KSBB Journal 2010. 25: 109~115 KSBB

미세조류 해양 바이오매스를 이용한 바이오디젤 생산기술

조병훈[1] · 차형준[1,2]*

[1]포항공과대학교 시스템생명공학부, [2]화학공학과

Biodiesel Production Using Microalgal Marine Biomass

Jo, Byung Hoon[1] and Cha, Hyung Joon[1,2]*

[1]School of Interdisciplinary Bioscience and Bioengineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea
[2]Department of Chemical Engineering, Pohang University of Science and Technology, Pohang 790-784, Korea

Abstract The demand of biodiesel that is a renewable, alternative fuel for fossil-based petrodiesel seems to keep increasing. Exploiting lipids of microalgae as a raw material for biodiesel is already technically feasible. To realize economical production of microalgal biodiesel, several factors or strategies should be addressed and improved. Especially, researches on improvement of lipid synthesis by genetic or metabolic engineering are now in early stage, and prospects of this field are bright, requiring concerns and interests of many researchers to put practical use of microalgal biodiesel forward.

Keywords: biodiesel, microalgae, marine biomass

서 론

화석연료 기반의 산업이 현재 큰 위기를 맞고 있다. 이는 화석연료는 결국 고갈된다는 사실과 이에 따른 공급 불안정 그리고 대기 중 이산화탄소 농도 증가 등의 문제에 기인한다. 그러므로 탄소 중립적 (carbon neutral)이고, 재생가능한 대체에너지가 필요하며 이는 환경적, 경제적으로 지속 가능한 대안이어야 한다. 신 재생에너지 중 바이오디젤 (biodiesel)은 운송 연료로서 커다란 주목을 받고 있다. 그러나 일반적으로 유지 식물로부터 생산이 되는 바이오디젤로는 현재 운송 연료의 극히 일부만을 대체하고 있으며, 세계적인 운송 연료의 수요를 충족시키기 위해서 다양한 장점을 가지고 있는 해양바이오매스 (marine biomass)인 미세조류 (microalgae)를 바이오디젤의 원료로서 사용하는 것이 최근에 대안으로 많은 사람들이 관심을 가지고 있다. 하지만, 이를 실용화하기 위해서는 생산성을 높이기 위한 노력이 더욱 필요하며, 아직 더 많은 집중된 연구가 요구된다.

***Corresponding author**
Tel: +82-54-279-2280, Fax: +82-54-279-5528
e-mail: hjcha@postech.ac.kr

바이오디젤

화석 연료 기반의 산업이 석유 파동 등의 위기로 흔들리고, 전지구적 대기 중 이산화탄소 농도의 증가와 같은 심각한 환경 문제의 대두로 경제 활동의 기반이 되는 화석연료를 대체하는 신재생 대체 에너지를 개발하려는 노력이 세계적으로 일어나게 되었다. 19세기 후반에 디젤 엔진을 개발한 루돌프 디젤에 의해 식물 유지를 디젤 엔진의 연료로 사용하려는 시도가 있었고 성공했지만, 이러한 시도는 널리 이용되지 못하였으며 석유의 등장과 함께 효용을 상실했다. 그 뒤 석유산업 기반의 문제인 고유가 및 지구 온난화 등 환경 문제가 대두되며 1980년대 유럽 등지에서 식물성 유지를 사용하려는 노력이 다시 일어나게 되었으나 이러한 가공하지 않은 식물성 유지는 그간 개선되어 온 디젤 엔진에 바로 사용이 불가능하다는 커다란 문제점에 부닥치게 되었다. 1990년대 초 식물성 유지를 에스테르 반응으로 만든 바이오디젤이 출현하고, 이로써 대체에너지로서의 바이오디젤에 대한 연구가 가속화되었다. 바이오디젤은 대체에너지로서 다음과 같은 많은 장점들을 지닌다 [1-3]. a) 기본적으로 화석 연료가 아니고, 에너지의 근원은 태양 에너지이므로 고갈 문제가 없고, 폐식용유등의 폐자원도 활용

이 가능하다 [4]. b) 바이오디젤은 탄소 함유 연료이지만 연소 시 발생되는 CO_2는 식물 또는 조류의 광합성 작용으로 회수되므로 재생 가능하며 탄소 중립적이다. c) THC, SOx, PM 등의 공해 물질 배출이 적다. d) 현재 사용하는 자동차의 엔진 개조가 거의 불필요하고 기존의 연료 인프라를 활용할 수 있다. e) 자연 분해도가 높아서 환경에 유출되어도 오염이 적다.

바이오디젤은 식물성 유지, 동물성 지방, 폐식용유 또는 미세조류 등을 원료로 하여 산, 염기 촉매 하에서 메탄올과 같은 값 싼 알코올과 반응시켜 생성되는 알킬 에스테르이다 (Fig. 1). 원유로부터 나오는 석유 디젤과 비슷한 성질을 지니고 있으므로, 현존하는 디젤 엔진 등에 바로 적용하여 실용화가 가능하다는 커다란 장점을 가진다 [1-3].

