

미세조류를 이용한 이산화탄소 고정화 기술 현황

전선미 · 김인혜 · 하종명 · 이재화[†]

신라대학교 제약공학과
(2007년 12월 24일 접수, 2008년 2월 20일 채택)

Overview of Technology for Fixation of Carbon Dioxide Using Microalgae

Seon-Mi Jeon, In Hae Kim, Jong-Myung Ha, and Jae-Hwa Lee[†]

Department of Pharmaceutical Engineering, College of Medical Life Science, Silla University, Busan 617-736, Korea
(Received December 24, 2007; accepted February 20, 2008)

온실가스로 인해 발생한 지구 온난화 현상은 최근 몇 년 동안 심각한 환경문제를 야기했다. 온실가스 중 가장 큰 비중을 차지하는 것은 이산화탄소이다. 이산화탄소의 처리 방법 중 하나인 미세조류의 광합성을 통한 이산화탄소 고정화는 화력발전소로부터 화석연료의 사용을 통해 나오는 이산화탄소 감소를 도와준다. 이러한 미세조류는 빠른 성장력을 지니고 있고, 다양한 환경에서 성장이 가능하다는 장점이 있다. 따라서 미세조류의 이용에 있어 고농도의 이산화탄소, 낮은 pH, 산성가스 등에 강한 내성을 지닌 미세조류에 대한 연구와 미세조류의 대량배양을 통해 효율성을 높일 수 있는 생물반응기의 연구가 선행되어야 한다. 앞으로 생물공학기술의 발달로 미세조류의 대량배양에 의한 이산화탄소 저감과 동시에 미세조류로부터 고부가 가치의 자원을 생산한다면 생물 산업의 발전을 촉진할 수 있다.

In this work we have studied the antifouling properties of the hydrophobic sol-gel modified sensing membrane and its optical properties for sensor application. *E. coli* JM109, *B. cereus* 318 and *P. pastoris* X-33 were cultivated in confocal cultivation dishes with glass surface, respectively. The glass surface was coated with the hydrophobic sol-gels prepared by the dimethoxy-dimethyl-silane (DiMe-DMOS) and tetramethyl-orthosilicate (TMOS). After cultivation, microorganisms adhered on the surface coated with sol-gels and glass surface were dyed by gram-staining method and the numbers of microorganisms were analyzed based on the image data of the scanning electronic microscope (SEM). A great number of microorganisms, about $2 \sim 3 \times 10^4/\text{mm}^2$, was adhered on the glass surfaces which no hydrophobic sol-gels were coated. But, the antifouling effect of the hydrophobic sol-gels was large, that microorganisms of less than $200 \sim 300/\text{mm}^2$ were adhered on the coated glass surface. The performance of the sensing membranes for detection of pH and dissolved oxygen was enhanced by recoating the light insulation layer prepared with the mixture of the hydrophobic sol-gel and graphite particles.

Keywords: microalgae, biological fixation, carbon dioxide, photobioreactor

1. 서 론

19세기 이후, 경제발전을 위한 과도한 산업화로 인해 화석연료의 사용량이 급격히 증가하면서, 화석연료의 연소과정에서 발생하는 이산화탄소와 메탄, 프레온 가스 등의 온실가스가 대량 발생하였다. 이들 온실가스로 인해 우주로 방출될 적외선을 흡수, 차단하며, 대기 중으로 다시 배출함으로써 대기의 온도를 상승시키는 온실효과(Greenhouse effect)가 발생하였다. 이로 인해 지구온난화(Global warming) 현상이 점점 가속화되고 있으며, 다가오는 2030년대는 기온이 평균 2~3 °C 상승하리라 예상된다[1].

지구온난화는 온실가스가 주원인으로서 알려져 있는데 이중 이산화탄소가 가장 큰 영향을 주고 있는 것으로 밝혀졌다. 이산화탄소의 대기 중의 농도는 과거 빙하기에 대기 중 농도가 180 ppm이었으나, 산업혁명이 시작된 이후 급격히 증가하여 1890년에는 290 ppm, 1992년에는 약 360 ppm으로 1세기 동안 30% 증가를 보였다. 또한 21세기 말에는 이산화탄

소의 대기 중의 농도가 산업화 이전의 2배 수준인 500 ppm에 도달할 것이며, 이산화탄소 배출 증가 속도가 1970년 수준으로 안정화된다고 하더라도 2000년 이후에는 1,000 ppm에 도달할 것으로 예상되고 있다. 우리나라의 경우에는 온실가스 중 이산화탄소 기여도가 88%이며, 이러한 이산화탄소의 96%가 화석에너지 소비에 의해 배출되고 있다. 또한, 주요 온실가스로 지목되고 있는 이산화탄소 배출량은 1990년에 비해 90% 이상 증가한 것으로 나타났으며, 연료연소부문의 이산화탄소 배출량으로는 미국, 중국, 러시아, 일본, 인도, 독일, 영국, 캐나다에 이어 세계 9위에 해당한다[2].

최근 국제 사회의 최대 환경이슈로 등장한 온실가스 저감 문제는 기후변화협약을 통하여 활발히 논의되고 있으며, 이러한 시점에 기후변화협약에 대한 적극적인 대응은 국가의 경제발전에 기여할 수 있는 동시에 에너지, 경제 및 환경의 조화를 통한 국가 발전을 이루는데 기여할 것이다. 이를 위해 보다 적극적인 온실가스 감축에 대한 계획과 프로그램을 마련하고 이를 시행할 이산화탄소 제어 기술의 개발과 보급이 매우 필요한 때이다.

