

평판형 광생물반응기의 미세조류 연속배양을 위한 On-off 제어

김재혁^a, 윤충만^a, 정상화^{a*}**On-off Control for Continuous Culture of Microalgae
in Flat Panel Photobioreactor**Jae-Hyeok Kim^a, Chung-Man Yoon^a, Sang-Hwa Jeong^{a*}^a Department of Mechanical Engineering, Chosun University, 309 Pilmundae-ro, Dong-gu, Gwang-Ju 61452, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	22	April	2016
Revised	2	June	2016
Accepted	14	June	2016

Keywords:

Continuous culture
Batch culture
Turbidostat
On-off control
Microalgae
Flat panel photobioreactor

ABSTRACT

Recently, technologies that produce biofuels from microalgae are being studied worldwide. It is necessary to significantly reduce the production costs of biofuels from microalgae for economic reasons. In this study, the growth curve of the microalgae was obtained using the batch-culture method, and the specific growth rate was predicted using the regression method. Based on the culture conditions of the estimated specific growth rate, the turbidity of the microalgae in the flat panel photobioreactor (PBR) was measured. Furthermore, an on-off control scheme was applied to the flat panel PBR in order to culture the microalgae continuously on the basis of turbidity. The parameters of the on-off control system were displayed by LabView. The on-off scheme of peristaltic pump was controlled based on the turbidity in the PBR. In addition, the turbidity values of growth curves were compared and analyzed in the continuous culture process using the on-off controller.

1. 서론

최근까지 광합성 미생물인 미세조류로부터 바이오연료를 생산하는 기술은 세계적인 관심을 받아왔다. 세계 여러 나라에서는 미세조류를 생산하기 위해 여러 종류의 배양 방법을 사용해 왔으며 배양방법으로 판형, 관형, 수직형 광생물반응기(PBR: photobioreactor), 및 노지(open pond) 배양 방법 등이 있다^[1]. 노지 배양 방법은 설치비용이 저렴하다는 장점을 가지고 있지만 주위 환경이 일교차가 적고 넓은 부지를 필요로 하기 때문에 주로 하와이, 미얀마, 태국, 브라질, 중국 등에서 실용화되어 사용되고 있다. 우리나라의 경우 사계절이 뚜렷하고 기온차가 크며, 넓은 부지 확

보의 어려움 때문에 실용화되기 어려운 실정이다. 최근에는 여러 가지 밀폐형 광생물반응기가 보고되고 있지만 아직 대중적으로 실용화되고 있지는 않다. 현재 미세조류로부터 추출되는 바이오 연료는 다른 곡물에서 추출되는 바이오 연료에 비하여 생산성에서 경쟁이 되지 못하는 상황이며 경제성을 갖추기 위해서는 생산비용을 현저하게 감소시킬 필요가 있다^[2].

생산비용을 감소시키는 방법으로는 미세조류를 대량 배양하는 방법이 있다. 미세조류를 배양하는 방법은 회분 배양(batch culture), 연속 배양(continuous culture), 유가식 배양(fed-batch culture) 등으로 나눌 수 있다^[3]. 이 중 연속 배양은 신선한 배지를 일정한 속도로 공급하면서 동시에 같은 양의 배양액을 배출시켜

* Corresponding author. Tel.: +82-62-230-7178

Fax: +82-62-230-7178

E-mail address: shjeong@chosun.ac.kr (Sang-Hwa Jeong).

평판형 광생물반응기내의 배양액 량을 항상 일정하게 유지시키는 방법으로서 적은 노동력으로 높은 생산성을 얻을 수 있으며, 제어를 통하여 제품의 균질성을 높일 수 있다⁴⁾. 또한, 기질농도, 용존산소의 농도, 대사생성물의 농도 그리고 pH 등의 환경조건이 항상 일정하게 유지되기 때문에 증식속도를 임의로 조절할 수 있다⁵⁻⁷⁾.

본 논문에서는 평판형 광생물반응기에서 미세조류를 회분식 배양하여 성장곡선을 모델링하고, 이를 통해 회귀 모델을 계산하여 비성장 속도를 예측하였다. 예측된 비성장 속도의 배양조건에서 평판형 광생물반응기 내의 미세조류를 연속으로 배양하기 위해 on-off 제어시스템을 구성하였다. 배양기 내의 설정된 탁도(turbidity) 값의 범위 내에서 on-off 제어기법을 적용하여 연동펌프의 on-off 와 속도를 제어하였다. 또한, 미세조류의 비성장 속도와 연동펌프의 속도에 따라 변화하는 미세조류의 성장곡선을 비교 분석하였다.

