

# 미세조류를 이용한 바이오디젤의 기술 및 계량 분석

김정준\* · 김희식\*\* · 강종석\*\*\* · 이상필\*\*\*\*

## I. 서론

### 1. 바이오에너지 개발동향

#### 1) 바이오 매스와 바이오 에너지

국제유가의 지속적인 상승으로 2012년 4월 기준 국내 주유소 휘발유 값은 사상 최고치를 돌파하였으며, 지난 2월 기름 소비량 역시 사상 최대치를 기록하였다. 또한, 지구온난화로 인한 기상이변은 전 세계 곳곳에서 한파, 이상고온, 가뭄, 홍수 등으로 나타나고 있으며, 이로 인해 인명피해와 농작물 피해, 기근 등이 잇따르고 있다. 최근 화석연료의 고갈과 지구온난화 같은 환경문제를 극복하고 급증하는 에너지 요구량을 만족시키면서 환경 친화적으로 지속가능한 성장을 도모하기 위한 대안으로 바이오매스에 대한 관심이 높아지고 있다. 에너지 고갈 및 환경문제를 동시에 해결하기 위해서는 이산화탄소 발생량이 적은 무한한 에너지원이 필요한데, 이를 만족시킬 수 있는 자원으로서 바이오매스가 독보적인 위치를 점하고 있기 때문이다.

바이오매스란 광합성에 의해 빛에너지가 화학에너지로 축적된 식물자원을 의미하는데, 크게 곡물자원을 활용한 1세대 바이오매스, 작물의 줄기나 폐목재 등을 사용하는 2세대 바이오매스, 그리고 물속에서 성장하는 미세조류를 활용한 3세대 바이오매스로 구분한다[1].

#### 2) 미세조류를 통한 바이오 연료

미세조류를 통한 바이오디젤 연구도 활발히 이루어지고 있다. 대두유, 유채유, 팜유 등 식물 기반의 바이오디젤 생산기술에 비해 미세조류를 통한 바이오디젤 생산기술의 경제성은 떨어지지만, 식물 기반의 미세조류는 양적인 면에서 한계성이 있고 일부 동남아시아에서는 삼림을 훼손한다는 지적이 있다. 따라서 미세조류 유래 바이오디젤의 경제성을 높이기 위한 연구의 일환으로 형질전환을 통한 우량 균주개발, 극지 미세조류의 신규종 분리 및 특성 연구를 통한 저온성 균주개발, 폐수 등 저가 기질의 이용 및 배양수 재활용을 통한 배양 공정 단계의 절감, 수확 및 추출공정의 효율향상 등 생산공정의 경제성을 증진시키기 위한 연구개발이 활발히 진행되고 있다.

특히, 미세조류는 식물보다 태양에너지 이용효율이 약 25배, 이산화탄소 고정능력도 15배 정도가 높다. 식물에 비하여 5-10배의 바이오매스 생산성이 높고, 배양조건에 따라 체내에 지질을 최대 70%까지 축적할 수 있어, 단위 면적당 지질의 생산량은 식물에 비하여 50-100배 이상 높다. 최근 생명공학기술의 발달로 미세조류를 유전공학적으로 개량하여 생산속도와 지질 함량을 증대시키기 위한 연구가 주목을 받고 있다. 또한 미세

---

\* 김정준, 한국과학기술정보연구원/과학기술연합대학원대학교 학생연구원, 02-3299-6236, jungjoonkim@kisti.re.kr  
\*\* 김희식, 한국생명공학연구원 책임연구원/과학기술연합대학원대학교 교수, 042-860-4326, hkim@kribb.re.kr  
\*\*\* 강종석, 한국과학기술정보연구원 책임연구원/과학기술연합대학원대학교 교수, 02-3299-6048, kangis@kisti.re.kr  
\*\*\*\* 이상필, 한국과학기술정보연구원 책임연구원/과학기술연합대학원대학교 교수, 02-3299-6066, splee@kisti.re.kr

