

# 도광판의 간격이 *Chlorella vulgaris* 증식에 미치는 영향 Effect of Optical Panel Distances on the Growth Rate of *Chlorella vulgaris* in a Photobioreactor

최희정<sup>†</sup> · 이승목 · 유성환  
H. J. Choi<sup>†</sup> · S. M. Lee · S. W. Yu

관동대학교 보건환경학과  
Department of Environment & Health, Kwandong University

(2013년 1월 19일 접수, 2014년 3월 10일 채택)

**Abstract** : The aim of this study is to optimize the efficiency of a photobioreactor on the growth rate of *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*) by varying distance of optical panel (OP). The round shaped *C. vulgaris* (FC-16) having the size of 3-8  $\mu\text{m}$  is employed in this study. The cells of *C. vulgaris* are cultured in the Jaworski's Medium with deionized water at 22°C for 15 days. The OP is placed at four different distances i.e., at 225 mm distance (Run 1), 150 mm distance (Run 2), 112.5 mm distance (Run 3) and 90 mm distance (Run 4) having a LED (Light Emitting Diode) source. The diffuse rate is achieved to 86%, 90%, 92% and 94% for Run 1, Run 2 Run 3 and Run 4, respectively. A narrower distance of OP caused to effectively increase the efficiency of diffuse light rate. For mass cultivation of this biomass, medium is changed according to distance of OP after attaining a maximum biomass concentration; Run 1 in 8 days, Run 2 in 6 days, Run 3 in 4 days and Run 4 in 3 days. In addition, the amount of maximum biomass rate for Run 4 was reached 3 times higher than that of Run1. However, growth rate, chlorophyll per cell, cell volume and doubling time are found to be Run 3 and Run 4 higher than that of Run 1 and Run 2 samples. However, Run 3 and Run 4 are having a slight difference in all these measurements. These findings suggest that in terms of economic consideration and efficiency towards simultaneous mass cultivation of biomass, Run 3 was found to be more effective than other samples.

**Key Words** : *Chlorella vulgaris*, Optical Panel, Biomass, Photobioreactor, Microalgae

**요약** : 본 연구는 도광판의 간격이 *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*)의 증식률에 미치는 영향을 알아보고자 하였다. *C. vulgaris* (FC-16) (3-8  $\mu\text{m}$ )는 Jaworski's Medium 에 22°C에서 15일 증식시킨 뒤 사용하였다. 실험을 위하여 네 개의 샘플을(Run 1: 225 mm 간격, Run 2: 150 mm 간격, Run 3: 112.5 mm 간격, Run 4: 90 mm 간격) 준비하여 도광판의 간격이 *C. vulgaris*의 증식률에 미치는 영향을 비교 실험하였다. 광효율은 Run 1이 86%, Run 2가 90%, Run 3가 92% 그리고 Run 4가 94%의 광효율을 나타내어 도광판의 간격이 짧을수록 광효율은 높았으며, 도광판의 간격에 따라 Run 1은 7일째, Run 2는 5일째, Run 3는 3일째 그리고 Run 4는 2일째에 최대 바이오매스 증식률을 나타내었다. 또한, 최대 증식률은 Run 4가 Run 1에 비해 3배 높았다. 그러나, 증식속도, 셀 당 클로로필 함량 및 단위면적 당 Cell volume 그리고 Doubling time은 Run 1과 Run 2에 비해 Run 3와 Run 4가 높았지만 Run 3과 Run 4는 크게 차이가 없었다. 따라서 경제적인 부분을 고려한다면 바이오매스의 대량생산을 위하여 Run 3의 사용이 가장 효율적이라 생각된다.

**주제어** : 클로렐라 볼가리스, 도광판, 바이오매스, 광 반응기, 미세조류

## 1. 서론

지구온난화의 주요한 원인인 이산화탄소 저감과 화석연료 고갈에 따른 자원 위기 대처를 위한 신재생에너지 개발이 전 세계적으로 매우 뜨거운 이슈가 되고 있다.<sup>1)</sup> 국제 에너지 기구(International Energy Agency, IEA)는 석유 및 천연 가스 등의 화석연료의 매장량은 각각 약 40년, 약 60년 후에는 고갈될 것으로 예상하고 있으며, 2008년부터 2035년까지 세계 에너지 수요가 총 36% 증가할 것으로 예상하고 있다. 이러한 에너지문제에 대처하기 위하여 대체 에너지 및 신재생에너지의 개발이 전 세계적으로 절실히 요구되고 있다. 현재 바이오 에너지 생산을 위한 주원료로는 옥수수, 콩, 야자열매 등의 식용작물이 주로 사용되고 있는데, 이러한 식용작물은 지구상의 식량문제가 아직 해결이 되지 않은 상

태에서 발생하는 윤리적 문제, 그리고 이러한 작물을 재배 하는데 동반되는 환경 오염문제 등에서 자유롭지 못하다. 그러나 미세조류는 작물을 재배하는데 동반되는 환경오염 문제와 식량문제에 따른 윤리적 문제 등을 해결할 수 있고, 증식속도가 빠르고, 광합성 시에 CO<sub>2</sub>를 흡수하므로 탄소 중립적이며, 유전자 조작이 용이하여 새로운 에너지원으로 부상되고 있다.<sup>2)</sup>

미세조류의 단위면적당 생산량은 최대 136,900 L/ha/yr이며, 이는 옥수수(172 L/ha/yr), 콩(446-636 L/ha/yr) 그리고 야자열매(5,366-5,950 L/ha/yr)에 비해 월등히 높은 양이다.<sup>1,2)</sup> 이러한 미세조류를 대량생산하기 위해서는 적당한 조도의 빛, CO<sub>2</sub>, 무기 영양소, 적정한 온도 및 pH를 필요로 한다.<sup>3,4)</sup> 특히 미세조류는 광합성 생물로서 빛의 균일한 분포가 미세조류의 증식에 많은 영향을 미친다.<sup>5,6)</sup> 따라서 이들 최적

