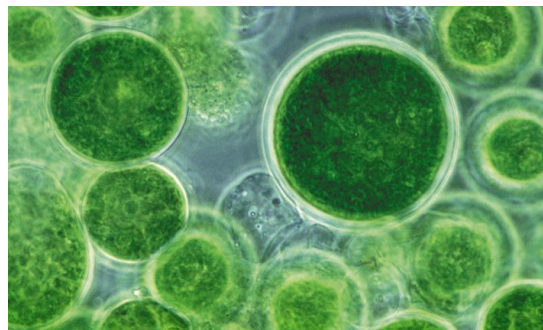


6. 생물학적 CO₂ 전환기술(II)

생물학적 전환에 의한 바이오연료 생산의 1세대는 식용작물로부터 연료를 생산하는 것이다. 이는 상용화 단계로 접어들었으나 식용작물을 사용하거나 식용작물의 재배가 가능한 지역에 오일생산을 위한 작물을 경작하는 이유 등으로 인하여 식량가격의 급격한 상승을 초래하였다. 또한 우리나라와 같이 쌀을 제외한 대부분의 농산물을 수입하는 국가에서는 식량안보의 위협이라는 커다란 걸림돌로 부각되었다. 1세대 기술을 이용할 경우 바이오연료의 생산 수율이 낮기 때문에 많은 경작지를 필요로 하는데 전 세계 곡물 경작가능 지역의 1%인 약 1천4백만헥타르에서 생산된 작물을 이용하여 수송용 연료를 생산할 경우 전 세계 수송연료 사용량의 1%에 불과하다. 즉, 1세대 기술을 이용한 수송용 연료의 대체는 요원할 수 밖에 없는 현실이다. 2세대 기술은 식용작물을 사용하는 대신 지질을 많이 생산할 수 있는 작물, 농산물 잔류물, 목재 잔유물 등을 사용하여 1세대 기술에 비하여 상대적으로 식량 문제가 끼치는 영향은 작으나 아직까지 연구개발 단계로 상용규모의 공정이 운전된 예는 없다. 생물학적 연료생산은 경제적인 면에서 화석연료인 석유와 경쟁을 하여야 한다. 바이오연료의 경쟁력 강화를 위해서는 추가적인 토지가 필요 없거나 최소한으로 사용하여야 하며, 이산화탄소 고정화와 같은 대기질 개선 효과와 함께 사용되는 물의 양이 최소여야만 한다. 생물학적 이산화탄소 전환 기술 중 이러한 조건을 만족시킬 수 있는 것이 미세조류를 이용한 이산화탄소 고정화 및 바이오연료 생산이다.

미세조류는 광합성 색소를 가지고 광합성을 하는 단세포 생물로 마이크로 단위 크기의 간단한 세포구조를 가지고 있다. 예로는 Chloroxybacteria같은 cyanobacteria류, Chlorophyta 같은 녹조류, Rhodophyta 같은 홍조류, Bacillariophyta 같은 규조류 등을 들 수 있다.

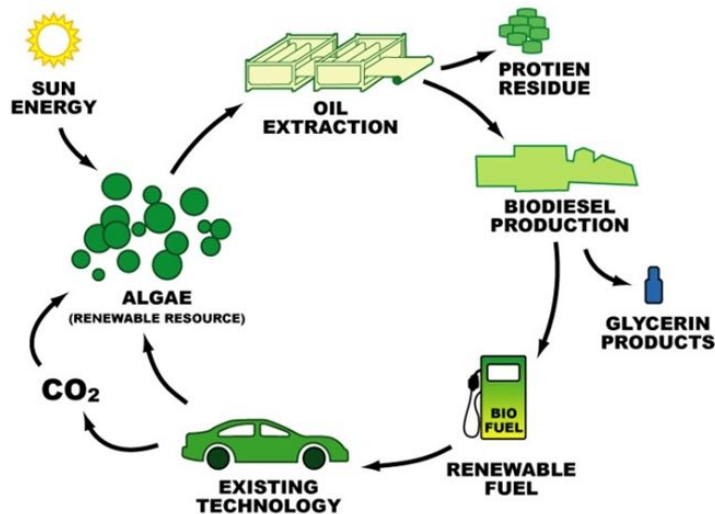


[그림 6-1] 미세조류 [AEON Biogroup].

