Article

미세조류 바이오연료 상용화를 위한 주요 인자 연구

강도형^{1*} · 허수진¹ · 오철홍¹ · 주세종² · 전선미¹ · 최현우³ · 노재훈⁴ · 박세현⁵ · 김태영⁶

¹한국해양과학기술원 해외생물자원연구센터

²한국해양과학기술원 심해저자원연구부

³한국해양과학기술원 해양과학데이터센터

⁴한국해양과학기술원 해양생태계연구부

⁵한국해양과학기술원 경제분석실

⁶한국해양과학기술원 해양 R&D실용화센터

(426-744) 경기도 안산시 상록구 해안로 787

A Review on Major Factors for Microalgae Biofuel Commercialization

Do-Hyung Kang^{1*}, Soo-Jin Heo¹, Chulhong Oh¹, Se-Jong Ju², Seon-Mi Jeon¹, Hyun-Woo Choi³,
Jae Hoon Noh⁴, Se Hun Park⁵, and Tae-Young Kim⁶

¹Global Bioresources Research Center, KIOST

²Deep-sea and Seabed Resources Research Division, KIOST

³Oceanographic Data & Information Center, KIOST

⁴Marine Ecosystem Research Division, KIOST

⁵Economics Assessment Section, KIOST

⁶Center for Promoting Utilization of R&D Results, KIOST

Ansan 426-744, Korea

Abstract : Microalgae are photosynthetic microorganisms that are highly productive in the presence of basic renewable natural sources (light, CO₂, water and nutrients). They can synthesize lipids, carbohydrates and proteins in a small number of days. Subsequently, these carbon-captured products can be processed into both biofuels and valuable co-products. Additionally, microalgae would be an ideal feedstock for replacing land-based food crops with cellular products as high energy density transportation fuels. These microscopic organisms could contribute a significant amount of renewable energy on a global scale. In Korea, microalgae biofuel research was common in the early 1990s. The research activities were unfortunately stopped due to limited governmental funds and low petroleum prices. Interest in algal biofuels in Korea has been growing recently due to an increased concern over oil prices, energy security, greenhouse gas emissions, and the potential for other biofuel feedstock to compete for limited agricultural resources. The high productivity of microalgae suggests that much of the Korean transportation fuel requirements can be met by biofuels at a production cost competitive with the increasing cost of petroleum seen in early 2008. At this time, the development of microalgal biomass production technology remains in its infancy. This study reviewed microalgae culture systems and biomass production, harvesting, oil extraction, conversion, and technoeconomical bottlenecks. Many technical and economic barriers to using microalgal biofuels need to be overcome before mass production of microalgal-derived fuel substitutes is possible. However, serious efforts to overcome these barriers could become a large-scale commercial reality. Overall, this study provides a brief overview of the past few decades of global microalgal research.

Key words : microalgae, lipids, microalgal-derived biofuels, carbon neutral fuels, high energy density, Republic of Korea

*Corresponding author. E-mail : dohkang@kiost.ac

1. 서 론

가용한 화석연료의 매장량은 한정되어 있는데 전세계 각국의 원유 수급량은 상대적으로 증가하고 있다. 그 중 우리나라 원유 공급량의 구조는 2009년과 2010년 기준으로 전체 에너지 소비의 96.5%를 수입하고, 이 중 81.8%를 중동국가에 의존하고 있다. 또한 우리나라 GDP 생산에 투입되는 석유의 양을 나타내는 단위인 에너지 원단위는 0.24를 기록하여 OECD의 평균 에너지 원단위인 0.13보다 높다(이 2011). 원유 전량을 수입하는 우리나라뿐만 아니라 미국의 경우도 60% 이상을 수입에 의존하고 있는 실정이며 이중 60%를 수송용 연료를 위해 사용하고 있다. 저개발국이나 개발도상국의 높은 에너지 의존도 또한 전세계 에너지 시장을 집중적인 경쟁관계 구조로 몰아가고 있는 실정이다. 최근 들어서는 화석연료의 사용이 온실가스(global greenhouse gas, GHG) 축적 및 심각한 기후환경변화로 증폭되어 세계 경제활동 및 인류가 해결해야 할 당면 문제로 나타나고 있는 실정이다. 이러한 문제점들을 해결해 나가고자 2007년 미국 부시행정부에서 실천계획으로 에너지독립 및 안보 실천(Energy Independence and Security Act, EISA)에 관한 법안이 만들어져 운영되고 있다. 이를 통해 강력한 신재생에너지의무할당제도(Renewable Portfolio Standard, RPS)와 신재생에너지의 무혼합제도(Renewable Fuels Standard, RFS)를 이끌어 냈다. 미국에서 발의된 RFS는 2022년까지 36억 갤런(1갤런=3.79리터)의 바이오연료 생산을 목표로 두고 있으며, 21억

갤런은 옥수수 바이오에탄올보다 기술·경제적으로 향상된 바이오연료를 생산하는 것이다. 옥수수 및 초본류와 같은 1, 2세대 육상식물 기반의 셀룰로오스계 바이오에탄올은 EISA의 목표달성에 중요한 역할을 한다. 더불어 EISA의 법안은 1, 2세대보다 진보적인 미세조류 바이오연료와 같은 3세대 바이오연료를 활용하여 RFS 세부목표인 21억 갤런의 바이오연료 생산 목표를 달성할 수 있도록 매우 특별한 역할과 비전을 보장하고 있다. 이는 국제적인 사안이 되어 우리나라에서도 2012년부터 RFS를 적용받게 되어 있으며, 2030년까지 신재생에너지 사용량을 11%까지 확대 사용할 수 있도록 계획되어 있다. 그러나 현재까지 우리나라의 연구개발 수준 및 신재생에너지 상용화 수준이 낮은 이유로 국가적 목표 달성에 매우 어려운 목표임에 틀림이 없다.

최근 전세계적으로 이러한 목표들을 달성하기 위해 가장 부각되고 있는 대체에너지원으로는 단연 조류(藻類, algae)를 이용한 제 3세대 바이오연료 생산이다. 조류는 대형해조류(macroalgae)와 미세조류(microalgae)로 크게 나뉘는데 이 중에서도 미세조류가 합성한 지질 성분이 에너지 자립국의 목표를 실현하고자 하는 국가들의 주요한 원료로 평가 받고 있는 현실에 주목해야 한다. 미세조류 재생가능에너지의 생산 개념은 태양에너지, 물, 이산화탄소를 이용한 광합성이 화학에너지로 전환되는 아주 단순한 생물 기작을 기본으로 한다. 그러므로 미세조류 유래 재생가능에너지는 현재 우리가 쓰고 있는 화석연료와는 원료 측면에서는 동일하다고 할 수 있으나, 시간적 생산

Fig. 1. Concept of a sustainable strategy for microalgae biofuel using a photosynthetic short-term scale, compared to fossil fuels

개념에서는 매우 상이하다(Fig. 1). 화석연료의 기원(fossilized organic deliverives) 중 원유는 바다의 1차 생산자인 플랑크톤과 같은 유기물의 사체가 천만 년에서 수억 년 동안 퇴적되고 층을 형성하여 고압고온에 의해 탄화수소(hydrocarbons)로 변성되어 생성된다. 지구 화석연료의 대부분은 특정한 시기에만 생성된 것으로 보이며, 특히 원유는 지질학적인 시간 개념으로 본다면 약 1억5천만 년 전, 1억 년 전 그리고 2천만 년 전 등 세 번의 기간에 생성되었다. 이러한 한정된 원유자원의 매장량은 미국의 지구물리학자 Dr. Marion King Hubbert의 주장에 의해 ‘유전 채굴 시작 후 약 35년이 지나면 생산량이 정점에 이른다’는 ‘Hubbert’s Peak Oil’ 예측 이론에 의해 원유 매장량은 줄곧 감소할 것으로 보고 있다(Deffeyes 2001). 최근 The Association for the Study of Peak Oil (ASPO) and Gas International이나 미국지질연구소 등에서는 전세계적으로 원유 매장지의 대규모 발견시기가 1973-74년 또는 1980년대 초라는 점을 고려하여 35년 후인 현재 우리가 살아가는 시기(2007-2020년)에 석유공급이 정점에 이르고, 이 후 상대적인 생산량이 절대적으로 감소할 것으로 예상하고 있다. 원유의 정유과정을 통해 얻는 물질들은 식품분야를 제외하고는 대부분의 산업 분야에 적용되고 있다. 그러므로 석유기반 사회를 유지하면서 원유를 대체할 수 있는 혁신적인 대체원료(alternative resources) 또는 재생가능원료(renewable resources)를 확보할 수 있을까? 라는 질문은 미래가 아닌 현실이 되어 버린 것이다. 그 중심에 미세조류 바이오연료의 전략이 있다.

미세조류가 전세계 수많은 연구자들과 기업들로부터 차세대 바이오연료의 원료로 주목받고 있는 이유로는 다음과 같다: 1) 단위면적당 고생산성, 2) 비식량 바이오매스 자원, 3) 비경작지 및 유허공간 이용 가능, 4) 다양한 수자원 활용 가능(담수, 기수, 해수, 각종 폐수 및 하수 등), 5) 탁월한 온실가스 저감 능력, 6) 기존 인프라의 사용으로 사회적 투자비용 저감 및 7) 바이오연료 뿐만 아니라 단백질원 및 색소 형태의 고부가가치 원료 확보 등을 들 수 있다. 또한 단기간 내에 성장하는 미세조류의 특성 때문에 단위면적당 생산량이 높으므로 바이오연료용 육상식물들의 대량재배가 어려운 해안 인접 국가에서도 미세조류를 이용한 연료확보가 가능하다는 점이다. 또한 미세조류 연료의 비용은 시장에 나와 있는 화석연료와 대등하거나 조금 더 높다고 보고되고 있고(Chisti 2008a), 환경적인 측면에서 석유에서 배출되는 황 및 벤젠 등과 같은 오염원을 만들지 않아 청정한 대기환경을 유지할 수 있어 사회적인 건강성을 증진시킬 뿐만 아니라 잠재적인 사회경제적인 비용을 낮출 수 있다. 그러나 미세조류 바이오연료는 연료화 전체 공정의 기본적인 아이디어를 이용해 기존 육상자원을 대체할 수 있는 자원으로 구분되어 미국 등지에서

지난 수십 년간 연구되어오고 있지만 산업화를 위한 경제적인 시스템의 개발은 몇몇 예를 제외하고 상용화되지 못하고 있다. 미세조류 바이오연료는 기존 석유기반 연료의 유의한 양을 대체할 수 있다는 높은 잠재성에도 불구하고 기업화를 위한 많은 요소 기술들은 연구개발 단계 또는 실증화 연구 정도에만 머물고 있다. 따라서 미세조류 기반 바이오연료 연구들이 상용화 규모의 생산성을 이끌어내기 위해서는 보다 체계적이고 획기적인 요소가 있어야 함을 반증한다. 그 중 미세조류 바이오연료는 기존 화석연료와 대비하여 생산단가에 대한 경쟁력을 확보하는 것이 가장 유의한 요소이기도 하다.