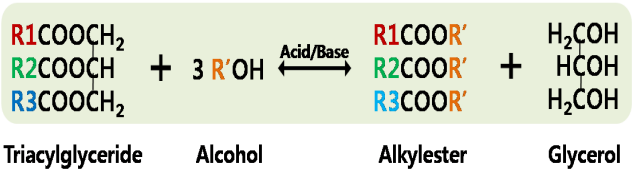

Fig. 1. Transesterification reaction.

이러한 transesterification이라는 바이오디젤 생산방법에서는 원료 기름인 triglycerides가 methanol 등의 알코올과 반응하여 바이오디젤로 쓰이는 fatty acid methylester와 부산물인 glycerol이 만들어진다. 1몰의 triglyceride를 반응시켜서 1몰의 glycerol와 3몰의 methyl esters를 만들기 위해서는 이론상 3몰의 알코올이 필요하지만, 충분한 양의 알코올이 있어야 반응이 잘 일어날 수 있다. 그러나 과도한 양의 알코올은 오히려 바이오디젤의 정제 과정을 어렵게 만들기도 한다. 일반적으로는 6 : 1 비율로 알코올을 반응시킨다 [2]. Transesterification은 산, 염기 촉매 또는 lipase 효소에 의해 촉진된다. 염기를 사용하는 반응이 산을 사용한 반응보다 훨씬 빠르므로 NaOH나 KOH 같은 염기들이 상업적인 촉매로 사용된다. Lipase 생촉매를 사용하면 높은 수율이나 부산물인 glycerol과의 분리가 쉽다는 점 등 이점이 있지만, 효소가 비싸다는 문제점을 가지고 있다 [5].

기후 변화에 관한 정부 간 협의체 (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC)에서는 바이오디젤의 대표적 원료로 쓰이는 식물체가 성장할 때의 이산화탄소 흡수 총량과 식물성 유지에 대한 이산화탄소 전환량, 유지 추출 시 쓰이지 않는 식물의 줄기 등 폐기물의 부패량, 바이오디젤 생산 시설에서 필연적으로 발생되는 이산화탄소 양 등을 고려하여, 바이오디젤 1 kg당 약 2.2 kg의 이산화탄소를 보존할 수 있다고 평가했다. 이는 곧 바이오디젤로 이산화탄소 배출권을 획득할 수 있음을 의미한다.

바이오디젤은 이미 산업적으로 생산되고 있으며 전 공정이 잘 확립되어 있다 [2]. 다양한 원료에 대한 연구와 바이오디젤로의 전환 공정에서의 촉매 등에 대한 연구가 기술 연구의 주를 이루고 있다. 그러나 현재 바이오디젤 연구에서 가장 커다란 과제는 바이오 디젤 생산비용의 50~85%이상을 차지하고 있는 원료비를 절감하는 것이다 [6]. 원료의 대부분을 차지하는 작물로부터의 바이오디젤은 현재 전체 수송 연료의 0.3%만을 공급하고 있으며 [7] 이들 작물은 식용으로서도 이용되므로 식용 작물로부터 바이오디젤의 생산량을 증가시키려 할 경우에는 심각한 식량 고갈의 문제를 야기할 수 있으므로 비식용 원료를 활용하려는 기술 개발 연구가 진행되고 있다.

미세조류를 이용한 바이오디젤

미세조류는 태양 에너지로부터 광합성을 하여 이산화탄소를 고정하는 해양 생명체로서 고정된 이산화탄소로부터 바이오 연료, 음식물 등의 다양한 유용 물질을 만들어낼 수 있다 [8] (Fig. 2). 미세조류의 지질로부터 바이오디젤을 만드는 것은 새로운 아이디어는 아니지만 최근 들어 석유 가격의 상승과 지구 온난화 등의 문제 때문에 많은 연구들이 시작되고 있다. 그러나, 현재 바이오디젤은 대부분 식물성 유지 또는 동물성 지방으로부터 생산되고 있으며, 미세조류를 이용한 생산은 아직 실험실 수준으로만 이루어지고 있다. 바이오디젤 생산기술 공정은 이미 잘 확립되어 있으며 미세조류로부터의 바이오 디젤 생산도 미세조류의 지질이 추출되면 그 후의 공정은 여타 원료를 사용할 때와 크게 다르지 않으므로, 미세조류를 통한 바이오디젤 연구는 미세조류의 배양과 그 효율을 늘리기 위한 연구에 일반적으로 초점이 맞춰져 있다.

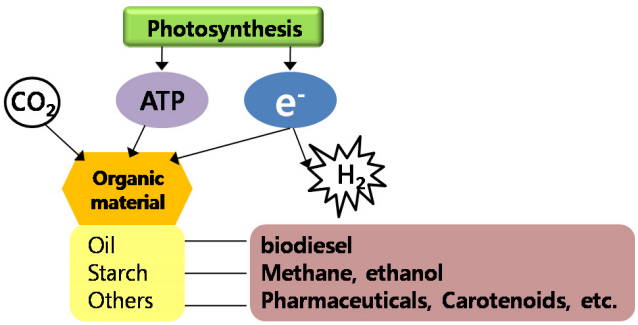

Fig. 2. Synthesis of high-value material by photosynthesis using microalgae.

