

◆ 특집 ◆ 바이오매스 대량생산용 광생물반응기 개발

미세조류 배양을 위한 광생물반응기 개발의 기술동향

Recent Trends of the Development of Photobioreactors to Cultivate Microalgae

김종태¹, 안동규², 박종락³, 박정우⁴, 정상화^{2,✉}
 Jongtye Kim¹, DongGyu Ahn², JongRak Park³, JeongWoo Park⁴ and SangHwa Jeong^{2,✉}

1 조선대학교 바이오리파이너리연구소 (Bio-refinery Research Center, Chosun Univ.)

2 조선대학교 기계공학과 (Department of mechanical Engineering, Chosun Univ.)

3 조선대학교 광기술공학과 (Department of Photonic Engineering, Chosun Univ.)

4 조선대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Design Engineering, Chosun Univ.)

✉ Corresponding author: shjeong@chosun.ac.kr, Tel: 062-230-7953

Manuscript received: 2010.12.16 / Accepted: 2010.12.21

This paper describes current status and future prospects of the mass production of microalgae biomass. Microalgae have attracted considerable attention since they not only effectively fix CO₂ gas during their metabolic process but also have the great potential to be utilized for producing valuable substances as a kind of efficient light-harvesting cell factories. In this review, we outline various types of photobioreactors employed for mass production of biomass by culturing microalgae in a well controlled way and give an overview about the present state of affairs, both domestic and international, in the field of the microalgal culturing technologies.

Key Words: High Efficiency PhotoBioreactor (고효율 광생물반응기), Flat Panel Type Reactor (평판형반응기), Microalgae (미세조류), Scale-Up (대형화), Raceway Pond (도수로연못), S/V Ratio (단위체적당 단면적비)

1. 서론

최근 화석에너지자원 고갈로 인한 원유 수급의 불안정성과 개발도상국의 급격한 성장으로 인하여 세계 에너지 소비량은 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 에너지자원의 확보는 국가에너지 안보에 까지 위협이 되고 있다. 또한 화석연료의 사용에 따른 온실가스의 배출로 인한 지구 온난화등 지구 환경 보전문제가 국제적으로 큰 이슈로 등장하고 있으며, 대기 중 이산화탄소의 경우는 국제적으로 이산화탄소의 배출량을 동결 혹은 저감시키려는 조치가 강구되고 있다.¹

이상과 같은 문제에 대한 대책으로 여러가지 대체에너지들이 개발되고 있으며 그 중 바이오연

료는 옥수수, 콩, 유채, 사탕수수등의 1 세대 바이오연료를 시작으로 목질계를 이용한 2 세대 바이오연료에 이어 3 세대 바이오매스를 이용한 바이오연료등이 개발되고 있다. 3 세대 바이오연료 중 미세조류를 이용한 바이오 디젤의 생산은 신재생 에너지분야에서 급부상하고 있으며 각 세대별 바이오 연료의 장단점은 Table 1 과 같다.²

특히, 3 세대 바이오에너지원에 해당하는 식물성 플랑크톤인 미세조류는 빛을 에너지원으로 고가의 유기탄소원 대신 이산화탄소를 이용하여 대사를 유지하므로 이산화 탄소 고정화 및 저감이라는 환경문제에 부합할 수 있고, 최근의 분자생명공학 및 나노기술 기반의 기술발달로 미세조류로부터 항암기능의 신 물질, 고 항산화성 물질 등의

Table 1 Classification of bioenergy (adapted from reference 2)²

Classification	1 st generation Crop-based	2 nd generation Wood-based	3 rd generation Microalgae
Harvest cycle	1~2 Times/year	1 Time/8 year	1~2 Times/month
CO ₂ fixation ability(ton/ha)	5-10	4.6	36.7
Manufacturing process	Simple	Complex (Lignin removal)	Simple(No lignin)
Disadvantage	Food-related	Forest damage	None

생리 활성 2 차 대사물들이 다량 검색되었고 고부가가치의 의약품, 색소, 탄수화물 그리고 정밀화학약품 등의 잠재력 있는 생산원으로서 그 관심이 증가하고 있다. 또한 미세조류의 성장 과정에서 휘발성 유기화합물과 이산화탄소 등을 세포내에 고정시키고, 생육과정에서 폐수를 정화할 수 있어 폐수처리와 농업으로까지 그 이용범위가 확장되고 있다. 그러나 광생물반응기 등 미세조류 대량배양 기술의 부족은 미세조류 유래물질도 미세조류에 의한 생산보다 화학적 합성에 의한 생산이 더 경제적인 경우가 많아 미세조류의 상업적 이용을 저해하는 요인으로 작용하고 있다.³⁻⁷

미세조류를 이용한 바이오에너지의 생산이나 부산물을 생산하기 위해서는 생물학적 균주의 개발과 대량배양을 위한 광생물반응기의 개발이 이루어져야 한다.