그러므로 본 연구에서는 그간 이루어져 왔던 국내외 미세조류 연구 내용들을 정리하여 경제·환경친화적인 모델을 소개하고자 한다. 결론 부분에서는 상용화를 목표로 한 미세조류 바이오연료 생산의 주요한 기술적 장벽들을 확인하고, 향후 극복할 수 있는 방법을 직간접적으로 제시하여 경제·환경친화적인 차세대 연료의 연구개발에 이해를 돕고, 이에 대한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 미세조류 기반 바이오연료의 연구 역사 및 연구개발 현황

미세조류 바이오연료 연구에서 가장 선도적인 미국의 연구개발 노력 중 대표적인 프로그램으로 1978년부터 1996년까지 에너지부(Department of Energy, DoE)에서 주관한 수서생물프로그램(Aquatic Species Program, ASP)을 들 수 있다. Table 1은 이 수서생물프로그램의 연도별 연구개발 목표, 협력 대학, 지역 및 주요 개발 기술 등을 보여주고 있다(Sheehan et al. 1998). 이 프로그램의 가장 중요한 요점은 대규모 재생가능연료를 생산하기 위해서 석탄화력발전소에서 배출되는 CO₂를 사용하고 실외배양을 할 수 있는 높은 지질함량의 미세조류를 선택하는데 있었다. 또한 지질 공급원으로서 미세조류 배양의 가능성을 성공적으로 입증했으며, 각 요소기술들의 중요한 부분을 발전시켰다. 특히 주목할 몇 가지 연구결과들로 수서환경으로부터 3000여 종의 미세조류 중 300종의 대상 미세조류 동정 및 분리와 특성화(Sheehan et al. 1998), 미세조류 세포생리학과 생화학(Roessler 1987, 1988), 유전공학(Roessler 1990; Roessler and Ohlrogge 1993), 일반공학, 바이오매스의 처리 과정, 실외 시연규모의 미세조류 대량배양(Weissman et al. 1989) 등을 들 수 있다. 또한 이 프로그램의 가장 핵심적인 연구내용을 세 가지로 요약해 보면, 첫째 미세조류 지질 축적에 대한 생물학적 메커니즘을 이해하고 이를 최적화하는 것, 둘째 저비용·고효율 대량배양 기술 확립, 셋째 바이오매스로부터 지질을 분리 추출하는 처리공학의 개발이었다. 한편 이 프로그램은 18년의

Table 1. Summary of the Aquatic Species Program in US Department of Energy for approximately 20 years

Year	Lab Studies				Outdoor Culture Studies				
	RG		MRP		TD	RG		MRP	
Pre-1980						Japan		4	
1980	NREL					CA, HI		5	
1981	NREL					CA, HI		5	
1982	NREL					CA, HI		5	
1983	CO, AL, MI	1			a, b	CA, HI		5	
1984	CO, UT	1				CA, HI		5	
1985	CB, NM, CO, UT, FL, HI, NIE, AL	1	2		c, d	CA, HI		5	
1986	AZ, CA, NV, NM, TX, UT	1	2		e	CA, HI, NM	5		6
1987	UT, WA, CO, CA, NV	1	2		f	CA, HI, NM	5		6
1988			2		g	NM			6
1989			2			NM			6
1990			2		h	NM			6
1991				3	i				
1992				3					
1993				3					
1994				3	j				
1995				3					
1996									

RG: Research group; MRP: Main research purpose; TD: Technique Development. *NREL: National Renewable Energy Laboratory; CO: Colorado; AL: Alabama; MI: Michigan; UT: Utah; CB: California Berkley; NM: New Mexico; FL: Florida; HI: Hawaii; NIE: National Institute of Energy; AZ: Arizona; CA: California; NV: Nevada; TX: Texas; WA: Washington. 1: Collection, screening and characterization; 2: Biochemistry and physiology of lipid production; 3: Genetic engineering of algae (a: Artificial saline media; b: Temperature-salinity gradient; c: Nile red lipid screening; d: N-deficiency lipid trigger; e: Si-deficiency lipid trigger; f: Collection of 3,000 algae strains; g: Link between Si-deficiency and ACCase; h: Isolation and characterization of ACCase enzymes; i: Transient expression of foreign genes in algae using protoplasts; j: 1st successful genetic transformation of diatom); 4: Fish aquaculture, algae production in wastewater treatment; 5: <100 m² pond culture studies; 6: 1,000 m² pond culture studies

연구기간 동안 괄목할만한 성과를 이뤘지만, 1995년 연방 예산 감소와 그 당시 원유 1배럴 당 생산 가격인 20달러에 비해 미세조류의 지질 생산단가는 상대적으로 높은 1배럴 당 40-60달러로 추정되는 바람에 이 프로그램은 사실상 중단되었다. 중단된 1998년 이후 미세조류 바이오연료 연구분야의 발전은 거의 이루어지지 않았다. 우리나라에서는 Pak et al. (1993)이 실외배양된 *Dunaliella salina* 1650가 생산하는 그린디젤인 hydrocarbon을 처음 연구하기 시작하였으나, 미국과 동일한 이유로 연구가 지속되지 못했다.

그러나 최근 몇 년 사이에 미세조류에 대한 관심이 높아짐에 따라, Haag (2007)는 새로운 에너지원의 수급을 바라며 미세조류의 연료화 가능성을 또다시 제기하게 되었다. 미세조류와 관련한 연구들은 현재 우리나라뿐만 아니라 미국, 유럽, 중동, 호주, 뉴질랜드 등 전 세계의 많은 국가에서 미세조류 연구에 대한 연구개발 노력 및 기업들의 상용화 투자 노력들이 2009년부터 유의하게 증가했다(Fig.

2). 이는 국가적 지원에서부터 민간투자자의 지원까지 다양한 방향에서 연구개발비 투자가 이루어지고 있음을 암시하는 것이며, 산학연에 속한 다수의 연구그룹들이 미세조류 바이오연료의 서로 다른 부분들을 연구하고 있다.

우리나라에서는 1990년 초반부터 미세조류와 관련한 수집, 동정 및 배양의 기초조건 설정과 같은 기초적인 연구개발이 시작되었다(Oh and Lee 1990; Hur 1992; Pak et al. 1993). 1990년대 중·후반에 들어 축산폐수 처리를 위한 *Spirulina platensis*의 배양 연구(Ahn et al. 1996), 해양 미세조류인 *Isochrysis galbana*의 성장 및 EPA/DHA 생산에 관한 연구(Oh and Park 1996; Oh et al. 1997), 미세조류를 활용한 이산화탄소의 생물학적 고정 연구(Kim et al. 1997; Oh et al. 1998) 등 미세조류를 활용한 연구의 폭이 다소 넓어졌다. 2000년대 초반에 들어서는 미세조류의 생명공학적인 활용에 연구의 중심이 옮겨가 생화학적인 조성 및 항산화에 관한 연구(Kim et al. 2001), 미세조류의 면역증강 관련 연구(Lee et al. 2003) 및 유용물질에 관한

Fig. 2. Approximate number and age of companies directly involved in producing biofuels from algae (source: Oilgae Estimates, www.oilgae.com)

연구(Oh et al. 2003) 등 1990년대에 비해 활발한 연구가 진행되었다. 이와 관련하여 바이오연료에 관한 연구는 2007년부터 해조류 바이오에탄올 연구가 한국생산기술원과 한국해양연구원(현 한국해양과학기술원)에서 시작되어 해조류 바이오연료의 본격적인 궤도 진입이 이뤄졌다. 이를 계기로 2009년부터는 정부로부터 연구비를 지원받아 미세조류를 활용하는 연구프로그램이 본격적으로 시작되었다. 다만 현재까지 지원되는 국내의 미세조류 바이오연료의 연구개발비는 전체 신재생에너지 분야에서도 미미한 수준이며, 기술혁신을 희망하는 정도의 연구비 지원은 아직 부족한 것이 현실이다. 미국의 미세조류 바이오연료 R&D에 대한 연방 자금 지원은 국방부와 에너지부로 나뉘어져 있다. 국방부에서는 미공군과학연구소의 미세조류 바이오제트 프로그램 등을 들 수 있으며, 미국 에너지부는 2009년부터 미세조류 바이오연료를 대상으로 에너지 효율과 재생에너지, 화석에너지중소기업혁신연구청 등과 같은 구체적인 프로그램들을 운영하고 있다. 미세조류 바이오연료 연구에 대한 관심은 주 차원까지 동참되어 1천만 달러의 연구 기금도 조성되었으며, 지난 수십 년간 미국재생가능에너지연구소, 샌디아국립연구소, 국립에너지기술연구소, 로스알라모스국립연구소, 퍼시픽노스웨스트국립연구소 및 오크리지국립연구소 등을 포함해 많은 미국 국립연구소들에 천문학적 연구비가 배당되어왔다. 미국의 미세조류 바이오연료 상용화를 지원하기 위한 민간투자는 150개 이상의 중소기업들이 미세조류의 바이오연료 상용

화에 참여하기 위해 지난 2년 사이에 주로 설립되었다(Fig. 2). Cleantech Group (<http://cleantech.com>)이 보고한 자료에 따르면, 미세조류 바이오연료 기업들의 연구 자금은 2008년 첫 9개월 사이 약 1억 8천만 달러로 증가했다. 그 중 남세균(cyanobacteria)으로부터 에탄올을 생산(Deng and Coleman 1999)하기 위해서 약 8억 5천만 달러가 투자될 계획이며, 현재 미세조류 기반한 연료 개발을 위해 민간 부문에서 투자한 돈은 10억 달러 이상을 상회할 것으로 추산되고 있다. 따라서 피할 수 없는 현실들을 반영한 선진국 정책의 한 예로 볼 수 있다. 따라서 우리나라도 미세조류 바이오연료 기술시장 선점 및 비산유국으로서 액체연료 생산 기반을 확보하기 위해 연구비 투자를 확대해야 할 것으로 판단된다.

3. 미세조류 유래 지질 합성 및 생산의 장점

Fig. 3은 수십만 종에 이르는 미세조류의 다양성 중 해양 및 담수에서 주로 관찰할 수 있는 종들을 나열한 그림이다. 현미경에서 관찰 가능한 미세조류는 태양에너지와 물을 이용한 광합성을 통해 대기중의 이산화탄소(CO_2)를 흡수하고, 세포 내 생화학적인 합성을 통해 고유의 물질들을 생성하는 기작을 갖는다. 광합성을 통해 생산된 당단(glucose)은 주 에너지원으로 사용되며, 환경에 따라 전분이나 중성지방과 같은 에너지 저장형태로 전환되기도 한다. 이러한 미세조류들은 육상식물들보다 매우 효율적이고 빠르게 바이오매스를 생산할 수 있는 아주 다양한 종류의 광합성식물들로 구성되어 있다. 미세조류는 종에 따라 체내 총지질 함량이 건조중량 당 1-85%로 매우 다양하다(Borowitzka 1988; Chisti 2007; Kang et al. 2010; Spoehr and Milner 1949). 그 중 몇 종들은 체내 지질 함량을 건조중량의 50% 이상 합성할 수 있으며(Chisti 2007; Hu et al. 2008), 이 지질의 많은 부분들은 바이오디젤의 원료인 트리아실글리세롤(triacylglycerols, TAGs)로 생성할 수 있다. 이 TAGs는 트랜스에스테르화 과정을 통해 생산되는 에너지 밀도가 높은 바이오디젤(Schuchardt et al. 1998; Kang et al. 2010), 그린 항공기 연료 및 그린 가솔린(수소화 과정과 촉매 분해반응의 혼합 처리 과정에 의해 생산) 등으로 쉽게 변형될 수 있어서 에너지 원료 소재로 기대를 모으고 있다(National Science Foundation 2007). 특히 이 TAGs 함유량은 질소, 인 등의 영양염 제한조건에서 가장 높게 나타난다. Spoehr and Milner (1949)는 일반적으로 건조중량의 약 5%의 지질 함량을 가지는 *Chlorella pyrenoidosa*를 질소원을 제한하여 배양한 결과, 체내 85%까지 지질 함량이 증가했다고 보고하였다. 이는 지질을 20% 이상 생산하는 미세조류인 경우, 영양염이 제한된 스트레스 조건에서 세포 내 에너지 대사를 전환하여 체내

Fig. 3. Photographs of different microalgal species collected from marine and freshwater systems

저장물질을 TAGs의 형태로 세포 내에 축적하는 기작이라 볼 수 있다. 반면 지질함량이 10% 이하로 적은 몇몇 종들은 영양염 제한 조건에서 성장억제 현상이 발생하므로 저장물질로 TAGs보다는 때때로 다당류를 축적하기도 한다. 지질을 효과적으로 생산하는 미세조류에서 TAGs는 기본적으로 글리세롤에 3개의 포화 또는 불포화지방산으로 구성되어 있으므로 스트레스 조건에서 탄수화물을 세포 내로 축적하는 것보다 훨씬 용이하여 스트레스 조건 후 세포를 다시 재건시키는데 최적의 축적물질이라 볼 수 있다(Roessler 1990). 그 외 세포 내 지질을 합성하기 위한 환경요소로서 수온 및 태양복사량을 들 수 있으며, 이 두 가지 요소들은 지질구성 및 함량 등에 영향을 끼치는 환경요소들이다(Guschina and Harwood 2006; Hu 2004; Hu et al. 2008; Roessler 1990). 일반적으로 높은 태양복사량은 TAGs의 생성에 도움을 주는(Roessler 1990) 반면, 낮은 복사량은 세포벽의 극성지질(polar lipid, e.g. 인지질)의 합성을 구조·기능적으로 촉진한다(Hu et al. 2008). 한편 미세조류의 지질 함량은 다양한 성장 조건들에 따라 양과 질이 달라지게 된다(Chisti 2007). 일반적으로 미세조류 체내에 회수된 탄소는 영양염이 충분하지 못하고 광합성을 위한 태양복사량은 충분할 경우, 단백질 생성량을 줄이고 지방 또는 탄수화물 생성량 증가로의 기작 전환이 이뤄진다. 특히 영양염 제한조건에서는 대체로 40% 이상의 높은 지질 함량을 얻을 수는 있으나, 상대적으로 바이오매스 생산성은 대개 감소하게 된다(Rodolfi et al. 2009). 반면에 영양염을 제한하여도 지질 함량이 증가하지 않는 경우도 있다. 규조류(diatom)의 경우, 상대적으로 높은 로그타입의 지질생산성을 가지고 있어서 영양염을 제한한다 하더라도 지질함량이 급증하지는 않는다(Benemann and Oswald 1996; Shifrin and Chisholm 1981). 또 다른 연구 방향은 유전자조작을 통한 높은 바이오매스와 지질 생산

