

Technical Review

<https://doi.org/10.12985/ksaa.2024.32.2.151>
ISSN 1225-9705(print) ISSN 2466-1791(online)

미세조류 이용 바이오디젤 항공유 기술개발 동향 연구

윤한영*

A Research of Trends in Development of
Bio-Diesel Aviation Fuel Technology using Microalgae

Han-Young Yoon*

ABSTRACT

Microalgae are aquatic microorganisms capable of photosynthetic growth using water, carbon dioxide and sunlight, and can replace petroleum for transportation. It is receiving great attention as a potential next-generation biological resource. The microalgae biodiesel production process is largely based on the development of highly efficient strains and mass production. It consists of cultivation, harvesting, oil extraction, fuel conversion and by-product utilization. Currently, microalgae diesel is 3-5 times more expensive than petroleum diesel. However, with the optimization of each element technology and the development of integrated systems, not only biofuels, but also industrial materials, wastewater treatment, and greenhouse gases As application expands to various fields such as abatement, the timing of commercialization may be brought forward. Oil prices have recently fallen due to the influence of sail gas. Although there has been a significant drop, global warming is an urgent challenge for current and future generations. In particular, Korea, which does not have oil resources, We must always prepare for political environmental changes, high oil prices, and energy crises. In this paper, the need for eco-friendly biofuel for carbon dioxide conversion. In addition to research trends, domestic and international research trends, and economic prospects, the concept of microalgae and the element technologies of the biodiesel production process are briefly discussed introduced.

Key Words : Microalgae(미세조류), Bio-Diesel(바이오디젤), CO₂ Conversion(이산화탄소 전환), Bio-Fuel(바이오 연료), Photosynthesis(광합성)

1. 서 론

최근 지구 온난화에 대응하기 위하여 2015년 파리 기후변화협약 이후 전 세계에서 청정에너지에 대한 연

구 개발과 상용화에 매진하고 있다. 화석연료의 대체에 너지 개발 및 고정 배출원의 이산화탄소 포집기술에 대한 연구들이 다양하게 진행 중에 있다(Lee et al., 2022). 청정에너지원인 태양에너지, 풍력, 조력, 지열을 중심으로 다양한 연구개발이 수행되고 있으나, 변동성과 용량 문제를 지니고 있다. 온난화 저지에 마지막 단계에 해당되는 이산화탄소 포집기술은 다양하게 기초적 연구와 실증연구가 수행되고 있으며, 주로 경제성 확보를 위해 저렴하고 혁신적인 성능의 분리제의 개발과 낮은 공정 에너지 비용을 이룰 수 있는 연구가 수행

Received: 14. Apr. 2024, Revised: 10. May. 2024,

Accepted: 29. May. 2024

* 한서대학교 항공융합학부

연락처 E-mail : hyoon@hanseo.ac.kr

연락처 주소 : 충남 서산시 해미면 한서1로 46

중이다(Dubey and Akhilesh, 2022). 신재생에너지로 생산된 전기에너지를 이용하면 항공기를 제외한 산업의 대부분 수요는 대체 가능하다. 혁신적인 항공기 제조기술이 개발되기 이전에 항공기의 경우 에너지 밀도가 높은 항공유의 사용만이 현재의 성능을 유지할 수 있다. 항공기는 수소의 경우, 부피당 에너지 밀도가 낮으며, 고압 저온의 저장 조건이 필요하여 문제가 있으며, 에탄올과 바이오가스도 에너지 밀도가 낮으므로 바이오디젤이 가장 적절한 형태이다. 따라서 화석연료를 대체할 수 있는 청정 항공유의 생산 공정의 개발이 매우 시급한 상황이다. Fig. 1은 각 연료별 단위 부피와 질량으로 에너지 양을 도시한 그림으로 디젤을 대체할 수 있는 연료는 없는 상태이다.

따라서 생물학적 방법으로 생산된 바이오메스로 부터의 디젤 합성이 화석연료를 대체할 수 있는 방법이다. 현재 바이오 디젤은 주로 다양한 육상 식물로부터 얻어지고 있으며, 일부 폐유로부터 합성되고 있다. 대표적인 바이오메스인 콩 등의 재배는 식물에 의한 고정화 효과가 있으나, 관리하는 과정에서 온실가스가 일부 발생한다.

Table 1. Types of bioenergy

구분	설명
바이오 에탄올	대부분 생물학적 발효과정 생산 바이오메스를 기질로 사용하여 효모, 박테리아 등 미생물을 이용 발효 일반적으로 사탕수수, 옥수수를 기질로 사용 생산
바이오 디젤	최초 연구는 미국 DOE에서 다양한 해조류를 이용한 합성법 연구 개시 후 1996년 생산 비용문제로 중단 최근 유럽, 미국 등 선진국에서 온난화문제로 활발한 연구 진행 공정 비용 감소를 위한 많은 양의 오일을 함유한 조류의 선별 및 대량 배양을 위한 설비 공정 개발 현재 사용 기질은 식물성 오일로부터 생산이 주를 이루고 있음
바이오 메탄	나무, 풀, 유기성 고정 폐수 등을 미세조류, 조류를 이용하여 생산 이산화탄소와 수소를 가수분해하여 생산 음식폐기물과 거대기질을 기질로 사용할 경우 생산비용 저감
바이오 가스	물과 바이오메스 및 다양한 유기성 폐기물로부터 태양에너지와 미생물을 이용 생산 1970년 석유 파동이후 연구 개시, 최근 조류를 이용한 생산 가능성 연구 활발