최근 미세조류를 대량으로 고농도 배양하기 위해 많은 광생물반응기가 연구 중에 있으며, 본 리뷰에서는 국내의 기술 현황에 대하여 살펴보고, 여러 형태의 광생물 반응기를 소개하자 한다.

2. 국내·외 기술현황

2.1 국내 기술 동향 및 수준

국내의 바이오에너지 관련 기술개발은 1988 년 부터 현재까지 126 건 이상의 정부지원 연구개발이 진행되었고, 조류를 이용한 바이오 에너지 생산과 관련해서는 최근 2~3 년에 산학연 공동연구로 집중적인 연구개발이 이루어지고 있다.

국내에서 진행되고 있는 기술개발의 경우 조류 생산과 연료추출에 집중되어 있으며, 바이오매스를 생산하는 광생물반응기와 관련 시스템 기술 분

야에 대해서는 아직 초보적인 단계의 연구가 이루어지고 있는 것으로 보고되고 있다.⁸

국내의 광생물반응기의 경우 옥외개방형이나 효율이 높지 못한 단순 형상의 원통형 반응기에 집중되고 있으며, 투입 에너지가 가장 적고 바이오매스 생산 효율이 매우 높은 특징표면형상을 가진 평판형 고효율 광생물반응기와 관련 시스템 개발 기술은 거의 전무한 상황이다.

바이오 연료의 생산 원료인 바이오매스를 대량 확보하고 생산성 향상을 실현시킬 수 있는 고효율 광생물반응기 개발의 경우 기계·광시스템공학과 생물공학의 융합 연구를 통하여 실현이 가능하나, 현재 국내에서 추진되고 있는 기술개발에서는 생물공학분야에서 광생물반응기 개발을 주도하고 있어 선진국 수준의 고효율, 고부가가치 광생물반응기 개발을 위해서는 융합기술개발이 절실히 필요하다.

전반적인 바이오 관련 선진국 대비 국내 기술은 77% 정도 수준이며, 기술격차는 5~10년 정도로 보인다.

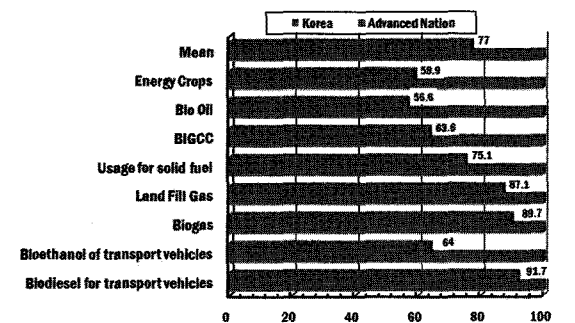


Fig. 1 The comparison of technical level about bio-energy between the internal and external nation (adapted from reference 8)⁸

바이오 에너지 관련 기술 중 바이오매스 및 에너지 생산을 위한 생물공학적 기술수준은 선진국의 기술수준에 접근하고 있으나, 바이오 에너지 관련 부품, 장치, 시스템 기술은 선진국과 기술격차가 매우 크다.

국내 기술 수준과 동향을 분석한 결과 표면 특정 구조를 가진 평판형 반응기와 다중광원 균일노광 도광관 및 마이크로프로세서 기반 공정 제어 시스템으로 구성된 미세조류 대량 생산용 고효율 광생물반응기 개발과 이 미세조류를 이용한

바이오 디젤 생산 개발 기술의 경우 국내에서는 아직 연구가 보고된 바가 없으나 학제간 공동 융합연구가 진행된다면 단시간 내에 원천기술확보가 가능할 것으로 기대된다.

2.2 국외 기술 동향 및 수준

미세조류를 사용하는 바이오 연료 생산 관련 연구는 전세계적인 친환경정책의 흐름에 따라 다양한 그룹에서 진행되고 있다. 특히 바이오디젤 생산용 미세조류는 다음과 같은 종류로 다양하게 개발되어 적용되고 있다.⁹⁻¹¹

Nannochloropsis sp.는 바이오매스 생산량이 높고 바이오매스 내에도 지질함량이 높아 최근 바이오디젤 생산에 적합한 균주로 각광받고 있다. 하지만 배양조건이 까다로워 연구진행에 어려움을 겪고 있으나 배양조건만 해결이 된다면 충분히 경쟁력을 가질 것으로 판단된다.

