

해양조류로부터 바이오에너지 생산 : 현황 및 전망

박재일 · 우희철*[†] · 이재화[†]

신라대학교 생명공학과
617-736 부산시 사상구 괘법동 산 1-1번지
*부경대학교 응용화학공학과
608-739 부산시 남구 용당동 산 100 번지
(2008년 3월 5일 접수, 2008년 6월 19일 채택)

Production of Bio-energy from Marine Algae: Status and Perspectives

Jae-Il Park, Hee-Chul Woo*[†] and Jae-Hwa Lee[†]

Department of Bioscience and Biotechnology, College of Engineering, Silla University, san 1-1, Kwaebop-dong, Sasang-gu, Busan 617-736, Korea

**Division of Applied Chemical Engineering, Pukyong National University, San 100, Yongdang-dong, Nam-gu, Busan 608-739, Korea*

(Received 5 March 2008; accepted 19 June 2008)

요 약

바이오에너지는 화석연료의 소비를 감소시키는 기회를 제공한다. 태양, 바람, 수력발전 및 지열, 그리고 바이오매스 자원으로부터 생성된 에너지는 재생이 가능하다. 대부분의 바이오에너지들은 태양으로부터 직·간접적으로 생산되기 때문에 화석연료와 달리 신재생에너지의 충분한 공급이 가능하다. 또한 바이오에너지의 이용은 환경적인 측면 뿐 아니라 정치, 경제적으로 이익을 제공한다. 바이오에너지는 이산화탄소의 순증가가 없고 무공해의 에너지 형태를 제공하는 해양 자원으로부터 생산 될 수 있다. 본 총설에서는 지구의 약 75%가 바다로 이루어져 있음을 고려해 볼 때 바이오에너지 생산을 위한 해양 바이오매스의 잠재력에 대해 검토한다.

Abstract – Bio-energy offers the opportunity to lessen fossil fuel consumption. Energy derived from solar, wind, hydroelectric, geothermal, and biomass sources are considered renewable. Because most forms of bio-energy are derived either directly or indirectly from the sun, there is an abundant supply of renewable energy available, unlike fossil fuels. The use of bio-energy also provides environmental, economic and political benefits. Bio-energy can be produced from a marine source such as biomass provides a CO₂ neutral, non-polluting form of energy. In this paper, the potential of marine biomass is increasingly discussed, given the size of the resource in that more than three quarters of the surface of planet earth is covered by water.

Key words: Marine Biomass, Macro-Algae, Bio-Energy

1. 서 론

세계는 화석연료의 과다한 사용으로 인한 고갈과 환경오염이라는 커다란 두 가지 문제에 직면하고 있으며 자연과 공존하며 안정적으로 발전하자는 ‘지속 성장(sustainable development)’의 개념이 화두가 되고 있다[1]. 현재 채굴 가능한 석유매장량은 약 3조 배럴, 이미 8천억 배럴을 사용했기에 나머지는 2조 2천억 배럴인데, 이 중 1억 배럴정도가 확인된 이용가능 매장량이라 한다. 이 경우 연간 3백억 배럴을 사용한다면 앞으로 40년 이내에 심각한 석유부족 문제, 제3의 석유과동에 봉착할 가능성이 대단히 높다. 더불어 세계의 에너지 공급원인 중동의 정세가 불안해지면서 고유가 시대로 들어섰고, 게다가 기후협약 등으로 이산화탄소 배출에 대한 제재가 강화

될 조짐이 보이고 있어 조화롭고 지속적인 발전과 함께 에너지 보존 및 효율적인 환경보존을 위한 대체 가능한 새로운 에너지의 개발에 관심이 모아지고 있다[2].

최근, 온실가스의 발생이 없거나 적은 환경 친화적인 대체에너지의 개발이 앞으로 국가 간 에너지 전쟁에서 생존할 수 있다는 인식이 높아지면서 선진국을 중심으로 환경오염 및 지구온난화 문제를 해결하기 위해 화석연료의 사용에 대한 규제를 강화하고 환경 친화적인 바이오, 수소, 태양 등 신재생에너지의 확산을 위한 정책 입안과 함께 이들 신재생에너지의 공급과 사용을 촉진하고 있다. 우리나라도 이러한 신재생에너지 개발에 적극 나서고 있지만 독일이나 브라질과 같은 신재생 에너지 선도국에 비하여 아직까지는 시작 단계에 불과하다.

바이오매스(biomass)는 식물과 미생물의 광합성에 의해 생성되는 식물체, 균체와 이를 먹고 살아가는 동물체를 포함하는 생물유기체

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: woohc@pknu.ac.kr or jhalee@silla.ac.kr

를 말한다. 바이오에너지(bio-energy)는 이와 같은 바이오매스 자원을 에너지화한 것을 말하며 현재 전 세계적으로 가장 많이 이용되고 있다. 즉, 바이오매스는 재생 가능한 식물로부터 생성된 유기물을 말하며 이 중에는 에너지 작물, 나무와 식품, 사료 등 농산물 및 부산물, 임산 부산물, 수생식물, 동물 분뇨, 도시쓰레기, 산업쓰레기 중의 유기성폐기물을 포함한다[3]. 최근에는 많은 바이오매스들이 계획적으로 재배된 속성수 혹은 속성으로 재배된 초본식물(예를 들면 갈대, switch grass 등)이 에너지 작물로 재생산되는 경우가 있으며 이를 바이오에너지 원료로 명명하기도 한다. 이 경우 이들이 자라면서 대기 중의 이산화탄소를 제거하며 바이오매스를 연소하거나 하여 에너지로 이용하면 이산화탄소는 다시 대기 중에 방출된다. 그러나 바이오매스가 끊임없이 재생산되는 한 바이오에너지 사용으로 인한 대기 중 이산화탄소의 순증가는 없다. 즉, 바이오에너지가 연소될 때 유독 가스가 배출될 수 있고 이산화탄소가 대기로 방출되지만 이 탄소는 애초에 대기 중에서 식물에 섭취된 것으로 화석연료가 연소할 때의 경우와 달리 이산화탄소의 생성이 아니라 순환으로 보아야 하기 때문이다[4, 5].

여러 가지 바이오매스원 중에서 해조류(미역이나 다시마 등)는 지구 온난화의 주범으로 꼽히고 있는 이산화탄소 흡수 능력이 매우 뛰어난 것으로 밝혀졌다. 일부 해조류의 경우 열대우림보다 5배 이상 이산화탄소 흡수 능력이 뛰어난 것으로 조사됐다. 우리나라는 세계 4위의 해조류 생산국인데다 육상보다 재배가능 면적이 넓어 해조류 재배가 온실가스 감축을 위한 새로운 가능성으로 떠오르고 있다. 특히 정부는 국제기후변화협약(UNFCCC)에 대비해 국내 산업을 유지·보호하기 위해 해조류를 이산화탄소 흡수원으로 국제협약에서 인증 받을 수 있도록 추진하고 있다. 바이오에너지는 열이나 전기 등의 에너지를 생산하는 풍력, 태양광, 태양열 등 무형의 재생에너지와는 달리 형태를 가지므로 에너지의 저장성이 우수하다는 장점이 있다.

이러한 바이오에너지는 바이오매스의 열화학적 또는 생물학적 전환에 의해 생산되며 전기의 생산(biopower) 또는 수송용 연료(biodiesel, bioethanol, biogas)로서 뿐만 아니라 천연 화학산업의 원료로서도 활용이 가능하다[6]. 특히 유기체인 바이오매스를 이용해 기존 화학연료 사용 시 발생하는 문제점인 공해 및 온실가스 발생을 획기적으로 줄일 수 있을 뿐만 아니라 자원고갈이라는 에너지 위기를 극복할 수 있는 대안이 될 전망이다[7]. 더불어 고유가가 지

속되고 있는 상황에서 바이오디젤과 바이오에탄올 등 바이오에너지가 일부 국가에서의 관심과 사용뿐만 아니라 전 세계적으로 상용화될 조짐을 보이면서 향후 바이오에너지에 대한 연구의 활성화가 예상된다. 본 총설에서는 최근 부각되고 있는 새로운 바이오매스원인 해양조류의 특징 및 이용가능성 그리고 바이오에너지 대한 개념과 현황 및 전망 등에 대하여 기술하였다.

2. 오일 피크 및 기후 변화

오일 피크의 시점과 관련하여 비관론자들은 2010년 경, 낙관론자들은 30~40년 이후 도래할 것으로 예측하고 있으며, 향후 몇 십년 내에 도래할 것으로 보인다(Table 1). 만약 향후 15년 내지 20년까지의 경제 성장률이 현재 예측한 수준일 경우, 원유 수요는 현 8천만 배럴/일에서 2030년 경에는 50%이상 증가한 1억 2천만 배럴/일 이상 될 것으로 전망된다[9]. 현재 석유수출국기구(OPEC) 국가들이 모든 설비를 최대한으로 가동함에도 불구하고 증가하는 원유 수요를 따라잡지 못해 유가가 계속 상승하고 있다. 특히 중국은 급속한 경제 성장으로 인해 최근 원유 수요가 급격히 증가하였고, 중국의 원유 소비는 현재 6.3백만 배럴/일에서 2025년 경 천3백만 배럴/일을 넘어설 것으로 예상하였다[10]. 인도와 같은 다른 아시아 국가들의 석유 소비도 증가할 것으로 예상되며, 미 에너지정보청(EIA)의 전망에 따르면 미국도 유럽 보다 두 세배 정도 증가할 것으로 전망하였다. 유엔의 '4차 기후변화 보고서'는 지금과 같이 석유, 석탄 등 화석연료에 의존한 인류의 생활이 계속되면 21세기말 지구의 평균 기온이 최대 6.4℃ 상승하고 해수면은 59 cm까지 상승할 것이라고 경고하였다. 또한 지난 100년(1906~2005년) 동안 지구의 평균 기온이 0.74℃까지 올랐다고 밝히면서 2001년 발표한 내용보다 지구온난화가 한층 더 심각함을 경고하였다.

