을 제공하는 광에너지를 효율적으로 공급해야 한다. 또한 적절한 농도의 이산화탄소가 포함된 가스를 배양액 내로 공급함으로써 기질인 무기탄소원을 제공하고 일정한 혼합을 유도해 투입되는 광에너지 대비 광합성 효율을 향상시켜야 한다. 특히 가스형태로 공급되는 이산화탄소와 광에너지의 경우 반응기내로 저장하기 어려운 특성에 기인하여 적절한 조절을 통한 공급이 반드시 필요하다[7,8].

미세조류를 광배양시 생장에 가장 큰 제한으로 작용하는 것은 광도이다. 미세조류의 색소는 광합성에 사용하지 못하는 광자도 흡수하여 반응기 내부에 광구배(light gradient)를 형성하고 광을 받는 반응기 표면에서만 알짜 광합성이 일어나 전체적인 생산성이 낮아지게 된다. 따라서 미세조류의 특성(생장속도, 세포 크기, 색소의 함량 등)에 기반한 효과적인 광공급 전략으로 목적 산물의 생산성 향상을 시도한 연구들이 보고된 바 있다.

이전 연구에서 담수 수계에서 신규 발굴한 녹조류인 *Parachlorella* sp.의 연구를 통해 생장의 우수성을 확인하였다. 또한 생리활성이 우수한 ω 계열의 불포화지방산(oleic acid, linoleic acid, and linolenic acid)을 높은 농도로 함유(전체 지방산 중 40%이상)하고 있는 것을 확인하였으며, 비생물학적 스트레스(abiotic stress)를 이용하여 고농도 지질 축적 유도에

대한 연구를 진행한 바 있다[9-11]. 본 연구에서는 *Parachlorella* sp.의 바이오매스 생산성을 높이기 위해 원통형 광생물반응기에서 이산화탄소의 농도와 가스공급속도에 대한 영향을 평가하였다. 또한 *Parachlorella* sp.의 생장성에 기반한 광에너지 조절법(루모스택 배양법)을 적용하여 고농도 배양을 달성하고 바이오매스 생산성을 높이고자 하였다.

재료 및 방법

1. 미세조류 균주 및 종균의 유지

본 연구에 사용된 미세조류는 생장성이 우수하고 다량의 불포화지방산을 함유하고 있는 담수 녹조류인 *Parachlorella* sp. FBCC180029를 이용하였으며, 국립낙동강생물자원관 생물자원은행 (Freshwater Bioresource Culture Collection; FBCC)에서 분양받아 사용하였다[9].

배양배지는 *Parachlorella* sp.의 고농도 배양을 위해 질소(N)와 인(P)성분이 강화된 BG11배지를 사용하였다[11]. 배지의 조성은 NaNO₃ 4.25 g/L, K₂HPO₄ 0.59 g/L, MgSO₄·7H₂O 0.075 g/L, CaCl₂·2H₂O 0.036 g/L, Citric acid 0.006 g/L, Ferric ammonium citrate 0.006 g/L, EDTA (disodium magnesium salt) 0.001 g/L, Na₂CO₃ 0.02 g/L, Trace-metal mix A5 (H₃BO₃ 2.86 g, MnCl₂·4H₂O 1.81 g, ZnSO₄·7H₂O 0.222 g, Na₂MoO₄·2H₂O 0.39 g, CuSO₄·5H₂O 0.079 g, Co(NO₃)₂·6H₂O 0.0494 g/L) 1 mL 121°C, 1.5기압에서 15분간 멸균한 뒤 사용하였다.

Parachlorella sp.의 종균배양은 250 mL Erlenmeyer 플라스크에 100 mL의 배양액을 넣고 진탕 배양기 (VS-8480SF, Vision Scientific Co., Ltd., Daejeon, Korea)를 이용하여 20°C의 온도에서 120 rpm으로 교반시키며 형광등을 이용해 50 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 광도로 24시간 빛을 공급해주어 배양하였다. 이후 미세조류를 0.5 L 기포탑 원통형 광생물반응기(bubble column photobioreactor; BC-PBR)를 이용하여 온도는 $22 \pm 1^\circ\text{C}$, 광도 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 를 조사하며 진행하였다. 폭기 조건은 공기와 이산화탄소를 혼합하여 5% 이산화탄소를 배양기 하단부로부터 0.1 vvm(gas volume per liquid volume per minute)로 연속적으로 공급하였다. 미세조류의 계대배양은 10일 간격으로 진행하여 미세조류가 대수성장기를 유지하도록 하였다.