현재 실용화되어 쓰이는 바이오디젤 원료의 대부분은 triacylglycerol (TAG)로 이루어져 있는 식물성 유지가 차지한다 [7]. 하지만 앞에서 언급했듯이 이러한 식물성 유지로부터의 바이오디젤은 전체 수송 연료의 극히 일부만을 충당하고 있다. 환경적인 측면을 고려하자면, 바이오디젤은 그 수요가 늘어날 것이고 실제로도 현재 꾸준한 증가 추세에 있다. 하지만 현재의 생산 시스템으로는 이러한 잠재적 수요에 대처할 수 없는데, 이것은 식물성 유지, 또는 동물성 유지 등으로는 바이오디젤 생산량에 한계를 보일 수밖에 없기 때문이다. 예를 들어서 현재 미국의 수송 연료의

반을 바이오디젤로 대체하려고만 한다면 유지 식물의 경작을 위해서 엄청나게 큰 경작지가 요구될 것이다 [9]. 다양한 바이오디젤 원료의 생산성을 비교하는 Table 1에서 볼 수 있듯이, 미세조류는 다른 유지 작물과 달리 광대한 부지를 필요로 하지는 않으며, 석유 유래의 디젤을 완전히 대체할 수 있는 가능성을 지닌 바이오디젤 원료로 인식되고 있다. 다른 유지 작물과는 달리, 미세조류는 빠르게 성장하고 많은 종 (species)들이 지질 함량에 있어서 뛰어난 특성을 보인다. 가장 널리 연구되는 대장균과 같은 미생물들보다는 성장 속도가 느리지만, 식물에 비교하면 매우 빠른 속도로 증식한다. 미세조류의 지질 함량은 건조 질량 기준으로 80%를 넘어서기도 한다 [10]. 또한 30-60%정도의 지질 함량을 갖는 종들도 많이 보고되고 있다 (Table 2).

Table 1. Biodiesel production yields using different biomass

Source	Biodiesel (L/ha/year)	Ref.
Corn	172	(9)
Cotton	325	(8)
Soybean	446~636	(8,9)
Mustard seed	572	(8)
Sunflower	952~1,070	(8)
Rapeseed	1,190	(8)
Jatropha	741~1,892	(8,9)
Coconut	2,689	(9)
Oil palm	5,366~5,950	(8,9)
Microalgae	~136,900*	(9)

*Oil content > 70%.

Table 2. Comparison of oil content using various microlage

Species	Oil content (% dry weight)	Ref.
Scenedesmus obliquus	11-22/35-55	(28)
Scenedesmus dimorphus	6-7/16-40	(28)
Chlorella vulgaris	14-40/56	(28)
Chlorella emersonii	63	(28)
Chlorella protothecoides	23/55	(28)
Chlorella sorokiana	22	(28)
Chlorella minutissima	57	(28)
Dunaliella bioculata	8	(28)
Dunaliella salina	14-20	(28)
Neochloris oleoabundans	35-65	(28)
Nitzschia sp.	45-47	(32)
Isochrysis sp.	25-33	(9)
Botryococcus braunii	25-75	(9,32)
Crypthecodinium cohnii	20	(9)
Cylindrotheca sp.	16-37	(9,32)
Nannochloris sp.	20-35	(9)
Nannochloropsis sp.	31-68	(9)
Schizochytrium sp.	50-77	(9,32)

가장 중요한 점은 미세조류는 식용으로 쓰이지 않기 때문에 다른 유지 식물의 경우처럼 식용 작물의 경작지 사용과 배치되지 않는다. 또한 미세조류는 다양한 종류의 지질, 단백질, 탄수화물, 저분자 물질 등을 만들어 내므로 [11], 지질을 추출하고 남아 있는 바이오매스 중 유용한 물질을 추가적으로 얻어낼 수 있는 가능성이 있다. 정리하면, 바이오디젤의 원료로서 미세조류는 식물과 비교했을 때 상대적으로 높은 광전환 효율을 가지고 거의 연중 내내 생산이 가능하여 지속적인 원료로서 공급이 가능하다. 또한 농작물과 달리 폐수와 염의 사용이 가능해서 상수의 사용을 크게 절감할 수 있다는 추가적인 이점도 지닌다 [8,9,12,13].

미세조류 배양과 광생물반응기

미세조류는 광합성을 통해 성장하며, 이것은 미세조류를 통한 바이오에너지의 생산에 있어서 가장 큰 장점 중의 하나이다. 광합성을 통한 생장에는 기본적으로 에너지원으로서 빛 에너지, 탄소원으로서 이산화탄소, 물, 그리고 기타 무기 영양소 등이 필요하며 배양 온도는 보통 섭씨 20도에서 30도 사이에서 유지되어야 한다. 배양액에는 미세조류를 구성하는데 필요한 질소나 인 등의 무기 영양소가 들어가게 된다. 미세조류는 광합성 미생물이므로 따로 에너지원과 탄소원을 공급해 줄 필요는 없으나 원활한 성장을 위해 추가해 주기도 한다. 미세조류의 배양은 간단해 보이지만, 실제로 지질 생산을 위한 배양 조건 최적화는 온도, 배양액 구성, 염도, 이산화탄소, pH 등의 많은 변수들에 의해 결정된다 [8].