지구온난화는 온실가스가 주원인으로서 알려져 있는데 이중 이산화탄소가 가장 큰 영향을 주고 있는 것으로 밝혀졌다. 이산화탄소의 대기 중의 농도는 과거 빙하기에 대기 중 농도가 180 ppm이었으나, 산업혁명이 시작된 이후 급격히 증가하여 1890년에는 290 ppm, 1990년대 후반의 최근에는 370 ppm으로 보고되었고[11], 1992년에는 약 360 ppm으로 1세기 동안 30% 증가를 보였다. 또한 21세기말에는 이산화탄소 대기 중의 농도가 산업화 이전의 2배 수준인 500 ppm(산업화 이전에는 280 ppm)에 도달할 것이며, 1970년

Table 1. An estimated deposit of oil (billions barrels)[8]

Author	Affiliation	Year	Estimated ultimate reserves	Peak year
Hubbert	Shell	1969	2100	2000
Bookout	Shell	1989	2000	2010
Mackenzie	Researcher	1996	2600	2007-2019
Appleby	BP	1996		2010
Invanhoe	Consultant	1996		2010
Edwars	University of Colorado	1997	2836	2020
Cmpbell	Consultant	1997	1800-2000	2010
Bemaby	ENI	1998		2015-2035
IEA	OECD	1998	2800	2010-2020
ELA	us DOE	1999	4700	2030
Laherrere	Consultant	1999	2700	2010
USGS	International Department	2000	3270	
Salameh	Consultant	2000	2000	2004-2005
Deffeyes	Princeton University	2001	1800-2100	2004

수준으로 안정화된다 하더라도 240년 이후(1995년 기준)에는 1,000 ppm에 도달할 것으로 예상되고 있다. 우리나라의 경우에는 온실가스 중 이산화탄소 기여도가 88%이며, 이러한 이산화탄소의 96%가 화석에너지 소비에 의해 배출되고 있다. 이에 대한 대안으로서 바이오에너지의 가치는 더욱 높아진다. 석유의 유한성과 화석연료의 사용으로 인한 환경문제를 저감시키고자 하는 노력들은 국가의 에너지 포트폴리오를 석유 중심 구조에서 재생에너지와 신에너지의 이용확대를 위한 노력을 경주하도록 만들고 있다. 2030년 경에는 석유의 공급부족분인 약 40% 정도의 에너지를 신재생에너지에서 충당하고자 우리나라 정부는 계획하고 있다. 이러한 노력들은 에너지 공급원의 다양화뿐만 아니라 환경오염 방지 측면에서도 중요한 의미를 가질 것이다. 이처럼 계속되는 석유의 가격상승과 더불어 화석연료의 무분별한 사용으로 인한 지구 온난화가 심각한 문제로 대두됨에 따라 최근 바이오에너지를 생산하기 위한 바이오매스원으로 해양조류에 관심이 집중되고 있다[12-14].

3. 해양 바이오매스(Marine biomass)

거대조류(macro-algae)와 미세조류(micro-algae)는 주로 식량과 동물 및 해양생물을 재배하기 위한 사료나 생물학적 비료로 이용되어 왔다. 특히 건조된 미세조류는 분말상태나 압축된 알약 형태로 가공하여 건강식품으로 이용되고 있다. 건강식품을 위한 미세조류 생명공학기술에는 주로 *Spirulina*, *Chlorella*, *Dunaliella*, *Nostoc*, *Aphanizomenon* 등이 이용되고 있으며 1999년에는 전 세계적으로 *Spirulina* 바이오매스가 약 3천 5백톤 가량 생산되었다[15]. 또한 해양 바이오매스는 전기를 생산하기 위한 원료나 열분해를 통한 액체 연료 생산 및 생물학적 발효를 통한 바이오메탄가스 생산에 이용된다. 바이오에너지를 생산하기 위한 바이오매스로 거대조류나 미세조류를 이용하기 위해서는 우선 생산성이 우수해야 하며 쉽게 수확할 수 있어야 하고 이용 가능한 다른 바이오매스보다 동등하거나 더 낮은 비용으로 생산되어야 한다. 이 같은 목적을 위해 단독으로 조류를 재배하기에는 조류 바이오매스의 생산비용적인 측면에서 보면 너무 높은 단점이 있기는 하다. 미래 에너지 대안으로서 바이오매스의 중요성이 검토된 연구에 따르면 비록 바이오에너지에 사용할 수 있는 가용한 토지면적과 생산성의 차이로 연구자간의 예측량에 차이가 많지만 바이오매스는 미래 지구상의 주된 1차 에너지원이 될 것으로 보고 있다[16]. 근대화된 바이오에너지 시스템은 개발도상국은 물론 선진국에 있어서 미래 지속가능한 에너지시스템의 구축과 발전에 기여할 것이다.

조류에는 해양에서 생육하는 해양성 조류(marine algae)와 담수에서 생육하는 담수조류(fresh water algae)로 나뉘며 형태학적으로는 거대조류와 미세조류로 분류되고 있다[17]. 일반적으로 조류는 육상식물을 제외한 모든 광합성 생물의 통칭으로, 어떤 특정 분류군을 지칭하는 분류학적 용어가 아니라 매우 다양한 분류군을 포함하는 일반 용어이다(Table 2).

다양한 분류군 중에서 대부분이 식물플랑크톤이라고 불리는 단세포성 미세조류에 속하며 이들은 해양생태계의 주요 생산자로 활동한다. 미세조류는 육상식물과 비슷한 광합성 메커니즘을 가지지만 물과 이산화탄소와 다른 여러 영양분으로의 접근이 효율적인 해양 환경에서 서식하므로 태양에너지를 바이오매스로 전환함에 있어서 더욱 효과적이다. 다세포성 거대조류에는 녹조류(green algae), 홍조

Table 2. The general classification of the algae

Common name	Division
Blue green bacteria	Cyanobacteria
Blue green algae	Cyanophyta
Red algae	Rhodophyta
Green algae	Chlorophyta
Golden brown algae	Chromophyta
Haptophytes	Haptophyta
Dinoflagellates	Dinophyta
Cryptomonads	Cryptophyta
Euglenoids	Euglenophyta

Table 3. Approximate chemical composition of seaweeds[19]

Component	Brown	Red	Green
Water ¹⁾	79-90%	70-80%	70-85%
Minerals ²⁾	30-50%	25-35%	10-25%
Carbohydrates	30-50% ³⁾	30-60% ⁴⁾	25-50% ⁵⁾
Protein	7-15%	7-15%	10-15%
Lipids	2-5%	1-5%	1-5%
Cellulose	2-10%	2-10%	20-40%

¹⁾of fresh weight

²⁾of dry weight

³⁾Mainly alginate and fucose-containing polysaccharides

⁴⁾Sulphated polygalactans and xylans, resp. dominate

⁵⁾Cellulose and starch are the main components

류(red algae), 그리고 갈조류(brown algae)가 있으며 이들은 얇은 바다의 서식지를 풍요롭게 하고 있으며 해조류(seaweed)라고도 부른다. 또한 성장속도가 매우 빨라 60 m까지 자랄 수 있다[18]. 경제적으로 더욱 가치 있는 해조류의 주요 화학 조성은 다음과 같다(Table 3).

해조류 다당류는 해수에 염분농도가 많은 것과 같은 환경 요인에 의해 이온 출입을 조절해야 하는 등의 원인에 의해서 독특한 특징을 갖는다. 즉, 세포벽 또는 세포간 다당류에는 카르복실기(COOH)나 에스테르결합의 황산기를 갖는 것이 많아서 육상의 식물과는 다르다. 더욱이 육상식물의 경우 카르복실기는 펙틴(pectine)에서와 같이 거의가 메틸에스테르(methyl ester)로 구성되어 있으나 해조류에는 모두가 유리형이다[20]. 해조류 중의 황산다당류로는 주로 갈조류로부터 얻는 후코이단(fucoidan)과 홍조류로부터 얻는 캐러기난(carrageenan)과 아가로펙틴(agarpectin), 녹조류로부터 얻는 sulfated xyloarabinogalactan, sulfated glucuronoxylorhamnan 등이 있는데, 육상식물에서는 발견되지 않는다[21]. 세포벽을 구성하는 다당류에는 열수, 약산, 약알칼리에 용출되지 않는 섬유단백질이 골격을 이루고 있다. 또한 이들 사이를 채우고 있는 물, 열수에 가용의 성분과 알칼리에 가용인 점질다당류도 있다[22].

해조류 가운데서도 녹조류는 엽록소(chlorophyll)에 의해서 광합성을 한다는 점이 육상식물과 같다. 저장전분은 엽록체의 피레노이드(pyrenoid)안에 존재한다. 녹조류의 당 구성에는 여러 가지 차이가 많은데 헥소스(hexose)보다는 펜토스(pentose)가 주로 관찰되는 것이 특징이며, 황산기는 펜토스와 결합되어 있다. 어떤 종류에서는 유론산(uronic acid)이 매우 많아 조성이 복잡함을 알 수 있다. 녹조류의 세포벽 다당류는 셀룰로오스(cellulose), 만노스(mannose), 자일렌(xylane) 그리고 수용성 유론산 황산다당 및 수용성 황산화 중성다당이 대표적이다. 특히 셀룰로오스를 세포벽골격으로 가지고 있으며, 물리적 성질도 육상식물과 유사한 점이 많다. 저장성 다당류

로는 전분(starch), 후럭탄(fructan), 파라밀론(paramylon)이 대표적이다. 특히 전분은 전형적인 아밀로펙틴형이며 육상식물의 전분과 비슷하다. 평균쇄장이 23으로서 곡류의 아밀로펙틴의 평균쇄장 25와 유사하다. 녹조류의 아밀로오스는 감자 아밀로오스와 비슷하나 I₂복합체의 형성능력이 약하고 극한점도가 낮다. 이러한 성질은 녹조전분이 저분자이며 가(假)중합도를 갖는 특징을 가지고 있어 육상식물과 구별된다[21].

홍조류를 구성하는 세포벽다당류는 셀룰로오스, 자일렌, 만난(mannan), 한천(agar) 그리고 케러기난(carrageenan)이 대표적인데 셀룰로오스는 그다지 많지 않다. 홍조세포벽의 내층은 셀룰로오스로 되어 있는 것에 반해서 외층 및 세포간격을 구성하는 점성다당류의 주성분은 한천이다. 한천은 단일당으로 형성된 다당류가 아니고 아가로즈(약 70%)와 아가로펙틴(약 30%)의 혼합물이다. 한천은 아세틸화 또는 메틸화 한 것을 클로로포름에 녹일 때에 녹는 부분이 아가로즈이고 녹지 않는 부분이 아가로펙틴이다. 한천 다당류중의 아가로즈 비율은 해조류의 종에 따라 다르며, 약 30~90%이고 평균 70%이다. 분자량은 16,000~135,000이며 중성다당류로서 황산기 함유량은 적으며 겔화하는 능력이 강하고 한천에 응고성을 부여하는 성분이 된다[22].