2. 건조세포 농도 측정

Parachlorella sp.의 세포농도(gDCW/L)는 680 nm에서 분광광도계(Perkin Elmer, LAMBDA 465, Boston, USA)를 이용하여 흡광도를 측정한 뒤 세포농도와 흡광도의 상관관계를 이용하여 계산하였다(식(1)). 상세하게는 채취된 미세조류 배양액 샘플을 $1,500 \times g$ 에서 10분간 원심분리하였다. 상등액을 제거하고 남은 세포를 증류수를 이용하여 세척한 뒤 같은 조건에서 원심분리를 하였다. 세척된 미세조류 균체를 종이필터(Whatman filter)를 이용하여 여과한 후 80°C 건조기에서 5시간 건조시켰다. 건조된 종이필터를 데시케이터에서 30분간 보관하였다. 필터의 무게 변화를 이용하여 미세조류 농도를 측정하였다.

$$\text{Dry cell weight(g/L)} = 0.54OD_{680} - 0.87 \quad (R^2=0.99) \quad (1)$$

3. 이산화탄소 농도 및 가스공급속도의 영향

광생물반응기로 공급되는 이산화탄소의 농도와 가스공급속도에 따른 미세조류 성장성을 알아보고자 하였다. 실험에 사용된 이산화탄소의 농도를 0~10%로 공기와 혼합하여 0.5 L BC-PBR에 공급하였다. 이때 배양조건은 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 이었으며, 광의존적 성장(light-dependent growth)을 막기 위해 55W 형광등을 이용하여 $300 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$ 로 공급하였다. 가스공급속도는 0.1 vvm로 반응기 하단으로부터 지속적으로 공급하였다.

가스공급속도에 따른 미세조류의 성장성 평가를 위해 표면가스속도(superficial gas velocity)를 이용하였다. 표면 가스속도는 최저 0.021 m/s부터 최대 0.106 m/s까지 달리하였다. 배양조건은 이산화탄소 농도 실험과 동일조건에서 수행하였다. 표면 가스공급속도는 식(2)을 이용하여 계산하였다. $U_G(\text{m/s})$ 는 표면가스속도이고, $Q(\text{m}^3/\text{s})$ 는 가스공급속도이며, $A(\text{m}^2)$ 는 광생물반응기의 단면적을 나타낸다[12].

$$U_G = \frac{Q}{A} \quad (2)$$

4. 광조절변수(q_e)를 이용한 *Parachlorella* sp. 배양

Parachlorella sp.의 바이오매스 생산성 향상을 위

해 루모스탯 배양법(lumostatic operation)을 시험하였다. *Parachlorella* sp.의 광조절변수(specific light uptake rate; q_e)를 찾고자 0.5 L BC-PBR에서 광도 $100 \mu\text{mol/m}^2/\text{s}$, 온도 $22 \pm 1^\circ\text{C}$ 에서 5%이산화탄소가 포함된 공기를 0.1 vvm로 공급하며 배양하였다. 비성장속도(specific growth rate)가 감소되는 시점의 세포농도와 공급되는 광도값을 이용하여 *Parachlorella* sp.의 q_e 값을 아래의 식(3)을 이용하여 계산하였다. $I_1(\mu\text{mol/m}^2/\text{s})$ 는 반응기 표면에 공급되는 광도이며, $I_2(\mu\text{mol/m}^2/\text{s})$ 는 반응기내 미세조류 배양액을 투과 후의 광도이다. 반응기 표면적에 조사되는 광도는 반응기 표면에서 45° 마다 측정하여(총 8구역) 평균값을 이용하였다. $A(\text{m}^2)$ 는 반응기의 표면적이며, $V(\text{m}^3)$ 는 배양부피, $C(\text{g/m}^3)$ 는 미세조류의 농도이다[13].

$$q_e = \frac{(I_1 - I_2)A}{VC} \quad (3)$$

Parachlorella sp.의 배양시 공급된 광에너지와 공급된 광에너지를 통해 생산된 바이오매스의 광자 효율성(photon yield; $Y_{x/e}$)은 다음과 같은 식을 이용하여 계산하였다. 식(4)는 배양기간에 공급된 총 광자수 계산을 위한 관계식이다. $E(\mu\text{mol})$ 는 배양기간 동안 공급된 광자의 수이며, $C(\text{g/m}^3)$ 는 세포의 농도이고 $V(\text{m}^3)$ 는 배양부피, t_1 과 t_2 는 배양시간, q_e 는 비광자흡수속도이다.