미세조류는 낮은 농도의 이산화탄소를 탄산으로 바꾸어 농축시키는 Carbon Concentrating Mechanism (CCM)을 가지고 있으므로 대기 중의 이산화탄소 농도에서도 성장할 수 있지만 [14], 광생물반응기 (photobioreactor)를 사용할 경우처럼 충분한 이산화탄소의 전달이 대기 농도로는 불가능할 경우, 충분한 혼합이 어려운 경우 또는 더욱 향상된 생산성이 필요한 경우 이산화탄소를 따로 공급해 주기도 한다. 화석 연료를 태움으로써 작동하는 발전소 또는 제철소 등으로부터 방출되는 이산화탄소를 사용하여 미세조류를 생산하고 이를 통해 바이오디젤을 만드는 제안은 이미 1990년대부터 나왔으며 [15], 이 경우에는 이산화탄소를 이용하는데 있어서 비용은 거의 들지 않으나 [16], 과도한 이산화탄소 농도 (~15% v/v)에 의해 야기되는 성장 저해의 해결과 기타 혼합물 제거가 관건이 된다.

미세조류 대량배양에 있어서 실제적으로 이용될 수 있는 시스템은 크게 분류하여 개방형 (open) raceway pond와 밀폐형 (closed) 광생물반응기이다 [8,9,12]. Raceway pond는 open pond의 다양한 형태 중 가장 널리 쓰이는 형태로서 약 0.1~0.3 m 정도의 깊이를 가진 수로로 이뤄져 있다. 작동하고 구축하고 유지, 보수하는 것이 쉽고 비용이 적게 들기 때문에 널리 쓰이고 있으며 실제로 이미 수십 년 전부터 연구되어 오고 있는 형태이다. 그러나, raceway pond는 개방되어 있다는 특성에 기인하는 두 가지 단점을 지닌다. a) 물이 증발하여 점차 줄어들게 되고 이산화탄소도 비효율적으로 사용할 수밖에 없다. b) 배양액이 잘 섞이기 어렵기 때문에 바이오매스 농도는 낮게 유지될 수밖에 없으며 다른 종류의 미세조류나 미생물에 의한 오염이 일어날 수 있어

생산성이 낮아질 수 있는 가능성이 항시 존재한다. 지질을 많이 만들어 내는 미세조류는 보통 다른 미세조류에 비해 느린 성장을 하게 된다. 일반적으로 배양액은 원하는 한 종류의 미세조류만 자라는 경우는 거의 없게 되며, 다양한 변수에 따라 두 가지에서 여섯 종류 이상의 미세조류가 동시에 경쟁하는 것으로 알려져 있다 [8]. 극한 환경에서 사는 고온성미생물을 사용하거나 유전공학적으로 만들고, 배양환경을 맞춰주면 이들이 우점종이 되어 오염 문제를 해결할 수 있지만 생산성 측면에서는 큰 이점이 없는 것으로 보고되고 있다 [8,17].

Raceway pond와는 다르게 광생물반응기는 밀폐형이기 때문에 오염의 문제가 거의 없고 온도 조절이 가능하며 배양액의 영양분을 효율적으로 사용할 수 있다는 장점을 가진다. 그러나, 개방형 배양 시스템에 비해 구축 비용이 크다는 단점이 있어 이는 생리활성물질과 같은 고부가가치 물질의 경우와는 달리 생산단가가 매우 중요한 바이오디젤과 같은 연료 물질 생산에 있어서는 커다란 문제가 된다 [17]. 다양한 형태로 반응기가 개발되었지만 일반적으로 관형 광생물반응기가 미세조류 배양에 널리 사용된다 [9,12,13]. 빛을 분산시켜 광 저해가 일어나지 않는 수준에서 최대한 효율적으로 광 에너지를 사용하기 위해 관 (tube)들은 일렬로 나열된 형태를 가진다. 중요한 것은 주어진 여타 제한 조건 내에서 반응기의 부피 대비 표면적의 비율을 될 수 있으면 크게 하는 것이다 [8]. 관은 보통 직경 0.1 m 또는 그 이하이며, 이것은 태양 빛이 미세 조류 배양액을 투과할 수 있는 한계에 의해 결정된다. 배양액의 적절한 혼합은 높은 생산성을 위해 필수적인 요소이며 세포들이 가라앉지 않는 효과를 가져옴과 동시에 이산화탄소와 같은 영양분이 잘 섞이도록 도와준다. Open ponds에서는 광합성에 의해 생성된 산소가 공기 중으로 자연스럽게 빠져 나가지만, 생물반응기에서는 배양액 속에 녹아서 degassing column에 들어가기 전까지는 빠져 나오지 못한다. 배양액 속 산소 농도가 높아진다면 이것은 광합성 작용을 저해할뿐더러 빛 에너지와 반응하여 reactive oxygen species (ROS)를 형성하여 세포에 손상을 입힐 수 있다. 관의 최대 길이는 이러한 산소 농도에 의해 제한을 받게 되고 degassing zone에서 산소 제거가 일어나도록 설계된다.

