



미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한 연구

바이오 (기능성)소재를 중심으로

지민규 · 최상기 · 조지혜



■ 연구진

연구책임자 지민규 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
참여연구원 최상기 (한국환경정책·평가연구원 선임연구위원)
조지혜 (한국환경정책·평가연구원 연구위원)

■ 연구자문위원 (가나다 순)

배정환 (전남대학교 경제학부)
이진희 (한국환경정책·평가연구원 부연구위원)
오희목 (한국생명공학연구원 책임연구원)

© 2016 한국환경정책·평가연구원

발행인 박 광 국
발행처 한국환경정책·평가연구원
(30147) 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 과학·인프라동
전화 044-415-7777 팩스 044-415-7799
<http://www.kei.re.kr>
인 쇄 2016년 12월 26일
발 행 2016년 12월 31일
등 록 제17-254호 (1998년 1월 30일)
ISBN 979-11-5980-061-0 93530

이 보고서를 인용 및 활용 시 아래와 같이 출처를 표시해 주십시오.
지민규, 최상기, 조지혜(2016), 「미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한
연구: 바이오 (기능성)소재를 중심으로」, 한국환경정책·평가연구원.

값 5,000원

서 언

국제적으로 석유계 연료 및 화학제품의 사용으로 인한 다양한 환경오염 문제가 발생되고 있습니다. 2000년부터 석유계 산업의 대안으로 바이오산업이 주목받아 왔으며 매년 시장 규모가 확대되고 있습니다. 바이오산업 중 미세조류 활용 분야는 비식용작물 및 활용가치의 다양성이란 장점을 가지며 바이오에너지를 중심으로 성장하여 왔습니다. 하지만 바이오에너지는 석유계 원료와 비교 시 고가의 생산비용으로 인해 산업화의 정체기에 머무르고 있습니다. 따라서 최근 미세조류 산업분야는 바이오에너지 기반하에 환경정화, 바이오 플라스틱, 바이오 기능성 식품 등의 고부가가치 소재 산업으로 변화되어 미국·유럽·일본을 중심으로 발전하고 있습니다. 본 연구에서는 미세조류를 활용한 고부가가치 산업의 활성화를 위해 국·내외 제품화 기술개발 동향, 해외 법 및 제도현황을 살펴봄으로써, 국내 적용을 위한 정책적 시사점을 도출하였습니다.

본 연구의 책임을 맡아 수행한 지민규 박사를 비롯하여 연구진으로 참여한 최상기 박사, 조지혜 박사의 노고에 감사드립니다. 또한, 자문위원으로서 연구의 질 향상에 도움을 주신 전남대학교 배정환 교수, 한국생명공학연구원 오희목 박사, 이진희 부연구위원께도 깊은 감사의 말씀을 드립니다.

2016년 12월

한국환경정책·평가연구원

원장 박 광 국

국문요약

미세조류 자원화 분야는 신재생에너지 공급의무제도에 따라 바이오디젤 생산을 중심으로 발전되어 왔다. 하지만, 현재까지는 석유자원과 비교 시 높은 생산단가와 원료의 대량공급 문제로 상업화가 지연되고 있다. 최근 미세조류 자원화의 경제성을 위해 석유화학 대체물질과 기능성 소재 분야 등 고부가가치 산업이 발달되고 있으며 관련 시장 규모가 매년 확대되고 있다. 이에 따라 본 연구에서는 미세조류의 고부가가치 자원화를 위해 바이오 플라스틱과 바이오기능성 소재(기능성 식품, 화장품 및 의약품)를 중심으로 한 연구개발 동향, 시장 현황 및 제도화에 대한 내용을 검토하여 향후 개선해야 할 사항들을 알아보았다. 또한, 자원화 이외에 미세조류 부영양화에 대한 인식변화 측면에서 환경 분야의 활용가치에 대해서도 검토해 보았다.

현황연구결과, 미세조류 바이오매스의 고부가가치 물질 전환은 스피룰리나, 클로렐라 기능성 식품으로 위주로 나타났으며, 이외에 오메가3, 아스타잔틴 등의 다양한 항산화 물질을 이용한 식품, 화장품 산업이 발달되고 있다. 바이오 플라스틱의 경우, 감자·옥수수 등 전분계를 이용한 산업이 발달되었으며, 최근 비식용 작물과 조류 등 생물을 활용한 Bio-PET, PLA 생산기술이 개발되고 있다. 환경적 측면으로는 미세조류가 수계 방사성물질과 환경호르몬 등을 저감시킬 수 있는 사실이 입증되어 질소·인·중금속 오염원의 제거와 함께 활용범위가 확대되고 있다.

미세조류 자원화를 위한 관련 제도는 해당 법률에 의거하여 인증제도가 확립되었거나 보완 중이다. 기능성 소재의 경우 미세조류 기반 물질의 안전성과 효능을 위주로 평가되고 있으며, 바이오 플라스틱은 생분해성과 비생분해성 제품에 따라 바이오매스의 함량, 생분해도, 중금속 함량 등이 평가기준이다. 한편, 미세조류의 자원화는 대규모 설비 운용이 제한되어 원료의 대량 확보가 어렵다. 따라서 산·학·연·정의 협력을 통한 바이오매스 수급방안 확립과 기술의 상업화 연계를 위한 제도적 뒷받침이 필요하다고 사료된다.

주제어 : 바이오매스 자원화, 미세조류, 고부가가치 물질, 자원화 제도

| 차례 |

제1장 서론	1
1. 연구 배경 및 목적	1
2. 연구 내용 및 방법	3
제2장 미세조류 바이오매스의 생산 및 이용기술 현황	5
1. 경제적 미세조류 배양기술	5
2. 미세조류 바이오매스 수확 및 전 처리 기술	7
3. 미세조류 고부가가치 물질 탐색기술	8
4. 바이오매스 생산 및 이용기술의 개선점	9
제3장 미세조류의 고부가가치 자원 활용	11
1. 바이오기능성 소재의 생산기술 현황	11
2. 바이오 플라스틱의 생산기술 현황	22
제4장 미세조류의 환경 분야 활용 가능성	35
제5장 결론 및 시사점	37
참고문헌	41
Abstract	45

| 표 차례 |

〈표 3-1〉 미세조류 종별 활용물질 및 응용 분야	12
〈표 3-2〉 카로티노이드의 세계시장 규모	16
〈표 3-3〉 바이오기능성 소재의 시장 현황(미국)	18
〈표 3-4〉 바이오기능성 소재의 시장 현황(한국)	18
〈표 3-5〉 국내 건강기능식품의 분류	20
〈표 3-6〉 천연화장품 인증기관	22
〈표 3-7〉 국내 바이오 기반 제품의 현황	28
〈표 3-8〉 국외 바이오 기반 제품의 현황	29

| 그림차례 |

〈그림 1-1〉 미세조류 바이오리파이너리 개략도	2
〈그림 1-2〉 연구 수행 체계도	4
〈그림 2-1〉 Raceway 형태의 개방형 미세조류 배양 플랜트(칠곡군) 및 관형 형태의 밀폐형 배양 플랜트(㈜카이로스)	6
〈그림 2-2〉 iHTac의 개념도 및 시스템 이미지	9
〈그림 2-3〉 미세조류 활용기술의 경제성을 위한 항목조사	10
〈그림 3-1〉 미세조류 기반 기능성 식품 생산 현황	14
〈그림 3-2〉 바이오 플라스틱의 분류	23
〈그림 3-3〉 바이오 플라스틱의 상세분류	24
〈그림 3-4〉 조류의 바이오 플라스틱 생산 경로	25
〈그림 3-5〉 조류 기반 바이오제품	27
〈그림 3-6〉 바이오 플라스틱 생산을 위한 토지사용 현황	30
〈그림 3-7〉 바이오 플라스틱 분류별 생산 비율	31
〈그림 3-8〉 바이오 기반 플라스틱(왼쪽)과 생분해성 플라스틱(오른쪽)의 제품화 분류	32
〈그림 3-9〉 국가별 바이오 플라스틱 제품 인증제도	34
〈그림 4-1〉 미세조류를 활용한 미국 내 폐수처리장 운영사례	36

제1장

서론

1. 연구 배경 및 목적

세계적으로 바이오산업은 21세기 첨단기술 분야로서 인류의 지속가능한 삶을 위해 발전하고 있다. 바이오산업의 원료인 바이오매스는 생물체 내 다양한 구성물질을 이용하여 에너지를 포함한 화학·식량·의약·전자 등의 다양한 분야로 적용되고 있으며, 생명·환경 및 나노공학 등이 융합된 신산업으로 변화되고 있다. 최근 한국의 바이오산업도 생물의약품 중심의 의약 바이오와 농업 중심의 그린바이오에서 화학제품 대체, 바이오연료 및 기능성 소재 등을 접목한 융·복합 바이오산업 분야로 전환됨을 알 수 있다.¹⁾

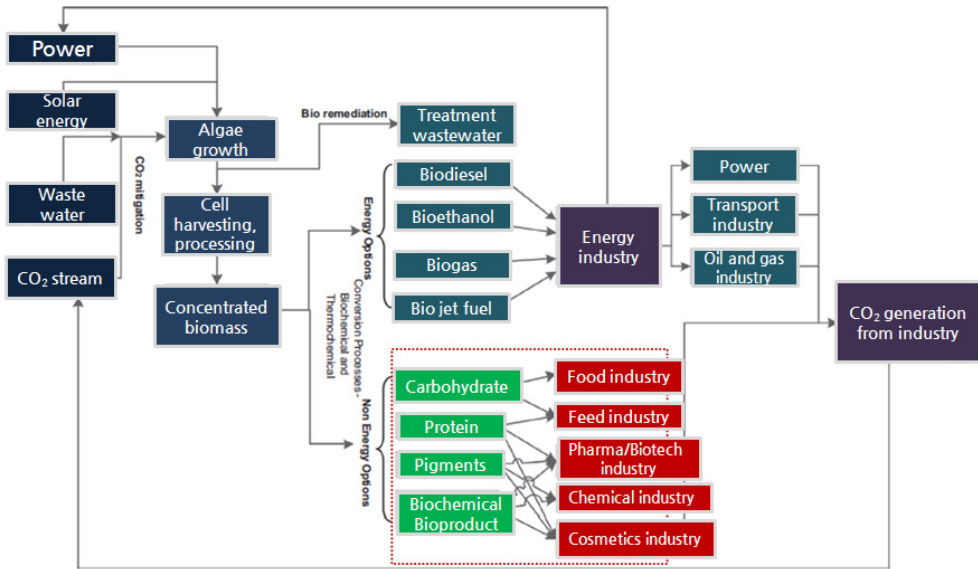
다양한 바이오 분야 중 환경-에너지에 부분에서는 2000년도부터 석유대체 연료와 온실가스 저감을 목적으로 바이오디젤, 바이오에탄올의 등 바이오에너지 분야에 대한 집중적인 R&D 투자와 기술개발이 이루어져 왔다. 바이오매스 원료는 1세대 식용작물인 팥, 대두, 사탕수수, 옥수수, 2세대 비식용작물인 톱밥과 자트로파 그리고 3세대 미세조류, 거대조류로 분류되어 왔다. 이 중 차세대 바이오매스로 알려진 미세조류는 1) 1, 2세대 바이오매스 작물에 비해 단위면적당 20~100배의 높은 생산량, 2) 1톤의 바이오매스당 약 1.83톤의 이산화탄소 저감, 3) 바이오매스 전 처리 과정의 용이성 및 4) 세포 내 탄수화물·지질·단백질 이외에 다양한 유용물질을 함유한 장점을 가지고 있다.²⁾

하지만 국내 협소한 부지에서의 상업화 바이오매스 생산시설의 부족과 회수, 전 처리 등 공정에 따른 고가의 연료 생산비용으로 산업화의 발전이 지연되고 있다. 최근 조류 바이오

1) 생명공학정책연구센터(2015a), p.143.

2) 조지혜, 이희선(2011), pp.9-10.

매스를 활용한 산업 분야의 경제성을 높이기 위해, 바이오연료 생산 후 부산물을 활용한 고부가가치 물질의 생산연구가 활발히 이루어지고 있으며 개념도는 <그림 1-1>과 같다.



자료: Viganì et al.(2015).

<그림 1-1> 미세조류 바이오리파이너리 개략도

고부가가치 물질 중 첫 번째로 조류 기반 기능성 건강식품, 바이오화장품 소재 및 (천연물) 바이오 의약품이 있으며, 근래 생산기술의 개발로 인해 제품화가 급증하고 있다. 관련 분야에서는 제품에 필요한 특정물질의 효율적 생산으로 미세조류 균주의 시스템 생물공학을 통한 바이오리파이너리 기술이 발달하고 있다. 현재 한국은 평균 수명의 증가와 고령화에 따른 웰빙한 삶을 위해 항노화, 항산화, 항염증 등 건강증진에 관심이 높아지고 있고, 제품의 원료를 인체 친화도가 높은 천연 바이오매스 소재로부터 이용률이 증가하는 추세이다.³⁾ 두 번째로 석유 대체 바이오 화학제품 중 바이오 플라스틱에 대한 관심이 높아지고 있다. 바이오 플라스틱은 석유계 플라스틱으로 대체될 시 연간 31-71%의 이산화탄소 배출량을 저감시킬 수 있고,

3) 오유관, 나정걸(2015), pp.12-13.