갈조류의 탄수화물은 녹색식물과 공통점이 많은 조류로서 엽록소 a, c와 카로티노이드 이외에 피코크산틴이 있기 때문에 갈조류 특유의 색을 나타낸다. 약 250속, 1,500여 종류가 있으나 거의가 해산으로 냉수성 해역에 많으며 세포내에는 알긴산, 후코이단 등의 다른 조류에서는 볼 수 없는 산성다당류가 있다. 세포벽다당류로는 셀룰로오스, 알긴산(alginate) 그리고 후코이단(fucooidan)이 대표적으로 존재하며 셀룰로오스 함유량은 다시마의 엽상부에서 3~5%, 경부에서는 6~10%, 기타 갈조류에서도 0.6~4.4% 정도이다. 미역에서는 셀룰로오스가 조체의 4~14%가 함유되어 있다. 알긴산은 D-mannuronic acid(M)과 L-guluronic acid(G)가 여러 가지 비율로 결합된 polyuronide다당으로서 갈조류의 세포막 사이를 채우고 있다. 함유량은 종류 및 장소, 계절, 부위에 따라 다르나 여름철에 함유량이 가장 많아 건량의 16~34%나 된다. M과 G의 비율도 해조류의 종, 계절 및 조체의 부위에 따라 다르므로 알긴산은 분자적으로 매우 일정하지 않다[21,22]. 산으로서 전처리한 해조류에서 3% Na₂CO₃로 쉽게 추출하여 에탄올 또는 산으로서 침전시켜 회수한다. 그리고 갈조류의 조체를 잘게 썰거나 파쇄하면 표면에 분비하는 세포간 점질물이 있는데, 이처럼 갈조류의 세포간 충전물이 바로 후코이단이며 함유량은 4~20%정도이다. 더불어 갈조류의 중요한 저장다당류로서 라미나란(laminaran)이 있으며 함유량은 밤과 낮, 성장 및 계절에 따라 다르며 줄기 등의 생장이 왕성한 부분과 계절적으로 생장이 왕성한 때는 함유량이 적으나 성숙기에는 건조한 조체

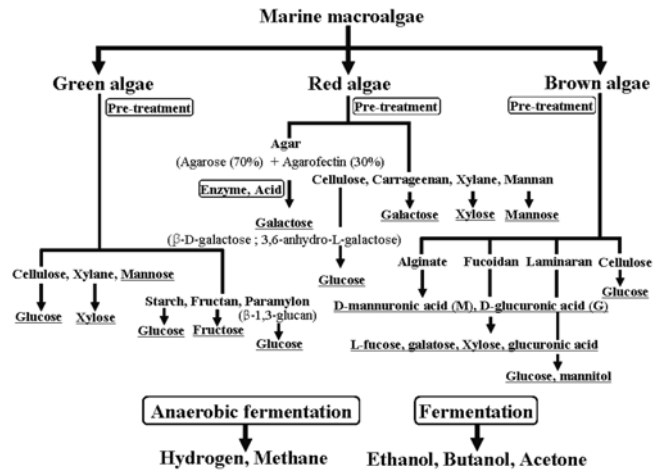


Fig. 1. Process of bioenergy production from carbohydrates of marine macroalgae.

의 약 20%가 될 때도 있다. 라미나란의 기본적인 구조로는 β-1,3 결합의 글루칸(glucan)이며 적게나마 부분적으로 β-1,6 glucoside도 있다. 라미나란 분해효소인 라미나라제(laminarase)에는 exo 및 endo-β-1,3 glucanase, β-D-glucosidase가 있다. 이들 효소는 세균, 곰팡이, 조류, 고등식물, 연체동물 등에 널리 분포한다[20]. Fig. 1에 이상의 내용을 요약하여 도표로 도시하였다.

4. 해조류의 생산 및 산업적 이용

매년 지구상에서 생산되는 2,000억 톤의 광합성량의 90%가 해양에서 이루어지므로, 바다의 중요성은 매우 크다 할 수 있다. 생물 중의 80%가 서식하는 해양 생태계의 총 가치는 25조 달러이며, 식량과 에너지를 포함한 해양자원의 가치는 1조 4달러를 상회할 것으로 추정하고 있다. 해양 바이오산업의 세계시장은 연간 30억 달러 수준이지만, 매년 수배씩 증가하고 있다[23]. 현재 전 세계적으로 약 200종의 해조류가 이용되고 있고 주로 녹조류에 속하는 홀파래류(Monostroma), 잎파래류(Enteromorpha)와 홍조류에 속하는 김속(Porphyra), 유키우마속(Eucheuma), 카파피쿠스속(Kappaphycus), 꼬시래기속(Gracilaria) 그리고 갈조류에 속하는 다시마(Laminaria japonica), 미역(Undaria pinnatifida)이 생산되고 있고[24], 재배방법에 따른 해조류의 광합성 효율과 생산성은 Table 4와 같다.

해조류의 생산량은 연간 700만 톤(wet weight)이며 그중 가장 많은 양을 차지하는 것이 다시마, 미역, 그리고 김이다. 1993년 한해 동안 중국에서만 다시마가 400만 톤이나 생산되었고 같은 해 일본에서도 30만 톤이 생산되어 전 세계적으로 다시마 단일 품종이 약

Table 4. Photosynthetic efficiency and productivity

Plant system	Photosynthetic efficiency of PAR (%)	Typical productivity range (g m ⁻² day ⁻¹)	Typical productivity (t ha ⁻¹ y ⁻¹) (Maximum)	Comments
Laminaria offshore	Not reported	1 - 5	7 - 16	Natural populations and commercial harvesting
Macrocystis, Gracilaria, Laminaria and Chondrus in culture chambers	Not reported	3 - 10	10 - 34 (127)	Probably not achievable on a commercial scale
Laminaria in offshore farm	Not reported	Not reported	28 - 46 (expected values, prevented by storm!)	High values can only be obtained by supplying nutrients at excessive costs
Uncultivated brown algae	Not reported	Not reported	10 - 36	

500만 톤이나 생산되었다. 미역은 우리나라, 일본, 중국에서 주로 양식되는데 1995년 한 해 동안 약 75만 톤이 생산되었다. 한편 우리나라와 일본에서는 김(주로 *Porphyra yezoensis*) 양식이 활발하게 이루어져서 1994년 약 55만 톤의 김을 생산했고 소득으로 환산하면 약 15억 달러 정도로 전 세계 수산업에서 가장 비싼 단일 품종이다. 이중 김과 미역은 대부분 식용으로 사용되고 다시마는 다당류 알긴산 추출에 기타 홍조류는 카라기난과 한천 생산에 이용되었는데, 다당류는 5억 6천 달러의 시장을 형성하고 있고 전체 조류 산업은 약 10조 달러 정도 된다[25]. 가장 생산량이 많은 이들 세 종 이외에도 총 115속 395종의 해조류가 식용 43%, 공업용 42.8%, 의약품 7.7%, 그리고 사료용 6.5%로 이용되고 있다[26].

해조류를 생산하는 나라는 주로 중국, 필리핀, 한국, 일본, 그리고 인도네시아 등의 아시아 국가들이며 또한 미국, 캐나다 그리고 프랑스, 독일, 네덜란드와 같은 유럽 국가들도 대규모의 해조류를 재배하기 위해 시도하고 있다[27-29]. 미국의 대규모 해조류 재배 시스템은 드넓은 바다를 활용한 자유부유배양시스템(free-floating cultivation system)을 활용하여 생산하고 있다[30]. 하지만 이러한 방법은 해조류 재배를 위해 사용되는 줄이 영커져 닻과 부표의 유실 같은 문제를 야기시킨다. 결국 이러한 문제는 줄을 둥근 링 구조(Circular ring structure)로 만들어 해결하였다. 또한 이 구조는 *Macrocystis(kelp)*의 재배에 가장 적합하다는 사실을 발견하였다. 그리고 최근 네덜란드에서는 미국의 해양조류 프로그램, 프랑스와 독일의 연구(Fig. 2)를 토대로 연근해 풍력발전 기지를 이용한 해조류 생산에 대해 연구하고 있다[29].

효율적인 해조류 재배를 위한 연근해 풍력기지의 이용은 전도유

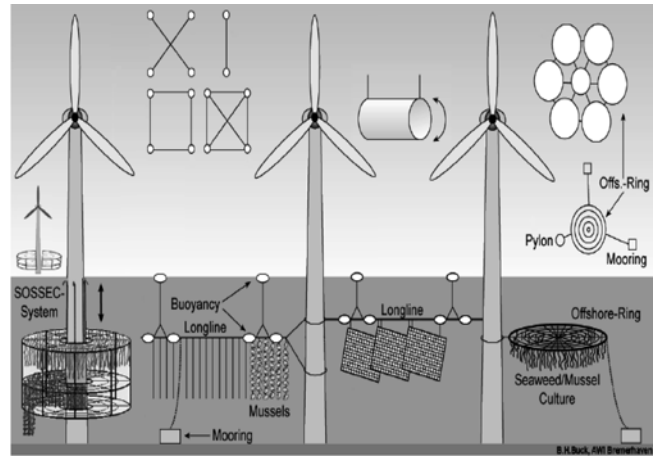


Fig. 2. Multiple use of off-shore wind energy parks for the co-cultivation of seaweed and seafood[28].

망한 방법 중 하나이기는 하나 해조류의 수확에 있어서 매우 노동 집약적인 단점이 있다. 그래서 이 같은 문제를 해결하기 위한 경제적인 연구가 뒷받침될 필요가 있다. 우리나라의 해조류 어업은 먼저 해면어업과 내수면어업으로 나누고, 해면어업은 다시 원양어업, 포경어업, 일반 해면어업, 천해양식어업으로 나누고 있다. 일반 해면어업은 해면어업 중 원양어업, 포경어업 및 천해 양식어업을 제외한 어업을 가리키므로 연안, 근해어업이라는 개념과 비슷하고 천해 양식업은 얕은 바다에서 양식하는 어업을 말한다. 현재 우리나라 해조류는 주로 일반 해면어업(Table 5)과 천해양식어업(Table 6)

Table 5. Production of seaweed by adjacent waters in Korea

Unit: M/T	Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<i>Porphyra tenera</i>		1	11	29	122	3	13	2
<i>Gracilaria verrucosa</i>		0	1	0	0	0	7	11
<i>Laminaria japonica</i>		350	357	88	37	0	9	12
<i>Pachymeniopsis lanceolata</i>		15	13	2	7	48	128	473
Diatom		29	22	0	0	0	2	1
<i>Undaria pinnatifida</i>		1,717	2,664	1,089	942	719	4,740	3,569
<i>Gelidium amansii</i>		2,872	3,768	2,150	467	1,791	3,079	3,012
<i>Codium fragile</i>		220	404	558	27	616	3,083	2,875
<i>Hizikia fusiforme</i>		6,062	7,024	5,081	2,744	5,284	3,520	2,933
<i>Hizikia fusiforme</i>		64	40	412	182	71	246	164
etc.		1,693	629	1,018	626	528	385	702
The sum total		13,023	14,933	10,427	5,154	9,060	15,212	13,754

Table 6. Production of seaweed by shallow-seas waters in Korea

Unit: M/T	Year	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006
<i>Porphyra tenera</i>		130,488	167,909	209,995	193,553	228,554	197,610	217,559
<i>Laminaria japonica</i>		14,160	17,506	24,873	25,259	22,510	108,327	201,919
<i>Undaria pinnatifida</i>		212,429	175,490	242,135	198,172	261,574	281,871	322,371
<i>Gelidium amansii</i>		0	0	4	0	0	0	0
<i>Codium fragile</i>		164	7	72	53	142	1,597	165
<i>Hizikia fusiforme</i>		11,654	6,865	11,016	33,661	22,814	30,058	21,125
<i>Hizikia fusiforme</i>		5,288	5,760	9,291	1,355	1,154	814	682
etc.		273	1	171	1	0	879	1,092
The sum total		374,456	373,538	497,557	452,054	536,748	621,156	764,913

