

생물학적 CO₂ 고정화를 위한 스케일-업된 광생물반응기에서 *Chlorella* sp. HA-1의 성장에 미치는 빛의 영향

이재영 · 권태순 · 김호정 · † 양지원
한국과학기술원 생명화학공학과 환경복원연구실
(접수 : 2003. 7. 26. 게재승인 : 2003. 8. 27.)

Effect of Light on Growth of *Chlorella* sp. HA-1 in Large-scale Photobioreactors for Biological CO₂ Fixation

Jae-Young Lee, Tae-Soon Kwon, Ho-Jeong Kim, and Ji-Won Yang†
National Research Laboratory for Environmental Remediation
Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea
(Received : 2003. 7. 26. Accepted : 2003. 8. 27.)

Feasibility of large-scale photobioreactors for biological CO₂ fixation was investigated using *Chlorella* sp. HA-1. Generally, as the volume of photobioreactor increased, the CO₂ fixation rate decreased because of a lower illumination efficiency in large-scale than in small-scale photobioreactors. Though controlling the arrangement and the number of light source, the maximum CO₂ fixation rates that could be achieved were 530 and 357 gCO₂/m²day for 40 L and 188 L photobioreactor, respectively, which was higher than the CO₂ fixation rate of lab-scale photobioreactor.

Key Words : Large-scale photobioreactor, light, *Chlorella*, CO₂ fixation

서론

지구 온난화 현상의 주원인인 이산화탄소를 제거하기 위한 대표적인 방법으로 생물학적 이산화탄소 고정화 공정 (biological CO₂ fixation)에 대한 연구들이 활발하게 이루어지고 있다(1). 특히 광생물 반응기 (photobioreactor)의 개발과 운전에 관한 연구들은 미세조류의 배양을 통해 이산화탄소 고정화 효율을 향상시킬 뿐만 아니라 생물학적 이산화탄소 공정의 pilot 규모의 적용을 위해서도 필수적이다(2). 현재까지 개발된 광생물 반응기의 대부분은 관형 반응기 (tubular photobioreactor) 형태의 광생물 반응기로 구조가 간단하며 스케일-업이 용이한 장점을 가지고 있어 그 응용 및 변형에 관해 많은 연구자들이 관심을 가지고 있다(1-3). Watanabe 등(4)에 의해 개발된 helical 광생물 반응기에서는 *Spirulina platensis*를 이용하여 30.2 g/m²-day의 이산화탄소 고정화 수율을 얻었다. 또한 Mori 등(5)에 의해 제안되어진 광섬유

(optical fiber)를 이용한 광생물 반응기의 경우에는 조류의 성장에 영향을 미치는 주요인자인 빛을 광섬유를 통해 반응기 내부로 조사시켜 미세조류의 빛에너지 이용 효율을 높였다. 그 결과, 다른 광생물 반응기들에 비해 높은 이산화탄소 고정화 효율을 얻을 수 있었다. 그러나 이러한 광생물 반응기의 경우 고가의 광섬유와 부대시설로 인한 초기 투자비가 지나치게 높아 실제 산업 현장에 적용하는 데는 한계를 가지고 있다(5, 6). 그래서 최근에는 Ogbonna 등(7, 8)이 인공적인 광과 자연적인 광을 모두 사용하여 광에너지 이용 효율을 최대한으로 하면서 비용을 낮출 수 있는 내부조사형 광생물 반응기를 설계하여 다양한 운전 인자를 최적화하는 연구를 통해 이산화탄소 고정화 효율을 향상시켰다.

