

## 부착조류 파판배양 시 Light Emitting Diodes (LEDs)의 적용

배재현 · 안희춘 · 김미경 · 박진철<sup>1</sup> · 박흥기<sup>1</sup> · 권오남<sup>\*2</sup>

국립수산과학원 동해수산연구소 해역산업과 · <sup>1</sup>강릉원주대학교  
해양자원육성학과 · <sup>2</sup>강릉원주대학교 동해안생명과학연구소

### Adaptation of light emitting diode (LED) at culture on attachment plate of diatom

Jae-Hyun BAE, Heui-Chun AN, Jin-Chul PARK<sup>1</sup>, Heum-Gi PARK<sup>1</sup> and O-Nam KWON<sup>\*2</sup>

Aquaculture Industry Division, East Sea Fisheries Research Institute, NFRDI, Gangneung 210-861, Korea

<sup>1</sup>Department of Marine Bioscience Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

<sup>2</sup>East Coastal Life Science Institute Gangneung-Wonju National University, Gangneung 210-702, Korea

We investigated biomass, diatom species and fucoxanthin contents as cell growth, fatty acid and amino acid contents as nutritional composition of diatoms attached on plate to confirm effects of light emitting diodes (LEDs) due to block off natural light. In the single LED irradiation, biomass showed significantly higher to  $30.0 \pm 6.48 \text{ mg/m}^2$  in white LED than that of others ( $P < 0.05$ ). The dominate diatom species was *Navicula cancellata*. Their lipid contents showed significantly higher to  $112.9 \pm 19.23 \text{ ug/mg DM}$  in control than that of others LEDs. But eicosapentaenoic acid (EPA) contents showed significantly higher to  $3.3 \pm 0.62 \text{ ug/mg DM}$  than others, but not significantly differed with natural control light treatment ( $P < 0.05$ ). And total protein contents are higher in control and blue LED light than that of others, but essential amino acid contents showed significantly higher to  $3.2 \pm 4.8\%$  in control ( $P < 0.05$ ). In mixing light with natural and LED light, biomass showed  $2.6 \pm 0.22 \text{ mg/m}^2$  in blue LED ( $P < 0.05$ ). Fatty acids contents were not significantly differed with all treatments. Amino acid contents showed to  $11.0 \pm 0.33 \text{ ug/mg DM}$  in white LED ( $P < 0.05$ ), but not significantly differed with others LED lights ( $P > 0.05$ ). Therefore, we could suggest that irradiation of blue LED in natural light very benefit to diatom culture for larvae of sea cucumber and abalone and do on.

Keywords: LED, Natural light, Diatom, Culture, Biomass

### 서론

전복과 해삼은 수정란에서 부화 후 수일 동안 부유생활을 하게 된다. 이후 변태와 함께 착저하여 바닥 등의 부착기질에 붙은 규조류를 먹으면서 성장을 한다. 일반적으로 이들의 인공종묘생산을 위해서는 착저기 유생

을 위해 투명한 plastic plate (부착 파판)에 먹이인 부착 규조류를 미리 번식시켜 먹이로 공급해 주게 된다 (Gordon et al., 2006). 보통 이러한 부착 파판의 규조류는 자연광의 차광에 따라 45일 정도의 관리기간 이후에야 이들 유생을 수용하기에 적합한 밀도로 번식하게 된

\*Corresponding author: onamkwon@yahoo.com, Tel: 82-33-640-2345, Fax: 82-33-640-2340

다. 따라서 초기 부착 구조류의 준비가 해삼과 전복 등의 인공종묘생산 양을 결정하는 중요한 요인으로 작용하는 것이다. 하지만 최근까지도 대부분의 양식장에서는 부착 파판에 구조류의 번식과 섭취에 따른 영양학적 균형을 고려하지 않은 채 인공배합사료나 대형해조류로 먹이전환을 행하고 있기 때문에 착저기 유생단계에서의 생존을 저하로 이어지고 있으나 부착 구조의 인위적인 배양에 한계가 있기 때문에 부착 구조류를 적극적으로 이용하지는 못하고 있는 실정이다. 따라서 부착 구조의 양적 문제점을 해결하면서 장기간 안정적으로 공급해 주기 위해서는 기존 배양방법보다 단위시간당 생산량을 높을 수 있는 배양기술이 개발될 필요가 있다.

미세조류는 광합성을 통해 세포성장을 행하는 독립 영양생물이기 때문에 광 관련인자는 무엇보다 고려되어야 할 중요한 사항이다. 특히 광원의 선택은 미세조류의 양적 성장과 질적 함유량 변화를 유도할 수 있기 때문에 인위적인 미세조류 배양에 있어 매우 중요한 요인이다 (Das et al., 2011; Yoshioka et al., 2012). 최근 미세조류의 효율적인 대량배양을 위해 모든 파장대를 구현할 수 있어 선호하는 특정 파장만을 공급해 줄 수 있는 light emitting diode (LED)가 적극 검토되고 있다 (Das et al., 2011). 실제 다양한 미세조류의 연구를 통해 기존 배양방법 보다 양적으로나 질적 (영양조성)으로 향상된 연구결과를 발표하고 있다 (Katsuda et al., 2006; Choi et al., 2013; Park et al., 2013; Saha et al., 2013; Markou, 2014). 이러한 맥락으로 LED를 부착 파판의 구조류를 배양하는데 활용한다면 자연광에 의존하여 생산량이 불안정했던 기존 배양방법보다 효율적인 대량배양이 가능하리라 판단된다. 하지만 아직까지 무척추동물의 인공종묘생산을 위한 부착 파판에 부착성 구조류의 LED 활용사례는 미미한 수준에 머물고 있어 이에 따른 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 LED광을 전복과 해삼 등 종묘생산 현장에 적용시키기 위해 자연광의 차단여부에 따른 구조류 번식과 초기 유생들을 위한 부착 구조류들의 영양조성변화를 확인하였다.

## 재료 및 방법

### 실내수조 부착파판의 단일 LED광 적용

부착 파판 내 LED 단일광 조건 실험에서 대조구를 제외한 모든 실험구는 차광막을 통해 차광한 상태에서

단독 LED만을 조명하였다. 200 L의 원형 수조에 자연 해수를 1시간에 100 L (24회전/일)의 주수량이 되도록 조절하였으며, 미세조류의 부착을 위해 별도의 여과장치는 사용하지 않았다. 실험에 사용된 LED 광원은 220V 무극성 LED를 사용하였으며, 대조구인 자연광은 지나친 광의 유입을 막기 위해 차광막 (75% 차광)으로 차광하여 수면에서 평균  $62.3 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Digital light meter, TES, Taiwan, 최저  $7.4 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , 최고  $117.2 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ )가 되도록 유지하였다. 각각의 LED 수조에는 red, blue 및 white LED를 3개 단위로 묶인 모듈을 8개씩 장착하였으며 (1개 모듈당 각 LED의 전력소모량은 red, 1.08 W; blue, 0.72 W; white, 2.16 W), red-blue 혼합 LED 실험구에서는 3개 단위로 묶인 모듈을 각각 4개 (총 8개)씩 장착하여 수면과의 거리를 35 cm를 유지하여 설치하였다. 또한 수면 아래에는 전복 치패 사육용 플라스틱 파판을 20장 ( $0.13 \text{ m}^2/\text{plate}$ )씩 넣어진 1세트를 수면 아래 10 cm에 위치할 수 있도록 설치해 주었다 (Fig. 1-A).

