

빛의 세기, 투과거리 및 세포농도에 따른 미세조류의 광합성 활성 모델링

윤영상, †박종문, ¹Bohumil Volesky
포항공과대학교 환경공학부 화학공학과, ¹McGill 대학교 화학공학과
(접수 : 1999. 4. 15., 게재승인 : 1999. 8. 13.)

Modeling of Microalgal Photosynthetic Activity Depending on Light Intensity, Light Pathlength and Cell Density

Yeoung-Sang Yun, Jong Moon Park†, and ¹Bohumil Volesky

Department of Chemical Engineering, School of Environmental Engineering, Pohang University of Science and
Technology, Pohang 790-784, Korea

¹Department of Chemical Engineering, McGill University, 3610 University Street, Montreal, Quebec, Canada H3A 2B2

(Received : 1999. 4. 15., Accepted : 1999. 8. 13.)

The influences of light intensity, cell density, and light pathlength on photosynthetic activity of *Chlorella vulgaris* were investigated. Since the light response curve varied according to reaction conditions, the parameters estimated from nonlinear regression were proved to be apparent and could not be applied to various situations. The light response model incorporating the light penetration through the microalgal suspension was developed based upon the spatial distribution of the photosynthetic activity. This model showed a good agreement with experimental data at different cell densities and light intensities. Using the model the effects of cell density and light pathlength were simulated and some discussions about optimization of operating conditions of photobioreactors were carried out. Concludingly, the developed model can be useful for predicting microalgal photosynthesis and for determining the optimal operating conditions.

Key Words : microalgae, *Chlorella vulgaris*, photosynthesis, light response curve, light limitation, modeling, photobioreactor, optimization

서 론

미세조류는 의약품, 식품, 사료 등 고부가가치의 유용산물을 생산할 수 있는 미생물로서 오랫동안 관심의 대상이 되어왔다(1-5). 또한 최근에는 영양염류의 제거(6,7), 중금속 흡착(8-10), 이산화탄소의 고정화(10-12) 등 환경복원을 목적으로 그 잠재력이 알려지면서 폭넓은 관련연구가 수행되고 있다. 그러나 미세조류의 상용적인 이용이 가속화되지 못하고 있는 실정인데 이는 대부분의 미세조류 배양은 빛에 의해 제한되고 있어 성장이 빠르지 못할 뿐만 아니라 이를 극복하고자 하는 광생물반응기에 대한 공학적 연구가 부족하였기 때문으로 분석되고 있다(13-15).

빛은 미세조류의 성장에 있어서 필수적인 에너지원인데 배양 용기내에 저장되지 않기 때문에 외부로부터 연속적으로 공급되어야만 한다. 또한 빛은 미세조류에 의하여 쉽게 흡수 또는 산란되어 빛을 미세조류의 배양액 내부까지 효과적으로 공급하기가 까다롭기 때문에 각종 광생물반응기는 빛을 효율적으로 전달하는데 초점을 두고 개발되어 왔다(16-20). 조류배양액 내에서

의 빛의 전달현상을 이해하고 수학적으로 표현해야만 반응기내의 빛의 분포를 예측할 수 있으며 이를 이용하여 광생물반응기를 설계하고 성능을 예측할 수 있게 된다.

미세조류의 광합성 및 성장은 빛의 세기에 따라서 크게 영향을 받는데 이를 표현하는 관계식을 흔히 광반응곡선(light response curve)라고 정의하며(21), 이는 미세조류의 종류에 따라 다른 것으로 알려져 있다. 빛의 공급이 전혀 이루어지지 않을 경우에 미세조류는 광합성을 멈추고 호흡반응만 하므로 산소를 소비하고 이산화탄소를 생산한다. 그러나 일정세기 이상의 빛이 공급될 경우 호흡속도보다 광합성속도가 빨라지면서 빛의 세기에 비례하여 산소를 생산하게 되며, 충분한 세기의 빛을 공급하면 더 이상 빛의 세기에 영향을 받지 않는다. 그러나 실제 배양에서는 이 정도로 충분한 빛을 반응기 전체에 공급하는 것은 대단히 어려운 것으로 보고되고 있으며, 따라서 대부분의 배양에서는 빛에 의해 제한을 받는 상황이 발생한다. 결국 빛은 미세조류의 배양에 있어서 가장 중요한 고려사항이므로 빛의 세기에 따른 미세조류의 활성변화를 알고 있어야만 광생물반응기의 설계 및 성능예측이 가능할 것이다.

그러나 미세조류의 광반응곡선은 세포농도, 빛의 투과거리 등 측정조건에 따라 크게 다른데 이는 빛의 전달현상과 상호연계되어 있기 때문이다. 즉 농도가 높을수록 그리고 빛의 투과거리가 증가할수록 단위세포당 산소생산속도가 감소하는 현상이 나타난다(21). 실제로 미세조류를 배양할 경우 시간에 따라서 세포

† Corresponding Author : Department of Chemical Engineering, School of Environmental Engineering Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-794, Korea
Tel : 0562-279-2275, Fax : 0562-279-2699
e-mail: jmpark@postech.ac.kr

농도는 계속 변화하고 반응기의 크기 및 형태에 따라서 빛의 투과거리는 변화되므로 각종 운전조건에서의 광반응곡선을 모두 알고 있어야만 한다. 이에 대한 정보를 실험에 의존하여 구하는 것은 시간과 비용을 생각할 때 효율적이지 못하므로 빛의 전달 현상과 빛의 세기에 따른 활성변화를 동시에 고려한 모델을 구축하여 각 조건에서의 광반응곡선을 예측하는 접근이 필요할 것이다.

본 연구에서는 빛의 세기, 세포농도 및 빛의 투과거리에 따른 미세조류의 광합성 활성의 변화를 예측하고자 하는데 그 목적이 있다. 이를 위하여 미세조류의 배양액에서 빛이 투과되는 특성을 Beer-Lambert 식으로써 표현하고자 하였으며 이를 이용하여 배양액 내부의 각 지점에서 빛의 세기 분포를 계산하고자 하였다. 또한 본 연구에서는 빛의 공간적인 분포에 따라서 광합성 활성의 공간구배가 존재한다는 점을 바탕으로 미세조류의 광합성 활성을 예측할 수 있는 모델을 구축하였다. 마지막으로 미세조류의 광합성에 영향을 미치는 세포농도 및 빛의 투과거리의 영향을 조사하였다.