$$\sum E = CV \int_{t_1}^{t_2} q_e(t) dt \quad (4)$$

따라서 공급된 광에너지로 생성된 *Parachlorella* sp. 바이오매스($Y_{x/e}$)는 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다. $E(\mu\text{mol})$ 는 배양기간 동안 공급된 광자의 수이며, $C_1(\text{g/m}^3)$ 와 $C_2(\text{g/m}^3)$ 은 세포의 농도이고 $V(\text{m}^3)$ 는 배양부피이다.

$$Y_{x/e} = \frac{V(C_2 - C_1)}{E} \quad (5)$$

결 과 및 고 찰

이산화탄소 농도에 따른 *Parachlorella* sp.의 성장성

미세조류를 광배양시 생합성에 필요한 탄소원은 배양액내에 공급되는 이산화탄소가 용해된 탄산염(HCO₃⁻)의 흡수를 통해 이뤄진다. 일반적으로 미세조류는 고등식물에 비해 넓은 농도 범위(≥20%)의 이산화탄소에서 생장이 가능한 것으로 알려져 있다. 그러나 일정수준 이상의 이산화탄소 농도에서는 광합성효율에 악영향을 미치게 되어 전체적인 균체 생산성을 낮추기 때문에 종마다 적절한 농도를 공급해주어야 한다[14].

g/L)을 보이는 반면, 0.5%이하의 낮은 농도와 12%이상의 높은 농도에서는 생장이 지체되는 것(≈0.65 g/L)으로 나타났다[15]. 낮은 농도에서는 배양액 내의 탄소원 기질의 부족으로 생장이 제한되는 것이고, 높은 농도의 이산화탄소로 인한 미세조류 성장성 저하는 엽록체(chloroplast)내 기질(stromal)의 산성화(acidification)로 인해 Calvin-Benson cycle에 관여하는 중요 효소들을 불활성화(inactivation)시키는 것으로 알려져 있다[14]. 따라서 미세조류 성장을 최대화 시키는 최소의 이산화탄소의 농도를 결정하여 공급해야 바이오매스 생산성을 높이고 배양에 투입되는 에너지와 자원의 효율성을 높일 수 있다.

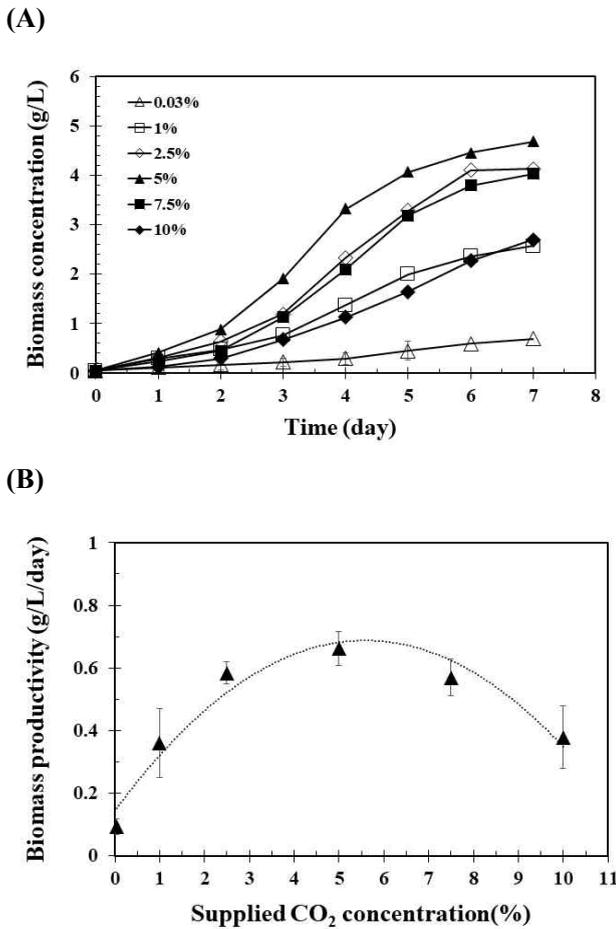


Figure 1. Biomass concentrations and (A) and productivities (B) of *Parachlorella* sp. cultured in 0.5 L bubble column photobioreactors as a function of supplied CO₂ concentration.