량을 증산하는 전략이다. 다만 해양 녹조 미세조류인 *Nannochloropsis*는 Kang et al. (2010)의 바이오디젤 전환 연구를 통해 그 가능성을 확인하였으며, Rodolfi et al. (2009)이 제안한 생리기작 조절을 통해서도 옥상작물인 sunflower or rapeseed (1000 L/ha/yr) 및 oil palm (6000 L/ha/yr) (Chisti 2007) 보다 3.5-20배 높은 20-30 ton/ha/yr의 지질 생산량을 가지고 있으므로 단기적 목적을 달성하기 위한 미세조류의 유전자조작은 바이오매스 생산량, 지질 생산량 및 환경문제 등을 고려할 때 적절치 않다. 이 문제를 해결하기 위해서는 많은 국가에서 장기간 연구와 연구비 지원이 따라야 하며, 현재 인식되고 있는 유전자변형생물(genetically modified organisms, GMO)에 대한 사회적, 환경적 제한 등을 해결해야 하는 큰 장벽이 있다는 것도 고려해야 한다. 그러나 미세조류 체내의 광포화(photosaturation) 및 광저해(photoinhibition)와 같은 현상들을 유전공학이나 대사공학적 접근을 통해 풀 수 있다면 생산량을 증가시킬 수 있을 것이며, 이러한 결과로 생산단가를 낮출 수 있을 것이다. 향후 여러 가지 해결해야 할 장애요소들이 있지만 미세조류는 전형적인 옥상작물(palm, soybean and canola etc.)들보다 단위면적 당 훨씬 많은 지질을 생산할 수 있는 가능성이 충분하다(Sanderson 2006; Ledford 2006; Table 2).

현실적으로 전통적인 옥상작물들과 폐식용유/지질들로부터 바이오연료를 생산하는 것으로 수송연료의 수요를 충족시킬 수는 없다(Tyson et al. 2004). Sills (2009)는 2007년 미국 농경지 6360만 에이커에서 생산된 약 30억 갤런의 콩기름(<http://www.soystats.com>)을 모두 바이오연료로 전환한다 할지라도, 약 660억 갤런에 달하는 경유 소모량의 약 4.5%만 대체할 수 있을 것이라고 예측하였다. 이러한 결과를 토대로 동일 면적의 대지를 미세조류 대량 배양에 이용하고, 15%의 중성지질에서 전환된 10 ml/m²/

Table 2. Advantages of microalgal biomass compared with traditional crops and terrestrial plants with regard to yield, greenhouse gas (GHG) reduction and harvesting times in a year (Sanderson 2006, Ledford 2006). BD: Biodiesel, BE: Bioethanol

Biomass	Microalgae	Corn Stover	Elephant grass	Switch grass	Poplar	Soybeans	Sunflowers	Canola
Field Product	BD, BE, Others	BE	BE	BE	BE	BD	BD	BD
Yield (ha/y)	10-12 kL	1.1-2.2 kL	7.3 kL	3.1-7.6 kL	3.7-6.0 kL	0.4 kL	0.73 kL	0.77 kL
GHG Saving (vs. petroleum)	High (>100%)	60-100%	65-70%	37-73%	51-100%	15-78%	15-78%	15-78%
Consider.	Short Doubling time, Land price	Most abundant in agricultural fields	Low agricultural input	High breeding effort should increase yields	Genetic improvement	Carbon release from soil	Genetic improvement	Carbon release from soil
Harvesting Per year	24-36	1-3	1-3	1-3	*	1-3	1-3	1-3

Table 3. Productivity comparisons between soybeans and microalgae (Pienkos and Darzins 2009). LP: Low Productivity, MP: Medium Productivity, HP: High Productivity, TAGs: Triacylglycerols

Productivity	Soybean	Microalgae		
		LP (10 g/m ² /day at 15% TAG)	MP (25 g/m ² /day at 25% TAG)	HP (50 g/m ² /day at 50% TAG)
gal/acre	48	633	2,637	10,549
Total acres (million)	63.6	63.6	25	6.26
gallon/yr (billion)	3	40	66	66
% Petrodiesel	4.5	61	100	100

Fig. 4. Design of the integrated microalgae farming system for the production of several industrial items based on energy and health businesses (modified from Henrikson 2009)

day의 바이오디젤 생산 최저 수율을 적용한다면 그 양은 연간 이용되는 경유의 61%를 대체할 수 있을 뿐만 아니라 동시에(Pienkos and Darzins 2009; Table 3), 바이오매스에서 약 20억 톤의 이산화탄소를 회수(capture)할 수 있을 것으로 보고하였다. 여기에서 사용된 이산화탄소 회수라는 개념은 이산화탄소 격리(sequestration)와 혼동해서는 안 된다. 왜냐하면 미세조류는 이산화탄소를 흡수하여 이를 체내 대사활동 및 재생산을 위한 에너지원 및 저장물질로 사용되기 때문이다. 물론 이를 이용해 바이오연료로 전환해 연소시킬 경우 일반 경유보다 약 80% 가량 적은 이산화탄소를 발생시키기는 하지만 발생된 이산화탄소는 다시 광합성에 의해 체내로 흡수되므로 진정한 재생가능 에너지원으로 볼 수 있다. 또한 바이오매스 생산성 개선, 지질 함량 개선 등과 같은 기술적 발전들은 바이오연료를 생산하는데 필요한 대지의 면적을 현저하게 줄일 수 있는 요소이기도 하다(Table 3). 지질 성분을 제거한 후, 남아

있는 잔여 바이오매스(대부분 탄수화물 및 단백질 등) 역시 기업의 비즈니스 모델에 따라 부가 에너지 생산, 가스 연료, 또는 동물사료 등 더 높은 가치의 부산물들의 생산에 이용될 수도 있을 것이다(Fig. 4). 미세조류 바이오연료들은 옥수수, 사탕수수 및 콩과 같은 육상작물 유래 바이오에탄올 및 바이오디젤보다 지속가능성이 더 높은 것으로 인식되고 있다(Chisti 2008b). 또한 미세조류는 경쟁적인 수요가 없는 담수, 기수, 해수 및 폐수에서도 성장할 수 있고, 농작물 경작에 적합하지 않은 비경작지를 이용해 배양할 수 있으므로 육상작물이 갖는 제한을 뛰어 넘을 수 있다는 전망을 제공하고 있기도 하다(De Fraiture et al. 2008). 미세조류는 바이오매스 1 g 당 약 1.83 g의 이산화탄소를 회수하므로(Chisti 2008a) 에너지 전환이 가능한 식물 연료들과 다른 화석연료 자원들에서 배출되는 이산화탄소를 회수할 수 있는 잠재력을 충분히 갖고 있다. 향후, 미세조류 유래 바이오정제(biorefinery) 기술은 각종

Table 4. Summary of the hidden costs of microalgae (e.g., *Spirulina*) and food (Henrikson 2009). Microalgae culture has no hidden costs, as opposed to growing organic food. Microalgae will improve our healthcare environment and reduce medical costs, as compared to stock and conventional food farming. Ecological cultivation of microalgae will also reduce pollution, soil erosion, water contamination and forest destruction

Hidden Cost	Microalgae Culture	Organic Farming	Agribusiness Crops	Meat/Dairy
Poisons in foods (from production and processing, e.g. herbicides, preservatives, additives, carcinogens)	N	N	Y	Y
Higher medical costs (cancer, heart, organ and degenerative disease)	N	N	Y	Y
Ecological destruction from poor resource management (e.g. greenhouse effect, loss of topsoil, forests and plant/animal species)	N	N	Y	Y
Toxic cleanup costs coming due (by soil/water pollution)	N	N	Y	Y
Global militarization costs (higher taxes)	N	N	Y	Y
Higher debt burden (taxes and interest)	N	N	Y	Y
Exploitation (earth resources and human suffering)	N	N	Y	Y
Overall: Sustainable pathway	Y	Y	N	N

바이오연료(바이오디젤, 그린 디젤 및 그린 가솔린, 상업용 및 군사용 항공 연료, 에탄올 및 메탄올)들을 생산하고 남은 부산물에서도 고부가가치 물질들(단백질, 탄수화물 및 색소류 등)을 생산하기 위한 여러 가지 다른 전환 기술들과 잠재적으로 융합되어야 할 것이다(Fig. 4). 그러나 우리나라에 적용가능한 미세조류 바이오연료의 지속가능성을 보다 정밀하게 확인하기 위해서는 자세한 전과정평가(life cycle assessment, LCA) 및 환경영향 분석 등이 수행되어야 한다(Pienkos and Darzins 2009). 예를 들어 에너지 투입과 생산에 관한 비율(net energy ratio)은 미세조류의 지질 생산량, 단위면적 당 바이오매스 생산성, 수확 및 추출 처리, 수처리 및 영양염 재활용 등과 같은 다양한 매개변수들에 따라 달라지기 때문이다(Chisti 2008a).

현재 및 미래의 바이오연료 생산 전망을 높인 미세조류 균주들은 향후, 각 국가의 미래산업 개발과 사회·경제적 공헌을 위해 상당한 잠재력을 갖고 있다는 점에서 농업혁명 전에 이용되기 시작된 농작물이라고도 비유할 만하다. 또한 유기농을 제외한 일반적인 농작물과 축산물에 비해 직간접적으로 보이지 않는 비용 요소가 없으며, 사회환경적인 이익들을 가지고 있으므로 국가적으로도 대단히 중요한 바이오 원료라 할 수 있다(Table 4). 특히 온실가스 배출, 환경오염, 생태계 파괴, 자원고갈, 식량 군축화 등의 요소에서 지속가능한 자원이라는 것에는 이견이 없다. 위

에서 설명한 내용들은 가까운 미래에 발생할 수 있는 미세조류 혁명(microalgal revolution)을 주도할 가장 기본적인 중요한 개념이므로 이에 따른 미세조류 연료화의 전체 흐름을 파악하는 것은 중요한 부분이다.

4. 미세조류 선정 및 배양조건에 따른 생산방법

미세조류의 성장특성과 세포 내 구성성분은 배양의 형태에 따라 현격하게 달라진다고 보고되고 있다(Chojnacka and Marquez-Rocha 2004). 일반적인 식물플랑크톤(phytoplankton)은 독립영양형(phototrophic)으로 광합성을 하는 1차생산자로 알려져 있다. 다만 미세조류를 산업적인 용도로 이용하기 위하여 다음과 같은 4 종류의 배양형태를 각 종의 특성에 맞춰 사용하기도 하고 혼재하여 사용하기도 한다. 네 가지 형태는 1) 광독립영양형 배양(phototrophic culture), 2) 종속영양형 배양(heterotrophic culture), 3) 혼합영양형 배양(mixotrophic culture), 4) 광·종속영양형 배양(photoheterotrophic culture)으로 구분된다. Table 5는 담수와 해수에서 서식하는 여러 종의 미세조류를 서로 다른 환경에서 배양하여 바이오매스 생산량, 지질 함량 및 일일지질생산량에 관한 최신의 연구를 정리한 표이다.