그러나 대부분의 광생물반응기에 관한 연구들이 실험실 규모 (laboratory scale)에서의 적용에만 그치고 있으며, 특히 pilot 규모에 대한 연구는 극히 미비하다. Richmond 등(9)은 pilot 규모의 광생물 반응기에서 *Nannochloropsis* sp.의 생산성을 향상시키기 위해 200 L과 500 L flat plate glass reactor를 이용하여 빛 조사 면적을 조절함으로써 240 mg/L-day의 균체 생산성을 얻었다. 그러나 이는 극히 일부의 경우이며, 대부분 광생물 반응기를 스케일-업할 때, 미세조류의 성장에 필요한 빛에너지를 효율적으로 공급할 수 있는 빛 조사 면적을 최적화하는 것이 가장 어려운 문제이다(10). 실제로 일부

† Corresponding Author : Department of Chemical and Biomolecular Engineering, KAIST, 373-1, Gusong-dong, Yusong-gu, Daejeon 305-701, Korea

Tel : +82-42-869-3964, Fax : +82-42-869-3910

E-mail : jwyang@kaist.ac.kr

광생물 반응기의 경우 실험실 규모에서는 높은 균체성장속도를 보이다가 반응기를 스케일-업했을 때, 단위부피당 빛 조사면적의 감소로 인해 반응기 내부에 공급되는 빛 조사 효율이 저하되어 결국 미세조류의 성장이 감소하였다. Sung 등(11)은 *Chlorella* HA-1을 이용한 기포탑 반응기에서 이산화탄소를 고정화하는 실험을 통해 광생물 반응기의 직경이 커짐에 따라 단위면적당 이산화탄소 고정화량이 감소한다고 보고한 바 있다. 그래서 최근에는 광생물 반응기에 효율적으로 빛을 공급하기 위한 광생물 반응기의 모델링에 관한 연구들이 보고되고 있다(12-15).

Vernerey 등(12)은 광생물 반응기의 스케일-업에서 외부광원, 내부광원, 균체성장과의 관계를 정량화하기 위해 7 L의 airlift 반응기를 10배 스케일-업하여 수학적 모델을 증명하였다. 그러나 미세조류의 self-shading effect 때문에 미세조류의 성장 거동을 정확하게 예측하기 어렵다. 또한 개발된 모델을 통해 예측한 결과와 실제 공정의 운전을 통해 얻은 결과를 비교 검증하는 단계도 필요하다. 그러나 실제 pilot 규모의 광생물 반응기를 이용한 미세조류의 이산화탄소 고정화에 관한 연구들이 보고된 바가 거의 없기 때문에 이 또한 어려운 현실이다. 따라서 본 연구에서는 기존에 개발된 3 L 광생물 반응기를 bench 규모의 40 L 반응기와 pilot 규모의 188 L 반응기로 스케일-업 하여 광원의 개수 및 배열이 *Chlorella* sp. HA-1의 이산화탄소 고정화 특성에 미치는 영향을 살펴보고자 하였다.

재료 및 방법

균주 및 배지

본 연구에서 이산화탄소를 고정화하기 위해 사용된 미세조류는 *Chlorella* sp. HA-1로 한국에너지기술연구소 (KIER, Korea)로부터 분양받았다. 사용된 배지는 M4N 배지이고, 그 조성은 3차 증류수 1 L에 KNO₃ 5.0 g, KH₂PO₄ 1.25 g, MgSO₄ · 7H₂O 2.5 g, FeSO₄ · 7H₂O 3 mg, trace metal (H₃BO₃ 2.86 mg, MnSO₄ · 7H₂O 2.5 mg, ZnSO₄ · 7H₂O 0.22 mg, CuSO₄ · 5H₂O 0.08 mg, Na₂MoO₄ 0.021 mg)이었다(16). 배지는 121 °C에서 15분간 멸균시켰다. 실험에 사용된 미세조류는 10 L cowboy 반응기에서 10% (vol/vol, CO₂/Air) 농도의 이산화탄소를 1 vvm (vol/vol · min)으로 공급하면서 계대 배양하여 고농도 이산화탄소에 적응시켰다.