최근 해양에서 문제가 되고 있는 미세플라스틱의 감소에 의한 생태계 건강성 확보 등 환경 분야에 많은 기여를 할 수 있다. 바이오 플라스틱은 대표적으로 PLA(Polylactic acid) 고분자 물질로 제조된 생분해성 플라스틱과 Bio-PET(Polyethylene Terephthalate)의 비생분해성 플라스틱이 상용화되고 있다. 미세조류를 활용한 바이오 플라스틱의 생산은 초기 연구 단계이지만 최근 상업화 가능한 유망기술이 개발되고 있어 타 바이오매스를 대체할 수 있을 것이라 전망된다. 근래 바이오 플라스틱 시장은 소재의 물성 개선, 제조가 하락 및 국제적인 CO₂ 환경규제로 자동차, 가전제품, 생활용품 산업 등 세계시장에서 수요가 증가하고 있으며, 미국·일본을 포함한 선진국들에서 의무사용 등의 규제를 통해 사용을 장려하고 있다.⁴⁾

바이오매스를 활용한 바이오산업의 배경은 탄소저감을 통한 지구온난화 방지, 석유계 오염원 배출 감소 및 천연자원 순환을 통한 인간의 건강하고 지속적인 삶의 의미가 내포되어 있다. 미세조류 바이오산업의 발전에는 향후 조류배양의 전방산업으로부터 물질분리, 발효 공정, 바이오신소재 개발 분야 그리고 각 물질을 이용한 제조업체의 후방산업까지의 체계적인 중장기 전략화를 통한 경쟁력 제고 및 산업화 과정이 필요하다.⁵⁾ 본 연구에서는 (미세)조류를 활용한 선진국들의 연구개발 동향, 제품화, 시장 현황을 조사하고 관련 제도와 정책을 살펴봄으로써, 국내 미세조류 바이오산업의 개선점을 파악하고 발전 가능성을 위한 시사점을 도출하고자 한다. 이외에 환경적 측면에서 미세조류를 활용한 다양한 오염원의 저감사례 및 바이오 플라스틱의 장점을 조사하여 환경 분야 적용방안을 위한 시사점을 제고하고자 한다.

2. 연구 내용 및 방법

본 연구에서는 미세조류를 활용한 국외 연구개발, 산업화 동향 및 제도의 조사를 통해 국내 미세조류 바이오산업의 개선점과 발전에 대한 시사점을 제안하는 것이다. 보고서는 총 5장으로 구성되어 있으며, 제1장의 서론을 포함한 각 장의 내용은 다음과 같다. 제2장은 바이오매스의 원료 확보를 위한 미세조류 배양기술과 다양한 원료물질을 추출하기 위한 전 처리 방법, 그리고 목적 물질 확인을 위한 최신 탐색기술을 살펴보았다. 제3장은 조류의

4) 이재춘, 배철민(2016), pp.1-2.

5) 오희목(2011), pp.359-360.

고부가가치 자원 중 국·내외 바이오기능성 소재 및 바이오 플라스틱 생산 연구, 제품화 동향, 관련 시장 규모의 파악 그리고 자원화 제도에 대해 조사하였다. 제4장은 환경성 측면에서, 미세조류를 활용한 환경오염원 저감에 관한 가능성을 살펴보았다. 마지막으로 제5장은 선진국의 바이오산업 관련 사례를 바탕으로, 국내 현황의 파악 및 문제점 개선에 관한 시사점과 결론으로 정리하였다. 연구는 문헌, 논문 조사와 전문가 자문을 주된 방법으로 수행하였고, 이외 국내외 정부기관 및 국제기구 등에서 발간한 자료들을 활용하였다.



〈그림 1-2〉 연구 수행 체계도

제2장

미세조류 바이오매스의 생산 및 이용기술 현황

1. 경제적 미세조류 배양기술

미세조류를 활용한 소재 및 제품 개발 시 경제적인 바이오매스의 원료 확보는 중요하다. 미세조류는 담수·해수 등 다양한 환경에서 서식하며, 빛과 온도, 질소·인 및 탄소원 농도 등 조건에 따라 성장속도가 결정된다. 그동안 국내외 연구자들은 저가의 비용으로 미세조류 바이오매스를 대량생산하기 위해 이산화탄소 배출시설(예, 지역난방공사, 화력발전소)의 탄소원과 폐수(예, 축산폐수, 생활폐수, 산업폐수) 처리 시설 내 영양염류들을 활용하여 왔으며, 이외에 고밀도 조류배양을 위해서 유전학적 균주개량과 발광다이오드(LED: Light Emitting Diode) 기술을 적용해 왔다. 조류 종에 따라서는 광독립영양형 배양(Phototrophic Culture), 종속영양형 배양(Heterotrophic Culture), 혼합영양형 배양(Mixotrophic Culture) 및 광·종속영양형 배양(Photoheterotrophic Culture) 방식이 존재하며, 미국과 중국에서 혼합영양 배양방법을 적용한 바이오매스 대량생산에 성공하였다.⁶⁾⁷⁾

미세조류 바이오매스 배양에 관한 실내조건의 연구가 최적화되었다면 지역의 환경과 생산물질에 적합한 조류 배양시스템의 대형화가 필요하다. 대량 배양시스템은 전 세계적으로 개방형 연못시스템(Open Ponds System)의 수로(Raceway) 형태와, 밀폐형 배양시스템(Closed System)으로 관형, 수직 원추형, 판형 및 내부 조명형의 광생물 반응기가 이용된다. 국내의 경우 밤낮의 높은 기온 차와 뚜렷한 4계절, 협소한 국토로 인해 공간 집약적 밀폐형 배양방식이 선호되고 있지만 전문가들마다 의견은 상이하다. 개방형 배양시스템의 경우 초기

6) Ji et al.(2016).

7) 권오상, 박상민 외(2011), p.4, p.27.

투자비용과 유지, 보수 및 관리 비용이 비교적 저렴하지만 외부의 오염원과 탄소원 농도 공급의 불규칙성으로 고밀도 배양이 어려운 단점이 있다. 반면, 밀폐형 배양시스템의 경우 초기 투자비용과 운전비용이 개방형 시스템에 비해 비교적 높지만, 생물학(예, 박테리아) 및 비생물학적 요소(예, CO₂ 농도, 빛)의 통제와 배양시설의 멸균이 가능하여 고밀도 조류 배양이 가능한 장점을 가지고 있다. 일반적으로 오픈형 배양기는 바이오연료 생산시설로 밀폐형 배양기는 고부가가치 원료 생산시설로 이용되고 있다. 최근까지 국내에서는 한국남부발전(주) 하동 실증단지에 Raceway Pond 형태의 옥외배양기, 그리고 한국남동발전(주) 영동화력발전 실증단지에 다단 밀폐형 반응기 그리고 한국지역난방공사 실증단지에 투명필름 형태의 밀폐형 반응기가 운영되어 왔다. 국외의 경우, 미국 샌디에이고와 이스라엘의 심바이오틱 (Seabiotic) 사에서 Raceway 형태의 개방형 실증규모 시스템 운용, 일본은 고베대학교 지도세 연구소에서 실증 규모의 옥외 개방형 타입의 미세조류 대량배양기를 운영하고 있다. 전문가들은 향후 최적의 조류 대량배양 시스템을 위해 생명공학-환경공학-광기술-기계 등의 분야가 융합된 다학제 간의 연구가 필요하다고 조언하며, 이를 통해 조류 기반 소재의 상업화를 앞당길 수 있다고 전망한다.⁸⁾



자료: U.S. DOE, National alliance for advanced biofuels and bio-products, 검색일: 2016.10.15;
 (주)카이로스, <http://blog.naver.com/spirulinasu/220587341526>, 검색일: 2016.10.15.

〈그림 2-1〉 Raceway 형태의 개방형 미세조류 배양 플랜트(칠곡군) 및
 관형 형태의 밀폐형 배양 플랜트(주)카이로스)

8) 오유관, 나정걸(2015).

2. 미세조류 바이오매스 수확 및 전 처리 기술

미세조류의 전 처리 공정은 제품 소재 원료물질의 생산과정 내 40% 이상의 비용을 차지하여 전 처리 기술의 최적화로 인한 비용절감이 필요하다. 공정은 일반적으로 수확 및 추출로 나뉘며, 수확의 경우 미세조류 세포의 작은 크기(약 5~30 μ m), 물보다 약간 큰 비중 및 조류 세포 간 전정기적 반발력으로 회수가 쉽지 않다. 그동안 미세조류의 회수를 위해 원심분리(centrifugation), 침전(sedimentation), 여과(filtration) 및 기포부유선별(air flotation) 등의 기술이 적용되었다. 침전방법의 경우 응집제 적용에 따라 미세조류 세포벽면의 질 변형과 환경 문제를 발생시킬 수 있으나 비용이 저렴하며, 원심분리의 경우 회수율이 높은 반면 경제성이 낮은 등 각 기술의 장단점이 존재한다. 최근 침전방법의 분류로는 미세조류-박테리아 자가응집법, 나노입자를 이용한 응집법, 알칼리성 pH 유도 of 자동응집법 그리고 산성광산 배수 등의 폐자원을 활용한 응집법이 제시되었고, 주로 바이오연료 중심의 바이오매스 회수에 적용되어 왔다. 최근 대량배양 시설에서는 경제적인 기술적용을 위해 화학적 응집법과 용존 공기부상법을 병합한 회수 기술들이 도입되고 있고, 미국 에너지부에서는 멤브레인 여과, 전기응집회수 및 초음파 회수법이 가장 경제적인 기술로 평가되고 있다. 조류들은 종마다 부착 및 부유 등 물리적 특징, 성장형태 및 침전시간 등이 다르기 때문에 배양 시 상황에 맞는 적절한 방법의 적용이 중요하다.⁹⁾¹⁰⁾

바이오매스의 회수 후의 전 처리로 대상물질의 추출방법이 적용된다. 추출은 일반적으로 클로로포름, 메탄올, 헥산, 이소프로판올의 용매법이 이용되며, 이외에 초음파 추출, 압착, 효소분해, 계면활성제, 이온성 액체, 열분해법 등이 적용된다. 추출기술의 핵심은 해당 물질 수율의 최대화 및 불순물을 최소화하는 것이며, 이를 위해 단일기술 또는 조합방법에 의한 효율 증진 연구가 진행되어 왔다. 최근 원료물질의 생산단가를 낮추기 위해 바이오매스 대량 배양-회수-추출 단계의 공정을 통합하는 기술이 개발되고 있다.¹¹⁾

9) Salama et al.(2015).

10) US-DOE(2016).

11) 오유관, 나정결(2015), pp.6-8.

3. 미세조류 고부가가치 물질 탐색기술

지구상에는 조류가 약 4만여 종이 서식하고 있으며, 조류 종의 특성 및 배양조건에 따라 세포 구성물질의 함량이 다르다. 특히, 조류에는 식품, 의약품, 화장품 등의 기능성 소재로 활용할 수 있는 다양한 생리활성 물질이 존재하는데, 대상 제품별 효능이 있고 독성이 없는 물질을 빠르게 찾는 것이 핵심기술로 평가되고 있다. 과거에는 표적물질을 확인하는데 많은 시간이 소요되는 문제점이 있었지만, 최근 국내에서는 미세조류를 포함한 천연물의 효능을 탐색할 수 있는 초고속 천연물 탐색 시스템(iHTac: integrated High Throughput Affinity Contents Screening System)이 도입되었다. 이 시스템은 로봇기술을 이용하여 하루 최대 5,000여 개의 샘플테스트를 통해 효능 및 분자구조를 확인할 수 있는 것이 특징이다. 국내에서는 한국과학기술연구원과 한국생명공학연구원에서 운영되고 있으며, 생물들의 부가가치 상승과 산업화에 있어 중요기술로 활용되고 있다. 이외에 미세조류의 고부가가치 물질 탐색으로, 적외선 분광기(FT-IR)를 통한 물질분리 확인, 액체크로마토그래피 질량분석기(LC/MS)를 이용한 물질의 분자량 분석 그리고 핵자기공명(NMR) 장비를 사용하여 물질구조 분석에 활용하고 있다.¹²⁾

12) 한국과학기술연구원(2014).



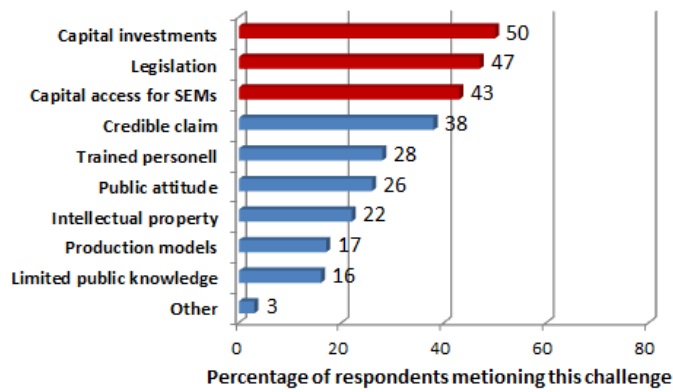
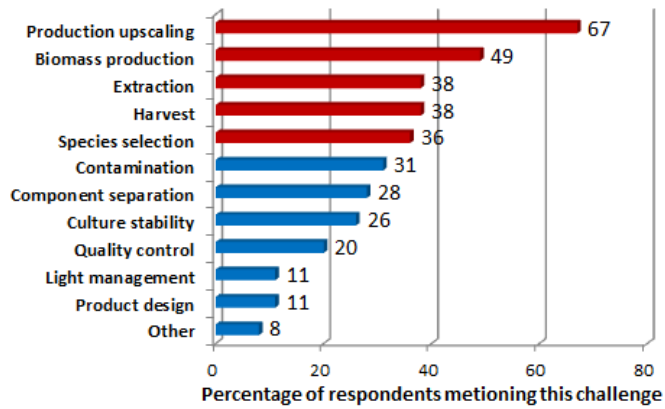
자료: 한국과학기술연구원, https://www.kist.re.kr/kist_web/?state=view&sub_num=41&idx=891, 검색일: 2016.10.15.