광독립영양형 배양은 광합성 시 기본적으로는 태양에너지

Table 5. The lipid contents and productivities of freshwater and marine microalgae strains by different types of culture environments (modified from Rodolfi et al. 2009 and Chen et al. 2011)

Microalgae species	Cultivation condition	Carbon source	Biomass productivity (g/L/d)	Lipid content (% of dry wt.)	Lipid productivity (mg/L/d)	Reference
Freshwater strains						
<i>Chlorella emersonii</i> CCAP 211/11N	Phototrophic	CO ₂	0.03-0.05	29.0-63.0	8.1-49.9	Illman et al. (2000)
<i>Chlorella protothecoides</i> CCAP 211/8D	Phototrophic	CO ₂	0.002-0.02	11.0-23.0	0.2-5.4	Illman et al. (2000)
<i>Chlorella sorokiniana</i> UTEX 1230	Phototrophic	CO ₂	0.003-0.005	20.0-22.0	0.6-1.1	Illman et al. (2000)
<i>Botryococcus braunii</i> UTEX 572	Phototrophic	CO ₂	0.03	20.80	5.50	Yoo et al. (2010)
<i>Chlorococcum</i> sp. UMACC 112	Phototrophic	CO ₂	0.28	19.30	53.70	Rodolfi et al. (2009)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Phototrophic	Air	0.06	12.70	7.14	Mandal and Mallick (2009)
<i>Scenedesmus obliquus</i>	Mixotrophic	Glucose	0.10-0.51	6.6-11.8	11.6-58.6	Mandal and Mallick (2009)
<i>Scenedesmus</i> sp. KCTC AG20831	Phototrophic	CO ₂	0.22	9.50	20.70	Yoo et al. (2010)
<i>Scenedesmus</i> sp. DM	Phototrophic	CO ₂	0.26	21.10	53.90	Rodolfi et al. (2009)
<i>Chlorella protothecoides</i>	Heterotrophic	JAH	4.0-4.4	43.0-46.0	1881.3-1840.0	Cheng et al. (2009)
<i>Chlorella protothecoides</i>	Heterotrophic	Glucose	1.7-2.0	43.0-48.7	732.7-932.0	Li et al. (2007)
<i>Chlorella vulgaris</i> #259	Heterotrophic	Glucose and Acetate	0.08-0.15	23.0-36.0	27.0-35.0	Liang et al. (2009)
<i>Chlorella vulgaris</i> #259	Mixotrophic	Glucose and Glycerol	0.09-0.25	21.0-34.0	22.0-54.0	Liang et al. (2009)
<i>Chlorella</i> sp. C-156	Mixotrophic	CO ₂ and Methanol	0.093	18.6	31.45	Choi et al. (2011)
Marine strains						
<i>Chaetoceros calcitrans</i> CS 178	Phototrophic	CO ₂	0.04	39.80	17.60	Rodolfi et al. (2009)
<i>Chaetoceros muelleri</i> F&M-M43	Phototrophic	CO ₂	0.07	33.60	21.80	Rodolfi et al. (2009)
<i>Dunaliella tertiolecta</i> IPIMAR	Phototrophic	Air	0.12	16.70	20.00	Gouveia and Oliveira (2009)
<i>Dunaliella tertiolecta</i> ATCC 30929	Phototrophic	CO ₂	0.10	60.6-67.8	60.6-69.8	Takagi et al. (2006)
<i>Ellipsoidion</i> sp. F&M-M31	Phototrophic	CO ₂	0.17	27.40	47.30	Rodolfi et al. (2009)
<i>Isochrysis</i> sp. (T-ISO) CS 177	Phototrophic	CO ₂	0.17	22.40	37.70	Rodolfi et al. (2009)
<i>Isochrysis</i> sp. F&M-M37	Phototrophic	CO ₂	0.14	27.40	37.80	Rodolfi et al. (2009)
<i>Monodus subterraneus</i> UTEX 151	Phototrophic	CO ₂	0.19	16.10	30.40	Rodolfi et al. (2009)
<i>Nannochloris</i> sp. UTEX LB1999	Phototrophic	CO ₂	0.04-0.35	29.9-40.3	15.6-109.3	Takagi et al. (2000)
<i>Nannochloropsis oculata</i> NCTU-3	Phototrophic	CO ₂	0.37-0.48	22.7-29.7	84.0-142.0	Chiu et al. (2009)
<i>Nannochloropsis</i> sp. F&M-M24	Phototrophic	CO ₂	0.18	30.90	54.80	Rodolfi et al. (2009)
<i>Pavlova lutheri</i> CS 182	Phototrophic	CO ₂	0.14	35.50	50.20	Rodolfi et al. (2009)
<i>Pavlova salina</i> CS 49	Phototrophic	CO ₂	0.16	30.90	49.40	Rodolfi et al. (2009)
<i>Phaeodactylum tricornutum</i> F&M-M40	Phototrophic	CO ₂	0.24	18.70	44.80	Rodolfi et al. (2009)
<i>Porphyridium cruentum</i>	Phototrophic	CO ₂	0.37	9.50	34.80	Rodolfi et al. (2009)
<i>Skeletonema costatum</i> CS 181	Phototrophic	CO ₂	0.08	21.10	17.40	Rodolfi et al. (2009)
<i>Skeletonema</i> sp. CS 252	Phototrophic	CO ₂	0.09	31.80	27.30	Rodolfi et al. (2009)
<i>Spirulina maxima</i> LB 2342	Phototrophic	Air	0.21	4.10	8.60	Gouveia and Oliveira (2009)
<i>Tetraselmis</i> sp. F&M-M34	Phototrophic	CO ₂	0.30	14.70	43.40	Rodolfi et al. (2009)
<i>Thalassiosira pseudonana</i> CS 173	Phototrophic	CO ₂	0.08	20.60	17.40	Rodolfi et al. (2009)

지 및 무기탄소원(inorganic carbon, e.g. CO₂)을 대기 또는 인위적인 방법으로 공급하여 광합성의 원료로 사용하여 세포 내 화학에너지의 형태로 전환하는 방법이다. 이 형태는 현재까지 미세조류를 성장 및 생육시키기 위한 가장 기본적인 배양조건이며(Pak et al. 1993; Gouveia et al. 2009; Gouveia and Oliveira 2009; Illman et al. 2000; Mandal and Mallick 2009; Rodolfi et al. 2009; Yoo et al. 2010), 대형 플랜트 시설에서는 공장이나 발전소에서 배출되는 이산화탄소를 사용할 수 있어서 다른 종에 의한 오염이 상대적으로 낮은 장점이 있는 것으로 보고되고 있다(Mata et al. 2010). 담수종을 대표하는 *Chlorella* spp.인 경우, 바이오매스 생산량의 범위가 0.002-0.28 g/L/d 수준이며 일일지질생산량은 0.20-53.70 mg/L/d 수준으로 각 연구결과 별로 차이가 심했다. Table 5에 표기한 담수종의 바이오매스 생산량과 일일지질생산량간의 상관관계는 최소, 최대값을 구분하여 산정하면 두 그룹 모두 높은 양(+)의 상관관계를 보였다(최소값 $r^2 = 996$, 최대값 $r^2 = 989$). 이는 담수종의 경우에 단위면적당 바이오매스 생산량을 2-3배 증가시키는 기술을 개발하면 일일지질생산량 또한 2-3배 증가시켜 추출할 수 있다는 결과가 된다. 한편 담수종 중 *Chlorococcum* sp. UMACC 112와 *Scenedesmus* sp. DM은 바이오매스 및 지질에 있어서 다른 종에 비해 월등히 높은 생산량을 나타냈으므로 바이오디젤 원료로서 가치가 있는 것으로 생각된다. 물론 Rodolfi et al. (2009)와 Mata et al. (2010) 등이 보고한 바와 같이 질소제한 조건이나 영양염 제한 조건에서 지질 함량이 증가하기도 하지만 원료 자체의 지질 함량이 높으므로 지질 함량 개선 연구를 비롯하여 추가적인 연구를 위한 대상종으로서 가치가 높다. 해양 미세조류의 배양방법은 Table 5에서 보는 바와 같이 광독립영양형이 아주 일반적이다. 해수종의 바이오매스 생산량의 범위가 0.04-0.48 g/L/d 수준이며 일일지질생산량은 8.60-142.0 mg/L/d 수준으로서 담수종에 비해 높은 편이다. 그 중 *Nannochloropsis oculata* NCTU-3는 바이오매스 생산량과 일일지질생산량에 있어서 가장 좋은 평가를 받고 있으며, *Tetraselmis* sp. F&M-M34, *Porphyridium cruentum* 등도 좋은 평가를 받을 수 있을 것이다. *Nannochloris* UTEX LB1999와 *Dunaliella tertiolecta* ACTT 30929의 경우에는 배양시간이 짧은 대신 높은 일일지질생산량을 보이는 것으로 분석되므로 바이오디젤 원료로서 가치가 있는 것으로 판단된다. 한편 해수종의 경우, 바이오매스 생산량과 일일지질생산량은 최소값($r^2 = 299$)과 최대값($r^2 = 506$) 두 그룹에서 모두 양(+)의 상관관계를 가졌으나, 담수종 보다는 낮았다. 이러한 이유로는 종에 따른 이산화탄소 공급, 해수배양 후 건조중량 측정을 위한 여과·세척방법 등에서 담수종보다 어려운 것으로 판단되므로 향후 이러한 방법들의 개선이 필요하다.

종속영양형 배양형태는 광독립형 배양조건이 맞지 않는 미세조류 또는 박테리아처럼 암조건에서 유기탄소원을 공급하여 생산하는 경우에 사용된다. 즉, 미세조류가 태양에너지 없이 에너지와 탄소를 유기탄소원으로부터 공급받는 것을 뜻한다(Chojnacka and Marquez-Rocha 2004; Chen et al. 2011). 유기탄소원의 종류로는 glucose, acetate, glycerol, fructose, sucrose, lactose, galactose, mannose 등의 당당류를 주로 사용하며(Liang et al. 2009), 당 성분 중 단가가 낮은 corn powder hydrolysate 등을 사용하기도 한다(Xu et al. 2006). 이는 높은 광조건을 필요로 하는 밀폐형배양시스템의 배양조건을 극복하는데 쓰이고 있으며, Table 5에서 보는 바와 같이 같은 종류의 *Chlorella protothecoides*를 배양한다 하더라도 종속영양형의 바이오매스와 일일지질생산량은 광독립형의 그것과 비교하여 차이가 현격하다. 그러나 종속영양형 배양형태는 공정 과정상, 초기 투자비용이 높은 발효조(fermentor)를 사용하고 높은 단가의 당당 첨가 배양액 이용 및 오염에 종종 노출되는 단점을 지니고 있어 향후 보완대책에 대한 후속 연구가 반드시 필요하다.

혼합영양형 배양은 미세조류가 광독립형이나 종속영양형 모두 가능할 때 활용하는 형태이다. 특히 이 때 에너지 원으로 광 및 유기탄소원을 사용하며, 탄소원으로 유·무기탄소를 사용한다. 또한 혼합영양 시 미세조류의 호흡에 의해 방출되는 CO₂를 무기탄소원으로 재활용할 수 있는 장점이 있다. 현재까지 혼합영양형 미세조류 배양 및 지질 생산성에 관한 연구를 살펴보면 광독립형이나 종속영양형 보다는 훨씬 미진한 실정이므로(Table 5) 향후, 기초적인 연구가 필요한 배양분야이기도 하다. 최근 우리나라에서도 기초적인 연구가 시작되고 있다(Choi et al. 2011). 이와 더불어 Table 5에서 볼 수 있듯이 몇몇 담수 미세조류 종에 국한되어 배양이 이뤄지고 있으므로, 이 배양법을 이용한 바이오연료 생산에 성공하기 위해서는 혼합영양형 성장 특징을 가진 종의 동정 및 배양기술의 확립이 필요하다.

마지막으로 광·종속영양형 배양 형태는 미세조류가 유기탄소원을 흡수하기 위해서 태양에너지가 필요한 경우를 말한다. 따라서 유·무기탄소원을 단독으로 쓸 수 있는 혼합영양형과 다른 점은 광조건이 있어야만 배양이 가능하다는 점이다. 따라서 광·종속영양형 배양을 위해서는 광조건과 유기탄소원이 동시에 필요한 형태이다(Chojnacka and Marquez-Rocha 2004). 혼합영양형 배양처럼 기초연구 자료가 부족한 실정이다.