예를 들어, 해양 미세조류인 *Dunaliella* sp.는 5-10%이산화탄소 공급시 최대의 균체 생산성(≈3

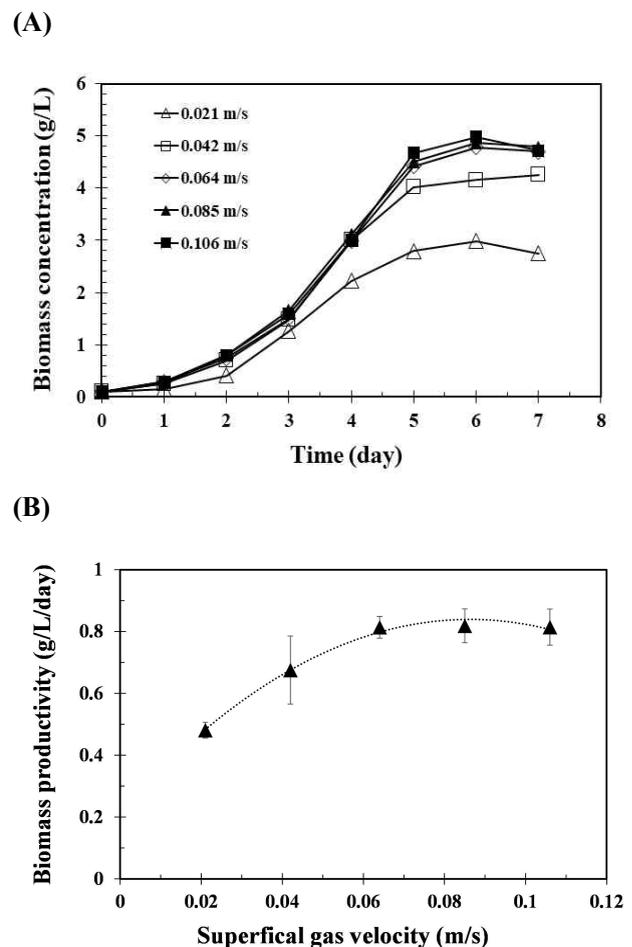


Figure 2. Biomass concentrations (A) and productivities (B) of *Parachlorella* sp. cultured in 0.5 L bubble column photobioreactors as a function of superficial gas velocity.

이산화탄소 농도에 따른 *Parachlorella* sp.의 성장

에 대한 영향을 시험하고자 0.5 L 광반응기에 0.032%부터 10%(v/v)의 이산화탄소를 공기와 혼합하여 0.1 vvm속도로 공급하고 성장속도를 분석하였다. Figure 1(A)에서 보는 것처럼, *Parachlorella* sp.는 이산화탄소 농도 5%까지는 비례적으로 성장 속도가 빨라지는 것으로 나타났으며, 그 이상의 농도에서는 바이오매스 생산성이 점차 감소하는 것으로 나타났다(Figure 1). 높은 이산화탄소 농도(>7.5%)에서도 높은 성장성은 연소가스 내의 높은 이산화탄소 제거에도 활용할 수 있을 것으로 판단된다[16]. 성장성과 이산화탄소 효율을 종합적으로 판단하였을 때, *Parachlorella* sp.의 배양에 적합한 이산화탄소 농도는 5%로 결정하였다.

이산화탄소 가스공급속도에 따른 *Parachlorella* sp.의 성장성

가스공급속도에 따른 미세조류의 성장성을 알아보기 위해 가스공급속도를 0.02 m/s에서부터 0.11 m/s까지 변화하며 *Parachlorella* sp.의 성장성을 분석하였다. 일반적으로 미세조류를 광배양시 가스의 공급은 탄소원의 제공뿐만 아니라 배양액의 원활한 흐름을 유도하여 세포에 의한 광에너지 흡수효율을 상승시킨다[17]. 또한 세포를 지속적으로 부유시키고 영양염의 흡수율을 상승시킨다. 이와는 반대로 과도한 빠른 가스공급속도는 이산화탄소의 배양액내의 머무름 시간(retention time)을 감소시켜 미세조류에 의한 탄소원의 활용성을 낮춘다. 또한 미세조류에 물리적인 스트레스(shear stress)를 일으켜 세포 사멸을 유도하게 된다. 따라서 적절한 가스공급속도를 이용하여 배양에 활용하는 것이 반드시 필요하다.