Chlorella sp.는 바이오매스 생산량이 높으나 지질함량이 *Nannochloropsis* sp.에 대해 상대적으로 낮다. 하지만 성장률이 높고 배양하기 쉬운 장점이 있기 때문에 고효율 광반응기를 이용한 미세조류 배양실험에 적합한 균주로 판단된다. 또한 최근 연구 동향에 따르면 *Chlorella* sp.를 이용하여 바이오디젤을 생산하는 실험이 진행되고 있다.

Botryococcus sp.는 현재까지 알려진 미세조류 중 지질 함량이 가장 많은 것으로 알려져 있다.¹² 이러한 장점 때문에 초기 연구에서 바이오디젤 생산에 관한 많은 연구가 진행되었으나 세포성장률 및 바이오매스 생산량이 낮아 바이오 디젤을 생산하는데 한계가 있다. 최근 세포성장률을 높이기 위해 유전자 변형 생물을 이용하려는 연구가 진행 중에 있으며 각 미세조류의 특징을 나타내보면 Table 2 와 같다.

미세조류 대량 생산 시스템 개발 관련 연구는 미세조류의 배양에 관한 연구와 광생물반응기의 개발인 두 분야로 요약될 수 있으며, 주목할 것은 미세조류의 배양에 관한 기술의 경우 대형 플랜트에 대한 연구개발이 추진되고 있다.¹³

미세조류를 이용한 이산화탄소 고정량 증대 및 바이오디젤 생산을 목표로 결성된 국제조직인 INMB(International Network for Microalgae Biofixation)는 2012 년까지 실현 가능한 기술개발로써 미세조류(*Botryococcus* sp.)의 생산성을 현재의 2 배 수준인 100 건조량 ton/ha/year 로 증대시키는 것을 목표로 하고 있다.

Table 2 Lipid content and productivities of different microalgae species (adapted from references 9,10 and 11)⁹⁻¹¹

Species	Maximum biomass productivity	lipid content	Product
	(mg/L/day)	(%)	
<i>Nannochloropsis</i> sp.	1,350	31-68	Biodiesel, Biomass
<i>Chlorella</i> sp.	1,180	28-32	Biomass, Biodiesel
<i>Botryococcus</i> sp.	350	29-75	Biodiesel
<i>Isochrysis galbana</i>	970	25-33	Biodiesel, Biomass
<i>Phaeodactylum tricornutum</i>	830	20-30	Biodiesel, Biomass
<i>Chlamydomonas reinhardtii</i>	90	21%	H ₂
<i>Chlorococcu littorale</i>	150	13-28	Carotenoid
<i>Dunaliella salina</i>	800	23-37	Carotenoids

미국 에너지성 (Department of Energy, DOE)은 Genomes To Life (GTL) program (2001-2020)을 실시하여 미생물 유전체 연구를 통한 지구온난화와 에너지 고갈 등의 21 세기 전 지구적 당면문제 해결을 목표로 하고 있다. *Syenchococcus* sp.를 대상으로 탄소고정효소의 유전체 구조 및 기능 분석에 관한 연구 및 지구온난화 방지와 바이오 디젤 생산을 목표로 한 *Botryococcus braunii* 의 유전체에 관한 연구를 수행 중에 있다.

미국은 NREL (National Renewable Energy Laboratory)을 중심으로 화석에너지를 대신할 수 있는 대체에너지자원의 개발과 미세조류 및 유전 공학적 조류 개량 기술 개발을 통해 대기 중 이산화탄소의 제거에 관한 연구를 활발히 진행 중이다. 수로형 연못(raceway pond)을 이용하여 연간 50 g/m²/day 의 효율로 미세조류를 배양하고 있다.¹

미세조류로부터 바이오연료 생산에 대한 연구를 수행하고 있는 대표적인 벤처기업으로는 SOLIX, GreenFuel, Cyanotec 등이 있으며 해마다 새롭게 창업되고 있는 기업의 수가 증가하는 추세이다. 대표적으로 미국의 GreenFuel Technologies 는 2001 년에 설립된 이래 발전소의 폐 가스를 이용

하여 미세조류를 관상 광생물반응기에서 배양하고, 이를 사용하여 바이오디젤 및 에탄올 그리고 바이오수소 생산에 대해 연구하고 있다.⁸

3. 광생물반응기 (Photobioreactors: PBRs)

3.1 개방형 연못 시스템 (Open ponds system)

1988 년에서 2000 년까지 집중적으로 연구개발되었으며, 가장 단순한 형태를 갖는다. 자연상태에서 영양원 공급이 풍부한 개방된 연못 등에서 배양하는 것으로, 초기 설비투자 와 운전비용이 저렴하고 유지 및 보수가 용이한 장점을 가지고 있다.¹⁴⁻¹⁶