5. 미세조류 배양시스템

현재까지 전 세계적으로 미세조류를 산업화로 이용하고

있는 경우는 스피룰리나(*Spirulina* sp.), 헤마토코커스(*Haematococcus* sp.) 및 클로렐라(*Chlorella* sp.) 등이 있으며, 전체 상업적인 건조체 생산량은 약 5천 톤에서 1만 톤 정도의 범위이다. 주로 고부가가치, 식품 보충용 또는 건강보조 제품들의 용도로 생산되고 있으나(Pulz and Gross 2004), 바이오연료 상용화는 현재 진행형이다. 위에서 설명한 상업용 미세조류들은 태양광을 직접 사용할 수 있다는 장점 때문에 대부분 개방형수조시스템(open raceway system, ORS)에서 생산되어 판매되고 있다(Pulz 2001). 물론 상업용 미세조류 생산 시설들은 각 회사의 특성에 맞게 ORS 또는 밀폐형배양시스템(photobioreactor and/or fermentor, PBRF)을 채택하여 운영하고 있다. 이러한 두 시스템은 각각 장·단점들이 있다. PBRF는 설치하는 비용이 훨씬 많이 들지만 실제 상업적 생산 능력은 다른 반응 장치들 보다 높다. 따라서 초기비용 및 운영비용을 저감하기 위한 기술장벽이 있다고 볼 수 있다. ORS는 1950년대에 독일과 일본에서 어류양식을 위한 모델로 처음 개발되었고, 이 후 미국에서 가장 광범위한 노하우를 축적하게 되었다(Richmond 1986). 이 ORS의 크기는 국외의 경우, ha급까지 scale-up되어 있으며 설비 재료로는 콘크리트, 찰흙, 플라스틱 등을 사용하고 있다(Tredici 2004). 단위면적 당 가장 낮은 단가로 운영할 수 있으며(Richmond 1986), 최근의 LCA에 따르면 가장 좋은 에너지효율을 가진 시스템으로 평가되었다(Huesemann and Benemann 2009). ORS는 상대적으로 저가에 설비가 가능하지만 실제 생산 능력은 PBRF에 미치지 못한다. 그러므로 두 시스템 기술들은 바이오연료 측면에서 아직 성숙단계에 있지 않다. 따라서 수년에 걸쳐 대규모 시스템들이 건설되고 운영될 수 있을 때까지 많은 불확실성이 남아 있을 것으로 판단된다. 다만 ORS에서 단위면적당 생산량을 획기적으로 개선시킨다면 전세계 상용화 모델로 가장 적합하다. 상업적으로 성공할 수 있는 ORS 미세조류 배양을 위해서는 환경조건에 알맞은 미세조류들의 개발, 세포 내 높은 원료(지질 또는 당당류 등) 함량, 저비용·고효율 배양액 개발, 배양수 내 기타미생물들의 먹이·공간 경쟁 최소화, 바이오매스의 일일 생산이 가능한 배양 조건 및 시스템 등이 요구된다. 지속적이고 경제적인 미세조류의 배양기술의 위협요소는 동물플랑크톤의 포식압, 저서성 초식동물, 오염종 및 병원균 등의 침입 등을 들 수 있으나, 미세조류의 빠른 성장과 연중 배양 등을 통한 공간 경쟁 우위는 이런 문제들을 간단히 해결할 수 있는 기회를 제공하기도 한다. 또한 배양 정점에서 바이오매스 수확시, 경쟁생물들에 대처할 수 있도록 주기적인 유지 관리를 통해 이러한 생물학적 문제들을 해결할 수 있을 것으로 보인다. 미세조류를 배양하기 위한 ORS는 전체 성장 주기에서 실패 확률을 가진 육상작물들과는 다르게 며칠 주

기로 생산을 재개할 수 있도록 재접종할 수 있는 장점이 있다. 다만 단가측면에서 산업적인 경쟁력을 가지고자 한다면 저비용·고효율 구조의 배양액을 제조할 수 있는 기술이 뒷받침되어야 한다. 이는 현재의 미세조류 바이오연료의 단가 구조를 개선시킬 수 있는 중요한 요소이기 때문이다.

한편 미세조류는 광범위한 환경 조건들에서 번성할 수 있지만, 특정 균주들은 육상작물들보다 더 제한된 기후 조건들을 갖기도 한다. 예를 들어 태양열 복사가 상대적으로 높은 지역에서, 이론적으로 미세조류 생산량 최대치는 건조중량으로 100 g/m²/day 정도로 산정되어 왔다(Schenk et al. 2008). ORS와 PBRF의 생산성 범위는 20-30 g/m²/day (Lee 2001)에 해당되지만, ORS (Sheehan et al. 1998)는 미세조류 대번식 조건(Field et al. 1998)에서 50 g/m²/day에 가까운 최고 생산성도 관찰되었다. 최대 부피 생산성(maximal volumetric productivity)은 ORS보다 밀폐된 PBRF 조건에서 더 높을 수 있는데, 이는 표면-부피 비율(surface-to-volume ratio)이 더 높기 때문이다. 그러나 대규모 수준에서 상대적인 투자비용 및 배양수 부피로 비교한다면 ORS가 밀폐된 PBRF 보다 더 많은 생산 능력을 가지게 된다. 현재까지 ORS 및 PBRF 조건들 모두 수평면 전일사량(Horizontal Solar Radiation)이 제한되어 있기 때문에 바이오매스의 생산은 최대 100 g/m²/day (Schenk et al. 2008)를 초과할 수 없다고 보고되고 있다. 한편 최근 각광받고 있는 light-emitting diodes (LED) 및 광섬유를 이용하여 인위적인 광합성 유도 기술(Katsuda et al. 2006; Wang et al. 2007; Chen et al. 2011)이 완성되어 ORS에서 적용된다면 생산단가를 대폭 낮출 수 있을 것으로 보인다. 그 일례로 실험실 배양에서 광조건을 위해 일반적으로 사용되는 형광등을 LED로 교체하면 40.32 Kw/h에서 20.16 Kw/h로 약 50%의 전기사용량을 절감할 수 있다(Chen et al. 2011). 에너지 투입량과 배양매지에 사용되는 유무기 영양염들의 비용 문제 또한 미세조류 바이오연료 생산을 위한 경제성 확보에 매우 중요한 요소들이다(Chisti 2008a). 따라서 광원을 고도화하는 연구뿐만 아니라 특정 환경에 맞는 종의 개발 및 저비용·고효율 구조의 배양액 개발(Kang et al. 2011) 등이 이뤄진다면 생산량에 대한 이론적 한계를 극복할 수 있을 것으로 판단된다. 중요한 것은 장기적으로 미세조류 바이오연료를 위한 ORS와 PBRF 배양시스템의 장점만을 조합한 새로운 모델을 개발하여 이러한 문제점들을 해결하는 것이며, 이는 배양의 안정성과 더불어 생산단가와도 직결된다. Pushparaj et al. (1997)은 미세조류 배양의 복합시스템을 처음으로 제안했다. 최근에는 Huntley and Redalje (2007)가 *Haematococcus pluvialis*를 이용하여 지질과 astaxanthin의 생산에 적용한 바 있고, Rodolfi et al. (2009)은 미세조

류를 이용한 지질생산 연구에 성공적으로 적용하였다. 이러한 전략을 이용하여 초기배양은 질소원이 충분한 배양액 환경의 PBRF 내에서 시작하고 이 환경에서 성장한 미세조류를 질소가 제한된 배양액 환경의 ORS로 이차 접종하면 공간경쟁 등에서 우위를 차지하게 되어 오염의 영향이 적고 바이오매스와 오일을 증산할 수 있을 것이다.

위에서 살펴본 바와 같이 현재까지 국내외적으로 ORS 및 PBRF 배양시스템을 이용한 연구개발 양상은 건설 자재, 배양수 혼합, 최적 배양 규모, 냉난방, 배양수의 증발, PBRF 내 산소증가 및 이산화탄소 투입과 같은 배양 관련 문제들을 어느 정도 고려한 상태에서 진행되고 있다. 그러나 현재의 배양시스템에 대한 연구의 결과보다 더 자세한 경제적인 비용 산정을 정량화하기 위해서는 정부 및 공공기관에 의한 선투자로 실증 연구진행이 이뤄져야만 산학연 측면에서의 다양한 평가 수행이 가능하다.

6. 미세조류 수확

미세조류 바이오매스 생산과 관련된 다양한 처리 과정들 중에서도 수확과정(harvesting process)은 중요한 경제성 요소이다. 또한 미세조류 수확을 위한 방법은 대량배양시 밀도와 세포 크기뿐만 아니라 배양의 최종산물 등의 전체적인 특성을 고려하여 설계되어야 한다. 더불어 미세조류 수확 비용은 총 생산비의 20-30%를 차지한다고 보고되고 있다(Gudin and Thepenier 1986). 태양광 및 인공광을 이용하여 광합성으로 키운 미세조류 바이오매스의 리터 당 세포의 건조체 농도는 ORS 경우엔 0.5-1.0 g/L의 범위이며, PBRF의 경우엔 약 5-10 g/L의 범위이다(Chisti 2008a). 이 범위의 최대값이라 할지라도 100 g/L 이상 수확량을 가진 박테리아나 이스트 발효에 비하면 여전히 낮은 것이 사실이다. 산술적으로 미세조류 바이오매스 1 g/L 수확량 수준에서, 1 kg의 건조 바이오매스를 회수하기 위해선 배양수 약 1000 L를 처리해야 한다. 설사 그 바이오매스에 50% TAGs를 함유하고 있다 할지라도, 미세조류 지질 1 L를 생산하는데 거의 2000 L의 배양수가 필요하다. 이러한 조건에도 불구하고 미세조류 바이오매스 수확과 관련된 많은 연구들은 낮은 밀도의 미세조류를 수확함에도 가능한 한 최저 비용의 처리과정 옵션들을 이용해 지질을 추출할 수 있는 지점까지 집중하는 것으로 보인다.

Golueke and Oswald (1965)는 여과법, 부상법, 원심분리법, 침전법, 이온교환법 및 초음파 진동법 등과 같은 수확방법 중 원심분리법과 화학적 침전법이 경제성에 가장 부합하는 옵션으로 보았으며, 그 중 원심분리법이 가장 효과적이라고 보고하였다. 현재 가동되고 있는 기능성 미세조류 생산 기업들은 원심분리법을 대량생산용 수확방법(bulk harvesting)으로 주로 이용하고 있으며, 하와

이 *Spirulina* 생산기업인 Cyanotech에서는 조밀응축법(thickening)을 병행하여 에너지 투입 원가를 낮추는 복합 수확과정을 사용하고 있다. 한편 최근의 미세조류 수확방법에 관한 연구결과들을 보면 원심분리법(Grima et al. 2003), 부상법(Chen et al. 1998; Uduman et al. 2010), 응집법(Sukenik and Shelef 1984; Oh et al. 2001; Grima et al. 2003), 여과 및 스크리닝(Wilde et al. 1991), 침전(Brennan and Owende 2010) 및 전기영동기술 접목(Mollah et al. 2004) 등을 들 수 있다. 그러나 현재까지 대량생산을 위한 미세조류 수확 방법 중 원심분리법 보다 경제성 있는 방법은 개발되지 않은 실정이다. 따라서 현재까지는 원심분리법 같은 고에너지 처리과정들은 chlorophyll-a, phycocyanin 및 β -carotene과 같은 기능성 미세조류 유래 고부가가치 제품들의 생산에는 경제성 측면에서 가능하겠지만, 판매가가 낮은 바이오연료의 단독 생산을 위해 미세조류 지질을 추출하기 위해서는 다소 높은 경비가 산출되는 단점이 있다. 미래의 수확기술을 예측했을 때, 미세조류에서 가장 유망하고 낮은 경비로 바이오연료를 생산할 수 있는 방법은 화학적 응집제의 사용 없이 자연적인 중력 조건을 이용한 침전 방법, 탄산칼슘을 함유한 미세조류 세포들의 공동 침전 및 pH가 높은 알칼리수에서 형성되는 자동응집 처리과정 등이 포함될 것으로 보인다고 보고되고 있다(Molina et al. 2003). 일부 경우에는 침전법 대신 미세조류의 부양성(예. 높은 지질 함량)을 이용한 방법 또는 화학적 응집제를 이용한 용존공기 부상법(dissolved air flotation) 등을 이용해서 바이오매스를 응집·부상시키는 방법 등도 수확의 용이성을 확보할 수 있을 것으로 보인다. 이러한 일련의 수확처리 과정을 향상시키기 위해 소량의 화학적 응집제는 사용되는 양에 따라 비용 대비 효율적인 수도 있다. 그럼에도 불구하고 단가 측면에서 비용 대비 효율적인 미세조류 수확 기법들의 개발을 향한 많은 공학적 연구 노력들이 있어야 할 것으로 판단된다.

