조류(Algae)의 산업적 이용

이유경 · 이홍금
한국해양연구원 해양미생물 다양성 연구사업단

조류는 육상식물을 제외한 모든 광합성 생물의 통칭으로, 어떤 특정 분류군을 지칭하는 분류학적 용어가 아니라 매우 다양한 분류군을 포함하는 일반 용어이다(Table 1). 조류를 구분하는 주된 기준은 광합성 색소와 편모의 구조이며(Table 2), 색소체의 구조와 세포벽 구성물질, 광합성 저장물질 등도 유용한 분류 기준이 된다(Table 3). 다양한 분류군 중에서 대부분이 식물플랑크톤이라고 불리는 단세포성 미세조류(microalgae)에 속하며 이들은 해양생태계의 주요 생산자로 활동한다. 다세포성 대형조류(macroalgae)에는 녹조류, 홍조류, 그리고 황색

Table 1. The general classification of the algae

Common name	한글 일반명	Division
Blue green bacteria	남세균, 남조류	Cyanobacteria,
Blue green algae		Cyanophyta
Red algae	홍조류	Rhodophyta
Green algae	녹조류	Chlorophyta
Golden brown algae	황색조류	Chromophyta
Haptophytes	착편모조류	Haptophyta
Dinoflagellates	쌍편모조류	Dinophyta
Cryptomonads	은편조류	Cryptophyta
Euglenoids	유글레나	Euglenophyta

Table 2. The principal characteristics of the algae

Division	Cell type	Principal pigments	Flagella
Cyanophyta	Prokaryote	Chlorophyll a; phycocyanin; phycoerythrin	Absent
Rhodophyta	Eukaryote	Chlorophyll a; phycoerythrin	Absent
Chlorophyta		Chlorophyll a, b	Smooth flagella
Chromophyta		Chlorophyll a, c_1, c_2; fucoxanthin	One smooth flagellum and one flagellum with masticonemes
Haptophyta		Chlorophyll a, c_1, c_2; fucoxanthin	Smooth flagella (and haptonema)
Dinophyta		Chlorophyll a, c_2; peridinin (Partially chlorophyll a, c_1, c_2; fucoxanthin)	Smooth flagella
Cryptophyta		Chlorophyll a, c_2; phycocyanin or phycoerythrin	Flagella with masticonemes
Euglenophyta		Chlorophyll a, b	Flagella with hairs

Table 3. The taxonomic characteristics of the algae

Division	Chloroplast feature	Cell wall	Food reserve
Cyanophyta	No chloroplast; thylakoids free in cytoplasm; unstaced phycobilisomes	4-layered peptidoglycan	Starch
Rhodophyta	One layered thylakoids; Chloroplast ER absent	Cellulose	Starch
Chlorophyta	Thylakoids in stacks of 2-6 or more; chloroplast ER absent; grana may be present	Cellulose, hydroxyprolinc, glycosides, xylans, mannans; naked	Starch
Chromophyta	Thylakoids in stacks of 3 (2-6 in brown algae); two additional membranes of chloroplast ER	various (naked; scale; cellulose, glucose, uronic acids	Chrysolaminarin or laminarin
Haptophyta	Thylakoids in stacks of 3; two additional membranes of chloroplast ER	organic scale; one to several layers;	Chrysolaminarin
Dinophyta	Thylakoids in stacks of 3; two additional membranes of chloroplast ER	Cellulosec theca	Starch
Cryptophyta	Thylakoids in stacks of 2; two additional membranes of chloroplast ER	Periplast	Starch
Euglenophyta	Thylakoids in stacks of 3 or more; one additional membranes of chloroplast ER	Protinaceous pellicle	Paramylon

조류의 일부인 갈조류가 속하며 이들은 얕은 바다의 서식지를 풍요롭게 하고 있다. 조류는 연 2,000억톤에 달하는 지구 전체의 광합성량 중 90%를 담당하는 실질적인 지구의 살림꾼이다.