Figure 2(A)에서 나타난 것처럼 세포의 농도는 배양 1-3일차에는 0.02 m/s를 제외하고 가스공급속도에 대한 미세조류 생장의 뚜렷한 차이는 크게 나타나지 않았다. 이는 전술한 것처럼 세포농도가 낮아 (>1 g/L) 강한 혼합에 의한 긍정적인 효과가 나타나지 않는 것으로 사료된다. 그러나 배양 4일 이후부터 세포 농도가 높아지면서 (>2 g/L) 성장과의 상관성이 뚜렷하게 나타났다. 0.064 m/s의 속도 이상에서는 세포농도가 약 20%이상 향상되는 것으로 나타났다. Figure 2(B)에 가스공급속도와 미세조류 성장속도 및 바이오매스 생산성의 상관성을 도시하였다. 성장성은 0.064 m/s 이상의 속도에서 두 항목 모두 0.8

g/L/day의 평형을 이뤄 최적 가스 공급속도를 0.064 m/s (=0.15 vvm)로 결정하였다.

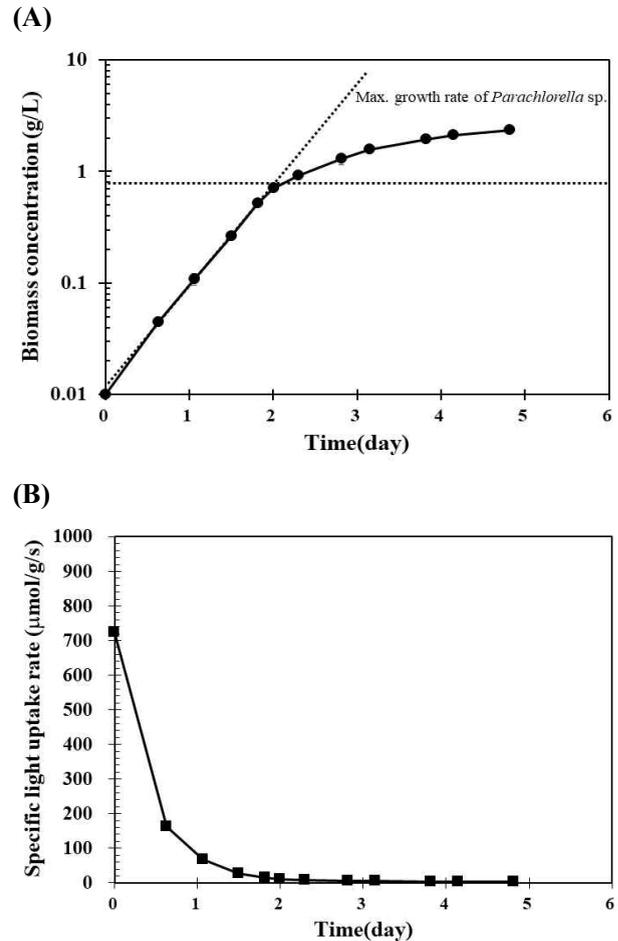


Figure 3. Time profiles of biomass concentration (A) and specific light uptake rate (B) of *Parachlorella* sp. cultured in 0.5 L bubble column photobioreactors

성장속도에 기반한 *Parachlorella* sp.의 q_e 값 결정

미세조류의 광합성 효율과 성장성은 조사되는 광도와 상관성이 깊다. 미세조류의 고효율의 광합성 기구는 세포에 도달하는 광자를 과도하게 흡수하여 광생물배양기 내에 광도구배(light gradient)를 형성하게 된다. 세포 농도가 높아질수록 광원과 가까운 반응기 표면에서만 알짜 광합성(net photosynthesis)이 발생되고 광보상점 이하의 광도가 도달하는 곳에서는 광합성이 일어나지 않게 된다. 이는 전체적인 미세조류 생산성과 광자효율성을 낮추게 된다. 이를 해결하고자 다양한 방법의 광도 조절법에 대해 연구가 진행되어 왔다. 그 중에서 미세조류 성장성에 기

반한 광도 조절방법인 루모스탯 배양법이 효과적으로 사용되고 있다. 루모스탯 배양법은 세포의 생장이나 목적 대사산물의 농도에 기반하여 광도를 조절하는 배양법이다. 지금까지 보고된 연구에 따르면, 세포 수(cells/mL), 광자를 받는 세포의 단면적 (projection area), 세포의 농도(g/L) 대사산물의 농도의 변화를 기준으로 q_e 을 도출하였다[13, 18-21]. 이를 통해 효과적인 광조사법을 개발하여 에너지효율성과 목적 산물의 고농도로 생산할 수 있었다.