7. 미세조류 지질 추출 및 바이오연료 생산

미세조류와 유지식물의 차이는 지질 추출을 위해 서로 다른 처리 과정들을 이용한다는 데 있다. 미세조류로부터 지질을 추출하기 위해 이용할 수 있는 가장 가능한 기술은 용매 추출을 통한 기법들과 관련이 깊다. 물론 기계적 추출, 전기 천공법, 초음파 이산화탄소 유체 추출, 초음파 및 도데칸(Hejazi and Wijffels 2004) 등을 이용한 물리적인 미세조류 짜기(microalgae milking) 방법들도 제안되었지만 재활용이 가능한 화학물질로 직접 추출하는 방법이 현재 가용되고 있다. 건조된 미세조류 바이오매스의 처리과정들은 생산과 관련된 에너지 투입으로 인해 경제적이

지 않으므로 건조되지 않은 미세조류 현탁액이나 농축된 미세조류(microalgal wet paste/cake)를 가지고 직접 처리하는 방법들을 선호하기도 한다(Chisti 2008a). 때때로 미세조류 개체군의 변화와 배양환경의 변동으로 발생할 수 있는 중성지질, 인지질 및 당지질 등 전체 지질 함량의 변화로 인해 생산량 산출 등 복잡한 문제들은 여전히 제기될 수 있지만, 미세조류 지질은 일단 추출하고 정제하면 바이오디젤이나 그린디젤로 분리하는 하류처리과정(downstream processing)에 대해서는 현재 상용화중인 처리과정을 도입(Kang et al. 2010)한다면 충분히 이해될 수 있을 것으로 본다. 또한 지질 추출 후 부산물을 이용한 이익 접근 역시 바이오연료 생산을 위한 경제성 확보의 한 부분으로서 유의하게 고려되어야 한다. 미세조류를 이용한 폐수 처리부터 바이오매스 잔사의 또 다른 바이오에너지로의 전환(연소, 가스화, 열분해 및 에탄올 발효 등), 고부가가치 동물사료 제조 및 동물용 영양/면역 보충제, 색소류 정제 등에 이르기까지 상당한 수준의 부산물 이익도 얻을 수 있다(Fig. 4). 미세조류는 기본적으로 증류기로 건조시킨 옥수수 바이오에탄올 부산물보다 더 높은 영양염을 함유하며, 지질을 제거한 바이오매스 잔사의 단백질 함량 또한 높은 미세조류를 사용한다면 동물사료로서도 가치가 높으므로 시장에서 더 높은 가격을 받을 수 있는 조건이 된다.

역사적으로 미세조류 유래 연료 생산에 있어 주요 장점으로 강조해 왔던 점은 육상작물에 비해 자체적으로 많이 함유하고 있는 탄소수 14 이상($>C_{14}$)의 고에너지 구조의 지방산들이다. 물론 미세조류 지질들은 유지식물과 비슷하게 지방산과 트리글리세라이드(triglyceride) 화합물들을 함유하고 있어 기존의 트랜스에스테르화(transesterification) 기술을 이용해 fatty acid methyl ester(FAME, 알코올 에테르 형태)로 전환될 수 있다. 이 트랜스에스테르화 반응에 대해선 잘 알려져 있으며, 바이오매스의 다양한 성분들에 대한 반응과 하류 처리 조건들을 최적화할 수 있는 많은 접근 방법들이 있기도 하다. 한 예로 국내의 바이오디젤 생산은 증류과정을 포함하고 있기 때문에 세계적으로도 그 품질을 인정받을 수 있는 구조이기도 하다. 한편 미세조류 지질들은 촉매 수소화 과정(catalytic hydroprocessing)을 통해 재생 가능 또는 그린 디젤 제품을 생산하는데 이용될 수도 있다. 식물유지들과 폐기용 동물지방도 한정된 정유소들에서 재생연료 처리 과정을 거쳐 바이오디젤로 처리되고 있다. 가솔린, 항공기 연료, 디젤은 그 원재료가 바이오매스 같이 생물학적 원천에서 나온 경우에 '재생 가능(renewable)' 또는 '그린(green)' 에너지로 기술되며, 따라서 근본적으로 모두 원유에서 나온 연료들과 동일한 정량적 분석을 받게 된다. 그러나 석유에서 추출한 연료들의 주요한 특징들 중 하나는 산소 함유량이 거의 없다는 것이

다. 전형적인 바이오연료들인 바이오에탄올과 바이오디젤 등은 원유와 비교 시 산소 함유량이 매우 높다. 그러므로 바이오매스를 이용한 재생 가능한 가솔린, 항공기 연료 및 디젤 연료 제조의 주된 목표는 최종 연료에서 최종 에너지 함량은 극대화하면서 엔진의 부식을 최소화 하기 위한 전략으로 산소 함량은 최소로 하는 방법들도 제안되고 있다.

8. 기술경제학적 분석, 자원 평가 및 시사점

미세조류 기반 연료 생산 기술의 경제학적 분석 및 자원평가는 우선적으로 경제적으로 실현 가능한가에 초점을 맞추고 적극적이며 장기적인 연구 노력이 필수적이다. 다만 미세조류 바이오연료에 대한 전체적인 연구개발 후, 상용화에 대한 자세한 검토는 그 기술에 드는 잠재적 비용의 파악 및 정밀한 조사가 없으면 완성될 수 없다. 미세조류 바이오연료 생산의 경제성은 TAGs 공급을 위한 바이오매스 생산 가격에 의해 크게 좌우된다(Pienkos and Darzins 2009). 이는 미세조류 원료의 생산량이 화석연료인 원유의 양과도 동일 시 할 수 있는 개념이기 때문이다. 물론 다른 요인들도 있긴 하나 TAGs의 가격과 생산량은 대상 미세조류에서 유도된 지질들이 치열한 시장경쟁에서 어떻게 살아 남을 수 있는지 결정하는데 큰 역할을 한다고 볼 수 있다. 앞서서도 살펴보았지만 현재까지 알려진 미세조류 생산 시스템은 ORS, PBRF, ORS+PBRF hybrid 등(Miao and Wu 2005)이 있으며, 시스템의 질적인 향상 연구들을 전세계적으로 수행하고 있다. 그 중 미국재생가능에너지연구소에서 ORS 기술에 초점을 맞추었던 이유는 이 기술이 미세조류 바이오매스를 생산하는데 경제성 측면에서 가장 효과적인 선택이라고 믿었기 때문이다(Sheehan et al. 1998). 물론 이 방법은 미세조류 밀도, 경쟁종 침입 및 증발에 의한 배양수 손실 등과 같은 기초 생산성 문제들을 악화시킨다는 것은 분명한 사실이다. 그럼에도 불구하고 ORS를 효과적인 방법으로 보는 것은 기술경제학적 분석 기반으로 Benemann and Oswald (1996)이 제안한 저비용단가처리(low-capital-cost process) 모델을 이용하고 있는 측면이 있기 때문이다(Sheehan et al. 1998). 이 모델은 저비용의 생산모델을 제시한 것으로서 앞서 설명한 바이오매스의 화학적 응집 유도, ORS 내 미세조류 지속 배양 방법, 고온 조건의 용매로 습식 바이오매스 유래 지질 추출 유도, 이후 3단계 원심분리로 지질, 물 및 부산물로 분리되는 과정이라 요약할 수 있다. Sheehan et al. (1998)의 연구에 따르면 원심분리법에 의한 미세조류 바이오연료 처리는 고비용 구조로 볼 수 있으나, 바이오매스 농축 단계의 배양수를 감소시키면 단가와 운영경비를 수용 가능한 수준까지 낮추게 된다고 제안하

였다. 또한 고온의 용매를 이용한 습식 추출 및 회수법 또한 바이오매스를 건조해야 하는 단계를 제거함으로써 운영 경비를 감소시킬 수 있는 구조라 보고했다. 또한 기존 추출용매의 비용을 최소화하고, 바이오연료 처리 과정으로 직접 보낼 수 있어 공정단계가 줄어든다는 장점도 있다. 원심분리 처리 과정에서 바이오매스 잔사는 또 다른 재생가능에너지를 생산하는데 이용될 수 있어 완벽한 재활용 순환관계를 나타낼 수 있는 구조가 된다(Fig. 4). 이러한 연구는 저비용 처리방법 도입에 대한 하나의 예일 뿐이며, 전세계적으로 아직까지 공개되지 않은 많은 기술들이 산재할 것으로 판단되므로 이러한 저비용 처리방법 개념을 따르자는 것은 이견이 없다고 본다. Pienkos and Darzins (2009)는 저비용 처리방법에 대한 모델에서 운영비, 자본, 토지 부분을 주요 요인으로 산정하여 미세조류 지질(TAGs) 공급 비용을 평가하였다. 총공급비용의 범위는 지질 생산성의 정도에 따른 운영비, 자본, 토지 부분의 비용 증감으로 총비용을 산정했다. 총비용의 범위는 6.6-0.66 USD/L 수준으로 고생산성(50 mg/L/d at 50%-TAGs)인 경우, 미세조류지질 가격은 콩기름 가격과 경쟁할 수 있는 높은 생산성을 가진 것으로 보고했다. 적어도 현재 석유 소매가격(우리나라 2012년 6월 현재, ≈ 1.6 USD/L)과도 경쟁할 수 있는 구도로 생각된다. 일반적으로

석유가 1배럴 당 110달러 이상일 때 바이오연료의 경제성과 경쟁이 가능할 것(Pienkos and Darzins 2009)으로 보고되고 있지만, 현재 비산유국인 우리나라 상황만을 놓고 본다면 잠재적 시장이 벌써 마련됐다고 추정해 볼 수도 있을 것이다. 앞서 Table 5와 4장에서 설명한 바와 같이 미세조류지질의 생산성 증진 및 투입비용에 대한 저감 기술이 실현이 된다면 사회적으로 실현되는 시기는 향후 10-15년 내에 가능할 것이다(Wijffels and Barbosa 2010).

차세대 바이오연료 공급원으로서의 미세조류 기술은 불모지 및 유헴지, 해수, 폐수 및 농작물에 적합하지 않은 자원의 생산적 이용을 가능하게 한다. 집중 관리된 미세조류 생산 시설들은 농작물 또는 육상작물에 비해 단위 면적당 수 배에서 수십 배의 이산화탄소를 회수시킬 수 있는 능력이 있다고 설명하였다. 미세조류의 호흡 및 바이오매스로부터 유도된 바이오연료를 연소시킬 때 여전히 CO₂는 배출되지만, 4장에서 언급한 광독립영양형 혼합영양형 배양 형태의 활용이 가능하다. 특히 미세조류 대량배양과 CO₂를 대량으로 발생시키는 발전소 등을 결합한 복합시스템은 상당한 매력을 지닌다. 왜냐하면 배출되는 CO₂를 이용하여 에너지로 변환시킬 수 있을 뿐만 아니라 CO₂ 배출로 발생되는 에너지를 60%까지 회수할 수 있으므로(Pienkos and Darzins 2009) 있으므로 발전소에서 배

Fig. 5. GIS assessment of the availability of natural resources for large-scale microalgae farms in Korea. (A) Atmospheric clearness index and (B) global solar horizontal irradiation. Data are allocated for two weather factors in 65 coastal and inland zones after implementing spatial interpolation using the average data from 1982 to 2007 collected from 16 weather stations in the Korea Meteorological Administration

출된 배기가스는 대규모 미세조류 배양에 필요한 무기탄소원의 충분한 양을 제공할 잠재력이 있다고 본다. 추가적으로 미세조류 연료 생산을 위해서는 바이오매스에 기반을 둔 모든 요인에 관한 직간접적인 연관성을 자원학적 관점에서 분석할 필요가 있다. 기후, 대지, 수자원과 이산화탄소 등의 자원 이용가능성은 미세조류 바이오연료 개발의 중요한 척도이므로 바이오매스 생산에 요구되는 자원들을 조사할 때 되도록 많은 요소들이 고려돼야 한다. 국내외적으로 대규모 바이오매스 생산에 대한 자원 이용가능성은 예비조사들을 통해 실시되어 왔으며, Fig. 5에 나온 결과는 우리나라 전역의 대기청명도 및 태양광 전일사량을 조사하여 적지선정 시 사용할 수 있는 GIS map이다. 비록 현재까지 16개 기상대의 자료만을 사용하고 있으므로 각 지역이 갖는 적지로서의 잠재력은 모두 표현하지 못하는 것이 사실이다. 좁은 국토이긴 하지만 대지, 이산화탄소, 수자원 등의 자료가 동시에 병합되어 적지로 이용될 수 있는 여러 장소들을 탐색하고 미세조류 대량배양 부지로 최대 잠재력을 가진 지역들을 확인하기 위해서는 관련 정보들을 모두 결합시키기 위한 더 많은 연구가 필요하다(Choi et al. 2010).