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: hjchoi@kd.ac.kr Tel: 033-649-7297 Fax: 033-647-7635

환경 인자와 반응기에서 빛의 균일한 분포를 고려한다면, 미세조류의 대량생산이 가능하게 되므로 환경 인자들의 최적화가 필수적이다. 지난 수 십 년간 미세조류의 고농도 배양을 위하여 연구가 활발히 진행되고 있다. 미세조류의 대량배양 시스템은 밀폐형과 개방형으로 나뉘는데, 개방형 시스템은 대기 중 이산화탄소의 비효율적 사용과 배양액의 불완전한 혼합으로 바이오매스의 농도가 밀폐형에 비하여 낮으며, 외부 미생물에 대한 오염의 가능성과 환경적인 영향을 많이 받는 단점이 있다.<sup>7)</sup> 반면 광생물 반응기는 외부적 요인에 대한 오염문제가 적고, 설치 및 시설의 관리가 용이하며, 반응기의 부피 대비 표면적을 최대화 할 수 있어서 널리 사용되고 있다.<sup>8)</sup> 이러한 광생물 반응기에 대한 연구는 대부분 얇은 판 형태,<sup>9)</sup> 관 형태<sup>10)</sup> 그리고 광섬유<sup>11)</sup> 등을 이용한 광생물 반응기가 대부분이며, 개조한 CSTRs (Continuous Stirred Tank Reactors) 형태<sup>12)</sup> 또는 PBR (Photobioreactor)<sup>13)</sup> 형태의 반응기가 보고되었다. 이러한 연구들의 주된 목표는 좀 더 효율적인 광원을 사용하고, 단위 면적 당 표면적을 증가시키고, 효과적인 기체전달을 하여 미세조류를 대량생산하고자 하였다. 그 결과 대부분의 반응기들은 약 5-6 g/L의 균체 건조 농도에 도달 하였으며,<sup>14,15)</sup> 몇몇 광생물 반응기는 10 g/L까지 건조 균체 농도를 올릴 수 있었다.<sup>9,10,13)</sup>

그러나 이러한 광생물 반응기들은 바이오매스의 농도가 증가함에 따라 셀의 비증식 속도는 반대로 감소하는 현상을 보였는데, 이는 각 셀의 그림자효과로 인해 빛의 투과효율이 떨어져 광합성의 저해현상이 발생되었기 때문이다. 이러한 그림자효과로 인한 광합성 저해효과를 극복하고자 최근에 최 등<sup>16)</sup>은 *Chlorella vulgaris* (*C. vulgaris*)의 바이오매스 향상을 위한 실험에서 반응기에 도광판(optical panel)을 삽입하고 광원으로 LED (Light Emitting Diode)를 사용하여 반응기 내부에 빛의 분포를 균일하게 해 줌으로써 12.3 g/L의 평균 바이오매스 증식률을 보고했다. 도광판을 이용한 반응기는 다른 반응기와 비교하여 높은 바이오매스 증식률을 나타내었다. 미세조류는 광합성을 하는 조류이므로 빛의 균일한 분포는 매우 중요한 영향 인자 이다. 그러나 아직까지는 도광판(Optical panel, OP)을 이용한 반응기에 대한 연구도 활성화 되지 않았을 뿐더러 도광판의 간격이 미세조류의 증식을 위한 광합성에 어느 정도 영향을 미치는지에 대한 연구는 더더욱 미흡하다. 따라서 본 연구는 미세조류 중 지방과 단백질의 함유량이 많아 유용성이 높고, 주변의 환경적 요인의 영향에 강하며 생명력이 강한 *C. vulgaris*를 사용하여 광생물 반응기에 삽입된 도광판의 간격이 미세조류의 바이오매스 증식률에 미치는 영향을 알아보려고 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험 장치 및 실험방법

본 연구에 사용된 미세조류는 3-8 μm 크기의 구형 *C. vulgaris* (FC-16)로써 한국 해양미세조류은행(KMMCC, Korea)

**Table 1.** A chemical composition of Jaworski's medium (unit: mg/L deionized water)

Components	Contents (mg/L)
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	20
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	12.4
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	50
NaHCO <sub>3</sub>	15.9
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	36
NaNO <sub>3</sub>	80
EDTA FeNa	2.25
EDTANa <sub>2</sub>	2.25
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.48
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.39
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo7O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.00
Cyanobalamin	0.04
Thiamine HCl	0.04
Biotin	0.04

에서 분양받아 JM 배지(Jaworski's Medium, Table 1)에서 22 °C ± 1 온도의 항온기에 10일간 증식 시킨 후에 사용하였다.

본 연구는 실제 하수처리장에 미세조류를 이용한 영양염류 제거 파일럿 설치를 위한 선행 실험이다. 따라서 파일럿 설치를 계획하고 있는 G 하수처리장의 전처리기가 끝난 하수를 이용하여 batch 실험을 하였다. G 하수처리장의 하수성상은 BOD 144.10 ± 21.43 mg/L, COD 223.41 ± 20.45 mg/L, SS 116.34 ± 18.16 mg/L, TN 35.41 ± 9.11 mg/L, NO<sub>3</sub>-N 33.46 ± 8.51 mg/L, TP 5.72 ± 2.25 mg/L 그리고 PO<sub>4</sub>-P 4.78 ± 1.34 mg/L이었다.