LED 단일광이 적용된 실험구의 광량은 red, blue, white에서 각각  $7.1$ ,  $1.5$  및  $23.5 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 확인되었고, red와 blue LED 혼합 조명구에서는  $4.6 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 조사되었다. 광주기는 대조구인 자연광을 고려하여 16:8 (L:D)로 조절하여 LED 조명을 조사하였다. 실험기간 (6월 16일에서 7월 30일) 동안의 수온은  $13.4\text{--}21.7^\circ\text{C}$ 사이로 7월 이후 꾸준히 상승하여 실험종료 시  $20.2^\circ\text{C}$ 이었다.

실험종료일인 45일 후에 임의대로 2장의 파판을 회수하여 총 4면에 있는 모든 미세조류를 해수 1 L와 붓을 이용해서 조심스럽게 털어 내고, 5% 포르말린 희석액으로 고정시켰다. 이후 약 500 mL인 고정 시료의 용량을 200 mL까지 침지 농축하여 미세조류의 부착 정도를 생체량 (mg dry weight)과 구조류 (diatom)의 보조색소인 fucoxanthin 함량 및 미세조류의 종 조성을 확인하였다. 또한 별도의 2장의 파판을 같은 방법으로 털어내어  $\text{AlSO}_4$ 가 함유된 응집제 (Magic Pool 99, MP Tech, Korea)를 적당량 사용하여 침전시킨 후 지방산과 아미노산의 분석에 이용하였다.

### 실내 부착 파판 내 LED 조명등과 자연광의 혼합 적용

LED 및 자연광과의 복합광 실험 조건은 LED 단일광 조건의 디자인과 시설을 그대로 사용하였지만, 각각

의 조명과 자연광이 함께 조사될 수 있도록 설치하였다 (Fig. 1-B). 즉, 상기 실험과 달리 차광막을 이용하지 않아 자연광을 함께 LED 조명등과 이용한 것이다. 수조 각각의 광량은 대조구에서  $3.9 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , red LED는  $7.0 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , blue LED에서  $1.9 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ , white LED는  $12.9 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$  이었으며, red와 blue LED 혼합 조명한 수조에서는  $3.7 \mu\text{mol photon m}^{-2}\text{s}^{-1}$ 로 조사되었다. 실험기간 동안의 수온은  $18.6\text{--}23.4^\circ\text{C}$  사이로 8월 1일에서 9월 15일까지 평균  $21.6\pm 1.31^\circ\text{C}$ 로 나타났다. 실험종료 후 측정항목으로는 단일 LED의 적용실험과 마찬가지로 생체량, 보조색소인 fucoxanthin, 미세조류의 종 조성, 아미노산 및 지방산 함량 등을 조사하였다.

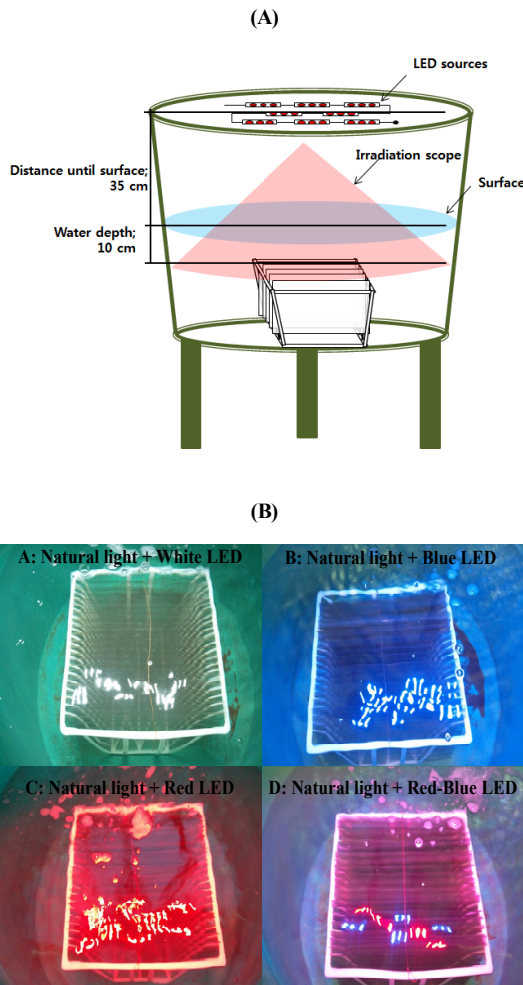


Fig. 1. Experiment view of LED irradiation treatment (200 L FRP tank) and diatoms attaching plate (30 cm × 40 cm). (A) schematic of installed LED and diatom attaching plate in tank; (B) for LED trials irradiated with natural and four LED sources (ISO 400 and exposure 0.5).

생체량, 세포수, 종 조성, fucoxanthin 함량, 지방산 및 아미노산의 분석 방법

생체량은 전자저울 (Mettler-Toledo ML204, U.S.A.)로 무게를 측정하였으며, 세포수 및 종 조성은 고정된 시료를 현미경 (Olympus OZ40, U.S.A.) 하에서 관찰하였다. 색소인 fucoxanthin 함량은 Wellburn (1994)의 방법에 따라 분광광도계 (V-550, JASCO, Japan)로 값을 측정한 후 공식에 대입하여 구하였으며, 그 외 지방산과 아미노산은 Park et al. (2013)의 방법에 따라 전처리 후 gas chromatography (HP6890 plus, Agilent, U.S.A.)와 아미노산 분석기 (L-8800, Hitachi, Japan)를 이용하여 구하였다.

### 통계처리

모든 실험결과의 생체량, fucoxanthin 함량, 총 출현 종 수, 지방산 및 아미노산 함량의 평균값은 one-way ANOVA-test를 실시 후 Duncan's multiple range test (Duncan, 1955)를 실시하여 처리 평균 간의 유의성 ( $P < 0.05$ )을 SPSS program (Ver. 14.0)으로 검정하였다.