광생물반응기와 open raceway ponds는 시설과 운용 형태 만큼이나 생산성에 있어서 큰 차이를 보인다. 앞서 언급한 광생물반응기의 장점 덕에 이것은 같은 면적 대비 raceway 보다 더 많은 지질을, 곧 생산성을 제공 한다 (Table 3). 설비에 드는 비용 문제를 제외하고는 모든 면에서 광생물반응기가 우수하다는 것은 익히 알려져 있는 사실이다. 실제로 광생물반응기의 높은 설치비용마저도 open ponds에 비해 훨씬 더 나은 생산성에 의해 상쇄되고도 남게 된다 [8]. 앞서 언급한대로 미세 조류가 고농도로 자라기 시작하면 상대적으로 관의 중심 쪽에 자리잡은 세포들은 빛을 덜 받게 된다. 이러한 dark zone의 세포들은 혼합을 통해 light zone의 세포들과 잘 섞여서 빠른 순환이 이뤄지게 해야 하며 펌프를 통한 turbulent flow로 어느 정도 해결이 가능하다. 빛이 포화된 환경에서의 빠른 light-dark cycling은 세포의 광합성 기구들이 excited state로부터 완전히 회복될 때까지의 짧은 dark period를 제공하므로 그러한 면에서도 유용하다 [18].

Table 3. Comparison of photobioreactor and raceway pond for biodiesel production [9]

	Photobioreactor	Raceway pond
Annual biomass production (kg)	100,000	100,000
Annual CO_2 comsuption	183,333	183,333
Volumetric productivity (kg m^{-3} d^{-1})	1.535	0.117
Area needed (m^2)	5681	7828
Oil yield (70% wt oil) (m^3 ha^{-1})	136.9	99.4

Open ponds와 광생물반응기의 장점만을 혼합한 hybrid 형식의 배양법이 이미 잘 알려져 있다 [8,17]. 이것은 open ponds의 값싼 시설과 운용비, 광생물반응기의 높은 생산성과 오염의 염려가 거의 없다는 점을 십분 활용한다. 높은 지질 함량은 질소나 실리콘 같은 영양분이 부족한 스트레스 환경에서 얻을 수 있는데, 이러한 환경은 세포 성장에는 좋지 않다. 따라서 먼저 높은 지질 함량을 가질 수 있는 미세조류 종으로 영양분이 충분한 배양액을 접종하여 생물반응기에서 고농도로 배양한다. 이렇게 성장한 대량의 미세 조류는 이제 open ponds로 들어가서 영양분이 부족한 배지에서의 지질 합성에 투입된다. Open ponds라 할지라도 성장에 필수적인 영양분이 부족하므로 다른 미생물 종에 의한 오염 문제가 크게 해결될 수 있다.

유전공학적 미세조류 개량

유전공학적으로 미세조류를 개량하는 것은 바이오디젤 생산뿐만 아니라, 미세조류를 이용한 다른 에너지연료의 생산 (e.g. 바이오수소) 등에 있어서도 매우 중요한 방법이다. 자연적 균주는 우리가 원하는 목표에 대한 효율에 한계가 있으므로 이를 개량하여 목적산물의 생산량을 증대할 필요가 있다. 여기에서는 미세조류 바이오매스에서 지질의 함량을 늘리려는 시도에 대해서만 간단히 정리한다.

유전공학을 이용하여 미세조류의 지질 함량을 증가시키려는 연구는 아직 초기단계이며 Acetyl CoA Carboxylase (ACCase)와 Phosphoenolpyruvate Carboxylase (PEPC)의 조작이 주를 이룬다 [19]. PEPC는 lipid 합성에 있어서는 방해요소이므로 antisense 발현 등의 방법으로 이의 활성을 줄여서 오일 함량을 늘리는 시도가 있어 왔다. ACCase 연구의 시초는 미국 National Renewable Energy Laboratory (NREL)에서 수행한 Aquatic Species Program (ASP)이다 [20]. 약 3,000종의 미세조류를 미대륙 북서지역과 동남지역 및 하와이 연안에서 수집하여 연구하였으며, 여기에서 많은 양의 지질을 축적하는 여러 미세조류가 발견되었다. 이러한 미세조류의 지질의 축적은 질소 등의 필요한 영양분이 고갈

되었을 때에 더욱 잘 일어나게 되는데, 이 경우 미세조류의 성장이 더뎌지므로 전체적인 지질의 생산량은 크게 차이 나지 않는다. 따라서 균체 성장을 저해하지 않는 동시에 지질을 더욱 축적하도록 하기 위한 유전공학적 방법으로서 ACCase의 활성을 증대시키려는 시도를 하였다.