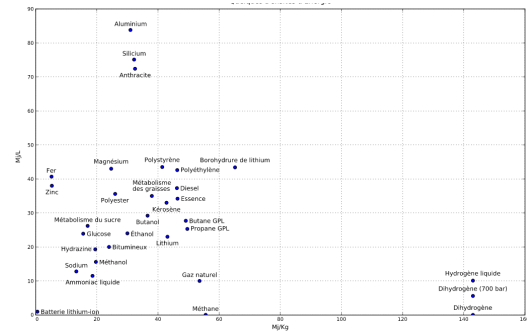


Fig. 1. A plot of selected energy densities¹⁾

바이오 디젤은 동물과 식물의 지방 또는 폐유지를 에스테르화 공정으로 생산되며, 경유의 대체연료로 공급이 확대되고 있다. 화석연료에서 분리 정제된 디젤과 바이오디젤은 물리화학적 특성, 세탄가, 열량, 점도 및 등이 유사하며, 경유와 혼합하여 사용하면 엔진개조 없이 쉽게 사용이 가능하다. 바이오디젤은 다양한 대기오염 물질이 경유보다 낮게 배출되는 장점을 지니고 있다. 바이오 연료에서 발생하는 이산화탄소는 순배출이 없는 것으로 CO₂-neutral fuel로 간주된다. 바이오디젤 1톤 연소시 2배 이상(2.2~2.8톤) 이산화탄소 발생 저감 효과가 인정된다(Renwable Energy Center, 2014).

현재 생산되는 바이오디젤은 1세대 바이오연료 기술로 회자되며, 다양한 식용작물에서 추출한 식물성 기름으로부터 생산되고 있으므로 최근 곡물가 상승으로 저소득층 및 온난화로 가뭄이 지속되어 저개발 국가의 식량 문제를 발생시키고 있다(R. C. Rial, 2024).

특히, UN 특별위원회의 Jean Ziegler는 “농작물을 생산하는 토양을, 연료로 태워 없어질 에너지 작물용으로 전환하는 것은 인류에 대한 범죄이다”라고 곡물 기반 바이오연료의 위험성에 대해 경고한 바 있다. 각종 정책으로 선진국을 중심으로 증가되는 바이오디젤 수요를 충족하기 위하여 가장 저렴한 팜유의 생산이 증가하면서 열대지역의 산림이 훼손되어 탄소 저장 및 고정화가 낮아져 지구온난화를 가속시키고 있다(Yun et al., 2012). 특히, 식용작물의 원가 상승으로 최근 남미의 아마존 우림이 콩, 옥수수 재배를 위하여 개간되어 온난화를 가속시키고 있다.

더욱이 우리나라는 바이오디젤의 원료(특히 팜유) 대부분을 수입하고 있으므로 수급 및 가격이 석유자원

1) https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Energy_density.svg

의 경우와 유사하여 대외적인 환경 변화에 크게 의존할 가능성이 있다.

따라서 미세조류(Microalgae)를 이용하여 바이오디젤과 탄화수소를 생산하는 기술이 '신규 바이오연료 기술'로 주목 받고 있다(Lee et al., 2015).

또한 최근 미국 에너지성의 연구 결과, 미세조류 및 조류로부터 다양한 희토류의 회수가 가능성에 대해 결과를 발표하였으며, 현재 연구가 진행 중이며, 우리나라에서도 김, 미역, 다시마와 같은 거대조류를 이용하는 연구를 공동으로 수행하고자 계획을 수립하고 있다. Fig. 2의 Refining 공정에서 바이오디젤의 원료를 회수하고, 희토류를 회수한다면 경제성이 확보될 수 있을 것으로 예측된다.

따라서 본 연구에서는 미세조류를 원료로 생산하는

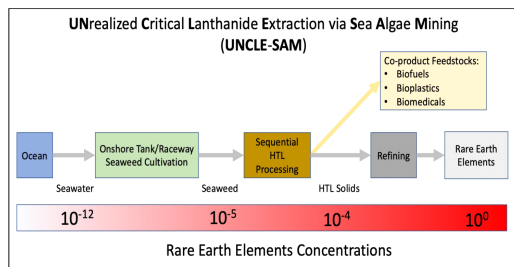


Fig. 2. Overview schematic of the UNCLe-SAM process (Scott et al., 2023)