기초 실험결과 도광판의 두께가 6 mm에서 가장 높은 바이오매스 증가율을 나타내었기 때문에 본 실험에서는 6 mm 두께의 도광판을 사용하였으며, 도광판의 간격이 *C. vulgaris*의 증식률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 네 개의 샘플을 (Run 1: 225 mm 간격으로 도광판 1개 삽입, Run 2: 150 mm 간격으로 도광판 2개 삽입, Run 3: 112.5 mm 간격으로 도광판 3개 삽입, Run 4: 90 mm 간격으로 도광판 4개 삽입) 준비하여 비교 실험하였다(Fig. 1(c)). 실험은 각 10일씩 총 9 번을 반복 실험하여 평균 데이터를 사용하였다.

### 2.2. 도광판삽입 광반응기(OPPBR)의 특성

다양한 도광판의 간격이 *C. vulgaris*의 바이오매스 증식에 미치는 영향을 비교 실험하기 위해서 외부적인 빛의 영향을 최소화하고자 검은색 아크릴을 사용하여 반응기에 투입되는 외부 빛을 차단하였다. Batch 실험을 위한 광 반응기는 450 mm(가로) × 280 mm(세로) × 305 mm(높이)의 크기이며 (Fig. 1(a)), 총 용량은 38.5 L이다. 이는 하수 35 L에 10일 동안 JM배지에서 배양한 *C. vulgaris*를 3.5 L를 넣어 클로렐라와 하수의 비율을 10 : 1로 맞춘 용량이다. 초기 *C. vulgaris*의 농도는 1.12 ± 0.7 g/L였다. 반응기의 공기주입률은 0.5 L/min로 연속적으로 공기를 주입했으며, 공기주입률에 따른

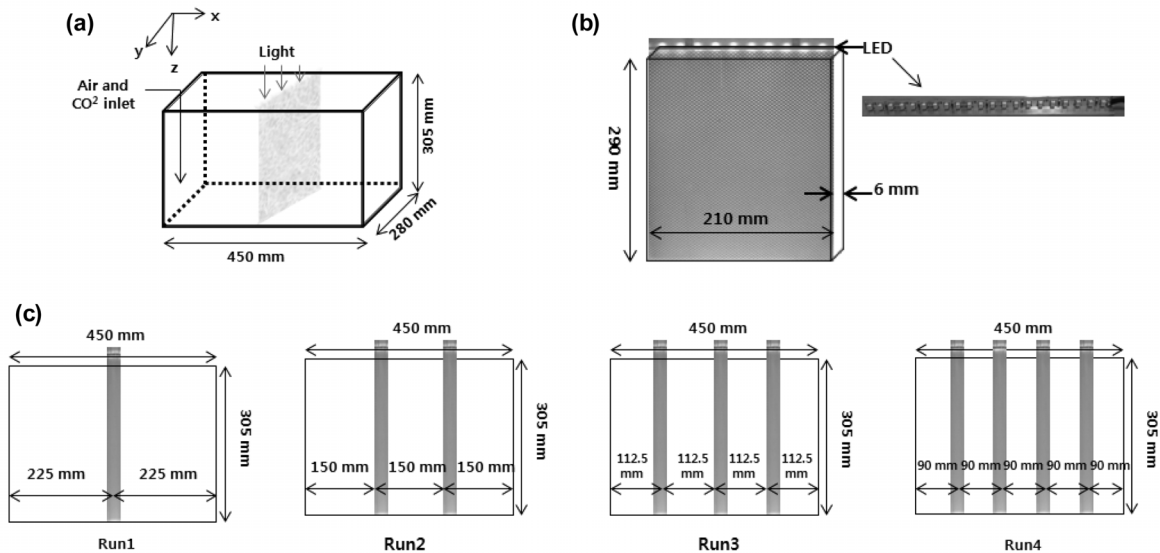


Fig. 1. A scheme of photobioreactor with optical panel (a), optical panel with LED (b) and various distance of optical panel in photobioreactor (c).

CO<sub>2</sub>의 주입량은 0.02 vvm이었다.

빛 에너지는 개방형은 태양광이 사용되거나 밀폐형인 경우 일반적으로 형광등이 많이 사용되어 왔다. 그러나 형광등의 경우 높은 유지비용과 과도한 열이 발생하는 문제점으로 인해 최근에는 LED (Light Emitting Diode)를 많이 사용한다. LED는 미세조류에 필요한 파장의 빛을 선택적으로 사용할 수 있어 효율적이다. 실험에 사용한 LED 램프는 bar 형식 (Fig. 1(b))으로 22개의 LED를 부착하여 특별 제작하였으며, LED에 공급되는 전원은 모델 FP-60-12 파워공급기(AD & Lighting, Suwon, Kyonggi-Do, Korea)를 사용하였다. 모든 광원은 LED를 도광판에 부착하여 위에서 아래로 공급하였으며, LED의 파장은 430 nm와 670 nm를 절반씩 사용하였다. 광합성에 사용되는 빛의 양을 나타내는 광량은 삽입된 도광판의 수에 따라 56-120  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 였다.

### 2.3. 도광판의 특성

도광판은 Lamp로부터 입사 되는 빛을 효과적으로 반사를 시키기 위해 도광판의 배면(뒷면)에 인쇄방식 또는 V-cut 등의 방법을 통해 특유의 반사체를 형성시킨다. 이 반사체들은 입사 되는 빛을 모두 앞부분으로 반사시키는 역할을 한다. 인쇄방식은 아크릴 뒷면에 특수 잉크를 소재로 하여 점들을 인쇄하여 입사되는 빛을 그 점을 통해서 반사를 시키는 방법이다. 반면, V-cut 방식은 아크릴 뒷면에 홈을 내어 그 홈들이 반사체 역할을 하며, 홈들을 통해서 빛의 방향을 바꾸어 전면으로 방출시키는 방법을 사용한다. V-cut 방식은 빛의 분포를 최대한 균일하게 분사시키기 위해 광원으로부터 멀어질수록 V-cut의 간격을 줄이고, 깊이를 늘리는 방법을 사용한다. 따라서 V-cut 방식은 홈의 간격과 홈의 각도를 이용하여 빛의 분산도를 조절하기 때문에 홈이 없는 Flat plate에 비해서 빛의 효율성이 높다.<sup>9,16)</sup> 실험에 사용한 V-cut 도광판은 Fig. 1(b)에서 볼 수 있듯이 210 mm(가로) × 290