〈그림 2-2〉 iHTac의 개념도 및 시스템 이미지

4. 바이오매스 생산 및 이용기술의 개선점

2014년 유럽연합 집행위원회에서 발간한 JRC Scientific and Policy Reports에서는 국제적 조류 관련 분야의 전문가 조사를 통해, 바이오매스 제품의 생산비용 저감에 관한 기술 및 비기술적 핵심사항을 분석하였다. 기술적 핵심사항의 경우, 조류 배양 생산시설의 대형화가 핵심사항으로 나타났으며 이외에 바이오매스 생산, 추출, 회수, 종 선정, 오염문제 및 대상 물질분리의 순으로 조사되었다. 반면, 비기술적 요인으로는 자본투자, 관련 법률 도입, 신뢰성 요구 및 국민들의 태도 등으로 나타났다. 보고서에 따르면 조류 바이오매스로부터 다양한 제품의 산업화 가능성은 높지만, 상용화 대량배양 시설의 체계적인 구축으로 인한 원료물질 확보와 국가적 차원에서의 경제적 지원 및 제도적 뒷받침을 해결해야 할 문제로 인식되고 있다. 한편, 미국 에너지부 기반으로 활동하고 있는 NAABB(National Alliance for Advanced Biofuels and Bioproducts)에서는 초기 바이오연료 단가인 \$240에서 최근 \$7.50까지 비용을 저감시켰다고 보고하였고, 유전자 변형, 개방형 배양방법의 개선, 전기응집

회수 및 열수액화(HTL: Hydrothermal Liquefaction) 추출 기술을 통해 각각 85%, 16%, 14% 및 86%까지 소모비용을 줄일 수 있다.¹³⁾



주: (위) Key technical challenges, (아래) Key non-technical challenges
 자료: Christien et al.(2014).

〈그림 2-3〉 미세조류 활용기술의 경제성을 위한 항목조사

13) Christien et al.(2014).

제3장

미세조류의 고부가가치 자원 활용

1. 바이오기능성 소재의 생산기술 현황

선진국을 중심으로 고령화 인구가 증가하면서 건강증진과 노화방지에 대한 관심도가 높아지고 있다. 사람들은 웰빙한 삶을 위해 자연에서 유래한 천연소재 제품을 선호하고 있으며, 최근 생명공학기술의 발달에 따라 관련 소재의 기술개발이 급증하고 있다. 다양한 식물을 포함한 천연소재 중 미세조류는 세포 내 생리활성물질이 검증되고 활용범위가 넓어짐에 따라 다양한 제품이 출시되고 있다. 미세조류는 기본적으로 단백질, 지방, 탄수화물 이외에 유용물질 종류에 따라 기초식품, 건강기능식품, 천연/바이오 의약품 및 화장품 그리고 항암, 항염, 혈액응고 방지, 살충제, 항고혈압, 콜레스테롤 저하제 등 다방면 바이오기능성 소재로 활용될 수 있다. 한 예로, 아스타잔틴 물질은 활성산소 중 독성이 강한 일중항산소의 저감 효율이 β -카로틴과 비타민 E보다 각각 10배 및 100배 이상 높고, CoQ10보다 800배나 높은 항산화 능력을 가지고 있다. 조류는 일반적으로 종마다 구성물질의 함량이 다르고 성장 환경에 따라 목표물질의 함량이 변화되어, 기능성 소재의 생산에 필요한 최적 종의 확보와 물질별 맞춤 배양 방식을 찾는 것이 중요하다. 향후, 조류를 활용한 기능성 소재의 생산은 바이오매스 원료의 대량 확보와 추출물질의 안정성 검증으로 인해 많은 제품화가 기대된다.¹⁴⁾

14) 허진아, 조대현, 김희식(2015), pp.527-528.

가. 자원화 연구 및 제품화 동향

미세조류를 이용한 가장 대표적인 건강식품으로는 스피룰리나(Spirulina)와 클로렐라(Chlorella)로서, 고함량의 단백질과 탄수화물, 지질 및 무기질 등의 다양한 영양소를 함유하여 미국·중국 등에서 천연자연식품으로 각광받고 있다. 색소계 물질인 베타카로틴(β -carotene), 아스타잔틴(Astaxantin), 루테인(Lutein), 피코빌린(Phycobilin), 피코에리트린(Phycocerythrin) 등은 건강기능식품, 식품첨가제, 의약품 및 화장품 원료로 사용되고, DHA, EPA 등 오메가-3 불포화지방산은 건강기능식품으로 활용되고 있다. 이외에 미세조류 유래 효소(Superoxide Dismutase, Luciferase 등)는 식품첨가물로 이용되고, 독성물질은 신경치료제 등의 의약품 분야에 적용되고 있다. 조류 종에 따른 유용물질 및 응용 분야는 <표 3-1>과 같다.¹⁵⁾¹⁶⁾

<표 3-1> 미세조류 종별 활용물질 및 응용 분야

종명	물질	응용
<i>Spirulina platensis</i>	Phycocyanins, Biomass	Health food, cosmetics
<i>Chlorella vulgaris</i>	Biomass, Ascorbic acid Astaxanthin	Health food, food supplement
<i>Dunaliella salina</i>	Carotenoid, β -carotene	Health food, food supplement, feed
<i>Haematococcus pluvialis</i>	Carotenoid, Astaxanthin	Health food, pharmaceuticals
<i>Scenedesmus almeriensis</i>	Lutein, β -carotene	Health food, food supplement,
<i>Odontella aurita</i>	Fatty acids	Pharmaceuticals, cosmetics, baby food
<i>Porphyridium cruentum</i>	Polysaccharides	Pharmaceuticals, cosmetics, nutrition
<i>Lyngbya nujuscule</i>	Immune Modulators	Pharmaceuticals, nutrition
<i>Schizochytrium</i> <i>Cryptocodinium</i>	DHA	Infant formula
<i>Nannochloropsis</i> , <i>Nitzschia</i>	EPA	Food supplement
<i>Arthrospira</i> <i>porphyridium</i>	Phycocyanin	Food pigment Reagents (fluorescent markers)

자료: 김충재, 김인중(2012); Christien et al.(2014).

15) Christien et al.(2014), pp.19-20.

16) 김충재, 김인중(2012), pp.2-3.

미세조류를 활용한 천연물 신물질의 대표적 발견은 채널로돕신과 포피린을 들 수 있다. 채널로돕신은 미세조류 클라미도모나스 종에서 발견한 광수용 단백질 신물질로서 안점이 빛을 감지할 수 있게 하여 시각장애의 극복에 효과로 광유전학의 연구에 활용되고 있다. 포피린은 특정 파장의 빛에 노출될 때만 세포 파괴 라디칼을 형성하는 광증감물질로서 암세포 표면만 선택적으로 부착하는 물질을 결합해 광기반 암 치료에 활용하고 있다.¹⁷⁾

국내 최근 연구로는 고려대에서 미세조류 바이오디젤의 생산과정에서 나오는 당으로 베타락탐계 항생물질인 CPC(세팔로스포린 C)를 생산하는 연구를 세계 최초로 개발하였고, 한국 해양과학기술연구원에서는 미세조류 *Chlamydomonas hedleyi*로부터 UV 호보 물질인 Mycosporine-like Amino Acid(MAA)의 확보와 추출된 Porphyrin-334를 이용하여 항염효과를 입증하였다. 한국생명공학연구원에서는 미세조류 *Arthrospira* sp.로부터 천연화장품으로 사용될 수 있는 β -carotene, Phycocyanin, Gamma-linolenic Acid(GLA)의 원료물질을 생산하는 연구를 수행하였다. 이외에도 국립낙동강생물자원관에서는 오메가-3 등 필수지방산 50% 이상의 파라클로렐라 미세조류를 발견하였다. 현재, 국내의 미세조류를 활용한 기능성 소재의 연구개발 및 제품화는 급속히 성장하고 있으며, 원천기술 개발로 인한 상업화의 도약기에 있다.¹⁸⁾¹⁹⁾²⁰⁾²¹⁾

국내에서는 대표적으로 ㈜대상에서 클로렐라를 생산하여 제품화하고 있고, 씨스팜은 조류 오메가3를 판매하고 있다. 엔엘피, 엠바이오 및 아테나 등의 업체에서는 스피룰리나 등 미세조류를 이용하여 항산화 화장품을 출시하고 있다. 해외의 경우, 말레이시아 Algatech사는 미국 하와이, 인도, 이스라엘에서 등에서 *Haematococcus*로부터 아스타잔틴을, 호주의 BASF 사는 *Dunaliella salina*로부터 베타카로틴, 미국의 Martek 사는 *Cryptocodinium*, *Shizochytrium*를 이용하여 DHA를, 그리고 미국의 Cyanotech 사는 *Spirulina*를 생산하여 왔다. 이외에 미국 Solazyme, 프랑스 Innovalg 등에서는 해조류 및 담수조류를 이용한 향노화, 미백 기능성 천연화장품을 출시하고 있다. 전 세계적으로 조류를 활용한 제품화의

17) KIST(2016).

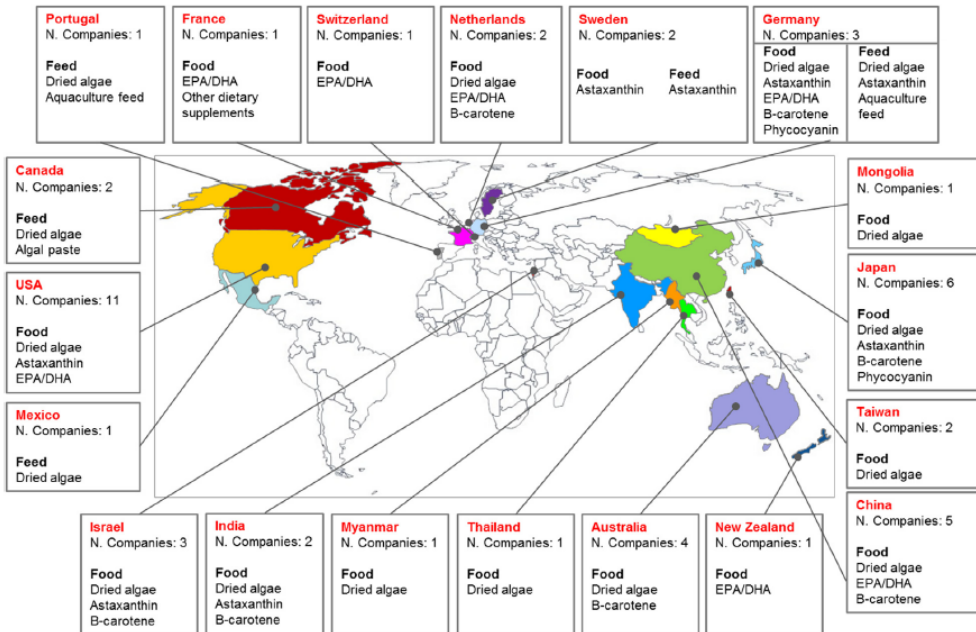
18) KISTory(2015).

19) Suk et al.(2014).

20) 허진아, 조대현, 김희식(2015).

21) 국립낙동강생물자원관(2016).

대표적 기업에는 2014년 기준, 아스타잔틴 생산 8개 업체, 베타카로틴 10개 업체, 스피롤리나 15개 업체, 클로렐라 70개 업체 및 화장품 관련 8개 업체로 나타났다. 조류를 이용한 천연물 의약품은 아직까지 정밀분석을 통한 정확한 효능 확인과 메커니즘의 규명이 어렵고, 연구소와 산업체의 전문인력 부족으로 인해 기초연구에 머물러 있는 실정이다.22)23)24)25)



자료: Vigani et al.(2015).

〈그림 3-1〉 미세조류 기반 기능성 식품 생산 현황

22) Vigani et al.(2015), pp.85-86.

23) 김충재, 김인주(2012), pp.2-3.

24) 엠바이오(주), <http://www.ma-bio.co.kr>.

25) 씨스팜, <http://www.syspharm.co.kr>.

나. 자원화 시장 규모

Vigani et al.(2015)의 논문에 의하면, 2010~2012년 기간 동안 중국, 인도네시아에서 조류 기반 제품을 연 125 million 달러 이상 수출하였고, 이외에 미국과 호주, 유럽에서는 네덜란드와 프랑스가 활발한 생산 활동을 벌이고 있다. 미세조류로부터 생산되는 상용화 제품은 대부분 *Spirulina*와 *Chlorella* 건조 조류로 아시아와 미국을 중심으로 시장을 형성하고 있다. 2010년 기준 *Spirulina*와 *Chlorella*의 판매단가는 각각 20달러/kg 및 44달러/kg로 나타났다.

유럽의 EnAlgae에 보고서에 의하면, 기능성 식품은 2006년 이전 총 50~85 billion 달러 규모로, 이 중 조류 시장 규모는 연 1.25 billion 달러(5,000~10,000톤 생산량)으로 확인되었다. 미세조류 오메가3 시장의 경우 2012년에 82 million 달러를 예상했으며, Reportlinker.com(2014)에서는 2013년 기준 물고기, 새우, 조류로부터 판매된 오메가3 시장 규모가 USD 2.3 billion으로 나타났다.²⁶⁾ 최근 물고기 및 새우로부터 생산된 오메가3 제품은 중금속 문제가 제시되고 있어 향후 조류의 시장 비중이 확대될 것이라 전망했다. 한편, 베타카로틴, 아스타잔틴, 루테인을 중심으로 한 카로티노이드 물질은 2010년 기준 1.2 billion 달러 규모로 나타났고 <표 3-2>에 2004년과 2009년도 카로티노이드 제품의 시장증가 현황을 예를 들어 나타내었다. 최근 미세조류를 활용한 기능성 식품의 시장 통계 자료는 제시되지 않았지만, 전문가들은 10년간 시장 성장률을 고려하여 보았을 때 지속적인 증가율이 전망된다고 보고했다.²⁷⁾

26) Reportlinker.com(2014).

27) Voort et al.(2015), pp.23-32.

〈표 3-2〉 카로티노이드의 세계시장 규모

(단위: USD Million)

제품		2004년	2009년
Beta-carotene	Supplements	125.0	128.0
	Food	98.0	103.0
	Cosmetics	6.0	7.0
	Feed	13.0	15.0
	Total	242.0	253.0
Lycopene	Supplements	50.5	68.7
	Food	3.5	9.3
	Cosmetics	0	3.0
	Feed	0	0
	Total	54.0	81.0
Lutein	Supplements	54.0	85.0
	Food	18.0	20.0
	Cosmetics	0	0
	Feed	67.0	82.0
	Total	139.0	187.0
Cantaxanthin	Supplements	3.0	3.0
	Food	7.0	8.0
	Cosmetics	0	0
	Feed	138.0	145.0
	Total	148.0	156.0
Astaxanthin	Supplements	3.5	4.8
	Food	0	0
	Cosmetics	0	0
	Feed	230.5	252.2
	Total	234.0	257.0
Zeaxanthin	Supplements	22.0	35.0
	Food	0	0
	Cosmetics	0	0
	Feed	0	0
	Total	22.0	35.0

자료: Mortensen(2009): Voort et al.(2015)에서 재인용.