조류 배양과 수확공정을 최적화하고 바이오디젤 생산을 위한 경제적이고 친환경적인 추출·전환 공정에 관한 연구개발도 활발히 진행되고 있다. 그러나 아직까지 미세조류를 이용한 바이오디젤 생산공정의 단가가 석유 기반 디젤의 생산공정에 비해 높기 때문에 경제성 확보를 통한 상용화에 어려움이 있는 실정이다. 본 논문에서는 미세조류의 균주개발, 개방형 및 폐쇄형 방식의 미세조류 배양, 미세조류 바이오매스의 수확, 오일추출 및 바이오디젤로의 전환을 중심으로 최근 동향을 살펴보고 미세조류 기반의 바이오디젤 생산에 대한 가능성을 소개하고자 한다.

## II. 본문

### 1. 미세조류 연구개발 동향

최근, 미세조류 바이오매스를 활용한 연구 및 기술개발이 활발히 이루어지고 있다. 미세조류 바이오연료의 연구동향을 보면, 2006년 이후부터 연구논문 및 특허가 급증하고 있으나 대부분 공정 및 배양기술에 집중되어 있으며, 지질대사에 관련된 연구논문 및 특허의 출현빈도가 높아지고 있다. 유전자 변형기술을 이용한 지질의 생산성 증대에 관한 연구는 육상식물을 대상으로 많은 연구가 진행되어 왔다. 미세조류의 경우 유전자변형 작물 분야의 거대기업인 몬산토사와 연계된 사파이어사에서 수천개의 새로운 계통의 미세조류를 개발하고 있으며, 최근에는 여러 기업과 연구그룹에서 많은 연구성과를 발표하고 있다.

미세조류로부터 바이오디젤 생산성을 극대화하기 위해서 미세조류의 지질대사기작을 이해하는 것이 중요하다. 미세조류의 지질대사 특히, 지방산 및 중성지방 TAG(triacylglycerol)의 생합성 경로는 고등식물에 비해 연구가 미흡한 편이다. 그러나 유전체(genome) 분석 데이터에 의하면, 육상식물에서 지질대사에 관련된 많은 유전자들의 유사체(homolog)가 미세조류에 존재하고, 지질대사 관련 유전자 및 효소 등의 특성을 살펴보면 미세조류 지방산 및 TAG 합성의 기본 대사과정은 고등식물과 동일하지만 다양한 차이점이 존재한다[2].

최근 미세조류의 지질대사 경로의 변이체 및 형질전환 방법을 이용하여 지질 생산성을 높이는 연구가 진행되고 있으나, 아직까지 주요한 성과가 없다. 그 이유는 육상식물에서와 같은 효율적인 핵형질 전환기술이 확립되지 않아서 많은 연구가 이루어지지 않았다. 미세조류의 지질대사 관련 유전자 및 효소 등의 일반적 특성 및 기본 경로가 다른 생물과 유사하므로, 다양한 생물의 연구사례를 분석하여 미세조류에 적용하는 것이 필요할 것이다.

한국생명공학연구원(KRIBB) 김희식박사 연구팀은 지질함량이 크게 증가하는 기작에 관하여 미세조류의 혼합영양(mixotrophic) 조건하에서 관련 유전자 발현량을 분석하였다. 이러한 지질함량의 변화는 질소결핍 조건과 혼합영양 조건(아세테이트 공급)에서 뚜렷한 변화를 보였고, 지방산 합성관련 유전자(BCX1: Acetyl-CoA carboxylase, MCT1: S-malonyl transferase), TAG합성 관련유전자(ACS2: Acetyl-CoA synthetase, DGTT4: diacylglycerol O-acyltransferase) 등의 발현량 변화를 qRT-PCR을 통해 관찰하였다. 미세조류의 지질 생산성을 높이기 위하여 우수 세포주를 개발하는 직접적인 방법으로 유전적 개량기술을 활용할 수 있다. 유전자의 발현을 변형시키는 방법으로는 유전체 정보를 기반으로 유전자의 도입, 제거, 유전자 조절기술(gene knock out, gene knock down) 등이 있다. 현재 많은 연구그룹에서 산업적 활용을 목표로 다양한 미세조류를 대상으로 효율적인 형질전환기술을 개발하고 있다[3].