재료 및 방법

미세조류

본 연구에서 사용된 미세조류는 단세포 녹조인 *Chlorella vulgaris* UTEX 259로서 the Culture Collection of Algae at the University of Texas (Austin, TX, USA)로부터 분양 받았다(22). 배양에는 KNO₃의 농도가 원래 N8 배지(23)에 비하여 두배인 질소강화(nitrogen-enriched) N8 배지를 사용하였는데 이는 *C. vulgaris*의 고농도배양에서 질소원이 부족한 것으로 나타났기 때문이다(24). 배지는 멸균(121℃, 25분)을 실시하기 전에 pH를 6.0으로 조절하였다. 본 미세조류는 100 mL의 배지를 포함한 250 mL의 플라스크에서 배양되었는데 공기를 200 mL min⁻¹으로 공급하면서 150 rpm으로 회전되는 rotary shaker 위에서 배양이 실시되었다. 이때 200±50 μE m⁻² s⁻¹의 빛을 형광등(20 watt, 한국GE)을 이용하여 연속적으로 조사하였으며 온도는 27℃로 유지되었다. 미세조류의 배양에서 매일 배양부피의 50%를 질소강화 N8 배지로 교체하였으며 이는 약 33 h의 세포 배가시간에 해당한다. 배지의 교체 전에 미세조류의 농도는 약 1.8 g dry weight l⁻¹으로 유지되었다.

상기의 방법으로 유지되고 있는 배양으로부터 일정량의 미세조류를 수확하여 실험에 사용하였는데, 수확된 미세조류는 3000 rpm에서 15분간 원심분리한 후 기 사용배지를 버리고 새로운 배지를 이용하여 다시 유동화 하였다. 이러한 원심분리 및 세척을 3회 반복한 다음 각 실험조건에 맞도록 세포의 농도를 조절 한 이후에 빛의 투과실험 및 광합성 활성 측정을 위해 사용하였다. 이러한 과정은 정밀한 광합성 활성을 측정하는데 있어서 영향을 미칠 수 있는 수소이온 및 영양염류의 농도를 모든 실험에서 일정하게 유지하기 위함이다. 즉 본 연구에서 사용된 반응매질은 항상 nitrogen-enriched N8 배지이었다. 미세조류의 농도는 건조중량으로 나타내었는데 조류배양액 5 mL을 0.45 μm 여과지에 거른 후 90℃에서 24시간 동안 건조하여 측정하였다.

빛의 투과특성 실험

빛의 투과실험을 위하여 미세조류 현탁액을 직육면체의 플라

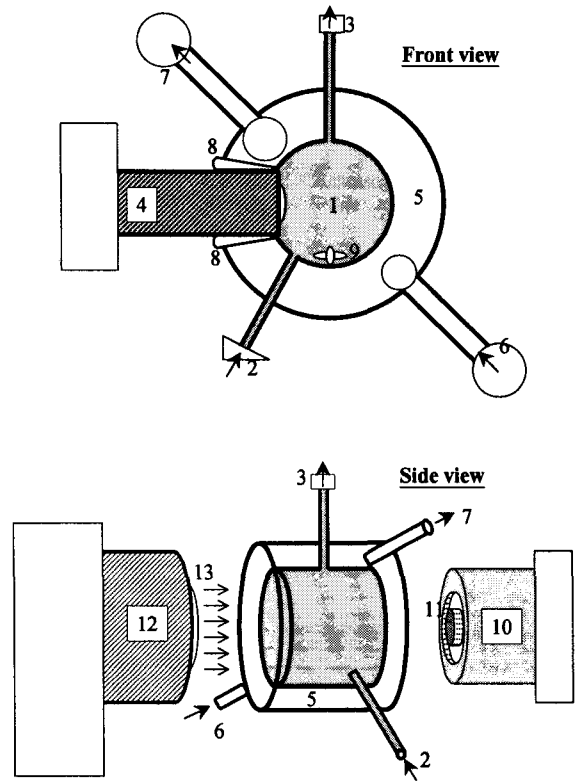


Figure 1. Schematic diagram of the photosynthetic activity measurement reaction cell. 1: microalgal suspension, 2: inlet of sample, 3: outlet of sample, 4: dissolved oxygen electrode, 5: cooling water jacket, 6: inlet of cooling water, 7: outlet of cooling water, 8: septum, 9: magnetic bar, 10: quantum sensor, 11: convex lens.

스틱 용기에 붓고 상부에서 형광등(20 watt, 한국GE)을 이용하여 191 μE m⁻² s⁻¹의 빛을 조사하였다. 이때 용기의 벽을 검은 종이로 도포하여 빛이 플라스틱 용기에서 반사되는 것을 최소화 하였다. 광센서(LX-101, Luton)를 조류배양액 안으로 투입한 후 수직으로 위치를 이동하면서 각 지점의 빛의 세기를 측정하였다. 이때 측정동안 미세조류의 농도를 균일하게 유지하고 빛을 산란시킬 수 있는 미세한 공기방울을 제거하기 위하여 magnetic stirrer를 이용하여 천천히 교반하였다. 빛의 투과실험은 각기 다른 농도의 미세조류 배양에 대하여 실시하여 궁극적으로 Beer-Lambert 식에서 specific absorption coefficient를 구하고자 하였다.