Element	Average Salish Seawater (ppb)	Std. error	Ulva sp. (ppb)	Std. error	Bioconcentration factor
Scandium	0.00591	0.00094	81.05	36.68	13,723
Cobalt	0.05665	0.00537	499.44	150.44	8,816
Nickel	0.29894	0.03346	518.44	158.53	1,734
Copper	0.29751	0.03387	3889.97	906.62	13,075
Germanium	0.03280	0.003	120.18	56.02	5,229
Rubidium	98.77905	1.157	12178.37	295.30	123
Yttrium	0.05451	0.00289	142.08	67.15	2,606
Ruthenium	0.00060	0.00005	BQL	-	-
Rhodium	0.01420	0.00061	0.16	0.00	11
Palladium	0.52542	0.01238	5.63	0.20	11
Silver	0.00484	0.00014	38.19	4.16	7,894
Lanthanum	0.00730	0.00167	147.22	67.24	20,167
Cerium	0.00645	0.00313	252.34	136.82	39,131
Praseodymium	0.00155	0.00042	36.92	18.37	23,890
Neodymium	0.00693	0.00179	158.67	78.50	22,894
Samarium	0.00173	0.00044	38.78	19.83	22,433
Europium	0.00056	0.00009	9.55	4.59	17,190
Gadolinium	0.00241	0.00048	41.48	20.57	17,192
Terbium	0.00050	0.00006	5.35	2.57	10,730
Dysprosium	0.00232	0.00038	29.75	14.14	12,843
Holmium	0.00070	0.00007	5.28	2.44	7,525
Erbium	0.00174	0.00019	13.21	6.07	7,600
Thulium	0.00045	0.00005	1.73	0.77	3,825
Ytterbium	0.00163	0.00019	10.48	4.72	6,428
Lutetium	0.00045	0.00004	1.48	0.66	3,326
Halfmium	0.27380	0.01423	165.15	39.78	603
Rhenium	0.00710	0.00033	BQL	-	-
Iridium	0.00008	0.00002	BQL	-	-
Platinum	0.00277	0.00052	BQL	-	-
Gold	0.00908	0.00336	0.10	-	11
Thorium	0.01438	0.00398	23.14	13.94	1,609
Uranium	2.58611	0.06547	35.56	3.49	14
Total REE+Sc+Y	0.09513		975.381		10,254

*BQL= below quantification limit

Highlighted orange elements are REEs with concentration factors greater than 2x10⁴

Highlighted blue elements are REEs with concentration factors greater than 1x10⁴

Values given for information only.

Fig. 3. Baseline elemental concentrations in seawater and marine macroalgae from the Salish (Scott et al., 2023)

바이오디젤 전환공정과 미세조류 배양기술의 전반적인 내용에 대한 고찰과 국내외 현황을 통해 항공유에 적용에 대하여 연구하였다.

II. 본 론

2.1 미세조류

조류(Algae)는 육상식물을 제외한 태양광을 에너지원으로 사용하여 물과 이산화탄소를 이용하여 광합성을 수행하는 수생 생물이며, 생물 분류군을 나타내는 분류학적인 용어가 아니며, 다양한 종류의 분류군이다. 일반적으로 조류 생태학적으로 크기에 따라 현미경으로 관찰되는 클로렐라 정도 크기를 미세조류(Microalgae)라 분류하며, 우뚝가사리, 미역과 같은 크기를 미터 단위로 성장되는 거대조류(Macroalgae)로 나눌 수 있다. 미세조류는 식물플랑크톤으로 불리며, 단세포성 광합성 미생물이다. 조류 중 녹조류, 홍조류, 갈조류 등을 다세포성의 거대조류로 분류하며, 근해 존재하고 일반적으로 해조류(Seaweed)라 한다(Morweiser et al., 2010).

미세조류의 생산성은 콩, 옥수수, 해바라기씨, 유채씨, 야자, 사탕수수과 같은 육상 식물로부터 생산되는 1세대 바이오연료에 비하여 동일 면적의 바이오매스 생산성이 최소 20에서 최대 100배 이상 높게 나타난다. 따라서 현재 이용되지 않는 해상 또는 육상 토지에서 대량 배양이 가능하며, 육상 재배로 식용작물의 재배를 감소시키지 않으며, 숲의 개간을 통한 부가적 탄소 배출과 흡수 저해를 방지할 수 있으며, 탄소 고정화로 이산화탄소 고정화로 온난화를 지연시킬 수 있다. 또한 미세조류는 하수, 해수 폐수 등에 정화에 사용되므로, 다양한 수자원의 이용과 수질 오염 저감에 이용할 수 있다. 가장 큰 장점은 이산화탄소 고정화로 이산화탄소를 처리할 수 있는 것이다. 현재 종과 배양조건에 따라 생체 내에 최대 70%의 오일을 함유할 수 있으므로 단위 면적당 오일 생산량이 육상식물보다 높아 원유 대체 가능성이 매우 크다(Oh and Nah, 2015). 또한 Fig. 4와 같이 오일만이 아닌 바이오수소, 바이오에탄올, 바이오가스 등 다양한 연료 에너지를 생산할 수 있다. 미세조류는 담수 및 해수에 10만 종 이상이 있는 것으로 조사되며, 현재 3,000종만이 분류되었고, 분류된 종을 대상으로 연구되고 있다. 미세조류에 대한 개량과 선별 및 메커니즘의 이해로 다양한 연구로 생산성의 향상은 증대할 것으로 사료된다.