## 결 과

### 실내 부착 파판 내 단일 LED의 적용

#### 생체량, 색소함량 및 종 조성

45일간 차광된 상태에서 수조 내 부착시킨 미세조류를 포함하는 생체량 (biomass,  $\text{mg/m}^2$ ), fucoxanthin 함량 ( $\mu\text{g/mg biomass}$ ), 총 출현종수, 우점종과 아우점종의 종명, 우점도 및 출현 세포수 ( $\times 10^4 \text{ cells/a plate}$ ) 등을 Table 1에 나타내었다. 우선, 생체량은 white LED에서  $30.0\pm 6.48 \text{ mg/m}^2$ 으로 유의적으로 가장 높았고, red LED에서  $20.0\pm 2.62 \text{ mg/m}^2$ 으로 가장 낮았다 ( $P < 0.05$ ). Fucoxanthin 함량은 대조구 (control)에서  $1.5\pm 0.45 \mu\text{g/mg biomass}$ 로 가장 높았으며, red LED에서 가장 낮은  $0.1\pm 0.03 \mu\text{g/mg biomass}$ 으로 조사되었다 ( $P < 0.05$ ). 총 출현종과 출현 세포수는 대조구에서 15종,  $21.9\pm 2.80 (\times 10^4 \text{ cells/a plate})$ 로 가장 많았던 반면 red LED에서는 가장 낮게 나타났다 ( $P < 0.05$ ). 대조구에서 우점종은 *Diplneis splendica*로 0.2781의 우점도를 보였으며, LED에 따른 우점종은 각기 달라서 red, blue, white 및 red-blue에서 각각 Cyanobacteria, *Amphipora gigantea*, *Navicula cancellata* 및 *N. cancellata*로 조사되었다.

**Table 1. Biomass (mg/m<sup>2</sup>), fucoxanthin content (ug/m<sup>2</sup>), appearance species (X10<sup>4</sup> cells/a plate), No. of total appearance cells (×10<sup>4</sup> cells/a plate) and name, dominant (and subdominant), total cells (X10<sup>4</sup> cells/a plate) of dominant and subdominant cells of attached diatom in each light-emitting diode (LED) trials cultured for 45 days on the different single LED sources\***

Light**	Con	Red	Blue	White	Red-Blue	
Biomass (mg/m <sup>2</sup> )	27.8±4.90 <sup>ab</sup>	20.0±2.62 <sup>a</sup>	20.3±3.02 <sup>a</sup>	30.0±6.48 <sup>b</sup>	22.0±4.36 <sup>ab</sup>	
Fucoxanthin (ug/mg mass)	1.5±0.45 <sup>d</sup>	0.1±0.03 <sup>a</sup>	0.5±0.19 <sup>c</sup>	0.3±0.07 <sup>b</sup>	0.1±0.05 <sup>a</sup>	
Total appearance species	15	10	14	13	11	
No. of total appearance cells (×10 <sup>4</sup> cells/a plate)	21.9±2.80 <sup>d</sup>	7.1±0.46 <sup>a</sup>	11.4±2.03 <sup>c</sup>	9.9±0.70 <sup>b</sup>	8.1±0.76 <sup>a</sup>	
	Name	<i>Diploneis splendica</i>	Cyanobacteria	<i>Amphipora gigantea</i>	<i>Navicula cancellata</i>	<i>N. cancellata</i>
Dominant	Dominant	0.2781	0.3571	0.2439	0.2951	0.2800
	Total cells (×10 <sup>4</sup> cells/a plate)	4.2±1.31	1.0±0.00	2.0±0.00	1.4±0.63	1.4±0.63
	Name	<i>Thalssionema nitzschoides</i>	<i>N. cancellata</i>	<i>N. cancellata</i>	Cyanobacteria	<i>Dinophysi</i> sp.
Subdominant	Subdominant	0.1788	0.2500	0.2195	0.2000	0.2000
	Total cells (×10 <sup>4</sup> cells/a plate)	2.7±2.81	0.7±0.62	1.8±0.94	1.0±0.00	1.0±0.00

\*Superscripts of "a" to "d" on values (mean±SD) indicate significant differences as non-order symbols by Duncan's multiple range test. Totally different superscripts (ex. a:b or a:c etc) between light conditions indicate significant differences (P<0.05) while a same superscript (ex. a:ab or b:ab) indicate non-significant differences (P>0.05).

\*\*Con, Red, Blue, White and Red-Blue indicated control, red LED, blue LED, white LED and red and blue mix LED, respectively.

#### 지방산 및 아미노산 조성

LED 광원의 단독 조사 시 미세조류의 지방산 (ug/mg DM)을 Table 2에 나타내었다. 지질함량은 대조구에서 112.9±19.23 ug/mg DM으로 가장 높게 조사되었으며, red LED 광원에서는 65.7±4.32 ug/mg DM로 가장 낮은 지질 함량을 보였다 (P<0.05). 포화지방산 (saturated fatty acid, SFA)의 경우, 대조구에서 25.0±4.5 ug/mg DM로 가장 높았던 반면 red 및 blue LED는 가장 낮은 함량을 보였다 (P<0.05). 고도불포화지방산 (highly unsaturated fatty Acid, HUFA)에서는 red-blue LED 광원에서 9.0±1.54 ug/mg DM로 가장 높은 함량을 보였지만 대조구의 8.0±1.23 ug/mg DM와 유의적인 차이는 보이지 않았다 (P>0.05). 지방산불포화도 (unsaturated index, UI)는 대조구와 red-blue LED 광원에서 각각 31.7, 32.4 ug/mg DM로 다른 LED 광원에 비해 높은 값을 보였다 (P<0.05). C20:5n3 (eicosapentaenoic acid, EPA) 함량에 있어서는 red-blue LED 광원에서 3.3±0.62 ug/mg DM으로 높게 조사되었지만 red LED 광원을 제외한 모든 실험구간에서는 유의적인 차이는 없는 것으로 나타났다 (P>0.05).

한편, 아미노산 (ug/mg DM) 함량과 총 단백질 함량을 Table 3에 나타내었다. 총 단백질 함량 (protein, %)은 blue LED 광원과 대조구에서 각각 9.4, 9.9%로 다

른 광원구에 비해 높은 함량을 보였다. (P<0.05), 필수 아미노산 (essential amino acids, EAA)은 3.2±0.48%로 대조구에서 가장 높았던 반면에 red LED 광원에서는 모든 아미노산의 항목과 총 단백질 및 필수아미노산 함량이 유의적으로 가장 낮은 것으로 나타났다 (P<0.05).

#### 실내 부착 파판 내 LED 조명등과 자연광의 혼합 적용 생체량, 색소함량 및 종 조성

45일간 차광하지 않고 LED와 자연광을 함께 받은 상태로 배양된 미세조류의 생체량 (biomass, mg/m<sup>2</sup>), fucoxanthin 함량 (ug/mg biomass), 총 출현종수, 우점종과 아우점종의 종명, 우점도 및 출현 세포수 (×10<sup>4</sup> cells/a plate) 등을 Table 4에 나타내었다. m<sup>2</sup> 당으로 계산된 총 생체량은 blue LED가 대조구보다 높은 2.6 mg의 생체량을 보여 가장 높은 것으로 나타났으며, white와 red-blue LED 혼합에서는 1.7 mg으로 가장 낮은 값을 보였다 (P<0.05). 생체량 당 fucoxanthin은 blue LED에서 0.58±0.059ug/mg biomass로 가장 높은 함량을 보였으며, 그 뒤로 대조구가 0.34±0.029 ug/mg biomass으로 높게 나타났다. 반면 red-blue 혼합 LED에서는 0.05±0.009 ug/mg biomass으로 가장 낮은 값을 보였다.