광생물반응기

Lee 등(1)이 발표한 논문에서 사용된 실험실 규모의 3 L 내부조사형 광생물 반응기 (운전 용량 : 2 L)의 형태는 길이가 55 cm이고 직경이 9 cm인 관형반응기로 아크릴로 제작되었다. 반응기의 중심부에 내부광원을 공급하기 위하여 직경 3 cm의 glass tube 1개를 삽입하였다(Fig.1, 2(a)). 사용된 광원은 18 W slim light (Korea, Kumho)였으며, 반응기 내부 온도를 조절하기 위해 외부에 water jacket을 설치하였으며, 이산화탄소의 고른 분포를 위해 반응기 하단에 산기석 (Korea)을 설치하였다. 가스 공급 속도는 1 vvm이었으며, 이산화탄소의 농도는 10%를 사용하였다. Bench 규모의 40 L

반응기와 pilot 규모의 188 L 반응기도 3 L 반응기의 기본 형태를 유지하면서 설계, 제작하였다. Bench 규모의 40 L 반응기의 크기는 직경 20 cm이고 길이는 1.2 m (운전 용량 : 30 L)였다. 반응기 내부에 공급되는 광도는 광원의 개수와 위치를 조절함으로써 최적의 광원 공급방식을 찾고자 하였다. 이에 Fig.1(b)과 같은 형태로 반응기내부에 glass tube를 각각 1개, 2개, 3개로 삽입하여 내부 광원의 개수를 조절함에 따른 광원의 영향을 살펴보았다.

또한 반응기 외부에 균일한 간격으로 4개의 circle lamp (Korea, Kumho)를 설치하여 반응기 내부에 공급되는 광량을 보조하였다(Fig. 2(b)). 반응기의 하단에는 3 L 반응기에서와 동일한 형태의 산기석을 설치하여 10 % 농도의 이산화탄소를 0.3 vvm의 속도로 공급하였다. 3 L 반응기에서와 달리 가스공급속도를 낮게 사용한 이유는 1 vvm을 사용하였을 경우 overflow 현상이 관찰되었기 때문이다. Pilot 규모의 188 L 반응기는 직경 40 cm, 길이 1.5 m 크기 (운전용량 : 150 L)의 관형반응기로서 광원간의 거리를 적절하게 유지하면서 최대한으로 glass tube를 삽입하기 위해 Fig. 1(c)와 같은 형태로 glass tube를 반응기 내부에 삽입하였다. 외부광원은 따로 설치 없이 자연광원을 그대로 사용하였으며, 공급되는 이산화탄소 농도와 유량 및 공급방식, 사용된 광원은 40 L 반응기와 동일하였다(Fig. 2(c)). 40 L와 188 L의 반응기의 경우에는 따로 외부에 water jacket을 설치하지 않았으며, 온도조절이 필요한 경우 내부에 heat exchanger를 설치하였으나 대부분의 실험은 별도의 온도 조절을 하지 않았다.

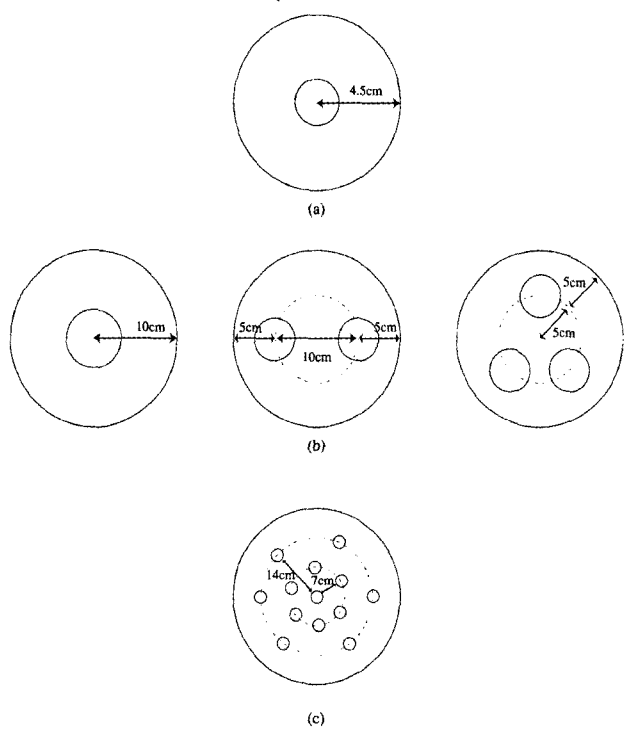
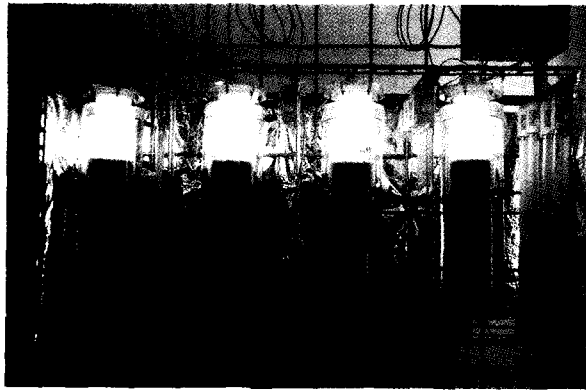
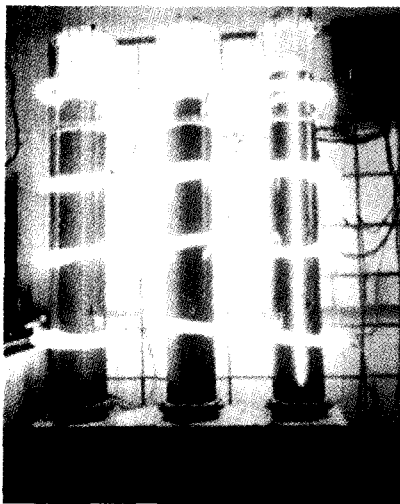