[†] 교신저자(e-mail: jhalee@silla.ac.kr)

Table 1. Classification of Microalgae

Class	Common name	Chlorophyll	Species
Bacillariophyceae	Diatoms	a & c ₁ c ₂	<i>Cyclotella</i> sp.
Chlorophyceae	Green algae	a & b	<i>Chlorella</i> sp.
Chrysophyceae	Golden algae	a & c ₁ c ₂	<i>Nitella</i> sp.
Cyanophyceae	Cyanobacteria Blue-green algae	a	<i>Spirulina</i> sp.
Phaeophyceae	Brown algae	a & c ₁ c ₂	<i>Heribaudiella</i> sp.
Rhodophyceae	Red algae	a	<i>Porphyridium</i> sp.

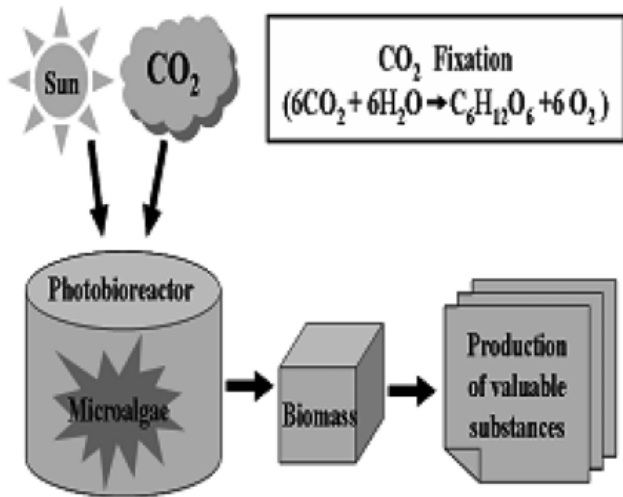


Figure 1. Scheme of biological carbon dioxide fixation.

이산화탄소 고정화 방법의 하나는 광합성 미생물을 이용하는 생물학적 고정화 방법으로 대기 혹은 수중의 이산화탄소를 식물 또는 미생물의 유기물질로 고정화 하는 방법이다(Figure 1). 이는 자연계 물질 순환의 핵심기능이며, 이산화탄소 저감을 위한 가장 환경 친화적인 방법으로 고온 및 고압에서 행하여지는 화학적 고정화 방법에 비해 반응속도가 늦어 생산성과 효율이 떨어지는 반면, 상온 상압 하에서 태양에너지와 해수만으로 이산화탄소 고정화가 가능한 장점을 가지고 있다. 또한 생물학적 고정화 방법은 배기가스에 직접적으로 적용할 수 있기 때문에 분리, 회수, 농축 등의 배출 가스 전처리 비용을 절감할 수 있으며, 최종 산물인 바이오매스를 동물의 사료나 청정연료 등으로 재이용함으로써 보다 경제적인 공정을 확립할 수 있는 장점을 가지고 있다[3,4]. 이러한 생물학적 이산화탄소 고정화 공정에 관한 연구는 1990년대 초반부터 활발하게 이루어져 왔으며, 고효율의 광생물반응기 개발[5]에서부터 고농도 이산화탄소에 대한 내성을 가지는 균주의 분리[6-8], 그리고 파일럿 플랜트 스케일(Pilot plant scale) 운전을 위한 모델링[9] 등 다양한 방향으로 연구가 진행되고 있다. 또한, 산업체 배기가스로부터 이산화탄소를 고정화하는데 적합한 미세조류를 개발하기 위한 연구가 활발히 수행되고 있다[9-11]. 따라서 생명공학기술을 이용하여 미세조류의 광합성 기능을 향상시키고, 최적 배양 환경에서 미세조류를 고밀도 대량 배양하여 이산화탄소의 처리와 동시에 생산된 바이오매스로부터 고부가의 유용물질을 생산함으로써 부가 가치를 창출할 수 있는 생물학적 이산화탄소 고정화 연구가 매우 필요한 실정이다. 본 논문에서는 이러한 미세조류를 이용한 이산화탄소 고정화 공정에 필요한 요소 기술과 최근의 연구동향에 대해 고찰하고자 한다.

2. 미세조류의 탐색

지구상에서 광합성을 하는 생물 중 하나인 미세조류는 광독립영양생물로, 여러 광합성 색소를 가지고 있어 태양에너지 이용에 의한 무기물에서 유기물로 변환시키는 생물군이다. 그 종류로는 약 수만 종이 다양한 환경에서 분포하고 있고, 사는 환경에 따라 담수성(Fresh water)과 해수성(Sea water)으로, 각 조류의 클로로필의 종류에 따라 규조강(Bacillariophyceae), 녹조강(Chlorophyceae), 황색편모조강(Chrysophyceae), 남조강(Cyanophyceae), 갈조강(Phaeophyceae) 및 홍조강(Rhodophyceae) 등으로 나눈다(Table 1).