Table 7. Cultivation area of seaweed in korea

Unit: ha	Year	2002	2003	2004	2005	2006
Porphyra tenera		54,012	53,136	52,749	51,894	55,101
Undaria pinnatifida		11,576	11,421	8,019	5,873	5,740
Laminaria japonica		1,487	1,440	3,484	5,283	6,149
Hizikia fusiforme		411	393	1,481	2,130	2,371
Gelidium amansii		0	0	0	0	0
Hizikia fusiforme		1,570	1,523	3,446	4,001	4,684
Meristotheca papulosa		0	0	0	0	0
Sargassum fulvellum		153	149	169	228	333
etc.		0	0	0	94	379
The sum total		69,209	68,062	69,348	69,503	74,757

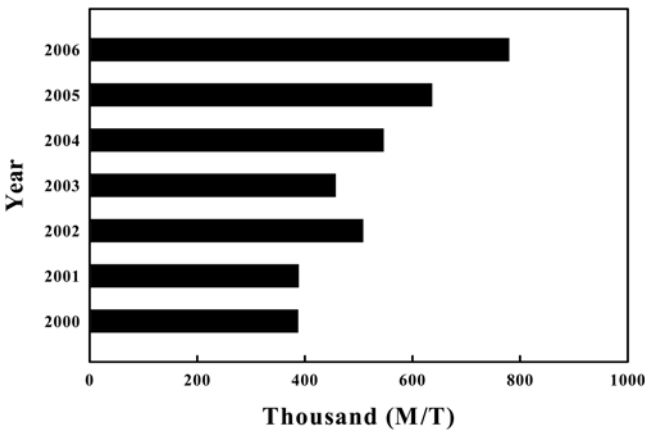


Fig. 3. Total annual production of seaweed in korea.

Table 8. European companies in the field of algal industry[31]

Field	%
Colloids	100
Harvesting seaweeds	47
Agar	18
Carrageenan	15
Alginates	12
Other colloids	8
Bioactive	100
Carotenoids	25
Cosmetics	36
Liquid fertilizers	25
Other	14
Food & feed	100
Macroalgae for human	27
Microalgae for human	15
Macroalgae for feed	29
Microalgae for feed	26
Other	3

을 통해 생산되고 있다. 해조류 재배면적은 2006년 한 해 동안 74,757 헥타르였으며(Table 7), 한해동안 생산되는 해조류의 양은 일반해면어업과 천해양식어업을 합산한 양을 의미하는데 2006년 한 해 778,667 톤이 생산되었다(Fig. 3). 한편 조류를 산업적으로 가공하는 나라는 주로 유럽과 미국에 밀집해 있다. 유럽의 조류 산업을 분석해 보면 카로티노이드, 화장품, 비료 등을 가공하는 산업과 식

품 및 사료 산업이 가장 크고 아가, 알긴산, 카라기난 등의 생산과 양식 등이 그 다음을 따르고 있다(Table 8).

5. 해조류의 주요기능

5-1. 부영양화의 감소 및 산소의 공급

해조류는 수중의 유기물을 흡수하고 환경을 청정화 하는 이외에도, 생물이 생육하는 장소를 제공하는 등 많은 역할을 담당하고 있다[32]. 최근, 연안의 부영양화 방지와 동시에 빈산소수괴의 형성을 해결하는 생물학적인 수질정화를 목적으로 한 구체적인 수질환경의 개선책이 요구되고 있다. 그 방법으로 주목받고 있는 것이 해조류를 재배하는 것이다. 해조류의 생장이나 증식에는 질소나 인은 불가결한 원소이다. 용해성의 질소나 인은 해조류에 있어 매우 유효한 성분으로, 부영양화 해수는 해조류의 생장을 촉진하는 능력을 가지고 있다[33]. 부영양화 한 연안의 양식장에서 해조류를 재배하는 의미는 양식장에 배출되는 용존태 무기질소(이하 N)이나, 용존태 무기인(이하 P)를 흡수시키고[34, 35], 동시에 양식어에 있어 불가결한 용존산소(이하 O₂)를 양식장에 공급하는 것이다. 다시마, 미역 및 파래의 어떤 해조류도 N, P 부하의 흡수능력을 가지고 있어 충분한 수질정화의 기능을 하고 있다는 것이 밝혀졌다.

5-2. 이산화탄소의 흡수

온실가스 증가로 인한 지구 온난화 가속으로 기후변화 협약에 따른 온실가스 배출 감축은 주 배출 원인 에너지 사용을 규제하는 것으로 각국의 경제성장과 직결되는 경제적 이슈로 이를 줄일 수 있는 첨단기술보유 여부가 국가, 기업의 경쟁력을 좌우하게 될 것이다[36]. 우리나라는 온실가스 세계 9위 이산화탄소 배출국으로 2013년 의무감축대상국에 포함될 전망으로, 정도에 따라 경제 및 산업 활동에 심대한 영향으로 작용할 것이다. 그러므로 대체에너지 개발 등 이산화탄소의 저감을 위해 많은 노력들이 필요한 실정이며, 이를 위해 단계적으로 청정에너지활용 방안과 이산화탄소를 흡수하는 육상과 해양의 식물 산업을 확대 증산하고 흡수능력 증대를 위한 중장기 정책수립과 연구를 조속히 추진하여야 한다. 우리나라는 해조류 양식생산량 세계 3위 국가로 2004년 양식생산량 826천 톤 중 해조류 452천 톤으로 약 54.7%를 점유하고 있으며, 2004년도 기준 우리나라의 전체 해조류양식어장 면적은 69,348 헥타르(양식적 지면적 98,803 헥타르 중 61%에 해당함)로 필요시 해조류양식 면적과 생산량을 크게 증가시킬 수 있는 저력과 경쟁력이 있으므로 해조류 자원의 효율적 이용을 통한 온실가스 저감대책 마련이 필요하다. 해조류 분포면적은 자연의 해조숲 해중림과 양식면적으로 구분되는데 해조숲에 의한 탄소고정량은 연간 약 200만 톤C(해조숲에 의한 이산화탄소 고정량은 1 헥타르 당 9~73 톤C)이다. 열대우림과 다시마 등 해조류의 이산화탄소 흡수효과 비교 결과, 모자반이나 측성양식 다시마는 약 2배 이상의 이산화탄소 흡수효과를 가지며, 이중 다시마는 지구상에서 광합성을 하는 생물 중에서 가장 높은 1차 생산력을 가진다(Table 9).

Table 9. CO₂ migration of Tropical rain forest submarine forest

Tropical rain forest	Temperate zone deciduous tree	Sargassum fulvellum	Forcing culture Laminariajaponica	Eisenia bicyclis
1500~2000*	1200*	4100*	4800*	2000~3000*

*Unit: gC/m²·yr

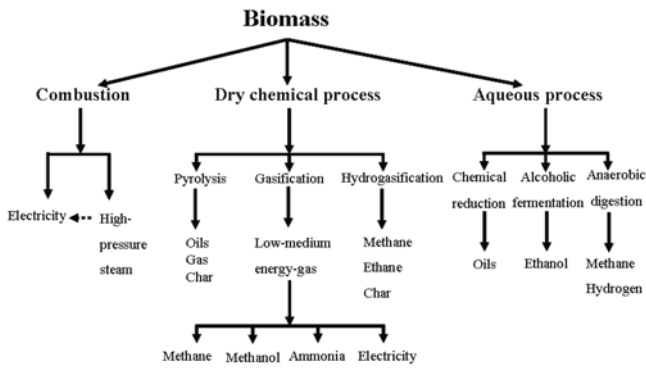


Fig. 4. Biomass energy conversion processes and products[37].

6. 바이오에너지

바이오에너지란 바이오매스로부터 생산되는 모든 에너지를 일컫는 말로 바이오에너지의 형태는 매우 다양하다. 바이오매스는 유채, 콩, 팥(야자), 자트로파(jatropha) 등의 유지작물과 옥수수 등의 곡물과 감자류를 포함한 전분질계의 자원, 사탕수수, 사탕무와 같은 당질계 자원, 초본, 임목과 볏짚, 왕겨와 같은 농업 부산물을 포함하는 셀룰로오스계의 자원을 비롯해 가축의 분뇨, 사체와 미생물의 균체를 포함하는 단백질계의 자원 그리고 해양조류까지 매우 다양하다. 또한 이들 바이오매스로부터 생산되는 바이오에너지 역시 매우 다양한데 크게 액체연료와 가스연료로 나누며, 액체연료에는 당질계, 전분질계, 목질계 원료에서 생산되는 바이오에탄올(bioethanol)과 유지작물로부터 생산되는 바이오디젤(biodiesel)로 이루어지며, 가스연료에는 혐기성나나 기타 유기성폐기물의 발효를 통하여 생산되는 바이오가스(biogas) 등이 있다(Fig. 4).

6-1. 바이오에탄올(bioethanol)

에탄올은 화학적으로 합성 가능하지만 대부분 생물학적 방법을 통해 생산되고 있다. 생물학적방법은 바이오매스를 기질로 이용하여 효모(*S. cerevisiae*, *S. uvarum* 등)나 박테리아(bacteria)등의 미생물로 발효시켜 에탄올을 생산한다. 전분을 원료로 하는 경우에는 산이나 전분분해효소인 아밀라아제(amyase)를 이용하여 먼저 전분을 포도당으로 전환하여 에탄올을 생성하게 된다. 바이오매스로부터 얻어진 에탄올은 휘발유나 혼합연료(gasohol)의 형태, 산화물(ETBE, Ethyl Tertiary Buthyl Ether)의 혼합연료 혹은 수화에탄올(에탄올 95% + 물 5%)로 기존의 내연기관에 거의 완벽하게 사용될 수 있으며, 공연비(Air/Fuel ratio)를 낮게 유지할 수 있으며, 또한 증발잠열이 높고, 옥탄가가 높으며 화염온도는 낮다는 등의 수송용 대체연료로서 아주 우수한 특성을 가지고 있다.

바이오에탄올을 생산하기 위한 해양조류 바이오매스원 중 갈조류는 리그닌(lignin)성분이 없을 뿐만 아니라 셀룰로오스(cellulose) 함량도 낮다. 따라서 육상식물에 비해 갈조류는 생물학적으로 분해가 더 쉬운 장점이 있다. 그리고 갈조류의 세포벽 다당류는 D-mannuronic acid(M)와 L-guluronic acid(G)가 여러 가지 비율로 결합된 polyuronide다당인 알긴산(alginate)과 갈조류의 조체를 잘게 썰거나 파쇄하면 표면에 분비하는 세포간 점질물인 후코이단으로 구성되어 있고 줄기 등의 생장이 왕성한 부분과 계절적으로 생장이 왕성한 때는 함유량이 적으나 성숙기에는 건조한 조체의 약 20%가

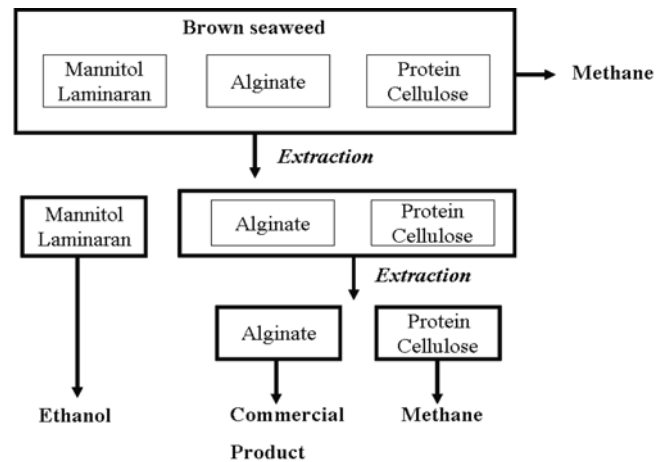


Fig. 5. Proposed utilization of different fractions of brown seaweed.