미세조류를 이용한 바이오연료 생산의 장점은 다음과 같다. ① 1년 내내 바이오디젤 생산이 가능하다. open pond에서 유채씨(rapeseed)를 이용한 경우 바이오디젤 생산량이 1,190 l/ha인데 비하여 미세조류를 사용한 경우 12,000 l/ha로 10배 이상 많다. ② 수생 경작이 가능하므로 추가적인 물 공급이 필요 없어 지상의 경작물보다 물이 덜 필요하다. ③ 식용작물의 경작을 할 수 없는 지역에서도 경작이 가능하며, 염분이 섞인 물에서도 경작이 가능하다. 즉, 외부 환경에 의한 영향이 작다. ④ 무게 비로 20 ~ 50 wt.%의 지질을 가지고 있으며, 성장속도가 빠르다. 성장속도는 지수함수적으로 증가하여 2배 증가하는데 3.5시간이 소요된다. ⑤ 이산화탄소 고정화 양이 많다. 건조중량 기준으로 1 kg의 미세조류는 1.83 kg의 이산화탄소를 고정화시킨다. ⑥ 영양분(질소, 인)을 폐수로부터 얻을 수 있기 때문에 오염된 물을 원료로 사용할 수 있으며, 이는 폐수 정화의 부가적인 효과를 얻을 수 있음을 의미한다. ⑦ 식용작물과는 달리 병충해에 대한 영향이 없다. ⑧ 단백질, 에탄올, 메탄과 같은 유용한 부산물 생산이 가능하다.

그러나 이러한 장점을 얻기 위한 많은 도전과제가 상존해 있다. 이를 살펴보면 ① 바이오 연료 혹은 유용한 부산물의 생산을 위해서는 미세조류의 종 선택이 중요하다. 모든 조건을 만족시키는 적절한 미세조류 선정이 아직 이루어지지 않고 있다. ② 현재보다 더 높은 광합성 효율을 얻어야 한다. ③ 물 순환, 이산화탄소 수송, 경작, 추출 등을 고려하면 바이오연료로써 얻는 에너지보다 바이오연료를 얻기 위한 에너지 소비가 더 크다. ④ 상용화가 거의 되어 있지 않다. 즉, 공정을 격상시키기 위한 자료가 부족하다. ⑤ 배가스 중 함유되어 있는 고농도 이산화탄소에 생존이 가능한 종의 선정과 SOx, NOx에 의한 비활성화가 없어야 한다.

이산화탄소의 생물학적 고정화 및 바이오연료의 생산은 다음 그림과 같다.



[그림 6-2] 미세조류를 이용한 바이오연료 생산 및 탄소 순환.

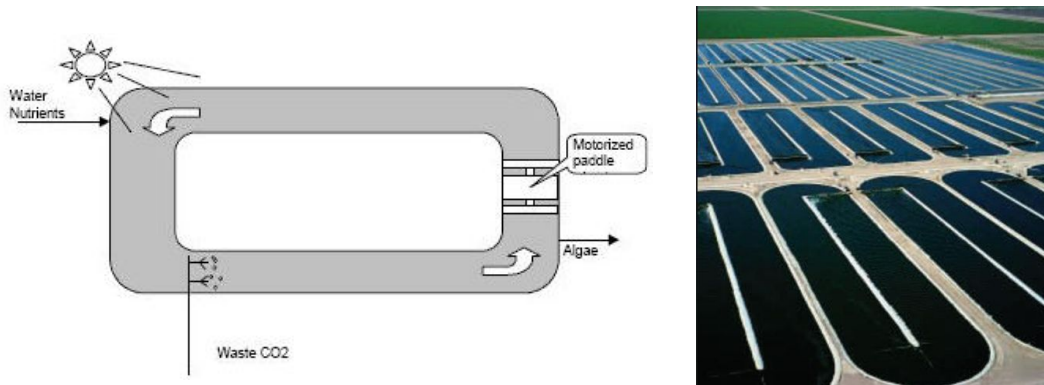
이산화탄소와 광합성을 이용하여 미세조류를 성장시키고 바이오매스를 수확한 후 이를 이용하여 바이오디젤을 생산하는 것이다. 이산화탄소 측면을 살펴보면 미세조류를 통해 생산된 바이오디젤을 내연기관의 연료로 사용하고 이때 발생하는 이산화탄소를 다시 미세조류의 영양원으로 공급함으로써 탄소중립을 이룰 수 있는 순환구조임을 알 수 있다.