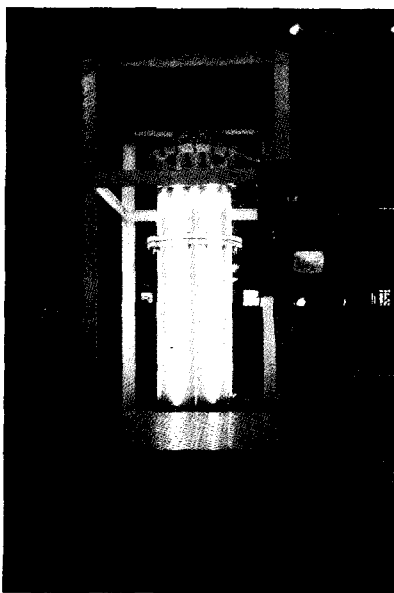
Figure 1. Configuration of light sources in 3 L reactors (a), 40 L reactors (b), and 188 L reactors (c).



(a)



(b)



(c)

Figure 2. General views of the 3 L reactors (a), 40 L reactors (b), and 188 L reactors (c).

분석방법

미세조류 농도는 UV spectrophotometer (8562A, Hewlett Packard, USA)를 사용하여 660 nm에서 측정하였다. 균체 건조량과 흡광도의 관계를 알기 위해서 균체 건조량은 50 mL의 배양액을 0.45 μm 의 membrane filter로 여과한 후 80°C에서 24시간 건조한 후 무게차로 결정하였다. 그 결과, 균체 건조량 = 0.1705 \times 흡광도 (상관계수=0.99)의 관계를 얻었다. *Chlorella* sp. HA-1에 의해 소비된 이산화탄소량은 외부에서 이산화탄소 외에 다른 탄소원을 공급하지 않기 때문에 균체의 C, H, O, N의 원소성분을 분석하여 간접적으로 계산하였다. *Chlorella* sp. HA-1의 원소분석은 한국화학연구소에 의뢰하였으며, 원소분석기 (CE EA-11 10 Elemental Analyzer)가 사용되었다. 그 결과 10 % 이산화탄소 농도에서 배양된 *Chlorella* sp. HA-1의 C, H, O, N의 구성비는 각각 43.6 %, 6.9 %, 4.1 %, 32.0 %였으며, 분자식은 $\text{CH}_{1.9}\text{N}_{0.08}\text{O}_{0.55}$ 이었다. 이 때 배양된 1g의 균체에 대하여 수율계수, $Y_{x/\text{Carbon}}$ 는

$$Y_{x/\text{Carbon}} = \frac{1 \text{ g cell}}{0.436 \text{ g Carbon}} = 2.293 \text{ g cell/g Carbon} \quad (1)$$

이며, 이산화탄소에 대해서는

$$Y_{x/\text{CO}_2} = \frac{1 \text{ g cell}}{0.436 \text{ g Carbon} \frac{44 \text{ g CO}_2}{12 \text{ g Carbon}}} = \frac{1 \text{ g cell}}{1.60 \text{ g CO}_2} \quad (2)$$

이다. 따라서 균체 성장량과 소비된 이산화탄소의 비는 1 : 1.6의 관계를 가졌다.