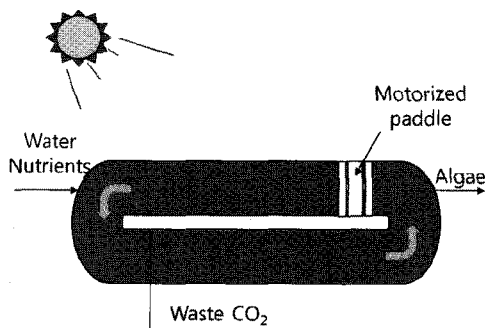


Fig. 2 Schematic of the raceway style ponds (adapted from reference 17)¹⁷

그러나 자연광을 이용함에 따라 배양장치 내부로 효과적인 빛 전달이 이루어지지 않아 미세조류의 성장속도가 느리고, 성장수율이 낮으며, 외부오염으로 인한 미세조류 생물량 및 종의 불안정성, 영양원의 불균등 분포 등의 단점을 가지고 있다.

또한 미세조류의 침전이 일어나는 점과 순환식 원형연못의 경우 중앙부에 효과적인 교반이 어려운 단점이 있어, 미세조류의 효과적 전이가 현저히 감소되기 때문에 생산성이 낮다. 현재는 Fig. 2 와 같이 대부분 수로(raceways)형태로 축조되고 있다.¹⁸⁻²⁰

3.2 밀폐형 배양시스템(Closed system)

3.2.1 관형 광생물반응기

관형 광생물반응기(tubular photobioreactor)는 미세조류의 밀폐형 배양장치 중 가장 많이 쓰이는 형태 중의 하나로 유리 또는 플라스틱 재질을 주로 사용한다.

자연채광을 위하여 수평형, 수직형, 유사수평형, 원뿔형, 경사형 등이 개발된 대표적인 관형 광생물반응기들이다. 우수한 교반성, 효과적인 멸균, 기체 전달의 용이성, 공간적 설치의 용이성 등 여러 장점이 있다.²¹⁻²³

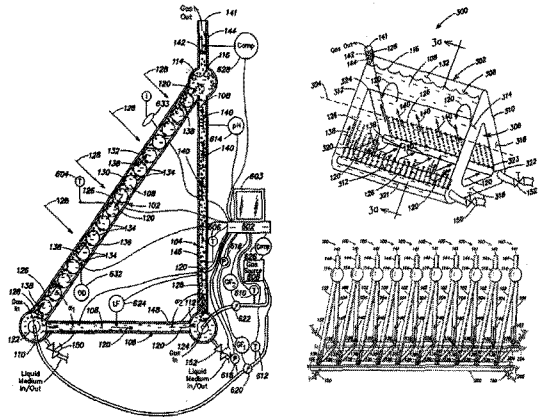


Fig. 3 Modified type of tubular PBR with triangular (adapted from reference 24)²⁴

다만, 대량의 배양을 위하여 관의 직경을 크게 할수록 부피에 대한 표면채광면적이 상대적으로 떨어지는 구조적인 단점을 지니기 때문에 효과적인 교반시스템 또는 인공채광 시스템을 추가적으로 구비해야 하며, 이 때 관의 길이는 제한을 받을 수밖에 없는 구조이다.²⁵

최근, 미국에서는 이러한 관형 광생물반응기의 구조를 Fig. 3 과 같이 삼각형(triangular type) 또는 고리형(annular type)으로 제작하여 단위반응기의 병렬연결을 통한 대량생산에 접근하는 사례도 보고 되고 있다.²⁶

3.2.2 수직 원추형 광생물반응기

수직 원주형 광생물반응기(vertical columns PBRs)는 2003 년도부터 2007 년도까지 집중적으로 연구되었는데, 수직으로 관을 설치하는 것이 태양광을 최대로 이용하기 어렵다는 단점이 있지만, 유리관이나 합성수지관(plastic bag column) 등은 가격이 저렴하고 제작이 간편하여 많은 연구가 진행되었다.^{27,28}

공기부양(air-lift)효과를 수반하는 버블칼럼(bubble column) 광생물반응기형태로 개발되고 있으며, 대체적으로 관형 광생물반응기와 마찬가지로 대형으로 제작 시 자연광의 채광성이 떨어진다는