조류의 생산과 이용

사람은 언제부터 조류를 일상생활에서 이용했을까? 문헌에 따르면 중국에서 기원전 1000년경부터 조류를 식용한 것으로 알려져 있고, 기원전 고대 페키니아인이 직물의 염색을 위해 자주빛 염료를 해조류로부터 구했다는 기록도 있다. 또한 기원후 AD 532년에 이스탄불에서 규조류를 벽돌 제작에 사용했다는 기록이 있으며, 프랑스에서는 17세기경 갈조류에서 소다회(soda ash)를 19세기 중엽에는 요오드를 추출하기도 하였다[18]. 우리나라의 경우는 중국 문헌에 '신라와 발해에서 좋은 다시마와 미역이 나는데 이를 중국에 보냈다'라는 기록으로 보아 역시 오래 전부터 조류를 식품으로 사용해 왔다는 것을 알 수 있고, 『세종실록』에 '고려시대에 왕자가 탄생하면 작전(해조류 채취장)을 하사하기도 했다'는 기록이 있는 것을 보아 해조류의 양식이 고려에서 이미 보편화되었음을 알 수 있다[20].

조류의 생산량은 연간 700만톤(wet weight)이며 그중 가장 많은 양을 차지하는 것이 다시마, 미역, 그리고 김이다[21]. 1995년 한해 동안 중국에서만 다시마(*Laminaria japonica*)가 400만톤이나 생산되었고 같은 해 일본에서도 30만톤이 생산되어 전 세계적으로 다시마 단일 품종이 약 500만톤이나 생산되었다. 미역(*Undaria pinnatifida*)은 우리나라, 일본, 중국에서 주로 양식되는데 1995년 한해동안 약 75만톤이 생산되었다. 한편 우리나라와 일본에서는 김(주로 *Porphyra yezoensis*) 양식이 활발하게 이루어져서 1994년 약 55만톤의 김을 생산했고 소득으로 환산하면 약 $ 15억 정도로 전 세계 수산업에서 가장 비싼 단일 품종이 되었다. 이중 김과 미역은 대부분 식용으로 사용되고 다시마는 다당류 알긴산 추출에 기타 홍조류는 카라기난과 한천 생산에 이용되었는데, 다당류는 5억 6천$의 시장을 형성하고 있고 전체 조류 산업은 약 10조$ 정도 된다[21].

가장 생산량이 많은 이들 세 종 이외에도 총 115속 395종의 조류가 식용 43%, 공업용 42.8%, 의약용 7.7%, 그리고 사료용 6.5%으로 이용되고 있다[19]. 조류를 주로 양식하는 나라는 중

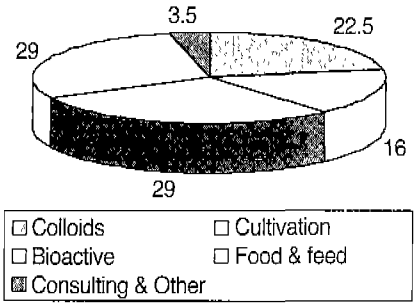

Fig. 1. European companies in main field of algal industry[11].

Table 4. European companies in the field of algal industry[11]

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

국, 일본, 한국이며 필리핀, 인도네시아, 말레이시아, 칠레, 프랑스, 영국, 미국, 캐나다 등 24개국에서도 생산되고 있다[13]. 한편 조류를 산업적으로 가공하는 나라는 주로 유럽과 미국에 밀집해 있다(Fig. 1). 유럽의 조류 산업을 분석해 보면 카로티노이드, 화장품, 비료 등의 bioactive를 가공하는 산업과 식품 및 사료 산업이 가장 크고 아가, 알긴산, 카라기난 등의 생산과 양식 등이 그 다음을 따르고 있다(Table 4).

생활 속의 조류 – 식품

조류는 전 세계적으로 다양한 제품 속에 숨어있다. 조류의 추출물이 들어있는 제품들의 예를 들면 잼, 젤리, 초콜릿, 인스턴트 커피, 포도주, 아이스크림, 맥주 등의 식품을 비롯해서 사진필름, 구두약, 면도용 비누, 향수, 화장품, 유리, 알루미늄, 에나멜 광택제, 살충제, 방부제, 치과용 impression gel materials, 음향기기 스피커까지 실로 다양하다. 예를 들어 조류 추출물은 아이스크림, 샤베트, 치즈에서 결정 생성 방지하고, 휘핑크림이나 셀러드 드레싱에서 에멀젼을 안정화시키며, 맥주를 맑게 하고 거품을 안정화시키는 일을 한다. 이들은 젤리를 단단하게 굳혀주기도 하고 식품의 건조를 막아주어 열대지방에서 고기나 생선의 일시적인 보존에 이용되기도 한다. 또한 초코렛 우유에서 코코아 분말이 잘 섞여 있도록 돕고 아이스크림에서 색소가 엉기지 않도록 하며, 어묵, 햄, 소세지, 게맛살의 조직개량제로 사용되는 등 식품 전반에 걸쳐 다양하게 이용되고 있다.

