

라만 분광법을 이용한 지질생산 미세조류 *Scenedesmus obliquus* 성장 평가

유용진^{1,4}, 이건우^{1,3}, 백동현³, 김진우^{2,3}, 김호섭^{1,4*}

¹선문대학교 나노과학과, ²선문대학교 식품과학과, ³선문대학교 차세대반도체기술연구소, ⁴씨이비티 (주)

Growth Evaluation of Lipid Production Microalgae *Scenedesmus obliquus* using Raman Spectroscopy

Yong Jin Yoo^{1,4}, Geon Woo Lee^{1,3}, Dong Hyun Baek³,
Jin Woo Lee^{2,3}, Ho Seob Kim^{1,4*}

¹Department of Physics and Nano-science, Sun Moon University

²Department of Food Science, Sun Moon University

³Center for Next-Generation Semiconductor Technology, Sun Moon University

⁴CEBT Co. Ltd.

요약 최근 3세대 바이오매스라고 알려진 미세조류를 이용하여 생산되는 바이오디젤은 기존의 교통수단에 사용되는 화석연료를 대체할 수 있는 유일한 재생에너지로 알려져 있다. 미세조류 중에서도 *Scenedesmus obliquus*는 다른 미세조류 대비 성장이 빠르고 건조세포무게 대비 지질을 40-50 % 축적이 가능하여 바이오디젤 생산에 있어 야외 및 대규모 재배에 적합한 지질생산 우수 종으로 알려져 있다. 미세조류를 이용한 바이오디젤 생산을 위해서는 높은 바이오매스 생산량 확보가 선행되어야 하며 배양공정의 제어를 위해 효과적인 세포 질량 측정 및 분석이 필요하다. 본 연구는 *S. obliquus*를 75일 동안 배양하며 흡광도, 현미경 이미지, 라만 분광법 등으로 미세조류의 성장 변화를 측정하고, 측정된 값들에 대한 상관관계를 관찰하였다. 배양 60일과 배양 75일 기간에, 흡광도의 변화량이 3 % 미만인 반면, 현미경으로 관찰한 미세조류의 숫자는 3배 이상 증가하였다. 또한, 라만 분광법으로 측정된 결과에서는 β -카로틴에 해당하는 997 cm^{-1} , 1148 cm^{-1} , 1515 cm^{-1} 의 강한 피크값이 측정되었으며, 배양 기간 동안 β -카로틴의 피크값은 초기보다 3배 이상 증가하는 것이 관찰되었다. 따라서 라만 분광법을 이용하면 미세조류 배양에서 세포 내 성장 물질과 성장 정도를 알아내어 높은 바이오매스를 생산할 수 있을 것이다.

Abstract Biodiesel produced using microorganisms, which are recognized as the third-generation biomass, is among the various known renewable energy sources that can replace fossil fuels used in conventional transportation. *Scenedesmus obliquus* has been identified as an excellent species for biodiesel production, as it grows faster and can accumulate up to 40-50 percent of the dry cell weight. Enhancing production using *S. obliquus* requires measuring the cell mass for controlling the cultivation process. In the current study, *S. obliquus* was cultured for 75 days, and growth changes of the microalgae were measured by absorbance, microscopic imaging, and Raman spectroscopy. Between days 60 to 75 of culture, the change in absorbance was observed to be less than 3%, whereas the number of microalgae observed microscopically was more than three times higher. Moreover, the Raman spectroscopy results showed three strong peak values of β -carotene at 997 cm^{-1} , 1148 cm^{-1} , and 1515 cm^{-1} , with peak values of β -carotene showing greater than 3-fold increase during the culture period. Therefore, we predict that application of Raman spectroscopy will help in identifying the growth elements and growth degree in microalgae culture during increased biomass production.

Keywords : Microalgae, *Scenedesmus obliquus*, LED light, Incubation time, Raman spectrum

본 연구는 중소벤처기업부와 한국산업기술진흥원의 "지역특화산업육성사업(R&D P0004891)"으로 수행된 연구결과입니다.