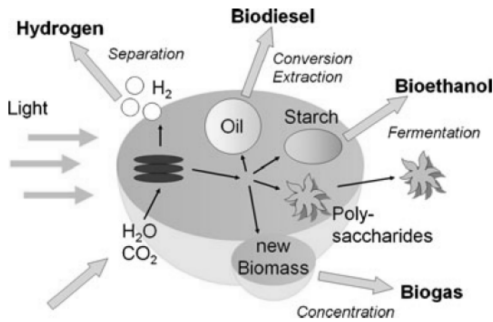


Fig. 4. Production of various bioenergy using microalgae (Morweiser et al., 2010)

2.2 미세조류 바이오디젤 생산기술

Fig. 5는 미세조류를 이용하여 생산 가능한 바이오 에너지의 전환과정을 나타내었다. 미세조류가 기존의 바이오매스와 차이는 지질의 추출 공정의 처리 과정이 상이한 정도이다. 미세조류로부터 지질 성분을 추출하는 방법은 기계적 추출, 전기천공법, 초임계 추출, 초음파 등(Hejazi et al., 2004)을 이용한 물리적인 Microalgae milking 방법이 제안되었지만, 재활용이 가능한 화학물질을 이용한 직접 추출이 사용되고 있다.

미세조류를 이용하여 바이오 연료 생산공정의 장점인 육상작물보다 탄소수 14 이상 고에너지 구조의 지방산이다. 미세조류 지질은 유지식물과 동일하게 지방산, triglyceride 화합물을 함유하고 있어 기존방법인 트랜스에스테르화 기술로 생산이 가능하다.

2.3 미세조류 바이오디젤 생산 기술 동향

2.3.1 국외 동향

오일쇼크 이후 1970년대 후반부터 지구 환경보존이 세계적인 이슈로 대두되어 지구온난화를 유발하는 이

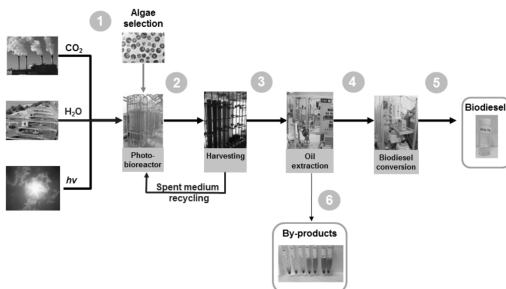


Fig. 5. Overview of microalgae biodiesel production process (Oh and Nah, 2015)

산화탄소의 효율적인 생물학적 전환 방법으로 조류 배양이 시도되며, 가장 성장 속도가 빠른 미세조류 배양이 미국 등에서 연구가 시작되었다. 지구온난화의 심각성과 1세대 바이오연료 생산에 따른 곡물자원에 고갈에 대한 우려로 미세조류 이용에 대한 연구의 필요성이 인식되었고, 액상 형태의 에너지 밀도가 높은 항공유인 바이오디젤 생산을 위하여 광합성 조류의 유전자 기초연구와 개량, 광생물 반응기, 대량 배양기술과 미세조류와 조류로부터 회수, 오일 추출, 바이오디젤 전환 및 공정과 부산물의 활용 등 배양, 추출, 전환 연구가 광범위하게 진행되고 있다. 미국은 에너지성을 중심으로 수송용 연료 생산을 위하여 미세조류의 배양, 전환의 기초 및 응용 기술 개발과 실증을 수행하고 있으며, 중장기 기초연구로 유용 미세조류 탐색 및 배양 등의 기초 연구를 수행하였다. 2001년 시작하여 2020년까지 조류 및 미세조류의 생물 유전체 연구 프로그램에서 *Synechococcus* 등 다양한 광합성 미생물의 유전공학적 연구가 수행되고 있다. 미세조류 연료의 1리터당 비용을 1.5달러 수준으로 낮추는 기술을 제시하였다. 2022년까지 미세조류로부터 오일 10억 갤런/년 생산 시스템을 설계를 위한 기술 정립과 실증 테스트 베드도 구축하였다.

또한 이산화탄소 저감을 위하여 포집된 이산화탄소를 공급하고, 유기성 폐수를 이용하여 오염 제어와 이산화탄소의 고정화를 미세조류를 이용하고, 고부가가치 바이오제품을 동시에 생산하는 기술 분야를 연구하고 있으며, 군용 연료의 대체를 위한 전략적 목표를 수립하여 2013년부터 다양한 바이오매스인 비식용 바이오매스, 폐기물, 미세조류로부터 바이오디젤, 바이오가스 등의 생산기술 개발도 추진하고 있다. 특히, 미세조류로 생산된 바이오 연료의 실증 실험으로 사용 범위를 확대하고 문제점을 개선하는 연구도 수행하고 있다. 미세조류 항공유를 이용한 바이오디젤의 헬리콥터 시험비행은 2011년에 수행되었으며, 2012년에는 구축함에도 시험적용하였다. 미국 오바마 대통령(2012)은 조류로 생산한 휘발유, 경유, 항공유(제트엔진 연료)로 전체 수송 분야 화석연료의 17%를 대체할 수 있는 양의 생산 가능성을 발표하였다. 미국은 다수의 민간기업에서 미세조류 바이오연료 개발과 실증을 수행하고 있다. Chevron사는 NREL(National Renewable Energy Laboratory)과 공동으로 'Algae to Biofuel Research' 연구를 수행하였다. 엑손모빌은 신세티지노믹스와