2. 미세조류 회분배양

2.1 균주 및 배지

본 연구에서 사용된 균주는 조선대학교 김시욱 교수 연구팀으로부터 분양 받은 *Chlorella* sp.를 균주로 사용하였다. 배양에 사용된 배양액은 TAP media를 사용하였으며, 배지 조성은 Table 1과 같다. 배지는 고압 멸균기를 이용하여 121°C에서 20분 동안 멸균하여 냉각 후 사용하였다.

Table 1 Composition of TAP medium for *Chlorella* sp.

Components	Amount (g/L)
50X FBS	
NH ₄ Cl	40
CaCl ₂ ·2H ₂ O	5
MgSO ₄ ·7H ₂ O	10
400X KPO₄ mix	
1M K ₂ HPO ₄	43.2
1M KH ₂ PO ₄	22.32
200X tris mineral	
EDTA·2H ₂ O	10
FeSO ₄ ·7H ₂ O	1
ZnSO ₄ ·7H ₂ O	4.4
H ₃ BO ₃	2.28
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.02
CuCl ₂ ·2H ₂ O	0.22
Na ₂ MOO ₄ ·2H ₂ O	0.52
CoCl ₂ ·6H ₂ O	0.32
glacial acet (acid)	20ml
Tris	2.42

2.2 회분식 배양법

회분 배양의 기본적인 특징은 목적물질(배양세포이거나 대사물질)을 생산하는데 필요한 기질 또는 배지 전체를 처음부터 배양기에 넣고 배양을 시작하므로 일단 배양이 시작되면 배양시간에 따라 기질은 점차 감소되며, 집중세포 량은 증가되고, 세포 안이나 배양액에 생산물이 점차 축적된다. Fig. 1은 일반적인 회분 배양 과정에서 최종 세포농도와 초기 배지농도의 관계를 나타낸 것이다. 1-영역에서는 유효배지 농도만큼 자유롭게 성장하지만 2-영역에서는 저해물질 축적 또는 영양분 고갈로 성장이 제한된다.

2.3 성장곡선

50 L 평판형 광생물반응기에서 *Chlorella* sp.를 35일 동안 회분 배양하고, 세포 농도와 광학 밀도를 측정하여 Fig. 2에 나타내었다. 미세조류가 지수함수적으로 성장하기 때문에 log를 취하여 나타내었다. 최대 광학 밀도(log(OD))는 0.8737이 측정되었다.

탁도법은 세포가 차지하는 체적의 양을 구하는 방법으로 탁도와 건조 중량의 상관성을 이용하여 배양 중인 바이오매스의 농도를 관찰할 수 있다⁸⁾. 일반적으로 높은 농도에서 빛의 투과율이

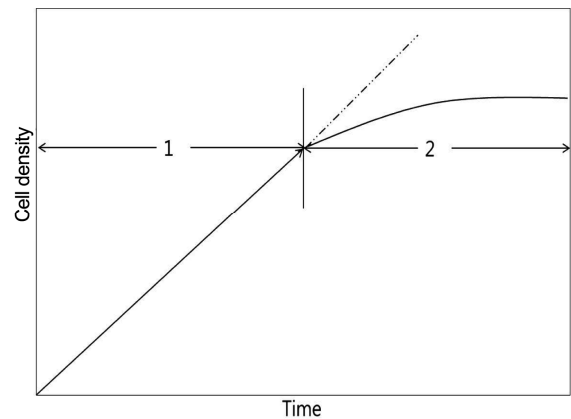


Fig. 1 Final cell concentration and the initial concentration of the medium in typical batch culture process

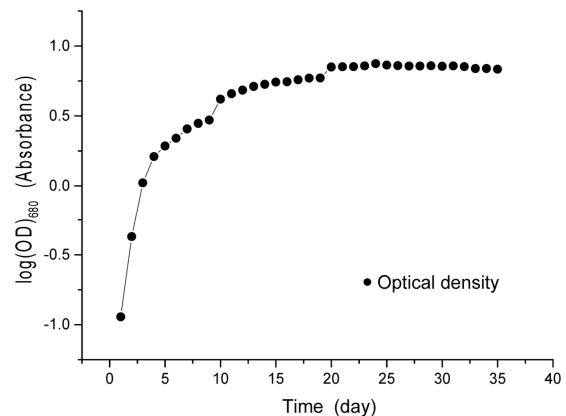


Fig. 2 Growth curve of *Chlorella* sp.

떨어져 흡광도가 낮아지므로 OD₆₈₀ 0.3 이상에서는 비선형 특성을 보인다^[9-11].

Fig. 2의 측정된 데이터로부터 광학 밀도와 건조 중량의 관계를 3차 방정식을 이용하여 근사화 하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 미세조류의 광학 밀도(log(OD))가 0.8585에서 바이오매스 건조 중량이 2.3 g/L로 가장 높게 측정되었다.

