

Anti-biofouling 광생물반응기를 이용한 미세조류 배양 연구

나인욱^{1*}, 서민호², 안수한³, 황경엽¹

Culture of Microalgae using Anti-biofouling Photobioreactor

In Wook Nah^{1*}, Min-ho Suh², Soohan Ahn³, and Kyung-Yub Hwang¹

접수: 2011년 11월 27일 / 게재승인: 2011년 12월 16일
© 2011 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: In this study, we carried out the development of high performance photobioreactor, which can be used to develop the biological CO₂ fixation technology as well as the renewable biofuels, the microalgae *Botryococcus braunii*. When *B. Braunii* was cultured in Anti-biofouling photobioreactor, growth rate of it showed about 3 times higher than that of bubble column photobioreactor at the same conditions. In case of photobioreactor without bead, after 3 days culture time, biofouling occur rapidly in wall of the photobioreactor. However, with bead 5% (V/V), biofouling do not occur all experimental days.

Keywords: Anti-biofouling photobioreactor, CO₂ fixation, Microalgae growth rate

1. 서론

현재 전세계적으로 지구온난화의 주원인으로 지적받고 있는 CO₂를 처리하기 위한 다양한 기술들이 개발되고 있다. 특히 자연계의 탄소순환 메카니즘을 이용하는 것으로써 가장 환경 친화적인 방법으로 평가되는 생물학적 CO₂ 고정화기술의

경우 낮은 초기투자비, 상온 상압 조업에 따른 저렴한 운전비 등의 경제성 면에서 큰 장점을 지니고 있기 때문에 미세조류와 관련된 폭넓은 연구가 수행되고 있다 [1]. 모든 바이오매스는 태양광을 에너지원으로 CO₂를 광합성하여 생체의 활성을 유지하는데 필요한 유기물을 얻는다. 그러나 바이오매스에 의한 CO₂ 고정화는 그 속도가 대단히 낮다. 바이오매스 종류에 따라 CO₂ 고정화속도는 차이가 있으며 미세조류가 가장 높은 CO₂ 고정화 속도를 갖는다고 알려져 있다 [1]. 그러나, 이러한 미세조류를 이용한 CO₂ 고정화 공정을 100 MW 화력 발전소에 적용한 경우에 필요한 부지 면적은 약 100 km²으로 우리 나라 발전소에서 배출되는 CO₂를 고정화하는 장치를 설치하는데 필요한 면적은 약 13,000 km²으로 우리 나라 전체 면적의 약 1/30으로 실제 적용이 불가능하다. 따라서 우리나라와 사정이 비슷한 일본, 이탈리아 등에서는 단위 면적당 CO₂ 고정화 속도가 월등히 높은 관형, 광섬유 반응기 등의 개발에 대한 연구를 수행중이다.

관형 반응기는 이미 상용화된 기술인 노지형 반응기에 비해 CO₂ 고정화 속도가 2배 높았으며 광섬유 반응기는 관형 반응기에 비해 2배 높은 CO₂ 고정화 속도를 나타낸다고 보고되어 있다 [2]. 광섬유 반응기의 경우 초기 투자비용이 높아 산업체 배출 CO₂ 고정화와 같은 대형 공정에는 적용이 어렵다. 따라서 관형 반응기를 사용하여 CO₂를 고정화하는 공정에 대해 많은 연구가 진행되고 있다. 생물학적 CO₂ 고정화 공정의 실용화를 위한 목적은 동일하지만 방법론은 각 연구자들에 따라 다르다. 즉 일부 연구자들은 옥외 공정의 개발 시 태양 빛의 활용율을 높이기 위한 연구를 수행한 반면, 다른 연구팀은 단위 면적당 CO₂ 고정화 속도를 높이기 위한 연구를 수행하였다 [3]. 관형 반응기의 기하학적 형태에 따라 단위면적당 CO₂ 고정화 속도는 달라지게 된다. 이외에도 관형 반응기에서는 생산성을 높이기 위해 고농도 균체 배양이 보편적으로 이루어지고 있다. 따라서 빛의 고갈현상이

¹한국과학기술연구원

Korea Institute of Science and Technology, Hwarangno 14-gil 5, Seongbuk-gu, Seoul 136-791, Korea
Tel: +82-2-958-5828, Fax: +82-2-958-6419
e-mail: niw@kist.re.kr

²한국과학기술정보연구원

Korea Institute of Science and Technology Information

³서울시립대학교 통계학과

University of Seoul, Dept of Statistics

나타나 이를 줄이는 방안에 대한 연구도 필요한 실정이다.