*Corresponding Author : Ho Seob Kim(Sun Moon Univ.)

email: hskim3@sunmoon.ac.kr

Received February 7, 2020

Revised March 3, 2020

Accepted May 8, 2020

Published May 31, 2020

1. 서론

19세기 이후 급속한 산업화로 인해 화석연료의 사용량이 급증하면서 화석연료의 연소과정에서 발생하는 이산화탄소, 메탄, 프레온 가스 등의 온실가스 발생이 급증하여 지구온난화와 같은 인류를 위협하는 환경 문제들이 발생하고 있다. 지구온난화의 주범으로 알려진 온실가스는 이산화탄소(CO₂), 메탄(CH₄), 아산화질소(N₂O), 수소화불화탄소(HFCs), 과불화탄소(PFCs), 육불화황(SF₆)을 지칭한다. 2016년 국내 온실가스 총 배출량 695백만톤 중 이산화탄소(CO₂)가 638백만 톤으로 90 % 이상을 차지하여 온실가스 저감을 위해서 이산화탄소 배출량 감소가 먼저 수행되어야 한다[1]. 현재 우리나라의 이산화탄소 배출량은 1990년대에 비해 약 2.5배 증가하여 세계 10위 수준이며, 온실가스 중 약 87 %는 화석연료의 연소과정에서 발생한다[1-2]. 이산화탄소 배출량을 줄이기 위해 화석연료 사용 감소가 선행되고 동시에 포집 및 저장기술 등과 같은 보다 적극적인 이산화탄소 저감을 위한 기술개발이 필요하다[3].

대기 중 이산화탄소를 감소시키는 가장 대표적인 방법은 식물에 의한 광합성인데 민물 또는 바닷물에서 성장하는 미세조류는 육상식물보다 태양에너지 이용 효율이 25배 높고 빠르게 성장하여 바이오매스 생산성이 5-10 배 높으며 이산화탄소 고정능력도 15배가량 높다고 알려졌다. 미세조류 종과 배양 조건에 따라 건체 중량 대비 80 % 이상의 지질 축적이 가능하며 이산화탄소를 이용한 바이오디젤과 같은 유용물질 생산에 있어 육상식물보다 우수한 3세대 바이오매스로 알려졌다[4-5].

미세조류는 chlorophyll, carotenoid 또는 phycobilin과 같은 색소를 함유하고 있는데 이러한 색소는 특정 파장을 흡수하는 특징을 가져 세포 농도 측정을 위해 분광 광도계를 사용하는 흡광도 비교법이 널리 사용되고 있다[6]. 하지만 기존의 분광 광도법은 세포 성장의 실시간 측정이 어렵고 세포 농도가 짙어질수록 측정의 정확도가 떨어지는 단점을 가지고 있다. 미생물 성장 측정에 있어 라만 분광법을 이용한 측정이 새롭게 적용되고 있는데, 라만 분광법은 분자의 진동운동을 측정해서 물질의 특성을 분석하는 방법으로 전처리와 손상 없이 시료 분석이 가능하다[7-12]. 라만 스펙트럼은 시료의 형상과 크기뿐만 아니라, 수분에 의한 영향을 거의 받지 않기 때문에 수용액 상태로 존재하는 미세조류의 특성 평가에 가능한 기술이다[12].

본 연구에서는 흡광도, 현미경 이미지, 그리고 라만 스펙트럼 등의 방법으로 고농도 배양을 통한 아스타잔틴 생산증대를[13] 위해 세포량을 측정하고 흡광도와 라만 결과 비교를 통해 상호 관계를 분석하고 성장 특성을 조사하였다.

2. 실험

2.1 배양 균주

본 연구에서 사용된 미세조류는 초승달 모양을 가지고 있는 *S. obliquus* LIMS-PS-0871로서 해양과학기술원 해양시료도서관 (JeJusi, Korea)로부터 분양받아 사용하였다. Fig. 1은 실험에서 사용된 미세조류의 SEM 사진이다. *S. obliquus*는 -60 °C로 1차 냉동하고 동결건조기(FDU-1200, EYELA, Japan)에서 -57 °C로 약 2시간 동안 건조하였다. 건조된 샘플을 Au 코팅한 후 EPMA (JXA-8200, JEOL, Japan)에서 가속전압 10 kV, 배율 3000배에서 관찰하였다.

