생물학적 이산화탄소 고정화 공정의 개발

이 선복, 박 찬범, 서 인수
포항공과대학교 화학공학과

Process Development for the Biological CO_2 Fixation

S.B.Lee, C. B. Park, I. S. Suh
Department of Chemical Engineering, POSTECH

서 론

최근 급속한 산업발달과 폭발적인 인구증가로 파생된 여러 지구환경문제 중, 1980년대 이후의 전세계적인 기상이변의 원인인 지구온난화 현상에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 화석연료의 대량연소시 발생하는 이산화탄소가 메탄 및 CFC 등과 함께 온실효과를 유발시키는 것으로 알려져 있으며, 이의 효과적인 처리 및 활용기술 개발이 시급히 요구되고 있다.

이산화탄소를 포함한 배기가스의 처리공정은 크게 이산화탄소의 물리 화학적 분리 회수 공정과, 화학적 또는 생물학적 고정화 공정으로 나눌 수 있다[1]. 생물학적 이산화탄소 고정화의 경우 고온 고압하에서 행하는 화학공정에 비해 반응속도가 늦어 생산성 및 효율이 상대적으로 낮은 반면, 상온 상압하에서 태양에너지 그리고 해수만으로 이산화탄소의 고정이 가능하며, 이산화탄소를 기질로 바이오매스를 생산함과 동시에 여러 유용물질을 얻을 수 있어 경제적인 측면에서 유리하다.

본 발표에서는 국외에서 연구되어온 광합성미생물의 배양 및 생물학적 이산화탄소 고정화 공정에 대해 간략하게 요약하고, 현재 포항공대 생물화공실험실에서 이루어지고 있는 연구에 관하여 소개하고자 한다.

생물학적 이산화탄소 고정

생물학적으로 이산화탄소를 고정화 하는 과정은 공기중의 이산화탄소를 태양에너지와 물을 이용하여 탄수화물로 전환하는 생화학적 반응인 광합성(photosynthesis)을 통해 수행되며, 지구상의 광합성 활동 중 적어도 절반 이상은 해양, 하천, 호수등에 있는 여러가지 해양생물 및 광합성미생물에 의해 이루어지고 있다.

이러한 광합성미생물의 종류에는 크게 유핵생물인 미세조류(microalgae)와 무핵생물인 시아노박테리아(cyanobacteria), 그리고 홍녹색세균(purple and green bacteria)등의 광합성 세균으로 나눌 수 있다. 이중 조류의 경우 유용물질을 많이 생성함에도 불구하고 대량생산을 목적으로 배양하기에는 성장속도가 너무 느리다는 단점이 있어, 진핵생물에 비해 상대적으로 빠르며 고등식물과 유사한 산소발생기구를 갖는 광합성박테리아, 특히 시아노박테리아에를 이용한 이산화탄소 고정화 연구가 활발하다.

광합성미생물을 배양하는 방법은 크게 옥외 대량배양과 광생물반응기를 이용한 방법으로 나눌 수 있다. 오래 전부터 *Chlorella, Spirulina, Dunaliella* 와 같은 미세조류를 옥외 연못에서 배양하여, 건강식품과 베타캐로틴 등을 간편하게 생산하여왔다. 여기에 자연대류 및 바람에 의한 mixing의 효과를 높이기 위해 raceway형태로 여러 채널을 루프로 연결하여

펌프에의해 배양액을 순환시키고, 1970년대부터는 기존의 펌프대신에 paddle-wheel이 도입되어 에너지 효율를 높이고 물리적 힘에의한 세포파괴를 줄였다. 그리고 공기를 불어넣어 주어 배양액을 혼합해 주는 air-lift형태의 배양기를 이용하거나, 연못에서 옥외배양시 생기는 배양액의 순환문제, 이산화탄소의 효율적인 주입문제 등을 근본적으로 해결하기 위하여 튜브 형태의 광생물배양기에 세포를 고정화하여 세포의 회수와 생산을 향상시키려는 연구가 진행 중이다.

이러한 옥외배양이나 튜브식 배양은 대단히 방대한 면적이 요구되며, 배양조건을 인위적으로 콘트롤하기 힘든 문제점과 특히 외부에서 빛을 조사하는 경우 광합성미생물의 고농도 배양에 한계가 있는 것으로 알려져 있다[2]. 이를 위해 최근에 개발되고 있는 배양기가 바로 광섬유(optical fiber)를 이용한 광생물반응기이다. 동경대학의 T. Matsunaga등은 광섬유를 광원으로 하는 튜브식 생물반응기에서 *Synechococcus* NKBG040607을 배양해 효율적으로 이산화탄소를 제거하고, 동시에 글루타민산을 다량 생산하는 내용을 담은 논문을 발표해 주목받고 있다[3,4]. 이러한 광생물반응기는 광섬유를 반응기 내부에 균일한 간격으로 설치함으로써, 배양기 외부에서 빛을 주는 기존의 방법보다 빛의 균일한 조사가 가능해져 이산화탄소 고정화 효율을 향상시키고 반응기 면적이 극소화하여 이의 실용화가 크게 주목받고 있다.