미세조류 바이오연료 연구의 필요성은 상기 설명한 광범위한 기술장벽들의 해결뿐만 아니라 동시에 지구상의 대기환경을 좌우하는 일차생산자와 수자원을 사용하는 기술이기 때문에 환경·생태학적 이점들을 지속가능하게 유지할 수 있는 세부 기술들(생산, 추출 및 전환 기술 등)이 함께 발전해야만 기후변화 대응 및 재생가능에너지 사용이라는 현재 및 미래사회의 전략과 함께 할 수 있다. 따라서 기술경제학적인 부분뿐만 아니라 이러한 사회경제학적인 부분들도 고려하고 발전시킬 수 있는 잠재력이 미세조류 바이오연료의 중요성이라 볼 수 있다. 이러한 전략을 이용하여 국가발전의 새로운 성장동력원으로 투자를 원하는 정부에서는 첫째, 연료시장 및 연료정책의 기능 향상을 위한 제도 및 유통에 관한 장벽 제거를 우선해야 하며, 두 번째로는 투자 활성화를 위한 예측가능하고 간결한 구조의 행정/연구/세제 등을 지원해야 한다. 이는 개발된 기술들이 시장으로 빠르게 진입할 수 있는 조치의 가장 중요한 요소이며, 지원 후에는 기술 혁신을 가속화시키기 위한 지속적인 모니터링이 필요하다. 또한 미세조류 바이오연료의 각 분야에서 시장경쟁이 가능한 신속한 기술개발을 이끌어 내기 위해서는 현재보다 더 폭넓은 수요조사와 선정에 따른 연구아이디어 보상 제도 도입, 이 후 연구프로젝트 개발 및 수행 과정에서는 기술 혁신성을 위해 노력한 훌륭한 연구팀에 대한 강력한 연구 보상 또는 장려제 도입 등이 마련되어야 할 것으로 보인다. 이러한 언급은 우리나라 전체 에너지 시스템으로 미세조류 바이오연료 기술들이 빠르게 진입하는 시간의 상대적인 효과를 고

려하여 주장하는 것임을 밝힌다. 화석연료가 약 50여 년 밖에 남지 않았다는 이 시간적인 절망 앞에 비산유국인 우리나라는 기술개발만이 에너지주권을 가지거나 또는 수출할 수 있는 마지막 기회일지도 모르기 때문이다.

9. 향후 연구 초점들

각 장에서 설명하였듯이 미세조류로부터 추출한 지질에 기반을 둔 연료를 생산하기 위해 필요한 모든 요소들은 제시되었다. 미세조류는 대규모 실외 배양지에서 성장 및 수확할 수 있고, 미세조류 지질을 추출하여 바이오디젤이나 다른 운송용 연료들로 전환시킬 수 있다. 따라서 이와 관련된 궁금증은 미세조류 유래 바이오연료를 생산하는 것이 가능한지 여부가 아니라, 미세조류 바이오연료들이 경제적 가치가 있는지, 우리나라 연료 수요에 기여하는데 어느 정도의 도움이 될 만큼 제조할 수 있는가 하는 것이다. 그러나 이 목표를 달성하기 위해서는 주요한 도전과제들이 많이 있다. 미국에서는 이러한 도전과제들을 풀어가 고자 정부 및 민간기업에서 2009년부터 1조원 이상의 연구비를 지원하고 있는 것으로 추정된다. 따라서 우리나라의 미세조류 바이오연료 개발을 위해서는 배양 및 시스템에 관한 기초 및 응용 연구들이 반드시 수반되어야 하며, 이에 대한 정부 및 기업의 대대적인 관심과 지원이 있어야 한다. 이 논문의 분석 결과, 미세조류 생산성은 주요한 생산 비용의 결정 요소이며, 미세조류의 성장물과 지질 생합성에 가장 큰 영향을 미칠 수 있으므로 미세조류 생물학 및 생물공학적인 분야에 대한 많은 연구 노력들이 집중되어야 할 것으로 보인다. 그러나 이러한 연구들은 “실험실 수준-scale-up 과정-플랜트 수준”과 같은 구조로 진행되어야만 실험실 수준에서 거둔 생산성을 실증 규모 배양조건에서 성공시킬 수 있다. 이는 종종 일어나는 실험실과 대규모 배양조건을 동일 선상에서 해석하는 실수를 저지르지 않기 위함이다. 따라서 생물학자와 공정엔지니어들 간에 자료 교환뿐만 아니라 상용화 실증에 대한 자원학적 생산 조건들의 큰 틀에서 미세조류들의 성장에 관심을 기울여야 한다. 이러한 융합적인 구조를 가지는 혁명적인 접근법은 향후, 새로운 산업 개념으로 성공할 수 있을 것이며 토지 및 수자원 종류를 가리지 않는 전천 후 활용도의 기대 속에서 상용화로 가는 길을 보장하기 위해서는 대규모 생산을 시작하기에 앞선 상세한 내용의 LCA와 환경·생태적 영향 분석 작업도 동시에 수행해야 할 것으로 판단된다.

10. 결 론

현재로서는 육상식물 유래 셀룰로오스 기반 바이오매스

가 바이오연료 생산의 선구자라고 할 수 있지만, 지질 생산성이 높고 이산화탄소를 대규모 회수할 수 있는 광합성 미세조류들이 기술적으로는 실용적이고 지속가능하며 매력적인 대안들이다. 미세조류는 육상작물인 sunflower or rapeseed (1000 L/ha/yr) 및 oil palm (6000 L/ha/yr) 보다 3.5-20배 높은 20-30 ton/ha/yr의 지질 생산성을 가지고 있다(Chisti 2007). 그러나 아직까지는 상용화 크기에서 생산되지 못하고 있는 실정이다. 그 원인은 최근 미세조류 대량생산 및 연료화 공정이 저비용 구조에서 가능함에도 불구하고, 아직까지는 기술이 성숙되지 않았기 때문으로 풀이된다. 그렇다면 여전한 의문점은 남아 있다고 볼 수 있다. 이 질문의 핵심은 미세조류 바이오매스의 고생산단가 (5 USD/kg)와 상대적으로 낮은 바이오디젤 생산단가 (0.25 USD/kg)의 차이를 어떻게 연결할 것인가 하는 것이다(Huesemann and Benemann 2009). 이것은 바이오매스 생산 시스템을 연간 수천 톤 수준으로 끌어 올리고, 높은 단위면적당 생산량을 달성해야 해결 가능한 문제이다(Rodolfi et al. 2009). 지난 60년 동안 미세조류 연구에서는 완전히 개방된 ORP에서는 바이오매스 생산량이 100 ton/ha/yr을 상회할 수준이라고 보고하고 있다. 이 생산량에서 최적의 환경을 조성해 준다 할지라도 최대 지질 생산량은 40 ton/ha/yr 수준이다. 물론 육상작물 보다는 생산성이 높은 것은 사실이지만 이런 문제들을 해결하기 위해서는 고생산성을 담보할 수 있는 ORP와 PBRF의 복합 시스템 개발 및 단위시간에 지방합성을 증가시킬 수 있는 생물생리학적 처리 기술 등이 동반되어야 할 것으로 생각된다. 또한 보다 향상된 지질생산성, 오염생물 구제, 재할용이 가능한 해수 및 폐열 이용 등은 장기적인 프로젝트에서만 가능한 연구분야이기도 하다. 그러므로 정부 및 민간 기업의 장기적이고 전폭적인 투자가 따라야만 실질적인 경제성을 부여할 수 있는 연구들이 진행될 것으로 판단된다. 또한 공공적인 성격이 강한 미세조류 바이오연료의 경제성 분석을 위한 방법으로 경제학자나 정책평가자들이 가치추정 시 종종 사용되는 조건부가치추정법(Contingent Valuation Method, 엄 2011)을 이용하고, 보수적 추정 및 합리적인 지불의사표기 가능성의 장점을 갖는 비모수추정법(nonparametric approach)에 의한 지불의사금액(Willingness-To-Pay)을 도출하여 가치를 추정할 수 있다(Hanley and Spash 1993; 표 등 2011). 이러한 방법들은 경제·잠재적 편익에 대한 유용한 정보를 제공할 뿐만 아니라 비용 산출 시 비시장재화의 가치를 추정하는데 매우 중요한 요인으로 작용할 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 이 연구를 요약하여 아래에 제시된 실질적인 자료로 상용화에 접근해야만 사회적으로 실현 가능한 경제성 있는 미세조류 바이오연료 모델을 세울 수 있을 것이다: (1) 생활폐수, 축산폐수 및 배출 CO₂, 및 새로운 배지

개발 등 낮은 단가의 배양액 원료들을 이용하고; (2) 현재 보다 상대적으로 낮은 저비용 구조의 고밀도 배양, 수확, 탈수 및 추출기술이 개발되어야 하며; (3) 바이오연료 뿐만 아니라 고부가가치 부산물 등도 동시에 개발하여야만 경제성, 재생가능성, 탄소중립성 등을 지속가능하게 할 것으로 판단된다.

사 사

이 연구는 한국해양과학기술원(Korea Institute of Ocean Science and Technology, KIOST)의 기본연구사업인 ‘조류를 이용한 바이오에너지 자원화 기술개발(PE98751)’ 과제의 지원과 국토해양부 소관 해양생명공학기술개발 사업의 연구비(PM57210) 지원에 의해 수행되었습니다. 이에 깊은 감사를 표합니다. 또한 KIOST 조류바이오연료연구실(Algae Biofuels Lab.)의 학생 및 연구자들의 도움과 노력에 감사드립니다.

참고문헌

- 이광우 (2011) 막 내린 Easy Energy 시대 에너지 파고 거세진다. LG Business Insight 7(27):2-13
- 엄영숙 (2011) 양분선택형 조건부가치추정법 응답자료의 실증적 쟁점분석. 자원·환경경제 연구 20(1):119-153
- 표희동, 박철형, 추재욱 (2011) 비모수추정법에 의한 부산시가정용수 수질개선에 대한 지불의사액 추정. 한국수자원학회논문집 44(2):125-134
- Ahn JH, Kim SS, Kim TH, Lee JY, Ohh SJ, Lee JH, Lee HY (1996) Optimizing the Process of Cultivating Photosynthetic Microalga, *Spirulina platensis* for Efficiently Treating Swine Wastes. J Korean Ind Microbiol 24:519-524
- Benemann J, Oswald W (1996) Systems and economic analysis of microalgae ponds for conversion of CO₂ to biomass. Pittsburgh Energy Technology Center, Pittsburgh, DE97052880, 214 p
- Borowitzka MA (1988) Fats, oils and hydrocarbons. In: Borowitzka MA, Borowitzka LJ (eds) Micro-algal biotechnology. Cambridge: Cambridge University Press, pp 257-287
- Brennan L, Owende P (2010) Biofuels from microalgae - a review of technologies for production, processing, and extractions of biofuels and co-products. Renew Sust Energ Rev 14:557-577
- Chen YM, Liu JC, Ju YH (1998) Flotation removal of algae from water. Colloid Surface B 12:49-55
- Chen CY, Yeh KL, Aisyah R, Lee DJ, Chang JS (2011) Cultivation, photobioreactor design and harvesting of

