

총 설

LED광원을 활용한 미세조류의 배양

김대근 · 최윤이^{†,*,**}

전북대학교 생물공정공학과
561-756 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
*LED농생명융합기술연구센터
570-752 전북 익산시 고봉로 79 전북대학교 익산캠퍼스
**전북대학교 생리활성소재과학과
561-756 전북 전주시 덕진구 백제대로 567
(2013년 9월 27일 접수, 2013년 12월 5일 수정본 접수, 2013년 12월 12일 채택)

Microalgae Cultivation Using LED Light

Dae Geun Kim and Yoon-E Choi^{†,*,**}

Department of Bioprocess Engineering, Chonbuk National University, 567 Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk 561-756, Korea
*LED Agri-bio Fusion Technology Research Center, Chonbuk National University, Iksan Campus,
79 Gobong-ro, Iksan-si, Jeonbuk 570-752, Korea
**Department of Bioactive Material Sciences, Chonbuk National University,
567 Baekje-daero, deokjin-gu, Jeonju-si, Jeonbuk 561-756, Korea
(Received 27 September 2013; Received in revised form 5 December 2013; accepted 12 December 2013)

요 약

미세조류는 이산화탄소를 제거하고 산업적으로 유용한 다양한 이차 대사물질을 생산해 내는 광합성 미생물로 생물산업분야에서 주목 받고 있는 유용한 자원이다. 이러한 미세조류를 실내에서 효과적으로 배양하기 위해서는 무엇보다도 효율적인 광원이 필수적이다. 최근 발달하는 LED광원은 광원의 크기가 작고, 에너지 효율이 우수하며, 특정 파장만 조사할 수 있다는 점 등의 다른 인공광원과 차별되는 많은 장점을 가지고 있다. LED광원을 미세조류의 배양에 적용하는 연구는 최근에 와서야 점차 시도되고 있는 실정이며, 아직까지 실험실 규모의 실험과 대표적인 특정 종 위주의 결과들만 나오고 있어, LED광원을 미세조류의 산업적인 배양에 적용하기 위해서는 더 많은 세부적인 연구 결과가 요구된다. 하지만 LED 조명을 미세조류 배양 분야에 적용하는 것은 효과적인 접근으로 생각되며, BT(Bio Technology) 산업에 새로운 지평을 열 것으로 생각된다. 따라서 본고에서는 최근 연구되고 있는 LED광원을 이용한 미세조류의 배양 현황 및 그 가능성에 대해서 조사하고, 향후 나아갈 방향에 대해서 기술해 보았다.

Abstract – Microalgae have been considered as a promising microorganism in the field of bio-industry due to their abilities to fix carbon dioxide as well as biosynthesize valuable secondary metabolites. Of many lighting sources for microalgal cultivation, LED (Lighting Emitting Diode) has been emerged as the appropriate choice with multiple advantages over the conventional bulbs. However, it is only in recent years that we have witnessed the possibility of application of LED into microalgae cultivation system. LED will serve as an evolutionary lighting source for microalgae cultivation system and open the frontier for integrative bio-industries. In this paper, we present the comprehensive review on the recent trends of LED applications into microalgal biotechnology.

Key words: LED, Microalgae, Photobioreactor, Microalgae Culture, LED Developments

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: yechoi@jbnu.ac.kr

[‡]이 논문은 KAIST 양지원 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1. 서 론

18세기 영국의 산업혁명 이후 화석연료를 바탕으로 급속도로 성장한 산업기술의 발달은 인류의 삶을 윤택하게 만들어준 최대의 업적이기도 하지만, 화석연료를 사용함으로써 인한 결과물로 발생하는 대기 중 이산화탄소 농도의 증가 역시 결코 피할 수 없는 부산물이었다. 이렇게 축적된 이산화탄소는 지구 밖으로 나가는 복사열을 붙잡아 두는 역할을 해 지구 온난화 현상을 일으켜 전 지구적인 급격한 기후 변화를 유발시키게 되었고, 그 결과 최근 세계 각지에서는 해수면의 상승뿐만 아니라, 유래 없는 홍수와 가뭄, 허리케인과 같은 일상적이지 않은 자연재해가 연이어 일어나고 있다. 따라서 전세계적으로 더 이상의 지구온난화를 막기 위해 에너지 사용을 줄이거나, 탄소로부터 자유로운 효율적인 에너지원을 찾는 연구가 계속 이루어지고 있다[20].

조류는 대기나 수중의 이산화탄소와 물을 원료로 광 에너지를 이용하여 유기물을 합성하고 산소를 생산하는 광합성을 통해 생산하는 생물로, 육안 관찰이 가능한 미역, 김 등의 대형조류와 현미경으로 관찰되는 클로렐라, 스피루리나 등의 미세조류로 구분된다. 그 중 미세조류는 지구상에 수십만 종이 존재하는 것으로 알려져 있으며 학계에 등록된 미세조류 수만 6천여 종으로 생물학적으로 높은 다양성을 가진다[37]. 이러한 미세조류는 단세포성 생물로 일반적인 지상의 고등 식물에 비해서 4~20배 정도 유기물 생산성이 높으며, 이러한 유기물 생산 과정 중에 온실가스인 이산화탄소의 높은 수준의 고정화가 가능한 것으로 알려져 있어, 최근 지구 온난화 문제가 떠오름에 따라 그 해결책 중 하나로 주목을 받고 있다[9]. 특히 이러한 미세조류는 그 생물학적인 다양성을 지니는 만큼 종류에 따라서 세포 내 지질 함량이 높아 바이오 디젤로 사용할 수도 있는 중, 산업적으로 가치를 지니는 불포화 지방산, 단백질, 비타민, 카로티노이드 계통의 이차대사물질 등 다양한 유용 물질들을 생산해 내는 중 등 중별로 아주 다양한 특징을 가지고 있어, 미세조류의 중 다양성에 기초를 두어 다양한 연구가 진행되고 있다[1,5,12,13,20,48]. 미세조류의 활용은 근대 이전의 단순한 식량 대체 자원으로부터 기초적 건강 보조식품으로, 나아가서는 생리활성물질 등 다양한 고부가가치 유용 물질 생산 및 미세조류 바이오 에너지 생산으로 점차 그 범위가 확대되어가고 있는 추세다. 따라서 미세조류를 이용한 BT(Biotechnology) 산업은 이산화탄소 고정화 및 바이오 에너지 생산을 통한 지구 온난화 방지와 함께 유용물질의 생산을 통한 식품, 화장품, 의약품 산업 등 다양한 산업에 활용이 가능한 다양한 장점을 가지고 있어 현재 전세계적인 연구가 지속되어가고 있는 실정이며, 미래의 저 탄소 녹색성장 시대를 이끌어갈 차세대 기반 산업이라고 할 수 있다.

광합성은 미세조류의 생육에 있어서 중요한 생화학 과정이며, 이를 통하여 빛 에너지를 화학에너지로 변환시킨다. 미세조류를 산업적으로 상용화하기 위해서는 먼저 반응기 등을 통한 대량 배양을 통해 원활한 바이오매스 생산이 이루어져야 하는데, 미세조류는 광합성을 통해 생산하는 생물이기 때문에 대량 배양을 위해서는 빛의 원활하고 효율적인 공급이 필수적으로 이루어져야 한다. 따라서 미세조류의 산업적 응용을 위한 가장 중요한 핵심 인자는 빛의 공급이며, 이러한 빛을 공급하는 과정에서 모든 전체 생물공정의 대부분의 비용이 발생한다고 하겠다. 현재 세계적으로 이러한 비용을 줄이기 위해서 다양한 연구들이 진행되고 있는데, 그 중 하나로 주목 받는 광원이 바로 발광다이오드 즉 LED(Light Emitting Diode)

이다. 이러한 LED는 칼륨, 인, 비소 등을 재료로 한 다이오드에 전류를 흘리면 빛을 발하는 성질을 이용해서 만든 것으로, 여타의 형광등 및 백열등에 비해 10~100배의 긴 수명과 전력소비가 낮고 고효율, 친환경적이라는 지대한 장점을 가지고 있어 주목받고 있다[44]. 하지만 LED를 식물 및 미세조류와 같은 광합성을 하는 생물에 적용하는 연구는 이제 막 주목받고 있는 초기 단계로 아직까지 산업적인 응용을 위해 고려해야 될 부분이 남아 있다. 따라서 본고에서는 LED 및 미세조류 산업에 대한 기본적인 연구 배경을 바탕으로 LED를 이용한 미세조류 배양산업의 융합에 대해서 간략하게 소개하고자 한다.