될 때도 있는 저장다당류인 라미나란(laminaran)으로 구성된다. 결국 바이오에탄올은 해양바이오매스인 갈조류와 같은 유기물을 혐기 조건하에 분해하면 생산 할 수 있다.

갈조류의 구성성분 중 복잡한 구조로 이루어진 알긴산을 에탄올 생산을 위한 기질로 직접 이용하기에는 어려운 점이 있지만 만니톨(mannitol)과 라미나란 같은 탄수화물들은 에탄올 생산을 위한 기질로 이용 가능하다. 또한 갈조류로부터 추출된 알긴산은 경제적으로 가치가 높아 산업적으로 유용하게 이용되고 있지만 만니톨과 라미나란은 부산물로 취급받고 있는 실정이다. 그래서 만니톨과 라미나란을 바이오에탄올 생산의 기질로 이용할 경우 유효자원의 회수라는 측면에서 보면 상당한 의미가 있다(Fig. 5).

일본에서는 현재 바이오에탄올을 사탕수수, 옥수수 등 식물을 원료로 하여 생산되고 있고, 도쿄 해양대와 미쯔비시 종합연구소를 중심으로 미쯔비시 중공업이 참가한 연구 그룹이 양식 해조류에서 석유 대체연료로 주목받고 있는 바이오에탄올을 대량 생산하는 구상(일본 내에 1만 km²의 양식어장을 설치하여 연간 2천만 kl의 바이오에탄올을 해조류에서 생산)을 제안하여 해조류를 발효시켜 만든다는 아이디어는 있었으나 아직 실행에 이르지 못한 실정이다.

6-2. 바이오디젤(biodiesel)

현재 바이오디젤 생산연구는 많은 양의 오일을 축적할 수 있는 해양조류를 이용한 미국의 국립에너지재생연구소(NREL) 프로젝트에 초점이 맞추어져 있다[38]. 이 프로젝트에서는 미세조류의 오일 생산 능력을 연구하기 위해 약 3,000종의 미세조류를 미대륙 북서지역과 동남지역 및 하와이 연안에서 수집하여 연구가 진행되었다. 그러나 거의 10년간 해조류를 이용하여 바이오디젤을 제조하는 연구를 수행하였으나 원유의 가격이 해조류를 이용하여 바이오 오일을 만드는 가격 경쟁력과 비교하여 훨씬 더 낮았기 때문에 국립에너지재생연구소 프로젝트는 1996년 종료되었다. 그런데 최근 오일 가격의 급등으로 인해 국립에너지재생연구소는 다시 연구에 착수하였다고 국립에너지재생연구소 과학자인 에릭 자비스(Eric Jarvis)는 밝혔다. 국립에너지재생연구소 프로젝트의 주요 테마는 많은 양의 오일을 축적하는 조류를 탐색하는 것이었고 바이오디젤을 생산하기 위한 우수한 잠재력을 가지는 여러 종의 미세조류를 확인하였다. 많은 양의 오일을 함유하는 것으로 확인된 여러 미세조류를 Table 10에 나타내었다.

Table 10. Oil content in selected microalgal species

Species	Oil content (% dw)	References
<i>Ankistrodesmus TR-87</i>	28-40	[39]
<i>Botryococcus braunii</i>	29-75	[40,41]
<i>Chlorella sp.</i>	29	[41]
<i>Chlorella protothecoides</i> (autotrophic/ heterotrophic)	15-55	[42]
<i>Cyclotella DI-35</i>	42	[41]
<i>Dunaliella tertiolecta</i>	36-42	[43,44]
<i>Hantzschia DI-160</i>	66	[41]
<i>Isochrysis sp.</i>	7-33	[41,45]
<i>Nannochloris</i>	31 (6-63)	[41,42,46]
<i>Nannochloropsis</i>	46 (31-68)	[41,47]
<i>Nitzschia TR-114</i>	28-50	[48]
<i>Phaeodactylum tricorutum</i>	31	[41]
<i>Scenedesmus TR-84</i>	45	[41]
<i>Stichococcus</i>	33 (9-59)	[41]
<i>Traselmis suecica</i>	15-32	[12,41,49]
<i>Thalassiosira pseudonana</i>	(21-31)	[50]

해양조류는 글리세롤에 3개의 지방산이 결합된 골격을 가지는 트리아실글리세롤로 구성된 많은 양의 오일을 축적한다. 지방산은 길이가 서로 다른 포화 또는 불포화 탄소 사슬이고 특히 탄소 개수가 16개 또는 18개의 단일 불포화 지방산일 때가 바이오디젤을 생산하기에 가장 적합하다. 이러한 관점에서 볼 때 매우 긴 탄소사슬을 가지는 다중불포화지방산들은 산화를 증가시킴으로 바이오디젤 생산에 적합하지 않다. 그러나 조류 오일의 불포화는 부분 촉매 수소화(partial catalytic hydrogenation) 기술을 적용하여 감소시킬 수 있다[51, 52].

이와 같은 기술은 식물성 오일로부터 마가린을 만들 때 이용되는 기술이기도 하다. 조류로부터 추출된 오일은 지방산 메틸에스테르를 만들기 위해 알콜과 산 또는 염기와 혼합되어져 에스테르화 반응을 통해 바이오디젤로 전환되어진다[12]. 미세조류를 이용하여 생산된 바이오디젤은 1 kg 당 1유로에도 미치지 못한다. 이 같은 바이오디젤의 낮은 판매 가격이 단점으로 지적되고 있다. 그린퓨얼사(GreenFuel Technologies Corporation)의 공정개발 부사장인 John Lewnard에 따르면 미세조류를 이용한 바이오디젤을 생산이 상업적으로 가격 경쟁력을 가지기 위해서는 하루에 1 m²당 약 100 g의 미세조류가 생산되어야 한다고 말한바 있다[53]. 그러나 미국 에너지국(DOE)의 지원으로 이루어진 해양생물 프로그램에 따르면 John Lewnard가 주장한 미세조류 생산량은 기존의 생산량의 약 3배에 달한다고 말한다. 하지만 기존의 석유로부터 생산되는 디젤연료와 경쟁하기 위해서 미세조류로부터의 바이오디젤 생산은 현실적인 경제성을 해결해야 하므로 이처럼 많은 양의 미세조류를 생산하기 위한 도전은 매우 의미 있는 일이다[12].

6-3. 바이오메탄(biomethane)

혐기적 조건하에 메탄을 생성하는 일련의 과정은 크게 세 단계로 구분할 수 있다. 첫째 단계는 복합 유기물이 가수분해 되고 고리가 긴 유기산 및 알코올, 수소, 이산화탄소 등을 생성하는 단계이다. 그 다음 단계는 산생성균들에 의해 첫째 단계에서의 생성물들을 분해하여 아세트산, 수소, 이산화탄소를 생성하는 산 생성 단계이다. 마지막으로 세 번째 단계에서는 아세트산을 분해하여 메탄 및 이산화탄소를 생성하거나 이산화탄소와 수소를 메탄으로 전환시키게 된다.

가수분해는 여러 종류의 미생물들이 분비하는 셀로비오스(cellobiose), 아밀라아제, 프로테아제(protease) 등의 체외효소(extracellular enzymes)에 의해 고분자 물질이 당, 지방산, 아미노산, 글리세롤과 같은 가용성 저분자 물질로 분해되는 과정으로 이 과정에 의해서 고분자 물질이 미생물의 세포막을 통해 체내로 흡수되어 대사와 성장 에너지원으로 이용된다. 이 가수분해 반응은 pH, 온도뿐만 아니라 고형물의 형태, 크기 및 잔류농도에 영향을 받고, 가수분해 반응의 산물인 유기산에 의해서도 저해를 받는 등의 복잡한 반응으로 전체 혐기성 소화 반응의 율속단계(rate limiting step)라고 알려져 있다[54].

혐기성 소화는 여러 종류의 미생물이 관여하는 복잡한 생물학적 반응으로 알려져 있다. 이들 다양한 미생물들은 크게 산생성균(acid forming bacteria)과 메탄생성균(methanogenic bacteria)으로 나눌 수 있다. 산생성균은 주로 통성 혐기성 미생물(facultative anaerobe)로 구성되어 있는데 이들은 주로 단백질, 탄수화물, 리그닌, 지방산 등의 복잡한 유기물을 비교적 간단한 유기물로 전환시키는 일을 담당한다. 이때 생성되는 주된 생성물들은 acetate, propionate, butyrate, valeric acid 등의 휘발산과 lactate, ethanol, carbon dioxide 등이다. 메탄생성균은 절대 혐기성 미생물(strict anaerobe)로 이들은 산생성균이 만들어 낸 생성물들을 이용하여 혐기성 소화의 최종 산물인 메탄가스와 이산화탄소를 생성한다. Fig. 6은 이들 산생성균과 메탄생성균이 관여하는 혐기성 소화의 전체 반응을 간략하게 나타낸 것이다.

바이오메탄을 생산하기 위해 주로 이용되고 있는 나무와 풀, 유기성 고형 폐수 같은 기존의 바이오매스보다 해양 바이오매스인 미세조류와 거대조류는 보다 더 높은 잠재력을 가진다. 거대조류의 성장속도는 육상식물보다 더 빠르다. 하지만 영양분의 이용도에 따라 성장속도가 제한받기도 한다. 해양에서는 심해로부터 영양염이 풍부한 심해수가 상승하기 때문에 충분한 영양분의 공급은 이를 통해 자연적으로 획득되는 장점이 있지만 수수나 포플러 바이오매스를 이용하여 메탄가스를 생산할 때 보다 다시마류를 이용할 경우 생산 비용이 약 2~10배 더 높은 단점이 있다고 보고된다(Table 11).