2.3 회귀모델

비구조(unstructured) 비분별(unsegregated) 모델을 사용하여 비성장속도(SGR: specific growth rate)를 예측하였다. 비성장속도를 예측하기 위해 Table 2와 같이 Logistic, Gompertz, Baranyi 모델을 사용하여 성장 모델을 근사화 하였다. 일반적으로 S 자형(sigmoidal shape) 성장곡선은 수학적 파라미터 (a,b,c)를 포함하고 있기 때문에 생물학적 의미를 갖는 파라미터(A, μ_m, λ)로 수정하여 나타내었다^[12-14]. 여기서 A는 최대 개체, μ_m은 비성장속도, 그리고 λ는 지체 시간을 나타낸다. 균주는 배광균일도가 70% 이상인 LED 도광판을 이용하여 빛의 세기를 100 μE/m²/s로 24:0의

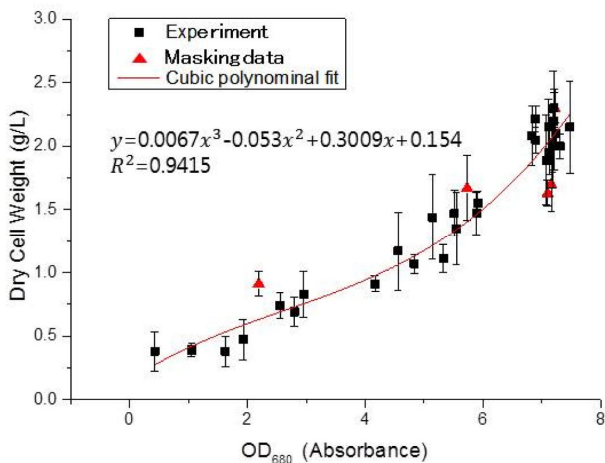


Fig. 3 Dry cell weight according to optical density

Table 2 Unstructured and unsegregated sigmoidal regression model for biological growth curve

Model	Equation (mathematical parameter)	Modified equation (Biological parameter)
Logistic	$y = \frac{a}{1 + e^{(b-cx)}}$	$y = \frac{A}{1 + e^{\left(\frac{4\mu_m}{A}(\lambda - t) + 2\right)}}$
Gompertz	$y = ae^{[-e^{(b-cx)}]}$	$y = Ae^{-e^{\left(\frac{4\mu_m}{A}(\lambda - t) + 1\right)}}$
Baranyi	$y = \mu_{max} A(t) - \ln\left(1 + \frac{e^{\mu_{max} A(t)} - 1}{e^A}\right)$ $A(t) = t + \frac{\ln[e^{-\mu_{max} t} (1 - e^{-\mu_{max} \lambda}) - e^{-\mu_{max} \lambda}]}{\mu_{max}}$	

광 주기에서 배양하였다^[15]. 측정된 OD₆₈₀값을 모델방정식으로 성장곡선을 근사화 하여 Fig. 4에 나타내었고, 실험데이터로부터 근사적으로 구한 모델방정식에 의해 도출한 생물학적 파라미터 값들을 Table 3에 나타내었다. 모델식의 적합성을 나타내는 결정계수(R-square) 값이 Baranyi 모델에서 0.9423와 0.9715로 가장 높기 때문에 *Chlorella* sp.의 성장을 예측하기에 가장 적합한 모델로 판단하였다.

3. 미세조류 연속배양

3.1 연속배양 장치 구성

연속식 배양은 배양기에 새 배지를 일정한 속도로 공급하고, 공급속도와 같은 속도로 배양액을 연속적으로 배양기 밖으로 배출시키는 방식이므로 배양기 안의 전체 액량을 항상 일정하게 유지하는 배양방식이다. 회분 배양에서는 세포가 성장하면서 기질이 소비되며, 대사생성물이 축적되고, 세포 성장환경은 배양시간과 함께 끊임없이 변화된다. 그러나 연속 배양에서는 회분 배양에서 나타나는 여러 가지 인자들이 항상 일정하게 유지되는 상태, 즉 정상상태가

Table 3 Growth parameters of *Chlorella* sp. on the basis of model equation

Measurement data	Model	A (maximal value)	SGR (μ _{max} , day ⁻¹)	Lag time (λ, day)	Adj. R-square
OD ₆₈₀	Logistic	4.047	0.406	1.3	0.9183
	Gompertz	4.059	0.485	0.62	0.9403
	Baranyi	4.09	0.444	1.35	0.9423
Turbidity	Logistic	6.227	1.497	1.022	0.9474
	Gompertz	6.243	1.791	0.723	0.9592
	Baranyi	6.255	0.981	2.842	0.9715