2. LED조명과 미세조류

2-1. 광원과 LED

세계 최초로 전기를 이용한 광원인 백열등은 에디슨이 발명한지 100여 년이 지난 지금도 형광등과 함께 전 세계적으로 많이 이용되고 있는 광원 중 하나이다. 백열등은 특유의 따스하고 아늑한 분위기와 전기 회로가 없이 빠르고 간편하게 점등할 수 있으며, 아주 저렴한 가격대를 가지고 있다는 뛰어난 장점을 가지고 있다. 하지만 이러한 백열등은 에너지 효율이 매우 낮아 형광등의 1/5 수준 밖에 되지 않으며, 이 말 뜻은 같은 전력량으로 계산했을 때 형광등을 켜면 백열등을 켜는 것보다 전력량을 80%나 아낄 수 있다는 뜻이 된다. 따라서 이렇게 에너지 효율이 낮은 백열등은 지구 온난화 시대에 맞지 않는 광원으로서 백열등을 대신해 LED와 같은 다른 고효율 광원으로 대체한다면 상당한 규모의 온실 가스를 줄일 수 있다는 결론이 나온다.

LED(Lighting Emission Diode, 발광 다이오드)는 1960년 미국의 GE에 의해 처음 개발된 전류를 흘려 보내면 빛이 발생하는 반도체다. 초기에는 밝기와 연색성이 낮아서 사용성이 낮았지만, 청색 LED 및 백색 LED가 개발되고 2000년대 초반부터 LED의 성능이 급속하게 향상되고 가격이 급락하면서 오히려 청색, 적색 등 원하는 특정 파장(wavelength)만 조사할 수 있는 LED조명은 BT분야에 있어서는 장점으로 인정받아 차세대 광원으로 연구되기 시작했다[47]. 이렇게 LED가 차세대 광원으로 주목 받는 이유에는 LED조명이 가지는 고효율, 환경 친화적, 긴 수명, 공간 효율성 등의 장점과 함께 LED광원의 보급화를 막았던 단점인 낮은 광 출력과 높은 가격 문제가, Fig.

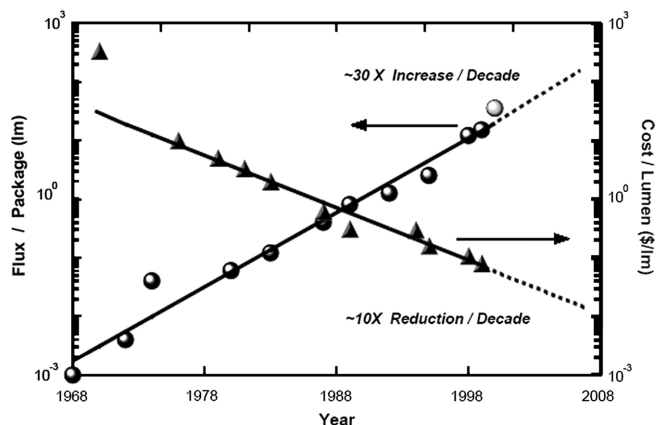


Fig. 1. A comparison of light-emitting diode costs and light output versus time [7].

1에서 나타낸 소위 하이츠의 법칙(Haibtz's Law)에 따라 점차적으로 단점이 개선되어졌기 때문이다[7]. LED광원은 백열등 전력 소비량의 20% 수준에 불과하며, 광원 효율이 100 lm/W 정도로 형광등과 비슷한 값을 보인다. 특히 LED조명은 약 8만시간의 수명으로, 백열등 약 1천 시간보다 약 80~100배, 형광등 약 2만 시간보다 약 4배의 긴 수명을 가지고 있어 경제성을 가진다. 무엇보다 LED칩의 크기는 대략 0.25 mm²로 쌀알 크기보다 작다. 그리고 이 칩을 포함해 패키지로 제작해도 넓이가 21 mm², 높이가 5 mm 미만의 크기로 아주 작은 완성품이 나온다. 이는 백열등과 형광등의 큰 부피에 비해서 LED조명이 가지는 큰 장점으로 예를 들어 실내에서 미세조류를 배양하는 광 반응기의 경우 기존에 형광등을 사용할 때는 광원의 특성상 외부 조사 밖에 이루어질 수 없어 가동 시 광원의 전달 효율이 크게 떨어졌지만, LED조명의 경우 광 반응기 내부에 조명을 설치해서 가동하거나 반응기 외벽에 붙여서 사용해도 될 정도로 공간을 절약할 수 있어 광원의 효율을 크게 높일 수 있다[8].

또한 디지털 조명인 LED는 기존 아날로그 조명에 비해서 세밀한 지능형 제어가 가능한 장점이 있다. 여타 다른 산업분야와는 다르게 식물과 미세조류 같은 식물체의 성장에 적용하기 위해서는 미세조류의 종류와 미세조류의 성장에 맞게 조명의 세기 및 파장을 다르게 적용할 필요가 있는데, 기존의 조명은 조명 하나당 한정된 크기와 사용되는 안정기의 가격 때문에 공간적, 비용적인 면에서 다양하게 적용하기가 어려웠다. 하지만 LED조명은 칩 하나하나의 크기가 매우 작고, 좁은 공간에 다양한 파장의 칩을 조합할 수 있어 다양한 파장과 밝기 그리고 디밍(Dimming) 등의 조절이 자유롭게 이루어질 수 있다. 따라서 LED조명은 기존의 형광등보다 공간적으로 작게 차지하면서도 광 출력뿐만 아니라 청색, 적색 등 원하는 특정 파장만 필요에 따라서 조사할 수 있어 미세조류와 같은 광합성 생물의 배양에 매우 적합할 것으로 판단된다.

2-2. LED광원을 이용한 미세조류 연구 동향

미세조류는 미생물계에 속하나 분해자의 역할을 하는 것이 아니라 대기 중의 이산화탄소를 흡수해 광 에너지를 받아들여 식물처럼 광합성을 하여 유기물질을 생성해내는 독립영양을 하는 생산자이다. 미세조류는 서식환경에 따라 물에 떠다니는 식물플랑크톤(phytoplankton)과 토양 등에 부착하여 서식하는 부착미세조류(benthic microalgae)로 구분되며 토양, 담수, 기수, 해수 등 다양한 환

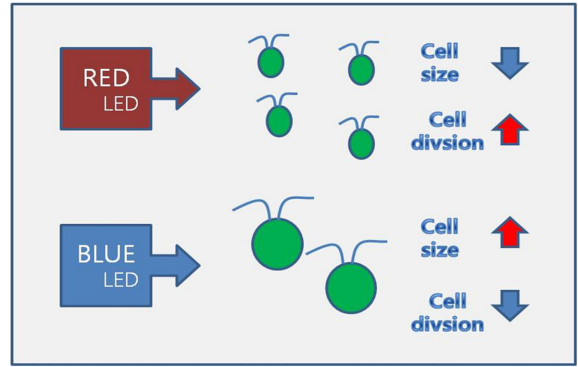


Fig. 3. The effect of LED light on microalgae growth.