바다를 이용한 대규모 거대조류의 생산은 이 같은 경제적 측면에서 불리함으로 작용함에도 불구하고 꼬시래기속과 다시마속 같은 거대조류는 메탄가스를 생산하기 위한 탁월한 기질로 알려져 있다[58, 59]. 또한 음식폐기물을 생물학적 방법을 통해 메탄가스를 생산할 경우에도 높은 수율을 보이고 있다[60, 61]. 결론적으로 생물학적 방법을 이용한 메탄가스 생산에 음식폐기물과 거대조류를 함

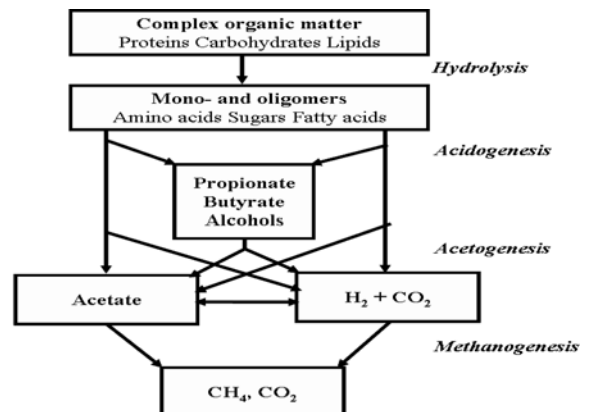


Fig. 6. Anaerobic degradation of organic matter to CO₂ and CH₄[55].

Table 11. Production costs of methane produced from different feed stocks[30]

Energy crop	Methane cost US\$ GJ ⁻¹	References
Sorghum	6 - 8	[56]
Poplar	3 - 7	[56]
Kelp	3 - 14	[57]

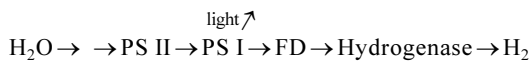
Table 12. Yield of methane produced from different feedstocks

Biomass	Methane yield (m ³ kg ⁻¹)	References
<i>Laminaria</i> sp.	0.26 - 0.28	[59]
<i>Gracilaria</i> sp.	0.28 - 0.4	[58]
<i>Sargassum</i> sp.	0.12 - 0.19	[58]
<i>Macrocystis</i> (kelp)	0.39 - 0.41	[59]
Water hyacinth	0.13 - 0.21	[59]
Sorghum	0.26 - 0.39	[59]
Poplar	0.23 - 0.32	[59]
Food waste	0.54	[59]

깨 기질로 이용할 경우 생산비용을 낮출 수 있으므로 가장 이상적인 접근이 될 수 있을 것이다. 다양한 해양조류 및 여러 바이오매스로부터의 메탄 생산 수율을 나타내었다(Table 12).

6-4. 바이오수소(biohydrogen)

물, 유기성 폐기물, 바이오매스로부터 태양에너지와 미생물을 이용하여 수소를 생산할 수 있는 생물기술은 환경친화적 에너지 생산 기술로 주목 받고 있다. 광합성 또는 혐기 수소생산 미생물 분리와 개선 연구가 1940년대 후반부터 진행되었으나 연구 규모가 실험실적 규모에 오랫동안 머물러 있었다[62]. 1970년대 에너지 위기 이후 화석연료를 대체할 수 있는 에너지로써 수소생산 연구가 초점을 받기 시작했으며, 이 시기에 생물학적 수소생산 연구도 활성화되었다[63]. 최근에는 조류를 활용한 수소 생산 가능성에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다[64-67]. 본 단락에서는 조류를 이용한 직접적인 수소생산에 대해 설명한다. 식물이나 조류는 광합성 작용에 의해서 대사 중에 산소와 환원체를 만드는데(Fig. 7), 이때 산소는 물로부터 발생하며, 식물은 공기 중의 이산화탄소를 탄수화물로 환원하여 식물체내에 축적하지만, 수소생산을 촉매하는 효소인 hydrogenase가 존재하지 않으므로 양성자(H⁺)를 수소로 환원하지는 않는다. 그러나 조류는 이산화탄소를 고정함과 동시에 양성자를 수소로 환원할 수도 있다[68].



식 (1)에서와 같이 물로부터 수소를 직접적으로 조류의 광합성 기작에 의해 발생하는 현상은 일시적이고, 실험실 조건에서 관찰된다. 즉 대부분의 조류는 광합성 조건에서 성장한 후에 혐기적 조건에서 일정시간 적응시키면 hydrogenase가 합성되며, 일정기간 동안 활성화되어 수소가 발생하는데, 이러한 현상은 광합성 동안에 축적된 유기물의 분해 작용에 의한 것이다. 그러나 다시 정상적인 광합성 작용이 생기면 이산화탄소를 고정하고, 이 과정 중에서 물로부터 산소가 발생하여 수소생산은 정지한다. 이와 같이 광합성 분해에 의한 직접적인 물 분해 수소생산은 광합성 작용에 의해 발생하는 산소에 의해 저해작용을 받는다. 즉 이 반응에 관여하는 hydrogenase와 반응 자체가 동시에 발생하는 산소에 매우 민감하여 수소 발생

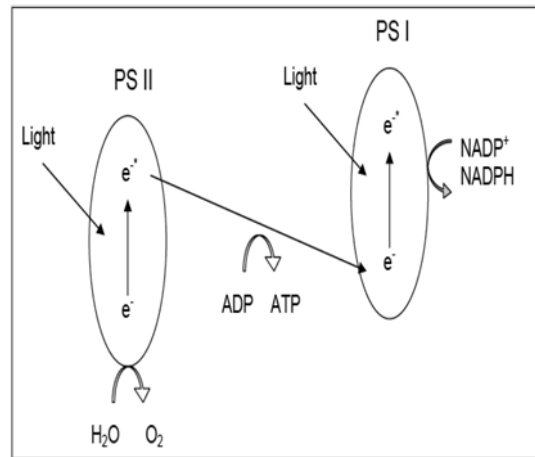


Fig. 7. Photosynthesis process showing the two Photosystem (PS I and PS II) involved in splitting water and the production of ATP and NADPH.

을 방해하기 때문이다. 이러한 과민반응을 극복하기 위하여 실험실적으로는 산소가 발생 되는대로 반응기 내에서 없애버리는 기술을 시도하였으나 대량 생산시설에서는 실질적인 처리 방법이 되지 못하고 있다. 그래서 미생물 자체가 태양광을 최대로 변환할 수 있는 환원력과 아울러 수소생산 효소인 hydrogenase까지 효율적으로 전달될 수 있는 미생물기술이 개발되어야 한다.

또한 저렴한 생물반응시설에 의해 물과 태양광으로부터 효율적인 생물 수소생산 반응을 제공하고 동시에 생성된 수소를 최대한 모을 수 있는 기술적인 개발이 필요하다. 즉 거대 광배양기(huge photobioreactor)를 이용하여 직접적으로 수소를 생산할 경우 계절과 날씨의 변동에 영향을 거의 받지 않고 연속적으로 수소를 생산할 수 있는 배양장치와 생산된 수소를 안전하게 저장할 수 있는 저장장치를 고안하기 위한 비용적인 면을 고려해야한다는 것이다. 만약 광배양기(photobioreactor)에 의한 비용을 m²당 약 1달러 정도를 감소시킬 수 있다면 현재 미국 에너지국에서 목표로 하는 재생 수소 가스의 판매가격인 2.60 달러에는 조금 못 미치지만 최저 수소 판매가격인 약 2.83 달러의 가격으로 기존의 수소 수송관을 통해 수송할 수 있다고 예측한다[69].

7. 해조류를 이용한 바이오에너지 연구 현황

해조류를 이용하여 바이오연료를 제조하는 연구는 많은 나라에서 진행되고 있다. 스웨덴의 칼머대(University of Kalmar)를 비롯한 공동 연구진은 해조류는 햇빛을 이용, 성장하는 유기체로서 육지의 식물과 마찬가지로 엽록소를 통해 광합성을 하는 메커니즘과 동일한 활동을 하는 것으로 인식되었다고 말했다. 이는 해조류를 바이오연료로 활용할 수 있다는 것을 의미한다. 미국 뉴멕시코 주 앨버커키(Albuquerque)의 샌디아국립연구소(Sandia National Laboratories)의 바이오연료와 바이오에너지 프로그램 기술 책임자인 케이트 앤드루스-스크레이머(Kathe Andrews-Cramer)는 해조류가 거대한 양의 오일을 만들어 낼 가능성을 지니고 있다고 말한다. 그는 해조류에서 추출한 오일을 이용하여 모든 디젤 연료를 대체할 수 있게 될 것으로 전망했다. 해조류의 에너지 전환에 대한 연구결과를 보면, 1 리터의 미세 해조류에서 약 100 g의 기름을 추출할 수 있음이 증명되었다.

이는 유채, 해바라기와 같은 식물들보다 30배 높은 것이다. 기업에서도 해조류를 이용한 바이오 오일 생산에 관심을 보이고 있다. 펠트로썬 주식회사(PetroSun, Inc.)는 알게바이오퓨얼즈(Algae BioFuels)사가 해조류를 이용하는 바이오연료 생산 기술의 라이선스를 ETC 에너지사에 주었다고 발표했다. 이 계약은 상업용 규모로 해조류를 키우는 기술과, 해조 기름으로부터 바이오 디젤을 정제하는 기술을 포함한다. 프랑스에서는 3년 동안 280만 유로의 예산을 사머시(Shamash) 프로그램에 배정하여 해조류 활용에 대한 활발한 연구를 추진 중이다. 사머시 프로그램은 국립 연구청(ANR)이 실현 가능한 생산모델의 개발을 위해서 프랑스 대학의 7개 연구팀으로 구성된 것으로 연구팀은 올리비에 베르나르(Olivier Bernard)에 의해 연계되고 중소기업 발코바이오(Valcobia)와 결합하여 미세해초에서 나온 지방산의 생산과 이를 바이오 연료로 변형하는 작업에 수익성을 주는 연구를 수행한다. 이 프로그램은 프로방스-알프스-코르디크 지방의 “바다” 경쟁지점에 의해 인증을 받은 후, 2006년 12월에 발족하였다[70].