Table 2. Characteristics of optical panel (OP)

Parameters	Method	Unit	V-cut OP
Specific gravity	ISO 1183	-	1.19
Transmittance	ISO 13468	%	93
Heat distortion temperature	ISO 75	°C	94
Melt flow rate	ISO 1133	g/10 min.	1.5
Tensile strength	ISO 527	MPa	75
Mold shrinkage	MRC Method	%	0.2-0.6

mm(세로) × 6 mm(두께) 크기이며, 빛의 투과율이 좋은 poly-methyl methacrylate (PMMA)로 제작하였다. 일반적인 V-cut 방식은 뒷면의 홈을 내어 반사판을 이용하여 전면으로 빛을 방출시키나 본 실험에서는 도광판 양면에 V-cut을 제작하여 빛이 양면으로 분산되게 하였다.

Table 2에 V-cut 도광판의 특성을 나타내었다. V-cut 도광판은 광투과율이 93%, 열 변형 온도는 94°C 그리고 성형 수축률은 0.2-0.6%이다.

### 2.4. 분석방법

주어진 광 조건에서 *C. vulgaris*의 최대 증식률(maximum growth rate)은 아래와 같이 계산하였다.

$$\mu_{\max} = t^{-1} \times (\ln x/x_0) \quad (1)$$

$\mu_{\max}$ 은 최대 증식률(L/day),  $x_0$  및  $x$ 는 초기 및 일정 배양 시간 후의 *C. vulgaris*의 최대 농도(cells/mL), 그리고  $t$ 는 배양시간(day)을 나타낸다.

바이오매스의 증가량을 알 수 있는 미세조류의 건조 질량은 50 mL의 샘플을 GF/C (Watmann, 영국)로 여과한 후 105°C에서 24시간 건조한 후 그 질량을 측정하여, 차이를 계산하였다.

$$C_B = (C_b - C_{b0}) / (t - t_0) \quad (2)$$

$C_B$ 는 바이오매스의 양,  $C_b$  및  $C_{b0}$ 는  $t$ 와  $t_0$  때의 바이오매스의 양을 나타낸다.

*C. vulgaris* 증식률은 아래의 식으로 계산하였다.

$$\mu = (\ln C_t - \ln C_0) / (t - t_0) \times 100 \quad (3)$$

$\mu$ 는 *C. vulgaris* 증식률,  $C_0$ 는 *C. vulgaris*의 초기농도,  $C_t$ 는  $t$ 시간의 *C. vulgaris*의 농도이다.

수중광량은 조도계(HOBO-Light Intensity, Onset Computer, USA)를 이용하여 수중광량을 측정하였다. 조도계는 LI-193-SA 센서와 LI-1400 기록계(Li-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA)를 이용하여 영점조정을 하였으며, 측정 시 센서위의 미세조류를 제거하여 미세조류로 인하여 발생할 수 있는 수중광량의 오류를 최소화하였다. 측정된 수중광량을 계산하여 광효율을 나타내었다.

총 엽록소 측정은 시료 500 mL를 GF/F ( $\phi$  0.45  $\mu$ m, Whatman) 필터를 이용하여 세포파괴를 줄이기 위해 일정한 압력(100 mmHg)하에서 여과한 다음, 습기를 제거하고 90% 아세톤으로 암/냉장 하에서 12시간 동안 색소를 추출하여 실시하였다. 엽록소는 형광분석기(TD-700, Turner Designs)를 이용하여 흡광도를 측정 후, 엽록소 a값으로 환산하였다.

$$C_{chl.a} = 0.0127A_{663nm} - 0.00269A_{645nm} \quad (4)$$

$$C_{chl.b} = 0.0229A_{645nm} - 0.00468A_{663nm} \quad (5)$$

전체 엽록소 함량(mg/mL)은  $C_{chl.a} + C_{chl.b} = 0.0202A_{645nm} + 0.00802A_{663nm}$ 로 나타내며, 엽록소 a와 b의 혼합액에 645 nm와 663 nm의 빛을 각각 비추어 측정된 흡광도의 값( $A_{645nm}$ 와  $A_{663nm}$ )을 이용하여 전체 엽록소의 함량을 계산하였다.

*C. vulgaris*의 Cell-counting은 용액을 50 mL/falcon 튜브에 담아 글루타르 용액으로 최종농도를 1%로 고정시킨 후, 고정된 시료를 4시간 이내에 광학현미경으로 200배의 배율로 확대하여 측정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 도광판의 간격에 따른 광효율 비교

미세조류의 성장은 종에 따라 매우 다양하지만, 일반적으로 광합성에 의한 성장 및 증식에서는 온도와 빛의 강도가 매우 중요한 성장요소이다. 특히 광의 균일한 분포는 반응기에서 미세조류를 대량 증식시킬 수 있는 중요한 요소이다.<sup>17,18)</sup> 즉, 미세조류는 스스로 내부의 온도 조절 기능이 없기 때문에 주변 환경의 온도와 빛이 미세조류의 바이오매스 성분, 신진대사, 그리고 신진대사의 반응속도에 직접적으로 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.<sup>19,20)</sup> Fig. 2에 광생물 반응기 안에서의 Run 1, Run 2, Run 3와 Run 4의 광효율을 나타내었다.