경에서 적응해서 서식한다. 일반적으로 남조류를 제외한 미세조류는 진핵 세포로 구성되어 식물의 생리적 기작과 매우 유사하나, 고등식물보다는 세포분열 및 성장의 주기가 매우 짧고 빠르게 분열하여 유기물 생산성이 우수해 Fig. 2에서 나타낸 것처럼 단백질, 지질, 당질, 비타민, 색소와 같은 산업적으로 유용한 고부가 가치 물질들을 다량 생산해 낼 수 있는 가능성을 가지고 있다[5,35].

LED조명을 이용해서 광합성 생물을 재배하려는 시도는 식물에서 먼저 시작되었으며, 다양한 파장에서 식물체의 반응을 조사한 결과가 보고되고 있다. 식물체는 광을 흡수하는 많은 광 수용체들을 가지고 있으며, 주요 발달 단계에 따라서 적합한 파장이 각기 달라, 조사한 파장에 따른 식물체의 반응이 달리 나타난다는 결론을 얻었다[42]. 아직 초기 단계이지만 식물과 유사한 광합성대사를 하는 미세조류에 있어서도 파장에 따른 성장에 미치는 연구들이 이루어지고 있으며, Fig. 3에 나타낸 것처럼 미세조류에서도 각기 다른 세포의 변화가 나타나는 것이 명확하지는 않지만 일부 확인 되고 있다[28,36,38]. Table 1에는 미세조류의 종류와 생성하는 다양한 영양성분과 각종 유용물질인 생리활성물질을 나타내었다. 생성하는 유용물질의 종류는 미세조류의 종만큼이나 매우 다양하며, 이러한 다양한 생리활성물질을 이용해서 인체의 면역증강, 간 기능 회복, 뇌졸중과 백내장 개선 등의 연구와 광합성 색소를 이용한 항산화제, 항염제, 항세균제, 항진균제, 항바이러스제등의 기능을 이용하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 특히 LED조명의 특정 파도, 파장과 pulse 등을 배양 단계에 맞게 적절하게 조사해서 미세조류를 배양한다면, 광합성 색소(chlorophyll 등)와 항산화물질, 지질과 같은 유용 생리활성물질의 합성을 증진하도록 유도할 수 있음이 최근 연구가 되어가고 있다[15,31,44]. 세포 내 지질 함량이 높아 바이오디젤로 사용하기 우수한 종으로 알려진 *Botryococcus braunii* 종의 경우 적색, 청색 그리고 녹색의 LED파장에서 따라서 세포 내 지질 및 탄수화물의 함량에 변화를 줄 수 있음이 확인되었으며[4], *Dunaliella salina*의 경우 청색과 적색 LED파장의 파장 비율이 25:75의 조건에서 성장효율이 증진되는 것을 확인하였으며, 특히 단일 적색 파장을 이용해 배양한다면 카로티노이드의 일종인 베타 카로틴의 함량을 증진시킬 수 있음이 확인되었다[18]. 이렇듯 LED의 조명을 이용하면 미세조류의 유용물질의 함량을 증진시킬 수 있는 긍정적인 연구 결과들이 나타나고 있지만, 아직까지 LED파장에 대해 연구가 되고 있는 미세조류의 수가 많지 않아, 다양한 유용 미세조류에 대해서 LED광원에서의 배양에 대해 지속적으로 연구해 나가는 것은 가장 먼저 해결되어야 할 매우 중요한 문제이다. 유용한 미세조류 별 LED파장에 대한 다양한

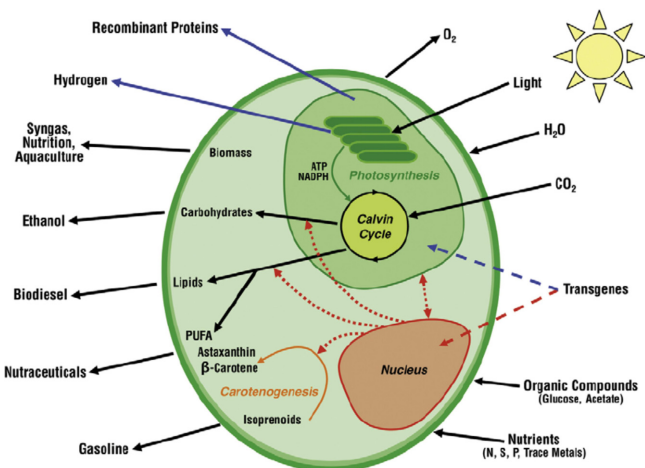


Fig. 2. Commercially important metabolic pathways in microalgae [35].

Table 1. Products synthesized by microalgae

Purpose	Microalgae	Products
Antioxidant	<i>Dunaliella salina</i>	β -carotene
	<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxanthin, cantaxanthin, lutein
	<i>Chlorella vulgaris</i>	Cantaxanthin, astaxanthin
	<i>Chlorella pyrenoidosa</i>	Lutein, violaxanthin
Anti-Inflammatory	<i>Haematococcus pluvialis</i> , <i>H. lacustris</i> , <i>Chlorella. zofingiensis</i> , <i>C. vulgaris</i>	Astaxanthin
	<i>Gyrodinium impudicum</i>	p-KG03
	<i>Chlorella stigmatophora</i>	Hydrosoluble components, sterols
Antimicrobial	<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	Eicosapentaenoic acid
	<i>Haematococcus pluvialis</i>	Short chain fatty acids
	<i>Skeletonema costatum</i>	Unsaturated, saturated long chain fatty acids
	<i>Euglena viridis</i>	Organic extracts
	<i>Askeletonema costatum</i>	Extra-metabolites
	<i>Chlamydomonas reinhardtii</i> , <i>Chlorella vulgaris</i>	Methanolic and hexanolic extracts
	<i>Peridinium bipes</i>	Water-soluble extract
	<i>Goniodoma pseudogoniaulax</i>	Goniodomin A
	<i>Gambierdiscus toxicus</i>	Polyether compounds (gambieric acids A and B)
	<i>Prorocentrum lima</i>	Polyether compounds
	<i>Dinophysis fortii</i> , <i>Staurastrum gracile</i> , <i>Pleurastrum terrestre</i> , <i>Dictyosphaerium pulchellum</i> , <i>Klebsormidium crenulatum</i>	Methanol extracts
	<i>Chlorococcum HS-101</i>	α -Linolenic acid
	<i>Chlorokybus atmophyticus</i>	Acetone extract
Antiviral	<i>Navicula directa</i>	Polysaccharide
	<i>Gyrodinium impudicum</i>	p-KG03 exopolysaccharide
	<i>Dunaliella primolecta</i>	Pheophorbide a-, b-like compounds
	<i>Chlorella autotrophica</i>	Sulfated polysaccharides
Antitumoral	<i>Haematococcus pluvialis</i>	Astaxanthin
	<i>Peridinium bipes</i>	Diadinochrome A, B, diatoxanthin/cynthiaxanthin

연구 결과가 확보된다는 점, 결국 미세조류 별 맞춤형 LED배양이 가능해 상기에 서술된 다양한 기능성 생리활성물질을 효율적으로 생산할 수 있도록 만들 것이며, 이는 결국 막대한 부가가치를 창출할 수 있는 바이오 소재 산업의 중요 기술이 될 가능성이 높다.