공동으로 미세조류 전환 연료를 개발에 6억 달러 투자를 발표하였으며, 100여 개 미세조류 관련 기업과 연구기관이 개발 중인 것으로 조사되었다(삼성경제연구소, SERI 경영노트 제 170호 2012). Sapphire Energy사는 2009년 이후 볼모지인 사막에 22 에이커 규모의 대규모 개방형 배양시스템을 시험 운전 중이다(European Algae Biomass Congress, 2013).

프랑스는 GreenStars 프로그램에서 미세조류 바이오리파이너리 기술 개발을 2022까지 수행하였다. 영국은 2.6천만 유로를 Algal Biofuels Challenges (ABC)에 2020년까지 투자하였다. 대표적인 신재생에너지 선도국인 독일, 스코틀랜드, 핀란드, 네덜란드 등에서 활발한 연구와 실증이 진행되고 있다. 독일 Fraunhofer Institute for Interfacial Engineering and Biotechnology (IGB)는 조류 바이오매스 생산공정의 자동화 연구를 진행하고 있다. 일본은 선도적으로 1990년부터 10년간 바이오 대체 에너지 신기술로 미세 조류를 이용한 탄소 고정화 및 다양한 탄화수소 전환에 관한 대형 연구를 국제공동으로 수행하였다. 이후 2000년 중반 NIES와 Tsukuba대학을 중심으로 미세조류를 이용한 바이오디젤 합성연구가 활성화되고 있다. 중국은 최근 China Petro 등 다양한 기업이 미세조류 배양, 전환공정이 시험 및 상용 운영 중이다.

2.3.2 국내 동향

미세 조류에 관한 국내 연구는 1980년대 말 시작되어, 고농도 유기성 폐수의 처리 등 환경 정화를 목적으로 연구가 수행되었다. 2000년 이후 이산화탄소 문제로 정부출연연구소 주도의 이산화탄소 고정화와 배양된 미세조류에서 유용물질(의약품, 대체연료) 생산 연구가 시작되었다. 최근 온실가스에 의한 지구온난화 문제와 신재생에너지 확대 필요성이 증대되는 세계적 환경 변화로 대형 국가 정책적 연구로 미세조류를 이용한 바이오연료 연구 개발이 추진되고 있다. 카이스트의 (재단법인)차세대바이오매스 연구단은 미래창조과학부 글로벌 프론티어 사업지원으로 이산화탄소의 효율적인 전환과 함께 유기성 자원의 동시 이용 기술을 기반으로 미세조류 바이오연료 전과정[미세조류 선별, 대용량 배양, 수확, 추출, 바이오연료(디젤, 항공유, 에탄올, 바이오가스) 전환, 부산물 활용 고부가 화학원료 생산, LCA 등을 활발히 연구하고 있다(2010-2019, 참여인력 약 300여 명/년, 총예산 1,065억 원). 카이스트, 경북대, 부경대,

부산대, 서울대, 연세대, 충남대, 포항공대, 한양대, 포항산업연구원, 한국생명공학연구원, 한국에너지기술연구원, (주)SK이노베이션, (주)SK케미칼, (주)NLP, (주)클로랜드 등 다양한 산학연 연구기관이 참여하고 있다. 2014년 11월 대전에서 아시아-오세아니아 미세조류 총회(Asia-Oceania Algae Innovation Summit)를 성공적으로 개최하였다. 인하대 해양바이오에너지 생산기술 개발연구센터는 해양수산부 지원으로 해양 미세조류 바이오매스 미세조류 바이오디젤 생산 공정기술 확보 및 연료화를 연구하고 있다(2019-2019, 총예산 490억원)[10]. 2012년 해상 미세조류 배양 파일릿 플랜트를 인천 영흥도에 준공하였다. 미래창조과학부 (재)한국이산화탄소 포집 및 처리 연구개발센터는 CCS(carbon capture & sequestration)기술 중의 하나인 생물학적 이산화탄소 전환분야로 고려대, 한양대, 한국과학기술원 등과 함께 고효율 유전자 전달, 초고속 세포 선별 등 미세조류 융합 플랫폼 기술을 연구하고 있다. (주)NLP는 산학연공동연구를 통해 “하이브리드 배양시스템을 이용한 미세조류 바이오매스 양산 및 디젤 연료화” 실증과제를 수행하고 있다. 최근 정부는 관계부처 합동으로 기후변화 대응 6대 핵심기술 개발전략의 하나로 바이오에너지(특히 미세조류 바이오디젤) 기술 및 자원 확보를 발표하였다(국가과학기술자문회의, 2014).