본 연구에서는 *Parachlorella* sp.의 q_e 값을 계산하고 이를 이용하여 바이오매스 생산성을 향상하고자 하였다. 이를 위해 *Parachlorella* sp.를 0.5 L BC-PBR에서 광도 $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 공급하면서 5일간 배양하였으며, *Parachlorella* sp.가 최대의 성장속도를 나타내는 최소의 광도값을 성장속도 기준으로 도출하고자 하였다. Figure 3(A)은 *Parachlorella* sp.의 성장곡선을 지수로 표현한 것이다. 세포 성장속도는 배양 2일차 0.71 g/L까지는 최대의 성장속도를 나타내었고 세포 농도가 증가됨에 따라 감소하여 3일차부터는 광의존적 성장(light-dependent growth)이 나타나는 것을 확인하였다. 바이오매스에 기반을 둔 적정 q_e 을 도출하기 위해 최대성장속도의 변곡이 발생(배양 48시간)하는 시점의 바이오매스 농도를 이용하여 *Parachlorella* sp.의 적정 q_e 값을 $10.2 \mu\text{mol}/\text{g}/\text{s}$ 로 설정하였다.

q_e 값을 이용한 *Parachlorella* sp.의 Lumostatic 배양

선정된 q_e 값을 이용하여 *Parachlorella* sp.를 0.5 L BC-PBR을 이용하여 배양하였다. 루모스탯 배양법과 바이오매스 생산성과 에너지 효율성을 비교하기 위해 $300 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 고정된 광도로 배양군을 대조군으로 사용하였다. Figure 4(A)에서 알 수 있듯이 미세조류 배양 36시간까지는 비슷한 양상을 나타냈지만, 배양 48시간이 지나가면서 성장성은 극명한 차이를 나타냈다. Figure 3(A)에서와 마찬가지로 *Parachlorella* sp.의 성장성은 1 g/L이상이 되면서 광의존적인 성장성을 나타낸 것과 동일한 현상이다. 그에 반해 q_e 값을 이용하여 성장시킨 경우 세포의 농도가 증가함에 따라 광조절을 통해 대수성장기 (exponential growth phase)를 연장시킬 수 있어 배양 1.5일에서 3일차까지 유지할 수 있었다. 최종적으로 배양 5일차에 최대 세포 농도인 $5.9 \pm 0.5 \text{ g/L}$ 를 얻을

수 있었다. 이는 같은 배양기간(5일차)에서 대조군 (control)에서 얻은 세포농도($4.2 \pm 0.2 \text{ g/L}$)에 비해 40%향상된 수치이다.

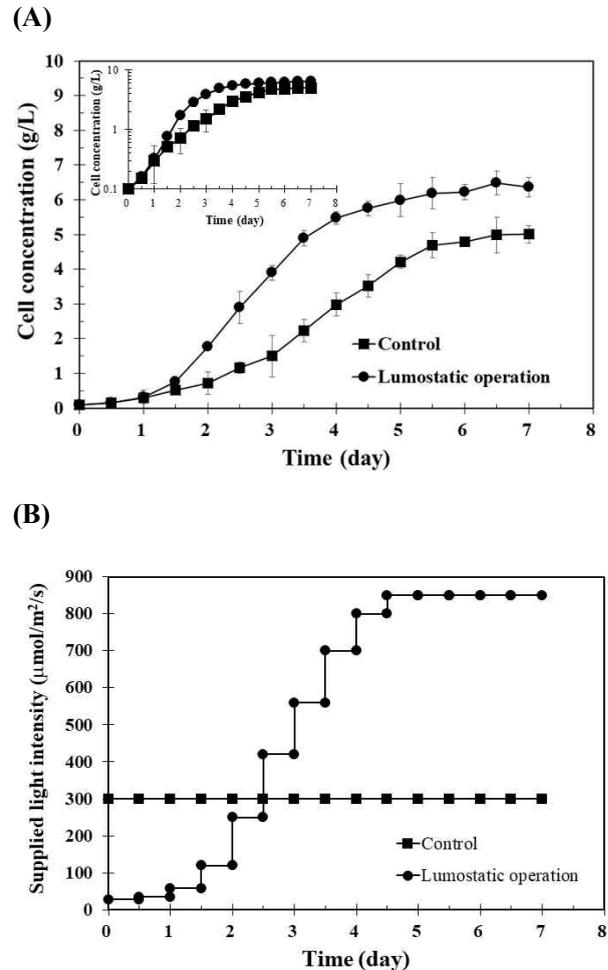


Figure 4. Time profiles of biomass concentrations (A) and supplied light intensities (B) of *Parachlorella* sp. cultured in 0.5 L bubble column photobioreactors.