또 한편 미세조류는 빛을 통해 광합성을 할 때 성장을 위해서 수 중의 질소와 인을 사용하게 되는데, 이러한 원리를 이용해서 미세조류를 하 폐수의 고도처리에 적용해, 폐수를 정화하고 이와 함께 대량생산된 바이오 매스를 바이오 에너지, 비료 등으로 재활용하여 사용하고자 하는 연구도 다양하게 이루어지고 있다[22,41]. 특히 최근에는 안정적으로 바이오 매스 및 이차 대사 물질을 생성하고 다양한 폐수의 고도처리의 효율을 높이기 위해서 LED조명을 적용한 다양한 연구들이 시도되고 있다[19,45]. 대표적인 폐수처리 미세조류인 *Chlorella vulgaris*의 경우 다양한 LED파장 및 광량의 조건에서 배양했을 때 적색 LED파장에서 가장 높은 성장율을 보였으며, 특히 조사하는 LED파장에 따라 질소와 탄소 같은 영양소의 제거효율이 다른 것으로 나타났다[19,46]. 또한 *C. vulgaris*와 *Spirulina platensis*와 같은 미세조류는 구리, 납, 카드뮴, 아연 등의 중금속에 대해 높은 수준의 흡착 능력이 있음도 밝혀져 있는데, 이를 통해 질소와 인 뿐만 아니라 폐수중의 중금속 처리의 활용에 대한 연구 또한 병행해서 진행되고 있는 실정이다[3,26]. 따라서 미세조류를 이용한 폐수 처리 시설에 LED광원을 접목한다면, 목적하는 폐수 내의 질소 및 탄소와 같은 영양물질의 함량에 따라 각기 다른 파장을 이용해 적용이 가능할 것으로 판단된다. 또한 폐수 내 중금속의 제거에 LED조명을 이용해 미세조류의 바이오 매스 생산성을 높여 배양한다면 화학적으로

새로운 물질을 합성할 필요가 없고, 중금속의 제거 효율이 높을 뿐만 아니라 흡착용량도 대단히 크며 중금속 이온에 대한 선택성도 비교적 높아지는 장점이 있어 융합에 따른 긍정적 효과가 기대 되는 분야 중 하나이다.

또한 미세조류는 수산양식어의 먹이시설에 매우 중요한 역할을 담당하고 있다. 양식어의 치어 단계에 사용되는 대표적인 먹이생물로 동물플랑크톤인 알테미아(*Artemia*)와 윤충(*Rotifer*), 요각류(*Copepod*) 등이 주로 사용되고 있는데 이러한 동물플랑크톤의 일차적 먹이로 클로렐라와 테트라셀미스, 스피루리나 같은 미세조류가 많이 사용된다[2,29]. 이때 윤충과 요각류가 알테미아보다 치어의 먹이로 사용되기에 영양학적으로 우수하지만, 배양이 어렵고 편리성이 떨어져 알테미아가 주로 사용되는 실정이다. 따라서 알테미아를 영양학적으로 보강하기 위해 영양물질을 첨가해 배양한 미세조류를 먹여 영양성분을 강화하는 일차적인 처리를 하게 되는데, LED조명을 이용해 영양성분이 강화되도록 미세조류를 배양한다면 다른 영양성분의 구매로 인한 추가적 지출 없이 효과적으로 영양 강화된 먹이생물을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 또한 전복이나 이매패류 종묘의 초기 먹이 생물로 부착성 규조류가 많이 이용되는데 이들의 생체 특성상 대량으로 배양하기 어려워 공급에 많은 어려움이 있었다[34]. 일반적으로 규조류는 녹조류와 다르게 생장에 적합한 광합성 파장 영역이 다르다[33,39]. 따라서 이러한 특징을 이용 LED조명을 사용해 최적 파장을 찾고 또한 LED파장에 따른 성장의 특징들을 확인하기 위한 연구도 이루어졌으며, 규조류의 일종인 *Cyclotella nana*와 *Thalassiosira pseudonana*의 경우 청색 파장에서 배양이 촉진되는 것을 확인하였

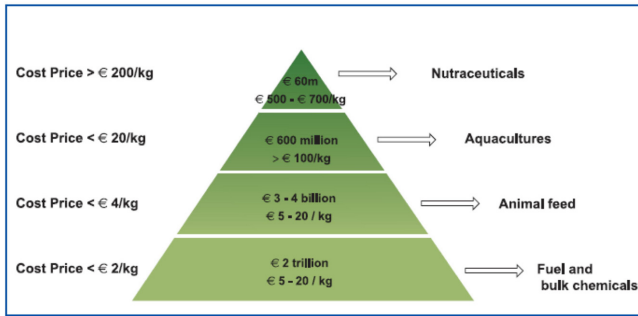


Fig. 4. Future prospects of microalgal market value [16].

으며, 또한 *Dunaliella tetiolecta*의 경우 녹색 과장에서 성장이 억제 되는 것이 보고되었다[17,39]. 이러한 연구들을 통해 볼 때 LED광원을 이용해서 규조류의 대량 배양에 접목하는 것 또한 효과적인 접근법으로 생각된다. 특히 최근 연이은 해양 대량 원유 유출 사고와 일본 원자력 발전소 오염 수 누출 사고 등으로 인해 해양 식품에 대한 불신이 지속적으로 높아져 앞으로 육상양식을 기반으로 하는 수산양식 산업은 계속 발달해 나갈 것으로 판단된다. 결국 이러한 산업이 성공적으로 발달되기 위해서는 반드시 먹이생물 및 사료생물로 사용될 미세조류의 대량배양과 사료화에 대한 연구가 뒷받침되어야 할 것이며 이러한 미세조류의 대량배양의 핵심 키 역시 LED조명에서 찾을 수 있을 것으로 판단된다.

따라서 지금까지의 내용을 종합해 볼 때 LED를 적용한 미세조류 대량 배양 산업은 전세계적으로 문제가 되고 있는 이산화탄소 감소에 의한 지구온난화 해결 및 강과 호소 및 연안 수역의 하 폐수 처리와 같은 환경적인 문제뿐만이 아니라, 인체에 유용한 다양한 생리활성 물질 생산을 통한 의약품 산업 및 바이오 에너지 생산 및 수산양식의 먹이까지 다양한 분야에 걸쳐서 연관되어 있는 잠재력이 높은 BT와 IT융합산업으로 판단되며, 이러한 LED기반 고밀도 대량 배양 기술, 수확 및 물질전환기술 등의 핵심기술의 발전에 따라 Fig. 4에서 보는 것처럼 다양한 분야에서 대규모 시장을 형성하게 될 것이다[16].

3. 미세조류 대량 배양

미세조류는 고등 식물에 비해서 배양장치가 비교적 단순하고 차지하는 토지 면적이 작다는 점에서 유리하다. 하지만 미세조류를 배양하기 위해서는 온도, pH, 혼합방식, 영양염 공급 등의 다양한 인자들이 효과적인 성장을 위해서 확보되어야 하며, 또한 미세조류의 성장에 따라 발생하는 산소 및 2차 대사물질의 축적이나 상호 간섭에 필요한 요소들을 명확히 확인해야 효율을 높일 수 있다[6]. 하지만 무엇보다도 광합성을 기반으로 하는 생명체이니만큼 사용되는 광원 및 광량, 광도의 조절이 배양에 가장 핵심적인 기술이라 말할 수 있다. 따라서 미세조류에 효과적으로 광원을 공급하기 위해 배양장치에 대한 다양한 연구들이 진행되어 온 것은 산업화를 향한 당연한 수순이라고 볼 수 있다. 현재까지 미세조류를 대량으로 배양하기 위해 사용되는 광원에는 주로 태양광, 형광등, 할로젠 금속 램프와 같은 전체 스펙트럼의 인공광원이 사용되고 있으나 최근 LED광원이 급속도로 발달함에 따라 이러한 광원들을 LED광원으로 대체하려는 시도가 많이 이루어지고 있다.