조류를 직접 음식 재료로 사용하는 나라는 주로 우리나라, 중국, 일본 등의 동북아시아와 아일랜드 그리고 세계 곳곳의 해안 지역과 도서 지역으로 제한되어 있다. 음식물로 직접 섭취되는 조류는 나라마다 고유한데 주로 대형 해조류(marine macroalgae)이며 우리나라의 경우 김, 미역, 다시마, 톳 등이 대표적이다. 이들의 영양적 특징은 비타민, 무기질 등의 미량

Table 5. Nutrition Index of *Enteromorpha* sp., *Porphyra* sp., and *Laminaria digitata*[21]

Nurition	*Enteromorpha* sp. 파래	*Porphyra* sp. 김	*Laminaria digitata* 다시마
Protein	10~18%	15~37%	8~14%
Fat	0.5~1.7%	0.12~2.48%	1%
Carbohydrates	48%	50~76%	48%
Vitamin C	40~122ppm	130~1,100ppm	12~18ppm
β-Carotene	–	266~384ppm	–
Vitamin B1	–	3~6ppm	5ppm
Vitamin B2	–	10~29ppm	22ppm
Vitamin B3	–	50~98ppm	34ppm
Vitamin B6	–	112ppm	–
Vitamin B12	–	0.2ppm	0.6-0.12ppm
Vitamin E	–	51.U.	–
Calcium	8,200~9,400ppm	2,000~8,000ppm	12,400~13,200ppm
Iodine	70ppm	150~550ppm	2479ppm
Iron	152ppm	56~350ppm	50~70ppm
Magnesium	2.6~2.8%	0.2~0.5%	6,400~7,860ppm
Manganese	1~12ppm	7~83ppm	1~16ppm
Sodium	7.3~8.4%	0.5~3.2%	2~5.2%
Potassium	0.7%	–	–
Zinc	–	41ppm	–
Laminaran	–	–	0~18%
Mannitol	–	–	4~16%

원소와 식이섬유의 함량이 풍부하며 양질의 칼슘과 요오드 등의 함량이 높고 알칼리성 건강식품이라는 점이다(Table 5). 이들 해조류에는 특히 다당류의 함량이 높은데 다당류는 소화흡수 되지 않아 다이어트 식품으로 적당하고 장의 점막을 자극해서 정장작용을 하며, 콜레스테롤의 체내 흡수를 방해하고 중금속을 흡착 배설하는 효과가 있다고 알려지고 있다.

이밖에도 조류에서는 항균성, 항산화성, 항암효과 등을 보이는 다양한 생리활성 물질이 보고되고 있어 앞으로 조류의 각종 영양성분과 생리활성 물질을 이용한 기능성 식품이 개발될 것으로 기대되고 있다. 이미 해조류로부터 추출한 물질을 첨가하여 비만 억제, 콜레스테롤 저하, 고혈압 예방, 변비 억제, 노화 억제, 항암성 기능을 가진 떠먹는 기능성 해조 요구르트가 개발되었고, 알긴산 음료와 Fucoidan 음료를 비롯한 해조 음료, 차와 스프 등의 인스턴트 제품이 개발된 바 있다. 갈조류 분말은 항암효과가 있는 면역 강화제로도 판매되고 있다[22, 23]. 최근에는 우리나라에서도 미역, 다시마 등 갈조류에서 추출한 알긴산을 저분자화하여 건강보조식품 형태인 콜레스테롤 저하제로 판매하고 있다. 해조류는 우리나라 수산물 생산의 약 10%를 차지하고 있으나 대부분이 생체 그대로 이용되고 있으며 일부가 건제품, 염장품, 조미가공품으로 소비되고 있는 실정이므로 연중 유통이 가능하고 부가가치를 높일 수 있는 제품개발은 앞으로도 계속 확장될 전망이다.