6 mm의 도광판 1개를 삽입한 Run 1의 평균 광효율은 86%, 6 mm의 도광판 2개를 삽입한 Run 2는 90%, 6 mm의 도광판 3개를 삽입한 Run 3는 92% 그리고 6 mm 도광판 4개를 삽입한 Run 4는 94%의 광효율을 나타내었다. 도광판은 윗면에서 들어오는 LED의 빛을 투명한 아크릴 패

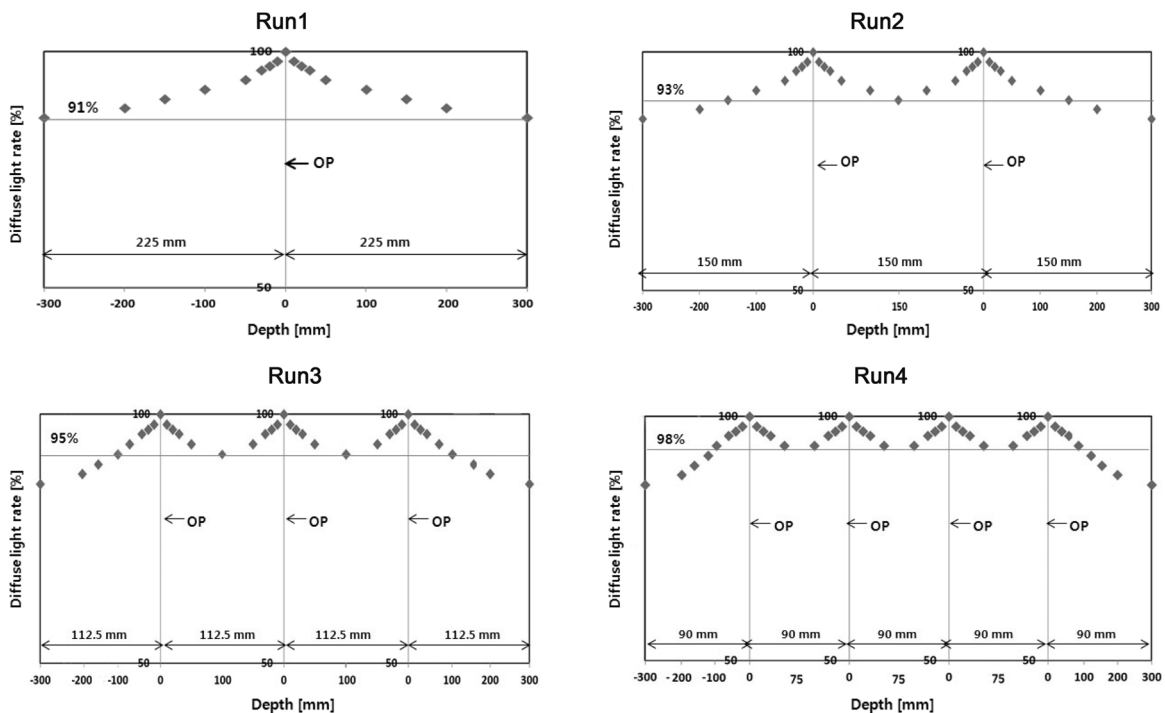


Fig. 2. Comparison of diffuse light rate in OPPBR for Run 1, Run 2, Run 3 and Run 4.

널로 받아들여 빛이 아크릴 표면에 증착된 V-cut의 면적과 패턴을 통해 전 영역에 걸쳐 빛을 균일하게 분포시켜주는 역할을 한다. 즉, 측면에서 나오는 LED 광원의 빛 손실을 최소화하여 전체 면적으로 골고루 분산시키고 균일하게 빛을 투과시키는 역할을 한다. 각각의 도광판에 따른 광 손실은 LED 광원에서 도광판으로 입사되는 빛의 손실이 발생하여 광원 자체의 광량이 조금씩 줄어들게 되고, 그로 인하여 도광판으로 입사된 빛의 정렬시에 발생하는 광량손실 또한 더 커지기 때문에 추가적인 광량의 감소가 발생했을 것으로 생각된다. 본 실험에서는 도광판의 간격이 좁을수록 반응기 안의 광효율은 높은 것으로 나타났다. 이러한 광효율의 차이는 미세조류의 성장에 적게나마 영향을 미칠 것으로 예상된다.

### 3.2. *C. vulgaris*의 바이오매스 증가량과 비증식률

*C. vulgaris*는 광합성을 통해 대기 중의 이산화탄소를 흡수하고, 육상식물들보다 훨씬 효율적이고 빠르게 바이오매스를 생산하며, 단위면적당 바이오연료 생산량이 콩, 옥수수 등의 육상작물에 비해 월등히 뛰어나다.<sup>21)</sup> *C. vulgaris*는 성장에 필요한 에너지가 남으면 에너지원인 포도당을 지방으로 전환해 저장하는데, 이 지방은 중성지방이며 바이오에너지원으로 활용할 수 있다.<sup>22,23)</sup> 이산화탄소의 감축효과와 바이오 오일을 동시에 생산할 수 있는 미세조류의 바이오매스의 생산량을 높이기 위해 많은 연구들이 진행 중이다. Fig. 3에 실험기간 동안의 바이오매스의 평균 증가량을 나타내었다.