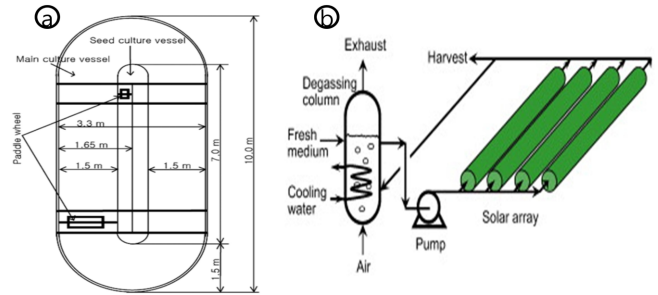


Fig. 5. Design of the raceway pond (a) and a tubular photobioreactor (b)[10,25].

3-1. 전체 스펙트럼 광원 기반 미세조류 대량 배양 장치

전통적으로 전체 스펙트럼인 태양광을 이용해서 미세조류를 배양하는 시도는 오래 전부터 진행되어 왔으며, 연못이나 인공적으로 큰 구덩이를 파서 만든 간단한 노지 배양방식과 밀폐형 광 반응기를 이용해 옥외 배양하는 방법이 대표적이다. 노지배양(open pond) 방식은 화학적 합성과 같은 다른 생산 방법들에 경쟁력을 가지도록 하기 위해 비교적 저렴하게 만들어진 단순 개방형 배양기를 뜻하는 것으로 Fig. 5a에서 나타난 수로형 연못(raceway pond)방식이 이 중 가장 효과적인 방법으로 알려져 있다[25]. 주된 배양 광원이 태양광을 이용한 광합성이기 때문에 수로의 깊이는 약 0.3에서 0.5 m 정도 이내로 해야 하며, 수로의 깊이가 깊어지면 배양 시 빛의 투과율이 급격히 낮아져 효율이 떨어지기 때문에 대량 배양을 위해서는 넓은 면적의 설치 장소가 요구된다. Matsumoto et al.은 *Nannochloropsis salina* 종을 사용, 화력발전소의 배출가스를 이용하여 수로형 연못 배양을 실시하였다. 이때 최종적인 미세조류의 생산성은 $42 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 로 나타났으며, 이산화탄소의 평균 이용률은 54%로 공급되는 이산화탄소의 많은 부분이 대기 중으로 손실돼 광합성 효율이 낮은 것을 확인할 수 있었다. 특히 사용한 수로형 연못 배양조 설치에 약 8,900 ha의 넓은 토지면적이 필요한 것으로 나타났다[30].

밀폐형 배양장치는 긴 관 또는 얇고 넓은 관 형태의 투명한 플라스틱 또는 유리재질로 만들어진 형태가 일반적이며, 연구 목적에 따라 돔(dome)형, 나선(spiral)형 등의 특이 형태도 존재하고 있다. 이러한 대부분의 광 생물반응기는 Fig. 5b에서 나타난 것처럼 배지저장기(media reservoir)와 광수집기(solar collector or tubular array)로 구성이 되며, 비용의 절감을 위해 태양광을 주된 광원으로 이용한다[10]. 광수집기는 태양광을 잘 받을 수 있는 형태로 유리재질의 투명 관을 병렬로 연결하며, 이 방법 역시 태양광의 투과를 위해서 관 직경은 0.1 m 이내로 제작해야 한다. 미세조류는 광합성을 통해 유기물과 함께 산소를 생산, 방출하게 되는데 특히 한 낮에 강한 광선과 함께 밀폐형 배양장치 내부에 증가한 산소 농도는 미세조류의 세포에 광산화 저해(photooxidative damage)를 주게 되어 광합성의 효율을 떨어뜨려 성장에 저해를 주게 된다. Molina et al.은 200L 규모의 관형 광 생물반응기를 제작해 유용 규조류인 *Phaeodactylum tricoratum*의 옥외배양을 실시하여 $32 \text{ g/m}^2/\text{day}$ 의 높은 생산성을 얻을 수 있었지만, 실험 시 강한 광선에 의한 광산화(photooxidation) 작용이 나타나 미세조류의 생산성이 감소되는 것을 확인할 수 있어 태양광을 이용한 밀폐형 광 반응기의 경우 태양광의 강도의 조절과 산소 농도의 조절이 무엇보다 중요한 과제임을 확인할 수 있었다[32].

따라서 상기에 언급한 대로 태양광을 이용해서 미세조류를 배양하는 방법은 배양의 특성상 상부에서만 빛 에너지를 받을 수 있기 때문에 광 반응기의 형태 및 깊이가 제한적일 수 밖에 없으며, 광량을 조절할 수 없고 기후의 영향을 많이 받아, 산업적인 신뢰성 있는 생산을 보장할 수 없다. 이를 보조하기 위해 장치에 별도의 형광등과 같은 인공광원을 설치하기도 하지만 이는 설치비용을 높이며, 효율이 떨어져 다른 대안이 요구되는 실정이다. 특히 태양광을 이용하는 특성상 반응기는 외부에 노출될 수 밖에 없는데 이는 미세조류를 배양하는 지역적인 영향을 많이 받을 수 밖에 없어 사계절이 있거나, 외부의 온도의 변화가 급변하는 지역에서는 적용이 어려워 한계가 있다.

3-2. LED기반 미세조류 대량 배양 장치

LED를 기반으로 하는 실내 밀폐형 배양은 이제 연구되기 시작한 초기 단계이지만, 앞에서 언급한대로 미세조류의 성장에 적합한 맞춤형 파장과 광량을 제공할 수 있다는 장점과 광원의 크기가 작아 광 반응기에 다양하게 적용할 수 있다는 장점 때문에 LED광원을 적용해 미세조류 배양의 효율을 높이기 위한 다양한 시도가 이루어지고 있다. 그 방법 중 가장 기본적인 것은 바로 수중 광원이다. 일반적으로 형광등과 같은 기존의 광원은 광원의 특성상 침수에 매우 약하기 때문에 반응기 외부에서 조사해주는 방법을 사용할 수 밖에 없었다. 하지만 이러한 방법은 광 전달 효율을 낮추고 광 이용의 효율을 높이기 위해 많은 양의 조명이 필요하게 되는 단점이 있었다. 최근 LED조명을 이용함에 따라 간단한 방수처리를 통해 Fig. 6처럼 LED 조명을 직접 광 반응기 내부로 넣어 광 효율을 높이는 연구들이 진행되기 시작했다[40]. 이러한 방식은 직접 반응기 내부로 들어감에 따라 빛의 이용 효율이 높아져 이전보다 적은 전력을 소모함에도 더 많은 바이오 매스 생산량을 얻을 수 있게 되었다. 이러한 LED광원 기반 밀폐형 광 반응기는 초기 설비 투자 비용 및 운전 비용이 높지만 생산성과 재현성이 높아, 고부가가치 기능성 물질 생산에 초점을 맞추는 것이 유리할 것으로 알려져 있다. 이에 따라 최근 강력한 항산화물질로 세계적으로 주목받고 있는 아스타잔틴을 생산하는 미세조류인 *Haematococcus pluvialis*의 배양에 LED를 적용하고자 하는 연구가 많이 진행되고 있으며, 현재 LED를 이용한 광생물 반응기를 제작해 배양시기를 단축시켜 배양의 효율을 높이거나, 청색 LED와

같은 강력한 LED광원을 이용해 아스타잔틴의 생산 효율도 높일 수 있음이 보고되고 있다[27]. 특히 *H. pluvialis*에 관한 연구는 다양하게 이루어지고 있는데, 배양 시 LED광의 파장을 적색 LED와 청색LED를 연속적으로 이용해서, 적색 LED로 성장을 증가시키고 청색 LED를 이용해서 아스타잔틴의 함량을 높여 바이오매스 효율 및 아스타잔틴의 함량을 높이는 연구 결과가 보고되었다[23]. 또한 LED광원을 이용 배양 시 광원을 flashing하는 효과를 주어 배양에 사용해 성장 및 아스타잔틴 함량을 높을 수 있다는 연구 결과도 보고되었다[24]. 따라서 *H. pluvialis*에 대해 선행된 LED광원을 이용한 다양한 연구 결과들은 LED기반 광 반응기를 통해 미세조류의 성장 및 유용 이차대사물질의 함량을 증가시킬 수 있다는 긍정적인 결과로 사료된다.