또한, 미세조류 배양과 추출에 관한 연구도 진행되고 있으나 국내 광생물반응기에 관한 연구는 주로 기초 실험에 머물고 있으며, 여러 종류의 미세조류에 대하여 광범위하게 적용할 수 있는 배양공정, 배양기의 개발

에 관한 연구가 미흡한 실정이다. 이제까지의 결과도 설계요소 및 광생물 반응인자의 부분적 관점에 대한 연구성과가 대부분이어서 광생물반응기 시스템에 관한 총체적인 연구가 절실히 요구되고 있다. 미세조류의 대량배양을 통한 유용물질의 생산과정에서 해결되어야 할 중요한 과제 중의 하나가 경제적인 수확방법의 개발이다. 대부분의 미세조류는 배양액에서의 농도가 낮으며, 크기가 30 $\mu$ m 이하이고, 물의 밀도보다 약간 큰 정도여서 분리하기가 쉽지 않다. 또한, 적합한 수확방법은 조류의 종 및 조류로부터 얻어질 유용물질의 용도에 따라 서로 달라진다. 따라서 경제성, 효율성, 환경친화성 등의 요소를 고려하여 미세조류의 배양규모 및 배양종에 따른 최적의 수확기술을 적용하여야 한다. 실제로 미세조류의 자연적 응집을 유도하여 침강시키는 생물응집(bioflocculation)은 대규모 배양시 적용될 수 있는 적절한 방법으로 인식되고 있다. 또한 근래에는 환경저에너지 소모형 바이오매스 수확기술들이 계속 개발되고 있다.

### 1) 오일 추출 및 바이오 디젤 생산

미세조류와 유지식물의 차이는 지질의 추출을 위해 서로 다른 처리과정들을 이용한다는 것이다. 미세조류로부터 지질을 추출하기 위해 기계적 추출, 전기천공법, 초임계 이산화탄소 유체추출, 초음파 및 도데칸[4] 등을 이용한 물리적인 미세조류 짜기(microalgae milking) 방법들도 제안되었지만 재활용이 가능한 화학물질로 직접 추출하는 방법이 현재 사용되고 있다.

역사적으로 미세조류를 이용하여 바이오연료를 생산하는 데 있어서 주요장점으로 강조해 왔던 점은 육상작물에 비해 자체적으로 많이 함유하고 있는 탄소수 14 이상(>C14)의 고에너지 구조의 지방산들이다. 물론 미세조류 지질들은 유지식물과 마찬가지로 지방산과 트리글리세라이드(triglyceride) 화합물들을 함유하고 있어 기존의 트랜스에스테르화(transesterification) 기술을 이용해 지방산 메틸 에스테르(FAME, fatty acid methyl ester) 형태로 전환시킬 수 있다. 동, 식물성 오일과 알코올을 촉매 아래에서 반응시키면 지방산 메틸에스테르와 글리세롤이 생성되며, 지방산 메틸에스테르를 정제하면 바이오디젤이 얻어진다. 부산물로 생성된 글리세롤은 제약, 식품 및 플라스틱 제품에 순도에 맞게 정제되어 이용되고 있다. 트랜스에스테르화 반응의 촉매로는 염기 촉매, 산 촉매, 효소 촉매가 이용되고 있는데, 이중에서 이중염기 촉매와 산 촉매가 가장 많이 적용되고 있다[5].