한편, 총 출현종과 출현 세포수는 blue LED에서 각각 11종, 11.8±0.37 (×10<sup>4</sup> cells/a plate)로 가장 높게 나

타난 반면 red LED에서는 가장 낮게 조사되었다 (P<0.05). 우점종은 LED에 따라 다르게 나타나 red, blue, white 및 red-blue에서 각각 *Pleurosigma angulatum*,

*Fragilaria oceanica*, *N. cancellata* 및 *Licmorphora abbreviata*로 조사되어 1차 실험인 단일 LED 만을 적용했을 때와 다소 차이를 보였다.

**Table 2. Fatty acid contents (ug/mg dry matters) of microalgae attached on a plate at single LED Light\***

Light**	Con	Red	Blue	White	Red-Blue
Total lipid (mg/g)	112.9 ± 19.23 <sup>c</sup>	65.7 ± 4.32 <sup>a</sup>	68.4 ± 9.88 <sup>a</sup>	83.8 ± 8.28 <sup>b</sup>	92.3 ± 9.82 <sup>b</sup>
Sum of SFA <sup>1</sup>	25.0 ± 4.5 <sup>c</sup>	13.2 ± 1.6 <sup>a</sup>	14.4 ± 2.0 <sup>a</sup>	18.5 ± 2.0 <sup>b</sup>	20.3 ± 2.0 <sup>b</sup>
C14:0	6.3 ± 1.15 <sup>c</sup>	1.2 ± 2.13 <sup>a</sup>	4.9 ± 1.08 <sup>b</sup>	4.6 ± 0.48 <sup>b</sup>	1.8 ± 3.05 <sup>a</sup>
C15:0	2.7 ± 0.35 <sup>c</sup>	1.8 ± 0.14 <sup>b</sup>	0.0 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.0 ± 0.24 <sup>b</sup>	2.8 ± 0.51 <sup>c</sup>
C16:0	10.0 ± 2.28 <sup>b</sup>	5.9 ± 0.70 <sup>a</sup>	6.7 ± 0.59 <sup>a</sup>	7.1 ± 0.68 <sup>a</sup>	9.2 ± 1.57 <sup>b</sup>
C17:0	2.6 ± 0.35 <sup>c</sup>	1.9 ± 0.18 <sup>b</sup>	0.0 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.0 ± 0.28 <sup>c</sup>	2.8 ± 0.47 <sup>c</sup>
C18:0	3.4 ± 0.52 <sup>ab</sup>	2.4 ± 0.21 <sup>a</sup>	2.9 ± 0.62 <sup>ab</sup>	2.7 ± 0.34 <sup>a</sup>	3.8 ± 0.63 <sup>b</sup>
Sum of MFA <sup>2</sup>	7.3 ± 1.18 <sup>c</sup>	4.5 ± 0.39 <sup>b</sup>	2.8 ± 0.21 <sup>a</sup>	5.3 ± 0.60 <sup>b</sup>	3.7 ± 0.65 <sup>a</sup>
C14:1	3.4 ± 0.54 <sup>c</sup>	2.3 ± 0.21 <sup>b</sup>	0.0 ± 0.00 <sup>a</sup>	2.5 ± 0.30 <sup>b</sup>	3.7 ± 0.65 <sup>c</sup>
C16:1	4.0 ± 0.69 <sup>c</sup>	2.3 ± 0.19 <sup>b</sup>	2.8 ± 0.21 <sup>b</sup>	2.8 ± 0.30 <sup>b</sup>	0.0 ± 0.00 <sup>a</sup>
Sum of HUFA <sup>3</sup>	8.0 ± 1.23 <sup>c</sup>	5.8 ± 0.55 <sup>a</sup>	7.2 ± 1.45 <sup>b</sup>	6.2 ± 0.47 <sup>a</sup>	9.0 ± 1.54 <sup>c</sup>
C18:2n6	5.0 ± 0.79 <sup>b</sup>	3.6 ± 0.36 <sup>a</sup>	4.6 ± 0.83 <sup>b</sup>	3.8 ± 0.24 <sup>a</sup>	5.6 ± 0.95 <sup>b</sup>
C20:5n3	3.0 ± 0.46 <sup>ab</sup>	2.1 ± 0.20 <sup>a</sup>	2.6 ± 0.62 <sup>ab</sup>	2.4 ± 0.29 <sup>ab</sup>	3.3 ± 0.59 <sup>b</sup>
n-3 HUFA	3.0 ± 0.46 <sup>ab</sup>	2.1 ± 0.20 <sup>a</sup>	2.6 ± 0.62 <sup>ab</sup>	2.4 ± 0.29 <sup>ab</sup>	3.3 ± 0.59 <sup>b</sup>
n-6 HUFA	5.0 ± 0.79 <sup>b</sup>	3.6 ± 0.36 <sup>a</sup>	4.6 ± 0.83 <sup>ab</sup>	3.8 ± 0.24 <sup>a</sup>	5.6 ± 0.95 <sup>b</sup>
UI	32.4 ± 4.98	22.5 ± 2.09	25.0 ± 4.83	24.8 ± 2.34	31.7 ± 5.50

\*Superscripts of "a" to "c" on values (mean±SD) indicate significant differences as non-order symbols by Duncan's multiple range test refer to Table 1.

\*\*Abbreviations (Con, Red, Blue, White and Red-Blue) refer to Table 1.

<sup>1</sup>Saturated fatty acid (SFA); 6:0, 8:0, 10:0, 11:0, 12:0, 13:0, 20:0, 21:0.

<sup>2</sup>Mono unsaturated fatty acid (MFA); 15:1, 17:1, 18:1n9, 20:1, 22:1n-9, 24:1.

<sup>3</sup>Highly unsaturated fatty acid (HUFA); 18:3n-3, 20:2, 18:3n-6, 20:3n-6, 20:4n-6, 22:2.

**Table 3. Protein-bound amino acid (PAA) contents (ug/mg dry matters) of microalgae attached on a plate at single LED light\***