다양한 간격의 도광판을 삽입한 반응기에서 *C. vulgaris*를 10일 동안 증식 시킨 후 바이오매스의 증식량을 비교한 결과 Run 1은 증식 7일째  $10.65 \pm 1.21$  g/L를 나타내어 가장 높은 바이오매스 증식량이 측정되었으며 7일 이후에는 서서히 감소하였다. Run 2는 증식 5일째  $12.01 \pm 1.13$  g/L의 최대 바이오매스 증식량을 나타내었으며, Run 3은 3일째에  $12.05 \pm 1.11$  g/L, Run 4는 증식 2일째에  $12.36 \pm 1.15$  g/L의 최대 바이오매스 증식량을 나타내었다. 실험결과 도광판의 거리가 가까울수록 광합성에 필요한 빛의 효율이 높아 최대

바이오매스 증식량에 도달하는 기간이 짧아졌음을 알 수 있었다. 따라서, *C. vulgaris*의 바이오매스의 대량생산을 위해서는 도광판의 간격에 따라 하수의 교환이 필요하다. Hsieh와 Wu<sup>13)</sup>는 투명한 사각형 반응기에 일반 Flat panel과 LED를 이용하여 *Chlorella sp.*를 13일 증식하여 미세조류의 바이오매스를 측정된 결과 4.75 g/L의 바이오매스를 얻었으며, Torzillo 등<sup>15)</sup>은 Tubular photobioreactor에서 *Spirulina*를 증식한 결과 5.34 g/L의 바이오매스 증가율에 도달하였다. 그러나 Sierra 등<sup>24)</sup>은 Flat plate를 이용한 광생물 반응기에서 7.86 g/L의 높은 바이오매스 증가량을 나타내었으며, Richmond and Cheng<sup>9)</sup> 또한 Flat plate glass 반응기를 이용하여 *Nannochloropsis*를 증식한 결과 8.94 g/L의 높은 바이오매스 증가량을 보고하였다. V-cut 도광판을 이용한 반응기는 Optical fiber나 일반 Flat panel을 이용한 것보다 설치가 간단하고 소모적이지 않으며, 빛을 효율적으로 분산할 수 있고, 영구적으로 쓸 수 있어 경제적이다.

최대 증식률(maximum growth rate)은 Run 1이  $0.44 \pm 0.015$  L/day, Run 2가  $0.59 \pm 0.023$  L/day, Run 3가  $0.79 \pm 0.018$  L/day 그리고 Run 4가  $1.20 \pm 0.011$  L/day를 나타내었다(Fig. 4). Run 4는 Run 1과 비교하여 2.73배, Run 2와 비교하여 2.03 배, Run 3과 비교하여 1.5배 이상의 최대 증식률의 차이를 나타냈다. 최대 증식률의 차이는 도광판의 간격이 좁을수록 증가하였다. 이는 앞에서도 서술했듯이 도광판의 개수가 증가함에 따라 광합성에 필요한 광량의 증가와 균일한 광 분산율의 증가가 *C. vulgaris*의 최대 증식률에 영향을 미쳤을 것으로 여겨진다. Richmond and Chen<sup>9)</sup>은 flat plate glass reactor를 이용하여 *Nannochloropsis sp.*를 대량 생산한 결과 flat plate를 사용하지 않는 반응기에 비해 2배 이상의 높은 바이오매스 생산량을 얻을 수 있었으며, 빛의 효율이 10% 증가할 때마다 최대 비증식률은 2배 이상 증가했다고 보고했다. 본 논문은 flat plate 보다 광분산율이 좋은 도광판을 사용함으로써 빛의 분산율이 8% 증가했을 때 2.73배의 최대 증식률의 차이를 나타내었다.

그러나, Run 1, Run 2, Run 3 그리고 Run 4 모두가 바이오 매스량이 증가함에 따라, 그리고 도광판의 간격이 좁아

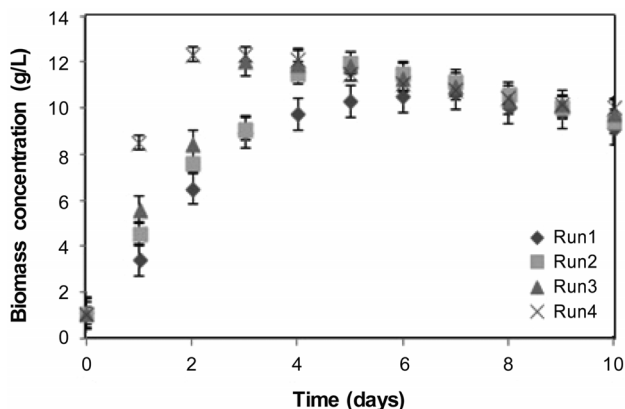


Fig. 3. The average of biomass profiles for Run 1, Run 2 Run 3 and Run 4.

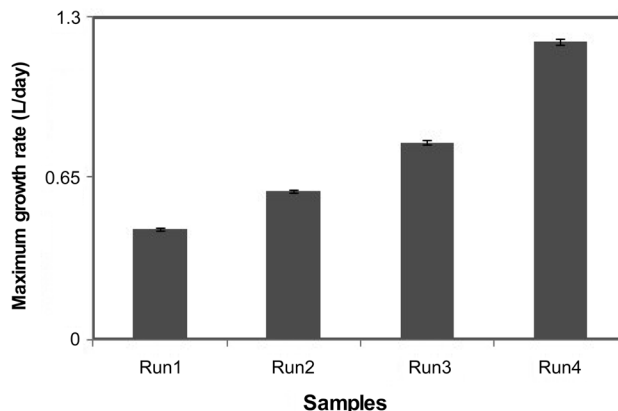


Fig. 4. Comparison of maximum growth rate for Run 1, Run 2, Run 3 and Run 4.