- microalgae for biodiesel production: A critical review. *Bioresource Technol* **102**:71-81
- Cheng Y, Zhou WG, Gao CF, Lan K, Gao Y, Wu QY (2009) Biodiesel production from Jerusalem artichoke (*Helianthus Tuberosus* L.) tuber by heterotrophic microalgae *Chlorella protothecoides*. *J Chem Technol Biot* **84**:777-781
- Chisti Y (2008a) Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol* **26**:126-131
- Chisti Y (2008b) Response to Reijnders: Do biofuels from microalgae beat biofuels from terrestrial plants? *Trends Biotechnol* **26**:351-352
- Chisti Y (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnol Adv* **25**:294-306
- Chiu SY, Kao CY, Tsai MT, Ong SC, Chen CH, Lin CS (2009) Lipid accumulation and CO₂ utilization of *Nannochloropsis oculata* in response to CO₂ aeration. *Bioresource Technol* **100**:833-838
- Choi HW, Choi D, Kang DH (2010) Biomass Estimation of *Ulva pertusa* in Korean Coastal Zone through Environmental Similarity Analysis. In: 9th International Marine Biotechnology Conference, Qingdao, China, 8-12 Oct, pp 136
- Choi WY, Oh SH, Seo YC, Kim GB, Kang DH, Lee SY, Jung KH, Cho JS, Ahn JH, Choi GP, Lee HY (2011) Effects of Methanol on Cell Growth and Lipid Production from Mixotrophic Cultivation of *Chlorella* sp. *Biotechnol Bioproc E* **16**:946-955
- Chojnacka K, Marquez-Rocha FJ (2004) Kinetic and stoichiometric relationships of the energy and carbon metabolism in the culture of microalgae. *Bio-Technol* **3**: 21-34
- De Fraiture C, Giordano M, Liao Y (2008) Biofuels and implications for agricultural water use: Blue impacts of green energy. *Water Policy* **10**:67-81
- Deffeyes KS (2001) Hubbert's Peak: The Impending World Oil Shortage. Princeton University Press, 232 p
- Deng MD, Coleman JR (1999) Ethanol synthesis by genetic engineering in cyanobacteria. *Appl Environ Microb* **65**: 523-528
- Field CB, Behrenfeld MJ, Randerson JT, Falkowski PG (1998) Primary production of the biosphere: Integrating terrestrial and oceanic components. *Science* **281**:237-240
- George W Huber (2008) Breaking the chemical and engineering barriers to lignocellulosic biofuels: Next generation hydrocarbon biorefineries. National Science Foundation, Chemical, Biogengineering, Environmental and Transport Systems Division, Washington, D.C., 177 p
- Golueke CG, Oswald W (1965) Harvesting and processing sewage-grown planktonic algae. *J Water Pollut Con F* **37**(4):471-498
- Gouveia L, Marques AE, da Silva TL, Reis A (2009) *Neochloris oleabundans* UTEX #1185: A suitable renewable lipid source for biofuel production. *J Ind Microbiol Biot* **36**:821-826
- Gouveia L, Oliveira AC (2009) Microalgae as a raw material for biofuels production. *J Ind Microbiol Biot* **36**:269-274
- Grima EM, Belarbi EH, Fernandez FGA, Medina AR, Chisti Y (2003) Recovery of microalgal biomass and metabolites: process options and economics. *Biotechnol Adv* **20**:491-515
- Gudin C, Thepenier C (1986) Bioconversion of solar energy into organic chemicals by microalgae. *Adv Biotechnol Processes* **6**:73-110
- Guschina IA, Harwood JL (2006) Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Prog Lipid Res* **45**:160-186
- Haag AL (2007) Algae bloom again. *Nature* **447**(31):520-521
- Hanley NS, Spash CL (1993) Cost-benefit analysis and the environment. Edward Elgar Publishing, Aldershot, UK, 278 p
- Hejazi MA, Wijffels RH (2004) Milking of microalgae. *Trends Biotechnol* **22**:189-194
- Henrikson R (2009) Earth Food Spirulina: How this remarkable blue-green algae can transform your health and our planet. Ronore Enterprises, Hawaii, 174 p
- Hu Q, Sommerfeld M, Jarvis E, Ghirardi M, Posewitz M, Seibert M, Darzins A (2008) Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: Perspectives and advances. *Plant J* **54**:621-639
- Hu Q (2004) Environmental effects on cell composition. In: Richmond A (ed) *Handbook of Microalgal Culture: Biotechnology and Applied Phycology*. Blackwell Science Ltd, Oxford, pp 83-93
- Huesemann MH, Benemann JR (2009) Biofuels from Microalgae: Review of products, processes and potential, with special focus on *Dunaliella* sp. In: Ben-Amotz A, Polle JEW, Subba Rao DV (eds) *The alga Dunaliella: Biodiversity, physiology, genomics, and biotechnology*. Science Publishers, Enfield, pp 445-474
- Huntley M, Redalje DG (2007) CO₂ mitigation and renewable oil from photosynthetic microbes: A new appraisal. *Mitig Adapt Strategies Glob Chan* **12**:573-608
- Hur SB (1992) Culture Collection of Marine Microalgae. *J Korean Aquacult* **5**:81-91
- Illman AM, Scragg AH, Shales SW (2000) Increase in *Chlorella* strains calorific values when grown in low nitrogen medium. *Enzyme Microb Technol* **27**:631-635

- Kang DH, Affan MD A, Heo SJ, Oh CH, Lee DW, Park HS, Jun SM (2011) Method for manufacturing culture medium *Spirulina* using pretreated seawater. KR Patent 10-1125668 (2012-03-05) (to Korea Institute of Ocean Science and Technology)
- Kang DH, Heo SJ, Oh CH, Ju SJ, Affan MD A, Lee D-W, Jung MJ (2010) Method of extracting triglycerides or fatty acid methyl esters from lipids of microalgae belonging to Heterokontophyta or Haptophyta and method of producing biodiesel using the extracts. KR Patent 10-0983023 (2010-09-13) (to Korea Institute of Ocean Science and Technology)
- Kim SK, Baek HC, Byun HG, Kang OJ, Kim JB (2001) Biochemical Composition and Antioxidative Activity of Marine Microalgae. Korean J Fish Aquat Sci **34**:260-267
- Kim TH, Sung KD, Lee JS, Lee JY, Ohh SJ, Lee HY (1997) Biological fixation of carbon dioxide using photosynthetic microalga, *Chlorococcum littorale*. J Korean Ind Microbiol **25**:235-239
- Katsuda T, Shimahara K, Shiraishi H, Yamagami K, Ranjbar R, 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
- Ledford H (2006) Making it up as you go along. Nature **444**(7):677-678
- Lee HS, Lee SH, Mun HC, Lee HY (2003) Screening of the Immuno-stimulatory Activity of the Marine Alga *Chlorella capsulate*. Korean Soc Biotechnol Bioeng **18**:19-24
- Lee YK (2001) Microalgal mass culture systems and methods: Their limitations and potential. J Appl Phycol **13**:307-315
- Li XF, Xu H, Wu QY (2007) Large-scale biodiesel production from microalga *Chlorella protothecoides* through heterotrophic cultivation in bioreactors. Biotechnol Bioeng **98**:764-771
- Liang YN, Sarkany N, Cui Y (2009) Biomass and lipid productivities of *Chlorella vulgaris* under autotrophic, heterotrophic and mixotrophic growth conditions. Biotechnol Lett **31**:1043-1049
- Mandal S, Mallick N (2009) Microalga *Scenedesmus obliquus* as a potential source for biodiesel production. Appl Microbiol Biot **84**:281-291
- Mata TM, Martins AA, Caetano NS (2010) Microalgae for biodiesel production and other applications: A review. Renew Sust Energ Rev **14**:217-232
- Miao X, Wu Q (2005) Biodiesel production from heterotrophic microalgal oil. Bioresource Technol **97**:841-846
- Molina Grima E, Belarbi EH, Acien Fernandez FG, Robles Medina A, Chisti Y (2003) ecovery of microalgal biomass and metabolites: Process options and economics. Biotechnol Adv **20**:491-515
- Mollah MYA, Morkovsky P, Gomes JAG, Kesmez M, Parga J, Cocke DL (2004) Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation. J Hazard Mater **114**:199-210
- Oh HM, Choi A, Mheen IT (2003) High-value materials from microalgae. Korean J Microbiol Biotechnol **31**:95-102
- Oh HM, Lee SJ, Park MH, Kim HS, Kim HC, Yoon JH, Kwon GS, Yoon BD (2001) Harvesting of *Chlorella vulgaris* using a bioflocculant from *Paenibacillus* sp. AM49. Biotechnol Lett **23**:1229-1234
- Oh HM, Kim JS, Lee SJ (1998) Biological Fixation of Global Warming Gas (CO₂) by Microalgae. Korean J Environ Biol **16**:291-297
- Oh HM, Lee GY (1990) Preparation of unialgal cultures from natural waters by a micropipette technique. Algae **5**:131-136
- Oh YK, Park SH (1996) Effect of the Environmental and Nutritional Conditions on the Growth of Marine Microalga *Isochrysis Galbana* Parke. Korean Soc Biotechnol Bioeng **11**:303-310
- Oh YK, Kim YJ, Park SH (1997) Production of EPA and DHA from Marine Microalga *Isochrysis galbana* Parke. Korean Soc Biotechnol Bioeng **12**(3):328-335
- Pak JH, Lee SY, Kim YN, Lee HY (1993) The Production of Algal Hydrocarbons in Outdoor Cultivations of *Dunaliella salina* 1650. J Microbiol Biotechnol **3**:46-50
- Pienkos PT, Darzins A (2009) The promise and challenges of microalgal-derived biofuels. Biofuels Bioprod Biorefin **3**:431-440
- Pulz O, Gross W (2004) Valuable products from biotechnology of microalgae. Appl Microbiol Biotechnol **65**:625-648
- Pulz O (2001) Photobioreactors: Production systems for phototrophic microorganisms. Appl Microbiol Biotechnol **57**:287-293
- Pushparaj B, Pelosi E, Tredici MR, Pinzani E, Materassi R (1997) An integrated culture system for outdoor production of microalgae and cyanobacteria. J Appl Phycol **9**:113-119
- Richmond A (1986) Outdoor mass cultures of microalgae. In: Richmond A (ed) Handbook of microalgal mass cultures. CRC Press, Boca Raton, pp 285-329
- Rodolfi L, Zittelli GC, Bassi N, Padovani G, Biondi N, Bonini G, Tredici MR (2009) Microalgae for Oil: Strain Selection, Induction of Lipid Synthesis and Outdoor Mass Cultivation in a Low-Cost Photobioreactor. Biotechnol Bioeng **2**(1):100-112

- Roessler PG (1987) UDP-glucose pyrophosphorylase activity in the diatom *Cyclotella cryptica*: Pathway of chrysolaminarin biosynthesis. *J Phycol* **23**:494-498
- Roessler PG (1988) Changes in the activities of various lipid and carbohydrate biosynthetic enzymes in the diatom *Cyclotella cryptica* in response to silicon deficiency. *Arch Biochem Biophys* **267**:521-528
- Roessler PG (1990) Purification and characterization of acetyl-CoA carboxylase from the diatom *Cyclotella cryptica*. *Plant Physiol* **92**:73-78
- Roessler PG, Ohlroge JB (1993) Cloning and characterization of the gene that encodes acetyl-coenzyme A carboxylase in the alga *Cyclotella cryptica*. *J Biol Chem* **268**:19254-19259
- Sanderson K (2006) A field in ferment. *Nature* **444**(7):673-676
- Schenk PM, Thomas-Hall SR, Stephens E, Marx UC, Mussgnug JH, Posten C, Kruse O, Hankamer B (2008) Second generation biofuels: High-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioresour Technol* **1**:20-43
- Schuchardt U, Sercheli R, Vargas RM (1998) Transesterification of vegetable oils: A review. *J Braz Chem Soc* **9**:199-210
- Sheehan JT, Dunahay J, Benemann JR, Roessler PG (1998) Look back at the US Department of Energy's Aquatic Species Program: Biodiesel from algae. National Renewable Energy Lab, NREL/TP-580-24190, 325 p
- Shifrin NS, Chisholm SW (1981) Phytoplankton lipids: Interspecific differences and effects of nitrate, silicate and light-dark cycles. *J Phycol* **17**:374-384
- Sills J (2009) Biofuels: Social benefits. *Science* **326**(4):1344-1346
- Spoehr HA, Milner HW (1949) The chemical composition of *Chlorella*: Effect of environmental conditions. *Plant Physiol* **24**:120-149
- Sukenik A, Shelef G (1984) Algal autoflocculation - verification and proposed mechanism. *Biotechnol Bioeng* **26**:142-147
- Takagi, M, Karseno, Yoshida T (2006) Effect of salt concentration on intracellular accumulation of lipids and triacylglyceride in marine microalgae *Dunaliella* cells. *J Biosci Bioeng* **101**:223-226
- Takagi M, Watanabe K, Yamaberi K, Yoshida T (2000) Limited feeding of potassium nitrate for intracellular lipid and triglyceride accumulation of *Nannochloris* sp. UTEX LB1999. *Appl Microbiol Biotechnol* **54**:112-117
- Tredici MR (2004) Mass production of microalgae: Photobioreactors. In: Richmond A (ed) Handbook of microalgal culture: Biotechnology and applied phycology. Blackwell Publishing, Oxford, pp 178-214
- Tyson KS, Bozell J, Wallace R, Peterson E, Moens L (2004) Biomass oil analysis: Research needs and recommendations. National Renewable Energy Laboratory, Golden, CO, NREL/TP-510-34796, 325 p
- Uduman N, Qi Y, Danquah MK, Forde GM, Hoadley A (2010) Dewatering of microalgal cultures: A major bottleneck to algae-based fuels. *J Renew Sust Energ* **2**:012701
- US Energy Information Administration (EIA), State and US Historical Data (2007) <http://www.eia.doe.gov> Accessed 12 Nov 2012
- Wang CY, Fu CC, Liu YC (2007) Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. *Biochem Eng J* **37**:21-25
- Weissman JC, Tillett DT, Goebel RP (1989) Design and operation of an outdoor microalgae test facility. Solar Energy Research Institute, Golden, Co., SERI/STR-232-3569, 56 p
- Wijffels RH, Barbosa MJ (2010) An outlook on microalgal biofuels. *Science* **329**:796-799
- Wilde EW, Benemann JR, Weissman JC, Tillett DM (1991) Cultivation of algae and nutrient removal in a waste heat utilization process. *J Appl Phycol* **3**:159-167
- Xu H, Miao XL, Wu QY (2006) High quality biodiesel production from a microalga *Chlorella protothecoides* by heterotrophic growth in fermenters. *J Biotechnol* **126**:499-507
- Yoo C, Jun SY, Lee JY, Ahn CY, Oh HM (2010) Selection of microalgae for lipid production under high levels carbon dioxide. *Bioresour Technol* **101**:S71-S74

Received Sep. 10, 2012

Revised Oct. 25, 2012

Accepted Oct. 29, 2012