바이오신소재 분야의 세계시장은 천연항생제, 바이오향료, 천연화장품 및 기능성 식품으로 구성되어 있으며, 이 중 2012~2017년까지의 성장률은 건강기능성 식품에서 13.0%로 두드러지게 나타났다. 이와 같은 국제적 성장률의 변화는 바이오 강국인 미국의 시장에서도 나타났다. 미국의 바이오 신소재 분야는 2012년부터 2017년까지 천연화장품 소재 및 건강기능성 식품 소재가 각각 122억 5,700 및 62억 4,600만 달러로 가장 높은 비중을 차지하고 있다. 한국의 시장 현황도 미국과 유사하며, 2017년까지 건강기능성 소재의 시장 규모가 바이오신소재 중 60%(약 3조 9,704억 원) 이상을 형성할 것이라 전망하고 있으며 2012~2017년의 성장률 또한 19.4%로 매우 높게 나타났다. 2016년 식품의약품안전처 보고에서는 국내 2015년 건강기능식품 시장 규모를 2014년 대비 16.2%가 증가한 2조 3291억 원으로 평가했다. 이외에 천연화장품이 5821억 원으로 두 번째로 큰 시장을 형성하고 있으며, 최근 천연/기능성 화장품 소비의 트렌드 및 관련 연구동향 등을 고려했을 때 성장 가능성이 높게 평가되고 있다.

한편, 제약시장 규모 내 (천연)바이오 의약품 시장은 2020년경 30% 이상을 차지할 것으로 예상하고 있다. 미세조류를 활용한 천연/바이오 의약품 시장 규모의 경우 확인이 되지 않아 시장 형성이 미비한 것으로 판단된다. 하지만 한 예로 미국의 Taxus속 식물(주목)로부터 개발된 항암제인 “Taxol” 및 일본의 미생물로부터 개발된 혈중콜레스테롤 저하제 “Compactin” 천연물 신약으로 연간 약 1조 원 이상의 매출이 발생하기 때문에 미세조류로 적용한 바이오 의약품 분야도 고부가가치 산업으로 발전될 수 있을 것이라 전망한다.²⁸⁾

28) KTLO(2014), pp.195-197.

〈표 3-3〉 바이오기능성 소재의 시장 현황(미국)

구분	주요품목 (소재)	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	성장률(%) '12~'17년
		(단위: 백만 달러)						
미국 시장	생체적합성	3,409	3,752	4,131	4,547	5,005	5,509	10.08
	건강기능식품	4,124	4,481	4,869	5,290	5,748	6,246	8.66
	천연화장품	8,956	9,536	10,154	10,811	11,511	12,257	6.48
	방충, 제초	2,109	2,359	2,638	2,950	3,299	3,689	11.83
	천연항생제	2,446	2,740	3,069	3,437	3,850	4,312	12.01
	바이오향료	2,689	3,059	3,480	3,959	4,504	5,124	13.76
	바이오염료	2,501	2,661	2,831	3,012	3,204	3,409	6.39
	천연조미	709	781	860	947	1,043	1,148	10.12
	기능성 효소	459	514	577	646	724	812	12.09
	합계	27,402	29,883	32,609	35,599	38,888	42,056	9.18

자료: KTLO(2014).

〈표 3-4〉 바이오기능성 소재의 시장 현황(한국)

구분	주요품목 (소재)	2012년	2013년	2014년	2015년	2016년	2017년	성장률(%) '12~'17년
		(단위: 억 원)						
한국 시장	생체적합성	118	130	143	159	175	193	10.34
	건강기능식품	16,340	19,515	23,307	27,836	33,244	39,704	19.43
	천연화장품	4,150	4,440	4,751	5,084	5,440	5,821	7.00
	방충, 제초	800	848	899	953	1,010	1,071	6.01
	천연항생제	3,450	3,547	3,644	3,757	3,859	3,980	2.90
	바이오향료	2,000	2,100	2,205	2,315	2,431	2,553	5.00
	바이오염료	343	388	438	495	559	632	13.00
	천연조미	1,195	1,215	1,235	1,256	1,277	1,298	1.67
	기능성 효소	2,373	2,864	3,457	4,173	5,036	6,069	20.66
	합계	30,769	35,047	40,079	46,028	5,031	61,321	14.79

자료: KTLO(2014).

다. 자원화 제도

국내 식품의약품안전처에서는 건강기능식품 법률 제6727호에 따라 2004년부터 건강기능식품 관리 제도를 시행하고 있다. 기능성 소재 원료의 효과는 질병발생의 감소 및 생리활성 기능에 관해 인정하고 있으며, 질병발생의 감소는 과학적 근거 자료를 기준으로 합의가 이루어질 수 있을 만큼 인정기준이 높으며, 생리활성 기능의 경우 인체의 생물학적 활동과 생리대사 시 건강 기능의 유지와 향상이 되는 경우 인정된다. 생리활성 기능은 인체적용시험에 따른 바이오마커의 개선효과에 따라 1, 2, 3등급으로 분류된다. 한편, 최근 3등급은 인체 적용시험과 무관하게 제품화될 수 있는 문제점으로, 판매되는 제품의 기능성을 2년만 인정하는 등 제품판매 및 허가에 있어 그 기준이 엄격해지고 있다. 미세조류 관련 등급별 제품은 다음과 같다. (㉞)풀무원은 조류유래 베타카로틴의 추출물을 함유한 생리활성 기능 1등급의 건강식품 스마트 안을 출시하였고, (㉞)씨스팜은 조류에서 추출한 오메가3를 이용하여 생리활성 기능 2등급의 건강기능식품을 판매하고 있다. 이외에 조류로부터 추출되는 루테인은 1등급 원료, 아스타잔틴은 2등급 원료, 클로렐라와 스피룰리나는 각각 2, 3등급 원료로 구분되어 있다.²⁹⁾

29) 생명공학정책연구센터(2015b), pp.8-9.

〈표 3-5〉 국내 건강기능식품의 분류

기능성 등급		기능성 내용	인정기준
질병발생 위험 감소기능		○○발생위험 감소에 도움을 줌	기반 연구자료를 통해 생리화학적 효과 또는 기전이 명확하게 입증되어야 하고 일관성 있는 바이오마커의 개선효과가 다수의 인체적용시험에서 확보되어야 함 *질병 관련 바이오마커의 확인
생리활성기능	1등급	○○에 도움을 줌	기반 연구자료를 통해 생리학적 효과 또는 기전이 명확하게 입증되어야 하고 일관성 있는 바이오마커의 개선효과가 다수의 인체적용시험에서 확보되어야 함 *생리활성 관련 바이오마커의 확인
	2등급	○○에 도움을 줄 수 있음	기반 연구자료를 통해 가능성 있는 생리화학적 효과 또는 기전을 추측할 수 있어야 하고 일관성 있는 바이오마커의 개선효과가 최소 1건 이상의 인체적용시험에서 확보되어야 함 *생리활성 관련 바이오마커의 확인
	3등급	○○에 도움을 줄 수 있으나 관련 인체적용시험이 미흡함	기반 연구자료를 통해 생리화학적 효과 또는 기전을 추측할 수 있는 자료가 있으나, 인체적용시험에서 기능성을 확보할 수 없음

자료: 식품의약품안전처(<http://www.mfds.go.kr>): 생명공학정책연구센터(2015b)에서 재인용.

미국은 식품의약품안전처(FDA)에서 1990년에 제정된 「영양표시교육법」의 과학적 근거인 SSA(Significant Scientific Agreement) 기준을 만족하는 경우 질병발생 위험 감소기능 표시를 인정하여 왔고, 현재는 영양증진을 위한 소비자 건강정보 발의로 SSA 기준을 만족하지 않은 경우에도 일부 조건부 기능 표시를 인정하고 있다. 식이보충제에 인체기능 표시의 경우 1994년 제정된 「식이보충제 건강교육법(Dietary Supplement Health and Education Act: DSHEA)」에 의하여 사전승인제도 없이 판매 1개월 전에 과학적 근거를 FDA로 제출하게 되어 있다. 유럽의 경우, 2007년부터 영양 표시 및 건강강조 표시에 대한 제도(Regulation (EC)1924/2006)의 시행으로 유럽식품안전처(EFSA: European Food Safety Authority)에서 과학적 근거 자료를 심사하여 질병발생 위험기능 표시 등의 건강강조 표시를 허용하고 있다. 일본은 2001년 제정된 보건기능식품제도에하여 건강기능식품을 관리하며, 영양기능식품 및

특정 보건용 식품으로 분류하고 특정기능식품의 경우 인체적용 자료를 제출하도록 되어 있다.³⁰⁾ 한편, 조류를 이용한 기능성식품 개발 시 EU와 미국에서는 유전자변형 조류(GM-algae)와 독성유발 가능성이 있는 조류의 제품화에 있어 철저한 과학적 검증절차로 인한 안정성 확보가 주요 사항으로 나타나고 있다.³¹⁾

국내의 천연물 의약품과 관련된 각국의 제도는 다음과 같다. 국내에서는 천연물 신약의 개발로 인한 산업화를 촉진하기 위해 2000년 법률 제12844호를 제정하여 「천연물신약연구개발촉진법」을 시행하고 정책적 지원을 하고 있다. 미국은 1994년 DSHEA(Dietary Supplements and Human Education Act)을 제정하여 천연물 산업 시장을 성장시켰으며, FDA가 관련 가이드라인을 제정하여 안정성 입증하여 제품의 산업화가 진행되고 있다. 미국의 경우 식물, 조류, 미세균류 등을 포함하는 식물의약품(botanical drugs)을 공식용어로 사용하고 있고 현재까지 20여 종이 넘는 항암제를 개발해 오고 있다. 독일에서는 「독일약품법(AMG II)」을 제정하여 제품화하고 있고, 유럽 국가에서는 Herbal Medicinal Product(HMP)을 천연물 추출 의약품으로 명칭하고 있다. 이외에 중국과 일본에서도 천연물 의약품 개발에 국가가 적극적으로 지원하고 있다.³²⁾

국내의 기능성 천연화장품의 정책 및 제도는 2008년 개정 고시 이래 2015년까지 기능성 화장품의 기준 및 시험방법(제2015-15호), 화장품 안전기준 등에 관한 규정(제2015-43호)으로 개정되어 왔다. 하지만 국내에는 유기농 화장품의 정의와 기준은 있으나 인증제도가 없어 제품에 대한 정확한 정보를 확인하기 어렵다. 최근 식품의약품안전처는 천연·유기농 화장품 인증제도를 골자로 하는 「화장품법」 일부 개정안을 입법 예고하여 제품에 대한 구체적인 기준과 인증제도 절차가 마련 중이다. 전 세계적으로 기능성 화장품을 포함한 천연화장품의 주요 인증기관으로는 프랑스의 에코서트, 코스메비오, 독일의 BDIH, 호주의 BFA 등이 있으며 유기농과 천연물에 관한 인증을 실시하고 있다.³³⁾

30) 식품안전정보원(2016), pp.29-47.

31) Christien et al.(2014), pp.49-60.

32) 한국바이오경제연구센터(2014), pp.7-14.

33) 생명공학연구센터(2015b), pp. 8-10.

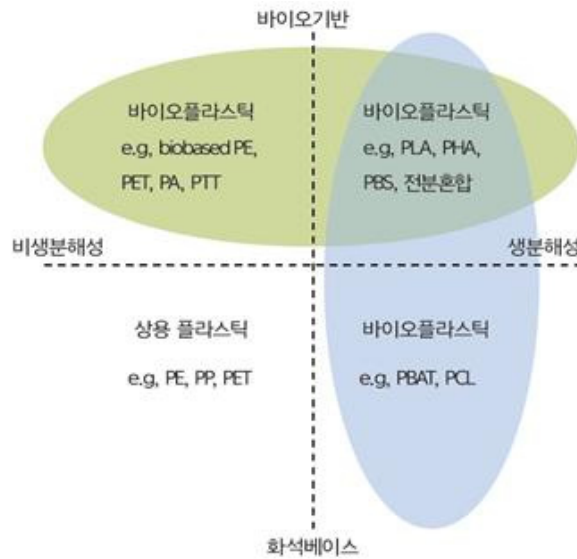
〈표 3-6〉 천연화장품 인증기관

기관	인증마크	인증범위	주요내용
에코서트		- Organic - Natural	- 프랑스에 소재하며 전 세계 80개국 이상의 천연물 가공품 검사/인증 - 원료로부터 생산설비, 제품 등 생산 전 과정을 총괄
USA		- Organic - Natural	- 미국 농무부에서 부여하는 유기농 농산물과 가공식품 인증
코스메비오		- Organic - Natural	- 에코서트에 의해 프랑스 산업부에 등록된 공식단체
BDIH		- Natural	- 독일의 제약, 식품, 화장품 기업 440개의 연합 단체 - 유럽에서 천연, 유기농 화장품으로 인정받기 위해 BDIH에 가입하여 기준 준수
BFA		- Organic - Natural	- 호주 농업산림부에 등록된 인증조합 - 6개월 단위로 유기농 제품의 검사/인증 실시

자료: 농업기술실용화재단(2013); 생명공학정책연구센터(2015b)에서 재인용.

2. 바이오 플라스틱의 생산기술 현황

바이오 플라스틱은 일반적으로 박테리아, 곰팡이, 조류 등의 미생물에 의해 분해되는 생분해성 플라스틱(Bio-degradable Plastic) 및 산화생분해성 플라스틱(Oxo-Biodegradable Plastics)과 바이오매스 물질을 함유한 바이오 기반(Bio-based Plastic) 플라스틱, 그리고 석유화학 비분해성 플라스틱으로 나눌 수 있다. 산화생분해성 플라스틱은 생분해성 플라스틱의 단점인 짧은 분해기간, 물성 및 내열성 문제 등을 극복하여 생분해 기간을 연장시킨 제품이다.