미세조류를 이용하여 바이오디젤을 생산하는 기술은 이산화탄소를 고정화하는 공정, 고농도의 이산화탄소를 이용하는 미세조류 균주 개량 기술, 미세조류 대량 배양 기술, 미세조류 바이오매스로부터 바이오연료를 생산하는 기술로 크게 분류할 수 있다. 미세조류는 에너지원으로써 태양광을 사용하여 이산화탄소를 고정화하는 탄소동화기능을 갖고 있으며 이를 통해 생리활성물질과 같은 다양한 유용물질을 생산하며 이산화탄소의 저감과 대체연료의 생산이라는 두 가지 장점을 갖는다. 이러한 광합성을 위해서 미세조류내에 광합성 효소인 RUBISCO가 존재하며 이 효소까지 무기탄소의 확산은 광합성능을 결정하는 중요한 요인으로 작용한다. 남조류인 *Synechocystis* sp.의 탄소농축기구 (carbon concentrating mechanism, CCM)는 에너지 의존적 수송체에 의한 무기탄소의 세포 내 축적과 대부분의 RUBISCO가 위치한 carboxylase 내에서 carbonic anhydrase에 의한 이산화탄소 고정의 두 단계로 구분할 수 있으며, 이에 관여하는 유전자의 분석이 이루어진바 있다. 분자생물학의 발달은 특정물질의 생산이 우수하며 다른 미생물과 경쟁하여 생존할 수 있는 유전적으로 조작된 미생물 (genetically engineered microorganism, GEMs)의 개발을 가능하게 하였다. 따라서 자연계로부터 분리한 미세조류에 대하여 돌연변이 유발과 같은 재래식 방법을 사용하거나 외부 유전자의 도입 및 유전자 조작 등을 통하여 세균에 대한 내성이 강하며, 최종적으로 생산수율이 높고 생장이 왕성한 우량 미세조류의 개발에 대한 연구가 수행되고 있다 (오희목, 안치용, 미세조류를 이용한 이산화탄소 고정 및 바이오디젤 생산, 공업화학과학전망, 2009). 일반적으로 5% 이상의 이산화탄소 농도에서는 미생물의 생장이 저해를 받은 것으로 알려져 있으나 해양성 미세조류인 *Chorococcum Littodale* 등과 같은 일부 광합성 미생물은 20~50%의 이산화탄소에 대해 내성을 갖는 것으로 알려져 있으며, 담수성 미세조류인 *Chlorella*는 20~30%의 이산화탄소 농도에 내성이 있어 연소배가스의 이산화탄소 고정화에 적용이 가능한 것으로 알려져 있다.

미세조류의 배양은 고등식물에 비하여 배양장치가 단순하고 차지하는 면적이 작다. 미세조류의 배양을 위해서는 탄소원으로 이용되는 이산화탄소를 적정량 공급, 광합성을 위한 광량 및 광도 조절, 온도 조절, 영양염류의 공급 등이 필요하다. 미세조류를 배양하는 방법은 크게 개방형 연못 (open pond)이나 광생물반응기

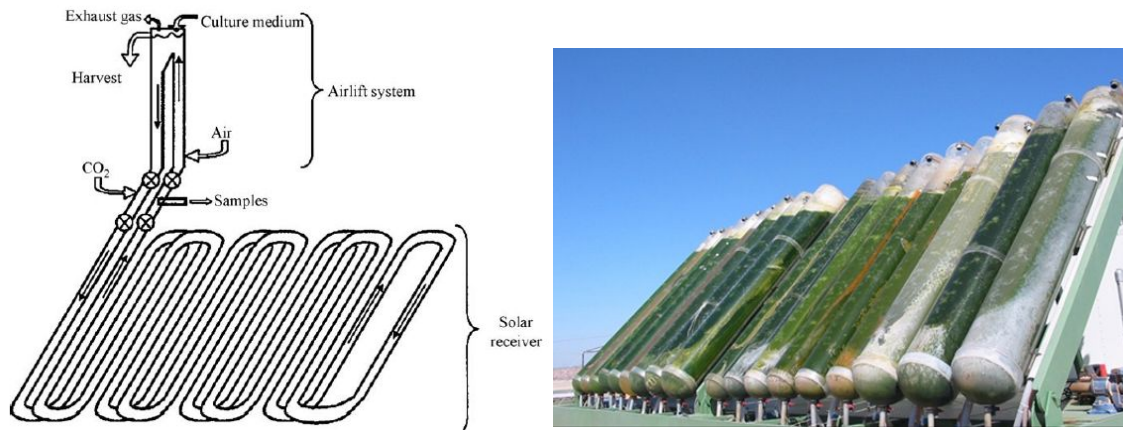
(photobioreactor)를 들 수 있다.

개방형 배양은 가장 단순한 형태로, 자연적으로 영양원 공급이 풍부한 개방된 연못 등에서 배양하는 것으로 초기 투자설비와 운전비용이 저렴하고 유지 및 보수가 용이한 장점이 있다. 그러나 배양장치 내부로 효과적인 빛 전달이 이루어지지 않아 균체의 성장속도가 느리고 균체의 성장 수율이 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 (전선미 등, 미세조류를 이용한 이산화탄소 고정화 기술 현황, 공업화학, 2008).