즉, 미세조류는 에너지원으로 태양광을 사용하여 이산화탄소를 고정화하는 탄소동화기능을 갖고 있으며 이를 통해 생리활성물질과 같은 다양한 유용물질을 생산하여, 이산화탄소의 저감과 대체연료의 생산이라는 두 가지 장점을 갖는다[12-14]. 미세조류 배양의 가장 큰 장점은 작물 생산에 적합하지 않은 염도 농도가 높거나 강한 알카리 등의 극한 환경에서도 성장 가능하다는 점이다. 또한, 수중에서 태양광, 이산화탄소 등을 이용하여 비교적 적은 비용으로 대량배양이 가능하며, 환경조건에 따라 폭 발적인 증식력을 가지고 있다[15].

생물학적 이산화탄소 고정화를 위해서는 이산화탄소의 효율적인 고정이 필수요건인데, 이를 위해서는 고농도의 이산화탄소 및 낮은 pH에 대한 내성, 안정적이고 높은 성장률, 고밀도 배양의 가능성 등의 특성을 모두 갖춘 미세조류의 탐색과 고밀도 배양 시스템에 관한 연구가 절실히 필요하다. 최근에 분리, 동정된 해양성 미세조류인 *Chlorococcum littorale* 등과 같은 일부 광합성 미생물들은 20~50%의 이산화탄소 농도에서 내성을 가지는 것으로 알려져 있다. Watanabe[6] 등은 20~30%의 이산화탄소에 대해 내성을 갖는 담수성 미세조류인 *Chlorella*를 분리하여 동물 사료로서의 활용성을 조사하였고, Sakai[16] 등이 온천에서 분리한 *Chlorella*는 42 °C의 고온에서도 성장 가능하였다. Kuranof[18] 등은 해양 녹조류인 *Chlorococcum littorale*로부터 이산화탄소의 분압 20%에서 높은 이산화탄소 고정률을 보고하였으며, Miyairi[18]는 온천에서 분리한 *Synechococcus elongatus*를 대상으로 60 °C의 고온과 60%의 이산화탄소 농도에서 빠른 성장에 대한 기작을 조사한 바 있고, 산성 및 고온 조건에서도 내성을 가진 미세조류를 탐색한 결과, 단세포 홍조인 *Galdieria partita*는 pH 1, 50 °C, 50 ppm, SO₂의 조건에서도 생장 가능한 것으로 보고하였다.

일반적으로 5% 이상의 이산화탄소 농도에서는 미생물의 성장이 저해를 받는 것으로 알려져 있으며 발전소에서 배출되는 이산화탄소 농도는 20%라고 알려져 있다. 지금까지의 연구를 바탕으로 낮은 pH와 20% 이상의 고농도 이산화탄소에서 생장할 수 있는 미세조류 균주를 응용한다면 이산화탄소 고정화 효율을 높일 수 있을 것으로 사료된다.

Table 2. Characteristics of Photobioreactors

Photobioreactor	Mixer	Light efficiency	Temperature control	Gas control	Contamination control	Scale-up
Tank	bad	very bad	difficulty	bad	difficulty	very difficulty
Stirred Tank (internal or external lighting)	equality	very good	excellent	high and low	easy	difficulty
Bag culture	variety	very good	good	high and low	easy	difficulty
Flat-plate photobioreactor	equality	excellent	excellent	high	easy	difficulty
Tubular photobioreactor (Serpentine type)	equality	excellent	excellent	high and low	easy	easy
Tubular photobioreactor (Biocoil type)	equality	excellent	excellent	high and low	easy	easy

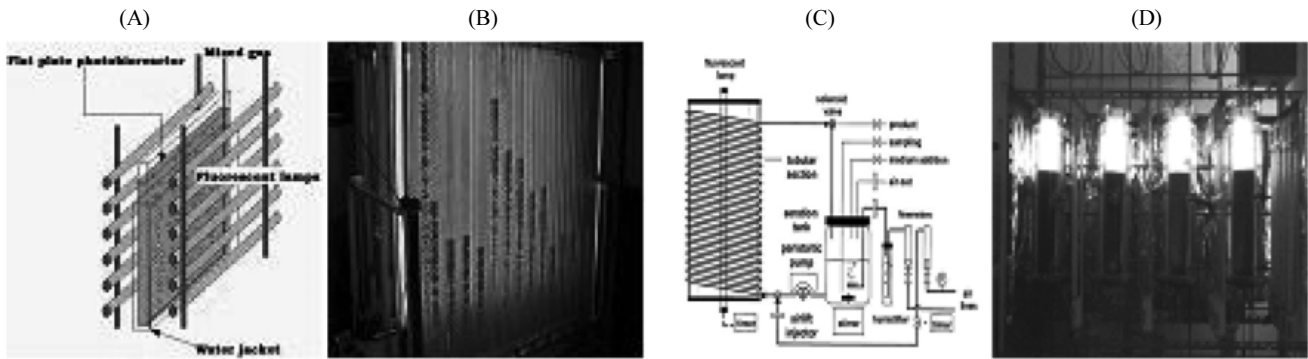


Figure 2. Type of bioreactors (A) Flat plate photobioreactor, (B, C, D) Tubular photobioreactor.

3. 미세조류의 대량 배양

효율적으로 미세조류를 이용하여 이산화탄소 고정화를 하기 위해서는 고농도 및 대량 배양기술의 확립이 필요한데, 이러한 미세조류를 배양하는 방법에는 옥외에서 배양하는 개방형 배양(Open culture)과 실내에서 광생물반응기(Photobioreactor)를 이용하여 배양하는 밀폐형 배양(Closed culture)으로 나눌 수 있다.