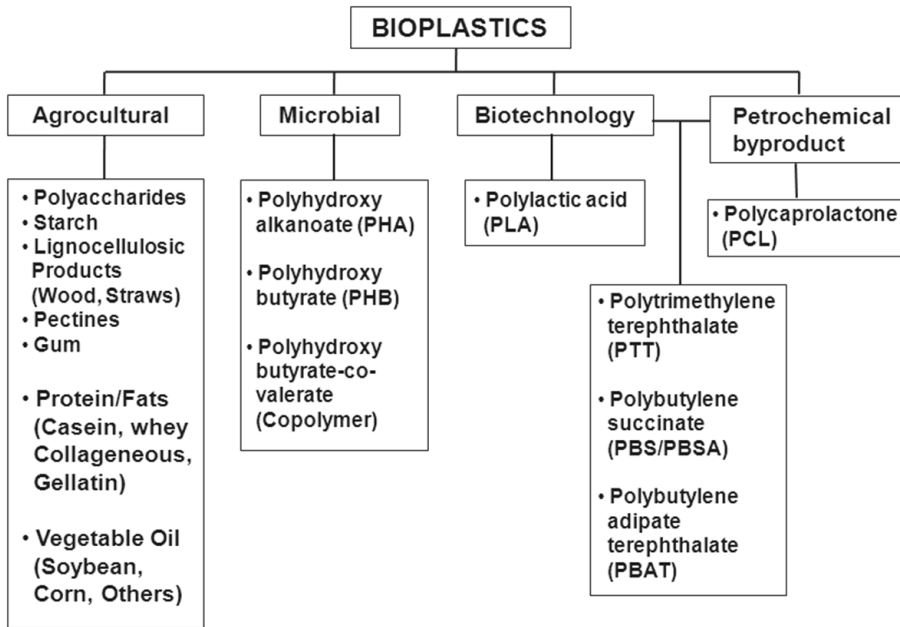


자료: European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org>, 검색일: 2016.10.15.

〈그림 3-2〉 바이오 플라스틱의 분류

바이오 플라스틱을 상세히 분류하면 석유기반 생분해성 고분자 물질과 바이오매스 기반 물질을 포함하여 통칭하고 Agrocultural, Microbial, Biotechnology 및 Petrochemical Byproduct 등 5개로 구분할 수 있다. Polyaccharides, Starch 등의 천연고분자, Polyhydroxy Alkanoate(PHA) 등 미생물에 의해 생산되는 고분자, Polylactic Acid(PLA)로 바이오매스 내 Sugar 단량체의 중합반응에 의해 생산된 고분자, Polytrimethylene terephthalate(PTT)와 같이 석유계+바이오매스 단량체의 중합반응에 의한 고분자 그리고 Polycaprolactone(PCL)의 석유기반 고분자가 존재한다.³⁴⁾

34) 제갈중진(2012), pp.21-22.



자료: 제갈중건(2012).

〈그림 3-3〉 바이오 플라스틱의 상세분류

바이오 플라스틱 제품은 환경적 측면에서의 생분해성과 석유화학기반 대체로서의 내구성이 요구된다. 필름류 등 포장소재로서 유통기간이 짧은 제품은 생분해성 소재로, 생활가전제품, 자동차 내장용품, 건축내장재 등 일정 강도를 요구하는 제품은 내구성 소재로 사용된다. 일반적으로 내구성 바이오 플라스틱 제품은 바이오매스를 25% 이상 함유하고 있고, 최근 제조기술의 발달에 따른 내열, 내충격성 등의 물성이 개선되고 있어 활용범위가 확대되고 있다. 자동차 분야의 경우, 업체 간의 차량 경량화로 인한 연비 개선으로 내장재뿐만 아니라 금속재질의 외장 제품도 바이오 기반 플라스틱으로 전환하는 과도기에 있다. 현재로는 바이오 플라스틱이 일반 플라스틱보다 가격 면에서 고가이나, 바이오 플라스틱 생산기술의 발달과 향후 폐기물 처리비용 및 환경성을 고려하면 제품의 경쟁력이 충분하다고 전망한다.³⁵⁾

미세조류를 활용한 바이오 플라스틱 소재의 생산은 3가지 방법으로 구분할 수 있다. 첫 번째,

35) 이재춘, 배철민(2016).

미세조류를 탄화수소 원료로서 열화학적 중합반응에 의해 압출성형하여 플라스틱으로 전환할 수 있다. 이때 사용되는 물질은 탄수화물 또는 단백질로 구성되며, 탄수화물의 경우 겔화 반응, 단백질의 경우 변성반응에 의해 생성된다. 두 번째, 유기성 생물 자원의 발효에 의한 단량체의 중합반응에 의해 생산되며 대표적으로 Polylactic Acid(PLA)가 있다. 세 번째로 발효 유기체 세포 내 단량체 원료의 물질을 박테리아가 소화하여 생산하는 것으로 Polyhydroxy Alkanoate(PHA)이 대표적이다. PHA와 PLA는 비생분해성 플라스틱으로 동일한 시간에 생분해되는 특징이 있다. 이처럼 미세조류는 세 가지 반응 공정을 통하여 비생분해성, 생분해성 바이오 플라스틱의 원료로 이용될 수 있다.³⁶⁾

BIOPLASTIC PRODUCTION TECHNOLOGIES	<u>Thermochemical polymerization</u> Natural, raw biomass polymers that are plasticized by means of heat Building blocks: - starch, sugars - protein e.g. soy, gluten - lignin	<u>Chemical polymerization</u> Monomers obtained through microbial fermentation (e.g. lactic acid) that are polymerized by means of chemical reactions Substrates for microbial monomer production: - starch, sugars - CO ₂ , CO ₂ - hydrolyzed lignocellulose	<u>Intracellular accumulation</u> Polymers produced within the cells of microorganisms Growth substrate for microorganisms: - sugars - CH ₄ , CO ₂ - fatty acids - hydrolyzed lignocellulose	
	RESULTING BIOPLASTICS	- Thermoplastic starch	- PLA (polylactate) - Bio-PET	- PHA (polyhydroxy-alkanoate) - Other e.g. bacterial cellulose
	USE OF MICROALGAE IN PRODUCTION TECHNOLOGY	Protein-rich microalgae biomass as polymeric material (early commercialization)	Microalgae monomer exudates as building blocks for polymers (exploratory research)	Microalgae as PHA-producing cell factories (exploratory research)

자료: Voort et al.(2015).

〈그림 3-4〉 조류의 바이오 플라스틱 생산 경로

가. 자원화 연구 및 제품화 동향

세계적으로 환경오염 규제 및 지구온난화 방지를 위해 미국·유럽·일본을 중심으로 회수하기 어려운 일회용품 위주의 일반 플라스틱 사용 규제와 바이오 플라스틱 원료물질의 발굴과

36) Voort et al.(2015), p.21.

관련 제품이 개발되고 있다. 바이오 플라스틱은 1900년대부터 전분계열의 천연고분자 물질을 기반으로 한 제품을 시작으로 최근에는 Bio-PET, Bio-PE 및 PLA 물질로 대체되고 있고 이 중 약 70%가 포장 재료로 사용되고 있다. 바이오 플라스틱 원료로는 옥수수·감자를 시초로 비식용 작물인 대두피·왕겨 등의 유기성 폐기물과 조류 등이 사용되고 있으며, 이를 활용한 연구가 광범위하게 수행되고 있다.³⁷⁾

국내에서는 최근 미세조류와 박테리아를 이용한 바이오 플라스틱 원료물질의 생산 연구를 진행하였다. 그 사례로 한국과학기술연구원에서는 미세조류(*Chlamydomonas Reinhardtii*)와 박테리아(*Corynebacterium Glutamicum*)를 이용한 바이오 플라스틱 원료인 숙신산(Succinic Acid)을 세계 최초로 생산하였고, 한국과학기술원에서는 유전자조작 대장균을 이용하여 임플란트에 활용되는 의료용 고분자(폴리락테이트-co-글라이콜레이트, PLGA)를 생물학적 공정으로 생산하였다. 이외에 포항공대에서는 이산화탄소와 물을 반응시켜 만든 탄산무수화효소를 이용해 의료용 플라스틱 제품 소재로서의 가능성을 확인하였다. 국외에서는 2013년도에 일본 산업기술총합연구소에서 미세조류의 일종인 유글레나를 이용하여 미세조류 기반의 바이오 플라스틱을 개발하였다. 소재는 유글레나 세포에서 생산되는 탄수화물인 파라밀론(Paramylon)과 캐슈너트 껍질로부터 추출된 지질을 합성하여 70% 이상의 식물성분이 함유되었다. 미국 유타주립대학에서는 미세조류로부터 지질추출 후의 잔존물에 *Escherichia coli*를 배양하여 Poly-3-hydroxybutyrate(PHB) 바이오 플라스틱 소재 생산기술을 개발하였다.³⁸⁾³⁹⁾⁴⁰⁾

국내 미세조류를 활용한 바이오 플라스틱 생산은 원료물질의 원천 기술개발 연구가 이루어지는 초기 단계이다. 국외의 경우 미국에서 AIGIX 회사를 중심으로 조류로부터 서핑보드의 연질품, 요가매트, PLA 3D 프린터 필라멘트 등을 생산하여 판매하고 있으며, 조류 내 단백질의 이용한 기술을 적용하고 있다. 이외에 홍조류 내 젤라틴 성분을 활용한 생분해성 용기 및 포장재를 일부 생산하고 있다.⁴¹⁾ 미국·유럽·일본을 포함한 선진국에서는 바이오 기반 플라스틱

37) European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org>.

38) 우한민(2014).

39) 동아일보(2016).

40) 화학공학소재연구센터, <http://www.cheric.org>.

41) ALGIX, <http://algix.com>.

소재 개발을 중점적으로 사업화하고 있으며 포장재, 농업용 멀칭 필름, 기능성 필름 등 다양한 바이오제품이 판매되고 있다. 또한, 국제기업들은 각종 부품, 소재 제조공정에 그린카본을 이용하여 유해물질의 발생을 저감시키는 환경 친화적 고분자 물질의 개발을 시도하고 있다. 대표적인 예로 Ford, GM, Toyota 등을 포함한 세계 6대 자동차 회사에서는 자동차 제조에 바이오 플라스틱을 적용하기로 결정하여 장기적으로는 2020년까지 무독성, 재생가능 그린 카본 기반 플라스틱 사용을 목표로 하고 있다. 전문가들에 의하면 조류 단독으로는 고유의 냄새와 바이오 플라스틱 강도 등 내구성 문제로 일반적으로 10~20%에서 최대 50%까지 석유 기반 물질 또는 타 바이오매스와 혼합사용을 권장하고 있다.⁴²⁾



자료: ALGIX, 검색일: 2016.10.15.

〈그림 3-5〉 조류 기반 바이오제품

국내 기업과 지자체, 정부연구기관은 바이오 플라스틱 제품 개발 및 상업화에 투자하고 있다. 최근 바이오 플라스틱의 R&D 투자로서, 1) 울산시는 한국화학연구원과 190억 원을 투자해 비식용 식물자원 바이오매스로부터 바이오 플라스틱과 바이오슈가를 생산하는 설비 협의, 2) LG화학은 팜한농의 인수와 LG생명과학을 합병하여 바이오 플라스틱 사업 진출,

42) 유영선 외(2015), pp.146-149.

3) CJ제일제당은 약 112억 원의 자금을 투자하여 폴리히드록시알카노에이트(PHA) 기반 바이오 플라스틱을 생산하는 미국의 메타볼릭스 사의 인수 체결(생명공학 관련 연구시설, 설비 및 지적재산권 해당) 그리고 대구시는 CJ제일제당 및 롯데케미칼과 바이오 플라스틱 실증 플랜트사업을 공동 구축하여 진행하고 있다.⁴³⁾ 국외의 경우, 미국 농무부는 바이오매스 R&D법을 통하여 바이오화학 프로젝트를 진행하여 오고 있고, 유럽에서는 SPLASH-project (Sustainable Polymers from Algae Sugars and Hydrocarbons)에서 *Botryococcus braunii*를 이용하여 바이오 플라스틱의 생산 및 연구를 수행하고 있다. 현재 세계 바이오 플라스틱 산업 시장에서 선도적인 역할을 하고 있는 기업으로는 BASF SE, 아케마(Arkema), 테크노 폴리머(Techno polymer Co. Ltd.), 도레이 인터스트리즈, 듀폰, 에보닉 인터스트리즈 (Evonik Industries), 네이처플라스트(NaturePlast), 네이처웍스(NatureWorks LLC) 등이 있다.⁴⁴⁾

〈표 3-7〉 국내 바이오 기반 제품의 현황

업체명	바이오 플라스틱 제품명	원료
에코패키징연구소	에코지퍼백, 수산물 가공 비닐	식물추출물
SK케미칼	음료용기	식물추출물
에코매스코리아	주방용품, 식품포장재	옥수수, 사탕수수, 당밀
무림	식품포장용기, 건축단열재	펄프파우더
삼성전자	핸드폰 재료	옥수수
롯데케미칼	바이오-BET(플라스틱 페트병)	옥수수, 사탕수수
SKC	생분해 필름	식물추출물
대상	전분계 비닐 생산	옥수수
에콜바이오텍	방열플라스틱 전구소재	옥수수

자료: 이재춘, 배철민(2016); 경기과학기술진흥원(2015).

43) 경기과학기술진흥원(2015), pp.46-49.

44) (사)한국바이오소재 패키징협회, <http://www.biopack.kr>.

〈표 3-8〉 국외 바이오 기반 제품의 현황

국가명	업체명	바이오 플라스틱 제품명
미국	NatureWorks	Ingeo
미국	Unitika	전자산업 바이오 플라스틱
미국	ALGIX	바이오 플라스틱 수지
미국	Ford	자동차 내외장재
미국	코카콜라	Bio-PET
일본	Unitika	전자산업 바이오 플라스틱

자료: 이재춘, 배철민(2016).