조류와 산업 원료

산업 원료로는 갈조류에서 추출한 알긴산, 홍조류에서 추출한 아가(한천)와 카라기난이 널리 이용되고 있다. 알긴산은 *Macrocystis pyrifera*(미국), *Ascophyllum nodosum, Laminaria cloustoni*(영국), *L. digitata*(영국, 노르웨이, 중국) 그밖에 *Ecklonia*나 *Durvillaea*와 같은 대형 갈조류에서 추출되고 있다. 이들은 최근까지도 대부분 자연산을 채취하여 사용하고 있으나 중국의 경우 다시마가 양식으로 재배되고 있다. 현재 조류 추출물에서 가장 용도가 다양한 알긴산은 전체 35,000톤의 생산량 중에서 섬유산업에서 50%, 식품에 30%, 제지 산업에 6%, 그리고 의약품에 5% 정도가 사용되고 있다. 알긴산은 흡수성이 커서 현탁제, 안정제, 유화제, 농후제, 겔화제 등으로 다양하게 이용되고 있다. 특히 수분을 보존하고 질감을 균일하게 해 주어 플라스틱이나 직물에서 유화안정제로 이용되고 있고, 제지코팅, 섬유도색, 화장품, 의약품 중에서 알약의 코팅제나 캡슐제 등의 원료로 사용되고 있으며, 치과용 impression gel material의 원료로도 활용되고 있다.

아가는 우뭇가사리(*Gelidium amansii,* 일본), *Chondrus crispus, Mastocarpus stellata, Gelidium pulchellum* 및 *G. latifolium*(영국), *Gelidium cartillagineum, G. arborescens* 및 *G. nudifrons*(미국), *Ahnfeltia plicata* 및 *Phyllophora nervosa* (러시아), *Frucillaria fastigiata*(덴마크), 그밖에 *Pterocladia* 와 *Acanthopeltis* 등의 홍조류에서 추출되고 있는데 가장 많이 활용되는 조류는 *Gelidium*이다. 아가는 미생물 배지로 이용되고 있고 순도가 높은 아가로오즈는 전기영동용 시약으로 이용되고 있다. 현재 아가와 아가로오즈의 가격은 각각 $2~200/kg, $250~40,000/kg에 달한다. 이들은 샴푸, 크림, 화장수 등에도 첨가물로 사용되고 있다.

카라기난은 홍조류인 *Chondrus crispus, Gigartina mamillosa, Euchema, Gigartina undulata* 및 *Gigartina clavifera*에서 추출되고 있다. 카라기난은 비교적 최근에 이용되고 있는데 1983년 아일랜드에서 생산되기 시작했다. 이들은 분산과 유화안정제, 팽윤제, Fat replacer, 증점제, 결착제, 식이섬유, 결정방지제, 방향제나 소취제 그리고 겔화제로 사용되어 다양한 산업분야에서 응용되고 있으며 앞으로 활용범위가 확대될 전망이다.

이밖에도 규조류에서 유래한 규조토가 정수기용 필터, 음향기기 스피커, 벼룩 살충제, 방부제, 에나멜 광택제, nitroglycerine의 안정제, 여송연(담배)의 불붙는 정도를 조절하는 첨가제, 페인트 광택 억제제 등으로 이용되고 있다. 최근에는 녹조류 청각의 일종인 *Codium tomentosum*에서 추출한 glucuronic acid(marine betahydroxyacid)와 hydroxyproline이 BAH라는 이름으로 화장품의 세포재생성분으로 이용되기도 한다. 그밖에도 해조팩, 선케어, 보디클렌저, 기초 화장품 등에 해조 추출물이 이용되고 있다. 한편 해조류에서 추출한 항균제는 곰팡이균, 세균 억제에 대해서는 탁월한 효과가 있어 팡이제로와 같은 생활용품으로 사용되고 있다.

의약품과 기능성 식품

조류는 기본적으로 알긴산, 아가, 카라기난 등이 의약제조에 있어 캡슐의 원료로 이용되고 흡착제와 유화제 및 suspending agents로 이용되고 있다. 해조류를 의약품으로 사용한 역사는 식용으로 사용한 역사만큼이나 깊다. 중국에서는 고대로부터 모자반과 다시마 등의 여러 가지 해조류가 갑상선 종양 및 그 밖의 내분비성 질환의 치료에 사용되어 왔으며, 우뭇가사리속도 일찍부터 위장병과 열병의 치료에 쓰여 왔다. 다시마류는 자궁경부를 확대하는 효과가 있고 홍조 진두발은 설사, 비뇨기병, 만성폐병 등을 치료하는 효력이 있다. 영국에서는 김을 괴혈병 방지용으로, *Chondrus*는 속병 치료용으로 사용하기도 하였다. 이밖에도 홍조 *Digenea*가 생산하는 kainic acid는 구충제로 사용되었으며, 다시마가 생산하는 만니톨이 의약품 원료로 광범위하게 사용되고 있다.

