

LED광원을 이용한 해양미세조류의 성장 비교

강만구† · 임수연 · 이창혁 · 백향란 · 신종암
(전남대학교)

Comparison of Marine Microalgae Growth Using LED Lights

Man-Gu KANG† · Su Yeon LIM · Chang-Hyeok LEE · Hyang Ran BAEK · Jong-Ahm SHIN
(Chonnam National University)

Abstract

To assess the effect of LED lights on marine microalgae growth in the laboratory, *Tetraselmis suecica*, *Chaetoceros simplex* and *Isochrysis galbana* were cultured under 20±1°C, Walne's medium and aeration using 3.6 L glass vessels. The LED light sources were Blue, Red, Blue+Red, CoolWhite and WarmWhite. The experiments were conducted three times. The density of microalgae was shown as the counted number of cells per day, and the specific growth rate was calculated by using the density. The statistical analysis was performed by analysis of variance using the SPSS 20.0 program. *T. suecica* culture was the highest density under the Blue LED light source, so the light source was the most effective for the growth of this alga. *C. simplex* and *I. galbana* culture had the highest density under the Blue+Red LED light source, therefore this light source was the most effective for the growth of these algae. The result of analysis of variance showed significant between groups.

Key words : ANOVA, LED light, Microalgae

I. 서론

최근 우리나라 연안은 환경오염과 어장의 노후화로 패류 모패의 자원량이 현저히 줄어들어 자연채묘가 어려워지고 있기 때문에 양식산업의 지속성을 위해서는 인공종묘생산이 필수적이다. 이때 인공종묘생산 초기 부화유생의 성공적인 사육을 위해서는 필요한 시기에 언제라도 질적·양적 조건을 갖춘 적절한 먹이생물의 안정적인 공급이 절대적으로 필요하다. 따라서 질적으로 우수한 미세조류의 안정적 대량배양기술의 확보가 중요하다(Park & Hur, 2000; Rho & Jung, 2007).

미세조류 성장의 4가지 중요 요인으로는 빛, 온도, 배지의 조성, 이산화탄소의 농도이다(Tamiya et al., 1976). 이들 중 빛은 미세조류의 성장과 광합성에 있어 필수 요소이며, 광합성은 미세조류의 성장을 제어하는 에너지 대사 활동으로 광질과 광량에 따라 그 효율과 능력이 달라진다(Ojala, 1993; Matthijs et al., 1995; Maxwell & Johnson, 2000; Han, 2002; Chojnacka & Noworyta, 2004).

LED광원을 이용하여 광합성 생물을 재배하려는 시도는 육상식물에서 먼저 시작되어, 식물의 생육에 미치는 영향 및 인공재배에 대한 연구 등

† Corresponding author : 061-659-7164, algae815@gmail.com

* 이 논문은 호남광역경제권 선도산업 육성사업의 지원으로 연구되었음.

식물공장 관련 연구가 활발히 진행되고 있다(Lee, 2010; Hwang & Ko, 2014).

현재 미세조류의 개방형 배양은 일반적으로 태양광을 이용하고 있으며, 밀폐형 배양의 경우에는 형광등을 가장 많이 이용하나, 형광등은 높은 유지비용과 고열 발생으로 LED대비 배양효율과 경제성이 낮다(Matthijs et al., 1995; Chen et al., 2008). LED광원의 일반적인 장점으로는 고신뢰성, 장수명, 고발광효율, 저발열량, 고속응답성, 내충격성, 소형·경량성과 환경성을 들 수 있다(Hwang et al., 2009). LED광원을 이용한 미세조류 배양의 경우, 해당 미세조류의 광합성에 필요한 파장의 빛만 선택적으로 공급하여 전체적인 빛의 이용효율을 높일 수 있어서 경제적 배양이 가능한 것으로 보고되었다(Lee et al., 1994; Katsuda et al., 2004; Wang et al., 2007).