질수록 증식률이 빠르게 감소했다. 즉, 전체적으로 *C. vulgaris*의 농도가 증가함에 따라 증식률은 반비례하여 감소하는 현상을 나타냈다. Rin 1은 실험 5일째부터 점차 감소하기 시작하였으나, Run 4는 실험 3일째부터 급격하게 감소 현상을 나타냈다. 이는 여러 연구자들의<sup>11,25)</sup> 실험결과에서 나타났듯이 미세조류의 농도가 높아질수록 광합성에 필요한 빛이 그림자효과(Shading effects)로 인해 미세조류에 효과적으로 전달되지 않아 나타난 현상이라 할 수 있다. 그러나 도광판을 이용한 본 연구는 반응기 전체에 광합성에 필요로 하는 빛이 도광판을 통해 거의 일정하게 전달되었기 때문에 그림자 효과로 인한 증식률의 감소보다는 *C. vulgaris*의 성장에 따라 증식에 필요한 영양염류의 감소로 나타난 현상이 더 큰 원인으로 볼 수 있다. 왜냐하면, 바이오매스 증식량에서도 언급했듯이 도광판의 간격이 좁아짐에 따라 최대 바이오매스 증식량에 도달하는 시간 또한 짧아졌기 때문이다. 도광판을 이용한 반응기에서 *C. vulgaris*의 지속적인 증식률의 증가를 위해서는 증식 후 2-3일째에 영양염류를 보충해주는 것이 좋다고 생각된다.

### 3.3. 총엽록소의 비교

클로로필(Chlorophyll, Chl.)은 광합성의 핵심분자로 빛 에너지를 흡수하는 안테나 역할을 하는 색소이며, 조류의 농도를 구하는 지표로 사용한다. Chl. a는 광합성을 하는 모든 식물에 들어 있으며, Chl. b는 육상식물과 녹조류에 들어 있다. 이 중 빛 에너지를 직접 화학 반응계에 전달하는 것은 Chl. a이며 다른 색소가 흡수한 빛에너지도 일단 Chl. a에 전달되었다가 다시 화학 반응계로 이동한다.<sup>26)</sup> *C. vulgaris*는 다량의 클로로필을 함유하고 있다. Chl. a와 b의 정량결과 Chl. a/b의 비율은 약 3.3-3.5로 나타났으며 도광판의 간격과 빛의 효율에 상관없이 모든 샘플이 큰 차이가 없었다 (Table 3). 대체로 일반 고등식물의 경우 Chl. a/b는 약 3:1인 것으로 나타났다.<sup>27)</sup>

개체수가 2배로 늘어나는데 걸리는 시간(Doubling time)은 광효율이 좋은 Run 4가 Run 1에 비해 2.5배, Run 2에 비해 1.8배 그리고 Run 3에 비해 1.5배 빨랐다. 셀 당 클로로필 함량은 Run 1이 701 ± 41.12 fg, Run 2가 721 ± 44.25 fg, Run 3이 785 ± 40.46 fg, Run 4가 828 ± 43.31 fg로 측정되어 Run 1과 Run 2는 큰 차이가 없었으나, Run 4는 Run 3에 비해 5%, Run 2에 비해 12.92% 그리고 Run 1에 비해 15.34% 높았다. 단위면적 당 Cell volume 또한 Run 1과 Run 2는 근소한 차이가 있었으나 Run 4는 Run 1과 비교하

여 20.66%, Run 2와 비교하여 16.94% 그리고 Run 3과 비교하여 11.98% 많았다. 실험 결과 셀 당 클로로필 함량 및 단위면적 당 Cell volume은 Run 4가 가장 높았으며, Doubling time 또한 Run 4가 가장 짧았다.

## 4. 결론

본 연구는 도광판의 간격이 *C. vulgaris*의 증식률에 미치는 영향을 알아보기 위하여 네 개의 샘플을(Run 1: 225 mm 간격으로 도광판 1개 삽입, Run 2: 150 mm 간격으로 도광판 2개 삽입, Run 3: 112.5 mm 간격으로 도광판 3개 삽입, Run 4: 90 mm 간격으로 도광판 4개 삽입) 준비하여 비교 실험하였으며, 실험 결과는 아래와 같다.

- 1) 300 mm 반응기 깊이에 광효율을 측정된 결과 도광판의 간격이 225 mm일 때 86%, 150 mm 간격일 때 90%, 112.5 mm 간격일 때 92% 그리고 90 mm 간격일 때가 94%의 광효율을 나타내어 도광판의 간격이 좁을수록 광효율은 높았다.
- 2) 최대 증식률, 셀 당 클로로필 함량 및 단위면적 당 Cell volume 그리고 Doubling time은 도광판의 간격이 가까울수록 증가하였다. 그러나 Chl. a/b의 비율은 약 3.3-3.5로 측정되어 도광판의 간격에 상관없이 모든 샘플이 큰 차이가 없었다.
- 3) 최대 바이오매스 증식량은 10.65 ± 1.21 g/L (Run 1), 12.01 ± 1.13 g/L (Run 2), 12.05 ± 1.11 g/L (Run 3) 그리고 12.36 ± 1.15 g/L (Run 4)를 나타내었고 도광판의 간격에 따라 Run 1은 7일째, Run 2는 5일째, Run 3은 3일째 그리고 Run 4는 2일째에 최대 바이오매스 증식량을 나타내었다.
- 4) 따라서 경제적인 부분을 고려한다면 바이오매스의 대량생산을 위하여 Run 3의 사용이 Run 4 보다 더 효율적이라 생각된다.

KSEE

## 사사

본 연구는 한국연구재단의 여성과학자 지원사업(201300-6899)으로 진행되었으며 이에 감사드립니다.