광합성 측정장치

광합성반응이 진행되면 이산화탄소는 흡수되고 산소가 발생하는데 일반적으로 광합성 활성은 산소의 생산속도로서 표현되고 있다(21). 미세조류의 광합성활성을 측정하기 위하여 pyrex glass로 제작된 원기둥형태의 반응용기를 제작하였는데 빛의 투과거리는 1.8 cm이며 부피는 3.58 mL이었다. 미세조류의 광합성 활성은 온도에 대단히 민감하기 때문에(1,25) 정교한 온도제어가 필요하므로 반응용기의 외부에는 일정온도(27℃)의 냉각수가 연속적으로 흐르게 하였다(Figure 2). 반응용기 내에는 미세

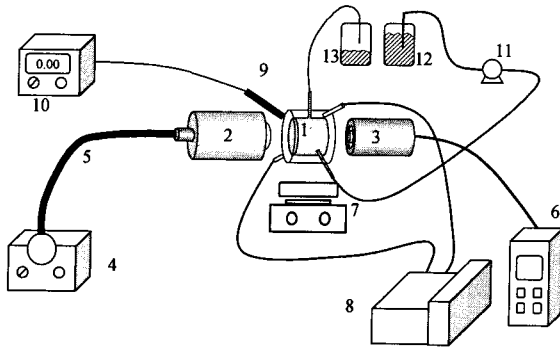


Figure 2. Schematic diagram of the photosynthetic activity measurement system. 1: reaction cell, 2: convex lens, 3: quantum sensor, 4: quartz halogen lamp, 5: optical fiber, 6: data logger, 7: magnetic stirrer, 8: water bath, 9: dissolved oxygen electrode, 10: dissolved oxygen meter, 11: peristaltic pump, 12: sample reservoir, 13: waste reservoir.

조류의 완벽한 혼합을 위하여 magnetic bar를 삽입하였으나 빛의 투과면적에 비해 대단히 작은 크기였기 때문에 빛의 투과에 영향을 주지 않았다(자료미제출). 시간에 따른 용존산소의 농도를 측정하기 위하여 전극(Ingold)을 빛의 입사방향과 수직으로 장착하였다. 빛은 반응용기의 한쪽방향에서 조사되었는데 광원으로는 150 watt quartz halogen lamp (A-3200, Dolan-Jenner)이었으며 빛은 광섬유를 통하여 반응용기까지 전달되었다(Figure 2). 이때 빛의 확산을 방지하고 직진을 유도하기 위하여 볼록렌즈가 장착되었는데 볼록렌즈의 선후 움직임을 통하여 정확히 초점을 조절할 수 있도록 하였다. 또한 lamp에서 나오는 광선중에서 광합성에 저해를 주거나 필요없는 자외선 및 적외선 영역은 광 filter를 이용하여 제거하였다. 반대쪽에는 통과되어 나오는 빛의 세기를 측정하기 위하여 quantum sensor (LI-190A, Licor)를 장착하였는데 이로부터 나오는 신호는 data logger(LI-1000, Licor)에서 시간당 면적당 광자의 양으로 환산되었다. 이때 quantum sensor는 미세조류가 갖는 색소에 의하여 흡수되어 광합성에 유용하게 쓰일 수 있는 400~700 nm의 파장영역 (photosynthetically active radiation: PAR)만을 선택적으로 감지할 수 있도록 설계되어 있다. 빛의 세기는 lamp와 광섬유 사이의 연결부에서 접촉면적을 조절함으로써 변화되었고 결과적으로 렌즈 밖으로 나오는 빛의 세기가 결정되었다.

광합성 활성의 측정

광합성 활성을 측정하기 전에 측정장치를 검량하기 위하여 반응용기에 물을 채우고 접촉면적을 조절하는 밸브의 눈금에 따라서 빛이 공급되는 반대쪽에서 빛의 세기가 측정되었으며(Figure 2) 이때 측정된 빛의 세기를 입사세기로 정의하였는데 이는 pyrex glass 및 냉각수, 그리고 반응용기내의 물에 의하여 흡수되는 빛은 미세조류에 의하여 흡수되는 빛에 비하여 무시할 수 있다는 가정을 바탕으로 하고 있다(25,26). 미세조류의 현탁액을 상기 방법에 의하여 준비한 이후에 2시간 동안 빛을 차단한 상태에서 27°C로 유지되고 있는 shaker에서 교반하였다. 이것은 미세조류 세포를 모든 실험에서 같은 상태로 유지하기 위함이며 부수적으로 용존산소의 농도를 감소시키는 효과가 있다. 준비된

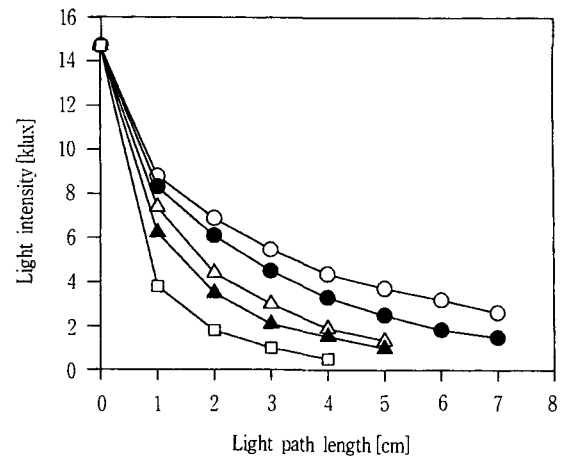


Figure 3. Light attenuation through the microalgal suspension with different cell density.

The cell densities are ○: 0.11, ●: 0.21, △: 0.27, ▲: 0.37, and □: 0.47 g dry weight l^{-1} .

미세조류 시료는 peristaltic pump를 이용하여 반응용기에 투입되었으며 반응용기가 액상시료로 완전히 채워져서 기상부분이 존재하지 않고 미세한 공기방울까지 완벽하게 제거된 것을 확인한 이후에 펌프의 작동을 멈추고 활성측정을 시작하였다. 광합성 활성의 측정은 일정한 빛의 세기로 조사되고 있는 동안에 용존산소의 농도의 증가를 시간에 따라 측정하였는데 빛이 조사되기 시작한 이후 1분 이내에 선형적인 증가가 시작되었으며 이로부터 산소생산속도를 계산하였다. 이와 같은 방법으로 빛의 세기 및 미세조류의 세포농도를 변화시키면서 실험을 수행하였다.