## 2. 계량정보분석

### 1) 미세조류를 이용한 바이오디젤에 관한 계량정보분석

바이오연료(바이오디젤, 바이오알콜, 바이오가스 등) 및 「미세조류를 이용한 바이오디젤」에 대한 계량정보분석을 위하여 과학기술 분야의 대표적인 인용색인(Citation Index) 데이터베이스인 Web of Science (WoS, Thomson Reuters)의 SCIE(Science Citation Index Expanded)<sup>1)</sup> 데이터베이스를 사용하였다. 바이오연료(바이오디젤, 바이오알콜, 바이오가스 등)의 전체적인 추이를 파악하기 위하여 먼저, SCIE 데이터베이스에서 논문의 제목, 주제어, 초록 등을 대상으로 정보검색을 실시하고, 정보분석시스템<sup>2)</sup>을 사용하여 데이터 정제·분석

1) SCIE(Science Citation Index Expanded)는 과학기술 분야 저널들의 학제간 연구의 지표로 사용되고 있다. SCIE데이터 베이스는 약 7100여종의 과학기술 저널과 약 150 여종의 과학기술 관련 저널로 구성되어 있고, 저널에 게재되는 모든 논문의 인용횟수를 포함하고 있으며, 1899년부터 현재까지의 논문들이 수록되어 있음.

2) SCIE(Science Citation Index Expanded) 데이터 베이스에서 추출된 바이오연료(바이오디젤, 바이오알콜, 바이

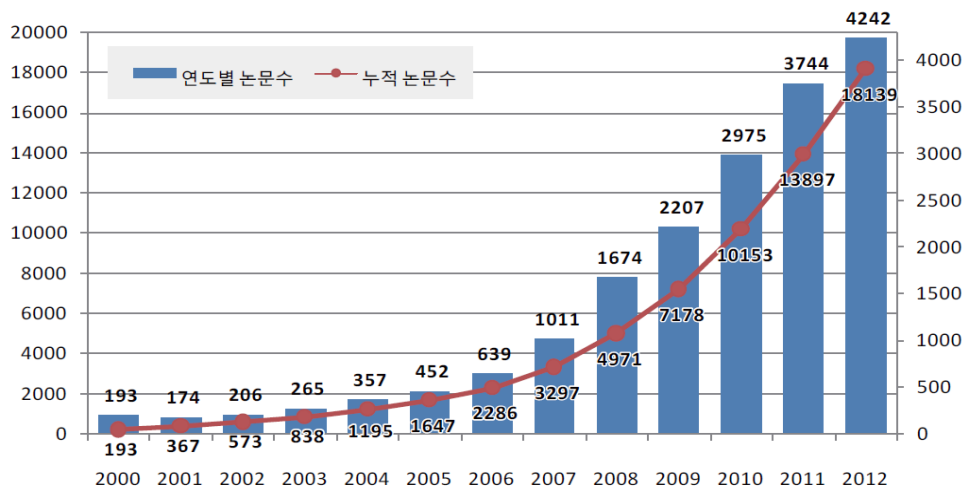
을 수행하였다. 검색에 사용된 검색식은 <표 1>과 같다.

검색연도는 최근 약 13년을 기준(2000-2012년)으로 설정하고, 검색조건에서 제시한 질문식을 검색하여 정제한 결과, 바이오연료 관련 논문이 18,139건으로 나타났다. 분석 대상 기간의 연평균 증가율<sup>3)</sup>은 연도별 논문수 기준으로는 약 29%, 누적 논문수 기준으로는 약 46%로 나타났다. (그림 1)