3.1. 개방형 배양

개방형 배양은 가장 단순한 형태로, 자연적으로 영양원 공급이 풍부한 개방된 연못 등에서 배양하는 것으로, 초기 설비투자와 운전비용이 저렴하고 유지 및 보수가 용이한 장점이 있다. 그러나 배양장치 내부로 효과적인 빛 전달이 이루어지지 않아 균체의 성장속도가 느리고, 균체의 성장수율이 낮으며, 오염으로 인한 미세조류 생물량 및 종의 불안정성, 영양원의 불균등 분포 등의 문제점과 더불어 많은 양의 이산화탄소를 제거하기 위해서는 넓은 설치 공간이 필요한 단점이 있다[4]. 미세조류의 침전이 일어나는 점과 순환식 원형연못은 중앙부에 효과적인 교반이 어려운 단점이 있어, 현재 거의 대부분 도수로(Raceways) 형태로 축조되고 있다. Matsumoto[19] 등은 옥외배양장치를 이용하여 미세조류를 배양하였는데, 이때 얻어진 생산성은 42 g/m²/d, 이산화탄소의 평균 이용률은 54%, 이산화탄소 고정량은 48 tC/ha/yr이었고, 이때 사용된 미세조류는 *Nannochloropsis*, *Phaeodactylum* 등의 미세조류로 화력발전소의 배출가스를 도수로 형태 배양기에 주입하여 배양하였고, 생산된 생물량은 고체연료로 사용할 수 있었다.

3.2. 밀폐형 배양

밀폐형 배양은 밀폐된 환경에서 배양한다는 의미로, 주로 광생물반응기를 이용하여 미세조류를 배양하는 것을 의미한다. 미세조류의 고농도 배양을 위한 중요한 인자는 빛, 기체 전달, 배지의 공급, 그리고 생물학적 한계 등이나 어느 정도의 농도 이상에서는 항상 광원이 가장 큰 제한인자이다[20]. 빛의 효율적인 전달을 위해서 태양광 집광판, 광섬유(Optical fiber) 이용 등의 다양한 방법이 시도되었으며, 고농도 배양에서 빛의 효율적인 전달을 위해서는 광생물반응기의 단위부피당 표면적을 증가시켜야 하는데, 이를 위해 다양한 형태가 보고되고 있다[21-27]. 적당한 광생물반응기를 선택할 때에는 광원의 종류, 광생물반응기의 기하학적 모양, 배양액의 깊이, 그 밖에 영향인자들을 고려하여야 하며, 광합성 효율을 극대화하기 위해서는 광량 및 광도의 조절과 최적화, 온도 조절, 혼합 그리고 영양염류의 균형 있는 공급 등이 수반되어야 한다[28-30].

광생물반응기 개발에 관한 연구는 1980년대부터 활발하게 진행되었으며, 이러한 연구들은 미세조류의 배양을 통해 이산화탄소 고정화 효율을 향상시킬 뿐만 아니라 생물학적 이산화탄소 고정화 공정의 파일럿 규모의 적용을 위해서도 필수적이다[31]. 광생물반응기는 옥외대량 배양장치에 비해 초기 투자비와 관리 유지비가 상대적으로 높은 단점을 가지고 있으나, 높은 균체 성장 속도와 편리한 운전조건 조절, 그리고 스케일-업이 용이한 장점을 가지고 있다. Table 2는 대표적인 광합성 미생물 배양장치들의 특징을 비교한 Table이다. 이 Table에서 알 수 있듯이 탱크(Tank)를 제외한 나머지 광생물반응기들은 광이용효율이 높고, 온도, 가스, 오염 조절이 비교적 쉬운 편으로 나타났다[32]. 그 중에서 대량배양을 위해 스케일-업을 할 수 있는 광생물반응기는 관형 광생물반응기(Tubular photobioreactor)임을 알 수 있다. 현재까지 개발된 광생물반응기의 대부

Table 3. Comparison of Performance in Various Photobioreactors

Design	Total vol. (L)	Area/Vol. ratio (m ⁻¹)	Productivity		Biomass (g/L)	Reference
			per area g/m ² /d	per vol g/L/d		
Falt-plate	1.4	85		28.8	26.6	[9]
Tank	5.6	19.3		0.51	2.67	[36]
Tubular	145	54	27.8		6.3	[37]
Slab	0.1	100	44	3.15	25	[38]
Inclined slab	6	85	51.1	4.3	15.8	[39]
Flat-panel	1.5	56		2.64	4.8	[40]

Table 4. High-value Materials from Microalgae

Microalgae	Dry weight (g/m ² /d)	High-value materials
<i>Chlorella</i>	<i>C. pyrenoidosa</i>	health food (protein, lipid, vitamin, mineral)
	<i>C. vulgaris</i>	
	<i>C. ellipsoidea</i>	
<i>Spirulina</i>	<i>S. platensis</i>	health food (protein, vitamin, mineral, carotenoid)
	<i>S. maxima</i>	
<i>Dunaliella</i>	<i>D. bardavil</i>	health food (β-carotene, glycerol)
	<i>D. salina</i>	
<i>Porphyridium</i>	<i>P. cruentum</i>	pigment (phycoerythrin), polysaccharides, arachidonic acid
	<i>P. aeruginum</i>	