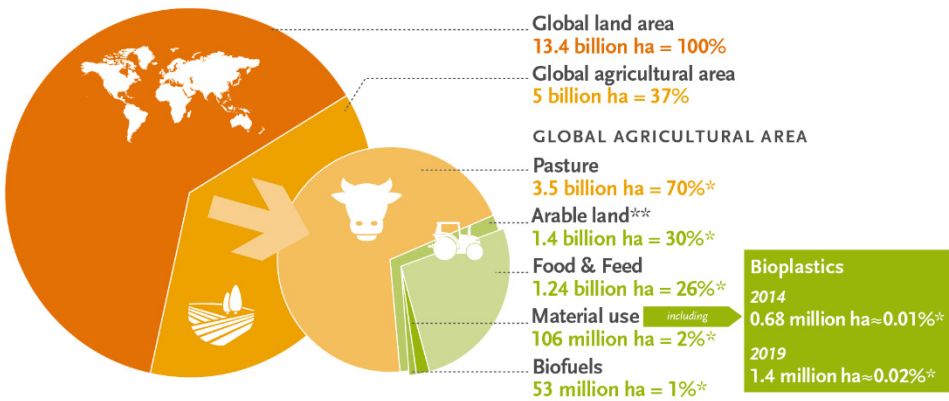
나. 자원화 시장 규모

국내 미세조류 바이오 플라스틱의 시장은 형성되어 있지 않으며, 국외의 경우도 제한적이다. 현재, 미세조류 또는 미세조류와 박테리아를 이용한 바이오 플라스틱 물질의 생산기술은 개발되고 있지만, 바이오매스의 대량 배양 설비 및 생산기술 문제가 관련시장 부재의 주요 원인으로 분석되고 있다. 하지만 바이오 플라스틱 시장을 형성하고 있는 사탕수수·옥수수 등 식량 바이오매스 원료는 넓은 부지와 장기간의 자원회수 시간이 소요되므로, 자원순환 속도가 빠르고 단위면적당 생산량이 높은 비식용 바이오매스의 확보가 요구된다. Global Bioplastics Market 2016-2020 보고에 따르면, 향후 비식용 작물인 조류 기반 바이오 플라스틱의 소비가 음료 제조에 소비될 것으로 보고했으며, 연간 1.3 billion 달러의 환경비용을 절감시킬 것이라 예측했다.⁴⁵⁾

유럽연합의 보고에 따르면, 전 세계 토지 규모 중 37%가 농경지로 사용되고, 농경지를 기준으로 초원을 제외한 경작지가 30%에 해당한다. 이중 식품과 바이오연료를 제외한 부지로의 사용은 2%이며, 2014년 기준 바이오 플라스틱 생산으로는 0.01%의 면적이 사용되었다. 전 세계에서 68만 ha의 면적을 소모하여 1.7 million 톤의 바이오 플라스틱이 생산되었으며, 전문가들은 2019년경 2배 이상의 면적 이용률이 증가할 것으로 전망했다. 한편, 2014년

45) Research and Market, *Global Bioplastics Market 2016-2020*.

기준 일반 플라스틱의 연간 생산량은 300 million 톤으로, 이 중 바이오 플라스틱은 1% 미만의 규모로 형성되어 있다. 하지만 바이오 플라스틱 시장은 국제적 차원에서의 수요급증으로 인해 해마다 20~100% 증가하고 있어 2019년경에는 약 5배로 규모가 확대될 것으로 예상하고 있다. 이와 유사하게 EnAlgae 보고서에서도 전 세계적으로 바이오 플라스틱 생산량은 2010년 724kt에서 2015년 1,710kt으로 증가함을 나타냈다.⁴⁶⁾



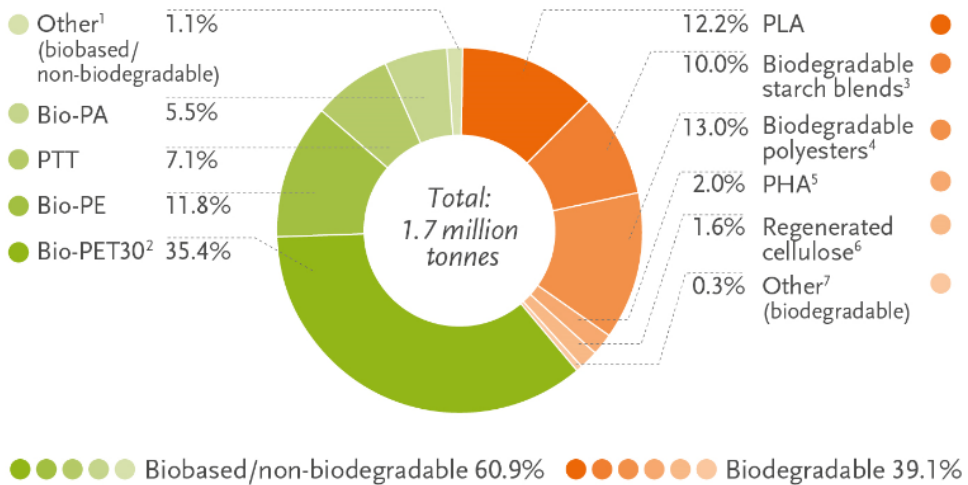
자료: European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org>.

〈그림 3-6〉 바이오 플라스틱 생산을 위한 토지사용 현황

대륙별 바이오 플라스틱 생산동향으로는 아시아가 58%로 큰 비중을 차지하고 있으며, 그 뒤로 유럽과 남·북아메리카로 나타났다. 유럽연합의 보고에 따르면, 아시아에서는 중국과 태국이 주요 생산국가로 나타났으며, 2019년에는 전 세계 생산량의 80%까지 증가할 것으로 전망했다. 2014년 생산된 바이오 플라스틱 중 Bio-PET(35.4%), Bio-PE(11.8%)을 중심으로 한 바이오 기반과 비생분해성 플라스틱은 60.9% 그리고 PLA(12.2%)와 PCL의 석유계 생분해성 물질의 polyesters 플라스틱 등은 39.1%를 차지하여, 최근까지는 바이오 기반 플라스틱의 제품 개발이 더 활발히 생산됨을 알 수 있다. 이는 생분해성의 개념보다는 탄소원 저감에 중점을 두는 산업화 패러다임의 변화로 분석된다. 한편, PLA, PHA, 녹말 기반 물질은 비교적

46) European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org> 정보를 바탕으로 해석함.

최근에 각광받는 바이오 플라스틱 소재로서 생분해성과 퇴비화 능력이 있고, 내구성·내열성·투명도 등을 향상시킬 수 있는 기술이 개발되고 있어 적용 범위가 확대되고 있다. 석유계 생분해성 플라스틱은 친환경 소재임에도 불구하고 그 수요증가가 상대적으로 낮은 수준이 될 것으로 전망되고 있다.⁴⁷⁾



주: ¹ contains durable starch blends, Bio-PC, Bio-TPE, Bio-pur(except thermosets)

² Biobased content amounts to 30%

³ Blend components incl. in main materials

⁴ Contains fossil-based PBAT, PBS, PCL

⁵ Incl. Newlight Technologies(CO2 Based)

⁶ Compostable hydrated cellulose foils

⁷ Biodegradable cellulose ester

자료: European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org>.

〈그림 3-7〉 바이오 플라스틱 분류별 생산 비율

바이오 기반 및 내구성이 있는 바이오 플라스틱 소재는 석유계 제품과 비슷한 품질의 수준으로 발전되고 있으며, 주로 강성 포장과 섬유산업, 차량/수송 등에 사용되고 있다. 특히 Bio-PET30 소재생산은 기존 석유 기반 생산공정 설비를 사용할 수 있는 장점으로 2019년까지 약 90%의 비중을 차지할 것으로 전망했다. 생분해성 바이오 플라스틱의 경우,

47) European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org> 정보를 바탕으로 해석함.

유연, 강성 포장과 농업, 원예 분야에 활용되고 있으며, 2019년도 PLA와 생분해성 폴리에스터 소재는 관련 시장의 약 70% 이상을 점유할 것으로 전망했다.⁴⁸⁾



자료: European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org>.

〈그림 3-8〉 바이오 기반 플라스틱(왼쪽)과 생분해성 플라스틱(오른쪽)의 제품화 분류

세계 바이오 플라스틱 시장 규모로는 2014년 190억 달러에서 2020년 438억 달러로의 증가를 전망했고, 2016~2020년 기간 동안 국제 바이오 플라스틱 시장의 연평균 성장률은 29.3%로 예측되었다. Bio-PET 시장은 2020년 기준 291억 달러 규모의 성장과 함께 2014~2020년 기간 동안 연평균 31.4%의 높은 성장률을 전망하고 있다. 이외에 자동차 산업에 활용되는 바이오 플라스틱 제품의 수요가 동일 기간 연평균 27% 이상 증가를 예상했다. 또한, 시장분석 전문업체인 리서치 앤 마케츠 사의 보고에 의하면 생분해성 고분자제품, 음식료품, 의료/제약 산업 등에 이용되는 PLA의 수요가 포장재를 중심으로 2019년까지 19.97% 성장할 것이라 보고했다. 한편, PLA는 석유계 고분자에 비해 고가이므로 조류, 유기성 폐자원 등 바이오매스로부터의 원료수급으로 인한 비용절감 문제를 해결해야 한다고 알려져 있다. 국내 바이오 플라스틱 시장은 2000년대 초 쓰레기종량제 봉투 제조 시 생분해성 소재 사용(30%) 의무화 이후 성장하고 있고, 2008년도 4,000톤을 시작으로 2018년도에는 10배 증가한 4만 톤으로 예상하고 있다. 국내시장은 아직 초기 산업화 상태로 전분계와 셀룰로오스계 등 생분해성 천연고분자를 중심으로 형성되어 있으며 최근 세계시장의 변화에 발맞춰 PLA를 중심으로 한 바이오 플라스틱의 시장이 형성되고 있다.⁴⁹⁾

48) European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org> 정보를 바탕으로 해석함.

다. 자원화 제도

국내는 「자원순환사회전환 촉진법」 안으로 난분해성 플라스틱 폐기물의 부담금제도를 마련하고 있으며, 이에 대응하여 전분과 PLA, 전분과 PCL 등의 혼합물을 적용한 생분해성 쓰레기종량제 봉투, 생분해성 육묘용 포트 및 멀칭비닐 등 바이오 플라스틱 필름 적용생산 분야가 확대되고 있다. 국내의 바이오 플라스틱은 아직까지 석유화학 플라스틱 제품의 가격과 내구성 등 품질에 못 미치는 것으로 나타났다. 국제적으로는 미국·캐나다·유럽·일본을 중심으로 일반 플라스틱의 사용규제 및 과세부과에 따라 음료용기와 비닐팩에 분해성 수지 사용의 의무화 추세에 있다. 한 사례로 캐나다 몬트리올에서는 2018년까지 비닐봉투 사용을 금지하고, 음료 제조업체에게 플라스틱 생수병 사용을 제한하겠다고 선언했다.⁵⁰⁾⁵¹⁾

국내외 바이오 플라스틱 표준화는 생분해성 플라스틱, 산화생분해성 플라스틱, 바이오 기반 플라스틱으로 나누어지며, 생분해성 플라스틱은 국제규격인 ISO14855를 기준으로 국가별 규격기준이 존재하며, 산화생분해성 플라스틱은 미국의 ASTM D 6954, 그리고 바이오 기반 플라스틱은 미국 ASTM D 6866을 기준으로 시행되고 있다. 한편 국내의 생분해성 플라스틱 제품 기준은 6개월 이내에 기준물질 대비 90% 이상 분해로, 미국·유럽·일본·독일의 60% 이상 분해기준에 비해 엄격하여 규제의 완화가 필요한 실정이다. 한국은 1992년부터 고분자가 70% 이상 포함된 바이오 기반 생분해성 플라스틱 마크제도 KSM 3100-1을 인증 기준으로 시행하여 환경부가 관리·담당하고 있다. 현재 (사)한국바이오소재패키징협회는 미국 시험기준 ASTM D 6866, 자체 시험기준 KBMP 0107, 그리고 유기물 TGA 분석을 통하여 바이오매스 25% 이상 함유 제품에 'BIOBASED' 인증 라벨을 운영하고 있다. 별도로 투명 및 발포제품의 경우 바이오매스 15% 이상 제품을 대상으로 하고 있다. 바이오 기반 플라스틱의 규격기준은 생분해성이 아닌 탄소중립형 식물 바이오매스 혼합에 따라 바이오매스 함량을 포함한 증감속 농도 분석을 통해 이루어진다. 이처럼 국가별 바이오 플라스틱 규격 및 인증 기준을 통하여, 미국은 2020년까지 화학제품의 25%를 바이오매스 기반으로 대체하는 목표를 가지고 있으며, 일본도 2020년까지 사용되는 모든 플라스틱의 20%를 재생 가능한 자원으로

49) 화학공학소재연구센터, <http://www.cheric.org>.

50) 이재춘, 배철민(2016), pp.248-249.

51) 경기과학기술진흥원(2015), p.9.

충당한다는 목표를 세워 추진하고 있다.⁵²⁾⁵³⁾

국가별 바이오 플라스틱 규격기준 및 인증 라벨

국가	바이오 플라스틱(Bio Plastics)			
	생분해 플라스틱(Biodegradable Plastics)		바이오 베이스 플라스틱(Bio Based Plastics)	
국제 규격	ISO 14955 생분해 수지 함량 : 70% 이상		ISO 472 바이오매스 함량 : 기준없음	
대한민국	기준: KSM 3100-1 명칭: 환경마크 인증단체: 환경기술진흥원 1992년, 70% 이상		기준: KBMP-0107 명칭: 바이오베이스 인증단체: KBMP 2011년 25% 이상, 투명 15% 이상	
미국	기준: ASTM 6400 명칭: Green seal 인증단체: Green Seal 1989년, 70% 이상		기준: ASTM D 6866 BIO Based Product 인증단체 BMA 2002년, 25% 이상	
일본	기준: JIS K 6953 명칭: 그린프라(GP) 인증단체: JBPA 1996년, 50% 이상		기준: ASTM D 6866 명칭: 바이오매스프라(BP) 인증단체: JBPA 2006년, 25% 이상	
벨기에	기준: EN 13432 명칭: OK Compost 인증단체: Vincotte 1995년, 70% 이상		기준: ASTM D 6866 명칭: OK Biobased 인증단체: Vincotte 2009년, 20% 이상	
독일	기준: DIN EN 13432 인증단체: DIN CERTCO 1979년, 70% 이상		기준: CEN/TR 15932 ASTM D 6866 인증단체: DIN CERTCO 2010년, 20% 이상	

자료: ㈜바이오소재, <http://www.neomcc.com>.