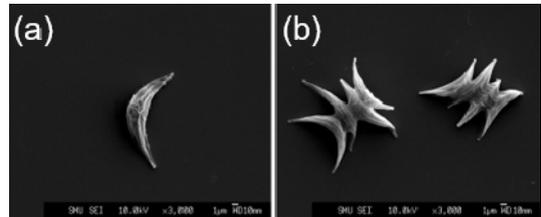


Fig. 1. The SEM images present *S. obliquus* growth (a) Single-cell form (b) Four-cell combination form

2.2 배양 조건

S. obliquus 미세조류 배양은 700 x 450 x 300 mm 크기의 배양기에서 45 L의 미세조류로 진행하였다. 미세조류 배양기에는 공기 및 이산화탄소 주입 튜브, 수류발생기, 센서, 그리고 히터 등이 설치되었다. 광합성을 위한 공기는 연속적으로 주입하였고 배양액 pH는 7이 유지되도록 CO₂양을 자동으로 조절되게 하였다. 배양기에서 미세조류의 순환은 수류발생기로 조정 하였으며 배양온도는 22 °C로 설정하였다.

배양조명은 배양기 상단에 백색 LED 광원을 설치하였으며 광량은 200 μmol/m²·sec으로 설정하였다. 백색 LED 광원은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 410 nm에서 720 nm의 파장대를 가지고 강한 피크값은 453 nm와 544 nm에 있다. LED 광원은 배양 성장을 위해서 30분 간격으로 On/Off를 하였다.

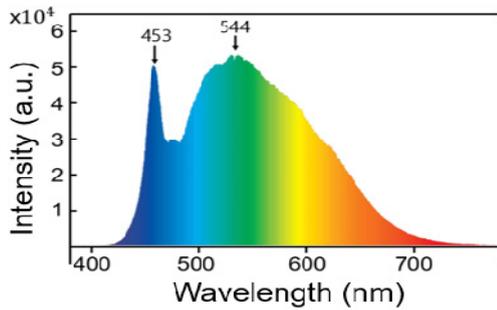


Fig. 2. Spectrum of LED light

2.3 배양 배지

미세조류의 성장을 위한 영양소는 Modified Bold's Basal Medium (MBBM) 배지를 사용하였다[14]. MBBM 배지는 Table 1에서 보는 바와 같이 16가지 배양성분으로 구성되어 있으며, 배양성분 중에서 NaNO_3 는 전체 39.06 %를 차지하고 있으며, $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$, K_2HPO_4 , KH_2PO_4 등은 11.8 % 정도를 차지하고 나머지 다른 배양성분은 0.2 - 4.8 % 정도를 차지하고 있다 [15].

Table 1. Table of modified bold's basal medium (MBBM)

No	Ingredient	1L Standard	Stock Produce (50mL, g)	Percentage (%)
1	NaNO_3	1	12.33	39.06
2	$\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1	1.25	3.96
3	$\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1	3.7	11.72
4	K_2HPO_4	1	3.75	11.88
5	KH_2PO_4	1	3.78	11.97
6	NaCl	1	1.26	3.99
7	$\text{Co}(\text{NO}_3)_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	1	0.02	0.06
8	KOH	1	1.54	4.88
9	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	2	0.25	0.79
10	EDTAFeNa	1	1.24	3.93
11	$\text{Na}_2\text{EDTA} \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	2	1.24	3.93
12	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	1	0.08	0.25
13	$\text{Na}_2\text{MoO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$	1	0.06	0.19
14	H_3BO_3	1	0.56	1.77
15	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	1	0.07	0.22
16	$\text{ZnSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1	0.44	1.39