Light**	Con	Red	Blue	White	Red-Blue
Thr	54.7 ± 5.19 <sup>c</sup>	39.0 ± 2.45 <sup>a</sup>	52.1 ± 7.39 <sup>bc</sup>	45.6 ± 2.61 <sup>b</sup>	46.0 ± 3.73 <sup>b</sup>
Val	57.2 ± 7.09 <sup>c</sup>	39.4 ± 3.53 <sup>a</sup>	54.5 ± 7.11 <sup>bc</sup>	50.0 ± 2.13 <sup>b</sup>	46.8 ± 5.17 <sup>ab</sup>
Met	1.5 ± 0.24	1.3 ± 0.26	2.0 ± 0.52	1.6 ± 0.29	1.8 ± 0.11 <sup>ab</sup>
Ile	39.6 ± 8.11 <sup>b</sup>	25.1 ± 2.98 <sup>a</sup>	34.0 ± 2.72 <sup>ab</sup>	31.8 ± 2.49 <sup>ab</sup>	30.9 ± 2.39 <sup>ab</sup>
Leu	67.4 ± 15.14 <sup>b</sup>	40.4 ± 4.61 <sup>a</sup>	55.0 ± 4.37 <sup>ab</sup>	52.1 ± 4.53 <sup>ab</sup>	49.5 ± 3.19 <sup>ab</sup>
Phe	51.6 ± 10.53 <sup>b</sup>	32.9 ± 2.16 <sup>a</sup>	44.8 ± 4.18 <sup>ab</sup>	41.2 ± 2.15 <sup>ab</sup>	39.3 ± 3.94 <sup>ab</sup>
Lys	43.1 ± 5.33 <sup>c</sup>	26.5 ± 2.66 <sup>a</sup>	36.4 ± 5.86 <sup>ab</sup>	33.6 ± 1.89 <sup>ab</sup>	31.6 ± 2.71 <sup>ab</sup>
Asp	116.6 ± 5.19 <sup>b</sup>	79.8 ± 6.76 <sup>a</sup>	110.5 ± 6.36 <sup>b</sup>	96.3 ± 4.92 <sup>ab</sup>	95.9 ± 8.19 <sup>ab</sup>
Ser	57.7 ± 6.05 <sup>b</sup>	41.5 ± 4.02 <sup>a</sup>	56.2 ± 8.29 <sup>b</sup>	49.0 ± 3.97 <sup>b</sup>	51.2 ± 2.15 <sup>b</sup>
Glu	114.0 ± 5.64 <sup>c</sup>	75.1 ± 7.67 <sup>a</sup>	101.0 ± 5.66 <sup>c</sup>	91.6 ± 6.86 <sup>b</sup>	89.9 ± 5.41 <sup>b</sup>
Gly	72.0 ± 7.52	32.5 ± 12.69 <sup>a</sup>	84.6 ± 16.46 <sup>c</sup>	53.1 ± 2.63 <sup>b</sup>	56.5 ± 2.80 <sup>b</sup>
Ala	65.3 ± 8.05 <sup>c</sup>	41.0 ± 2.28 <sup>a</sup>	62.8 ± 13.39 <sup>c</sup>	48.5 ± 1.76 <sup>b</sup>	47.5 ± 1.67 <sup>b</sup>
Cys	8.4 ± 0.29 <sup>b</sup>	6.2 ± 1.22 <sup>a</sup>	8.0 ± 1.88 <sup>b</sup>	6.0 ± 3.71 <sup>a</sup>	7.9 ± 0.80 <sup>b</sup>
Tyr	4.4 ± 4.16 <sup>b</sup>	0.8 ± 0.03 <sup>a</sup>	3.0 ± 1.95 <sup>b</sup>	1.1 ± 0.32 <sup>a</sup>	1.5 ± 0.11 <sup>a</sup>
HN3	32.4 ± 1.92	30.0 ± 1.84	40.8 ± 9.82	32.0 ± 1.25	34.0 ± 2.04
His	10.7 ± 7.49 <sup>b</sup>	5.0 ± 1.10 <sup>a</sup>	12.7 ± 9.01 <sup>b</sup>	5.4 ± 0.70 <sup>a</sup>	6.0 ± 1.86 <sup>a</sup>
Arg	49.3 ± 5.41 <sup>b</sup>	31.4 ± 4.01 <sup>a</sup>	46.9 ± 11.02 <sup>b</sup>	38.8 ± 2.88 <sup>a</sup>	37.8 ± 1.41 <sup>a</sup>
Pro	46.3 ± 5.27 <sup>b</sup>	27.5 ± 1.81 <sup>a</sup>	40.9 ± 5.06 <sup>b</sup>	33.4 ± 2.47 <sup>a</sup>	29.1 ± 3.28 <sup>a</sup>
Protein(%)	9.9 ± 0.98 <sup>c</sup>	6.4 ± 0.70 <sup>a</sup>	9.4 ± 1.66 <sup>c</sup>	7.9 ± 0.48 <sup>b</sup>	7.8 ± 0.44 <sup>b</sup>
EAA <sup>1</sup> (%)	3.2 ± 0.48 <sup>d</sup>	2.0 ± 0.19 <sup>a</sup>	2.8 ± 0.31 <sup>c</sup>	2.6 ± 0.15 <sup>bc</sup>	2.5 ± 0.21 <sup>b</sup>

\*Superscripts of "a" to "d" on values (mean±SD) indicate significant differences as non-order symbols by Duncan's multiple range test refer to Table 1.

\*\*Abbreviations (Con, Red, Blue, White and Red-Blue) refer to Table 1.

<sup>1</sup>Essential amino acids.

**Table 4. Biomass (mg/m<sup>2</sup>), fucoxanthin content (ug/m<sup>2</sup>), appearance Species (X10<sup>4</sup> cells/a plate), No. of total appearance cells (X10<sup>4</sup> cells/a plate) and name, dominant (and subdominant), total cells (X10<sup>4</sup> cells/a plate) of dominant and subdominant cells of attached diatom in each light-emitting diode (LED) trials cultured on natural and the different LED sources\***

Light**	Con	Red	Blue	White	Red-Blue	
Biomass (mg/m <sup>2</sup> )	1.9±0.43 <sup>ab</sup>	2.0±0.36 <sup>ab</sup>	2.6±0.22 <sup>b</sup>	1.7±0.19 <sup>a</sup>	1.7±0.10 <sup>a</sup>	
Fucoxanthin (ug/mg mass)	0.34±0.029 <sup>d</sup>	0.24±0.098 <sup>c</sup>	0.58±0.059 <sup>c</sup>	0.12±0.047 <sup>b</sup>	0.05±0.009 <sup>a</sup>	
Total appearance species	8	8	11	9	10	
No. of total appearance cells (×10 <sup>4</sup> cells/a plate)	11.6±3.22	7.2±0.60	11.8±0.37	8.3±0.70	7.8±1.06	
Dominant	Name	<i>T. nitzschioide</i>	<i>Pleurosigma angulatum</i>	<i>Fragiaria oceanica</i>	<i>N. cancellata</i>	<i>Licmophora abbreviata</i>
	Dominant	0.2794	0.3030	0.2982	0.3750	0.2759
	Total cells (×10 <sup>4</sup> cells/a plate)	1.9±3.67	1.0±0.00	1.7±0.38	1.2±0.56	0.8±0.10
Subdominant	Name	<i>N. cancellata</i>	<i>N. cancellata</i>	<i>N. cancellata</i>	<i>Cocconeis</i> sp.	<i>N. cancellata</i>
	Subdominant	0.2647	0.1818	0.1754	0.2188	0.1379
	Total cells (×10 <sup>4</sup> cells/a plate)	1.8±1.63	0.6±0.63	1.0±0.76	0.7±0.52	0.4±0.63

\*Superscripts of "a" to "e" on values (mean±SD) indicate significant differences as non-order symbols by Duncan's multiple range test refer to Table 1.

\*\*Abbreviations (Con, Red, Blue, White and Red-Blue) refer to Table 1.