분은 관형 광생물반응기와 관형(Flat plate photobioreactor) 광생물반응기 (Figure 2)로 효과적인 멸균이 가능하고, 기체 전달이 용이하며, 구조가 간단하여 쉽게 어느 곳에서든 설치가 가능하다는 장점을 가지고 있어 그 응용 및 변형에 관해 많은 연구가 되고 있다[19-26]. 광섬유반응기(optical fiber reactor)의 경우에는 빛을 광섬유를 통해 반응기 내부로 조사시켜 빛 에너지 이용 효율을 높이는데, 다른 반응기들에 비해 높은 이산화탄소 고정화 효율을 얻을 수 있다[33]. 그러나 광섬유반응기의 경우 고가의 광섬유와 부대시설로 인한 초기 투자비가 지나치게 높아 실제 산업 현장에 적용하는데 한계를 가지고 있다. 광생물반응기 형태에 따라 각각의 성능을 비교하면 주로 관형 광생물반응기와 관형 광생물반응기의 생산량이 높음을 Table 3에서 알 수 있다[8,34-38].

Takano[39] 등은 광섬유를 이용한 광생물반응기로 *Emiliania huxleyi*를 8일간 배양한 결과, 이산화탄소를 탄산칼슘으로 전환하여 이산화탄소를 제거하는데 효과적임을 확인하였다. Watanabe[40] 등은 *Spirulina platensis* 배양에 원주형 나선 관상 광생물반응기(Cylindrical shaped helical tubular photobioreactor)를 이용하여 이산화탄소의 농도가 4%인 공기를 공급한 결과, 30.2 g dry weight/L (14.6 g/m²/d)의 생산율에 도달하였다. Samon와 Leduy[41]는 *Spirulina maxima*를 평판형광반응기에서 다단연속배양으로 1.7 g/L/d의 수율을 얻었다. Laws와 Berning[44] 등은 shallow outdoor flume에서 해양 규조류인 *Cyclotella cryptica*를 발전소 배출가스를 이용하여 대량 배양하였으며, 이때 순생산물은 15~20 g/m²/d이었다. 수직 기포탑 반응기에서 *Chlorella* sp. HA-1의 이산화탄소 고정화 특성 연구에서는 직경 2 cm의 반응기에서 1.097 g/L/d로 이산화탄소 고정화능이 가장 높게 조사된 바 있다[43].

우리나라의 경우 태양광이 일정하지 않고, 온도 및 강우량의 일련차 및 연편차가 큰 지역에서는 미세조류의 고농도 배양을 위해서는 밀폐형 배양장치인 광생물반응기에 의해서 수행되어야 경쟁력이 있다. 밀폐형 배양이 개방형 배양보다 초기 투자비용과 운전비용이 많이 들지만, 생산성과 재현성이 높아서 고부가가치의 물질 생산에 적합하다. 미세조류를 이

용하여 생산하는 물질이 현재의 바이오매스에서 좀 더 고부가가치 산물의 창출이 가능해짐에 따라 밀폐형 광생물반응기의 사용이 늘어날 것이라 예상된다. 이러한 연구내용을 바탕으로 밀폐형 광생물 반응기에서 이산화탄소 고정화능이 우수한 미세조류를 배양함으로써 이산화탄소 저감의 시설 및 운영에 따른 비용의 상쇄를 기할 수 있을 뿐만 아니라, 고부가가치의 산물을 창출하여 여러 분야로 활용할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 고부가가치로서의 활용방안

미세조류는 수질관정을 위한 지표생물로서 연구되고 있고, 비타민, EDTA와 같은 고도 불포화 지방산, 단백질, 메탄가스 등 고부가가치 소재의 공급원, 건강식품, 사료, 비료, 연료 등 생명 공학적 연구개발 소재로 각광받고 있다[44]. 특히 최근에는 생물적 환경정화(Bioremediation)를 위해 미세조류를 이용하여 환경 친화적인 수질 오염원 및 대기 중에 이산화탄소를 제거하는데 이용하고 있다. 이처럼 조류의 대량배양을 통해 생산한 유용물질을 산업화하여 많이 이용하고 있고, 폐수 처리에 이용하거나 환경문제를 해결하는 등의 여러 연구가 이루어지고 있다[45]. Table 4에서 보면 대량배양에 의해 생산된 조류의 생물량은 종에 따라 여러 방향으로 활용될 수 있다는 것을 알 수 있다[46].