〈그림 3-9〉 국가별 바이오 플라스틱 제품 인증제도

52) ㈜바이오소재, <http://www.neomcc.com>.

53) (사)한국바이오소재패키징협회, <http://www.biopack.kr>.

제4장

미세조류의 환경 분야 활용 가능성

땀, 강과 호수를 포함하는 호소시스템은 지구상 물의 구성 비율 중 0.03% 정도를 차지한다. 최근 호소는 산업의 발달과 도시화, 그리고 기후변화의 요인으로 인해 수질이 악화되고 있으며, 비점오염원으로 인한 부영양화가 발생되고 있다. 국내 수계의 부영양화에 따른 미세조류 대량 증식은 최근 사회 및 환경적으로 문제시되어 근본적인 해결책이 필요한 상황이다. 반면 미세조류를 이용한 수계 오염원 저감에 관한 긍정적인 측면도 보고되고 있다. 대표적으로 미세조류를 활용한 도시폐수의 유·무기 오염원 저감, 방사성 폐수의 스트론튬, 세슘 오염원 저감, 농약류, 의약품류 등의 난분해성 유기오염물질 저감, 폐광산 폐수 내 중금속 제거 등이 있으며, 그 사례는 아래와 같다.

- 1) 뉴질랜드 Aquaflo Bionomic 사는 Blenheim 하수처리장에서 미세조류를 활용한 폐수 정화를 실시하였고, 미국 메릴랜드 주에서는 Algal Turf Scrubber(ATS) 공정을 이용하여 패턱센트 강(Patuxent River)에서 m^2 당 질소, 인을 각각 250mg, 45mg 저감하였다. 또한, 국내 농어촌공사에서는 농어촌 지역에서 발생하는 소규모 폐수(축산 폐수, 농경 배수 등)의 처리에 미세조류 공정을 적용하여 90% 이상의 질소, 인 처리 효율을 입증하였다.⁵⁴⁾⁵⁵⁾
- 2) 한국원자력연구원에서는 일반적으로 알려진 클로렐라 불가리스 미세조류를 이용하여 방사성 폐수 내 스트론튬(Sr^{2+}) 이온을 스트론티아나이트($SrCO_3$) 탄산광물로 생산하여 제거하였다. 일본에서도 후쿠시마 원전의 세슘(Cs), 스트론튬(Sr), 요오드(I) 등 방사성

54) 김충재, 이원학(2013), pp.7-10.

55) 이상필, 김희식(2013), pp.33-34.

오염원을 저감하기 위해 다양한 미세조류 종을 이용하여 오염 저감의 연구사례들이 보고되었다.⁵⁶⁾⁵⁷⁾

- 3) 미세조류를 이용하여 일반적인 폐수처리 공정 내 처리효율이 낮은 난분해성 유기오염물질 (예, 농약류-Atrazine, 내분비계성 환경호르몬-Bisphenol A, 의약품질-Carbamazepine 등)의 제거 효과를 입증하였다.⁵⁸⁾
- 4) 한국과학기술연구원에서는 현장 규모의 미세조류 공정을 이용하여 실제 강릉 영동탄광 내 중금속 폐수를 정화하는 연구를 수행하여 철을 포함한 금속이온의 저감효과를 입증하였다.⁵⁹⁾



자료: <http://www.aquaflowgroup.com>: 김충재, 이원학(2013)에서 재인용.

〈그림 4-1〉 미세조류를 활용한 미국 내 폐수처리장 운영사례

위의 보고서들에 따르면, 미세조류는 기존 폐수처리시설과 함께 수계의 다양한 오염원 저감방법으로 적용될 수 있으며, 오염원이 수계로 방출되기 전 유출수의 부하농도를 감소시키는 대안으로 보고 있다.

56) 한국원자력연구원, <http://www.kaeri.re.kr>.

57) Fukuda et al.(2014).

58) Xiong et al.(2016).

59) Park et al.(2013).

제5장

결론 및 시사점

미세조류의 상업화에는 유전자 개량에 의한 대량배양 시설의 최적화가 해결해야 할 난제로 인식되고 있지만, 타 바이오매스와 비교하여 단위면적당 높은 생산량과 비식용작물 그리고 다양한 유용물질을 함유한 장점으로 꾸준한 연구개발이 진행되고 있다. 최근 10년간 조류 바이오매스를 활용한 연구개발 분야는 바이오에너지에 집중되어 왔으나, 유가 하락과 원료 물질 회수에 대한 경제성 문제로 정체기에 이르고 있다. 하지만 2010년 대비 2015년에는 미세조류 바이오연료의 생산단가가 절반으로 낮아졌고, 관련 기술발달에 따라 2019년 5달러/gge, 2027년까지 3달러/gge으로 비용절감이 전망되고 있다. 그럼에도 불구하고 시대의 상황에 발맞춰 바이오연료 이외에 미세조류로부터 석유화학 대체 제품과 기능성 소재 및 의약품 등 고부가가치 원료 생산기술의 연구개발과 산업화는 꾸준한 증가 추세에 있다.⁶⁰⁾

본 연구에서는 미세조류를 활용한 바이오 플라스틱과 기능성 소재(기능성 건강식품, 천연/바이오 의약품 및 천연화장품)의 생산에 대한 국내외 연구개발 동향, 시장 규모, 제품의 인증 및 제도화에 대하여 조사하였고, 이외에 환경성 측면을 고려하여 수계의 다양한 오염원 저감사례에 대해 알아보았다.

가. 자원화 측면

조류를 활용하여 상업화된 가장 큰 분야는 기능성 건강식품으로 나타났고, 각국의 인증제도를 통한 제품화가 활발히 이루어지고 있다. 조류 기반 천연화장품 분야는 최근 시장이 형성되고, 관련법 개정안에 의한 인증제도가 마련되고 있어 시장의 활성화가 진행되고 있다. 이외에

60) Vigani et al.(2015).

천연물 의약품의 경우, 연구개발에서부터 상용화까지 장기간이 요구되고, 국내 전문인력과 연구개발의 인프라 기반이 부족하여 학교 및 연구소 위주의 원천기술 개발에 정체되어 있다. 바이오 플라스틱은 「자원순환사회전환 촉진법」에 따라 제품의 규격화와 인증제도로 인해 사용을 장려하고 있고, 국내에서는 감자 및 옥수수 등의 전분계 위주의 제품, 그리고 미국에서는 미세조류 바이오 플라스틱을 제품으로 한 상업화 초기 단계에 있다.

전문가들은 추후 미세조류를 다양한 제품의 원료물질로 적용하기 위해, 추출된 물질의 안정성 검증으로 인한 체계적인 규격화, 표준화 인증제도의 보완이 필요하다고 조언한다.

현재 국내에서는 조류 관련 R&D사업으로 2010~2019년까지 글로벌 프린터 사업이 수행되고 있으며, 조류로부터 바이오 연료·소재 기술 강국을 목표로 운영되고 있다. 사업단을 통해 산업화에 필요한 다양한 바이오 분야의 원천기술이 산업체로 이전되고 있지만, 미국·일본·유럽 등 선진국들의 상용화 기술 수준에 못 미치고 있다. 따라서 향후 국내 산업화를 위한 제도적·기술적 내용은 다음과 같다. 1) 국제적 협력하에 다학제 간 연구를 통한 전략적인 R&D가 필요하고, 대기업과의 기술 연계로 고부가가치 산업시장 진출이 필요하다. 2) 국내로는 바이오매스 원료를 지속적으로 확보할 수 있는 인프라 기반을 구축하고, 국외로는 동남아 국가들과의 전략적인 바이오매스 수급 협력방안이 필요하다. 3) 바이오 물질의 높은 생산단가로 인해 제품의 시장진출이 어려우므로 관련 제품의 사용 권장, 보조금 지원, 환경세 감소 등의 노력과 시장수요에 부합한 정책 및 제도의 뒷받침이 필요하다. 4) 기술적 측면으로는 유전 공학을 이용한 형질전환 후 대량배양 시설의 최적화 및 개별공정의 단일화가 필요하다. 이외에 5) 바이오산업에 활용되는 조류 종은 종류는 제한적이므로 타 미세조류 종의 안정성 실험 및 검증을 통한 활용방안이 필요하다.

나. 환경적 측면

녹조는 수계의 오염원으로 인식되고 있지만, 본래 수생태계 먹이사슬의 구성에 필수적이며, 탄소원을 소모하여 산소를 발생시키는 이로운 생물이다. 최근 미세조류를 활용한 다양한 폐수(예, 농촌폐수, 하수, 방사능 폐수, 중금속 폐수 및 난분해성 폐수 등)의 오염원 저감 효과들이 입증되고 있어 환경적으로도 활용범위가 확대되고 있다. 특히, 일본의 원전사고

이후 이슈화된 방사성 폐수 내 세슘, 스트론튬 등의 오염원 저감과, 하수 방류 수질기준 항목에 포함되지 않는 환경호르몬, 의약/항생물질, 농약류의 저감효과가 알려지고 있다.

이외에 화력발전소, 지역난방공사 등 이산화탄소를 배출하는 점오염 시설 내 온배수를 이용하여 미세조류를 배양시키고 최종 배기가스 배출 지점에 미세조류공정을 적용하여 오염원을 저감시킬 수 있는 방안도 평가되고 있다. 한편, 국내에서는 조류 부영양화 등의 수환경 재해를 방지하기 위해, 비점오염원의 관리와 지역별 수질오염총량제를 실시하고 있다. 전문가들은 농촌폐수 등 소규모 지역에 미세조류 활용을 통한 수질 오염 저감으로, 큰 수계의 오염을 사전에 방지할 수 있다고 조언한다. 그 예로 농촌에서는 휴경지 내 미세조류 배양 시설을 이용하여, 농촌폐수의 질소, 인 저감이 가능하며 생산된 미세조류는 회수하여 퇴비화, 토양개량제, 사료 등으로의 사용이 권장된다.

한편, 미세조류 기반 바이오 플라스틱 생산 제품은 연소과정 시 유독가스 발생량이 적어 대기오염원을 저감시키고, 폐기 시 짧은 분해시간으로 인해 매립지 면적을 감소시킬 수 있다. 이외에 석유계 플라스틱 제품에 의한 비스페놀A 등의 환경호르몬 및 중금속 배출 감소에 기여하여 담수 및 해수의 수질오염의 방지에 기여할 수 있다.

다. 연구의 한계

미세조류를 활용한 자원화 분야의 적용은 대규모 설비의 운용기술 부족으로 원료의 대량 확보가 쉽지 않다. 따라서 조류 기반 제품의 경제성을 판단하기 어렵고 관련 제도적 지원도 지연되고 있는 상황이다. 한 예로, 미세조류를 이용한 상업화를 위해서는 현재 배양 규모의 1,000배 이상 수준으로 확대될 필요가 있다는 의견도 제시되고 있다.⁶¹⁾ 따라서 현재는 국내 산·학·연·정의 유기적인 연계 기술개발과 선진국과의 협력연구로 기술적 문제를 극복해야 할 시기라 여겨진다.

61) Wijffels et al.(2010).

| 참고문헌 |

[국내문헌]

- 김충재, 김인주(2012), 「떠오르는 미세조류 그리고 강원도」, 강원발전연구원.
- 김충재, 이원학(2013), 「미세조류 수질개선 및 신재생에너지 생산방향 연구」, 강원발전연구원.
- 경기과학기술진흥원(2015), 「경기바이오 인사이트」.
- 권오상, 박상민 외(2011), 「조류를 이용한 하수고도처리 및 바이오연료 생산」, 국립환경과학원.
- 생명공학정책연구센터(2015a), 「2015년 BioIndustry 산업동향보고서」.
- 생명공학정책연구센터(2015b), 「2015년 BioINpro 천연물 유망산업 동향」.
- 식품안전정보원(2016), 「기능성 식품산업 육성방안」.
- 이상필, 김희식(2013), 「미세조류를 이용한 바이오디젤」, 한국과학기술정보연구원.
- 이재춘, 배철민(2016), “친환경 바이오 플라스틱 동향”, 「공업화학회지」, 27(3), 한국공업화학회, pp.245-251.
- 오유관, 나정걸(2015), “미세조류 바이오디젤 생산공정 기술”, 「공업화학회지」, 18(3), 한국공업화학회, pp.1-14
- 오희목(2011), 「미세조류 바이오매스의 연료화 연구개발 현황 및 전망」, 화학공학소재연구정보센터, pp.355-360.
- 우한민(2014), “미세조류로부터 바이오 플라스틱 원료인 숙신산 세계최초 생산”, 「과학과 기술」, 통권 544호, 한국과학기술단체총연합회, pp.50-54.
- 유영선 외(2015), “국내외 바이오 플라스틱의 연구개발, 제품화 및 시장동향”, 「청정기술」, 21(3), 한국청정기술학회, pp.141-152.
- 조지혜, 이희선(2011), 「해조류를 이용한 바이오연료의 환경 친화적 적용을 위한 기초연구」, 한국환경정책·평가연구원.
- 제갈종건(2012), “바이오 플라스틱 현황 및 전망”, 「한국공업화학회지」, 15(4), 한국공업화학회, pp.21-25.

- 한국바이오경제연구센터(2014), 「2014 바이오 의약품 동향분석 보고서」.
- 허진아, 조대현, 김희식(2015), “화장품 소재탐색을 위한 토착 미세조류 스피루리나의 배양 최적화”, 「아시안뷰티화장품학술지」, 13(4), 한국피부과학연구원, pp.527-532.
- KTLO(2014), 「중소기업 기술로드맵 전략보고서(바이오신소재 분야)」.