## Reference

1. Haag, A. L., "Algae bloom again," *Nature*, **447**, 520~521 (2007).
2. Masojidek, J. and Torzillo, G., "Mass cultivation of freshwater microalgae," In *Encyclopedia of Ecology*, Academic Press, Oxford, UK, 2226-2235(2008).
3. Choi, H. J. and Lee, S. M., "Effect of temperature, light

Table 3. Characteristics of *C. vulgaris* by various distance of optical panel in the OPPBR

	Run 1	Run 2	Run 3	Run 4
Doubling time [h]	15±0.45	11±0.42	9±0.51	6±0.48
Chl. a/b	3.3±0.41	3.4±0.40	3.4±0.41	3.5±0.41
Chl. per cell [fg]	701±41.12	721±44.25	785±40.46	828±43.31
Cell volume [µm <sup>3</sup> ]	192±5.30	201±6.45	213±4.67	242±5.62

- intensity and pH on the growth rate of *Chlorella vulgaris*,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **33**(7), 511~515(2011).
4. Mayo, A. W. and Noike, T. “Effects of temperature and pH on the growth of heterotrophic bacteria in waste stabilization pond,” *Water Res.*, **30**(2), 447~455(1996).
  5. Wu, Z. and Shi, X., “Optimization for high-density cultivation of heterotrophic *Chlorella* based on a hybrid neural network model,” *Lett. Appl. Microbiol.*, **44**(1), 13~18(2007).
  6. Tadesse, I., Green, F. B. and Puhakka, J. A., “Seasonal and diurnal variations of temperatures, pH and dissolved oxygen in advanced integrated wastewater pond system treating tannery effluent,” *Water Res.*, **38**(3), 645~654(2004).
  7. Lee, Y. K., “Microalgal mass culture systems and methods: their limitation and potential,” *J. Appl. Phycol.*, **13**(4), 307~315(2001).
  8. Moreno-Garrido, I., “Microalgae immobilization: current techniques and uses,” *Bioresour. Technol.*, **99**(10), 3949~3964(2008).
  9. Richmond, A. and Cheng-Wu, Z., “Optimization of a flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis sp.*,” *J. Biotechnol.*, **85**(3), 259~269(2001).
  10. Javanmardian, M. and Palsson, B. O., “High-density photoautotrophic algal cultures: design, construction, and operation of a novel photobioreactor system,” *Biotechnol. Bioeng.*, **38**(10), 1182~1189(1991).
  11. Suh, I. S. and Lee, C. G., “Photobioreactor engineering: Design and performance,” *Biotechnol. Bioproc. Eng.*, **8**(6), 313~321(2003).
  12. Lee, E. T. Y. and Bazin, M. J., “A laboratory scale air-lift helical photobioreactor to increase biomass output rate of photosynthetic algal cultures,” *New Phytol.*, **116**(2), 331~335(1990).
  13. Hsieh, C. H. and Wu, W. T., “A novel photobioreactor with transparent rectangular chambers for cultivation of microalgae,” *Biochem. Eng. J.*, **46**(3), 300~305(2009).
  14. Hu, G., Kurano, N., Kawachi, M., Iwasaki, I. and Miyachi, S., “Ultrahigh-cell-density culture of a marine green alga *Chlorococcum littorale* in a flat-plate photobioreactor,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **49**(6), 655~662(1998).
  15. Torzillo, G., Carozzi, P., Pushparaj, B., Montaini, E. and Materassi, R., “A two-plane tubular photobioreactor for outdoor culture of *Spirulina*,” *Biotech. Bioeng.*, **42**(7), 891~898(1993).
  16. Choi, H. J. and Lee, S. M., “Effect of photo bioreactor with optical panel on the growth rate of *Chlorella vulgaris*,” *J. Kor. Soc. Environ. Eng.*, **34**(7), 467~472(2012).
  17. Ogbonna, J. C. and Tanaka, H., “Light requirement and photosynthetic cell cultivation-development of processes for efficient light utilization in photobioreactors,” *J. Appl. Phycol.*, **12**(3-5), 207~218(2000b).
  18. Lee, K. Y. and Lee, C. G., “Effect of light/dark cycles on wastewater treatments by microalgae,” *Biotechnol. Bioproc. Eng.*, **6**(3), 194~199(2001).
  19. Chen, C. Y., Yeh, K. L., Aisyah, R., Lee, D. J. and Chang, J. S., “Cultivation, photobioreactor design and harvesting of microalgae for biodiesel production: A critical review,” *Bioresour. Technol.*, **102**(1), 71~81(2011).
  20. Grobbelaar, J. U., “Physiological and technological considerations for optimizing mass algal cultures,” *J. Appl. Phycol.*, **12**(3-5), 201~206(2000).
  21. Chisti, Y., “Biodiesel from microalgae,” *Biotechnol. Adv.*, **25**(3), 294~306(2007).
  22. Alain, D., Jean, D., Françoise, P. and Lhoussaine, B., “Growth rate four freshwater algae in relation to light and temperature,” *Hydrobiol.*, **207**(1), 221~226(2000).
  23. Sakai, N., Sakamoto, Y., Kishimoto, N., Chihara, M. and Karube, I., “*Chlorella* strains from hot springs tolerant to high temperature and high CO<sub>2</sub>,” *Energy Conv. Manage.*, **36**(6-9), 693~696(1995).
  24. Sierra, E. Ación, Fernández, J. M. García, González, C. and Molina, E., “Characterization of a flat plate photobioreactor for the production of microalgae,” *Chem. Eng. J.*, **138**(1-3), 136~147(2008).
  25. Jin, E., Polle, J. E. W., Lee, H. K., Hyun, S. M. and Chang, M., “Xanthophylls in microalgae: From biosynthesis to biotechnological mass production and application,” *J. Microbiol. Biotechnol.*, **13**(2), 165~174(2003).
  26. Chen, X., Goh, Y. Q., Tan, W., Hossain, I., Chen, W. N. and Lau, R., “Lumostatic strategy for microalgae cultivation utilizing image analysis and chlorophyll a content as design parameters,” *Bioresour. Technol.*, **102**(10), 6005~6012(2011).
  27. Choi, I. S., “The microorganisms and industry,” *Kor. J. Microbiol.*, **30**(2), 42~49(2004).