#### 지방산 및 아미노산 조성

자연광과 LED 광원을 함께 조사하였을 경우, 각 실험 구별에 따른 지방산 및 아미노산 조성을 Table 5와 6에 나타내었다. 총 지질함량 (mg/g DM) 및 포화지방산은 red-blue LED 광원에서 가장 높게 조사되었지만 모든 실험구와의 유의적인 차이는 보이지 않았다 (P>0.05). 고도불포화지방산 (HUFA) 및 지방산불포화도 (UI)도 red-blue LED에서 가장 높은 함량을 보였지만 대조구를 포함한 그 외 실험구와의 유의적인 차이는 보이지 않았

다 (P>0.05).

아미노산 조성에 있어서는 총 단백질 (%)의 경우, white LED 광원에서 11.0±0.33%로 가장 높게 조사되었지만, blue와 red-blue LED 광원의 red LED를 제외한 다른 실험구와의 유의적인 차이는 보이지 않았다 (P>0.05). 필수아미노산 (EAA, %)도 white LED 광원에서 3.4±0.11%로 가장 높게 나타났으나 red LED를 제외한 다른 실험구간 유의적인 차이는 나타나지 않았다 (P>0.05).

**Table 5. Fatty acid contents (ug/mg dry matters) at natural and single LED Light\***

Light**	Con	Red	Blue	White	Red-Blue
Total lipid(mg/g)	100.2± 10.93	98.2± 3.19	96.8± 1.90	92.4± 1.04	113.6± 8.94
Sum of SFA <sup>1</sup>	19.2± 3.89	18.8± 0.99	18.6± 2.30	17.7± 2.38	21.8± 3.69
C16:0	7.6± 1.50	7.4± 0.35	7.1± 0.70	7.2± 0.92	8.6± 1.33
C17:0	2.4± 0.48	2.3± 0.13	2.7± 0.29	2.1± 0.31	2.7± 0.48
C18:0	3.2± 0.63	3.1± 0.18	3.2± 0.72	2.9± 0.42	3.6± 0.66
Sum of MFA <sup>2</sup>	9.0± 1.96	8.7± 0.44	8.6± 0.75	8.4± 1.00	10.2± 1.51
C14:1	3.0± 0.63	2.9± 0.17	2.8± 0.30	2.7± 0.39	3.4± 0.61
C16:1	3.2± 0.73	3.0± 0.12	3.2± 0.27	3.2± 0.43	3.6± 0.36
Sum of HUFA <sup>3</sup>	7.5± 1.62	7.6± 0.42	7.4± 1.23	6.9± 0.96	8.6± 1.56
C18:2n6	4.7± 1.05	4.7± 0.26	4.7± 0.97	4.3± 0.59	5.4± 1.01
C20:5n3	2.8± 0.57	2.8± 0.17	2.7± 0.26	2.5± 0.37	3.2± 0.55
n-3 HUFA	2.8± 0.57	2.8± 0.17	2.7± 0.26	2.5± 0.37	3.2± 0.55
n-6 HUFA	4.7± 1.05	4.7± 0.26	4.7± 0.97	4.3± 0.59	5.4± 1.01
UI	32.5± 6.92	32.3± 1.80	31.3± 3.96	29.9± 3.98	36.9± 6.28

\*The different superscripts indicated significant different in same row (P<0.05).

\*\*Abbreviations (Con, Red, Blue, White and Red-Blue) refer to Table 1.

<sup>1,2,3</sup> are as in Table 1.

Table 6. Protein-bound amino acid (PAA) contents (ug/mg dry matters) of microalgae attached on a plate at natural and LED light\*

Light**	Con	Red	Blue	White	Red-Blue
Thr	54.0± 3.68 <sup>ab</sup>	49.5± 6.02 <sup>a</sup>	57.3± 5.77 <sup>ab</sup>	59.1± 1.00 <sup>b</sup>	56.8± 5.40 <sup>ab</sup>
Val	54.3± 2.75 <sup>ab</sup>	47.3± 5.18 <sup>a</sup>	57.6± 5.18 <sup>ab</sup>	60.1± 1.80 <sup>b</sup>	56.9± 5.90 <sup>ab</sup>
Met	1.7± 0.31	2.0± 0.19	2.1± 0.28	2.0± 0.12	1.9± 0.28
Ile	35.3± 2.05 <sup>ab</sup>	30.5± 4.05 <sup>a</sup>	36.5± 3.83 <sup>a</sup>	42.1± 2.22 <sup>b</sup>	39.1± 3.41 <sup>ab</sup>
Leu	56.5± 2.36 <sup>ab</sup>	48.6± 6.01 <sup>a</sup>	58.7± 6.76 <sup>ab</sup>	66.8± 3.74 <sup>c</sup>	61.8± 5.42 <sup>abc</sup>
Phe	42.8± 1.92 <sup>ab</sup>	37.2± 4.70 <sup>a</sup>	45.6± 5.32 <sup>ab</sup>	49.7± 1.35 <sup>b</sup>	45.9± 4.32 <sup>ab</sup>
Lys	47.2± 5.16 <sup>a</sup>	42.4± 5.63 <sup>a</sup>	49.1± 4.84 <sup>a</sup>	62.7± 3.79 <sup>b</sup>	56.0± 6.28 <sup>ab</sup>
Asp	107.3± 4.37 <sup>ab</sup>	96.0± 11.07 <sup>a</sup>	116.2± 11.10 <sup>ab</sup>	120.8± 0.64 <sup>b</sup>	114.7± 11.74 <sup>ab</sup>
Ser	53.6± 2.87 <sup>ab</sup>	49.9± 6.07 <sup>a</sup>	58.5± 5.47 <sup>ab</sup>	62.0± 1.12 <sup>b</sup>	60.3± 6.48 <sup>b</sup>
Glu	116.1± 8.11 <sup>ab</sup>	101.7± 12.05 <sup>a</sup>	121.5± 13.50 <sup>ab</sup>	138.5± 5.65 <sup>b</sup>	130.1± 12.08 <sup>b</sup>
Gly	64.3± 4.43 <sup>ab</sup>	55.1± 8.64 <sup>a</sup>	74.0± 9.36 <sup>c</sup>	74.9± 7.55 <sup>c</sup>	71.3± 6.19 <sup>bc</sup>
Ala	58.5± 3.02 <sup>ab</sup>	51.0± 6.34 <sup>a</sup>	64.7± 6.57 <sup>b</sup>	63.8± 3.25 <sup>b</sup>	59.5± 5.14 <sup>ab</sup>
Cys	8.9± 0.46 <sup>b</sup>	6.9± 1.14 <sup>a</sup>	9.1± 0.34 <sup>b</sup>	9.6± 0.94 <sup>c</sup>	8.9± 1.39 <sup>b</sup>
Tyr	7.2± 0.57 <sup>ab</sup>	4.9± 1.79 <sup>a</sup>	9.6± 3.43 <sup>b</sup>	7.0± 2.11 <sup>ab</sup>	6.0± 0.51 <sup>ab</sup>
HN3	32.8± 2.88	34.7± 3.91	36.7± 3.85	38.7± 3.92	41.7± 7.44
His	20.4± 2.02 <sup>ab</sup>	18.0± 1.19 <sup>a</sup>	22.2± 2.35 <sup>ab</sup>	24.6± 2.24 <sup>b</sup>	21.4± 3.77 <sup>ab</sup>
Arg	44.9± 3.05 <sup>b</sup>	39.6± 4.64 <sup>a</sup>	48.7± 5.28 <sup>ab</sup>	53.4± 1.74 <sup>b</sup>	50.3± 4.54 <sup>ab</sup>
Pro	43.2± 3.90 <sup>ab</sup>	36.5± 6.44 <sup>a</sup>	45.3± 10.80 <sup>ab</sup>	50.5± 1.78 <sup>c</sup>	44.4± 3.43 <sup>ab</sup>
Protein (%)	9.4± 0.58 <sup>ab</sup>	8.4± 1.03 <sup>a</sup>	10.1± 1.02 <sup>ab</sup>	11.0± 0.33 <sup>b</sup>	10.3± 1.00 <sup>ab</sup>
EAA <sup>1</sup> (%)	2.9± 0.18 <sup>ab</sup>	2.6± 0.32 <sup>a</sup>	3.1± 0.31 <sup>ab</sup>	3.4± 0.11 <sup>b</sup>	3.2± 0.31 <sup>ab</sup>