루모스탯 배양법의 *Parachlorella* sp. 바이오매스 생산에 긍정적인 효과를 분석하기 위해 실험의 효율성(최고 세포농도, 바이오매스 생산성, 광자효율성)을 Table 1에 비교하였다. 미세조류 바이오매스 생산성, 공급된 총 광자량, $Y_{x/e}$ 값은 루모스탯 배양조건에서 stationary phase로 진입하는 배양 4일차를 기준으로 평가하였다. 미세조류 바이오매스 생산성의 경우 루모스탯 배양군에서 1.37 g/L/day를 얻어 대조군에 비해 83%높았다. 또한 투입된 광에너지 대비 생산된 바이오매스 비교에서도 약 66%의 효율성이 높은 것

을 확인할 수 있었다. 따라서 *Parachlorella* sp.에 적합한 q_e 값을 이용한 효율적인 배양으로 짧은 기간에 바이오매스를 고농도 생산의 가능성을 확보하였다.

Table 1. A comparison of maximum cell concentration, biomass productivity, and photon yield cultured under constant light intensity and lumostatic operation

	Constant light	Lumostatic operation
Max. cell Conc.(g/L)	5.0 ± 0.3 (at day 7)	6.4 ± 0.3 (at day 6.5)
Biomass productivity(g/L/day)	0.75 ± 0.07	1.37 ± 0.04
Σsupplied photons(mol)	3.39	3.75
photon efficiency(g/mol)	0.88 ± 0.11	1.46 ± 0.03

결론

본 연구에서는 생장성이 우수하고 유용지방산을 생산하는 토착 담수 미세조류 *Parachlorella* sp.의 바이오매스 생산성 향상을 위해 가스공급속도와 루모스탯 배양법을 이용하였다. 다양한 농도의 이산화탄소와 가스공급속도에서 *Parachlorella* sp.를 배양하여 생장에 가장 효과적인 5%이산화탄소의 농도와 0.064 m/s의 가스공급속도가 생장에 효과적임을 확인하였다. 또한 *Parachlorella* sp.의 바이오매스 생산성을 높이기 위해 광도와 비생장속도의 관계를 이용하여 광조절변수를 복잡한 과정 없이 도출할 수 있었다. 이를 이용하여 고정된 광도와 생산성을 비교한 결과, 바이오매스 생산성을 대조군에 비해 83%향상시켰으며, 공급된 광자에 의해 전환된 바이오매스는 66%높아 효율적인 배양법임을 확인하였다. 본 연구 결과는 미세조류의 고농도 달성을 위해 중요한 가스과 광공급조건을 최적화 하여 바이오매스 생산성을 높일 수 있는 방법으로 활용이 가능할 것이다.

감사의 글

이 연구는 환경부의 재원으로 국립낙동강생물자원관에서 지원(NNIBR202303113)과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2021R1A2C2005148).

References

1. Benemann, J. R. 1997. CO₂ mitigation with microalgae systems. *Energ. Convers. Manage.* **38**, S475-S479.
2. Wang, B., Y. Li, N. Wu, CQ, Lan. 2008. CO₂ bio-mitigation on using microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **79**, 707-718.
3. Borowitzka, M. A. 2013. High-value products from microalgae—their development and commercialisation. *J. Appl. Phycol.* **25**, 743-756.
4. Joshi, S., R. Kumari and V. N. Upasani. 2018. Application of algae in cosmetics: An overview. *Int. J. Innov. Res. Sci. Eng. Technol.* **7**, 1269-1278.
5. Kim, Z.-H., H. Park, Y.-J. Ryu, D.-W. Shin, S.-J. Hong, H.-L. Tran, S.-M. Lim, and C.-G. Lee. 2015. Algal biomass and biodiesel production by utilizing the nutrients dissolved in seawater using semi-permeable membrane photobioreactors. *J. Appl. Phycol.* **27**, 1763-1773.
6. Hong, S.-J., K.-J. Yim, Y.-J. Ryu, C.-G. Lee, H.-J. Jang, J.-Y. Jung, and Z.-H. Kim. 2022. Improvement of Lutein and Zeaxanthin Production in *Mychonastes* sp. 247 by Optimizing Light Intensity and Culture Salinity Conditions. *J. Microbiol. Biotechnol.* **33**, 1-8.
7. Bhuyar, P., S. Sundararaju, M. H. A.Rahim, R. Ramaraj, G. P. Maniam, and N. Govindan. 2021. Microalgae cultivation using palm oil mill effluent as growth medium for lipid production with the effect of CO₂ supply and light intensity. *Biomass Convers. Biorefin.* **11**, 1555-1563.
8. Chang, H. X., Y. Huang, Q. Fu, Q. Liao, and X. Zhu. 2016. Kinetic characteristics and modeling of microalgae *Chlorella vulgaris* growth and CO₂ biofixation considering the coupled effects of light intensity and dissolved inorganic carbon. *Bioresour. Technol.* **206**, 231-238.
9. Yim, K.-J., H. Park, C.-S. Lee, B.-Y. Jo, S.-W. Nam, C.-G. Lee, and Z.-H. Kim. 2019. Effects of Nitrogen and Phosphorus Starvation on Growth and Fatty Acid Production in Newly Isolated Two Freshwater Green Microalgae from Nakdonggang River. *J. Mar. Biotechnol.* **11**, 81-88
10. Park, H., K.-. Yim, J.-H. Min, S.-M. Kang, C.-W. Han, C.-S. Lee, J.-Y. Jung, S.-J. Hong, C.-G. Lee, and Z.-H. Kim. 2020. Investigation on Media Composition for Cult