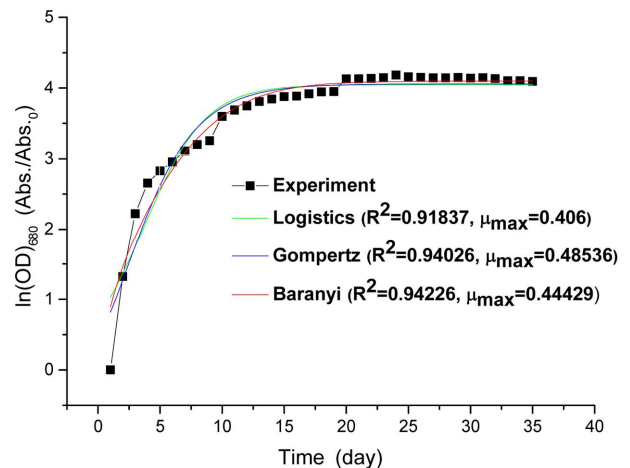


Fig. 4 Logistic, Gompertz, Baranyi models for OD values

계속되므로 공급되는 기질의 양과 세포가 소비하면서 성장하는 세포량과 배출량 사이에 일정한 비례관계가 성립하고, 이 상태가 지속적으로 유지된다^[6].

연속 배양장치는 미세조류의 광합성을 위하여 가스(CO₂, O₂)와 배지를 지속적으로 공급하고, 동시에 성장하는 미세조류의 탁도 값을 측정한다. Fig. 5는 연속 배양시스템의 실제 실험 장치의 모습을 나타낸 것이고, Fig. 6은 개략도를 나타낸 것이다. Fig. 7는 on-off 제어 프로그램의 흐름도를 나타낸 것이고, Fig. 8은 LabVIEW를 통해 개발된 모니터링 프로그램을 나타낸 것이다.

3.2 연속 배양 모델링

연속 배양방법은 크게 케모스탯(chemostat)과 터비도스탯(turbidostat)으로 나뉜다. 케모스탯은 생육제한 영양원의 공급속도를 일정하게 함으로써 정상상태를 유지하는 방법이다. 케모스탯은 세포의 조절형(영양제한형)에 속하며, 제한영양물질로서는 당이나 유기산 등의 탄소원, 암모늄이나 인산염, 아미노산(아미노산요구균의 경우)을 사용한다. 배출된 배지에는 미생물들과 함께 미생물들이 만들어낸 산물들이 포함되어 있기 때문에 정제하여 유용물질을 만들 수 있다. 그러나 효율을 높이기 위해선 가급적 성장 속도와

대사 속도가 빠른 미생물을 이용해야 하며, 배양액의 실시간 출입으로 인한 오염 위험이 크다.

터비도스탯은 배양기 내에 균체 농도가 일정하게 유지되도록 배양액 공급속도 및 배출속도를 제어하는 연속 배양방법으로서 분광광도계로 미세조류 배양기의 탁도 값을 측정하여 균체 농도를 일정하게 유지시키는 배양방법을 말한다. 터비도스탯은 첨가되는 기질의 양에 관한 일차 미분 방정식으로 모델링 할 수 있다. Monod 식을 성장식과 기질소비에 근거한 세포수율에 관한 식과 결합하여 식 (1)을 예측할 수 있다^[17].