현재 한국은 자동차용 바이오 에탄올 사용은 도입조차 되지도 않은 실정이며, 현재 실증 평가 단계에 있다. 반면, 바이오 디젤의 경우는 정부가 지난해 정유사들로 하여금 의무적으로 경유에 0.5%(B0.5) 혼합사용하도록 하였고, 올해는 작년보다 2배 증가한 1%(B1; 1%의 바이오 디젤과 99%의 경유가 혼합된 자동차 연료)까지 혼합하여 사용하도록 시행 할 계획이다. 세계 석유수입 5위이면서 온실가스(greenhouse gas) 배출 10위인 국가로서는 상당히 소극적인 대응처럼 보인다. 참고로, 바이오디젤의 최강국인 유럽과 동남아시아 국가에서는 현재 5~20%(B5-B20)까지 섞어 사용하고 있는 실정이다. 전통적으로 세계 최대의 바이오디젤 생산국은 유럽공동체(European Union) 국가다. 이 중 독일이 단연 최대 생산국이다. 독일은 유채(rapeseed)에서 추출한 기름으로부터 바이오디젤을 생산하고 있으며, 식용이 아닌 연료용으로 406,000 헥타르(hectares) 규모의 유채를 재배하고 있다. 이 면적으로 약 407,000톤 정도의 기름을 생산할 수 있다. 이 중 300,000톤 정도가 바이오디젤 원료로 사용되고 있다[71]. 이런 유럽의 바이오디젤 시장이 동남아시아와 미국의 가세로 점차 예전의 최대 생산국의 면모를 잃어가고 있다. 최근, 아시아의 독일이라 불리는 말레이시아와 인도네시아가 바이오디젤 시장에 혜성처럼 나타난 국가들이다. 말레이시아는 아시아 국가 중 최고 생산국이며 수출국이다. 말레이시아 정부는 오는 2010년까지 바이오디젤 2천 1백만 톤 생산을 목표로 하고 있으며, 이 양은 무려 현재보다 6배 정도 많은 양에 달한다. 이처럼 말레이시아가 바이오디젤 강국이 될 수 있었던 첫 번째 요인은 국토와 기후조건(tropical rainforest region)의 혜택으로 인해 원료인 팜 오일(palm oil)을 아주 손쉽게 재배할 수 있는 천혜의 환경 때문이다. 한국은 기후조건상 동남아시아처럼 열대성 식물을 이용할 수 없다. 하지만 자연 혜택을 최대한 활용할 수 있는 최적의 조건을 가진 아시아 국가 중 하나임은 틀림없다. 즉, 해양바이오매스를 이용한 바이오에너지 생산이다. 현실적으로 바이오 연료개발에서 원료의 경제적 수급이 차지하는 비중은 전 공정비용에 상당한 부분을 차지한다. 이런 관점에서 바다가 3면인 우리나라는 상당히 희망적이지 아닐 수 없다. 해조류(marine algae)는 우선 물과 햇빛만 있다면 어디에서나 양식이 가능하고, 일년에 4~5회 정도 수확이 가능하며, 뜨거운 햇빛을 자랑하는 사막지형에서도 가능하다고 한다. 그리고 바닷물에서의 해조류 성장속도는 민물보다 훨씬 뛰어나다는 점은 더욱더 한국으로서는 매력적인 원료다. 미국과는 달리 바다 식물을 주로 식용으로

이용하는 한국은 세계에서 중국 다음으로 해산물 양식 강대국이다. 이런 기술적 노하우(knowhow)가 어촌지역의 부가창출 뿐만 아니라 고용창출 면에서도 큰 경제 효과를 기대 할 수 있다.

현재 미국에서 생산중인 바이오디젤 원료로 사용하고 있는 콩기름(soybeans)은 연간 에이크(acre)당 190 리터(liter)의 오일을 생산할 수 있는 반면 해조류(marine algae)는 연간 15,000 리터를 생산할 수 있다고 한다. 특히나 동남아시아 지역의 팜 오일과 비교하면 상당히 친환경적인 바이오매스(biomass)라는 점이다[38]. 말레이시아와 인도네시아 지역은 바이오디젤 생산을 위해 엄청난 열대 우림 지역(tropical rain forest) 지역을 훼손하면서 팜 오일 재배를 추진 중인 상태다. 이는 무수한 이산화탄소를 대기 중으로 배출하는 결과를 초래함과 동시에 이 지역 생태계에 아주 치명적이다. 다른 한편으로는 보다 적극적인 바이오 연료 개발을 통해 현재 지구가 직면한 지구온난화 문제, 그로 인한 자연생태계 변화를 바쁜 시일 내 해결해야 한다는 일부 과학자들의 주장도 제기 되고 있다. 따라서 상충관계(trade-off) 측면을 고려해서, 보다 효율적이면서 친환경적인 원료공급과 재배가 선행되어야 한다면 해조류를 이용한 바이오디젤 생산은 현재로서는 친환경적 대체에너지로 손색이 없다. 미국 정부는 기존 가솔린 사용량을 오는 2017년까지 20% 감소하는 정책을 내 놓았다. 20%에 해당하는 가솔린을 재생에너지로 대체 할 계획인 것이다. 이는 무려 바이오 연료 1천 3백억 리터(liter)에 해당하는 양이다. 미국에서의 주 원료인 옥수수(corn)와 콩(soybean)으로는 20%에 해당하는 바이오 연료를 대체하기란 현실적으로 불가능한 실정이다. 따라서 미국에서도 옥수수를 대신할 원료로 목재뿐만 아니라 해조류를 이용한 바이오 연료 개발에 상당한 관심과 움직임이 보이고 있다. 미국 또한 시작단계의 기술에 지나지 않는 것으로 보인다. 한국은 지금부터라도 국가사업차원에서 보다 적극적인 자세로 대응한다면 독자적인 기술선점의 좋은 기회가 될 수 있을 것으로 기대 한다. 에너지 독립성을 확보해 나가고 대체에너지를 개발하는 일은 더이상 미룰 수 없는 국가적 당면과제이다.

8. 향후 전망 및 결론

최근 기후변화협약과 환경규제 강화에 의해 친환경 특성을 가지는 에너지 신소재 및 석유를 대체할 수 있는 바이오에너지를 개발하기 위한 연구가 세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 현재까지는 주로 작물, 목재, 천연섬유 등의 식물 셀룰로오스 자원을 보강제로 이용하는 고분자 복합재료 혹은 이들 자원을 이용한 바이오 연료 제조 연구가 주로 많이 진행되고 있었다. 그러나 작물은 식량과 경쟁하며 또한 식물계 셀룰로오스는 성장하는 장소나 성장기간에 따라 특성이 많이 다르며 성장속도가 느린 단점도 가지고 있다. 따라서 성장속도가 빠르고 셀룰로오스가 풍부한 천연섬유의 선정과 육성, 재배가 필요한 연구분야로 요구되고 있다. 목재 같은 경우는 셀룰로오스 이외에 헤미셀룰로오스나 리그닌이 많이 포함되어 있기 때문에 이들을 제거하는 공정이 필요하기 때문에 경제성에서 문제가 될 수도 있다. 더욱이 2017년 까지 약 350조 갤런의 재생 연료를 생산하여 가솔린 소비의 20%를 대체하려는 부시 대통령의 목표를 달성하려면 탄수화물이 풍부한 다른 바이오매스를 찾는 등 새로운 방법이 강구되어야 한다.

이러한 문제점들을 해결하기 위한 다양한 연구와 새로운 천연자원을 찾기 위한 노력이 꾸준히 진행되고 있는 가운데 최근 해양조

류에 관심이 집중되고 있다. 해조류는 종에 따라 차이는 있지만 일반적으로 섬유질을 많이 포함하고 있는 벽면과 다양한 당류를 포함하는 물질로 채워진 내부 추출물로 되어 있다. 해조류는 목재 등 식물계 셀룰로오스보다 성장속도가 빠르고 바다에서뿐만 아니라 농작물이 자라지 않는 자투리땅에서도 키울 수 있다는 큰 장점을 가지고 있다. 특히, 해조류는 성장하는 동안에 광합성에 의해 이산화탄소를 흡수하고 폐수에서 발생하는 질소를 처리할 수 있는 능력도 있어 환경오염을 줄이는 데에도 도움을 줄 수 있다. 바이오에너지를 생산하기 위한 바이오매스원으로 해양조류를 활용하려면 기존의 농업과 임업 바이오매스에 비해 기반시설 확충을 위한 경제적인 비용문제가 불리하게 작용하긴 하지만 이산화탄소 고정화율이 월등히 우수하고 성장속도가 매우 빠른 장점을 가짐으로 바이오에너지를 생산하기 위한 새로운 바이오매스원으로서의 잠재성은 매우 크다고 할 수 있다.

감 사

본 연구는 국토해양부 marin바이오21사업의 해양바이오프로세스 연구단 연구비 지원에 의해 수행되었으며, 부산 테크노파크 신성장 동력발굴사업 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Mclaren, J. S., "Crop Biotechnology Provides an Opportunity to Develop a Sustainable Future," *Trends Biotechnol.*, **23**(7), 339-342(2005).
- Wright, L., "Worldwide Commercial Development of Bioenergy with a Focus on Energy Crop-based Projects," *Biomass and Bioenergy*, **30**(8-9), 706-714(2006).
- Agarwal, A. K., "Biofuels (Alcohols and Biodiesel) Applications as Fuels for Internal Combustion Engines," *Progr. Energ. Combust. Sci.*, **33**(3), 233-271(2007).
- Arnulf, J. W., "Status of PV Research, Solar Cell Production and Market Implementation in Japan, USA and European Union," European Commission, Joint Research Center(2002).
- McNelis, B., "The Photovoltaic Business: Manufacturers and Markets," Electricity from Sunlight, IT Power, UK(1997).
- Demirbas, A., "Progress and Recent Trends in Biofuels," *Progr. Energ. Combust. Sci.*, **33**(1), 1-8(2007).
- Gereene, N., "Growing Energy: How Biofuels can Help end America's Oil Dependence," Natural Resources Defense Council, New York(2004).
- Asif, M. and Muneer, T., "Energy Supply, Its Demand and Security Issues for Developed and Emerging Economies," *Renew. Sustain. Energ. Rev.*, **11**(7), 1388-1413(2006).
- Kang, S. H., Choi S. J. and Kim, J. W., "Analysis of the World Energy Status and Hydrogen Energy Technology R&D of Foreign Countries," *Trans. of the Korean Hydrogen and New Energy Society*, **18**(2), 216-223(2007).
- International Energy Outlook 2004, EIA (Energy Information Administration)(2004).
- Tolbert, N. E., in J. Preiss(Ed.), Regulation of atmospheric CO₂ and O₂ by photosynthetic Carbon Metabolism, Oxford University Press, Oxford, 8-33(1994).
- Chisti, Y., "Biodiesel from Microalgae," *Biotechnol. Adv.*, **25**(3), 294-306(2007).
- Huntley, M. and Redalje, D. G., "CO₂ Mitigation and Renewable Oil from Photosynthetic Microbes: A New Appraisal," *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, **12**(4), 573-608(2007).
- Li, X., Xu, H. and Wu, Q., "Large-scale Biodiesel Production from Microalga Chlorella Protothecoids through Heterotrophic Cultivation in Bioreactors," *Biotechnol. Bioeng.*, **98**(4), 764-771(2007).
- Pulz, O. and Gross, W., "Valuable Products from Biotechnology of Microalgae," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **65**(6), 635-648 (2004).
- Berndes, G., Hoogwijk, M. and Van Den Broek, R., "The Contribution of Biomass in the Future Global Energy Supply: a Review of 17 Studies," *Biomass and Bioenergy*, **25**(1), 1-28(2003).
- Kanetsuna, Y., "New and Interesting Desmids (Zygnematales, Chlorophyceae) Collected from Asia," *Phycological Research*, **50**(2), 101-113(2002).
- Mchugh, D. J., "A Guide to the Seaweed Industry," Rome, FAO. *FAO Fish. Tech. Pap.*, **441**, 105(2003).
- Arne, J., "Present and Future Needs for Algae and Algal Products," *Hydrobiologia*, **260-261**(1), 15-23(1993).
- Skjåk-Bræk, G. and Martinsen, A., in M. D. Guiry, G. Blunden (Ed.), Seaweed Resources in Europe: Uses and Potential, John Wiley & Sons, Chichester, UK, 219-257(1991).
- Kloareg, B. and Quatrano, R. S., "Structure of the Cell Walls of Marine Algae and Ecophysical Functions of the Matrix Polysaccharides," *Oceanogr. Mar. Biol. Ann. Rev.*, **26**, 259-315(1988).
- Percival, E., "The Polysaccharides of Green, Red and Brown Seaweeds: Their Basic Structure, Biosynthesis and Function," *British Phycological Journal*, **14**, 103-117(1979).
- Costanza, R., d'Arge, R., Groot, R. D., Farberk, S., Grasso, M., Hannon, B., Limburg, K., Naeem, S., O'Neill, R. V., Paruelo, J., Raskin R. G. and Suttonk, P., "The Value of World Ecosystem Services and Natural Capital," *Nature*, **387**, 253-260(1997).
- Luning, K. and Pang, S. J., "Mass Cultivation of Seaweeds: Current Aspects and Approaches," *J. Appl. Phycol.*, **15**(2-3), 115-119(2003).
- <http://seaweed.ucg.ie>.
- <http://bio.sch.ac.kr/~hwshin/STUDYDATA.htm>.
- Buck, B. H., Krause, G. and Rosenthal, H., "Extensive Open Ocean Aquaculture Development within Wind Farms in Germany: The Prospect of Offshore Co-management and Legal Constraints," *Ocean Coast. Manag.*, **47**(3-4), 95-122(2004).
- Buck, B. C. and Buchholz, C. M., "The Offshore Ring: A New System Design for the Open Ocean Aquaculture of Macroalgae," *J. Appl. Phycol.*, **16**(5), 355-369(2004).
- Reith, J. H., Deurwaarder, E. P., Hemmes, K., Curvers A. P. W. M., Brandenburg, W. and Zeeman, G., "Bio-offshore: Grootschalige Teelt Van Zeewieren in Combinatie Met Offshore Windparken in de Noordzee," ECN(2005).
- Chynoweth, D. P., "Review of Biomethane from Marine Biomass," Ph. D. Dissertation, Department of Agricultural and Biological Engineering, University of Florida, Gainesville, Florida (2002).
- Reina, G. G., "Culture Collections and Herbaria in European Countries," European Communities, Italy(1996).
- Munoz, R. and Guieysse, B., "Algal-bacterial Processes for the Treatment of Hazardous Contaminants: A Review," *Water Res.*, **40**(15), 2799-2815(2006).
- Davis, T. A., Volesky, B. and Mucci, A., "A Review of the Bio-