- ivation of a Newly Isolated Freshwater Microalga *Parachlorella* sp. to Enhance Fatty Acid Productivity. *Microbiol. Biotechnol. Lett.* **48**, 328-336.
11. Kim, Z.-H., K. Kim, H. Park, C.-S. Lee, S.-W. Nam, K.-J. Yim, J.-Y. Jung, S.-J. Hong, and Lee, C.-G. 2021. Enhanced fatty acid productivity by *Parachlorella* sp., a freshwater microalga, via adaptive laboratory evolution under salt stress. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **26**, 223-231.
 12. Azhand, N., A. Sadeghizadeh, and R. Rahimi. 2020. Effect of superficial gas velocity on CO₂ capture from air by *Chlorella vulgaris* microalgae in an Airlift photobioreactor with external sparger. *J. Environ. Chem. Eng.* **8**, 104022.
 13. Lee, H.-S., Z.-H. Kim, H. Park, and C.-G. Lee. 2016. Specific light uptake rates can enhance astaxanthin productivity in *Haematococcus lacustris*. *Bioprocess Biosyst. Eng.* **39**, 815-823.
 14. Cabello, J., M. Morales, and S. Revah. 2017. Carbon dioxide consumption of the microalga *Scenedesmus obtusiusculus* under transient inlet CO₂ concentration variations. *Sci. Total Environ.* **584**, 1310-1316.
 15. Jeon, H., Y. Lee, K.-S. Chang, C.-G. Lee, and E. Jin. 2013. Enhanced production of biomass and lipids by supplying CO₂ in marine microalga *Dunaliella* sp. *J. Microbiol.* **51**, 773-776.
 16. Aslam, A., S. R. Thomas-Hall, T. Mughal, Q. U. Zaman, N. Ehsan, S. Javied, and P. M. Schenk. 2019. Heavy metal bioremediation of coal-fired flue gas using microalgae under different CO₂ concentrations. *J. Environ. Manage.* **241**, 243-250.
 17. Qiang, H. and A. Richmond. 1996. Productivity and photosynthetic efficiency of *Spirulina platensis* as affected by light intensity, algal density and rate of mixing in a flat plate photobioreactor. *J. Appl. Psychol.* **8**, 139-145.
 18. Choi, S.-L., I.-S. Suh, and C.-G. Lee. 2003. Lumostatic operation of bubble column photobioreactors for *Haematococcus pluvialis* cultures using a specific light uptake rate as a control parameter. *Enzyme Microb. Technol.* **33**, 403-409.
 19. Lee, H.-S., M.-W. Seo, Z.-H. Kim, and C.-G. Lee. 2006. Determining the best specific light uptake rates for the lumostatic cultures in bubble column photobioreactors. *Enzyme Microb. Technol.* **39**, 447-452.
 20. Yoon, J.-H., J.-H. Shin, E.-K. Ahn, and T.-H. Park. 2008. High cell density culture of *Anabaena variabilis* with controlled light intensity and nutrient supply. *J. Microbiol. Biotechnol.* **18**, 918-925.
 21. Chen, X., Q. Y. Goh, W. Tan, I. Hossain, W. N. Chen, and R. Lau. 2011. Lumostatic strategy for microalgae cultivation utilizing image analysis and chlorophyll a content as design parameters. *Bioresour. Technol.* **102**, 6005-6012.