<표 1> 바이오연료 및 미세조류의 정보검색

순번	검색어
1	Topic=(biofuel* OR bio-fuel*)
2	Topic=(biodiesel* OR bio-diesel*)
3	Topic=(biodiesel* OR bio-diesel* OR alcohol* OR ethanol* OR methanol* OR butanol* OR bioalcohol* OR bioethanol* OR biomethanol* OR biobutanol* OR bio-alcohol* OR bio-ethanol* OR bio-methanol* OR bio-butanol*) OR biogas* OR bio-gas* OR hydrogen* OR methane* OR biohydrogen* OR biomethane* OR bio-hydrogen* OR bio-methane* OR biogasoline* OR bio-gasoline*)
3	#1 AND (#2 Or #3) Databases=SCI-EXPANDED Timespan=2000-2013 Document Type=Article(Journal), language=English
4	#1 OR #2 Databases=SCI-EXPANDED Timespan=2000-2013 Document Type=Article(Journal), language=English
5	Topic=(algae* OR algal* OR microalga* OR micro-alga*)
5	#4 AND #5 Databases=SCI-EXPANDED Timespan=2000-2013 Document Type=Article(Journal), language=English

특히, 세계 각국이 기후변화 해결을 위한 저탄소·지속가능한 생산체제 구축을 위한 적극적인 정책을 시행하고, 국제 원유가격이 급등하기 시작한 2007년 이후부터, 바이오연료에 관한 논문수가 급격히 증가하고 있는 것으로 나타났다.

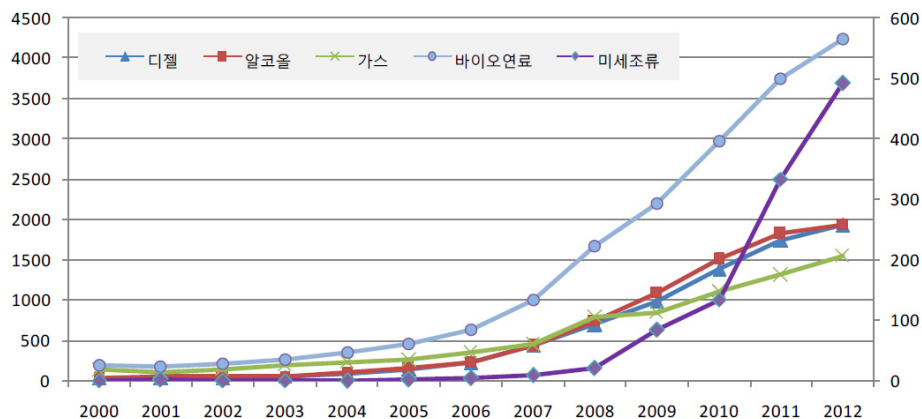


(그림 1) 바이오연료의 연도별 논문수 현황

오가스 등)에 관한 논문정보의 데이터를 정제하기 위하여 한국과학기술정보연구원(KISTI)에서 개발한 과학기술정보분석시스템(KITAS, Knowledge Matrix)을 사용하였음.

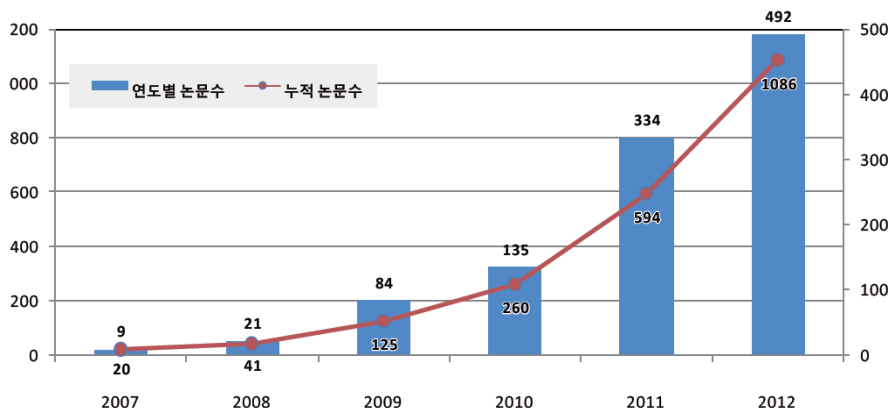
3) 연평균증가율 산출식 :  $r = e^{(\ln An - \ln A1) / (n-1)}$

2000년~2012년까지, 최근 13년을 기준으로 검색된 바이오연료에 관한 논문 18,139건에 대하여 미세조류 바이오디젤, 바이오디젤, 바이오알코올, 바이오가스, 바이오연료 전체 등으로 분류하여 연도별 추이를 분석하였다. 바이오연료 각 분야별로 2007년부터 대부분 상당한 증가추이를 보이고 있으며, 특히 미세조류 바이오디젤은 2009년부터 다른 바이오연료 분야에 비해 논문수가 급격히 증가하고 있다.