본 연구에서는 높은 광효율 및 생산성을 갖은 광반응기를 개발하기 위하여 미세조류의 반응기 벽면부착 (Biofouling) 현상을 방지하고 미세조류의 원활한 혼합을 위해 Anti-biofouling 광생물반응기를 설계 제작하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. Anti-biofouling 광생물반응기에서 CO₂ 고정화 실험

본 실험을 위하여 60 L 용량의 광생물반응기를 제작하였다. 본 반응기의 재질은 아크릴이었으며 폭과 높이가 각각 약 1 m이고 두께는 미세조류가 최대농도로 성장하였을 때 까지 빛이 공급되는 크기로 하였다. CO₂가스의 공급은 반응기의 하부에서 직접 반응기 내부로 투입되도록 하였으며 배양액의 순환을 위하여 1/2마력의 원심펌프를 사용하였다. 미세조류의 성장조건을 적절히 유지하기 위하여 pH 및 순환 시간을 측정 제어하였으며 OD (Optical density)의 변화를 추적하였다.

광원은 형광등을 사용하였고 반응기에 조사되는 빛의 세기는 100 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 로 조절하였다. 공급되는 CO₂ 농도는 CO₂와 공기를 혼합, 각각 기체 유량계를 사용하여 CO₂ 1%로 조절한 후 기체 혼합 장치를 통과시켜 균일하게 섞이도록 하였다. 그 후 0.45 μm 필터를 통해 반응기에 공급하였다. 배지는 Chu 13 (KNO₃ 371 mg/L, K₂HPO₄ 80 mg/L, MgSO₄ · 7H₂O 200 mg/L, CaCl₂ · 2H₂O 107 mg/L, Fe-citrate 100 mg/L, Citric Acid 20 mg/L, microelement 1 mL/L), 반응기 온도는 25°C로 유지하였고 공급가스 량은 0.15 vvm으로 조절하였다. 구의 재질과 형상은 여러 가지 물성을 고려하여 선정하였으며 이의 혼합비와 Biofouling 제거효율과의 관계를 알아보기 위하여 혼합비를 각각 5, 10, 15, 20% (V/V)로 조정하였다. 구의 순환을 위해서 1시간 중 10분간 간헐적으로 순환되도록 펌프에 타이머를 연결하였으며, pH는 기존 문헌의 배양조건에 따라 7.5~8.0이 되도록 조절하였다 [1]. 또한, 구를 사용하지 않은 경우에 대하여도 실험을 수행하였다. Anti-biofouling photobioreactor와 기존의 Bubble column photobioreactor의 미세조류 성장 속도를 비교하기 위하여 20 L 용량의 Bubble column 광생물반응기를 사용하였다. Bubble column 광생물반응기 밑에는 magnetic stirrer를 설치하여 항상 혼합하여 주었으며, 반응기에 조사되는 빛의 세기는 100 $\mu\text{E}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 배지, 표면적/체적비, 기체 유량과 CO₂ 농도도 Anti-biofouling photobioreactor와 동일한 조건으로 실험하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Anti-biofouling 광생물반응기 운전 설계

구 (bead)가 광반응기내에서 순환유동하기 위해서는 구 (bead)의 물중에서의 종말속도 (terminal velocity) 보다 펌프의 유량이 크면 구는 반응기내에서 계속 순환하게 된다.

3.1.1. 종말속도 (terminal velocity) [4]

중력 침강 (沈降) 에서는 g가 일정하다. 또 항력은 언제나 속도에 따라 증가한다. 식 (1)은 가속도가 시간 경과에 따라 줄어들다가 0에 접근함을 나타낸다. 입자는 곧 일정속도에 이르게 되는데, 주어진 상황에서 얻을 수 있는 최대값을 종말속도 (終末速度)라 한다. 중력 침강인 경우, 종말속도 u_t 에 관한 식은 $du/dt = 0$ 으로 놓음으로써 구해진다. 따라서, 식 (1)에서 다음과 같이 된다.

$$\frac{du}{dt} = g \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m} \quad (1)$$

$$u_t = \sqrt{\frac{2g(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}} \quad (2)$$

원심력에 의한 운동에서는 속도가 반지름에 의존되며, 입자가 유체에 대하여 운동하고 있다면 가속도가 일정하지 않다. 그러나, 실제적으로는 du/dt 가 식 (1)에 다른 두 항에 비하여 적어서 무시할 수 있는 경우가 많다. 따라서, 반지름이 주어졌을 때의 종말속도를 다음 식으로 정의할 수 있다.