조류는 잠재적인 의약품으로 활용가치가 높다. 다시마는 기침과 통풍 치료 효과가 있고 미역은 장에서 칼슘 흡수를 도와 뼈 형성을 촉진시킴으로 골다공증에 효과가 있는 것으로 알려져 있다. 모자반(*Sargassum* sp.), 청각(*Codium pugniformis*) 및 다시마(*Laminaria japonica*), 스피룰리나(*Spirulina*)에서 추출되 다당류(long-chained polysaccharides)가 구강암세포의 생장을 억제하는 것으로 알려져 있다. 홍조류와 남조류의 광합성 보조색소인 Phycocyanin이 항암작용을 하며 면역체계를 증진시키는 것이 보고되었고, Dumontiaceae에 속하는 2종의 홍조류에서 추출한 다당류는 입가에 생기는 수포성 발진(cold-sore Herpes)을 약화시키는 것으로 나타났다. 남조류인 *Lyngbya lagerheimii*와 *Phormidium tenue*의 황함유 지질(Sulphur-containing lipid)은 HIV의 cytopathic effect에 대항하여 사람 세포를 보호하는 기능을 하는 것으로 추정되고 있고 미세조류인 스리룰리나(*Spirulin*), 클로렐라(*Chlorella*) 그리고 *Scenedesmus*가 콜레스테롤을 감소시키는 것이 알려져 있다. 이밖에도 조류에서 추출한 bromophenols, fatty acids, tannins 및 terpenesantibiotics 등이 항생제 효과가 있는 것이 알려져 있다.

최근에는 미세조류도 건강보조 식품으로 활용이 급격히 증가되고 있는 추세이다[15]. 대표적인 미세조류는 *Dunaliella, Spirulina, Porphyridium* 그리고 *Chlorella*이다.

*Dunaliella*는 추출물인 β-carotene이 이미 상품화된 고부가가치의 녹조류이다. 호주(Western Biotechnology Ltd, Betatene Ltd), 미국(Microbio Resources Inc), 이스라엘(Naturebeta) 등에서 대량배양으로 생산하고 있고 건강보조 식품이나 사료 첨가물로 널리 활용되고 있다.

*Spirulina*는 일찍부터 배양되어 온 미세조류이다. 기록에 의하면 1524년에 이미 멕시코 원주민들이 *Spirulina*를 식용으로 배양했다고 한다. 서아프리카의 Chad 호수 근처에 살던 원주민들도 수세기 전부터 *Spirulina*를 배양해 왔다. 멕시코 Texcoco 호수에서도 인디안들이 *Spirulina*와 다른 남조류인 *Oscillatoria*를 배양하였다[13]. 현재 전 세계적으로는 태국, 이스라엘, 일본, 대만, 미국, 중국 등지에 배양시설이 있으며 연간 약 850톤이 생산되고 있다. *Spirulina*는 수확이 쉽고 세포벽이 소화되기 쉬우며 단백질 함량이 건조 중량의 60% 정도로 매우 높아 알약의 형태로 건강보조식품으로 판매되거나 건조 분말 상태로 음식에 사용된다.

*Porphyridium*은 필수지방산인 아라키돈산의 농도가 높아, 전체 지방산의 36%를 차지한다. *Porphyridium*은 배양과 추출이 쉽기 때문에 phycobiliprotein의 좋은 생산자이기도 한데, 이들은 항체, 단백질, 비오틴과 같은 생리활성 물질은 표지하는데 사용할 수 있는 색소로 사용된다.