이 연구에서는 5가지의 LED광원 [Blue, Red, Blue+Red(Blue와 Red 광원의 1:1 혼합, 이하 B+R), CoolWhite, WarmWhite]에서 해양미세조류 3종(*Tetraselmis suecica*, *Chaetoceros simplex*, *Isochrysis galbana*)의 성장을 비교하고 그 적용성을 검증하고자 하였다. 먹이생물의 필요충분조건은 안정적이고생산성, 저비용성, 고선택성, 고소화

흡수성, 고영양성, 비병원성 등이다. 이 연구에서 사용된 미세조류 3종은 이러한 조건들을 적절히 충족하고 있다. 우선 이 3종의 성장에 효과적인 LED광원을 탐색하여 앞으로 미세조류산업에 있어서 근본이 되는 미세조류의 배양공정에 일조하고자 이 연구를 수행하였다.

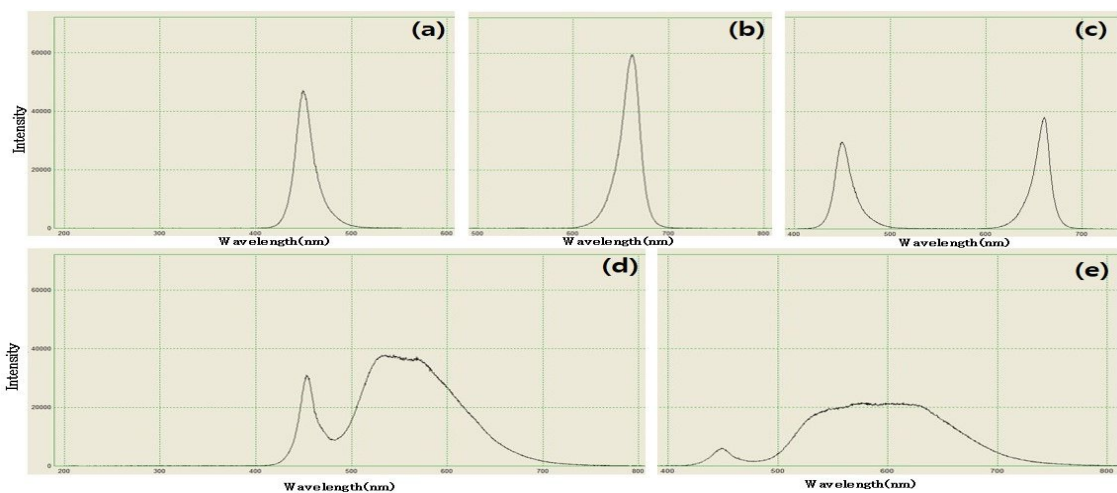
II. 재료 및 방법

1. 실험종

이 연구에서는 현재 먹이생물로서 널리 이용되고 있는 부유성 미세조류 약 12종(Okauchi, 1992) 중에서 *Tetraselmis suecica* (KMMCC-111), *Chaetoceros simplex* (KMMCC-608), *Isochrysis galbana* (KMMCC-12)의 3종을 2014년도에 한국미세조류은행(KMMCC, Korea)으로부터 분양받아 실험에 사용하였다.

2. 실험방법

1) 실험용 LED광원
배양에 사용된 광원들의 Emission spectrum은 LED Quick Tester(ELT-100, ECOPIA, KOREA)로



[Fig. 1] Emission spectra of LED using in this study.

(a): Blue LED, (b): Red LED, (c): Blue+Red LED, (d): CoolWhite LED, (e): WarmWhite LED.

측정하였다(Fig. 1). Blue LED광원에서는 450nm에서 흡광극대를 나타냈으며, Red LED광원에서는 660nm에서, B+R LED광원에서는 450nm, 660nm 두 곳에서 흡광극대를 나타냈다. CoolWhite LED광원과 WarmWhite LED광원은 450nm(Blue LED)를 기본 base로 phosphor를 섞워 파장을 통과시켜 의사백색을 나타나게 하였다.

CoolWhite LED광원은 형광등과 유사한 백색의 빛이며, WarmWhite LED광원은 백열등과 유사한 황색의 빛을 말한다. 이들 광원들은 GODOSNT (Korea)에서 제작되었다.