[그림 6-3] 미세조류의 개방형 배양.

광생물반응기를 이용한 미세조류의 배양은 국토가 협소하고 태양광이 일정하지 않으며 온도 및 강우량의 편차가 큰 우리나라의 경우에 보다 적합한 시스템으로 평가되고 있다. 폐쇄형 광생물반응기는 상기에서 언급한 개방형 배양의 단점을 극복하기 위해 개발되었다. 또한 개방형 배양에서는 여러 종류의 미세조류가 서식하는데 비해 폐쇄형 광반응기내에는 바이오연료를 가장 많이 생산할 수 있는 단일한 미세조류를 배양할 수 있는 장점이 있다. 광생물 반응기는 관형 혹은 평판형 형태로 빛이 투과될 수 있는 유리나 플라스틱으로 만들어 진다. 주요 구성 공정은 배지저장기 (medium reservoir)와 광수집기로 구성된다. 관형 반응기는 일반적으로 0.1m 보다 작은 지름을 가지며 미세조류가 포함된 배양액은 펌프나 airlift에 의하여 순환되며 이때 이산화탄소가 미세조류와 접촉이 쉽도록 혼합되도록 구성하여야 한다. 전체 공정의 중요한 인자는 빛, 기체 전달, 배지의 공급과 생물학적 한계 등이다.



[그림 6-4] 패쇄형 광생물 반응기.

빛의 효율적인 전달을 위해서 태양광 집광판, 광섬유 (optical fiber) 이용 등의 다양한 방법이 시도되었으나 바람직하게는 비용절감을 위해 태양광을 이용하는 것이 타당하다. 배지저장기는 신선한 배양용 배지가 일정한 속도로 공급되도록 하며, 같은 양의 배양된 배양액이 회수되도록 한다. 야간에는 배지의 공급을 중단하지만 미세조류의 침강을 막기 위해서 계속적으로 교반을 해주어야 한다. 통상적으로 주간에 생산된 광합성 산물의 25%는 야간에 조류 세포의 활동을 유지하는데 사용된다.

대량 배양된 미세조류를 유용물질로 전환하기 위해서는 별도의 미세조류 수확공정이 필요하다. 미세조류는 크기가 $30\mu\text{m}$ 이하로 작으며, 물의 밀도보다 약간 크기 때문에 수용액상으로부터 분리하기가 용이하지 않다. 따라서 여과, 침전, 부유, 원심 분리, 응집 등 다양한 방법들이 적용되고 있다.

수확된 미세조류를 바이오연료로 전환하는 기술 중 기존 촉매를 이용하거나 산성 촉매 에스테르화 반응을 이용한 공정과 같은 전통적인 방법들은 반응 시간이 느리고 필요한 메탄올 양이 많으며, 공정 중에 원하지 않는 비누성분들이 발생하는 등의 문제점이 있다. 최근 새로이 연구되고 있는 초임계 메탄올을 이용한 바이오디젤 전환방법은 원료 물질을 녹임으로써 촉매의 필요성을 제거하여 비누성분의 발생 및 바이오디젤 전환수율 저하와 같은 문제점의 해결이 가능하며 지방산 원료물질들을 실질적으로 처리하는 장점이 있다. 이와 같이 미세조류로부터 지질 추출, 지질의 바이오디젤 전환분야는 최근 본격적으로 연구되기 시작한 신생분야로서 경제적이고 격상 공정 개발이 가능한 기술개발이 진행 중이다 (오희목, 미세조류 바이오매스의 연료화 연구개발 현황 및 전망, NICE 2011).

미세조류를 이용한 바이오디젤 생산가는 \$2.80/l로 추산되며 2006년 기준 식물성

기름인 palm oil 가격은 \$0.52/l 로 나타나 현재 판매되고 있는 식물성 바이오디젤보다 약 5배의 가격임을 알 수 있다. 또한 2010년 미국 텍사스 지역 내 주유소의 석유 디젤 가격이 \$3.09/gallon 인데 비하여 triglyceride를 이용한 바이오디젤 가격은 \$19.25/gallon 로 석유디젤에 비하여 약 6~7배 높은 것으로 나타났다. 즉, 미세조류를 이용한 바이오연료의 생산이 미래 재생에너지로써 큰 부분을 차지하며 온실가스를 줄일 수 있는 대안 중 하나로 부각되고 있으나 생산가격을 절감시킬 수 있는 미세조류 종 개발, 배양 기술 개발 및 오일 전환기술 개발이 이루어져야만 한다.