- chemistry of Heavy Metal Biosorption by Brown Algae," *Water Res.*, **37**(18), 4311-4330(2003).
34. Lee, M. G., Lim, J. H. and Kam S. K., "Biosorption Characteristics in the Mixed Heavy Metal Solution by Biosorbents of Marine Brown Algae," *Korean J. Chem. Eng.*, **19**(2), 277-284(2002).
 35. Yu, Q. and Kaewsarn, P., "A Model for pH Dependent Equilibrium of Heavy Metal Biosorption," *Korean J. Chem. Eng.*, **16**(6), 753-757(1999).
 36. Lee, J. S. and Lee, J. P., "Review of Advances in Biological CO₂ Mitigation Technology," *Biotechnol. Bioproc. Eng.*, **8**(6), 354-359 (2003).
 37. Slesser, M. and Lewis, C., *Biological energy resources*, John Wiley & Sons, New York(1979).
 38. Sheehan, J., Dunahay, T., Benemann, J. and Roessler, P., "A Look Back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program-biodiesel from Algae," NREL/TP-580-24190. U.S. Department of Energy's Office of Fuels Development(1998).
 39. Ben-Amotz, A. and Tornabene, T. G., "Chemical Profile of Selected Species of Macroalgae with Emphasis on Lipids," *J. Phycol.*, **21**(1), 72-81(1985).
 40. Banerjee, A., Sharma, R., Chisti, Y. and Banerjee, U. C., "Botryococcus Braunii: A Renewable Source of Hydrocarbons and Other Chemicals," *Crit. Rev. Biotechnol.*, **22**(33), 245-279(2002).
 41. Metzger, P. and Largeau, C., "Botryococcus Braunii: A Rich Source for Hydrocarbons and Related Ether Lipids," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **66**(5), 486-496(2005).
 42. Xu, H., Miao, X. L. and Wu, Q., "High Quality Biodiesel Production from a Microalga Chlorella Protothecoides by Heterotrophic Growth in Fermenters," *J. Biotechnol.*, **126**(4), 499-507 (2006).
 43. Kishimoto, M., Okakura, T., Nagashima, H., Minowa, T., Yokoyama, S. and Yamaberi, K., "CO₂ Fixation and Oil Production Using Microalgae," *J. Ferment. Bioengin.* **78**(6), 479-482(1994).
 44. Tsukahara, K. and Sawayama, S., "Liquid Fuel Production Using Microalgae," *J. Jpn. Petrol. Inst.*, **48**(5), 251-259(2005).
 45. Valenzuela-Espinoza, E., Millan-Nunez, R. and Nunez-Cabrero, F., "Protein, Carbohydrate, Lipid and Chlorophyll Alpha Content in Isochrysis Aff. Galbana (Clone T-Iso) Cultured with a Low Cost Alternative to the f/2 Medium," *Aquac. Eng.*, **25**(4), 207-216(2002).
 46. Negoro, M., Shioji, N., Miyamoto, K. and Miura, Y., "Growth of Microalgae in High CO₂ Gas and Effects of Sox and Nox," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **28-9**, 877-886(1991).
 47. Hu, Q., Zhang, C. and Sommerfeld, M., "Biodiesel from Algae: Lessons Learned Over the Past 60 years and Future Perspectives," *J. Phycol.*, **42**(12), 1-48(2006).
 48. Kyle, D. J. and Gladue, R. M., "Eicosapentaenoic Acids and Methods for Their Production," U. S. Patent No. 5244921(1991).
 49. Zittelli, G. C., Rodolfi, L., Biondi, N. and Tredici, M. R., "Productivity and Photosynthetic Efficiency of Outdoor Cultures of Tetraselmis Suecica in Annular Columns," *Aquaculture*, **261**(3), 932-943(2006).
 50. Brown, M. R., Dunstan, G. A., Norwood, S. J. and Miller, K. A., "Effects of Harvested Stage and Light on the Biochemical Composition of the Diatom *Thalassiosira pseudonana*," *J. Phycol.*, **32**(1), 64-73(1996).
 51. Dijkstra, A. J., "Revisiting the Formation of Trans Isomers During Partial Hydrogenation of Triacylglycerol Oils," *Eur. J. Lipid Sci. Tech.*, **108**(33), 249-264(2006).
 52. Jang, E. S., Jung, M. Y. and Min, D. B., "Hydrogenation for Low Trans and High Conjugated Fatty Acids," *Compr. Rev. Food Sci. Food Saf.*, **4**(1), 22-30(2005).
 53. Ross, P. E., "Grow Your Own," *Am. Sci.*, **293**(6), 25-26(2005).
 54. McInerney, M. J. and Bryant, M. P., in D. L. Wise(Ed.), "Fuel Gas Production from Biomass: Review of Methane Fermentation Fundamentals," CRC Press, Boca Raton, Florida(1983).
 55. Brock, T. D., Madigan, M. T., Martinko, J. M. and Parker, J., "Biology of Microorganisms," Prentice Hall, USA(1994).
 56. Legrand, R., "Methane From Biomass Systems Analysis and CO₂ Abatement Potential," *Biomass and Bioenergy*, **5**(3-4), 301-316(1993).
 57. Bird, K. T., in K. T. Bird and P. H. Benson(Eds.), *Seaweed Cultivation for Renewable Resources: Cost Analyses of Energy from Marine Biomass*, Elsevier, Amsterdam, 327-350(1987).
 58. Bird, K. T., Chynoweth, D. P. and Jerger, D. E., "Effects of Marine Algal Proximate Composition on Methane Yields," *J. Appl. Phycol.*, **2**(3), 207-213(1990).
 59. Chynoweth, D. P., Turick, C. E., Owens, J. M., Jerger, D. E. and Peck, M. W., "Biochemical Methane Potential of Biomass and Waste Feedstocks," *Biomass and Bioenergy*, **5**(1), 95-111(1993).
 60. Kerner, K. N., Hanssen, J. F. and Pedersen, T. A., "Anaerobic Digestion of Waste Sludges from the Algalinate Extraction Process," *Bioresour. Technol.*, **37**(1), 17-24(1991).
 61. Morand, P., Carpentier, B., Charlier, R. H., Maze, J., Orlandini, M., Plunkett, B. A., de Waart, J., in M. D. Guiry and G. Blunden (Eds), *Seaweed Resources in Europe: Bioconversion of Seaweeds*, John Wiley & Sons, Chichester, 95-148(1991).
 62. Markov, S. A., Bazin, M. J. and Hall D. O., "Advances in Biochem," *Eng. Biotech.*, **52**(1), 60-81(1995).
 63. Marz, *Bakterien-Energiekraftwerke der Zukunft*, Umwelt Magazin, pp53(1998).
 64. Levin, D. B., Pitt, L. and Love, M., "Biohydrogen Production: Prospects and Limitations to Practical Application," *Int. J. Hydrogen Energy*, **29**(2), 173-185(2004).
 65. Prince, R. C. and Khesghi, H. S., "The Photobiological Production of Hydrogen: Potential Efficiency and Effectiveness as a Renewable Fuel," *Crit. Rev. Microbiol.*, **31**(1), 19-31(2005).
 66. Rupprecht, J., Hankamer, B., Mussgnug, J. H., Ananyev, G., Dismukes, G. C. and Kruse, O., "Perspectives and Advances of Biological H₂ Production in Microorganisms," *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **72**(3) 442-449(2006).
 67. Hankammer, B., Lehr, F., Rupprecht, J., Mussgnug, J. H., Posten, C. and Kruse, O., *Photosynthetic Biomass and H₂ Production by Green Algae: from Bioengineering to Bioreactor Scale up*, *Physiologia Plantarum* in Press(2007).
 68. Benemann, J. R. and Weare, N. M., "Hydrogen Evolution by Nitrogen Fixing Anabaena Cylindrica Cultures," *Science*, **184**(4133), 174-175(1974).
 69. Amos, W. A., "Updated Cost Analysis of Photobiological Hydrogen Production from *Chlamydomonas reinhardtii* Green Algae," NREL/MP-560-35593. National Renewable Energy Laboratory(2004).
 70. <http://www.renewableenergyaccess.com>.
 71. Canakci, M. and Sanli, H., "Biodiesel Production from Various Feedstocks and Their Effects on the Fuel Properties," *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.*, **35**(5), 431-441(2008).