근본적인 단점을 지니고 있다.^{29,30} 버블컬럼 광생물반응기의 경우, 내부교반 및 채광성을 보완하기 위하여 드래프트 튜브(draft tube)를 광생물반응기내부에 삽입하거나, 광생물반응기 실린더 자체가 공간적으로 분리된 분리형 공기부양 광생물반응기(split type air-lift PBR)에 대한 분석연구가 최근 소개되고 있으며 수직원추형의 형식을 Fig. 4 에 도시하였다.(미국,스페인,뉴질랜드 등)³¹

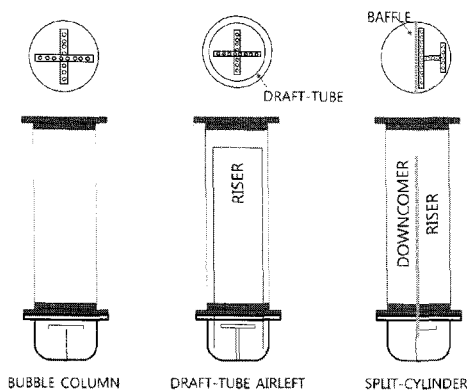


Fig. 4 Schematic of the vertical columns type PBR (adapted from reference 31)³¹

3.2.3 판형 광생물반응기

평판형 광생물반응기(flat-plate type, FP PBR)는 1953 년 Milner 에 의하여 개발된 이래, 최근에 가장 일반적인 형태로 자리 잡고 있는 광생물반응기의 형태이다. 고농도 배양을 위한 광생물반응기는 반드시 단위 체적당 표면적(S/V ratio)비가 높아야 하는데, 이를 높이는 가장 쉽고 간단한 방법은 판형이며, 이런 점에서 판형 광생물반응기의 개발이 가장 활발히 이루어지고 있다. 보편적으로, 옥외배양용 판형 광생물반응기는 수직 원주형 광생물반응기의 단점을 개선하기 위하여, 보다 많은 빛을 흡수할 수 있는 각도로 판을 태양광 쪽으로 기울여 설치한다.³²⁻³⁴

1985 년에는 캐나다의 Samsom 과 Leduy 에 의하여 채광개선을 위한 형광램프 장착형 판형 광생물반응기가 개발되었으며, 이후 프랑스의 Ramos 와 Roux 는 두꺼운 투명 PVC 재질을 사용한 옥외형 광생물반응기를 개발하였다. 최근에는 이러한 연구가 기반이 되어 채광효율을 개선하기 위한 투명 재료를 사용하는 것이 일반화 되어 있다. Fig. 5 에 일반적인 형태를 도시하였다.

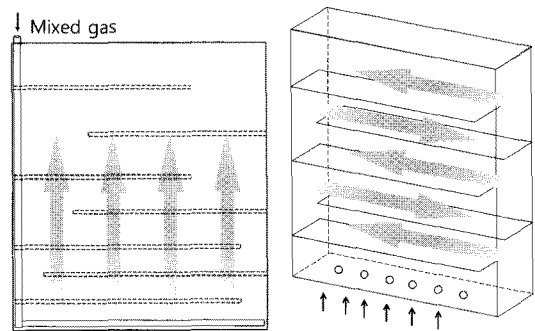


Fig. 5 Schematic of the flat-plate type PBR (adapted from reference 35)³⁵

최근에는 독특한 명칭의 판형 광생물반응기가 개발되는 추세로, 예를 들면, 판형(flat plate), 공기부양식 판형 반응기(flat plate air-lift reactor, FPALR), 수직 기포 판형(vertical alveolar panel, VAP), 경사식 판형(flat inclined module photobioreactor, FIMP), 판형과 수로의 융합형 등의 판형 광생물반응기가 소개되고 있으나 근본적으로는 모두 빛의 제한을 극복하기 위하여 배양액의 깊이를 얇게, 즉, 배양액의 모든 부피에 빛이 도달할 수 있도록 빛이 투과하는 방향의 길이를 가능한 짧게 설계한 것이다. 다만 반응기 내부 조류 증착면 자연성장, 균일한 정밀 온도제어의 어려움, 기포제어 등 몇몇 애로사항이 해결되어야 할 과제로 남아 있다.

3.2.4 내부조명형 광생물반응기

판형 광생물반응기에서도 언급하였듯이 채광조건을 개선(흐린날씨 또는 밤)하기 위하여 챔버 내부에 인공램프를 장착한 형태의 내부조명형 광생물반응기(internally-illuminated photobioreactor)가 일본에서 개발되고 있다. 판형의 경우에는 대체적으로 교반효과를 최대화 하기 위하여 내부에 임펠러를 장착한 형태가 주를 이루며, 공기 및 CO₂ 의 주입은 스파저(aparger)를 통하여 이루어지는 구조이며 Fig. 6 은 내부조명형 광생물반응기의 한 형태를 도시하였다.