국외 연구 현황

광합성미생물을 이용한 이산화탄소의 고정화 기술은 최근에 본격적으로 연구되기 시작한 분야로서 아직은 연구개발단계에 있다. 앞에서 서술한 바와 같이 조류(algae)의 옥외배양은 오래전부터 개발되어 이미 상업화가 되어 있기는 하나 이산화탄소의 대규모 고정화 공정에 사용된 예는 아직 없다.

미국과 이스라엘 등 기후조건이 좋은 지역에서는 미세조류를 옥외배양하는 연구가 이루어지고 있고, 이를 위해 미국의 경우 Solar Energy Research Institute, Oak Ridge National Laboratory등에서 미세조류를 이용한 fuel oil 생산기술 개발, 광합성박테리아를 이용한 이산화탄소 고정화 및 수소 생산 등에 대해 연구하고 있으나, 미생물을 이용한 석탄 탈황 및 석탄 액화 등의 연구에 비해 Department of Energy의 지원이 상대적으로 적은 것으로 알려져 있다.

반면 우리나라와 비슷한 기후조건을 가진 일본에서는 이산화탄소 고정화 공정개발에 수년전부터 많은 투자를 하고 있으며, 2000대초까지 이 기술의 실용화에 목표를 두고 있다. 특히 광합성박테리아를 이용한 이산화탄소 고정화에 상대적으로 많은 투자를 하고 있으며, 이는 최근 생물공학기술(biotechnology)의 눈부신 발전에 힘입어 균주개량 및 유전자 조작을 통한 고부가가치 산물 생산이 가능하며, 원료로 단지 해수(물)와 태양빛(광에너지) 그리고 이산화탄소만이 필요하여, 장기적인 안목에서 볼 때 기술개발이 완료되면 경제성이 다른 어느 기술보다 높다고 보고 있기 때문이다. 또한 광합성 기작에 관한 연구는 추후 가장 이상적인 인공 광합성(artificial photosynthesis)기술의 개발을 가능케 할 수 있을 것으로 전망되고 있다.

이를 위해 일본에서는 1999년까지 10개년 계획을 마련하고 이산화탄소 발생량을 매년 2,000억톤씩 감소시키고자 이른바 "The Green Planet Project"를 통산성 주도하에 추진하고 있는 데, 이계획의 원년인 1990년도에 이미 총 예산 60억엔을 투자하였다. 이 중 미생물

이나 조류의 배양을 통한 이산화탄소 고정화에 가장 많은 약 22억엔을 배정하였으며 이 연구에는 동경대학의 첨단과학기술센터와 Hitachi, Sumitomo, Mitsui, Mitsubishi, Kawasaki, Asahi 등 모두 16개 기업체가 참여하고 있다.

국내 (포항공대) 연구 현황

포항공대 생물화공실험실에서는 포항제철의 지원과 산업과학기술연구소의 협조하에 포항 근해에서 이산화탄소 고정화 효율이 좋은 광합성미생물을 분리, 순수 배양하고 있으며, 시아노박테리아인 공시균주 *Synechococcus* sp. PCC6301과 PCC7002 및 *Synechocystis* sp. PCC6803등을 실험에 사용하고 있다.

효과적인 이산화탄소 제거를 위해서는 광합성미생물의 고농도 배양 및 대량 배양이 가능한 반응기 개발이 필수적인데, 이를 위해 광섬유를 이용한 광생물반응기를 개발하고 있다. 효율적인 이산화탄소의 전달과 광섬유 설치를 위해서 Column type으로 반응기를 제작하였다. 여기에 반응기 내부에 광섬유 약 600 본을 균일하게 설치하고 광원으로 400 W의 메탈할로겐 램프를 조사하였다. 이 반응기의 대조구로 형광등을 이용한 배양기를 따로 설치하여 비교 실험하였다.

몇 실험결과를 보면, 1L 크기의 광생물반응기에서 *Synechococcus* sp. PCC 6301를 고농도로 배양할 경우, 형광등 이용시 거의 성장이 없는 데 비해 좋은 성장을 나타내었다 (Fig. 1). 바이오매스 생성율을 기준으로 계산한 이산화탄소 전환속도는 6.25×10^{-4} mol CO_2/hr정도로, 이는 Matsunaga등이 측정한 값과 거의 일치하였다.