$$\frac{du}{dt} = \gamma \omega^2 \frac{\rho_p - \rho}{\rho_p} - \frac{C_D u^2 \rho A_p}{2m} \quad (3)$$

$$u_t = \omega \sqrt{\frac{2r(\rho_p - \rho)m}{A_p \rho_p C_D \rho}} \quad (4)$$

3.1.2. 구형 입자의 운동 [4]

입자의 지름 D_p 인 구이면, 다음과 같이 된다.

$$m = \frac{\pi D_p^3 \rho_p}{6} \quad (5)$$

$$A_p = \frac{\pi D_p^2}{4} \quad (6)$$

식 (5) 및 식 (6) 중의 m 과 A_p 를 식 (2)에 대입하면, 구의 중력 침강에 대한 식이 된다.

$$u_t = \sqrt{\frac{4g(\rho_p - \rho)D_p}{3C_D \rho}} \quad (7)$$

일반적으로, 이 종말속도는 시행착오법으로 구하는데, 이 때 C_D 의 초기값을 정하기 위하여 $N_{RE, \rho}$ 를 가정한다. Reynolds 수가 아주 작거나 아주 큰 극단적 경우에는, 이 식에서 직접 u_t 를 구할 수 있다.

Reynolds수가 작으면 항력계수가 $N_{RE, \rho}$ 에 역비례하며, C_D , F_D , u_t 에 관한 식은 다음과 같다.

$$C_D = \frac{24}{N_{Re, \rho}} \quad (8)$$

$$F = \frac{3\pi\mu u_t D_p}{g_c} \tag{9}$$

$$u_t = \frac{gD_p^2(\rho_p - \rho)}{18\mu} \tag{10}$$

식 (10)은 Stokes법칙으로 알려진 것인데, Reynolds수가 1.0 이하인 입자에 적용된다. $N_{RE, \rho} = 1.0$ 이면 $C_D = 24.0$ 이 아니라 26.5이며, 종말속도는 항력계수의 제곱근에 비례하므로, Stokes 법칙은 이 점에서 약 5%의 오차가 있다. 식 (10)에 g 대신에 2을 대입하여 수정함으로써, 원심력장치에 있는 작은 입자의 속도를 추정할 수 있다.

$1,000 < N_{RE, \rho} < 200,000$ 이면 항력계수는 거의 일정하며, 다음 식들이 된다.

$$C_D = 0.44 \tag{11}$$

$$F_D = \frac{0.055\pi D_p^2 u_t^2 \rho}{g_c} \tag{12}$$

$$u_t = 1.75 \sqrt{\frac{gD_p(\rho_p - \rho)}{\rho}} \tag{13}$$

식 (13)은 Newton 법칙으로, 기체나 점도가 낮은 유체 중에서 낙하하는 제법 큰 입자에만 적용된다.

윗 식에 대입하면 구 (bead)의 종말속도는 23.2 cm/s이며, 물의 흐름을 수직 위방향으로 이 속도이상의 용량을 가진 펌프를 사용해야 할 것으로 판단된다.

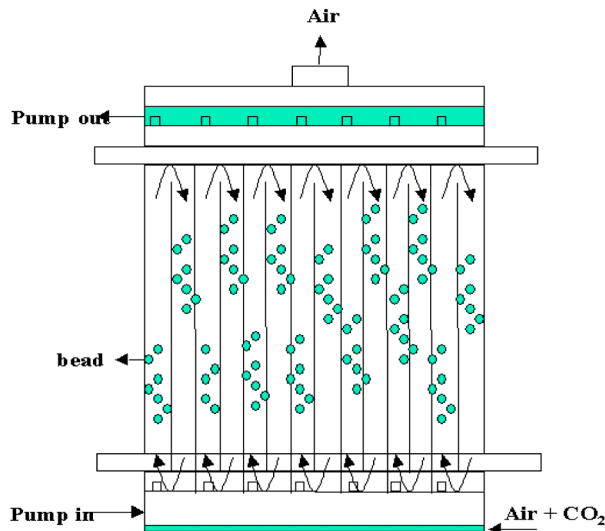


Fig. 1. Schematic Diagram of Anti-biofouling photobioreactor.