이러한 구조의 광생물반응기는 일정한 압력하에서 발생하는 열에 의하여 열균효과를 기대할 수 있으나, 옥외형으로 구성하기에는 다소 기술적 문제가 뒤따른다는 단점을 지니고 있다.^{37,38}

전 세계적으로 개발된 대표적 광생물반응기에 대한 상호비교는 Table 3 과 같다.³⁹

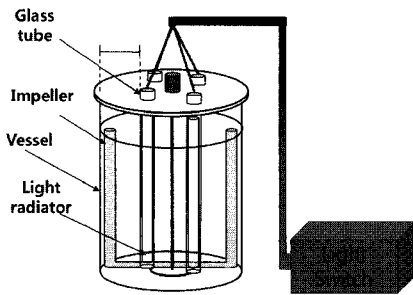


Fig. 6 Schematic of the Internally-illuminated type PBR (adapted from reference 36)³⁶

Table 3 Characteristics of photobioreactors (adapted from references 11, 39)^{11,39}

System	Raceway ponds	Tubular PBR	Flat panel airlift PBR
Light efficiency	Fairly good	Excellent	Excellent
Temperature control	None	Excellent	Excellent
Gas transfer	Poor	Low-high	Low-high
Oxygen accumulation	Low	High	Low
Biomass concentration	Low	High	High
Sterility	Low	High	High
Cost to scale-up	Low	High	High
Volumetric productivity	Low	High	High
Energy demand per kg biomass produced	High	High	Low

4. 광생물반응기 개발 방향

바이오에너지의 생산을 목적으로 대량의 바이오매스를 확보하기 위해서는 이산화탄소 고정화 능력이 우수하고 생산성이 높은 미세조류에 대한 연구와 대형화(scale-up) 광생물반응기의 연구가 병행되어야 할 것으로 사료된다.

특히, 우리나라의 경우처럼 한정된 공간과 기

은 및 강우량의 편차가 큰 환경조건에서 미세조류의 고농도 배양을 위해서는 개방형 반응기에 비해 초기 투자비용과 운전비용이 상대적으로 높은 단점을 가지고 있으나, 높은 미세조류의 성장속도와 편리한 운전조건 제어, 그리고 대형화에 적합한 밀폐형 광생물반응기가 경쟁력이 있을 것으로 판단된다.

밀폐형 광생물반응기의 비교분석결과를 살펴보면 광생물반응기로 투입되는 에너지의 양, 제작구성비용, 생산성 및 가스교환 효과 등을 고려할 때, 광 이용 효율이 높고, 온도, 가스, 오염 제어가 비교적 쉬운 평판형 광생물반응기의 개발이 필요하다고 사료된다.

미세조류의 고농도배양을 위한 중요한 인자는 빛, 기체전달, 배지의 공급 등이나 고농도화를 위해서는 필연적으로 빛의 효율적인 전달이 필요하다. 이를 위해 태양광을 이용한 집광시스템이나 광섬유등을 이용하는 방법, LED 조명을 이용하는 방법등과 같은 광원에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

현재까지 개발되어있는 광생물반응기 중 판형 광생물반응기는 효과적인 멸균이 가능하고, 기체전달이 용이하며, 구조가 간단하여 쉽게 어느 곳에서든 설치가 가능하다는 장점을 가지고 있어, 고효율 평판형 공기부양식 광생물반응기와 같이 응용 및 변형에 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

5. 결론

광합성 플랑크톤인 미세조류는 광합성의 과정에서 이산화탄소를 고정화하여 바이오매스를 생산함으로써 지구온난화 방지 및 재생에너지 생산의 이중효과를 낼 수 있는 환경친화적인 에너지원이다. 본 리뷰를 통하여 바이오에너지 생산을 위한 국내외 기술개발현황에 대하여 고찰하였고 여러 가지 다양한 광생물 반응기를 소개하였다.

미세조류를 이용한 바이오디젤등의 바이오에너지를 생산하기 위한 대량의 바이오매스 확보를 위해서는 태양광 집광시스템이나 LED 조명을 적용한 대형화 고효율의 평판형 공기부양식 광생물반응기가 최적으로 판단되며, 기계-광기술-생명공학분야 등의 학제간 융합연구를 통한 시스템 설계, 제작, 실험 및 평가에 대한 연구가 진행된다면 단기간에 원천기술을 확보할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2010 년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다. (No. 20103020090020)