Eukaryotic algae인 diatom *Cyclotella cryptic* 배양 시 silicon deficient 환경에서 lipid 성분이 축적되는 것과 이 때에 ACCase의 활성이 4배까지 증가하는 연구를 통해 조류에서 ACCase가 lipid 축적 과정에 관여한다는 것으로 밝혀졌다 [21,22]. 하지만 이러한 조류에서의 lipid 합성 경로나, 그 조절 등에 관한 연구가 충분히 이뤄져 있지 않기 때문에 이러한 단순한 조작만으로는 실제 미세 조류에서 지질 생산을 크게 향상시키지는 못하였다 [19,23]. ACCase는 4개의 subunit으로 이뤄져 있고 두 개의 서로 다른 반응을 촉진한다. Biotin은 항상 Biotin Carboxyl Carrier Protein (BCCP)에 붙어서 반응이 진행되며 모든 과정은 비가역적인 것으로 알려져 있다 [24]. 여기에서 생성된 malonyl-CoA는 여러 단계의 효소 반응을 거쳐 결국 lipid로 전환되게 된다 [23]. 이 많은 단계에서 ACCase가 작용하는 단계가 바로 lipid 합성에 있어서의 rate-limiting step인 것으로 추측되고 있다 [19,21-23].

대장균에서도 유사한 연구가 이뤄졌는데, 자체 ACCase를 과발현하여 lipid 생성을 살펴본 결과, lipid 합성 속도가 6배 가량 증가했다는 보고가 있다 [24]. 따라서 ACCase는 미세조류에서 여전히 lipid 합성에 있어 중요한 요소의 하나이며, 이것은 lipid 축적을 늘리려는 연구에 있어서 기본적인 대상이 되어야 할 것이다. 이 밖에 Stanford 대학의 Chaitan Khosla 연구실에서는 ACCase 외에도, free fatty acid의 분해에 관여하는 fadD라는 효소의 활성을 막는 시도를 병행하여 lipid 합성을 향상시키는 연구를 시도했으며 [25], 실제적으로 lipid 합성에 있어서 유전 공학적 조절이 가능한 부분은 효소뿐만 아니라 조절 인자들까지 포함하여 더욱 많으므로 [26], 앞으로 이 분야의 성과가 미세조류 바이오디젤 실용화의 주축으로서 작용할 것으로 주목된다.

미세조류 바이오디젤의 품질과 경제성

다양한 형태의 바이오디젤 원료는 그 구성 성분 등에서 차이를 보이기 때문에 실제 연료로 활용하기 위해서는 각 원료의 구성과 특성을 연구할 필요가 있다 [6]. 미세 조류를 원료로 한 바이오 디젤은 현존하는 기준에 부합되어야 한다. 이러한 기준은 바이오 디젤의 상업화에 연료 품질의 보장을 위해 필요하며 대표적으로 미국에서는 ASTM D6751, 유럽 연합에서는 Standard EN 14214으로 나뉘어져있다. 이러한 표준은 연료의 발화점, 밀도, 점성, 세탄가, 황 함유, 산화 안정성 등의 여러 가지 성질에 대한 한계점을 제시한다 [27]. 미세조류의 지질은 특히 산화 안정성에 있어 특별한 고려가 필요한데, 이는 미세 조류 지질이 다중 불포화 지방산을 많이 함유하고 있기 때문이다 [23]. 지질이 산화되면 성질이 변하여 바이오 디젤로서 적합하지 못하게 된다. 하지만 적절한 화학적 방법으로 이중 결합을 쉽게 환원시킬 수 있으며 (e.g. hydrogenation) 애초에 바이오 디젤에 적합한 성분을 많이 생산하도록 유전 공학적인 접근을 하려는 시도도 이뤄지고 있다.

Yusuf Chisti (2007)에 따르면 몇 가지 가정하에 광생물반응기를 통해 배양한 미세 조류로부터 지질을 추출하는 데에 $2.80/L-oil 정도의 비용이 든다 [9]. Palm oil을 바이오디젤로 전환하는 과정이 미세 조류로부터의 지질에도 똑같이 적용된다면 최종적으로 미세 조류 지질로부터 바이오디젤을 생산하는 데에는 $2.94/L-diesel의 비용이 소요될 것이다. 세금과 분배 비용을 제한 석유 디젤의 가격은 $0.49/L-diesel 정도이므로 미세 조류 바이오 디젤이 가격 경쟁력을 가지려면 그 생산 비용이 1/6 수준으로 절감되어야 한다. 이러한 추정에는 이산화 탄소 공급 비용이 들지 않는다는 가정, biomass 중 약 1/3이 지질이라는 가정 등이 들어 포함되므로, 실제로는 생산 비용이 추가될 수밖에 없다.

위의 계산을 살펴봤을 때 미세 조류 바이오 디젤이 실용화되려면 생산 비용을 50%로 절감하는, 즉 효율을 100% 향상시키는 혁신적인 기술적 발전을 적어도 두 번 이상 거쳐야 하며 따라서 실용화가 단기간 내 이뤄지기는 어렵다고 전망할 수 있다. 하지만 미세 조류 바이오 디젤 연구는 아직 초기 단계이고 특히, 미세 조류 자체의 광 효율을 높이고 지질 함량을 늘리는 유전 공학적 연구에 의한 생산 효율 향상의 가능성은 충분하다. 또한 biorefinery와 같은 다양한 분야를 조합, 접목시키는 방안으로 그 효율은 더욱 향상될 수 있다.