* Stock produces of No 9 and 11 were melting on 100 mL

2.4 배양 성장 측정

미세조류의 성장은 UV/Vis 분광기 (Optizen 2120

UV, Mecacy, Korea)를 이용하여 680 nm에서 측정된 흡광도 방법, 현미경 (FLUOVERT FS, LEITZ, Germany)으로 측정된 이미지로 개체량 숫자 측정 방법, 그리고 532 nm 파장 레이저를 이용한 라만 스펙트럼 (LabRAM HR800, Horiba, Japan)방법 등으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조류의 성장 및 분석

미세조류는 배양기에서 75일 동안 배양하면서 시료를 채취하였고, 분광 광도계를 이용하여 흡광도를 측정하였으며, 10일, 26일, 60일, 75일에는 단위면적당 세포 숫자와 크기는 광학현미경 Fig. 3으로 측정하였다. 광학현미경 이미지에서 $300 \mu\text{m} \times 200 \mu\text{m}$ 의 면적을 기준으로 미세조류의 세포 수량은 10일에 4개, 26일에 17개, 60일에 39개, 75일에 121개가 측정되었으며, 시간이 증가함에 따라 단세포에서 2, 4 또는 8개의 세포로 된 군체가 증가하는 것이 관찰되어 세포 성장이 잘 이루어짐을 확인할 수 있었다.

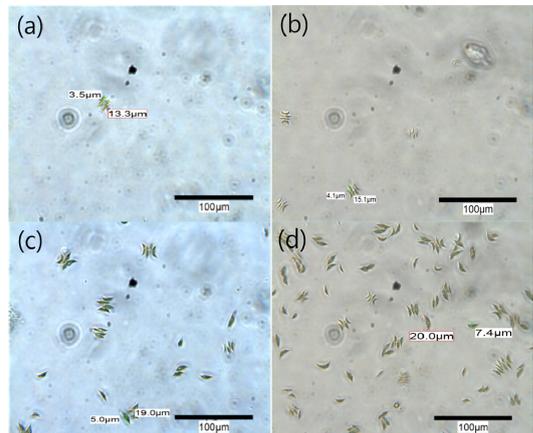


Fig. 3. The optical microscope images of cultured microalgae for (a) 10, (b) 26, (c) 60, (d) 75 days

Fig. 4는 미세조류 배양 일에 따라 측정된 세포 크기와 숫자에 대한 분포 그래프이다. 10일째 관찰한 미세조류는 단세포 형태로서 평균 크기는 $3.5 \mu\text{m} \times 13.8 \mu\text{m}$ 이었으며, 26일의 평균 크기는 $3.4 \mu\text{m} \times 12.9 \mu\text{m}$ 이다. 26일에 관찰된 세포의 길이는 $10.3 \mu\text{m} - 15.2 \mu\text{m}$ 에 분포하고 있으며, 이 중에서 과반수의 미세조류가 평균

이하의 길이를 가지고 있었다. 60일간 성장한 미세조류의 평균 크기는 $15.8 \mu\text{m} \times 4.4 \mu\text{m}$, 75일까지 성장한 미세조류의 평균 크기는 $4.8 \mu\text{m} \times 18.4 \mu\text{m}$ 로 측정되었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 *S. obliquus* 크기 분포는 배양일이 증가함에 따라 단세포의 크기가 성장하고 있다. 배양 10일을 기준으로 배양 75일까지의 미세조류는 평균 성장은 40 % 정도이고, 최대 120 % 까지 성장하고 있는 것을 볼 수 있다.

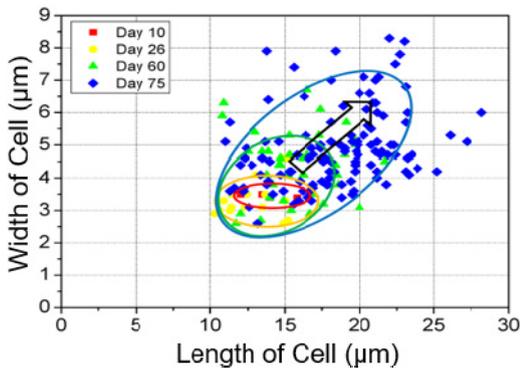


Fig. 4. Cell size by the culture days (10, 26, 60, and 75 days)

Fig. 5는 배양되는 과정에서 측정된 흡광도와 광학현미경 이미지에 측정된 단위면적당 세포 수에 대한 그래프이다. 배양 10일의 흡광도는 0.01이며, 미세조류가 증가함에 따라 점차 증가하여 60일에는 1.75이며, 75일에는 1.80의 값이 측정되었다. 흡광도의 변화량이 2.9 % 정도인 배양 60일과 배양 75일 사이에 미세조류의 세포 수가 3배 이상이 증가하는 것이 보인다.