2) 배양조건 및 방법

실험실의 온도는 20±1℃로 유지하였으며, 13일간 배양하였다. 공기 중 오염을 최소화하기 위해 필터를 장착한 에어펌프로 통기배양하였다. 통기는 광원에 대한 그림자효과의 감소, 배양용기 내의 퇴적물과 사체침전방지 및 배지와 가스의 원활한 순환을 위한 것이다. 실험구는 5개의 LED 광원(Blue, Red, B+R, CoolWhite and WarmWhite)과 3종(*T. suecica*, *C. simplex*, and *I. galbana*)의 조합으로 총 15개였다. 광량은 photometer (ILT1400-A, International Light Technologies, USA)를 이용하여 100µmol/m²·s로 동일하게 조절하였으며, 광주기는 연속조명 (24L:0D)으로 하였다. 배양용기는 3.6 l 용량의 원형유리병이며, 이들 유리병의 캡에 LED를 부착하기 위하여 LED광원 기판은 원형으로 제작되었다. 각각의 원형 LED 기판은 32개의 칩으로 구성되어 있으며 광원들은 컨트롤박스에 연결되어있어서 각 광원별 광량 및 전원을 조절할 수 있게 설계되었다. 배양실에서 광원들 사이에는 흑판을 설치하여 광원간의 간섭을 가능한 한 최소화 하였다.

건열 멸균한 배양용기에 멸균해수 2l를 넣고 최종 세포밀도가 약 1.0X10⁶cells/mL가 되도록 접종하였다. 배지는 Walne's medium(Culture Collection of Algae and Protozoa 2002, UK)을 이용하였다.

3) 분석방법

시료의 측정은 매일 같은 시간에 마이크로피펫 (Pipetman Classic P100, Gilson, France)으로 일정량 취하여 밀도를 5회 반복 측정하였다.

밀도측정은 Haemocytometer(Mariefeld, Superior, Germany)를 사용하여 현미경(CX40RF200, Olympus, Japan)으로 세포수를 전량 계수하였다.

비증식률(Specific growth rate)은 Guillard(1973)의 식을 이용하였다.

$$K_{10} = \frac{\log(N_1/N_0)}{t_1 - t_0} \text{ and } k = \frac{\log_2(N_1/N_0)}{t_1 - t_0}$$

$$k(\text{div./day}) = \frac{K_c}{0.6931} = \frac{2.3026}{0.6931} K_{10} = 3.322 K_{10}$$

$$= 3.322 \times \frac{\log(N_1/N_0)}{t_1 - t_0}$$

..... (1)

여기서, N₀, N₁은 초기 및 일정 배양 시간 후의 농도를 나타내며, t₀ 및 t₁은 배양개시일 및 일정배양시간 경과 후의 일수를 나타낸다.

성장곡선의 증식극대는 최대증식량 도달일수를 말하며, 밀도는 단위용적당 개체수(Conc. of cells/ml), 비증식률은 밀도를 (1)식에 대입하여 얻은 것이다.

3. 통계분석

실험 결과는 One-way ANOVA test를 실시하였으며, 평균간의 유의성(P<.001)은 Duncan 사후검증을 하였다. 통계분석은 SPSS 20.0 program을 이용하여 분석하였다.

III. 결과

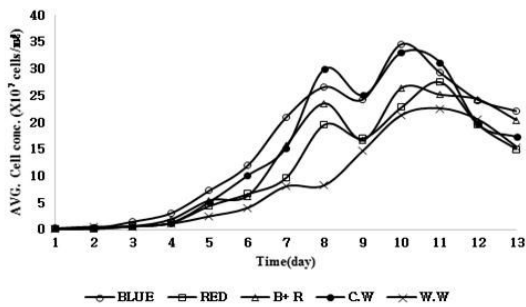
세 차례 배양한 결과의 평균값으로 광원에 따른 최대증식밀도와 비증식률을 계산하여 그 값들을 <Table 1>에 나타내었다.