2.4 미세조류 바이오디젤의 경제성

미세조류를 원료로 사용한 바이오연료 생산기술은 탄소 저감, 재생 및 친환경 연료 개발, 녹색산업 성장 등 장점을 지니고 있지만, 배양과 전환공정상 추출비용이 높아 석유 디젤 및 1세대 바이오연료보다 아직은 경제성이 낮다. 미세조류 기반 바이오디젤의 단가는 국내에서 수행된 실험실 규모 연구에서 정확한 산정이 어렵지만, 석유 분리 정제 디젤 대비 3배 이상 고가로 추산된다. 실증연구 수행 시 단가 추산이 가능할 것으로 사료되며, 온실효과 저감에 따른 비용 산정시 경제성이 확보될 수 있겠다. LG경제연구원(2010)은 한국에너지기술연구원 자료를 토대로 미세조류 바이오디젤의 가격을 1리터당 ~5.4달러로 추정하였다. 삼성경제연구소(2012)는 美 환경부(DOE, Department of Environment)를 인용해(Biddy, 2012) 미세조류 기반 디젤의 1리터당 가격을 \$2.8-\$5.3 USD로, 석유디젤 대비 경제성을 확보하는 시기를 2020년 이후로 예측한다. 녹색기술센터는 전문가의 의견을 인용하면서 미

세조류 바이오디젤의 가격은 석유 디젤에 비해 5-8배 정도 높다고 발표하였다(National Institute of Green Technology, 2014). 온실가스 규제정책과 정부와 기업의 투자 규모, 유가 등 다양한 관련 산업 생태계 및 환경변화에 따라 미세조류 기반 디젤과 탄화수소의 경제성 확보는 유동적이다.

2.5 미세조류 바이오디젤 생산 공정

미세조류 바이오디젤 생산기술은 크게 1) 고효율 미세조류 개발, 2) 미세조류 대량 배양, 3) 수확, 4) 오일 추출, 5) 바이오디젤 전환, 6) 부산물 활용 등으로 구성된다(Fig. 6). 각 요소기술의 특징은 아래에 자세히 기술하였다.

2.5.1 미세 조류 균주 선별 및 개발

미세조류를 이용한 바이오디젤의 단가 저감과 생산성을 향상을 위하여 자연계에 존재하는 우수한 균주의 선별과 유전공학적 변이가 요구된다(Lee et al., 2015) Fig. 6은 바이오연료 생산용 균주의 특성을 나타내고 있다. 태양의 빛에너지를 효율적으로 탄소 고정화를 통한 바이오매스로 전환한다. 미세 조류의 빛 에너지 전환효율은 5% 이하로 보고되고 있으며, 과도한 광에너지 하에서는 광저해 효과로 성장이 둔화된다. 산소 분압에 민감하지 않은 균주가 요구된다. 이산화탄소를 광합성하여 탄소체로 고정화 하는 과정에서 산소가 발생되고, 배양시스템에서 산소 농도가 증가되면 성장 속도가 감소하는 산소 저해 효과가 발생할 수 있으므로 산

소농도에 민감하지 않은 균주가 요구된다. 육상 배양용 관형 광생물반응기 경우 산소 농도 상승을 방지하기 위하여 탈기 장치를 설치 운영하여 생산성 및 비용 문제를 야기하기도 한다. 인간이 선별한 균주는 대부분 외부 생물의 오염에 취약하므로 외부생물에 대하여 안정적인 균주의 선별과 개량이 필요하다. 실증 생산시 단일 종의 배양 또는 멸균 상태 유지는 매우 어려운 운전이다.

Chlorella, *Dunaliella* 등과 같은 미세조류는 건강 보조식품 및 양어장의 치어 사료 등의 목적으로 육상에서 pH, 염도, 온도 등의 조건을 조절하여 배양하고 있으나, 바이오 디젤과 같은 연료 생산을 위한 미세조류는 대규모 배양 시설을 운영하거나, 근해에서 배양하여야 하므로 미세조류의 안정성과 자연계에서 생태적 합성이 중요하다. 또한 미세조류 균체의 오일 축적량이 높은 균주의 개량은 경제성에 가장 큰 인자이다. 현재 오일 생산을 위한 미세조류 배양에서는 미세조류가 성장한 후 2단계로 질소원, 염도 등을 조절하여 스트레스 조건을 부여하여 미세조류의 오일 함량을 상승시키고 있다. 이러한 경우 근해에서의 배양에는 한계가 나타난다. 일부 스트레스 조건하에서 배양 종의 오염과 불안정성이 나타나기도 한다(Cho et al., 2012). 배양된 미세조류의 오일 추출 공정의 수월성을 고려한 균주 개량 및 선별이 필수적이다. 이는 회수비용을 고려하여 반드시 고려하여야 한다. 생물학적 폐수처리 공정과 같이 미세조류가 성장한 후 사멸기 직전 또는 사멸 후 군집이 형성되면 수확 단계 비용이 감소될 수 있다. 또한 미세조류의 세포벽은 다른 박테리아에 비하여 비하여 파쇄에너지 소비가 높다. 따라서 성장속도가 빠르고 세포막이 얇으며, 성장후 군집의 형성을 이루어도 안정성을 지닌 미세조류의 선별과 개량이 이루어져야 경제성을 빠른 시일에 확보할 수 있다.