4.1. 식품분야

미세조류를 식품으로 이용한 대표적 예로서 *Chlorella*와 *Spirulina*를 들 수 있는데, 이들은 비교적 높은 부가가치를 지닌 미세조류로서 다이어트 식품 등의 건강보조식품으로 현재 상품화되고 있다. *Nostoc flagelliforme*는 중국에서 진미의 음식으로 통하기도 하고[47,48], 남조류 중 일부가 인도와 필리핀 등지에서 식품으로 사용된다는 보고가 있다[49]. 미세조류 중에서 규조류인 *Phaeodactylum tricoratum*은 총지방산의 35% 이상이 EPA (Eicosapentaenoic acid)로 구성되어 있는 것으로 보고 되었으며[50], 와편모조류인 *Cryptocodinium* sp.에서 추출한 DHA

Table 5. Type of Biologically Active Materials from Microalgae

Biologically active materials	Type
Amino acids	proline, asparatate, alanine, histidine, serine threonine, phenylalanine, leucine, ornithine, glutamate
Lipids	lipids, fatty acids, sterols
Pharmaceuticals	alkylguanidine compounds, arachidonic acid, microcystin, anatoxins, gallotannin, aponin, malyngolide
Pigments	carotenoids, astaxanthin, chlorophyll, biliproteins
Polyols/Carbohydrates	trehalose, glucose, sucrose, sorbitol, glycerol, glycolate, mannitol, mannose
Polysaccharides	containing D-xylose, D-glucose, D- and L-galactose, methylxylose, D-glucuronic acid, etc.
Primary alcohols	phytol
Vitamin	B ₁ , B ₆ , B ₁₂ , C, E, Biotin, rivoftavin, nicotinic acid, pantothenate

(Docosahexaenoic acid)를 함유한 식물성 오일은 미국에서 건강보조식품으로 널리 판매되고 있다[51]. EPA가 부족하면 혈관계의 이상을 초래할 수 있어, EPA를 다량 함유한 *Nannochloropsis*, *Navicula*, *Nitzschia*, *Porphyridium* 등 다양한 미세조류의 건조체가 상품화되고 있다[52]. 또한, *Spirulina*는 단백질 함량이 건조중량의 46~71%로 매우 높고[53], GLA (γ -linolenic acid), phycocyanin, myxoxanthophyll, zeaxanthin 등 약리작용을 나타내는 물질이 다량 함유되어 있어 사람뿐만 아니라 동물에게까지 단백질 등의 영양소를 제공하는 건강보조식품으로 선호되고 있다[54-56].

4.2. 기능성 물질과 의약품 분야

미세조류는 자연 상태에서 다양한 유용물질을 생산하는 것으로 알려져 있는데, 그 대표적 유용물질로는 carotenoid, phocobiliproteins, polysaccharides, Polyols/Carbohydrates 등이 있다(Table 5). *Dunaliella salina*로부터 주로 추출되는 β -carotene은 이미 상품화된 고부가 가치의 조류산물로, 호주(Western Biotechnology Ltd, Betatene Ltd), 미국(Microbio Resources Inc), 이스라엘(Naturebeta) 등에서 생산되며[57], 식품의 보조색소, 산화방지제, 화장품용 노화방지제 등으로 널리 사용되어 왔다. 남조류인 *Synechococcus*의 추출물 중 allophycocyanin, phycocyanin과 같은 phycobiliproteins에 의해 세포 성장을 촉진하는 효과가 있다는 것이 보고되었다[53]. 이 외에 항종양, 항세균, 항진균, 항바이러스, 신경활성과 같은 다양한 생리활성물질들이 미세조류에 의하여 생산 가능한 것으로 보고되고 있다[58].

4.3. 환경 에너지 분야

미세조류를 이용하여 생물적 환경정화를 위해 환경 친화적인 수질 오염원을 개선하고 대기 중에 이산화탄소를 함께 제거하는 장점이 있다[59, 60]. 미세조류를 이용한 폐수처리의 연구로는 *Chlorella*와 *Scenedesmus*가 우점인 조류배양에 의하여 액상분뇨로부터 질소와 인의 제거에 관한 연구[61], *Spirulina platensis*를 이용한 축산폐수처리에 관한 연구[62] 등이 있다. 이처럼 미세조류의 대량배양을 통해 생산된 유용물질을 산업화하여 많이 이용하고 있으며, 폐수 처리에 이용하는 등 환경문제 해결에 적용하고자 하는 연구가 이루어지고 있다.

미세조류를 이용한 대체에너지 개발은 1970년대 석유 파동이 일어나, 태양 에너지를 이용한 재생 생물자원의 개발에 관심이 집중되면서 미세조류를 이용한 연구가 시작되었다. 미국은 1990년대 중반까지 남서부의 광활한 사막 지역에서 발전소가 배출한 이산화탄소를 원료로 탄화수소 함량인 높은 미세조류를 배양하여 경유 대체 연료인 바이오디젤(biodiesel)을 생산하는 공정의 실용화를 위한 요소 기술 개발에 주력하고 있다[63]. 이탈리아 피렌체 대학에서는 소형 병합발전시스템에서 배출되는 연

소가스를 미세조류 배양 시설에 공급하여 처리하고 생산된 미세조류를 혐기 소화하여 생산된 메탄을 병합발전시스템 연료로 사용하는 실증 연구에 착수하였다. 국내에서도 생물학적 이산화탄소 전환기술의 실용화를 위한 다양한 요소기술 개발에 대한 연구가 다수 수행되었고, 한국 에너지 기술연구원에서는 LNG 연소 가스를 미세조류 배양 공정에 주입하여 사료 첨가제로 전환하는 기술을 개발하였다[64].

이와 같이 미세조류는 식품분야, 의약품분야, 에너지환경 분야 등 다양한 분야에서 이용 가능성이 입증되었고, 무한한 시장성을 지니고 있음을 확인할 수 있었다.