클로렐라는 단백질이 건조물 중에 약 52% 정도이고 필수지방산도 균형 있게 들어 있으며, 비타민, 핵산이 풍부하고 건강보조제와 다양한 식품 첨가물로 이용되고 있고 앞으로 우주식품으로도 이용될 전망이다. 클로렐라는 등푸른 생선의 기름에 EPA나 DHA와 같은 다가불포화지방산이 많이 함유되어 있으며 클로렐라에는 50% 이상의 양질의 단백질, 20%의 탄수화물, 푸른채소보다 비교가 안될 정도로 많은 5%의 엽록소, 풍부한 핵산(DNA, RNA), 그리고 베타카로틴, 비타민 B1, B2, B6, 나이아신, 엽산, 비타민 C, E, K 등과 칼슘, 마그네슘, 규소, 바나듐등의 미네랄을 함유하고 있다. 이밖에 클로렐라의 특효 성분으로 알려진 C.G.F(*Chlorella* Growth Factor)와 β-Glucan 등이 있다. 클로렐라는 골대사에 필요한 호르몬, 효소, 비타민 D등을 활성화시키고 골형성에 필요한 단백질, 미네랄 등을 공급해 가지고 골형성률이나 골밀도를 높이는 것으로 알려져 있다.

이밖에도 양식어류의 천연 채색제로 사용되는 Astaxanthin

을 합성하는 *Haematococcus pluvialis*이 있다. 앞으로 미세조류는 phycoerythrin, phycocyanin, β-carotene, zeaxanthin과 같은 천연 색소와 항산화 물질의 주된 원료로 활용이 증가될 전망이다. 미세조류를 대량배양하고 수확하기 위하여 다양한 배양방법이 활용되고 있다[16]. 아직까지는 미세조류의 생산비용이 육상식물(예를 들어 콩)보다 많이 들지만 비옥한 경작지가 부족하거나 비료와 제초제를 공급할 수 없는 경우에는 조류의 배양이 바람직하다. 앞으로 더욱 배양비용을 낮추어 미세조류의 추출물이 상업적으로 다른 물질들에 비해 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 기대된다.

천연사료와 천연비료

태평양 해안이나 아프리카 남동해안에서는 대형갈조 분말을 가축의 천연사료로 이용하고 있다. 유럽인들은 해조를 가축의 사료로 이용해 왔는데 프랑스, 노르웨이, 덴마크, 독일 등에서는 해조류를 이용한 사료 공장이 세워져 해조 분말을 만드는 기술을 발달시켰다. 또한 다양한 미세 조류가 가축 및 새우 양식, 어류 양식과 같은 수산 양식 사료로 활용되고 있다[14].

유럽, 아시아, 미국 등지에서는 일찍부터 해조류를 비료로 사용해 왔는데, 해조류를 직접 경작지에 뿌려 주거나 해조 속에 포함된 비료 성분만을 따로 추출하여 이용하고 있다. 유럽, 북아메리카, 남아프리카 등지에서는 모자반류, *Ascophyllum*류의 대형 갈조를 비료로 이용하고 있다. 해조비료는 토양성층을 향상시키고 부식토를 증가시키며 토양수분 함유율을 증가시켜 종자의 발아를 촉진하며 감염에 대한 저항성을 증가시킨다. 석회성 조류(Calcareous algae)들과 남조인 *Anabaena* sp., 대형 갈조, 녹조 *Chlamydomonas*와 *Chlorella*를 비롯한 토양성 조류도 천연 비료로 이용되고 있다.

미래의 자원 조류

조류는 바이오 에너지 생성과 오염물질 정화능력을 보유하고 있어 이의 산업적 이용도 시도되고 있다. *Chlamydomonas reinhardtii*를 산소와 황이 없는 환경에서 배양하면 수소를 합성하는데, 수소는 화석에너지를 대신할 대체에너지이자 환경문제를 근본적으로 해결할 수 있는 청정에너지로 부각되고 있다. 또한 *Chlamydomonas*는 광합성으로 만든 전분을 효율적으로 에탄올로 변환시키는 효소를 지니고 있다. 따라서 태양빛 아래에서 대량의 이산화탄소를 주어 이를 배양한 후, 광합성이 되지 않는 어두운 무산소 상태의 탱크 안으로 옮기면 1~2일 안에 에탄올을 생성한다. 일본에서는 녹조류를 이용하여 2010년까지 화력발전소로부터 대량 배출되는 이산화탄소를 에너지로서 재이용하는 플랜트를 완성시킬 예정이다. 이밖에도 대형 갈조류 *Macrocystis*에서 방출되는 메탄을 이용하는 연구도 진행되고 있다.