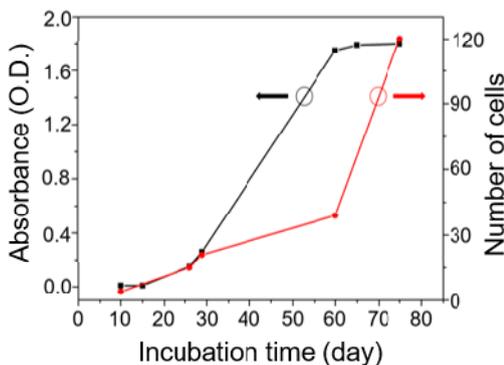


Fig. 5. Microalgae growth graphs in MBBM culture medium. Absorbance and number of cells were plotted by incubation time (days)

3.2 라만 분광 및 분석

미세조류에 대한 라만 분광법은 미세조류의 특성 및 성장에 따른 변화를 분석하는 방법으로 새롭게 사용하고 있다[7-12]. 라만 분광은 분자의 진동방식을 측정해서 물질의 특성을 분석하는 장비이다. 미세조류 분석을 위하여 건조, 동결, 분쇄와 같은 샘플 전처리가 필요하지 않고 분석과정에서도 시료를 파괴하지 않기 때문에 실시간 모니터링이 가능한 장점이 있다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 532 nm 파장의 레이저를 이용하여 미세조류 배양을 시작일로부터 10, 15, 60, 65 일에 측정된 라만 스펙트럼 그래프이다. 배양 후 10일에 측정된 라만 스펙트럼에서 3개 (997 cm^{-1} , 1148 cm^{-1} , 1515 cm^{-1})의 피크값이 관찰되었고, 이 중에서 제일 강한 피크값은 1515 cm^{-1} 이다. 이러한 라만 피크값은 *S. obliquus* 미세조류의 특성을 보여주고 있다[8]. 배양 후 15일 이후에 측정된 라만 스펙트럼에서는 형광 배경효과가 보인다. 시간이 증가함에 따라 형광 효과도 함께 증가하고 있다.

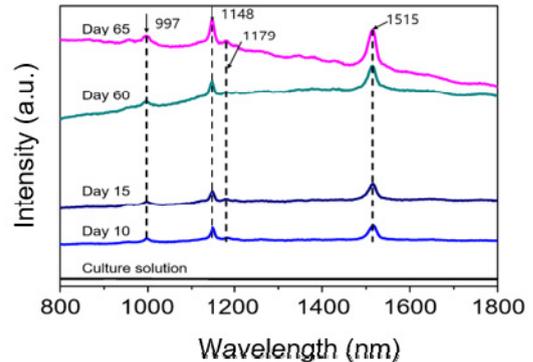


Fig. 6. Raw raman spectra of *S. obliquus* on culture solution, day 10, day 15, day 60, and day 65. After day 60, strong fluorescent background effects appeared

형광 배경효과는 미세조류와 같은 색소가 존재하는 생물학적 샘플에서 나타나는 형상으로 스펙트럼 모양을 전체적으로 왜곡시키게 된다[16]. 이러한 배경효과는 스펙트럼의 피크값들이 비선형성으로 나타나게 되므로 라만 분광을 정확히 분석하기 위해서는 배경효과를 제거해야 한다[17-18].

*S. obliquus*에는 엽록소 a, β -카로틴 등과 같은 성분으로 구성되어 있다. 라만 스펙트럼에서 β -카로틴에 관련된 피크값은 1001 cm^{-1} , 1152 cm^{-1} , 1161 cm^{-1} ,

1521 cm^{-1} 이며, 엽록소 a의 피크값은 주로 1182 cm^{-1} , 1534 cm^{-1} 에 나타난다[8].