결과 및 토론

빛의 투과실험

빛이 조류배양액을 통하여 통과될 때 미세조류가 가지고 있는 각종 색소에 의하여 흡수되기도 하고 빛의 파장에 비하여 상대적으로 큰 미세조류 세포에 의하여 산란되기도 한다. 이러한 복잡한 빛의 전달 메커니즘을 모두 고려하여 정량적으로 표현하는 것은 대단히 어려운 일이므로 일반적으로 아래의 Beer-Lambert 식 (1)으로 간단히 표현하고 있다. 즉 일정한 세포농도 (X)에서 입사되는 빛의 세기 (I_0)는 빛의 투과거리 (l)에 따라서 지수함수적으로 감소하여 각 거리에서의 빛의 세기 (I)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$I(X, l) = I_0 \exp(-\epsilon X l) \quad (1)$$

여기서 ϵ 는 specific absorption coefficient이다. 그러나 위의 식은 순수한 색소가 녹아있는 용매를 통하여 단색광이 통과할 경우에만 맞는 식이다. 즉 미세조류의 배양액과 같이 색소가 세포내에만 존재하며 세포에 의하여 산란이 일어나는 경우에는 이론적으로 적용할 수 없으며 특히 다양한 파장을 함유한 다색광이 사용될 경우에는 오차가 좀 더 발생할 수 있다. 따라서 Beer-Lambert 식을 사용하기 위해서는 specific absorption coefficient를 실험적으로 구하는 것이 바람직하며 균질한 chlorophyll 용액으로 가정하여 계산하면 packaging effect 등으로 인한 오

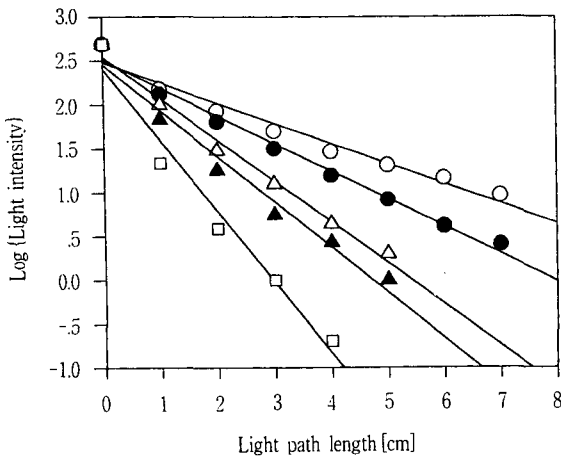


Figure 4. Semi-logarithmic plot of light intensity vs light penetration length. The cell densities are ○: 0.11, ●: 0.21, △: 0.27, ▲: 0.37, and □: 0.47 g dry weight l⁻¹.

차가 큰 것으로 알려지고 있다(21). 따라서 본 연구에서는 Figure 3과 같이 실험적으로 빛의 투과특성을 살펴보았다. 미세조류의 배양액을 통과하면서 빛의 세기는 급격히 감소하는데 특히 세포농도가 증가할수록 그 감소폭이 더 크게 나타났다(Figure 3). 식 (1)을 정리하면 아래의 식 (2)와 같이 각 농도에서의 결과를 선형화할 수 있는데 Figure 4에서 보는 바와 같이 대체적으로 모든 농도에서 선형적인 경향을 보여주고 있다.

$$\ln \{K(X, l) / I_0\} = -\epsilon X l \quad (2)$$

식 (2)로부터 다시 specific absorption coefficient는 Figure 5와 같이 1.63 dm³ g⁻¹ cm⁻¹로 나타났다. 즉 미세조류 배양액 내에서 빛의 투과거리에 따른 빛의 감소현상을 Beer-Lambert 식으로 대략적으로 표현할 수 있었다.

광반응곡선 실험

*C. vulgaris*의 광반응곡선을 표현하기 위하여 광합성 활성을 단위 용적당 산소생산속도 및 단위 건조중량당 산소생산속도로 나타내었으며 이를 빛의 입사세기의 함수로서 나타내었다(Figure 6 및 7). Figure 6에서와 같이 광반응곡선은 낮은 빛의 세기에서는 빛의 세기에 크게 영향을 받으나 높은 세기에서는 거의 일정한 값에 도달함을 보여주었으며 실시된 실험범위에서는 빛에 의한 저해현상은 발견되지 않았다. 낮은 세포농도에서는 약 150 μE m⁻² s⁻¹ 이상에서 빛의 세기에 독립적이거나 높은 농도에서는 약 400 μE m⁻² s⁻¹ 이상에서 독립구간이 나타나고 있다. 단위 용적당 산소생산속도는 세포농도가 높은 경우에 크게 나타나지만 세포농도가 4배의 차이가 남에도 불구하고 최고 산소생산속도는 3.1배로서 고농도에서는 세포당 산소생산량이 오히려 감소함을 알 수 있다(Figure 7). 즉 단위 건조중량당 산소생산속도는 낮은 세포농도에서 오히려 1.2배 가량 큰 것을 보여주고 있다(Table 1).

이와 같은 광반응곡선을 좀더 정량적으로 나타내기 위하여 일반적으로 식 (3)과 같은 경험식이 사용되고 있다. 즉 산소생산속도(P^{app})를 입사되는 빛의 세기(I_0)의 함수로서 표현하는 수식

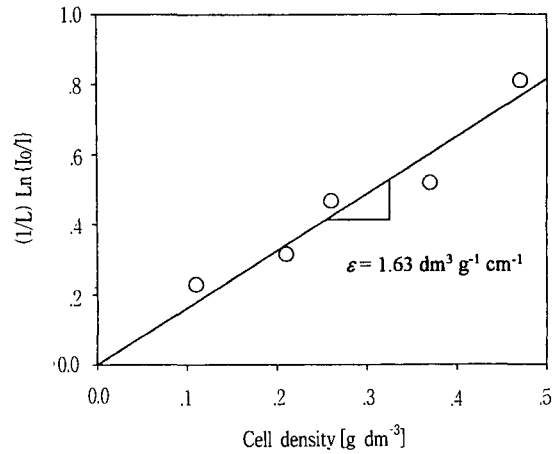


Figure 5. Specific light absorption coefficient.