한편 LED만을 유일한 광원으로 이용하지 않고 LED와 태양광을 복합적으로 이용하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 바로 광 반응기와 노지배양의 장점만을 조합해 배양의 효율을 높이고자 하는 시도로 Fig. 7에서 보는 것처럼 LED를 선택적으로 이용해 배양의 효율을 높이고자 하였다. 이런 방식은 주로 하 폐수 및 식물공장의 폐양액과 같은 물질을 대상으로 해, 질소와 인의 고도처리를 함과 동시에 미세조류의 바이오 매스를 효과적으로 회수해 저렴한 바이오 매스를 생산을 기반으로 미세조류 바이오 디젤의 산업화 경쟁력을 낮추는데 주된 목적을 두고 있다. 이 방식은 태양광의 단점을 LED조명으로 보완해 그 효율을 높이고, 빠른 시간 내에 하수의 고도처리가 가능하도록 구상되었으며, 현재 식물공장 내 배출되는 폐양액을 대상으로 연구가 진행 중에 있다.

아직 미세조류 광 반응기에 LED조명을 적용해서 배양하는 기술은 아직 초기 단계이며, 대부분 실험실 수준의 결과만 나타내고 있다. 하지만 LED를 적용해서 미세조류를 배양하는 연구의 질적 수준이 우수하며, LED를 이용한 미세조류 배양시 바이오 매스 생산량 증



Fig. 6. A tubular photobioreactor with LEDs inside.

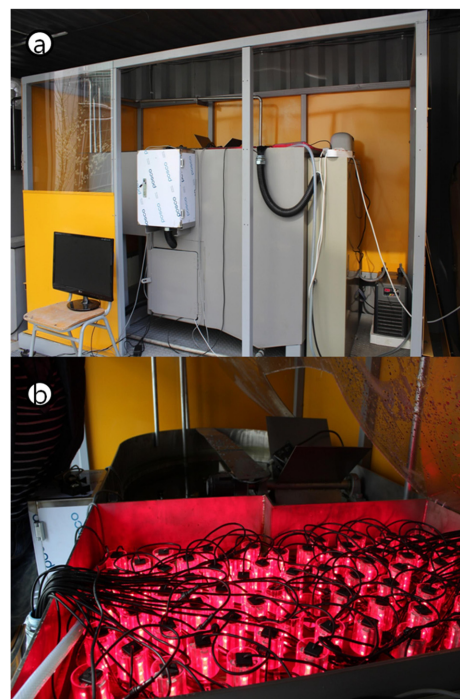


Fig. 7. New design photobioreactor with open ponds (a) and red LED (b) for wastewater treatment.

가 및 이차대사물질 함량 증대도 촉진된다는 긍정적인 결과들이 나타나고 있어, 미세조류를 산업적으로 대량 배양함에 있어서 LED조명의 적용은 적합한 방법으로 판단된다. 특히 최근에는 100L 이상의 비교적 큰 규모의 LED를 적용한 광 반응기의 연구들도 진행되고 있어 앞으로 그 효율은 더욱 높아질 것으로 판단된다.

3-3. LED광원 기반 미세조류 배양장치의 연구의 방향

상기에 언급한 대로 미세조류의 배양에 있어서 빛 에너지는 가장 중요한 에너지원이며, 따라서 빛 에너지가 광합성을 통해 화학에너지로 전환되는 효율을 높여주는 것이 미세조류의 배양에 있어서 가장 중요한 핵심이라고 할 수 있겠다. 미세조류의 배양에 있어서 주로 고려해야 할 빛 에너지 인자는 광량(light intensity)과 광질(spectral quality)이며, 지금까지 사용되어 온 인공 광원인 형광등과 할로겐 램프 등은 광량의 조절은 가능했지만 광질 즉 빛의 파장의 조절은 어려워 이와 관련된 연구가 많이 이루어지지 않았다. 최근의 LED조명을 이용한 연구 결과들은 주로 LED파장에 따른 미세조류의 성장 효율에 대한 연구 결과들이 주로 나타나고 있으며, 특히 단일파장 아래에서의 성장을 확인하는 결과들이 많이 이루어지고 있다 [19,24,45]. 상기에 언급한 대로 미세조류는 Table 1 같은 다양한 이차 대사물질을 생산할 수 있으며, 생산하는 물질 역시 미세조류의 종류에 따라서 다양하다. 또한 미세조류를 배양할 때 조사하는 LED파장에 따라서 이차 대사 물질의 생산 효율이 달라질 수 있음이 확인되었으며, 그 특징은 이차 대사물질의 종류와 배양하는 종마다 다르게 나타난다 [18,23,24]. 따라서 LED광원을 이용해서 다양한 파장에서 배양 시 미세조류의 배양특징 및 생리적 변화에 대한 많은 실험 결과들이 요구되지만 *Chlorella vulgaris*, *Haematococcus pluvialis*, *Botryococcus braunii*와 같은 많이 알려진 특정 미세조류에만 한정적으로 연구 결과들이 보고되고 있다 [4,11,23,46]. 따라서 아직도 LED파장에 대해서 다양한 종의 성장 및 대사과정에 대한 연구의 결과들은 부족한 실정이며, 이러한 연구들이 선행될 때 LED광원을 이용한 광생물 반응기의 효율을 더욱 극대화할 수 있을 것이다.

LED광원은 그 특성상 광원의 사이즈가 작고 좁은 공간에 다양한 파장의 칩을 조합할 수 있어 다양한 파장과 밝기 그리고 디밍(Dimming) 등의 조절이 자유롭게 이루어질 수 있다 [8]. 일반적으로 광 반응기 내부에서 미세조류를 배양 시 낮은 광량 조건에서는 광량이 증가함에 따라 미세조류의 성장효율도 일정하게 증가하지만, 높은 광량 조건에서는 광량이 증가하면 광저해(photoinhibition)를 받아 광효율이 떨어지게 된다 [12]. 반면 반응기 내 미세조류의 농도가 높아지거나 광원과 배양액과의 거리가 멀 경우에는 미세조류 스스로에 의해서 빛의 차단이 발생하는 self-shading 현상이 나타나 광효율이 떨어지게 된다 [43]. 따라서 배양 시 광 반응기 내부에서 배양액과 광원과의 거리와 배양액 내 미세조류의 농도에 따라서 광원의 세기를 유동적으로 조절할 필요가 있으며, 이것은 LED기반 광 반응기만 가질 수 있는 효율적인 장점이다. 이미 녹조류인 *H. pluvialis*의 경우 배양 시 LED광원의 frequency를 조절하는 것이 미세조류의 성장에 영향을 줄 수 있다는 것이 보고되었다 [24]. 하지만 아직까지 배양기 내 세포농도에 따른 파장의 세기 및 파장에 관련된 내용에 관해서는 단편적인 연구 결과밖에 이루어지고 있지 않아 미세조류의 대량배양 장치의 효과적인 설계를 위해선 가장 먼저 반응기 내 광원의 위치 및 배양하는 세포농도에 따른 적정 광량 및 파장에 대한 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것으로 판단된다.