<Table 1> The difference of populations by species and light sources

| Species Type of LEDs | <i>Tetraselmis suecica</i> | | <i>Chaetoceros simplex</i> | | <i>Isochrysis galbana</i> | |
|-------------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|----------------------------|----------------------|
| | MCD* ¹ | SGR* ² | MCD* ¹ | SGR* ² | MCD* ¹ | SGR* ² |
| | (x10 ⁷ cell/ml) | (day ⁻¹) | (x10 ⁷ cell/ml) | (day ⁻¹) | (x10 ⁷ cell/ml) | (day ⁻¹) |
| Blue | 34.54 | 0.54 | 9.00 | 0.20 | 116.00 | 0.81 |
| Red | 27.50 | 0.54 | 10.00 | 0.31 | 69.17 | 0.76 |
| Blue+Red | 26.42 | 0.57 | 12.83 | 0.29 | 181.38 | 0.82 |
| Cool White | 33.04 | 0.52 | 11.00 | 0.31 | 99.04 | 0.77 |
| Warm White | 22.63 | 0.50 | 9.92 | 0.29 | 36.96 | 0.67 |

*1: Maximum cell density.

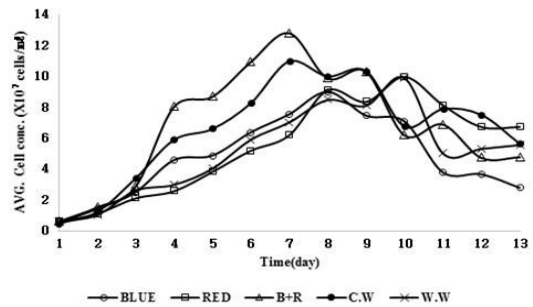
*2: Specific growth rate.



[Fig. 2] Average growth curves of 3 times experiment of *Tetraselmis suecica* by LED light sources. Blue; Blue LED, Red; Red LED, B+R; B+R LED, C·W; CoolWhite LED, W·W; WarmWhite LED.

[Fig. 2]에 *T. suecica*의 광원별 성장곡선을 나타내었다. 최대증식밀도는 배양 10일째에는 Blue LED광원, CoolWhite LED광원과 B+R LED광원에서, 배양 11일째에는 Red LED광원과 WarmWhite LED광원에서 나타났다. 밀도는 Blue LED광원에서는 34.54x10⁷cell/ml, CoolWhite LED광원에서는 33.04x10⁷cell/ml로 다른 LED광원보다 상대적으로 높았으며, Blue LED광원은 가장 낮은 밀도를 보인 WarmWhite LED광원에 비해 밀도가 약 1.5배 이상 높았다. 비증식률은 B+R LED광원에서 0.57day⁻¹로 가장 높았고, WarmWhite LED광원에서 0.50day⁻¹로 가장 낮았다.

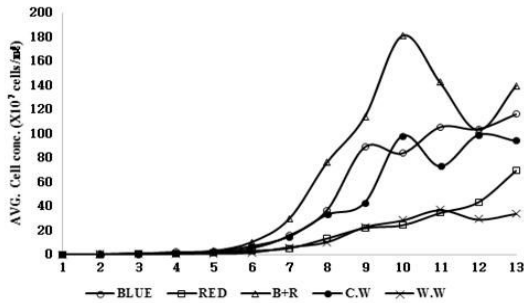
[Fig 3]에 *C. simplex*의 광원별 성장곡선을 나타내었다. 최대증식밀도는 7일째에 B+R LED광원, CoolWhite LED광원에서, 8일째에 Blue LED



[Fig. 3] Average growth curves of 3 times experiment of *Chaetoceros simplex* by LED light sources. Blue; Blue LED, Red; Red LED, B+R; B+R LED, C·W; CoolWhite LED, W·W; WarmWhite LED.

광원에서, 10일째에 Red, WarmWhite LED광원에서 나타났다. 밀도는 B+R LED광원에서 12.83x10⁷cell/ml로 다른 LED광원보다 상대적으로 높았으며 B+R LED광원은 가장 밀도가 낮은 Blue LED광원에 비해 밀도가 약 1.5배 높았다. 비증식률은 최대밀도를 보였던 B+R LED광원은 0.29day⁻¹이었고, Red, CoolWhite LED광원에서 0.31day⁻¹로 가장 높았으며, Blue LED광원에서 0.20day⁻¹로 가장 낮았다. *C. simplex*의 배양은 *T. suecica*의 배양 보다 밀도가 상대적으로 낮았다.