3.2. 광반응기 효율

재질이 아크릴 등 합성고분자일 경우 벽면 부착문제는 선속도만으로는 해결하기 어려운 것으로 확인되었다. 한편, 유리는 광투과성이 좋고 벽면부착성이 적은 반면, 실제 scale-up하는 과정에서는 재료비 및 강도, 그리고 가공성 등의 문제로 인해 광생물반응기의 재료로 유리를 재료로 사용하는 것에

많은 제한적 요소가 있는 것으로 판단되었다. Anti-Fouling 형태의 scale-up한 광생물반응기를 개발하였다. Fig. 2(a)는 구 (bead)의 수에 따라 광생물반응기 벽에 생기는 Biofouling의 영향을 나타낸 사진이다. 배양 후 3일 정도부터 조금씩 벽면에 붙기 시작하여 5일이 지난 후에는 사진처럼 급속도로 붙어 자란 모습을 볼 수 있었다. 그러나, 구 (bead)의 양이 5, 10, 15, 20% (V/V)에는 관계없이 scale이 제거됨을 볼 수 있었다. Fig. 2(b)는 Anti-biofouling 광생물반응기에서 미세조류 배양 후 초기, 3일, 5일 후의 모습을 나타내었는데 미세조류의 농도가 점차 높아짐을 알 수 있다.

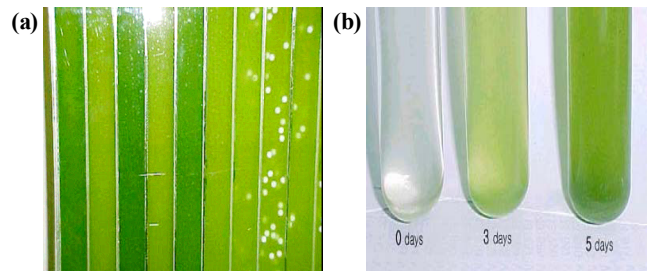


Fig. 2. (a) 구 (bead) 유무에 따른 Anti-biofouling photobioreactor 벽 모습, (b) Bubble column photobioreactor.

Fig. 3은 Anti-biofouling 광생물반응기와 기존의 Bubble column 광생물반응기와의 미세조류 성장 속도를 비교하였다. Bubble column 광생물반응기의 경우 실험에서 나타난 성장속도계수는 $3.05 \times 10^{-3} \text{ hr}^{-1}$ (Monod식 이용)로 측정되었으며, Anti-biofouling 광생물반응기는 $7.16 \times 10^{-3} \text{ hr}^{-1}$ 로 Bubble column 광생물반응기에 비해 2~3배가량 높은 속도를 나타내었다.

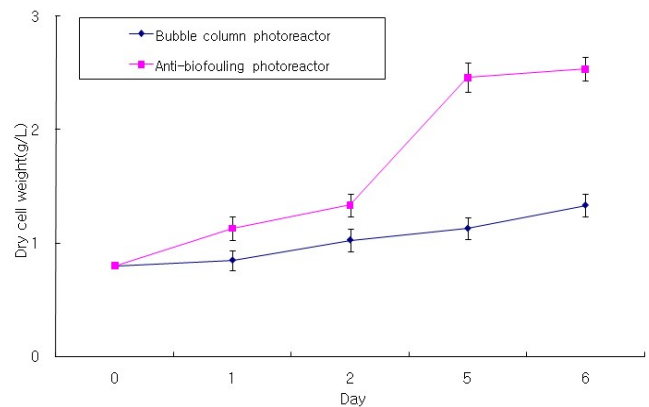


Fig. 3. Comparison of growth rate between Anti-biofouling photobioreactor and Bubble column photobioreactor.

4. 결론

본 연구에서는 Anti-biofouling 광생물반응기를 설계 제작하여 미세 조류 (Botryococcus Braunii)를 배양하여 fouling 제거 효과 및 성장 속도를 Bubble column 광생물반응기와 비교하였다. 구 (bead)가 없는 Anti-biofouling 광생물반응기

에서는 미세 조류 배양 후 3일부터 광반응기 벽면에 fouling 이 생성되기 시작하여 5일후에는 광투과가 어려울 정도가 되었다. 구 (bead)의 양은 5% (V/V)이상 반응기에 주입되었을 때는 반응기 벽면에 전혀 fouling이 생기지 않았다. 동일한 조건에서 Anti-biofouling 광생물반응기와 Bubble column 광생물반응기의 미세 조류 성장 속도계수 비교 결과, Anti-biofouling 광생물반응기가 2~3배 높은 속도를 나타내었다. 이러한 결과를 통해 향후 고부가가치 미세조류에도 활용하여 CO₂ 저감 및 생물제품화에 기여할 수 있을 것으로 기대된다.

References

1. KRIBB Report (1998) Development of hydrocarbon production technology using microalgae.
2. Ogbonna, J. C., H. Yada, and H. Tanaka (1995) Light supply coefficient: A new engineering parameter for photobioreactor design. *J. Fermt. Bioeng.* 80: 369-376.
3. Ogbonna J. C. and H. Tanaka (1997) Industrial-size photobioreactors. *CHEMTECH*. July: 43-49.
4. McCabe (1992) *Unit Operation of Chemical Engineering* 4th, 121-123.