4. 결 론

LED조명은 기존 조명과 달리 아주 좁은 범위의 파장을 선택적으로 조사할 수 있으며, 기존의 광원이 가지지 못하는 다양한 장점을 가지고 있어 배양하고자 하는 목적 미세조류에 따라 최적 배양 파장만을 조사할 수 있다. 이를 통해 미세조류의 광합성효율을 높이고 목적하는 이차대사물질의 생산을 높일 수 있는 등 목적에 따른 맞춤형 배양이 가능할 것으로 판단된다. 특히 LED는 아주 작은 크기의 칩 사이즈로 장소에 거의 관계없이 적용이 가능하며, 광 출력과 에너지 효율이 높고 비교적 발열이 낮아 광 반응기와 같은 대량 배양 장치의 내부에 근접 설치가 가능하여 광 이용 효율을 크게 높일 수 있다. 또한 긴 수명과 강한 내구성으로 유지 보수비를 절감할 수 있어 현 미세조류 배양조명을 대체할 수 있는 신 광원이라 할 수 있겠다. 하지만 아직까지 보편 상용화되기 위해서는 몇 가지 해결해야 할 문제점들이 남아 있다. 기술적으로는, 초기 설치 비용을 절감할 수 있는 더욱 값싼 LED조명의 개발이 시급하며, 이와 함께 효과적인 대량 배양을 위한 광 효율이 높은 LED기반 광 반응기 구조의 설계 또한 함께 이루어져야 할 것이다. 또한 연구적으로는, 배양하는 미세조류 별 최적 배양 광량 및 이차 대사물질을 증가시킬 수 있는 파장 및 광량에 대한 지속적인 데이터베이스가 함께 구축되어야 할 것이다. 경제적으로는, 아직까지 초기단계에 머물러 있는 미세조류 배양산업을 효과적으로 성장시키기 위해서 석유화학산업이 발달했던 것처럼 미세조류 바이오 화학공업의 발달이 병행되어야 할 것이다. LED조명을 기반으로 한 미세조류 배양시스템으로 하 폐수의 고도처리를 통해 미세조류 바이오 매스를 얻고, 얻은 바이오 매스에서 고부가가치 이차대사물질은 분리해 의약품과 화장품 원료로, 단백질 부분은 가축의 사료로, 지질 부분은 바이오 디젤로 사용되는 방식으로 버려지는 부분이 없이 접근한다면, 미세조류 기반 산업은 조금 더 경쟁력을 가질 수 있게 될 것이다. 또한 이러한 접근 방식을 근간으로 하는 한 미세조류 대량 배양 LED조명 시스템의 구축은 미세조류 산업화를 앞당길 좋은 해결책이 될 것이다.

감 사

본 연구는 “산업통상자원부”, “한국산업기술진흥원”, “호남지역사업평가원”의 “광역경제권 선도산업 육성사업”으로 수행된 연구결과입니다. 또한 이 논문은 2012년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 (재)차세대 바이오매스 연구단(글로벌프론티어연구개발사업)의 지원을 받아 수행된 연구입니다((재)차세대바이오매스연구단-2012-055032).

References

1. Apel, K. and Hirt, H., “Reactive Oxygen Species: Metabolism, Oxidative Stress, and Signal Transduction,” *Annu. Rev. Plant Biol.*, **55**, 373(2004).
2. Arumugam, P., Inbakandan, D., Ramasamy, M. and Murugan, M., “Encapsulated Spirulina Powder Feed for the Nutritional Enrichment of Adult Brine Shrimp (*Artemia salina*),” *J. Appl. Aquac.*, **25**, 265(2013).
3. Azizkhani, M., Baghestani, M., Bagheri, H. and Nikmanesh, M., “A Review on the Application of Two Microalgae (*Chlorella vul-*