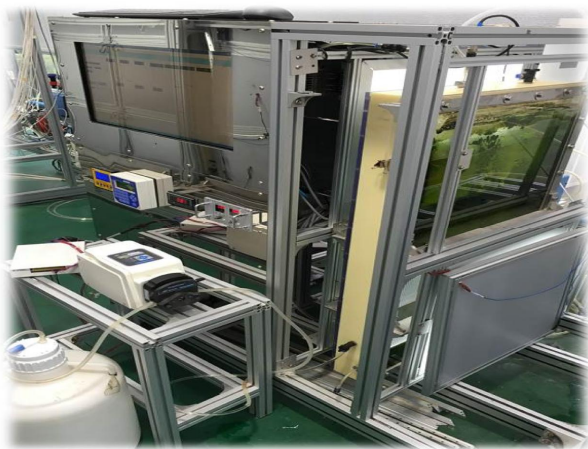


Fig. 5 Experimental device of continuous culture system

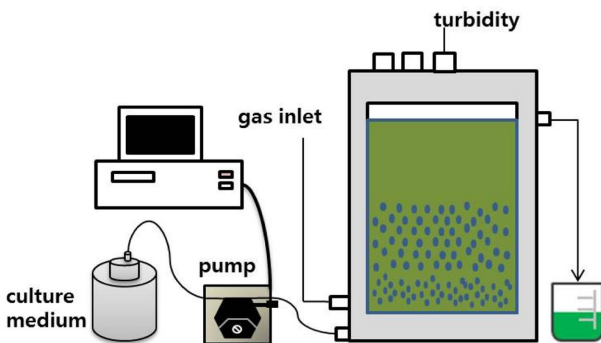


Fig. 6 Schematic diagram of continuous culture system

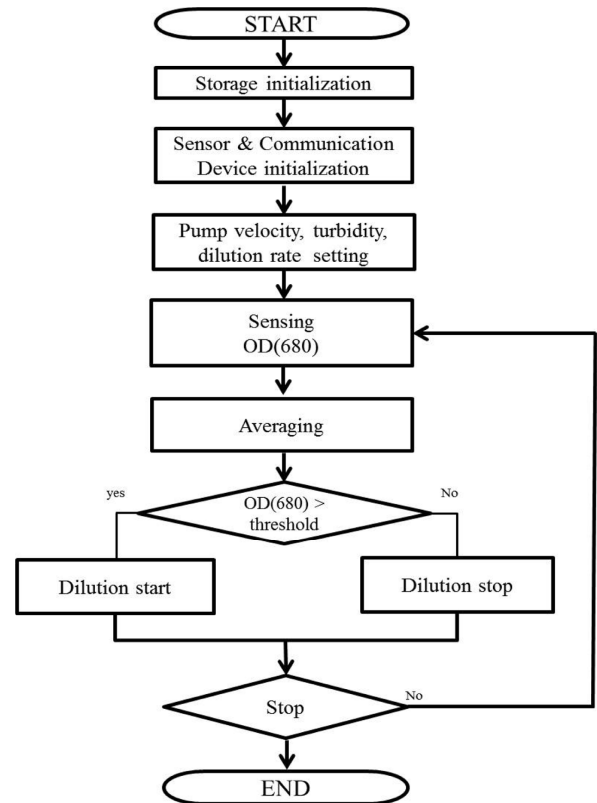


Fig. 7 Flow chart of on-off control program

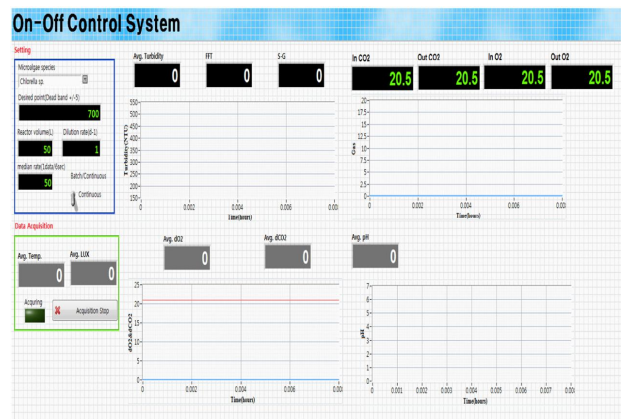


Fig. 8 On-off control monitoring display using LabVIEW

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \mu(s)x - Dx \\ \dot{s} &= \frac{-\mu(s)x}{Y} + D(s_0(t) - s) \\ P &= Dx \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 x 는 생물농도, P 는 생산성, s 는 기질의 농도, D 는 희석률, Y 는 기질에 대한 수율, $\mu(s)$ 는 비성장속도이다. 단위 시간에 대한 세포 농도의 변화량은 유출량과 생육량의 관계를 통해 구할 수 있다. 정상상태에서는 희석률과 비성장속도가 동일하다고 가정한다. Fig. 9는 터비도스탯 제어시스템의 블록선도를 나타낸 것이다. 실시간 측정이 가능한 탁도법을 이용하여 세포농도를 측정하여 on-off 제어를 수행하였다.

4. On-off 제어

4.1 비성장속도 1.0 day⁻¹에서의 연속 배양

미세조류의 일정한 OD₆₈₀값을 유지하기 위해 탁도 값 130 (NTU)에서 오차범위 ±5를 기준으로 비성장속도 1.0 day⁻¹에서 연속 배양을 수행하였고, 조작변수는 연동펌프(peristaltic pump)의 작동유무로 설정하였다. 펌프 속도는 비성장속도 1.0 day⁻¹가 되도록 설정하였다. 비성장속도 1.0 day⁻¹은 회분식 배양에서 Baranyi 성장모형을 통해 예측된 비성장속도로서 $D=F/V$ 로 나타낸다. 여기서 D 는 희석률, F 는 배지유입속도, V 는 배양액 량이다. 정상상태에서는 희석률과 비성장속도가 동일하다고 가정한다. 펌프가 작동하게 되면 새로운 배지가 평관형 광생물반응기 내에 설정된 속도로 공급이 되고, 동시에 같은 속도로 배양기 내의 미세조류가 배양기 밖으로 자연 수확된다. Fig. 10은 미세조류를 45시간 동안 on-off 제어를 통해 연속 배양한 성장곡선이며, Fig. 11은 연속 배양 중의 연동펌프의 작동결과를 나타낸 것이다.