5. 요약 및 결론

미세조류를 이용한 생물학적 고정화는 다른 이산화탄소 자원화 기술에 비해 온실가스의 순 저감효율은 매우 높지만 생물 공정의 낮은 반응 속도 때문에 이산화탄소의 절대 저감 양은 크다. 또한, 미세조류는 산업적으로 고밀도 배양이 가능하므로 이산화탄소 저감문제 해결이 가능하다. 그러나 산업체 배출가스로부터 이산화탄소를 직접 고정화하는데 적용하기에는 아직 해결해야 할 문제점이 있다. 특히, 산업체 배출가스 중 이산화탄소 평균농도는 10~15%로 대부분의 미세조류가 활성을 갖는 4~6%에 비해 높다. 또한 배출가스 중의 불순성분인 SOx, NOx 등은 미세조류 배양 배지의 pH를 떨어뜨리고 그 결과, 미세조류의 이산화탄소 고정화 활성은 크게 저하된다. 뿐만 아니라, 대규모 시설에 적용할 수 있는 기술적 측면도 부족한 것이 현실이다.

그러므로 미세조류를 탐색하여 우수 조류주를 분리하고, 생물 공학 기술의 발달로 발전소의 배출가스와 같은 고농도의 이산화탄소에서 생장이 가능하며, SOx, NOx에 대한 내성이 있는 미세조류 균주를 개발해야 한다. 이와 더불어 효율적인 광생물반응기의 개발과 배양 공정을 개선함으로써 이산화탄소 대량 처리 기술로서도 활용 가능할 것으로 사료된다. 또한, 조류 배양에 의해 환경오염문제의 근원적 해결과 동시에 유용생물자원을 생산하는 환경 친화적 생물 산업을 창출하여 이산화탄소 저감 시설 및 운영에 따른 비용의 상쇄효과 등을 기대할 수 있다.

참고 문헌

1. H. Rodhe, *Science*, **248**, 1217 (1990).
2. J. K. Jeon, Y. K. Park, and S. K. Ihm, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **14**, 1 (2003).
3. S. B. Lee, C. B. Park, and I. S. Suk, *Chem. Ind. Technol.*, **13**, 13 (1995).
4. I. Karube, T. Takeuchi, and D. J. Barnes, *Adv. Biochem. Eng.*