(그림 2) 분야별/연도별 논문수 추이(바이오연료)

미세조류 바이오디젤 관련 논문의 교신저자 국적을 분석한 결과, 세계적으로 56개 국가에서 관련 연구가 수행되는 것으로 나타났다. 검색 연도는 최근 약 13년을 기준(2000~2012년)으로 설정하고, 검색조건에서 제시한 질문식으로 검색·정제한 결과, 미세조류 바이오디젤 관련 논문이 1,086건으로 나타났다. 특히, 2008년 6월 ABO(Algal Biomass Organization) 국제기구 출범 이후인 2009년부터 연간 84건, 2010년 135건, 2011년에는 전년 대비 약 2.5배 이상의 미세조류 바이오디젤에 관한 논문이 발표되는 등, 최근 급격한 증가추세를 나타내고 있다.



(그림 3) 미세조류 바이오디젤의 연도별 논문수 현황

## 2) 한국의 연구동향 계량정보분석

2000년~2013년까지, 최근 14년을 기준으로 검색된 미세조류 바이오디젤관련 논문 중에서 우리나라의 발표한 논문(96건)에 대하여 연구기관별로 분석한 결과, 3건 이상의 논문을 발표한 연구기관이 12개 기관으로 조사되었다. 한국과학기술원(KAIST)이 14건으로 1위이고, 이어서 한국생명공학연구원(KRIBB), 연세대

학교가 각각 13건, 10건으로 2, 3위를 차지하고 있는 것으로분석되었다. 이외에도 한국에너지기술연구원 (KIER), 조선대학교, 부경대학교, 인하대학교, 포항산업과학연구원(RIST), 전남대학교, 강원대학교, 경희대학교, 부산대학교 등이 연간 3건 이상의 미세조류 바이오디젤에 관련 논문을 발표한 것으로 나타났다.

<표 2> 한국의 연구기관별 논문수 현황(미세조류 바이오디젤)

순위	연구기관	논문수
1	KOREA ADV INST SCI & TECHNOL KAIST	14
2	KOREA RES INST BIOSCI & BIOTECHNOL KRIBB	13
3	YONSEI UNIV	10
4	KOREA INST ENERGY RES KIER	6
5	CHOSUN UNIV	5
6	PUKYONG NATL UNIV	5
7	INHA UNIV	4
8	RES INST IND SCI & TECHNOL RIST	4
9	CHONNAM NATL UNIV	3
10	KANGWON NATL UNIV	3
11	KYUNG HEE UNIV	3
12	PUSAN NATL UNIV	3
13	기타	23
계		96

연세대학교 JEON BH, 한국생명공학연구원(KRIBB) OH HM이 각각 6건의 논문을 발표하여 1, 2위를 차지하였다. 한국과학기술원(KAIST) HAN JI이 4건, 부산대학교 LEE T, 전북대학교 CHOI YE, 서원대학교 LEE HY, 한국에너지기술연구원(KIER) PARK JY 등이 각각 3건의 논문을 발표하여 3~7위를 기록하였다. 이외에도 부경대학교 JEONG GT, 조선대학교 JUNG WK, 경희대학교 LEE EY, 한국생명공학연구원 (KRIBB) SEO JW, 인하대학교 TRAN HL, 한국과학기술원(KAIST) YANG JW, 포항산업과학연구원(RIST) YI H, 경북대학교 YOON HS 등이 각각 2건 이상의 논문을 발표한 것으로 조사되었다.