참고문헌

- Sebastian, O. and Hermann, E. O., "The Kyoto Protocol : International Climate Policy for the 21st Century," Springer-Verlag, pp. 1-136, 1999.
- Pimentel, D. and Patzek, T. W., "Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; Biodiesel production using soybean and sunflower," Natural Resources Research, Vol. 14, No. 1, pp. 65-76, 2005.
- Kurano, N., Ikemoto, H., Miyashita, H., Hasegawa, T., Hata, H. and Miyachi, S., "Fixation and Utilization of Carbon Dioxide by Microalgal Photosynthesis," Energy Convers. Mgmt., Vol. 36, No. 6-9, pp. 689-692, 1995.
- Sung, K. D., Lee, J. S., Shin, C. S., Park, S. C. and Choi, M. J., "CO₂ fixation by *Chlorella* sp. KR-1 and its cultural characteristics," Biosource Technology, Vol. 68, No. 3, pp. 269-273, 1999.
- Goldman, J. C., "Outdoor algal mass cultures -II. Photosynthetic yield Limitations," Water Research, Vol. 13, No. 2, pp. 119-136, 1979.
- Pulz, O., "Photobioreactors : production systems for phototrophic microorganisms," Appl. Microbiol. Biotechnol., Vol. 57, No. 3, pp. 287-293, 2001.
- Oh, H. M., Choi, A. and Mheen, T. I., "High-Value Materials from Microalgae," Kor. J. Microbiol. Biotechnol., Vol. 31, No. 2, pp. 95-102, 2003.
- Oh, H. M., "Development of Photosynthetic Microorganism for the Production of Higher-value Carotenoid Using Carbon Dioxide," Ministry of Education, Science & Technology, Carbon Dioxide Reduction & Sequestration R&D Program, 2008.
- Liu, Z. Y., Wang, G. G. and Zhou, B. C., "Effect of iron on growth and lipid accumulation in *Chlorella vulgaris*," Bioresource Technology, Vol. 99, No. 11, pp. 4717-4722, 2008.
- Jeon, S. M., Kim, I. H., Ha, J. M. and Lee, J. H., "Overview of Technology for Fixation of carbon Dioxide Using Microalgae," J. Korean Ind. Eng. Chem., Vol. 19, No. 2, pp. 145-150, 2008.
- Becker, E. W., "Microalgae: Biotechnology and Microbiology by E.W.Becker," Cambridge University Press, pp. 63-171, 1994.
- Dayananda, C., Sarada, R., Usha Rani, M., Shamala, T. R. and Ravishankar, G. A., "Autotrophic cultivation of *Botryococcus braunii* for the production of hydrocarbons and exopolysaccharides in various media," Biomass & Bioenergy, Vol. 31, No. 1, pp. 87-93, 2007.
- Benemann, J. R., "A technology roadmap greenhouse gas abatement with microalgae," Report to the U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory, and the International Energy Agency Greenhouse Gas Abatement Program, 2003.
- Oswald, W. J., "Large scale algal culture systems (engineering aspects): in Borowitzka, M. A. and Borowitzka, L. J. (Eds.), Micro-algal Biotechnology," Cambridge University Press, pp. 357-410, 1988.
- Pushparaj, B., Pelosi, E., Tredici, M. R., Pinzani, E. and Materassi, R., "An integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria," J. Applied Phycology, Vol. 9, No. 2, pp. 113-119, 1997.
- Chaumont, D., "Biotechnology of algal biomass production: a review of system for outdoor mass culture," J. Applied Phycology, Vol. 5, No. 6, pp. 593-604, 1993.
- <http://biofuels2010.blogspot.com/2010/11/mit-algae-photobioreactor.html>
- Borowitzka, M. A., "Closed algal photobioreactors : design considerations for large-scale systems," Journal of Marine Biotechnology, Vol. 4, No. 4, pp. 185-191, 1996.
- Carvalho, A. P., Meireles, L. A. and Malcata, F. X., "Microalgal Reactors: A Review of Enclosed System Designs and Performances," Biotechnol. Prog., Vol. 22, No. 6, pp. 1490-1506, 2006.
- Tredici, M. R. and Materassi, R., "From open ponds to vertical alveolar panels: the Italian experience in the development of reactors for the mass cultivation of phototrophic microorganisms," J. Applied Phycology, Vol. 4, No. 3, pp. 221-31, 1992.
- Lee, Y. K., "Enclosed bioreactors for the mass cultivation of photosynthetic microorganisms: the