\*Superscripts of "a" to "c" on values (mean±SD) indicate significant differences as non-order symbols by Duncan's multiple range test refer to Table 1.

\*\*Abbreviations (Con, Red, Blue, White and Red-Blue) refer to Table 1.

<sup>1</sup>Essential amino acids.

### 고 찰

빛 파장은 세포성장, 색소함량과 더불어 영양조성까지도 변화시킬 수 있기 때문에 미세조류 배양에 있어 반드시 고려되어야 할 환경요인이다 (Das et al., 2011; Yoshioka et al., 2012). 또한 미세조류는 육상식물과는 달리 보조색소가 다양하게 있기 때문에 450 nm 파장 이하의 blue와 680 nm 이상의 red 뿐만 아니라 그 전후의 빛 파장도 필요하기에 자연광의 적당한 혼합은 미세조류의 배양에 있어 보다 효율적일 수 있다. 이에 본 연구에서는 각기 다른 빛 파장대의 단독 LED의 적용과 자연광과의 혼합을 통해 부착성 미세조류에 어떠한 영향이 미치는지를 조사해 보았다.

본 연구의 1차 실험인 LED 단독에 의한 조사 실험에서는 자연광에서 생체량, fucoxanthin 함량 등이 가장 높게 나타났다. 이는 대조구인 자연광에서 광량 값이 가장 높았기 때문이라 판단된다. 하지만 태양광을 차광하지 않은 상태에서, 즉 자연광과 LED를 혼합하여 조사한 2차 실험에서는 광량 값이 가장 낮았던 blue LED 실험구에서 생체량, fucoxanthin 함량이 자연광 보다 더 높았던 것으로 조사되었다. 이는 부착성 미세조류의 대

부분을 차지하는 규조류는 fucoxanthin을 주색소로 갖는 것을 고려해 본다면, blue 파장은 자연광의 도움으로 대조구 (자연광)보다도 높은 chlorophyll과 fucoxanthin 함량을 축적할 수 있는 환경이 조성되었던 것으로 판단할 수 있다 (Jeong et al., 2013). 이에 기인하여 출현한 cell 수에 있어서도 광량 값이 낮았던 blue LED에서 출현종의 개수와 출현 미세조류의 양이 가장 많이 나타난 것으로 판단된다.

일반적으로 미세조류는 광합성을 위해 광원 중 400-700 nm의 파장대를 이용하나 모든 범위 내에서 광합성을 할 수 있는 것은 아니며, 주로 적색광 (600-700 nm)과 청색광 (400-500 nm)에서 미세조류의 성장을 촉진시키는 것으로 보고되고 있다 (Das et al., 2011). 적색광에 의한 효과로는 *Arthrospira platensis* (Markou, 2014), *Spirulina platensis* (Wang et al., 2007) 및 *C. pyrenoidosa* (Lee and Palsson, 1994)가 red LED에 의한 성장 개선이 확인되었지만 이들은 남조류와 녹조류에 국한된 결과들이다. 반면, *Nannochloropsis* sp. (Das et al., 2011), *Haslea osrearia* (Mouget et al., 2004), *Isochrysis galbana* (Sánchez-Saavedra and Voltolina,

2006) 등은 진안점조류 및 구조류로서 파장이 짧은 blue LED에서 세포성장을 향상시킬 수 있는 것으로 알려져 있다. 본 연구에서도 부착 파판 내 군집을 이루고 있던 종들은 대부분 구조류였기에 파장이 짧은 blue LED에서 긍정적인 영향을 받았던 것으로 판단된다. 이처럼 짧은 파장대인 blue에서 효과가 있었던 것은 구조류라는 종 특이성도 작용했지만, 그 외 세포 내 동화작용 및 대사 작용의 차이 (Ruyters, 1984)와 광합성 유도 유전자 전사 및 효소활동의 차이 (Das et al., 2011)에 의한 복합적인 요인도 작용한 것이라 판단되어진다. 또한, Whatley (1997)와 Mulo et al. (2012)는 705 nm에서는 광계 1 (photosystem 1)만 활성을 보이고, 650 nm 이하에서는 광계 1과 2가 모두 활성을 보이기 때문에 red 파장대 (620-750 nm) 보다는 blue 계열의 파장대에서 효율적인 광합성이 진행된다고 언급하였다. 이러한 점도 미루어 볼 때, 본 연구에서와 같이 구조류의 군집인 부착 파판의 미세조류의 성장을 위해서는 파장이 긴 red 계열 (705 nm 이상) 보다는 blue 계열의 LED가 더욱 효과적일 것으로 판단된다.

한편 본 연구의 개선된 조사 (irradiation) 방법인 LED에 자연광을 혼합한 2차 실험에서 지방산의 조성 및 함량은 대조구와 LED가 포함된 모든 실험구간에서 전혀 차이를 보이지 않았으며, 총 단백질 및 필수아미노산 함량도 대조구와 red LED를 제외한 다른 실험구간에서 유의적인 차이를 보이지 않는 것으로 나타났다. 이는 곧 기존 배양방법인 단독 자연광만을 이용한 대조구와 영양조성을 비교했을 때 본 실험에 이용된 모든 LED는 충분히 그 이용 가능성이 있다는 사실을 확인시켜 주는 것이다. 하지만 세포 성장 및 생체량과 같은 양적인 측면과 색소 (fucoxanthin) 함량을 동시에 고려해 볼 때, LED 중에서도 blue가 가장 이상적일 것이라 사료된다.