Fig. 7 (a)는 라만 스펙트럼에서 형광 효과가 제거된 후의 라만 스펙트럼을 보여준다. 라만 스펙트럼은 997 cm^{-1} , 1148 cm^{-1} , 1515 cm^{-1} 부근에서 강한 피크값을 보인다. 3개의 라만 스펙트럼 피크값은 시간 증가에 따라 피크값이 점차 증가하는 것을 보고 있다. 측정된 라만 스펙트럼 피크값에서 4 cm^{-1} 오차범위에서 β -카로틴 피크값과 일치하고 있다. 따라서 미세조류 배양 일수에 따라 3개의 피크값 강도 증가는 엽록소 a보다 β -카로틴 증가가 매우 크다는 것을 알 수 있다.

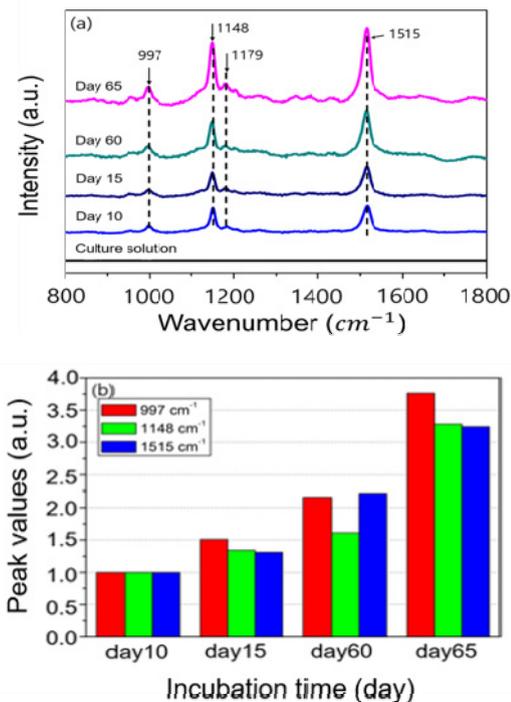


Fig. 7. The peak values at day 15, day 60, and day 65 were based on day 10. (a) Raman spectra of *S. obliquus* after removal of fluorescent background effects, (b) Raman spectra peaks at 997 cm^{-1} , 1148 cm^{-1} and 1515 cm^{-1}

Fig. 7 (b)는 3개의 라만 피크값에 대한 시간별 변화 값에 대한 그래프이다. 미세조류 배양 10일을 기준으로 배양 15일에 O.D. 값의 변화량은 거의 없으나 997 cm^{-1} 피크값은 1.5배 증가하였으며, 1148 cm^{-1} 피크값과 1515 cm^{-1} 피크값은 1.3배 증가하였다. O.D.값이 1.75로 증가한 60일의 경우, 997 cm^{-1} 피크값은 2.2배, 1148 cm^{-1} 피크값은 1.6배, 1515 cm^{-1} 피크값은 2.2배

까지 증가하였다. 배양 65일의 경우, 피크값은 배양 10일을 기준으로 각각 3.8, 3.3, 3.2배 증가하였다. 그러나 배양일 15일을 기준으로 하면 세 피크값 모두 2.5배로 증가하는 것으로 나타났다. 라만 분광법은 기존에 미생물 검측에 사용된다고 알려졌었는데 미생물뿐만 아니라 미세조류 배양에서도 세포 성장 및 세포 내 생산물질에 대한 생성 정도를 측정하는 데 유용하게 사용될 것으로 사료된다[10].

4. 결론

미세조류의 한 종류인 *S. obliquus*를 75일 동안 배양 하며 흡광도(O.D.), 현미경 이미지, 라만 분광계 등으로 미세조류의 성장 변화를 관찰하였다. 배양 기간(75일) 동안 흡광도의 변화는 0.01에서 1.8로 증가하였으며 미세조류의 크기는 3.5 μm x 13.8 μm 에서 평균 크기는 40% 이상 증가하였으며, 최대 6.0 μm x 28.2 μm 크기로 성장하는 것이 관찰되었다.