조류에는 또한 킬레이팅 능력이 있어 중금속 오염물질을 흡착할 수 있다[19]. 현재 규조류 화석을 하수 여과재료로 사용하여 수질을 정화시키고 있다. 뿐만 아니라 미세 조류를 이용하여 산업 폐수나 축산 폐수를 처리하는 기술을 개발하고 있다[17]. 대표적인 예로 인공적으로 만든 해양 생물계인 바이오스페어-2라는 인공 시스템에서의 해수 정화를 위해 해조류가 들어선 콘테이너를 통해 제거되는 조류 청정 시스템을 채택한 바 있다. 바이오스피어-2에서 조류는 더러운 바닷물에서 오물을 효과적으로 흡수하고 정화시켰다.

전 망

아가와 카라기난의 수요는 홍조류의 수확량을 훨씬 초과한다. 따라서 조류를 유전적으로 조작할 수 있다면 성장속도와 제품 생산량을 증가시키고 생산단가를 낮출 수 있을 것으로 기대하고 있다. 지금까지는 주로 돌연변이 선별을 통해 생장속도가 빠르고 질병에 내성을 가지며 유용물질의 생산성이 높거나 신물질을 생산하는 조류를 확보해왔다. 그러나 앞으로는 보다 빠르고 효과적인 방법으로 형질전환이 이루어져야 한다. 현재까지 조류의 형질전환은 *Chlamydomonas*에서만 성공적으로 이루어 졌고 다른 조류의 경우는 연구가 진행중이다[2]. 예를들어 *Chlorella ellipsoida*[3], *Volvox*[5], 규조류 [1,4], 홍조 *Kappaphycus alvarezii*[8], 김 *Porphyra miniata*[9]과 *Porphyra yezoensis*[7], 파래 *Ulva lactusa*[6], 그리고 다시마 *Laminaria japonica*[10]에서 부분적인 연구가 수행되고 있다. 앞으로 형질전환 기법을 활용하여 새로운 품종의 개발이 활발하게 전개되며 functional genomics가 수행될 것으로 기대된다.

한편 해양환경으로 방출되는 병원균이나 적조생물의 추적, 양식 어패류나 해산 식품의 오염균이나 오염물질의 진단을 위하여 flow cytometry와 광학 현미경 분석을 접목시킨 자동 분류 장치와 DNA chip, 단백질 칩, chemical chip 등이 개발될 것으로 보인다.

조류는 잠재적인 이용가능성이 높다[12, Table 6]. 특히 다당류, 단백질, 지질, 색소, 카로티노이드, 스테롤, 비타민, 항생물질, 효소, 의약품, 탄화수소, 메탄, 알코올 등의 다양한 물질의 공급원으로 이용될 가능성이 높다. 특히 다당류들은 항바이러스, 항괴혈, 항암, 항응고 그리고 콜레스테롤 저하 활성을 가져 의약품과 기능성 식품으로의 개발이 활발하게 이루어지고 있는 중이다. 조류는 효과적이고 재생가능하며 환경 친화적으로 화학물질과 에너지를 생산할 수 있는 좋은 생물체이다. 또한 해양 서식지의 오염을 제거하는 생물복원(bioremediation)에도 조류가 크게 기여할 것이다. 아직까지 조류가 생물공학에서 차지하는 분야는 적은 편이다. 그러나 조류의 중요성이 점차 인식되고 연구활동이 증가하고 있는 추세이어서 머지않아 생물공학에서 비중이 커질 것으로 기대된다.

Table 6. Products from algae[13]

Algal products	Uses and examples	Approx. value, $/kg	Approx. market	Algae genus or type
Isotopic compounds	Medicine Research	>1000	Small	Many
Phycobiliproteins	Diagnostics	>10000	Small	Red algae
	Food colours	>100	Medium	Cyanobacteria
β-Carotene	Food supplement	>500	Small	*Dunaliella*
	Food colour	300	Medium	
Xanthophylls	Chicken feeds	200~500	Medium	Many
	Fish feeds	1000	Medium	
Vitamins C & E	Natural vitamins	10~50	Medium	Many
Health foods	Supplements	10~20	Medium to large	*Chlorella, Spirulina*
Polysaccharides	Viscocifiers, gums	5~10	Medium to large	*Porphyridium*
	Ion exchangers		Large	Many
Bivalve feeds	Seed production	20~100	Small	Diatoms
	Aquaculture	1~10	Large	Many
Soil inocula	Conditioner,	>100	Unknown	*Chlamydomonas*
	Fertilizers		Unknown	N-fixing species
Amino acids	Proline	5~50	Small	*Chlorella*
	Arginine, aspartate	5~50	Small	Cyanobacteria
Single cell protein	Animal feeds	0.3~0.5	Large	Green algae, others
Vegetable oils	Foods, Feeds	0.3~0.6	Large	Green algae, others
Marine oils	Supplements	1~30	Small	Diatoms, others
Waste treatment	Municipal, industrial	1	Large	Green algae, others
Methane, H_2, liquid fuels	General uses	0.1~0.2	Large	Many