- Biotechnol.*, **46**, 63 (1992).
5. G. Torzillo, B. Pushparaj, F. Bocci, W. Balloni, R. Materassi, and G. Florenzano, *Biomass*, **11**, 61 (1986).
 6. M. Yanagi, Y. Watanabe, and H. Saiki, *Energy Convers. Mgmt.*, **36**, 713 (1995).
 7. N. Sakaki, Y. Sakamoto, M. Chihara, and I. Karube, *Energy convers. Mgmt.*, **36**, 693 (1995).
 8. Q. Hu, N. Kurano, M. Kawachi, I. Iwasaki, and S. Miyachi, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **49**, 655 (1998).
 9. N. Hamagata, T. Takeuchi, Y. Fukuju, D. J. Barnes, and I. Karube, *Phytochem.*, **31**, 3345 (1993).
 10. A. Hamasaki, N. Shioji, Y. Ikuta, Y. Hukuda, T. Makita, K. Hirayama, H. Matuzaki, T. Tukamoto, and S. Sasake, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **45**, 799 (1994).
 11. E. D. Laws and K. L. Berning, *Biotech. Bioeng.*, **37**, 936 (1991).
 12. J. L. Stauber, *Aquat. Toxicol.*, **41**, 213 (1998).
 13. A. H. Daranas, M. Norte, and J. J. Fernandez, *Toxicol.*, **39**, 1101 (2001).
 14. Y. H. Shon, K. S. Nam, and M. K. Kim, *J. Microbiol. Biotechnol.*, **14**, 158 (2004).
 15. R. J. Radmer, *Bioscience*, **46**, 263 (1996).
 16. N. Sakai, Y. Sakamoto, N. Kishimoto, M. Chihara, and I. Karue, *Energy Convers. Mgmt.*, **36**, 693 (1995).
 17. N. Kurano, H. Ikemoto, H. Miyashita, T. Hasegawa, H. Hata, and S. Miyachi, *Energy Convers. Mgmt.*, **36**, 689 (1995).
 18. S. Miyairi, *Energy Convers. Mgmt.*, **36**, 763 (1995).
 19. H. Matsumoto, N. Shioji, A. Hamasaki, Y. Ikuta, Y. Fukuda, M. Sato, N. Endo, and T. Tsukamoto, *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **51**, 681 (1995).
 20. C. G. Lee, *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, **4**, 78 (1999).
 21. A. Bolsunovsky and V. Zhavoronokov, SAE Technical Paper Series 961361, 1 (1996).
 22. M. A. Borowitzka, *J. Mar. Biotechnol.*, **4**, 185 (1996).
 23. M. Javanmardian and B. O. Palsson, *Adv. Space Res.*, **12**, 231 (1992).
 24. J. L. Liu and S. L. Zhang, *J. Biotechnol.*, **16**, 119 (2000).
 25. E. Molina, J. Fernandez, F. G. Acién, and Y. Chisti, *J. Biotechnol.*, **92**, 113 (2001).
 26. J. C. Ogbonna and H. Tanaka, *Chemtech.*, **27**, 43 (1997).
 27. M. R. Tredici and G. Chini Zittelli, *Biotechnol. Bioeng.*, **57**, 187 (1998).
 28. J. Y. Lee, T. S. Kwon, H. J. Kim, and J. W. Yang, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.*, **18**, 340 (2003).
 29. P. Carlozzi and G. Torzillo, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **45**, 18 (1996).
 30. Y. Watanabe and D. O. Hall, *Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **44**, 693 (1996).
 31. K. L. Terry and L. P. Raymond, *Enzyme Microb. Technol.*, **7**, 474 (1985).
 32. A. B. Michael, *J. Biotechnol.*, **70**, 313 (1999).
 33. K. Mori, *Biotechnol. Bioeng. Symp.*, **15**, 331 (1985).
 34. W. Yongmanitchai and O. P. Ward, *J. Am. Oil Chem. Soc.*, **69**, 584 (1992).
 35. G. Torzillo, P. Carlozzi, B. Pushparaj, E. Montaini, and R. Materassi, *Biotechnol. Bioeng.*, **42**, 891 (1993).
 36. C. G. Lee and B. O. Palsson, *Biotechnol. Lett.*, **17**, 1149 (1995).
 37. Q. Hu, H. Guterman, and A. Richmond, *Biotechnol. Bioeng.*, **51**, 51 (1996).
 38. J. Degen, A. Uebele, A. Retze, U. Schmid-Staiger, and W. Trosch, *J. Biotechnol.*, **92**, 89 (2001).
 39. H. Takano, H. Furu-Une, J. G. Burgess, E. Manabe, M. Hirano, M. Okazaki, and T. Matsunaga, *Appl. Biochem. Biotech.*, **39**, 159 (1993).
 40. Y. Watanabe, J. Noue, and D. O. Hall, *Biotechnol. Bioeng.*, **47**, 261 (1995).
 41. R. Samon and A. Leduy, *J. Chem. Eng.*, **63**, 105 (1985).
 42. E. A. Laws and J. L. Berning, *Biotechnol. Bioeng.*, **37**, 936 (1991).
 43. K. D. Sung, J. S. Lee, C. S. Shin, and S. C. Park, *J. Microbiol. Biotechnol.*, **8**, 409 (1998).
 44. S. K. Kim, H. C. Baek, H. G. Byun, O. J. Kang, and J. B. Kim, *J. Kor. Fish. Soc.*, **34**, 260 (2001).
 45. K. Lee and C. G. Lee, *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, **6**, 194 (2001).
 46. D. S. Joo and S. Y. Cho, *J. East Coast. Res.*, **9**, 89 (1999).
 47. K. Gao, *J. Appl. Phycol.*, **10**, 37 (1998).
 48. H. Takenake, Y. Yamaguchi, S. Sakaki, K. Watarai, N. Tanaka, M. Hori, H. Seki, M. Tsuchida, A. Yamada, T. Nichimori, and T. Morinaga, *Food Chem. Toxicol.*, **36**, 1073 (1998).
 49. D. N. Tiwari, *New Phytol.*, **81**, 853 (1978).
 50. V. Veloso, A. Reis, L. Gouveia, H. L. Fernandes, J. A. Empis, and J. M. Novais, *Bioresour. Technol.*, **38**, 115 (1991).
 51. V. Brower, *Nat. Biotechnol.*, **16**, 728 (1998).
 52. J. A. Running, R. J. Huss, and P. T. Olson, *J. Appl. Phycol.*, **6**, 99 (1994).
 53. T. Katano and S. I. Nakano, *J. Sea Res.*, **55**, 182 (2006).
 54. O. Ciferri, *Microbiol. Rev.*, **47**, 551 (1983).
 55. R. A. Kay, *Crit. Rev. Food Sci. Nutr.*, **30**, 555 (1991).
 56. T. Enoki, H. Sagawa, T. Tominaga, N. Eiji, K. Nobuto, T. Sakai, and F. G. K. Gao, *J. Appl. Phycol.*, **10**, 37 (1998).
 57. C. Vilchez, I. Garbayo, M. V. Lobato, and J. M. Vega, *Enzyme Microb. Technol.*, **20**, 562 (1997).
 58. H. S. Kim, C. H. Kim, M. C. Kwon, Y. K. Song, J. H. Cho, H. G. Gwak, B. Y. Hwang, J. C. Kim, and H. Y. Lee, *J. Kor. Fish. Soc.*, **39**, 318 (2006).
 59. A. H. Daranas, M. Norte, and J. J. Fernandez, *Toxicol.*, **39**, 1101 (2001).
 60. Y. H. Shon, K. S. Nam, and M. K. Kim, *J. Microbiol. Biotechnol.*, **14**, 158 (2004).
 61. M. K. Park, S. J. Lee, H. H. Suh, H. S. Kim, Y. H. Kim, B. D. Yoon, and H. M. Oh, *Algae*, **13**, 227 (1998).
 62. J. H. Ahn, S. S. Kim, T. H. Kim, J. Y. Lee, S. J. Ohh, J. H. Lee, and H. Y. Lee, *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **24**, 519 (1996).
 63. K. L. Kadam, *Energy Convers. Mgmt.*, **38**, S505 (1997).
 64. J. S. Lee, D. G. Kim, J. P. Lee, S. C. Park, J. H. Joh, and S. J. Ohh, *J. Microbiol. Biotechnol.*, **11**, 772 (2001).