4.2 비성장속도 0.5 day⁻¹에서의 연속 배양

미세조류의 일정한 OD₆₈₀값을 유지하기 위해 탁도 값 130

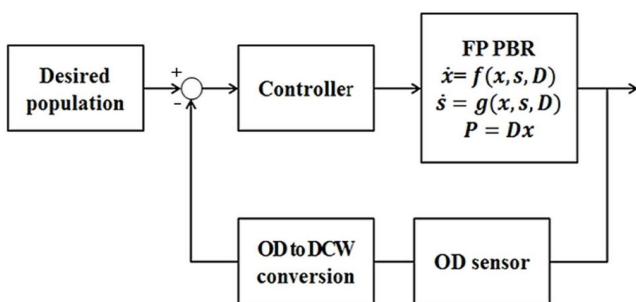


Fig. 9 Block diagram of turbidostat control system (DCW: dry cell weight)

(NTU)에서 오차범위 ±5를 기준으로 비성장속도 0.5 day⁻¹에서 연속 배양을 수행하였고, 조작변수는 비성장속도 1.0 day⁻¹에서의 실험과 동일하게 연동펌프의 작동유무로 설정하였다. 여기서, 비성장속도를 0.5 day⁻¹로 낮추게 되면 1.0 day⁻¹과 비교하여 배양기 내에 배지를 유입시키는 펌프의 속도가 절반으로 줄어들게 된다.

회분식 배양에서 Baranyi 성장모형을 통해 예측된 비성장속도를 0.5 day⁻¹로 낮추고, 72시간 동안 on-off 제어를 통해 미세조류를 평관형 광생물배양기에서 배양한 결과를 Fig. 12와 Fig. 13에 나타내었다.

4.3 실험 결과

비성장속도 1.0 day⁻¹과 0.5 day⁻¹에서 실험한 결과 두 실험 모두 탁도 값 135 (NTU)에서 펌프가 작동하고 125 (NTU)에서 펌프가

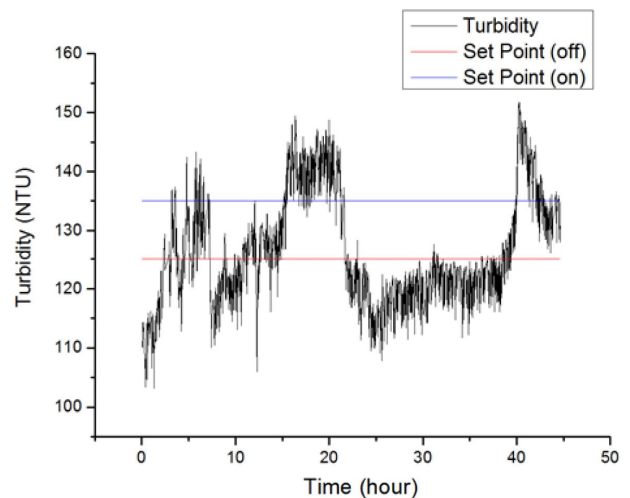


Fig. 10 Growth curve of *Chlorella* sp. for on-off control in dilution rate of specific growth rate 1.0 day⁻¹

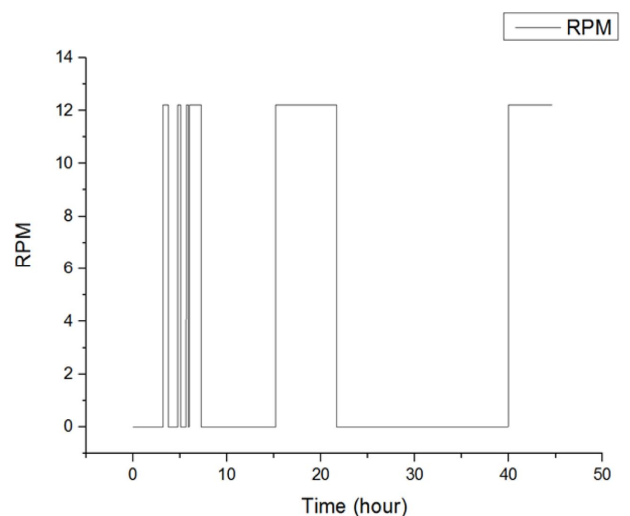


Fig. 11 RPM curve of Pump for on-off control in dilution rate of 1.0 day⁻¹

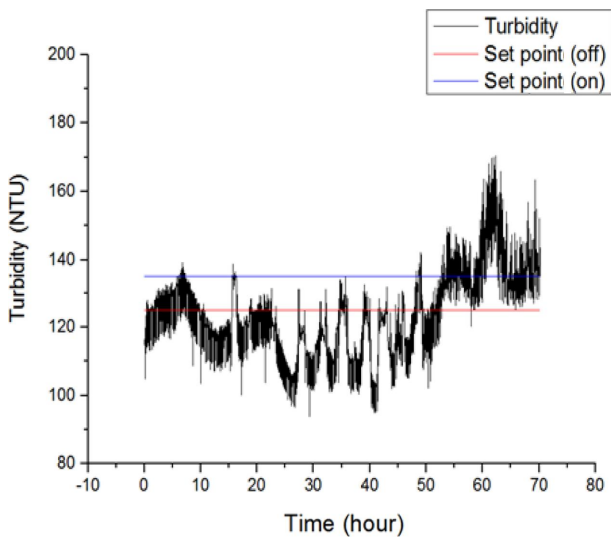


Fig. 12 Growth curve of *Chlorella* sp. for on-off control in dilution rate of specific growth rate 0.5 day^{-1}