[Fig 4]에 *I. galbana*의 광원별 성장곡선을 나타내었다. 최대증식밀도는 10일째에 B+R LED광원과 CoolWhite LED광원에서 나타났다. *I. galbana*는 B+R LED광원에서 181.38x10⁷cell/ml으로 다른 LED광원보다 상대적으로 높았으며, Red



[Fig. 4] Average growth curves of 3 times experiment of *Isochrysis galbana* by LED light sources. Blue; Blue LED, Red; Red LED, B+R; B+R LED, C·W; CoolWhite LED, W·W; WarmWhite LED.

LED광원과 WarmWhite LED광원에서는 상대적으로 낮았다. B+R LED광원은 가장 밀도가 낮은 WarmWhite LED광원에 비해 밀도가 약 4.9배 높았다. 비증식률은 최대밀도를 보인 B+R LED광원에서 0.82day^{-1} 로 가장 높았고, WarmWhite LED광원에서 0.67day^{-1} 로 가장 낮았다. 이 결과에서 보면 *I. galbana*가 *T. suecica*와 *C. simplex*보다 고밀도 성장을 나타내었다.

종과 광원에 따라 개체수에 차이가 있는지 검증하기 위해 일원배치분산분석(One-way ANOVA) 및 Duncan의 사후검증을 실시하였다(<Table 2>). 그 결과, 종에 따른 개체수의 차이가 통계적으로 유의하였다($F=47.135$, $p<.001$). Duncan의 사후검증 결과, *I. galbana*의 개체수가 가장 많았으며, *T.*

suecica, *C. simplex*의 순이었다. 또한, 광원에 따른 개체수의 차이도 통계적으로 유의하였다($F=6.349$, $p<.001$). Duncan의 사후검증 결과, CoolWhite, Blue, B+R LED광원은 WarmWhite LED광원보다 개체수가 많았으며, Blue, B+R LED광원은 Red LED광원보다 개체수가 많았다.

IV. 고찰

LED광원을 이용한 *T. suecica*의 배양결과, Blue LED광원과 CoolWhite LED광원에서 증식극대가 빨랐고, 최대 밀도도 가장 높았기 때문에 배양에 가장 효과적인 광원이라고 볼 수 있다. Teo et al. (2014)은 *Tetraselmis* sp.를 LED광원에 14일간 배양하였을 때, Blue LED광원(457nm)에서 Red LED광원(660nm)보다 성장이 좋았고, 높은 증식률을 보였다고 보고하였다. Das et al.(2011)은 *Nannochloropsis* sp.를 LED광원에서 200시간 배양하였을 때, 생물량이 Blue(470nm)>White>Green(550nm)>Red(680nm) 순으로 나타났다고 보고하였다. Oh et al.(2015)는 녹조류 *Chlorella vulgaris*의 최대성장속도와 최대세포밀도는 적색 LED광원(650nm)에서 가장 높았다고 하였으며, 미세조류의 파장별 성장특이성의 차이는 광합성 주색소인 Chlorophyll a 이외에 보조색소의 종류에 따른 차이이며, 종 특이성 또는 분류군 특이성이라 언급하였다.