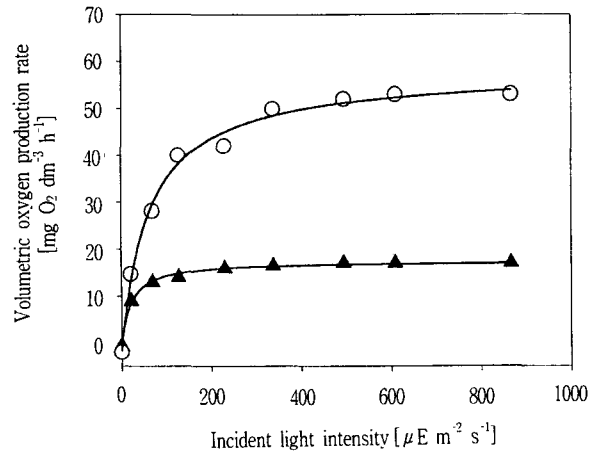


Figure 6. Dependence of volumetric photosynthetic activity on incident light intensity. The cell densities are ○: 0.532 and ▲: 0.133 g dry weight l⁻¹.

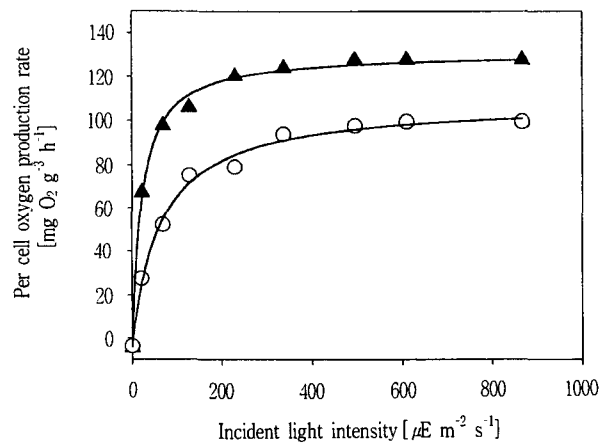


Figure 7. Dependence of per cell photosynthetic activity on incident light intensity. The cell densities are ○: 0.532 and ▲: 0.133 g dry weight l⁻¹.

으로써 최대 산소생산속도(P_{max}^{app}) 및 반포화상수(K^{app}), 그리고 호흡속도(R^{app})가 매개변수로 포함되어 있다. 이러한 매개변수의 단위는 산소생산속도에 따라 결정된다(Table 1).

Table 1. Apparent parameters of the light response curves.*

Parameters	Volumetric activity		Parameters	Per cell activity	
	0.133 g dm ⁻³	0.532 g dm ⁻³		0.133 g dm ⁻³	0.532 g dm ⁻³
$P_{V,max}^{app}$ mg O ₂ dm ⁻³ h ⁻¹	18.0 (0.45)	59.5 (2.00)	$P_{X,max}^{app}$ mg O ₂ g ⁻¹ h ⁻¹	135.0 (3.37)	111.8 (3.77)
K_V^{app} μE m ⁻² s ⁻¹	21.0 (2.06)	62.9 (8.61)	K_X^{app} μE m ⁻² s ⁻¹	21.0 (2.06)	62.9 (8.61)
R_V^{app} mg O ₂ dm ⁻³ h ⁻¹	0.52 (0.41)	1.57 (1.74)	R_X^{app} mg O ₂ g ⁻¹ h ⁻¹	3.92 (3.06)	2.96 (3.27)
r ²	0.996	0.993	r ²	0.996	0.993

* Standard errors are given in parentheses.

$$P^{app} = \frac{P_{max}^{app} I_o}{K^{app} + I_o} - R^{app} \quad (3)$$

Table 1은 실험결과로부터 비선형회귀법(27)을 이용하여 추정된 매개변수를 나타내고 있다. 즉 미세조류의 농도에 따라서 광반응곡선을 나타내는 매개변수가 상당한 차이를 보이고 있다. 따라서 특정농도에서 구한 매개변수는 다양한 조건하에서의 광반응곡선을 예측하는데 이용될 수 없는 것이며 단지 특정실험 조건에서의 결과는 대표하는 외관매개변수(apparent parameters)임을 알 수 있다. 결국 이렇게 조건에 따라 변화하는 광반응곡선을 예측하기 위해서는 빛의 투과특성 및 빛에 의한 미세조류의 의존성을 동시에 고려하는 모델이 요구된다고 할 수 있다.

광반응곡선 모델링

본 연구에서 사용된 반응용기는 1.8 cm의 투과거리를 갖는 아주 작은 용기임에도 불구하고 위치에 따라 빛의 분포가 존재한다. 따라서 각 위치에 있는 미세조류는 각각 다른 빛의 세기에 노출되어 있다고 생각할 수 있다. 이때 특정위치에 있는 미세조류가 갖는 단위 건조중량당 광합성활성($P_X(X, l)$)은 특정위치에 도달된 빛의 세기($I(X, l)$)의 함수로서 생각할 수 있다(식 (4)).

$$P_X(X, l) = \frac{P_{max} I(X, l)}{K + I(X, l)} - R_X \quad (4)$$

여기서 하첨자 X는 단위 건조중량당 활성을 표현하고 있으며 식 (4)에 포함된 매개변수는 모두 고유한(intrinsic) 값이다. 그러나 측정이 가능한 값은 반응용기 내에서 전체적으로 생산되는 부피당 산소생산속도(P_V^{app})이며 실제로 이것이 관심의 대상이라고 볼 수 있다. 즉 식 (4)에서 보여주고 있는 각 지점에서의 광합성 활성은 전체 반응용기에 대하여 식 (5)와 같이 평균되어야 한다. 본 실험에서 사용된 반응용기의 경우 빛이 통과하는 단면적이 일정하기 때문에 빛의 투과거리(L)에 대하여서만 평균이 이루어지면 된다.

$$P_V^{app} = \frac{\int_0^L X \left\{ \frac{P_{max} I(X, l)}{K + I(X, l)} - R_X \right\} dl}{\int_0^L dl} \quad (5)$$

Table 2. Intrinsic parameters of the model*.