Biorefinery 개념

석유 산업의 refinery와 비슷한 개념으로서 biorefinery는 biomass의 모든 요소를 유용한 물질 생산을 위해 사용한다 [9,28-30] (Fig. 3). 미세 조류로부터 얻을 수 있는 다양한 물질이나 연료를 개별 시설에서 얻어온 것이 지금까지의 현실이었고, 따라서 한 가지 물질을 생산할 때마다 미세조류 배양에 비용이 쓰일 수밖에 없었다. 지질 이외에도 미세 조류는 많은 단백질과 탄수화물 또는 다른 유용한 영양소를 지니고 있으며, 바이오 디젤 생산 후 남은 biomass는 animal feed로 사용될 수도 있다. 혐기성 조건에서 methane 가스를 만드는데 쓰일 수도 있으며 [28,31] 이러한 가스는 여분의 에너지를 공급하여, 바이오 디젤 생산 시설을 움직이는 에너지를 공급하는 데에 쓰일 수 있다. 이것은 진정한 의미의 탄소 중립적 연료 사용이 가능하다는 것을 의미한다. 최근에는 미래의 청정 에너지로 각광받고 있는 바이오 수소의 생산과 융합하여 biomass의 활용을 극대화하려는 개념이 제안되고 있다 [30]. 이러한 유용한 에너지 연료와 고부가 가치 의약품 같은 유용 물질을 동시에 생산하는 데에는 유전 공학적인 맞춤형 균주 개량이 필수적인 선행 연구가 될 것이다. 앞으로는 최적화된 균주의 선택과 개량

등을 통해 다양한 조합의 통합적인 biomass의 활용 방안이 각광을 받을 것임에 틀림없다.

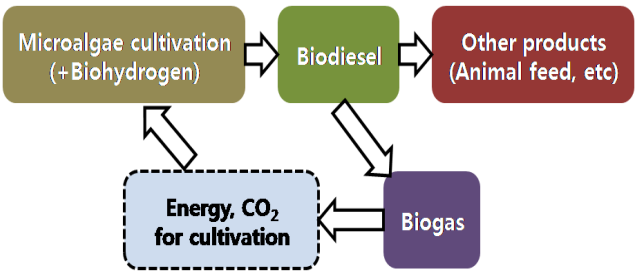

Fig. 3. Biorefinery system.

요 약

바이오 디젤은 석유 기반의 액체 연료를 대체할 수 있는 재생 가능한 대체 에너지로서, 특히 수송 연료에 있어 경유를 대신하여 일부 사용되어 있고 수요는 계속 증가할 것으로 보인다. 앞서 살펴본 바대로, 미세 조류의 지질을 바이오 디젤의 원료로 사용하는 방안은 기술적으로는 이미 실현 가능하다. 모든 생산 과정을 최적화시키고 biorefinery 개념을 도입하여 경제성을 최대한 끌어 올리며, 광생물반응기를 좀 더 개선시켜 효율을 높임과 동시에 수요 증가에 의해 가격이 낮아지게 되면 미세 조류를 이용한 바이오 디젤 생산의 경제적 문제를 해결할 수 있을 것이다. 특히 미세 조류에서의 유전공학적, 대사공학적인 지질 합성에 관한 연구는 아직도 몇 가지 유전자를 조작해보는 초기단계에 있고 이에 대한 발전 가능성은 긍정적이므로 앞으로 많은 연구자들이 이 분야에 관심을 가진다면 미세 조류 바이오 디젤의 실용화는 한 단계 앞당겨지리라 기대한다.

감 사

본 논문은 국토해양부의 해양생명공학사업 (해양바이오에너지생산기술개발)과 해양에너지전문인력양성사업에 의해 수행된 연구결과이며, 이에 감사드립니다.