- future trend," *Trends in Biotechnology*, Vol. 4, No. 7, pp. 186-1899, 1986.
22. Zhang, K., Miyachi, S. and Kurano, N., "Evaluation of a vertical flat-plate photobioreactor for outdoor biomass production and carbon dioxide bio-fixation: effects of reactor dimensions, irradiation and cell concentration on the biomass productivity and irradiation utilization efficiency," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, Vol. 55, No. 4, pp. 428-433, 2001.
 23. Tredici, M. R., Cariozzi, P., Zittelli G. C. and Materassi, R., "A vertical alveolar panel(VAP) for outdoor mass cultivation of microalgae and cyanobacteria," *Bioresource Technology*, Vol. 38, No. 2-3, pp. 153-159, 1991.
 24. Berzin, I., "Photobioreactor and process for biomass production and mitigation of pollutants in flue gases," United States Patent Application Publication No. US2005/0260553A1, 2005.
 25. Contreras, A., Garcia, F., Molina, E. and Merchuk, J. C., "Interaction between CO₂-mass transfer, light availability, and hydrodynamic stress in the growth of *phaeodactylum tricornutum* in a concentric tube airlift photobioreactor," *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 60, No. 3, pp. 317-325, 1998.
 26. Lee, Y. K., Ding, S. Y., Low, C. S. and Chang, Y. C., "Design and performance of an α -type tubular photobioreactor for mass cultivation of microalgae," *J Applid Phycology*, Vol. 7, No. 1, pp. 47-51, 1995.
 27. Martinez-Jeronimo, F. and Espinosa-Chavez, F., "A laboratory-scale system for mass culture of freshwater microalgae in polyethylene bags," *J. Appl. Phcol.*, Vol. 6, No. 4, pp. 423-425, 1994.
 28. Tredici, M. and Rodolfi, L., "Reactor for industrial culture of photosynthetic micro-organisms," WIPO Patent Application WO 2004/074423 A2, 2004.
 29. Chalmers, J. J., "Cells and bubbles in sparged bioreactors," *Cytotechnology*, Vol. 15, No. 1-3, pp. 311-320, 1994.
 30. Miyamoto, K., Wable, O. and Benemann, J. R., "Vertical tubular reactor for microalgae cultivation," *Biotechnology Letters*, Vol. 10, No. 10, pp. 703-708, 1988.
 31. Miron, A. S., Camacho, F. G., Gomez, A. C., Grima, E. M. and Chisti, Y., "Bubble-column and airlift photobioreactors for algal culture," *AIChE Journal*, Vol. 46, No. 9, pp. 1872-1887, 2000.
 32. Tredici, M. R. and Zittelli, G. C., "Efficiency of Sunlight Utilization: Tubular Versus Flat Photobioreactors," *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 57, No. 2, pp. 187-197, 1998.
 33. Qiang, H. and Richmond, A., "Productivity and photosynthetic efficiency of *spirulina platensis* as affected by light intensity, algal density and rate of mixing in a flat plate Photobioreactor," *J. Applied Phycology*, Vol. 8, No. 2, pp. 139-45, 1996.
 34. El-Shishtawy, R. M. A., Kawasaki, S. and Morimoto, M., "Cylindrical-4Type Induced and Diffused photobioreactor. A Novel Photoreactor for Large-Scale H₂ Production: in Zaborsky, O. R. (Ed.), *Biohydrogen*," Plenum Press, pp. 353-358, 1998.
 35. Jörg, D., Andrea, U., Axel, R., Ulrike, S. and Walter, T., "A novel airlift photobioreactor with baffles for improved light utilization through the flashing light effect," *Journal of Biotechnology*, Vol. 92, No. 2, pp. 89-94, 2001.
 36. Ugwu, C. U., Aoyagi, H. and Uchiyama, H., "Photobioreactors for mass cultivation of algae," *Bioresource Technology*, Vol. 99, No. 10, pp. 4021-4028, 2008.
 37. Fouchard, S., Pruvost, J. and Legrand, J., "Investigation of H₂ production by microalgae in a fully-controlled Photobioreactor," *J. Hydrogen Energy*, Vol. 16, pp. 13-16, 2006.
 38. Rodolfi, L., Zittelli, G. C., Bassi, N., Padovani, G., Biondi, N. and Tredici, M. R., "Microalgae for oil: strain selection, induction of lipid synthesis and outdoor mass cultivation in a low-cost Photobioreactor," *Biotechnol. Bioeng.*, Vol. 102, No. 1, pp. 100-112, 2009.
 39. Ogbonna, J., Soejima, T. and Tanaka, H., "Development of Efficient Large-scale Photobioreactors," Plenum Press, pp. 329-343, 1998.
 40. Spolaore, P., Joannis-Cassan, C., Duran, E. and Isambert, A., "Commercial Applications of Microalgae," *J. Biosci. Bioeng.*, Vol. 101, No. 2, pp. 87-96, 2006.