라만 분광계의 측정 결과에서, β -카로틴에 해당하는 3개의 스펙트럼 피크값 997 cm^{-1} , 1148 cm^{-1} , 1515 cm^{-1} 에서 측정되었으며, 배양 기간의 증가에 따라 스펙트럼 피크값의 세기가 증가하였다. 배양 초기의 라만 피크값 들이 유사한 비율로 증가하는 시점이 최대 배양 시점으로 판단된다. 또한, 미세조류는 배양 시간이 증가함에 따라 β -카로틴 증가가 대부분을 차지하고 있는 것을 보인다. 배양일 10일을 기준으로 β -카로틴의 피크값은 3배 이상 증가함을 확인하였다. 이러한 실험 결과를 토대로 *S. obliquus*의 대량 배양을 위한 기초자료로써 유용하게 이용될 것이다.

References

- [1] Ministry of Environment, Environmental Statistics Yearbook 2018, Statistical publications, Ministry of Environment, Korea, pp.129.
- [2] Ministry of Environment, Environmental Statistics Yearbook 1999, Statistical publications, Ministry of Environment, Korea, pp.106.
- [3] C. D. Kang, T. H. Park, S. J. Sim, "Biological CO₂ Fixation to antioxidant carotenoids by photosynthesis Using the green microalga *Haematococcus pluvialis*.". *Korean Chemical Engineering Research*, Vol. 44, No. 1, pp.46-51, Feb. 2006.

- [4] B. H. Jo, H. J. Cha, "Biodiesel production using microalgal marine biomass.", *KSBB Journal*, Vol. 25, No. 2, pp.109-115, Apr. 2010.
- [5] J. J. Kim, H. S. Kim, J. S. Kang, S. P. Lee, "An analysis of biodisels technology and metering using microalgae.", *Korea Technology Innovation Society*, pp.5-11, May. 2014.
- [6] D. U. Santos-Ballardo, S. Rossi, V.Hernandez, R. V. Gomez, M. D. C Rendon-Unceta., J.C. Corrales. "A simple spectrophotometric method for biomass measurement of important microalgae species in aquaculture.", *Aquaculture*, Vol. 448, No. 1, pp.87-92, Nov. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaculture.2015.05.044>
- [7] X. Wei, D. Jie, J. J. Cuello, D. J. Johnson, Z. Qiu, and Y. He, "Microalgal detection by Raman microspectroscopy.", *Trends in Analytical Chemistry* Vol. 53, pp.33-40, Jan. 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trac.2013.09.012>
- [8] Y. Shao, H. Fang, H. Zhou, Q. Wang, Y. Zhu, and Y. He, "Detection and imaging of lipids of *Scenedesmus obliquus* based on confocal Raman microspectroscopy.", *Biotechnology for Biofuels*, Vol. 10, p. 300, Dec 2017. DOI: <http://doi.org/10.1186/s13068-017-0977-8>
- [9] G. B. Jung, "Biomedical application of raman spectroscopy.", *New Physics: Sae Mulli*, Vol. 67, No. 6, pp. 665-678, Jun. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.3938/NPSM.67.665>
- [10] J. H. No, T. K. Lee, "Rapid bacterial identification using raman spectroscopy.", *Korean Journal of Microbiology*, Vol. 53, No. 2, pp.71-78, Jun. 2017. DOI: <https://doi.org/10.7845/kim.2017.7034>
- [11] S. K. Kim, D. Y. Ko, J. K. Park, A. R. Park, S. J. Baek, "A hierarchical cluster tree based fast searching algorithm for raman spectroscopic identification.", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 20, No. 3, pp.562-569, Mar. 2019. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.3.562>
- [12] R. J. Swain, and M. M. Stevens, "Raman microspectroscopy for non-invasive biochemical analysis of single cells.", *Biochemical Society Transactions* Vol. 35, No. 3, pp.544-549, Jun. 2007. DOI: <https://doi.org/10.1042/BST0350544>
- [13] S. Y. Kim, S. J. Jung, H. S. Kim, D. H. Gam, J. W. Kim, "Optimization of extraction conditions for astaxanthin from *Haematococcus pluvialis*.", *Korean Society for Biotechnology and Bioengineering Journal* Vol. 34, No. 4, pp.346-351, Dec. 2019. DOI: <http://dx.doi.org/10.7841/ksbbj.2019.34.4.346>
- [14] S. J. Joo, H. J. Hwang, S. Zhang, S. J. Hwang, "Effects of light condition in the continuous mass cultivation of microalgae *Scenedesmus dimorphus*.", *Korean Society of Water and Wastewater*, Vol. 29, No. 3, pp.319-323, Jun. 2015. DOI: <https://doi.org/10.11001/jksww.2015.29.3.319>
- [15] S. J. Joo, S. Zhang, K. J. Choi, S. M. Lee, S. J. Hwang, "Effects of sodium bicarbonate as an inorganic carbon source on the growth of *Scenedesmus dimorphus*.", *Journal of Korean Society of Wastewater*, Vol. 28, No. 5, pp.555-560, Oct. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.11001/jksww.2014.28.5.555>
- [16] Y. Y. Huang, C. M. Beal, W. W. Cai, R. S. Ruoff, E. M. Terentjev, "Micro-raman spectroscopy of algae: composition analysis and fluorescence background behavior.", *Biotechnol Bioeng*, Vol. 105, No. 5, pp.889-898, Apr. 2010. DOI: <https://doi.org/10.1002/bit.22617>
- [17] O. D. Paraschuk, N. N. Brandt, O. O. Brovko, A. Y. Chikishev, "Optimization of the rolling-circle filter for raman background subtraction.", *Applied Spectroscopy*, Vol. 60, No. 3, pp.288-293, Mar. 2006. DOI: <https://doi.org/10.1366/000370206776342553>
- [18] I. Ruisanchez, P. M. Ramos, "Noise and background removal in raman spectra of ancient pigments using wavelet transform.", *Journal of Raman Spectroscopy*, Vol. 36, No. 9, pp.848-856, Sep. 2005. DOI: <https://doi.org/10.1002/jrs.1370>