접수 : 2010년 1월 5일, 게재승인 : 2010년 4월 20일

REFERENCES

1. Ma, F. and M. A. Hanna (1999) Biodiesel production: a review. *Bioresour. Technol.* 70: 1-15.
2. Sharma, Y. C., B. Singh, and S. N. Upadhyay (2008) Advancements in development and characterization of biodiesel: a review. *Fuel* 87: 2355-2373.
3. Sharma, Y. C. and B. Singh (2009) Development of biodiesel: current scenario. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 13: 1646-1651.
4. Zhang, Y., M. A. Dube, D. D. McLean, and M. Kates (2003) Biodiesel production from waste cooking oil: 1. process design and technological assessment. *Bioresour. Technol.* 89: 1-16.
5. Ranganathan, S. V., S. L. Narasimhan, and K. Muthukumar (2008) An overview of enzymatic production of biodiesel. *Bioresour. Technol.* 99: 3975-3981.
6. Canakci, M. and H. Sanli (2008) Biodiesel production from various feedstocks and their effects on the fuel properties. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 35: 431-441.
7. Durrett, T. P., C. Benning, and J. Ohlrogge (2008) Plant triacylglycerols as feedstocks for the production of biofuels. *Plant J.* 54: 593-607.
8. Schenk, P. M., S. R. Thomas-Hall, E. Stephens, U. C. Marx, J. H. Mussgnug, C. Posten, O. Kruse, and B. Hankamer (2008) Second generation biofuels: high-efficiency microalgae for biodiesel production. *Bioenerg. Res.* 1: 20-43.
9. Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae. *Biotechnol. Adv.* 25: 294-306.
10. Spolaore P., C. Joannis-Cassan, E. Duran, and A. Isambert (2006) Commercial applications of microalgae. *J. Biosci. Bioeng.* 1: 87-96.
11. Guschina, I. A. and J. L. Harwood (2006) Lipids and lipid metabolism in eukaryotic algae. *Prog. Lipid Res.* 45: 160-186.
12. Chisti, Y. (2007) Biodiesel from microalgae beats bioethanol. *Trends Biotechnol.* 26: 126-131.
13. Qiang L., D. Wei, and L. Dehua (2008) Perspectives of microbial oils for biodiesel production. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 80: 749-756.
14. Badger, M. (2003) The roles of carbonic anhydrases in photosynthetic CO_2 concentrating mechanisms. *Photosyn. Res.* 77: 83-94.
15. Benemann, J. R. (1993) Utilization of carbon dioxide from fossil fuel-burning power plants with biological systems. *Energy Convers. Mgmt.* 34: 999-1004.
16. Yun, Y. S., S. B. Lee, J. M. Park, C. I. Lee, and J. W. Yang (1997) Carbon dioxide fixation by algal cultivation using wastewater nutrients. *J. Chem. Technol. Biotechnol.* 69: 451-455.
17. Vasudevan, P. T. and M. Briggs (2008) Biodiesel production-current state of the art and challenges. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* 35: 421-430.
18. Molina, E., E. Fernandez, F. G. Acien, and Y. Chisti (2001) Tubular photobioreactor design for algal cultures. *J. Biotechnol.* 92: 113-131.
19. Song, D., J. Fu, and D. Shi (2008) Exploitation of oil-bearing microalgae for biodiesel. *Chin. J. Biotechnol.* 24: 341-348.

20. Sheehan, J., T. Dunahay, J. Benemann, and P. Roessler (1998) A look back at the U.S. Department of Energy's Aquatic Species Program: biodiesel from algae. *Close-out Report, NREL/TP-580-24190*.
21. Roessler, P. G., J. L. Bleibaum, G. A. Thompson, and J. B. Ohlrogge (1994) Characteristics of the gene that encodes acetyl-CoA carboxylase in the diatom *Cycbtella cryptica*. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 721: 250-256.
22. Roessler, P. G., L. M. Brown, T. G. Dunahay, D. A. Heacox, E. E. Jarvis, J. C. Schneider, S. G. Talbot, and K. G. Zeiler (1997) Genetic engineering approaches for enhanced production of biodiesel fuel from microalgae. *NREL Report*.
23. Hu, Q., M. Sommerfeld, E. Jarvis, M. Ghirardi, M. Posewitz, M. Seibert, and A. Darzins (2008) Microalgal triacylglycerols as feedstocks for biofuel production: perspectives and advances. *Plant J.* 54: 621-639.
24. Davis, M. S., J. Solbiati, and J. E. Cronan (2000) Overproduction of acetyl-CoA carboxylase activity increases the rate of fatty acid biosynthesis in *Escherichia coli*. *J. Biol. Chem.* 275: 28593-28598.
25. Lu, X., H. Vora, and C. Khosla (2008) Overproduction of free fatty acids in *E. coli*: implications for biodiesel production. *Metab. Eng.* 10: 333-339.
26. Courchesne, N. M. D., A. Parisien, B. Wang, and C. Q. Lan (2009) Enhancement of lipid production using biochemical, genetic and transcription factor engineering approaches. *J. Biotechnol.* 141: 31-41.
27. Knothe, G. (2006) Analyzing biodiesel: standards and other methods. *J. Am. Oil Chem. Soc.* 83: 823-833.
28. Gouveia, L. and A. C. Oliveira (2009) Microalgae as a raw material for biofuels production. *J. Ind. Microbiol. Biotechnol*. 36: 269-274.
29. Wang, B., Y. Li, N. Wu, and C. Q. Lan (2008) CO_2 bio-mitigation using microalgae. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 79: 707-718.
30. Skjanes, K., P. Lindblad, and J. Muller (2007) BioCO_2-A multidisciplinary, biological approach using solar energy to capture CO_2 while producing H_2 and high value products. *Biomol. Eng.* 24: 405-413.
31. Raven, R. P. J. M. and K. H. Gregersen (2007) Biogas plants in Denmark: successes and setbacks. *Renew. Sustain. Energ. Rev.* 11: 116-132.
32. Meng, X., J. Yang, X. Xu, L. Zhang, Q. Nie, and M. Xian (2009) Biodiesel production from oleaginous microorganisms. *Renew. Energy* 34: 1-5.