- garis, Spirulina platensis*) as Biofilters to Eliminate Heavy Metals from Industrial Waste Water,” *KAUMS J. (FEYZ)*, **16**, 717(2013).
4. Baba, M., Kikuta, F., Suzuki, I., Watanabe, M. M. and Shiraiwa, Y., “Wavelength Specificity of Growth, Photosynthesis, and Hydrocarbon Production in the Oil-producing Green Alga *Botryococcus braunii*,” *Bioresour. Technol.*, **109**, 266(2012).
 5. Behrens, P. W. and Kyle, D. J., “Microalgae as a Source of Fatty Acids,” *J. Food Lipids*, **3**, 259(1996).
 6. Borowitzka, M. A., “Commercial Production of Microalgae: Ponds, Tanks, and Fermenters,” *Prog. Industri. Microbiol.*, **35**, 313(1999).
 7. Bourget, C. M., “An Introduction to Light-emitting Diodes,” *Hort Sci.*, **43**, 1944(2008).
 8. Carvalho, A. P., Silva, S. O., Baptista, J. M. and Malcata, F. X., “Light Requirements in Microalgal Photobioreactors: An Overview of Biophotonic Aspects,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **89**, 1275(2011).
 9. Chisti, Y., “Biodiesel from Microalgae,” *Biotechnol. Adv.*, **25**, 294(2007).
 10. Chisti, Y., “Biodiesel from Microalgae Beats Bioethanol!” *Trends Biotechnol.*, **26**, 126(2008).
 11. Choi, B., Lim, J.-H., Lee, J. and Lee, T., “Optimum Conditions for Cultivation of *Chlorella sp.* Fc-21 Using Light Emitting Diodes,” *Korean J. Chem. Eng.*, **1**(2013).
 12. Choudhury, N. and Behera, R., “Photoinhibition of Photosynthesis: Role of Carotenoids in Photoprotection of Chloroplast Constituents,” *Photosynthetica*, **39**, 481(2001).
 13. Cordero, B. F., Obraztsova, I., Couso, I., Leon, R., Vargas, M. A. and Rodriguez, H., “Enhancement of Lutein Production in *Chlorella Sorokiniana* (Chlorophyta) by Improvement of Culture Conditions and Random Mutagenesis,” *Mar. Drugs*, **9**, 1607(2011).
 14. Courchesne, N. M. D., Parisien, A., Wang, B. and Lan, C. Q., “Enhancement of Lipid Production Using Biochemical, Genetic and Transcription Factor Engineering Approaches,” *J. Biotechnol.*, **141**, 31(2009).
 15. Das, P., Lei, W., Aziz, S. S. and Obbard, J. P., “Enhanced Algae Growth in Both Phototrophic and Mixotrophic Culture Under Blue Light,” *Bioresour. Technol.*, **102**, 3883(2011).
 16. Decker, J., “Blooming Biofuel: How Algae Could Provide the Solution,” *Renewable Energy World Magazine*(2009).
 17. del Pilar Sánchez-Saavedra, M. and Voltolina, D., “Effect of Blue-green Light on Growth Rate and Chemical Composition of Three Diatoms,” *J. Appl. Phycol.*, **8**, 131(1996).
 18. Fu, W., Guðmundsson, Ó., Paglia, G., Herjólfsson, G., Andrés-son, Ó. S., Palsson, B. Ø. and Brynjólfsson, S., “Enhancement of Carotenoid Biosynthesis in the Green Microalga *Dunaliella salina* with Light-emitting Diodes and Adaptive Laboratory Evolution,” *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **1**(2013).
 19. Ge, Z., Zhang, H., Zhang, Y., Yan, C. and Zhao, Y., “Purifying Synthetic High-strength Wastewater by Microalgae *Chlorella vulgaris* Under Various Light Emitting Diode Wavelengths and Intensities,” *J. Environ. Health Sci. Eng.*, **11**, 8(2013).
 20. Hallenbeck, P. C. and Benemann, J. R., “Biological Hydrogen Production; Fundamentals and Limiting Processes,” *Int. J. Hydrogen Energy*, **27**, 1185(2002).
 21. Hamid Badawi, G., Yamauchi, Y., Shimada, E., Sasaki, R., Kawano, N., Tanaka, K. and Tanaka, K., “Enhanced Tolerance to Salt Stress and Water Deficit by Overexpressing Superoxide Dismutase in Tobacco (*Nicotiana tabacum*) Chloroplasts,” *Plant Sci.*, **166**, 919(2004).
 22. Hammouda, O., Gaber, A. and Abdelraouf, N., “Microalgae and Wastewater Treatment,” *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **31**, 205(1995).
 23. Katsuda, T., Lababpour, A., Shimahara, K. and Katoh, S., “Astaxanthin Production by *Haematococcus Pluvialis* Under Illumination with LEDs,” *Enzyme Microb. Technol.*, **35**, 81(2004).
 24. Katsuda, T., Shimahara, K., Shiraiishi, H., Yamagami, K., Ranjbar, R. and Katoh, S., “Effect of Flashing Light from Blue Light Emitting Diodes on Cell Growth and Astaxanthin Production of *Haematococcus Pluvialis*,” *J. Biosci. Bioeng.*, **102**, 442(2006).
 25. Kim, C.-J., Jung, Y.-H., Ko, S.-R., Kim, H.-I., Park, Y.-H. and Oh, H.-M., “Raceway Cultivation of *Spirulina Platensis* Using Underground Water,” *J. Microbiol. Biotechnol.*, **17**, 853(2007).
 26. Kumar, S. D. and Nandakumar, R., “Heavy Metal (zinc) Using Immobilized Marine Microalga *Chlorella Marina*,” *Pak. J. Biol. Sci.*, **10**(2013).
 27. Lababpour, A., Hada, K., Shimahara, K., Katsuda, T. and Katoh, S., “Effects of Nutrient Supply Methods and Illumination with Blue Light Emitting Diodes (LEDs) on Astaxanthin Production by *Haematococcus pluvialis*,” *J. Biosci. Bioeng.*, **98**, 452(2004).
 28. Münzner, P. and Voigt, J., “Blue Light Regulation of Cell Division in *Chlamydomonas reinhardtii*,” *Plant Physiol.*, **99**, 1370(1992).
 29. Makridis, P., Costa, R. A. and Dinis, M. T., “Microbial Conditions and Antimicrobial Activity in Cultures of Two Microalgae Species, *Tetraselmis chuii* and *Chlorella minutissima* and Effect on Bacterial Load of Enriched *Artemia* Metanauplii,” *Aquaculture*, **255**, 76(2006).
 30. Matsumoto, H., Shioji, N., Hamasaki, A., Ikuta, Y., Fukuda, Y., Sato, M., Endo, N. and Tsukamoto, T., “Carbon Dioxide Fixation by Microalgae Photosynthesis Using Actual Flue Gas Discharged from a Boiler,” *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **51**, 681(1995).
 31. Menon, K. R., Balan, R. and Suraishkumar, G., “Stress Induced Lipid Production in *Chlorella vulgaris*: Relationship with Specific Intracellular Reactive Species Levels,” *Biotechnol. Bioeng.*, **110**, 1627(2013).
 32. Molina, E., Fernández, J., Acien, F. and Chisti, Y., “Tubular Photobioreactor Design for Algal Cultures,” *J. Biotechnol.*, **92**, 113(2001).
 33. Oh, S. J., Kim, D. I., Sajima, T., Shimasaki, Y., Matsuyama, Y., Oshima, Y., Honjo, T. and Yang, H. S., “Effects of Irradiance of Various Wavelengths from Light-emitting Diodes on the Growth of the Harmful Dinoflagellate *Heterocapsa Circularisquama* and the Diatom *Skeletonema costatum*,” *Fish. Sci.*, **74**, 137(2008).
 34. Renaud, S., Parry, D. and Thinh, L.-V., “Microalgae for Use in Tropical Aquaculture i: Gross Chemical and Fatty Acid Composition of Twelve Species of Microalgae from the Northern Territory, Australia,” *J. Appl. Phycol.*, **6**, 337(1994).
 35. Rosenberg, J. N., Oyler, G. A., Wilkinson, L. and Betenbaugh, M. J., “A Green Light for Engineered Algae: Redirecting Metabolism to Fuel a Biotechnology Revolution,” *Curr. Opin. Biotechnol.*, **19**, 430(2008).
 36. Ruyters, G., “Effects of Blue Light on Enzymes,” *Blue Light Effects in Biological Systems*, Springer, pp. 283-301(1984).
 37. Scott, S. A., Davey, M. P., Dennis, J. S., Horst, I., Howe, C. J., Lea-Smith, D. J. and Smith, A. G., “Biodiesel from Algae: Challenges and Prospects,” *Curr. Opin. Biotechnol.*, **21**, 277(2010).

38. Tamiya, H., Hase, E., Shibata, K., Mituya, A., Iwamura, T., Nihei, T. and Sasa, T., "Kinetics of Growth of *Chlorella*, with Special Reference to its Dependence on Quantity of Available Light and on Temperature," *Algal Culture From Laboratory to Pilot Plant*, 204(1953).
39. Wallen, D. and Geen, G., "Light Quality in Relation to Growth, Photosynthetic Rates and Carbon Metabolism in Two Species of Marine Plankton Algae," *Mar. Biol.*, **10**, 34(1971).
40. Wang, C.-Y., Fu, C.-C. and Liu, Y.-C., "Effects of Using Light-emitting Diodes on the Cultivation of *Spirulina platensis*," *Biochem. Eng. J.*, **37**, 21(2007).
41. Wang, L., Min, M., Li, Y., Chen, P., Chen, Y., Liu, Y., Wang, Y. and Ruan, R., "Cultivation of Green Algae *Chlorella* sp. In Different Wastewaters from Municipal Wastewater Treatment Plant," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **162**, 1174(2010).
42. Wenke, L., "Light Environmental Management for Artificial Protected Horticulture," *Agrotechnol.*, (2012).
43. Wood, B., Grimson, P., German, J. and Turner, M., "Photoheterotrophy in the Production of Phytoplankton Organisms," *Prog. Ind. Microbiol.*, **35**, 175(1999).
44. Xu, B., Cheng, P., Yan, C., Pei, H. and Hu, W., "The Effect of Varying Led Light Sources and Influent Carbon/nitrogen Ratios on Treatment of Synthetic Sanitary Sewage Using *Chlorella vulgaris*," *World J. Microbiol. Biotechnol.*, 1(2013).
45. Yan, C., Zhang, L., Luo, X. and Zheng, Z., "Effects of Various LED Light Wavelengths and Intensities on the Performance of Purifying Synthetic Domestic Sewage by Microalgae at Different Influent C/N Ratios," *Ecol. Eng.*, **51**, 24(2013).
46. Yan, C., Zhao, Y., Zheng, Z. and Luo, X., "Effects of Various LED Light Wavelengths and Light Intensity Supply Strategies on Synthetic High-strength Wastewater Purification by *Chlorella vulgaris*," *Biodegradation.*, 1(2013).
47. Yeh, N. and Chung, J.-P., "High-brightness Leds—energy Efficient Lighting Sources and Their Potential in Indoor Plant Cultivation," *Renew. Sust. Energ. Rev.*, **13**, 2175(2009).
48. Yoo, S. J., Oh, S.-K. and Lee, J. M., "Sensitivity Analysis with Optimal Input Design and Model Predictive Control for Microalgal Bioreactor Systems," *Korean Chem. Eng. Res.(HWAHAK KONGHAK)*, **51**, 87(2013).