유 용 진(Yon-Jin Yoo)

[준회원]



- 2016년 2월 : 선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과 (학사)
- 2018년 8월 ~ 현재 : 선문대학교 일반대학원 나노과학과 (석사과정)

<관심분야>

ICT, 바이오

이 건 우(Geon Woo Lee)

[준회원]



- 2019년 8월 : 선문대학교 공과대학 정보디스플레이학과 (학사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 선문대학교 일반대학원 나노과학과 (석사과정)

<관심분야>

ICT, 반도체, 바이오

백 동 현(Dong-Hyun Baek)

[정회원]



- 2007년 8월 : 선문대학교 자연과학대학 신소재과학과 (이학사)
- 2013년 8월 : 고려대학교 일반대학원 전자전기공학과 (공학박사)
- 2014년 9월 ~ 2018년 2월 : U of Wisconsin-Madison 박사후 연구원

• 2018년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 기계ICT공학융합부 계약교수

〈관심분야〉

MEMS, 유연 디스플레이

김 진 우(Jin-Woo Kim)

[정회원]



- 1997년 2월 : 인하대학교 생물공학과 (공학석사)
- 2000년 5월 : Colorado State Univ.(美) 화학공학과 (공학석사)
- 2004년 10 : McGill Univ. (캐) Biosystems Engineering (박사)
- 2015년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 식품과학과 교수

〈관심분야〉

생물, 바이오

김 호 섭(Ho Seob Kim)

[정회원]



- 1992년 5월 : 인하대학교 물리학과 (학사)
- 1992년 5월 : 미국 미주리주립대학교 물리학과 (박사)
- 1992년 5월 ~ 1997년 10월 : 미국 IBM T. J. Watson 연구소 연구원

• 1992년 3월 ~ 현재 : 선문대학교 디스플레이반도체공학과 교수

〈관심분야〉

반도체기술, 스마트팜