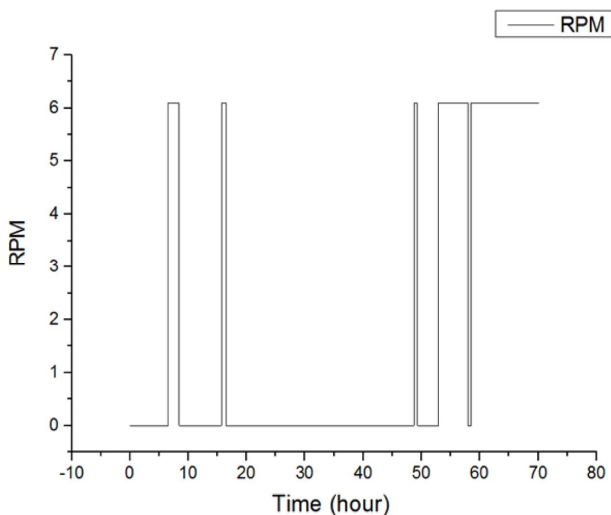


Fig. 13 RPM curve of Pump for on-off control in dilution rate of 0.5 day^{-1}

정지되어 on-off 제어가 잘 이루어지고 있음을 확인할 수 있었다. 비성장속도가 1.0 day^{-1} 에서 0.5 day^{-1} 로 낮아지게 되면 펌프의 속도와 작동횟수가 절반으로 줄어드는 것을 Fig. 10과 Fig. 12를 통해서 알 수 있다.

펌프의 속도가 낮아지게 되면 새로운 배지의 유입량이 줄어들었기 때문에 비성장속도가 1.0 day^{-1} 일 경우에는 45시간 동안 총 두 번의 펌프의 작동이 있었지만, 비성장속도가 0.5 day^{-1} 일 경우에는 48시간 동안 한 번의 펌프의 작동을 볼 수 있다. 또한, 새로운 배지의 유입량이 줄어들고, 이에 따라 평판형 광생물반응기 밖으로 자연 수확된 미세조류 량도 줄어들었음을 알 수 있었다. 하지만, 배양기 밖으로 자연 수확된 미세조류의 OD_{680} 의 값은 두 가지 실험의 탁도 값을 동일하게 설정하고 실험을 수행하였기 때문에 비성장속

도의 변화에 따라 큰 변화는 나타나지 않았고, 초기 설정된 OD_{680} 의 값과 유사한 값으로 측정되었다.

5. 결론

평판형 광생물반응기에서 35일 동안 미세조류 *Chlorella* sp.을 회분 배양하여 성장곡선을 모델링하고, 회귀모델을 통해 성장률을 예측하였다. 예측된 성장률을 이용하여 평판형 광생물반응기에서 on-off 제어 시스템을 적용하여 미세조류를 연속으로 배양하는 시스템을 구축하였다.

(1) 35일 동안 회분 배양하여 성장곡선을 모델링하였고, 최대 OD_{680} 의 값은 7.477이 나왔다. 광학 밀도값과 건조 중량의 관계를 3차 방정식으로 근사화 하였고, OD_{680} 7.22값에서 바이오매스의 건조 중량이 2.3 g/L 로 가장 높게 측정되었다.

(2) 비성장속도를 예측하기 위하여 Logistic, Gompertz, Baranyi 모델을 사용하여 성장 모델을 근사화 하였다. 모델식의 적합성을 나타내는 결정계수(R-square) 값이 Baranyi 모델에서 0.9423와 0.9715로 가장 높기 때문에 *Chlorella* sp.의 성장을 예측하기에 가장 적합한 모델로 판단하였다.

(3) 회귀모델을 통해 예측된 비성장속도 1.0 day^{-1} , 0.5 day^{-1} 조건에서 미세조류를 연속으로 배양하기 위해 배양기 내의 설정된 탁도(turbidity) 값의 범위 내에서 on-off 제어기법을 적용하여 연동펌프의 on-off와 속도를 제어하였다. 연동 펌프의 속도에 따라 유입되는 배지의 양이 달라지기 때문에 자연 수확되는 미세조류의 양도 on-off 제어되는 연동펌프의 속도에 따라 결정된다.