본 연구결과를 통해 늘어난 부착 구조류의 생체량은 수조 내 수용 가능한 유생의 밀도를 높여줄 수 있는 근거가 될 수 있을 것으로 판단된다. 따라서 기존 배양방법을 통해 배양된 구조류는 지나치게 빨리 소모되어 먹이의 부족현상을 초래하는 반면에 본 연구에서처럼 자연광에 LED를 추가 시설해 준다면 이러한 문제점을 해결할 수 있을 것이라 판단된다. 다만, LED에 의한 전복과 해삼 유생의 생존과 성장이 확인되어야만 착저기 유

생들의 성장과정에서도 지속적으로 LED 광원을 이용할 것인지에 대한 결정을 내릴 수 있을 것이라 판단된다. 실제 해삼, 전복이 부착 구조류를 섭취하는 단계에서의 LED 적용 사례는 아직까지 보고가 없기 때문에 그 유해성을 단정지어 얘기할 순 없지만, 시각 기능이 있는 어류의 경우 blue LED에 의한 스트레스 저하 (Volpato and Barreto, 2001)와 어중에 따른 특정 파장에서 체성장 촉진 (Ruchin, 2004)과 같은 유익한 효과도 같이 보고되어 있기 때문에 향후 실험실/현장에서 blue LED 적용이 부착 유생에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 보완 연구는 반드시 필요할 것으로 사료된다.

결국 현재까지의 본 연구결과를 종합해 보면, 자연광에 blue LED를 혼합하여 부착 파판 내 부착 구조류를 배양하는 이러한 방법은 종묘생산 현장에서도 쉽게 실현할 수 있고, 치패의 먹이가 되는 미세조류의 생체량을 늘릴 수 있으면서 파판에 부착 구조류를 배양하는 기간 또한 단축시킬 수 있기에 추후 유생에 미치는 영향만 연구된다면 종묘생산현장에서 매우 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

## 결론

전복, 해삼 등의 착저유생 시기에 부착 파판에 부착성 구조류를 자연광에만 의존하여 배양하는 기존 배양방법보다 blue LED를 추가했을 때 세포성장 (바이오매스)과 같은 양적 향상은 물론 fucoxanthin, 아미노산 및 지방산과 같은 질적 측면도 우수하게 나타난다는 사실을 확인할 수 있었다. 자연광에 blue LED를 혼합하는 이러한 배양방법은 종묘생산 현장에서도 쉽게 실현할 수 있으며, 기존 배양방법에 비해 높은 생체량을 유도할 수 있어 먹이 부족현상도 방지할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 부착 구조류를 준비하고자 하는 기간도 단축시킬 수 있기에 경제적 및 효율적인 부착성 먹이생물의 배양이 실현 가능해 질 것으로 판단되어진다.

## 사사

본 연구는 국립수산과학원 수산시험연구사업 (RP-2014-AQ-131)의 지원에 의해 수행되었습니다.



## References

- Choi BR, Lim JH, Lee JK and Lee TY. 2013. Optimum conditions for cultivation of *Chlorella* sp. FC-21 using light emitting diodes. Korean J Chem Eng 30, 1614-1619. (doi:10.1007/s11814-013-0081-0)
- Das P, Lei W, Aziz SS and Obbard JP. 2011. Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light. Bio Technol 102, 3883-3887. (doi:10.1016/j.biortech.2010.11.102)
- Ducan DB. 1955. Multiple-range and mutiple F tests. Biometrics 11, 1-42. (doi:10.2307/3001478)
- Gordon N, Neori A, Lee J and Harpaz S. 2006. Effect of diatom diets on growth and survival of the abalone *Haliotis discus hannai* postlarvae. Aquaculture 252, 225-233. (doi:10.1016/j.aquaculture.2005.06.034)
- Jeong H, Lee J and Cha M. 2013. Energy efficient growth control of microalgae using photo methods. Renewable Energy 54, 161-165. (doi:10.1016/j.renene.2012.08.030)
- Katsuda T, Shimahara K, Shiraishi H, Yamagami K, Ranjbar R and Katoh S. 2006. Effect of flashing light from blue light emitting diodes on cell growth and astaxanthin production of *Haematococcus pluvialis*. J Biosci Bioeng 102, 442-446. (doi:10.1263/jbb.102.442)
- Lee CG and Palsson BØ. 1994. High-density algal photobioreactors using light-emitting diodes. Biotechnol Bioeng 44(10), 1161-1167. (doi:10.1002/bit.260441002)
- Markou G. 2014. Effect of various colors of light-emitting diodes (LEDs) on the biomass composition of *Arthrospira platensis* cultivated in semi-continuous mode. Appl Biochem Biotechnol 172, 2758-2768. (doi:10.1007/s12010-014-0727-3)
- Mouget JL, Rosa P and Tremblin G. 2004. Acclimation of *Haslea strearia* to light of different spectral qualities-confirmation of 'chromatic adaptation' in diatoms. J Photochem Photobiol B 75, 1-11. (doi:10.1016/j.jphotobiol.2004.04.002)
- Mulo P, Sakurai I and Aro EM. 2012. Strategies for psbA gene expression in cyanobacteria, green algae and higher plants: form transcription to PSII repair. Biochim Biophys Acta 1817, 247-257. (doi: 10.1016/j.bbabi.2011.04.011)
- Park JC, Kwon ON, Hong SE, An HC, Bae JH, Park MS and Park HG. 2013. Changes in the growth and biochemical composition of *Nannochloropsis* sp. cultures using light-emitting diodes. Kor J Fish Aquat Sci 46, 259-265.
- Ruchin AB. 2004. Influence of colored light on growth rate of juveniles of fish. Fish Physiol Biochem 30, 175-178. (doi:10.1007/s10695-005-1263-4)
- Ruyters G. 1984. Effects of blue light on enzymes. Senger H, ed. Springer Verlag, Berlin, Germany, 283-301.
- Saha SK, McHugh E, Hayes J, Moane S, Walsh D and Murray P. 2013. Effect of various stress-regulatory factors on biomass and lipid production in microalga *Haematococcus pluvialis*. Bioresour Technol 128, 118-124. (doi:10.1016/j.biortech.2012.10.049)
- Sánchez-Saavedra MP and Voltolina D. 2006. The growth rate, biomass production and composition of *Chaetoceros* sp. grown with different light sources. Aquacult Eng 35, 161-165. (doi:10.1016/j.aquaeng.2005.12.001)
- Volpato GL and Barreto RE. 2001. Environmental blue light prevents stress in the fish Nile tilapia. Brazillian J Med Biol Res 34, 1041-1045.
- Wang CY, Fu CC and Liu YC. 2007. Effects of using light emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. Biochem Eng 37, 21-25. (doi:10.1016/j.bej.2007.03.004)
- Wellburn AR. 1994. The spectral determination of chlorophylls a and b, as well as total carotenoids, using various solvents with spectrophotometers of different resolution. J Plant Physiol 144, 307-313. (doi:10.1016/S0176-1617(11)81192-2)
- Whatley FR. 1997. Changing views of photosynthesis. Further Mulestones in Biochemistry. Foundation of modern biochemistry 3. Ord MG and Stocken LA, eds. Elsevier, Philadelphia, U.S.A., 23-66.
- Yoshioka M, Yago T, Yoshie-Stark Y, Arakawa H and Morinaga T. 2012. Effect of high frequency of intermittent light. Aquaculture 338-341, 111-117. (doi:10.1016/j.aquaculture.2012.01.005)

---

2014. 11.1 Received

2014. 11.25 Revised

2014. 11.26 Accepted