현재 미세조류가 지질함량이 높아지면 균체 외부로 배출하는 기작을 지닌 균주의 개량도 시도하고 있다. 이는 오일 추출에너지 소요 감소와 생성산 증대를 이룰 수 있다. *Botryococcus* 종은 지질농도가 70% 이상이며, 균체의 탄화수소 물질을 방출 분비하지만 낮은 성장속도 문제로 배양을 못하고 있다.

상기에 기술한 요건을 충족하는 미세균주가 선별 개량될 경우 미세균주를 이용한 바이오 항공유의 상용화는 빠르게 실현될 것이다.

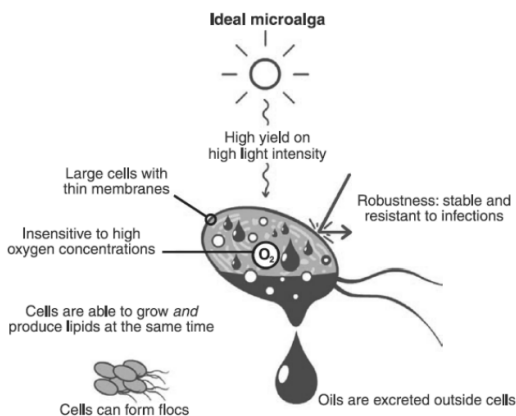


Fig. 6. Characteristics of microalgae for biofuel (Wijffels and Barbosa, 2010)

2.5.2 미세조류 대량 배양

미세조류의 대량 배양은 이산화탄소를 탄소원으로 사용하므로 이산화탄소의 공급과 광량 및 광도의 최적 조건 유지가 필요하다. 또한 최적의 온도와 필수 요소인 K, P, N 공급이 중요하다. 미세조류 육상 배양 시스템은 이반적으로 토지면적을 최대로 활용하는 자루형 광생물반응기(Photobioreactor)와 개방형 연못(Open pond)이 있다.

개방형 연못 시스템은 현재 사용되는 생물학적 폐수 처리시스템과 유사하며, 단지 폐수 처리를 위한 시스템은 산소의공급이 필요하다. 이산화탄소가 발생되고 바이오 연료용 미세조류 배양시스템은 이산화탄소가 공급되고, 산소가 발생하는 시스템으로 두 시스템 모두 빠른 처리 및 성장을 위하여 공기와 이산화탄소를 공급하는 차이가 있다. 이산화탄소의 공급시 많은 에너지를 투입하여 분리 포집된 이산화탄소가 공기 중으로 유출되는 문제점을 지니고 있다. 미세 조류는 탄화수소 합성을 위한 에너지원으로 태양광이 필요하므로 반응기 깊이는 0.3m로 제작된다. 혼합기를 이용하여 배양액을 순환시키고, 미세조류를 부유 상태로 유지한다. 또한 자연계의 미세조류와 박테리아 오염에 영향을 받는다(Oh and Ahn, 2009).

광생물반응기는 고립된 형태로 배양시스템이 폐쇄된 반응기로 안정적인 제어가 가능하여 미세조류의 생산성이 높다. 태양광의 이용을 최대화하기 위한 형태로 설치 운전하며, 상대적으로 비용이 높으나 대규모 scale-up이 가능하도록 설계된다(Wijffels and Barbosa, 2010).

효율적인 태양광의 투과를 위하여 유리, 플라스틱 등의 재질로 제작된다. 현재 공항의 유헴 부지에 설치할 경우 잡초 등의 성장이 저해되고, 곤충의 유입이 줄어들어 연쇄적으로 새의 유입도 줄어들 수 있을 것으로 사료된다. 생산성 향상 및 비용절감을 위하여 다양한 이산화탄소 배출원과 필수 영양소가 함유된 하수를 동시에 이용하는 기술이 연구되고 있다(Praveenkumar et al., 2009). 이러한 상태는 공항의 폐수 처리와 공항에서 발생하는 배가스 처리 등에 활용될 수 있다.

국내 바이오디젤을 2006년부터 보급되어 2015년 7월부터 신·재생에너지혼합의무화(RFS)제도를 시행되었으며, 2024년 현재 경우 대비 바이오디젤의 혼합비율은 3.5%이다. 바이오 항공유 혼합비를 ICAO는 2025년 2%, 2040년 32%, 2050년 50%로 목표하고

있으며, 미세조류 배양이 성공적으로 이루어질 경우 목표는 상향될 것으로 예측된다.