[국외문헌]

- Christien et al.(2014), “Microalgae-based Products for the Food and Feed Sector: An Outlook for Europe”, *JRC Scientific and Policy Reports*.
- Fukuda et al.(2014), “Global searches for Microalgae and Aquatic Plants that Can Eliminate Radioactive Cesium, Iodine and Strontium from the Radio-polluted Aquatic Environment: A Bioremediation Strategy”, *Journal of Plant Research*, 127, pp.79-89.
- Ji, M.K et al.(2016), “Mixotrophic Cultivation of *Nephroselmis* sp. Using Industrial Wastewater for Enhanced Microalgal Biomass Production”, *Ecological Engineering*, 95, pp.527-533.
- Park et al.(2013), “Removal of Metal from Acid Mine Drainage Using a Hybrid System Including a Pipes Inserted Microalgae Reactor”, *Bioresource Technology*, 150, pp.242-248.
- Salama et al.(2015), “Application of Acid Mine Drainage for Coagulation/Flocculation of Microalgal Biomass”, *Bioresource Technology*, 186, pp.232-237.
- Suk et al.(2014), “Anti-inflammation Activities of Mycosporine-like Amino Acids (MAAs) in Response to UV Radiation Suggest Potential Anti-skin Aging Activity”, *Marine Drugs*, 12, pp.5174-5187.
- Voort et al.(2015), “Macro-economics of Algae Products”, *EnAlgae*, Report WP2A7.02.
- Vigani et al.(2015), “Food and Feed Products from Microalgae: Market Opportunities and Challenges for the EU”, *Food Science & Technology*, 42(1), pp.81-92.

Wijffels et al.(2010), “Microalgae for the Production of Bulk Chemicals and Biofuels”, *Biofuels, Bioproducts and Biorefining*, 4, pp.287-295.

Xiong et al.(2016), “Biodegradation of Carbamazepine Using Freshwater Microalgae *Chlamydomonas Mexicana* and *Scenedesmus Obliquus* and the Determination of Its Metabolic Fate”, *Bioresource Technology*, 205, pp.183-190.

[온라인 자료]

국립낙동강생물자원관, <http://www.nnibr.re.kr/kor/search/getUnitySearchList.do>,
검색일: 2016.10.15.

동아일보, <http://news.donga.com/3/all/20160623/78828409/1>, 검색일: 2016.10.15.

(사)한국바이오소재패키징협회, <http://www.biopack.kr>, 검색일: 2016.10.15.

(주)바이오소재, http://www.neomcc.com/default/bio_plastic/standard.php?sub=06,
검색일: 2016.10.15.

(주)씨스팜, <http://www.syspharm.co.kr>, 검색일: 2016.10.15.

(주)카이로스, <http://blog.naver.com/spirulinasu/220587341526>, 검색일: 2016.10.15.

엠바이오(주), <http://www.ma-bio.co.kr>, 검색일: 2016.10.15.

한국과학기술연구원, https://www.kist.re.kr/kist_web/?state=view&sub_num=41&id_x=891,
검색일: 2016.10.15.

한국바이오안전성정보센터, 바이오화학산업동향, <https://www.biosafety.or.kr/boardCnts/list.do?boardID=167&m=070304&s=kbch&C01=4&searchStr=>, 검색일: 2016.10.15.

한국원자력연구원, https://www.kaeri.re.kr/board/menu1/view.ht?keyCode=8&start=0&sk=&sf=0&search_category=&article_seq=5008&article_upSeq=5008,
검색일: 2016.10.15.

화학공학소재연구센터, <https://www.cheric.org/news/globaltrend/view.php?id=GTB2013030050>,
검색일: 2016.10.15.

ALGIX, <http://algix.com>, 검색일: 2016.10.15.

ALGIX, <https://3dprint.com/106381/algae-fuel-filament>, 검색일: 2016.10.15.

ALGIX, <http://news.algaeworld.org/2015/08/algix-effekt-collaborate-on-project-for-worlds-first-algae-derived-surfboard-foams-and-yoga-mats>, 검색일: 2016.10.15.

European Bioplastics, <http://www.european-bioplastics.org/bioplastics/materials/>, 검색일: 2016.10.15.

KIST, <http://www.etnews.com/20160720000399>, 검색일: 2016.10.15.

KISTory, <http://kiststory.tistory.com/1642>, 검색일: 2016.10.15.

Reportlinker.com, “Omega-3 Polyunsaturated Fatty Acids (PUFAs) - A Global Market Overview”, <http://www.prnewswire.com/news-releases/omega-3-polyunsaturated-fattyacids-pufas---a-global-market-overview-246919431.html>, 검색일: 2016.10.15.

Research and market, *Global Bioplastics Market 2016-2020*, <http://www.researchandmarkets.com>, 검색일: 2016.10.15.

U.S. Department of Energy, “National Alliance for Advanced Biofuels and Bio-products”, http://energy.gov/sites/prod/files/2014/06/f16/naabb_synopsis_report.pdf, 검색일: 2016.10.15.

Abstract

Utilization of Microalgal Biomass Resources : Focusing on Bio (Functional) Materials

Min-Kyu Ji, Sangki Choi, Ji-Hye Jo

The field of microalgae resources has been developed by focusing on biodiesel production in accordance with the renewable portfolio standard. However, their commercialization has been delayed due to the unit production cost which is higher than petroleum resources and challenges in implementing a massive cultivation system. In recent years, high value-added industries (such as alternative materials of petro-chemicals and functional materials) have been developed to ensure the economics of microalgae recycling, and their market size is growing each year. In this research, development trends, market status and institutionalization focused on bio-functional materials (such as functional food, cosmetics and pharmaceuticals) and bio-plastics were reviewed to identify areas of improvement for the production of high-value added resources from microalgae. In addition, we examined how microalgae can be utilized in the environmental field from the perspective of changing the perception of algal bloom.

Survey results show that the conversion of microalgal biomass into high value-added substances is mainly carried out by manufacturing functional food with dried spirulina sp. and chlorella sp. In addition, cosmetics and food industries are advancing by using various anti-oxidants such as omega-3 and astaxanthin. In the case of bioplastics, the industry is evolving by using

potatoes and corns as substrate. Recently, bio-PET and PLA production technologies are being developed by utilizing non-edible crops and algae. In terms of environmental aspects, microalgae have been proven to be a good candidate for bioremediation thanks to their ability to reduce water-based radioactive materials and environmental hormones, and they are being used in a wider scale including the removal of nitrogen, phosphorus and heavy metal pollution sources.

The policies and systems for using microalgae as resources have been established or are being supplemented by applicable laws. For example, functional materials are evaluated mainly to ensure the safety and efficacy of microalgal-based materials. Depending on whether they are biodegradable or non-biodegradable, bioplastics are assessed based on standards such as biomass content, biodegradability and heavy metal content. Meanwhile, the recycling of microalgae is limited by the lack of large-scale cultivation systems and facilities, making it difficult to procure a large amount of raw materials. Therefore, it is necessary to establish a biomass supply plan and provide institutional support for linking technology with commercialization through the cooperation among the industry, universities, research institutes and government.

Keywords : Biomass Resources, Microalgae, High Value-added Material, Resources System

■ 저자약력

지민규 (연구책임)

연세대학교 환경공학 박사
한국환경정책·평가연구원 부연구위원(현)
E-mail : mkji@kei.re.kr

최상기

독일 Hambur-harburg TU 환경공학 박사
한국환경정책·평가연구원 선임연구위원(현)
E-mail : skchoi@kei.re.kr

조지혜

포항공과대학교 환경공학 박사
한국환경정책·평가연구원 연구위원(현)
E-mail : jhjo@kei.re.kr

| KEI Working Paper 목록 | 2014~2016

- 2016년
- 2016-01 시스템과 네트워크 이론을 활용한 미래 환경정책 방향 연구(이승준)
 - 2016-02 공공자료 분석을 통한 친환경적 풍력에너지 개발 기초 연구(김태윤)
 - 2016-03 환경영향평가에서 활용 가능한 주민참여 방법 기초 연구(이상윤)
 - 2016-04 자율주행 자동차의 친환경성 제고를 위한 기초 연구(이승민)
 - 2016-05 미래 고온환경 변화와 직종 간 임금격차 추정(김동현)
 - 2016-06 드론을 이용한 환경재난 사후대응 기술 및 연구동향 분석 연구(손승우)
 - 2016-07 건물부문의 환경 부하 평가 모형 개발을 위한 기초연구(송지윤)
 - 2016-08 근지표환경 임계영역(critical zones)의 환경적 중요성과 환경관리의 미래 이슈(현윤정)
 - 2016-09 시민과학의 자연환경조사 적용방안 연구(김윤정)
 - 2016-10 환경평가 자료의 공공서비스 지원을 위한 기초연구(김태형)
 - 2016-11 토지환경분야의 지속가능발전목표(SDGs) 이행을 위한 정책방향 설정(명수정)
 - 2016-12 건강영향평가 분야에서의 위해소통을 위한 리스크 테이블 제작 연구(하종식)
 - 2016-13 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 환경전략/대기환경/물환경/국토자연/자원순환 부문 (조일현, 공성용, 한대호, 홍현정, 한상운)
 - 2016-14 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 환경평가 부문(박하늘)
 - 2016-15 해외 환경정책 인벤토리 구축 연구: 온실가스 감축 부문(김이진, 간순영)
 - 2016-16 지하수 개발사업의 환경영향평가 개선을 위한 기초연구(김경호)
 - 2016-17 토양자원 관리를 위한 전략환경영향평가 개선을 위한 기초연구: 도시개발사업을 중심으로(양경)
 - 2016-18 미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한 연구: 바이오 (기능성)소재를 중심으로 (지민규)
 - 2016-19 2016 국민환경의식조사 연구(곽소윤)
- 2015년
- 2015-01 싱크홀 방지를 위한 환경영향평가 개선방안 연구(김윤승)
 - 2015-02 이슈스캐닝(Horizon Scanning) 기법 활용을 통한 물환경관리 부문 이머징 이슈 발굴 연구(한혜진)
 - 2015-03 기후경제통합-지역평가모형(Regional Integrated Assessment Model of Climate and the Economy) 비교분석 및 국내 모형개발을 위한 기초연구(황인창)
 - 2015-04 기후변화로 인한 고온환경 근로자의 작업역량 저하 추정과 공간적 군집 파악(김동현)
 - 2015-05 환경영향평가 설명회·공청회 운영현황 분석(조공장)
 - 2015-06 도로 및 철도 사업의 토양분야 환경영향평가 사례 연구(신경희)
 - 2015-07 빅데이터를 활용한 환경보건서비스에 관한 기초연구(간순영, 윤성지)
 - 2015-08 자원순환분야 지속가능발전목표(SDGs) 이행 기반 마련을 위한 기초연구(임혜숙)
 - 2015-09 내륙습지에 대한 환경영향평가 개선방안 연구 I: 환경부 전국내륙습지 조사 지침(2011)의 적용을 중심으로(방상원)

- 2015-10 자원순환성 평가제도 대상 확대를 위한 기초연구(이소라)
- 2015-11 환경소음 빅데이터의 정책 활용성 제고 방안(박영민)
- 2015-12 인과지도(Causal Loop)를 활용, 미래 물수급관리 정책 지원을 위한 기초연구(류재나)
- 2015-13 생물안전 법제 기초연구(홍현정)
- 2015-14 지방자치단체 환경영향평가 조례 운영현황 및 효율화 방안(선효성)
- 2015-15 개발사업의 비점오염 영향평가방법 개발을 위한 기초연구(이진희)
- 2015-16 환경영향평가제도에서의 생태계보전협력금 활용 개선방안(이상범)
- 2015-17 환경가치 증장기 연구수요 조사(곽소운)
- 2015-18 세종특별자치시의 대기질 관리 기획 연구(심창섭)
- 2015-19 2015 국민환경의식조사 연구(곽소운)

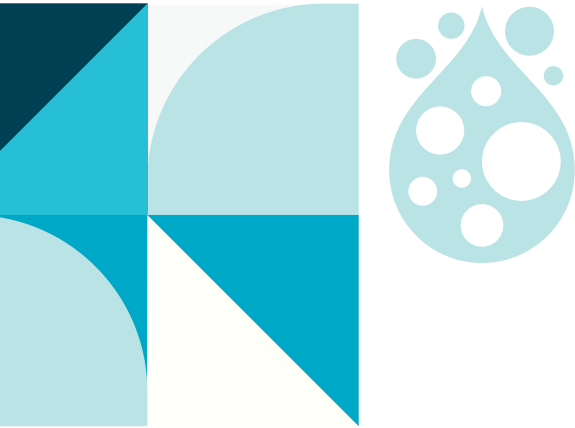
- 2014년 2014-01 국내 지하수의 자원·환경적 가치 확립을 위한 기초연구(현윤정)
- 2014-02 층간소음의 건강영향에 대한 기초연구(박영민)
- 2014-03 소음원 종류에 따른 3차원 소음예측모델 적용방안 마련(선효성)
- 2014-04 개발사업 입지 및 계획기준의 조사·분석에 관한 연구(주용준)
- 2014-05 기후변화 취약 근로 직종 파악을 위한 기초 연구(김동현)
- 2014-06 불확실성을 고려한 수질오염총량관리 안전율 산정 기초연구(정선희)
- 2014-07 기후변화 적응을 위한 공간계획 수립 시 도시/환경/방재분야 공간정보 연계·활용방안 연구(김태현)
- 2014-08 기후변화를 반영한 내수침수 리스크 평가 방법론 고찰(류재나)
- 2014-09 SEA 사후관리를 위한 해외 사례연구(조한나)
- 2014-10 농어촌 관련 정책 및 계획에서의 기후변화 적응 고려 방안(임영신)
- 2014-11 소음·진동 사후관리를 위한 기초연구(선효성)
- 2014-12 2014 국민환경의식조사 연구(이미숙)

※ KEI 설립 이후 현재까지의 보고서 원문은 KEI 홈페이지(www.kei.re.kr)에서 보실 수 있습니다.



미세조류 바이오매스의 자원화 활용에 대한 연구

바이오 (기능성)소재를 중심으로



 한국환경정책·평가연구원

30147 세종특별자치시 시청대로 370
세종국책연구단지 B동(과학·인프라동) 8~11층
<http://www.kei.re.kr>