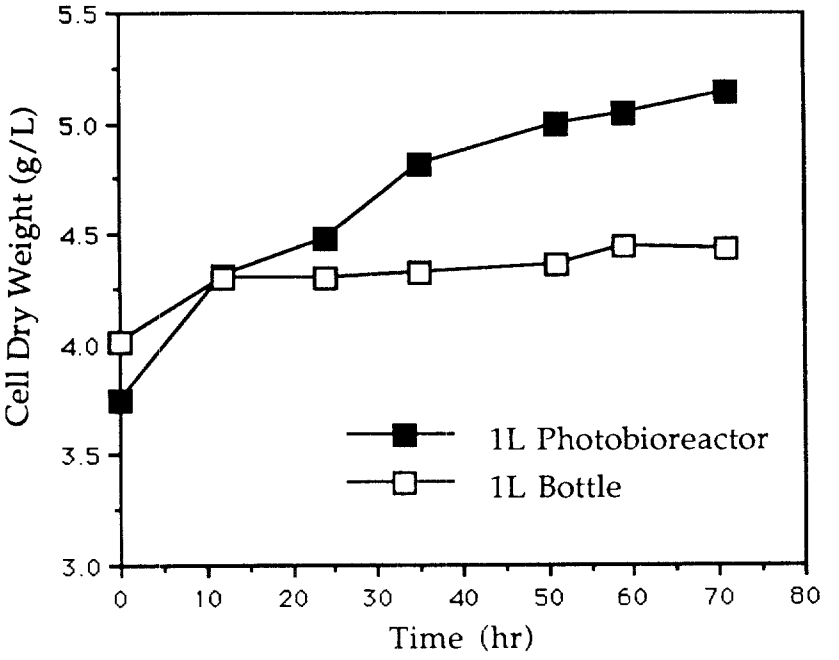

Fig. 1. High density culture of *Synechococcus* sp. PCC 6301.

광생물반응기의 culturue volume을 2.5 L크기로 scale-up하였을 경우, *Synechococcus* sp. PCC 6301의 성장속도는 형광등을 이용한 기존의 배양기에서와 비교해 볼 때 상대적으로 우수한 결과를 보인다(Fig.2).

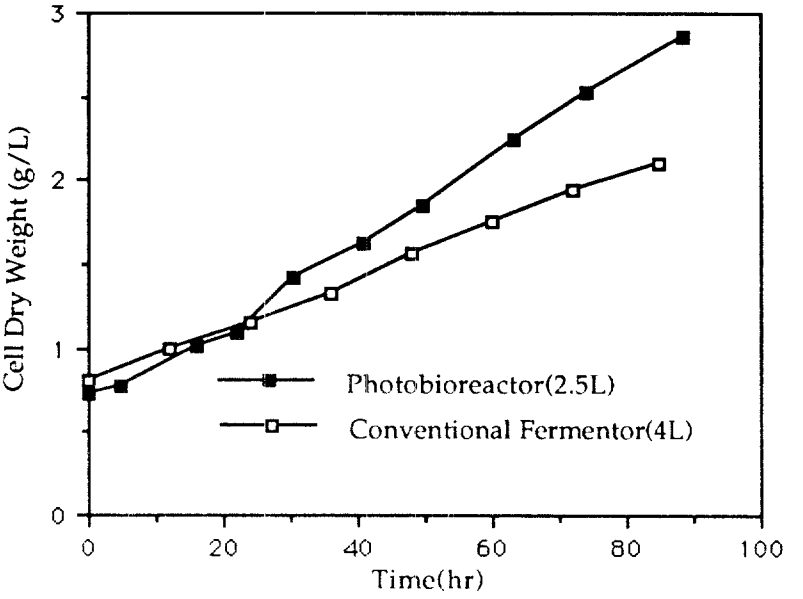

Fig. 2. Cultivationof *Synechococcus* sp. PCC 6301 in optical-fiber photobioreactor (2.5L) and conventional fermentor with cool fluorescent lamp(4 L).

위의 결과에서 광섬유를 사용한 광생물반응기의 경우 광합성미생물의 배양이 낮은 농도에서뿐만 아니라 고농도에서도 가능하며, 이를 이용할 경우 효율적인 이산화탄소 고정화 공정에의 적용이 기대된다. 또한 시아노박테리아를 유전자재조합기술을 이용하여 외래 단백질 등을 생산할 수 있을 것으로 판단되며 현재 본 실험실에서는 이에 관한 연구도 병행하고 있다.

참고문헌

1. 박 찬범, 이 선복 : *생물화공*, 8 (2), 49 (1993)
2 . Lee, Y. K. : *Trends in Biotechnology*, **4** (July), 186 (1986)
3. Matsunaga, T., Takeyama, H., Sudo, H., Oyama, N., Ariura, S., Tagano, H., Hirano, M., Burgess, J. G., Sode, K., Nakamura, N. : *Appl. Biochem. Biotechnol.* **28/29**, 157 (1991)
4.Tagano, H., Takeyama, H., Nakamura, N., Sode, K., Burgess, J.G., Manabe, E., Hirano, M., Matsunaga, T. : *Appl. Biochem. Biotechnol.* **34/35**, 449 (1992)