Parameters	Unit	Value	Standard error
P_{max}	mg O ₂ g ⁻¹ h ⁻¹	113.7	39.7
K	μE m ⁻² s ⁻¹	28.7	9.5
R_X	mg O ₂ g ⁻¹ h ⁻¹	3.4	1.4

* r² = 0.995, p value = 0.0001

이때 반응용기 내부는 magnetic bar에 의하여 충분히 혼합이 이루어지고 있으므로 미세조류의 세포농도는 모든 지점에서 같은 값을 가지므로 식 (5)에서의 적분에서 상수로서 취급될 수 있다. 따라서 각 지점에서의 빛의 세기를 나타내고 있는 식 (1)을 식 (5)에 대입하여 적분을 실시하면 다음과 같은 식 (6)을 얻을 수 있게 된다.

$$P_V^{app} = \frac{P_{max}}{\epsilon L} \ln \left\{ \frac{I_o + K}{I_o \exp(-\epsilon XL) + K} \right\} - X R_X \quad (6)$$

식 (6)에 포함되어 있는 고유의 매개변수들은 실험을 통하여 직접적으로 구할 수 없는 것이나 이미 구해진 실험결과(Figure 6)를 바탕으로 추정할 수 있다. 본 연구에서는 Marquardt-Levenberg algorithm(27)에 따라 SigmaPlot(4.0, SPSS, Inc.)를 이용하여 비선형회귀곡선을 구하였다. 이러한 방법으로 구한 매개변수는 Table 2에 나타내었으며 실험치와 계산치의 비교는 Figure 8에서 볼 수 있다. 즉 위의 모델은 각기 다른 미세조류 세포농도에서의 광반응곡선을 잘 나타내고 있음을 알 수 있다. 결과적으로 빛의 세기는 투과거리에 따라 변화하고 이에 따라 광합성활성이 영향을 받으므로 활성의 공간구배가 존재한다는 가정 하에 만들어진 식 (6)은 반응조건에 따른 광반응곡선을 예측하는데 유용하게 이용될 것으로 판단된다. 또한 본 연구에서는 빛의 투과가 직교좌표계에서 일방향으로만 일어나는 경우에 해당하는데 실제로 태양빛이 위에서 조사되고 있는 raceway pond에서와 동일한 상황이라고 볼 수 있다. 따라서 조류배양에 가장 보편적으로 이용되고 있는 raceway pond에서 조류의 광합성 활성을 예측하는데 적용이 가능할 것으로 판단된다(28). 그러나 옥외용 관형광생물반응기나 다양한 형태의 옥내용 광생물 반응기의 경우 위 식을 그대로 적용할 수 없을 것이다. 왜냐하

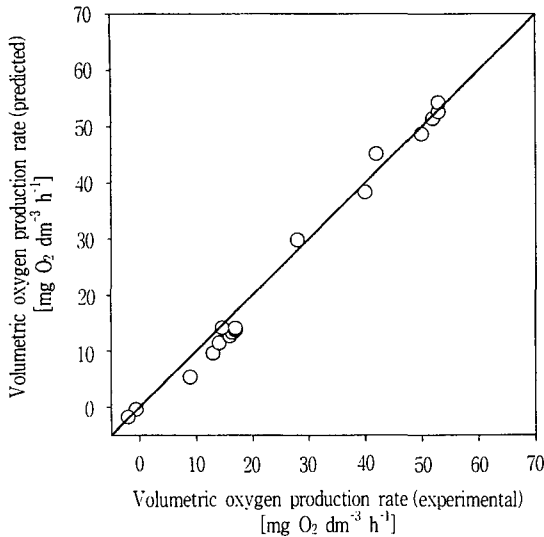


Figure 8. Comparison between the predicted and experimental volumetric oxygen production rate.

이 경우에는 반응기 내에서의 빛의 분포를 계산하기 위하여 좀더 복잡한 과정이 요구되기 때문이다.

빛의 세기, 세포농도 및 투과거리에 따른 산소생산속도

위의 모델을 이용하여 광반응곡선에 크게 영향을 미치는 미세조류의 세포농도 및 빛의 투과거리에 대한 효과를 계산하였다. 이때 사용된 매개변수는 Table 2와 같으며 입사되는 빛의 세기를 다양하게 변화시키면서 광합성 활성을 살펴보았다.

먼저 미세조류의 세포농도에 따른 효과는 Figure 9에 나타나 있다. 단위 부피당 산소생산속도는 모든 빛의 세기에서 동일한 경향을 보이고 있다. 즉 단위 부피당 산소생산속도는 세포농도가 증가할수록 급격히 증가하다가 최고점에 이르러서는 서서히 감소하고 있다. 이러한 경향은 실제로 옥외배양 결과에서도 발견되고 있는데 결과적으로 부피당 생산속도를 위한 최적의 세포농도가 존재하는 것으로 알려지고 있다(1,3-5). 따라서 최대의 광합성 활성을 얻기 위해서는 광생물반응기내의 세포농도를 최적으로 유지할 필요가 있을 것이다. 그러나 단위 건조중량당 산소생산속도는 세포농도가 증가할수록 항상 감소하는 경향을 보여주고 있다. 한편 빛의 세기가 증가하면 단위 부피당 및 단위 건조중량당 생산속도가 향상됨을 알 수 있다. 그러나 Figure 9에서 보는 바와 같이 빛의 세기는 약 5배씩 증가하였지만 생산속도는 그 증가폭이 작아지고 있다. 결국 강한 빛이 공급될 경우 효율(광자공급 당 산소생산)은 점차 감소한다는 사실을 알 수 있는데 이러한 경향은 미세조류의 광합성에서 이미 잘 알려져 있다(2-5,28). 따라서 인공조명을 사용하여 미세조류를 배양할 경우 빛의 공급은 에너지의 소비를 의미하므로 광합성 속도 및 효율을 동시에 고려하여 최적의 조사량을 결정하는 것이 바람직할 것이다.