<Table 2> The difference of populations by species and light sources

| | Division | N | M±SD | F | P(Duncan) |
|------------|-------------------|-----|---------------|-----------|--|
| Species | <i>T. suecica</i> | 195 | 101.91±92.54 | 47.135*** | .000 (C.<T.<I.) |
| | <i>C. simplex</i> | 195 | 45.92±32.33 | | |
| | <i>I. galbana</i> | 195 | 272.65±404.36 | | |
| LED lights | Blue | 117 | 169.81±270.95 | 6.349*** | .000 (WarmWhite<CoolWhite, Blue, Blue+Red Red<Blue, Blue+Red) |
| | Red | 117 | 88.67±120.22 | | |
| | Blue+Red | 117 | 216.70±413.37 | | |
| | CoolWhite | 117 | 152.23±233.61 | | |
| | WarmWhite | 117 | 73.40±94.86 | | |

*** P<.001

*C. simplex*의 성장은 혼합 LED광원과 CoolWhite LED광원에서 가장 효과적인 것으로 나타났다. 단일 파장만으로도 배양이 가능하지만 B+R LED광원을 사용하였을 때 조금 더 빠르게 증식극대에 도달하며 최대밀도 또한 높은 것으로 나타났다. Oh et al.(2015)는 규조류 *Nitzshia* sp., *Phaeodactylum tricornutum*, *Skeletonema* sp.의 최대 성장속도와 최대세포밀도는 청색 LED광원(450nm)에서 가장 높았으며, 형광램프, 적색 LED광원(650nm), 황색 LED광원(590nm) 순이었다고 보고하였다.

An et al.(2014)은 *Chaetoceros calcitrans*를 LED광원에서 배양하였을 때 Red LED광원(630nm)에서 가장 높은 증식률과 생물량을 보였으며, White 계열 광원을 이용하였을 때에도 부정적인 영향을 받지 않았다고 보고하였다. 본 연구에서는, Red LED광원(660nm)에서 배양한 *C. simplex*의 비증식률과 개체수가 B+R LED광원보다는 낮았고 Blue LED광원보다는 높았다(<Table 1>). 이것은 Red LED광원이 Blue LED광원과 상승효과를 나타낸 것이라 볼 수 있고, *I. galbana*의 경우는 그 역이나(<Table 1>), *T. suecica*는 B+R LED광원이 Blue와 Red LED광원보다 낮아서 일종의 상쇄효과를 나타낸 것으로 보인다. 이러한 현상은 광원에 대한 종 특이성과 배양조건에 따른 차이라고 판단되며, 앞으로 실험자료의 축적이 필요하다.

*I. galbana*는 LED광원에서는 타 종에 비해 고밀도 배양이 가능한 것으로 나타났다. 450nm 파장을 포함하는 Blue, B+R, CoolWhite LED광원에서 가장 효과가 좋았으며 그 중에서도 B+R LED광원에서 가장 빠르게 증식극대에 도달하였고, 다른 광원 대비 약 2배에 가까운 최대밀도를 보였다. Choi et al. (2012)은 *I. galbana*가 황조류(golden algae)이므로 Red LED광원(660nm)보다는 White LED광원에서 더 좋은 효율을 보였다고 보고하였다. 이 연구에서도 *I. galbana* [현재는 착편모식물문(Haptophyta), 예전에는 황갈조식물문

(Chrysophyta), 황색조식물문(Chromophyta)에 속하기도 하였음. 분류군의 방법, 정의에 따라 달라질 수 있음(cf. Green & Leadbeater, 1994; Chihra, 2000; Sze, 1998)]는 종의 색과 유사한 붉은색, 황색을 띄는 LED광원에서는 효과가 낮은 것으로 나타났다. 이것은 450nm를 bas]로한 B+R, Blue와 CoolWhite의 LED광원에서 효율이 좋았다. 보색작용의 측면에서 정밀한 연구가 필요하다.

다양한 배양조건과 배양환경에 따른 미세조류의 광합성 과정에서 특유의 생물화학합성에 대해서는 앞으로 그 가치와 효능에 대해 많은 연구가 필요로 할 것으로 생각된다.

LED광원을 이용한 미세조류의 배양은 대상종의 특성에 맞는 맞춤형 광원과 멸균해수의 사용 및 오염을 최소화한 단종배양일 때 효과적인 것으로 판단된다. 하지만, 실제 양식어가에서 활용되는 고압필터방식에 의한 여과해수를 사용할 경우에는 다른 종의 혼입으로 먹이생물로서의 활용 및 대량배양에 있어서 제한적 요소가 될 수도 있다.