<표 3> 한국의 연구자별 논문수 현황(미세조류 바이오디젤)

순위	저자	소속기관	논문수
1	JEON BH	YONSEI UNIV	8
2	OH HM	KOREA RES INST BIOSCI & BIOTECHNOL KRIBB	8
3	HAN JI	KOREA ADV INST SCI & TECHNOL KAIST	4
4	LEE T	PUSAN NATL UNIV	3
5	CHOI YE	CHONBUK NATL UNIV	3
6	LEE HY	SEOWON UNIV	3
7	PARK JY	KOREA INST ENERGY RES KIER	3
8	JEONG GT	PUKYONG NATL UNIV	2
9	JUNG WK	CHOSUN UNIV	2
10	LEE EY	KYUNGHEE UNIV	2
11	SEO JW	KOREA RES INST BIOSCI & BIOTECHNOL KRIBB	2
12	TRAN HL	INHA UNIV	2
13	YANG JW	KOREA ADV INST SCI & TECHNOL KAIST	2
14	YI H	RES INST IND SCI & TECHNOL RIST	2
15	YOON HS	KYUNGPOOK NATL UNIV	2

### III. 결론

미세조류는 에너지 및 산업소재 생산, 온실가스 저감이 가능한 자원으로 큰 잠재력을 지니고 있다. 이러한 큰 잠재력은 향후 에너지 분야, 환경 분야, 화학 분야 등, 총 3가지 분야를 중심으로 확대될 전망이다. 에너지 분야에서 특히 각광 받고 있는 이유는 미세조류가 모든 바이오디젤 생산 작물 중 오일 생산성이 가장 우수하고, 식량자원의 에너지화에 대한 비판으로부터 자유로운 생물자원이며, 석유계 디젤과 유사한 물성을 가진 바이오연료를 생산할 수 있기 때문이다.

미세조류를 이용한 바이오디젤 생산은 미래기술로서 단순히 대체 에너지와 고부가가치 제품을 생산한다는 것을 포함하여 환경문제의 해결이라는 커다란 과제를 떠안고 있다. 또한, 가까운 미래 석유자원의 고갈이라는 잠재적인 위협과 식량자원의 고갈 등도 미세조류를 이용한 자원의 개발을 촉진하고 있다. 미세조류를 이용한 바이오디젤 생산기술은 공정의 경제성을 얻기 위하여 다양한 기술들이 단일 시스템 내에서 조화롭게 운영되어야 하며, 하폐수 처리장의 폐수를 이용하여 미세조류를 배양하는 것이 경제성 제고라는 측면에서 무시할 수 없는 방식이다

아직은 석유자원에 비해 경제성이 없고 대량생산에 대한 경험이 부족할 지라도 혁신적인 원가절감 기술 및 추가 수익확보 여부에 따라 상업화 시점이 앞당겨 질 수 있는 가능성 매우 높다. 미세조류 생명공학은 생물산업의 활성화와 함께 이산화탄소 저감 등 환경산업의 발전을 함께 도모할 수 있는 지속가능한 미래 유망산업으로서 성장해 나갈 것으로 기대되고 있다. 따라서 이와 같은 선진기술을 선점하여 국가 경쟁력의 우위를 확보하기 위해서는 ‘미세조류를 이용한 바이오디젤’ 연구개발 및 산업화에 대하여 정부 및 산업계의 지속적인 관심과 투자가 요구된다.

### 참고문헌

- Yang, J. W. (2012) The Korean Federation of Science and Technology Societies.  
Gong and Jiang (2011) *Biotechnol Lett* 33:1269-1284.  
Ramanan R, Kim BH, Cho DH, Ko SR, Oh HM, Kim HS (2013) *FEBS Lett.* 587: 370-377.  
Hejazi MA, Wijffels RH (2004) *Trends Biotechnol.* 22: 189-194.  
Meher, L. C., Sagar, D. V., and Naik, S. N. (2006) *Renew. Sust. Energ. Rev.*, 10: 248-268.