일정한 미세조류의 세포농도가 일정한 상태에서 빛의 투과거리가 변화할 경우 산소생산속도는 Figure 10에 나타난 바와 같다. 빛의 투과거리에 따른 광합성 활성의 변화 경향은 단위 부피당 속도 및 단위 건조중량당 속도가 같은 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 같은 세기의 빛이 입사되고 있는 경우 빛

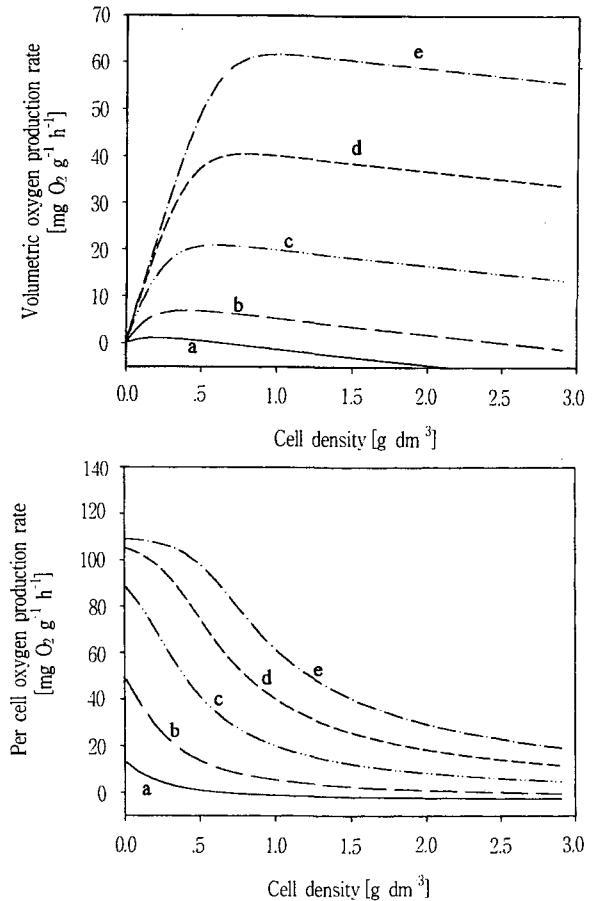


Figure 9. Effect of cell density on the photosynthetic activity at different incident light intensities. The incident light intensities are a: 5, b: 25, c: 125, d: 625, and e: 3125. The light pathlength is 5 cm.

의 투과거리가 증가할수록 단위 부피당 및 단위 건조중량당 산소생산속도는 감소하고 있다. 따라서 빛의 투과거리를 작게 유지하면 산소생산속도를 크게 유지할 수 있음을 알 수 있다. 그러나 대단히 강한 빛을 조사할 경우에는 일정한 투과거리까지는 최고의 산소생산속도를 유지하는 것으로 나타나고 있다. 그러므로 조류배양에서 최적의 투과거리를 결정하는 것은 공급되는 빛의 세기와 함께 고려되어야 할 것이다.

이상에서는 광합성 활성에 영향을 미치는 세포농도, 빛의 투과거리 및 빛의 세기와 같은 주요인자에 대하여 살펴보았다. 결국 미세조류의 광합성 활성을 최대로 유지시키기 위해서는 상기의 인자를 동시에 고려해야만 한다는 결론을 얻을 수 있다. 예를 들어 raceway pond의 옥외운전의 경우 공급되는 빛은 태양으로부터 오기 때문에 일사량의 변화에 따라 최적의 운전조건은 함께 변화한다. 이러한 경우에는 옥외에서의 일사량을 연속적으로 측정하여 이로부터 최적운전조건을 계산, 적용함으로써 최대의 성능을 도출할 수 있을 것이다. 그러나, 옥내배양의 경우 공급되는 빛은 인공조명으로서 인위적으로 세기의 조절이 가능하다. 옥내 광생물반응기에서 희분식 배양이 실시될 경우 미세조류가 성장하면서 세포농도가 연속적으로 변화하게 되므로 성장속도 및 광합성효율을 동시에 고려하면서 각 세포농도에서의 최적의 빛 조사량을 결정해야만 할 것이다. 결론적으로 본 연구를

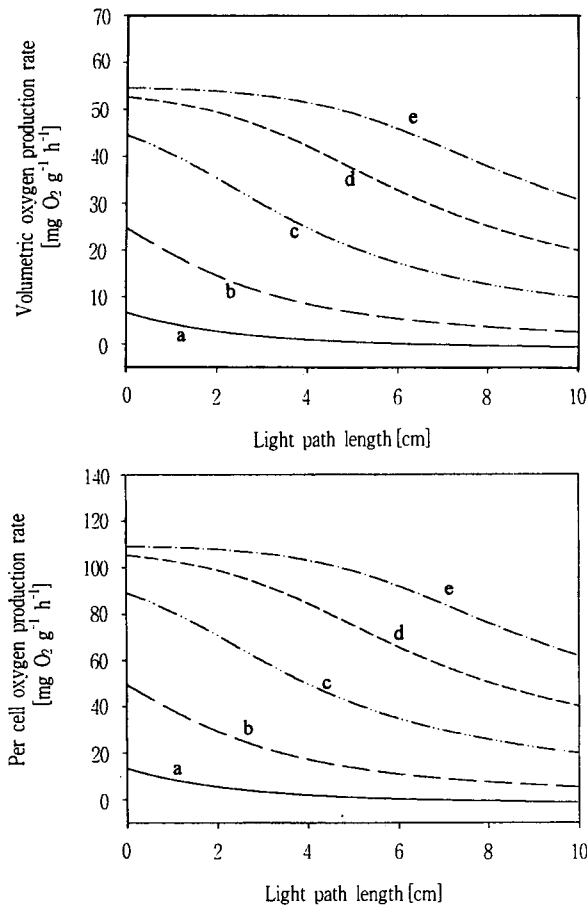


Figure 10. Effect of light pathlength on the photosynthetic activity at different incident light intensities.

The incident light intensities are a: 5, b: 25, c: 125, d: 625, and e: 3125. The cell density is 0.5 g dry weight dm^{-3} .

통하여 제시된 빛의 투과특성에 의거한 모델은 미세조류의 광합성을 예측하고 광생물반응기의 최적운전조건을 결정하는데 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

요 약

본 연구에서는 미세조류의 배양액을 통한 빛의 전달특성을 수식적으로 표현하고 이를 바탕으로 광합성 활성을 예측할 수 있는 수학적 모델을 구축하였다. 먼저 미세조류의 배양액에서의 빛의 거동은 Beer-Lambert 식으로서 개략적으로 표현할 수 있었다. 미세조류의 광합성을 산소생산속도로서 나타낸 결과 미세조류의 농도가 높은 경우 낮은 농도에 비하여 단위 부피당 활성은 크게 나타난 반면 단위 건조중량당 활성은 오히려 낮게 나타났다. 이렇게 운전조건에 의존적인 광반응곡선을 예측하기 위하여 국부적인 광합성 활성을 가정하고 이를 전체부피에 대하여 평균하는 방법으로 수리적인 모델을 구축하였다. 또한 실험결과를 이용하여 고유 매개변수를 추정하였으며 예측치와 실험치를 비교한 결과 우수한 일치성을 확인하였다. 모델을 이용하여 광합성 활성에 크게 영향을 미치는 빛의 세기, 세포농도 및 빛의 투과특성과 같은 주요 운전조건에 대하여 그 영향을 살펴보았다. 그 결과 빛의 세기가 강할수록 광합성활성은 증가하지만 광