참고 문헌

1. Apt K.E., Kroth-Pancic P.G. and Grossman A.R. 1996. Stable nuclear transformation of the diatom *Phaeodactylum tricornutum*. *Mol. Gen. Genet.* 252: 572-579.
2. Davies J.P. and Grossman A.R. 1998. The use of *Chlamydomonas*(Chlorophyta: Volvocales) as a model algal system for genome studies and the elucadation of photosynthetic processes. *J. Phycol.* 34: 907-917.
3. Dawson H.N., Burlingame R. and Cannons A.C. 1997. Stable transformation of *Chlorella*: rescue of nitrate reductase-deficient mutants with the nitrate reductase gene. *Curr. Microbiol.* 35: 356-362.
4. Dunahay T.G., Jarvis E.E. and Roessler P.G. 1995. Genetic transformation of the diatoms *Cyclotella cryptica* and *Navicula saprophila*. *J. Phycol.* 31: 1004-1012.
5. Hallmann A. 1999. Enzymes in the extracellular matrix of Volvox: an inducible, calcium-dependent phosphatase with a modular composition. *J. Biol. Chem.* 274: 1691-1697.
6. Huan X., Weber J.C., Hinson T.K., Mathieson A.C. and Minocha S.C. 1996. Transient expression of the GUS reporter gene in the protoplasts and partially digested cells in *Ulva lactuca* I. (Chlorophyta). *Bot. Mar.* 39: 467-474.
7. Kuang M., Wang S.-J., Li Y., Shen D.L., Zeng C.K. 1998. Transient expression of exogenous GUS gene in *Porphyra yezoensis* (Rhodophyta). *Chinese J. Oceanol. Limnol.* 16: 56-61.
8. Kutzman A.M. and Cheney D.P. 1991. Direct gene transfer and transient expression in a marine red alga using the biolistic method. *J. Phycol.* 27 (Suppl.):42.
9. Kubler J.E., Minocha S.C. and Mathieson A.C. 1994. Transient expression of the GUS reported gene in protoplasts of *Pophyra miniata* (Rhodophyta). *J. Mar. Biotechnol.* 1: 165-169.
10. Qin S., Jiang P. Li X.-P., Wang X.-H., Zeng C.-K. 1998. A tansformation model for *Laminaria japonica* (Phaeophyta, Laminariales). *Chinese J. Oceanol. Limnol.* 16: 50-55.
11. Reina G.G. 1996. Algae-Directory algologists, companies, culture collections and herbaria in European countries. European Communities, Italy.
12. Stein J.R. & Borden C.A. 1984. Causative & beneficial algae in human disease conditions: a review. *Phycologia* 23: 485-501.
13. Susan R. Barnum. 1998. Biotechnology. Thomson Learning, Singapore.
14. 박흠기, 허성범. 1999. 수산양식과 해양미세조류. 생물산업 12: 40-47.
15. 오희목, 이석준. 1999. 미세조류로부터 유용물질 생산의 현황 및 전망. 생물산업 12: 30-35.
16. 이철균. 1999. 미세조류의 대량배양. 생물산업 12: 22-29.
17. 이현용. 1999. 미세 조류를 이용한 축산 폐수 처리 기술. 생물산업 12: 36-39.
18. http://211.40.179.13/book_file/ke29/ke029-050.htm
19. http://bio.sch.ac.kr/~hwshin/STUDYDATA.htm
20. http://pony.chungnam.ac.kr/~today/algae.htm
21. http://seaweed.ucg.ie
22. http://stopcancer.com/seaweed.htm
23. http://www.modifilan.com/index.html