미세조류들은 각각 그 생활환경조건의 상한과 하한을 가지고 있으며, 또한 증식, 형태 형성 및 활성 등에 호적조건과 최적조건을 가지고 있다. 따라서, 종별 또는 유전형별로 환경요소들을 제어하면서 호적 또는 최적생활조건을 찾아야한다. 이를 위해서는, 배양증식에 관련된 배양공학, 증식공학, 생물반응공학, 생물화학공학, Process system공학, Bioprocess공학, Bioelectronics와 더 포괄적인 생물 process system공학이 필요할 것이며, 당해 미세조류에 관련된 생물학과 해수의 물리·화학적 연구도 필요하다.

여러 조건에서 무균배양이 아닌 일반적인 단종 또는 병용배양시, 그 배양기 내에는 미세조류, 균류, 편모충, 선충, 섬모충, 바이러스 등 분류군 수준의 다양성과 생산자, 분해자, 포식자, 기생자 등 기능의 다양성 및 배양조건과 제어불가능한 미세환경의 다양성에 따른 환경다양성이 존재한다. 이러한 미세조류의 배양기도 일종의 microcosm

또는 mesocosm이라고 할 수 있으므로, 그 계 내에서의 물질과 에너지의 흐름을 종합적·전일적으로 연구하여 질적·양적으로 최적의 미세조류를 생산하는 것이 필요할 것이라고 생각된다. 그러기 위해서는 그 전체상을 연구하여 공통법칙을 찾아내기 위한 집단 또는 군집생물학적 및 생물인구학적 연구를 위한 metagenomics, 또한 미세조류 자체의 영양유전체학, 대사체학, 단백질체학, 당질체학, 생리체학, 상호작용체학, 광유전체학 등의 Omics 즉, ecome(Saitou, 2013)의 ecomics도 연구해야 할 것이다.

감사의 글

이 논문은 호남광역경제권 선도산업 육성사업의 일환인 ‘수산 인공종묘 배양장에 있어서 생산성 향상의 근간이 되는 먹이생물(조류) 증식용 LED 조명 시스템 개발’ 과제의 지원으로 수행되었기에 감사드리는 바입니다.

References

An, Heui-Chun · Bae, Jae-Hyun · Kwon, O-Nam · Park, Heum-Gi and Park, Jin-Chul(2014). Change in the growth and biochemical composition of *Chaetoceros calcitrans* cultures using light-emitting diodes. J. Kor. Soc. Fisheries Technology. 50(4): 447~454.

Chen, Chun-Yen · Saratale, Ganesh D. · Lee, Chi-Mei · Chen, Pei-Chung and Chang, Jo-Shu(2008). Phototrophic hydrogen production in photobioreactors coupled with solar-energy-excited optical fibers. Int. J. Hydrogen Energy. 33: 6886~6895.

Chihara, Mitsuo(ed.)(2000). Diversity and evolution of algae. Shokabo. 346 pp.

Choi, Bo-Ram · Kim, Dong-Soo and Lee, Tae-Yoon(2012). Correlation conditions for marine microalgae *Isochrysis galbana* under illumination of light emitting diodes. J. Kor. Geo-Environmental Society. 13(10): 63~68.

Chojnacka, Katarzyna and Noworyta, Andrzej(2004). Evaluation of *Spirulina* sp. growth in photoautotrophic, heterotrophic and mixotrophic cultures. J. Enzyme and Microbial Technology. 34: 461~465.

Culture Collection of Algae and Protozoa(2002). Walne's medium for algal cultures. Dunstaffnage Marine Laboratory. Web: www.ccap.ac.uk.

Das, Probir · Lei, Wang · Aziz, Siti Sarah and Obbard, Jeffrey Philip(2011). Enhanced algae growth in both phototrophic and mixotrophic culture under blue light. J. Bioresource Technology. 102: 3883~3887.

Green, J. C. and Leadbeater, B. S. C.(1994). The haptophyte algae. Clarendon Press. 446 pp.

Guillard, Robert R. L.(1973). Growth measurement. pp. 287~320. In Handbook of phycological methods - Culture methods & Growth measurements-. Stein, J. R. (ed.), Cambridge Univ. Press.