III. 결 론

최근 세계적인 원유가격의 상승과 화석연료의 사용에 의한 온실가스 배출에 대한 규제가 강화되면서 바이오에너지에 대한 관심이 증대되고 있으며, 현재 타 교통수단에 비해 배출가스가 많은 항공기는 바이오에너지로의 대체가 절실한 상황이고 특히, 유럽내 국가들에서는 항공기 운항을 감축하고, 항공기의 바이오 연료 혼합을 의무화하고 있다. 바이오 연료개발은 유전공학의 발전과 친환경 및 이산화탄소 고정화 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 오일 함유량이 높고 성장속도가 빠른 미세조류에 의한 대체 가능성이 높다. 오일 함유량이 높은 미세조류에 의한 바이오디젤의 생산의 경우, 육상재배 식물보다 바이오디젤 전환공정의 효율 향상에 의하여 최대 1,000배 이상까지 증가가 가능하기 때문이다. 현재 미세조류의 균주 개량과 광생물반응기의 효율 향상으로 미활용 육상 토지를 사용하여 기존 디젤보다 낮은 생산원가를 달성할 가능성이 높다. 이는 전세계적으로 다양한 연구가 진행되고 있으며, 온실효과와 한계점에 도달하고 있기 때문에 가장 효율적인 탄소고정과 화석연료 대체에 효율이 높은 최적 기술이기 때문이다. 따라서 항공산업의 경우, 현재와 같은 화석연료에 일부의 바이오디젤을 혼합하는 형태가 아닌 100% 바이오디젤을 이용할 수 있는 항공기 엔진의 개발과 현재 항공유와 동일한 물리화학적 특성으로 전환할 수 있는 바이오 디젤 전환공정 개발이 시급하다.

References

1. Lee, S. H., Lee, M. G., Jeon, W., Son, M. S., and Jung, S. P., "Current status and perspectives of carbon capture and storage", *Journal of Korean Society Environmental Engineering*, 44(12), 2022, pp.652-664.
2. Dubey, A., and Akhilesh, A., "Advancements in carbon capture technologies: A review", *Journal of Cleaner Production*, 373(1), 2022, pp.133932.
3. <https://commons.wikimedia.org/wiki/File:>

- Energy_density.svg
4. Renewable Energy Center, Renewable Energy White Paper, Korea Energy Agency, 2014, <https://www.knrec.or.kr/biz/pds/pds/view.do?no=511>
 5. Rial, R. C., "Biofuels versus climate change: Exploring potentials and challenges in the energy transition", 196, 2024, pp.114369.
 6. Yun, Y. M., Jung, K. W., Kim, D. H., Oh, Y. K., and Shin, H. S., "Optimization of bio-H₂ production from acid pretreated microalgal biomass", Journal of Korea Organic Resource Recycling Association, 20(1), 2012, pp.78-86.
 7. Lee, S. H., Kook, J. W., Shin, J. H. and Sohn, J. M., "Two stage fluidized bed biomass gasifier for hydrogen production and method of preparing hydrogen using the same", Korean Patent No, KR101503607B1, 2015.
 8. Scott, J., Edmundson et. al., "Unrealized critical lanthanide extraction from sea algae mining (UNCLE SAM) USDOE", Advanced Research Project Agency - Energy(ARPA-E), 2023.
 9. Morweiser, M., Kruse, O., Hankamer, B., and Posten, C., "Developments and perspectives of photobioreactors for biofuel production", Applied Microbiology and Biotechnology, 87(4), 2010, pp.1291-1301.
 10. Oh, Y. K., and Nah, J. G., "Microalgal biodiesel production process", Korean Society of Industrial and Engineering Chemistry, 18(3), 2015, pp.1-14.
 11. Hejazi, M. A., and Wijffels, R. H., "Milking of microalgae", Trends Biotechnology, 22(4), 2004, pp.189-194.
 12. European Algae Biomass Congress, 2013, <https://www.asdevents.com/event.asp?id=2433>
 13. Bidy, M. J., Integrated Strategies to Enable Lower-Cost Biofuels, Z. Haq, Biofuels Design Case, Office of Biomass program, U.S. Department of Energy, 2012, <https://www.energy.gov/eere/bioenergy/articles/integrated-strategies-enable-lower-cost-biofuels>
 14. National Institute of Green Technology, Deep Analysis of Green Technology, 2014.
 15. Wijffels, R. H., and Barbosa, M. J., Science, 329(58993), 2010, pp.796-799.
 16. Lee, Y. C., Lee, K., and Oh, Y. K., "Recent nanoparticle engineering advances in microalgal cultivation and harvesting processes of biodiesel production: a review", Bioresource Technology Journal, 184, 2015, pp.63-72.
 17. Cho, W. Y., Choi, S. H., Oh, C. G., Lee, Y. C., Seo et al., Enhancement of lipid extraction from marine microalga, *Scenedesmus* associated with high-pressure homogenization process, Biomed Res. Int., 2012, 359432
 18. Oh, H. M., and Ahn, C. Y., "Development of large-scale CO₂ fixation and biodiesel production technology using improved microalgae", Korean Industrial Chemistry News, 12(5), 2009, pp.12-20.
 19. Praveenkumar, R., Kim, B., Choi, E., Lee, K., Cho, S., Hyun, J. S., Park, J. Y., Lee, Y.C., Lee, H. U., and Lee, J. S., "Mixotrophic cultivation of oleaginous *Chlorella* sp. KR-1 mediated by actual coal-fired flue gas for biodiesel production", Bioprocess and Biosystems Engineering, 37, 2014, pp.2083-2094.