합성효율은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. 미세조류의 세포농도의 경우 단위 부피당 산소생산속도를 위한 최적의 농도가 존재함을 알 수 있었으며 이는 조사되는 빛의 세기에 따라 변화하였다. 빛의 투과거리가 짧을수록 광합성 효율은 증가하지만 충분히 강한 빛이 공급될 경우에는 일정한 투과거리까지는 최고치를 유지하였다. 결론적으로 광생물반응기의 성능을 예측하고 최적조건을 결정하는데 제시된 모델이 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

이 논문은 1997년도 한국학술진흥재단의 대학교수 해외파견 연구지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- Borowitzka, M. A. and L. J. Borowitzka (1988), *Microalgal Biotechnology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Bulew, J. S. (1953), *Algal Culture from Laboratory to Pilot Plant*. Carnegie Institution of Washington Publication, Washington, D. C..
- Cresswell, R. C., T. A. V. Ress, and N. Shah (1989), *Algal and Cyanobacterial Biotechnology*. Longman Science & Technical, UK.
- Becker, E. W. (1994), *Microalgal Biotechnology and Microbiology*. Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- Richmond, A. (1986), *Handbook of Microalgal Mass Cultures*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Svoboda, I. F. and H. J. Fallowfield (1989), An aerobic piggery slurry treatment system with integrated heat recovery and high-rate algal pond. *Wat. Sci. Technol.*, 21, 277-287.
- Banat, J., K. Puskas, I. Esen, and R. Al-Dahar (1990), Wastewater treatment and algal productivity in an integrated ponding system. *Biol. Wastes*, 32, 265-275.
- Volesky, B. (1990), *Biosorption of Heavy Metals*. CRC Press, Boca Raton, FL.
- Wilde, E. W. and J. R. Benemann (1993), Bioremoval of heavy metals by the use of microalgae. *Biotechnol. Adv.*, 11, 781-812.
- Yun, Y.-S., S. B. Lee, J. M. Park, C.-I. Lee and J.-W. Yang (1997), Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients, *J. Chem. Tech. Bioetchnol.*, 70, 451-455.
- Karube, T., T. Takeuchi and D. J. Barnes (1992), Biotechnological reduction of CO₂ emissions. *Adv. Biochem. Eng./Biotechnol.*, 46, 63-79.
- Hall, D. O. and J. I. House (1993), Reducing atmp-spheric CO₂ using biomass energy and photobiology. *Energy Convers. Manag.*, 34, 889-896.

13. Richmond, A. (1988), Large scale microalgal culture and applications. *Prog. Phycol. Res.*, 7, 1-62.
14. Soeder, C. J. (1980), Mass cultivation of microalgae: results and prospects. *Hydrobiology*, 11, 274-280.
15. Goldman, J. C. (1979), Outdoor algal mass cultures: II. Photosynthetic yield limitations. *Wat. Res.*, 13, 119-136.
16. Pirt, S. J., Y.-K. Lee, M. R. Walach, M. W. Pirt, H. H. M. Balyuzi, and M. J. Bazin (1983), A tubular photobioreactor for photosynthetic production of biomass from CO₂: Design and performance. *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, 33B, 35-58.
17. Roubicek, R. V., K. H. Patton, K. H. McCorkle, and A. L. Rakow (1986), Cultivation of microalgae in a photobioreactor. *Algal Biomass Technologies* (W. R. Barclay and R. P. McIntosh, eds), pp. 218-221, Cramer, Berlin, Germany.
18. Mori, K. (1985), Photoautotrophic bioreactor using solar rays condensed by fresnel lenses. *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, 15, 331-345.
19. Tredici, M. R., P. Carozzi, G. C. Zittelli, and R. Materassi (1991), A vertical alveolar panel (VAP) for outdoor mass cultivation of microalgae and cyanobacteria. *Bioresource Technol.*, 38, 153-160.
20. Burgess, J. G., K. Iwamoto, Y. Miura, H. Takano, and T. Matunaga (1993), An optical fiber photobioreactor for enhanced production of the marine unicellular alga *Isochrysis* aff. *Galgana* T-Iso (UTEX LB 2307) rich in docosahexaenoic acid. *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, 39, 456-459.
21. Geider, R. J. and B. A. Osborne (1992), *Algal Photosynthesis*. Chapman & Hall, Inc., New York, NY.
22. Starr, R. C. and J. A. Zeikus (1993), UTEX: the Culture Collection of Algae at the University of Texas at Austin. *J. Phycol.*, 29 (Suppl.), 1-106.
23. Vonshak, A. (1986), Laboratory techniques for the cultivation of microalgae, *Handbook of Microalgal Mass Culture* (A. Richmond, ed), pp. 117-145, CRC Press, FL.
24. Yun, Y.-S. and J. M. Park (1997), Development of gas recycling photobioreactor system for microalgal carbon dioxide fixation. *Kor. J. Chem. Eng.*, 14, 297-300.
25. Dubinsky, Z., P. G. Falkowski, A. F. Post, and U. M. Van Hes (1987), A system for measuring phytoplankton photosynthesis in a defined light field with an oxygen electrode. *J. Plankton Res.*, 9, 607-612.
26. Yun, Y.-S., S. R. Lim, K.-K. Cho and J. M. Park (1997), Variations of photosynthetic activity and growth of freshwater algae according to ozone contact time in ozone treatment, *Biotechnol. Lett.*, 19, 831-833.
27. Marquardt, D. W. (1963), An algorithm for least square estimation of parameters, *J. Soc. Ind. Appl. Math.*, 11, 431-441.
28. Yun, Y.-S., J. M. Park, and B. Volesky (1999), Simultaneous treatment of carbon dioxide and ammonia by microalgal culture, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, 14, 328-336.