Han, Bo-Ping(2002). A mechanistic model of algal photoinhibition induced by photodamage to photosystem-II. J. Theor. Biol. 214: 519~527.

Hwang, Jong-Dae and Ko, Dong-Su(2014). Development of a high efficient LED system for the plant growth. J. Kor. Soc. Manufacturing Precess Engineers. 13(4): 121~129.

Hwang, Myeong-Geun · Park, Jae-Hwan · Lim, Jong-Min · Lee, Jang-Won. 2009. Eco-friendly high efficiency LED lighting. A-JIN. 123 pp.

Katsuda, Tomohisa · Lababpour, Abdolmajid · Shimahara, Kazumichi and Katoh, Shigeo(2004). Astaxanthin production by *Haematococcus pluvialis* under illumination with LEDs. Enzyme and Microbial Technology. 35: 81~86.

Lee, Choul-Gyun and Palsson, Bernhard O.(1994). High-density algal photobioreactors using Ligh-Emitting-Diodes. Biotechnology and Bioengineering. 44: 1161~1167.

Lee, Sang-Woo(2010). Plant factory and plant cultivation using LED artificial light. Optical Science and Technology. 4(3): 12~19.

Matthijs, Hans C. P. · Balke, Hans · Van Hes, Udo · Kroon, Bernd M. A. · Mur, Luuc R. and Binot, Roger A.(1996). Application of light-emitting diodes in bioreactors: Flashing light effects and

- energy economy in algal culture(*Chlorella pyrenoidosa*). J. Biotechnology and Bioengineering. 50: 98~107.
- Maxwell, Kate and Johnson, Giles N.(2000). Chlorophyll fluorescence-a practical guide. J. Experimental Botany. 51(345): 659~668.
- Oh, Seok-Jin · Kwon, Hyeong-Kyu · Jeon, Jin-Young and Yang, Han-Seop(2015). Effect of monochromatic light emitting diode on the growth of four microalgae species (*Chlorella vulgaris*, *Nitzschia* sp., *Phaeodactylum tricorutum*, *Skeletonema* sp.). J. Korean Society of Marine Environment & Safety. 21(1): 1~8.
- Ojala, Anne(1993). Effects of temperature and irradiance on the growth of two freshwater photosynthetic cryptophytes. J. Phycol. 29: 278~284.
- Okauchi, Masanori(1992). Live feeds for aquaculture. pp. 75~88. In Yamaguchi, Katsumi. (ed.) Utilization of microalgae. Kouseisha-kouseikaku.
- Park, Jung-Eun and Hur, Sung-Bum(2000). Optimum culture condition of four species of microalgae as live food from China. J. Aquaculture. 13(2): 107~117.
- Rho, Sum and Jung, Min-Min(2007). Live food organisms for aquaculture. Onnuri. 256 pp.
- Saitou, Naruya(2013). Introduction to evolutionary genomics. Springer. 461 pp.
- Sze, Philip(1998). A biology of the algae. WCB/Mcgraw-Hill. 278.
- Tamiya, EL · Hase, E · Shibata, K · Mituya, A · Iwamura, T · Nihei, T. and Sasa, T.(1976). Kinetics of growth of chlorella, with special to its dependence on quantity of available light and on temperature. pp. 204~232. In Burlew J. S. (ed.). Algal culture : from laboratory to pilot plant. Carnegie Institution of Washington Publication.
- Teo, Chee Loong · Atta, Madiha · Bukhari, Attaullah · Taisir, Mohamad · Yusuf, Afendi M · Idris, Ani(2014). Enhancing growth and lipid production of marine microalgae for biodiesel production via the use of different LED wavelengths. Bioresource Technology. 162: 38~44.
- Wang, Chih-Yu · Fu, Chun-Chong and Liu, Yung-Chuan(2007). Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. Biochemical Engineering Journal. 37: 21~25.

-
- Received : 17 March, 2017
 - Revised : 04 April, 2017
 - Accepted : 13 April, 2017