(4) 비성장속도 1.0 day^{-1} 과 0.5 day^{-1} 의 자연 수확된 미세조류 OD_{680} 의 값은 초기 설정된 값과 유사한 값으로 측정되기 때문에 비성장속도는 자연 수확된 미세조류의 OD_{680} 값에 큰 영향을 미치지 않는다.

(5) 연속 배양 시스템을 통해 배양기 내의 여러 가지 인자들이 항상 일정하게 유지하여 제품의 균질성을 높일 수 있고, 적은 노동력으로 높은 생산성을 얻을 수 있다고 판단된다.

후기

이 논문은 2013년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2013R1A1A22010889).

References

- [1] Jung, T. M., Jin, E. Jung., Park, H. Jin., Joo, H., Lee, J. W., 2010, Optimal Culture Conditions for Photosynthetic Microalgae Nanno-

- chloropsis Oculata, Appl. Chem. Eng., 21:6 659-663.
- [2] Choi, S. P., Sim, S. J., 2012, Microalgal Bioconversion to Organic Resources from CO₂, KIC News, 15:2 11-24.
- [3] Kim, K. W., Choi, K. H., Jeong, S. H., 2012, Measurement System Monitoring and Growth Curve Modeling for Continuous Culture of *Dunaliella salina*, Proceedings of KSPE Autumn Conference, 953-954.
- [4] Martínez-Jerónimo, F., Espinosa-Chávez, F., 1994, A laboratory-scale system for mass culture of freshwater microalgae in polyethylene bags, Journal of Applied Phycology, 6:4 423-425.
- [5] Kim, S. B., and Jeong, S. H., 2010, Continuous Microalgae Separation Process Using Ultrasonic Waves, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 24(4), 407-413.
- [6] Im, K. H., Zhang, G. L., Choi, S. R., Ye, C. H., Ryu, J. S., Lim, S. H., Han, M. G., David, K. H., 2011, One-sided Nondestructive Evaluation of CFRP Composites by Using Ultrasonic Sound, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 20:1 47-52
- [7] Lee, S. J., Lee, J. H., Lee, D. Y., Seo, T. W., Kim, J. H., 2014, Optimal Parametric Design of Coil Gun to Improve Muzzle Velocity, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23:4 408-412.
- [8] Kim, W., Park, J. M., Gim, G. H., Jeong, S. H., Kang, C. M., Kim, D. J., Kim, S. W., 2012, Optimization of Culture Conditions and Comparison of Biomass Productivity of Three Green Algae, Bioprocess and Biosystems Engineering, 35:1/2 19-27.
- [9] Zhao, B., Zhang, Y., Xiong, K., Zhang, Z., Hao, X., Liu, T., 2011 Effect of Cultivation Mode on Microalgal Growth and CO₂ Fixation, Chemical Engineering Research and Design, 89:9 1758-1762.
- [10] Nedbal, L., Trilek, M., Cervený, J., Komarek, O., Pakrasi, H. B., 2008, A Photobioreactor System for Precision Cultivation of Photoautotrophic Microorganisms and for High-content Analysis of Suspension Dynamics, Biotechnology and Bioengineering, 100:5 902-910.
- [11] Stibal, M., 2004, Comparison of Life Strategies in Two Green Algae from Snow and Soil of the Polar Regions, International Journal of ELSEVIER Food Microbiology, 26 199-218.
- [12] Mytilinaios, I., Salih, M., Schofield, H. K., Lambert, R. J., 2012, Growth Curve Prediction from Optical Density Data, International journal of food microbiology, 154:3 169-176.
- [13] Zwietering, M. H., Jongenburger, I., Rombouts, F. M., Van't Riet, K., 1990, Modeling of the Bacterial Growth Curve, Applied and Environmental Microbiology, 56:6 1875-1881.
- [14] Baranyi, J., Roberts, T. A., 1995, Mathematics of Predictive Food Microbiology, International Journal of Food Microbiology, 26:2 199-218.
- [15] Kim, H., Park, J. R., Shin, S. S., Hwang, M. Y., Lim, H. C., Kim, G. H., Kim, J. T., Jeong, S. H., 2012, Study on Design and Fabrication of Illumination System for Photobioreactor by using Light Guiding Plate, Proceedings of KSPE Autumn Conference, 951-952.
- [16] Tredici, M. R., Rodolfi, L., 2004, Reactor for Industrial Culture of Photosynthetic Micro-organisms, World Patent WO, 74423, A2.
- [17] Kim, G. H., Ahn, D. G., Park, J. R., Choi, G. H., Kim, J. T., Kim, K. W., Jeong, S. H., 2013, Bioprocess Control for Continuous Culture of *Dunaliella Salina* in Flat Panel Photobioreactor, Journal of the Korean Society for Precision Engineering, 30:2 137-142.