결과 및 고찰

40 L 광생물 반응기 : 외부 광원이 존재하지 않을 때 내부 광원 개수가 미세조류의 성장에 미치는 영향

생물학적 이산화탄소 고정화 공정을 스케일-업할 때 균체 성장 속도가 떨어지면서 이산화탄소의 고정화 양이 감소하는 가장 주된 이유는 lab 규모의 반응기와 동일한 광량을 공급하기 어렵기 때문인 것으로 보고되고 있다(10). 본 연구에서 이용되는 내부조사형 광생물 반응기의 경우, 반응기 내부에서 광원의 개수를 적절하게 조절할 수 있기 때문에 앞에서 언급한 문제를 해결할 수 있다. 그러나 광생물 반응기 내부에 배치할 수 있는 광원의 개수는 제한적이므로 최적의 광원 개수와 배치를 결정하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 bench 규모의 40 L 광생물 반응기 내부에 공급되는 광원의 개수를 각각 1개, 2개, 3개로 증가시키면서 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도를 살펴보았다. 우선 3 L 반응기와 동일하게 반응기 내부에서 1개의 광원으로 빛을 공급하였을 때, *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도는 0.041 g/L-day이었다(Fig. 3). Lee 등(1)에 의해 발표된 논문에서 3 L 반응기의 최대 균체 성장 속도는 0.413 g/L-day로, 이와 비교할 때 반응기를 스케일-업한 용량에 비례하여 균체 성장 속도가 감소하였다. 반면에 반응기 내부의 광원을 각각 2개, 3개로 증가시켰을 때, 균체성장속도는 각각 0.123, 0.227 g/L-day로 증가하였다. 결과적으로 반응기 내부의 광원의 개수가 증가함에 따라

Chlorella sp. HA-1의 성장 속도가 향상되었다. 그러나 반응기 내부의 광원의 개수를 3개로 증가시키더라도 3 L 반응기에서의 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도와 비교하여 45 % 정도가 감소하였다. 반면 40 L 광생물 반응기에서 최대 총 CO₂ 고정화 양은 7.264 g CO₂/day로 3 L 반응기에서의 1.322 g CO₂/day에 비해 향상되었다. 그러나 광생물 반응기의 스케일-업된 용량에 비례하여 이산화탄소 고정화량을 증가시키기 위해서는 반응기에 공급되는 광량을 더 증가시켜야 한다.

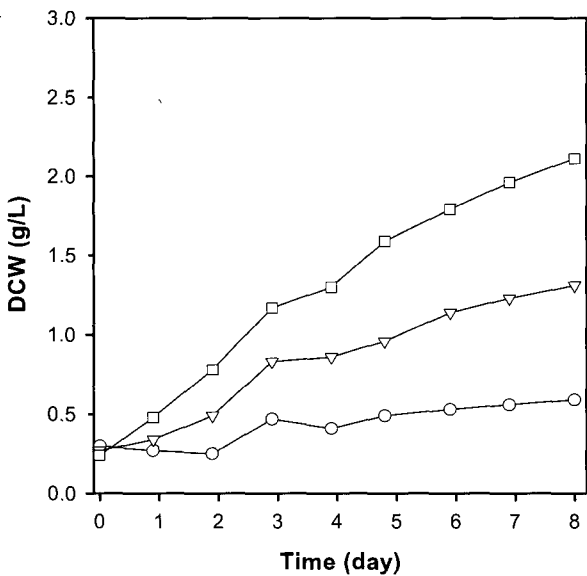


Figure 3. Cell growth curves of *Chlorella* sp. HA-1 with different number of inner light sources in 40 L photobioreactors at the absence of outer light sources. ○ : 1, ▽ : 2, and □ : 3

40 L 광생물 반응기 : 외부 광원이 존재할 때 내부 광원 개수가 미세조류의 성장에 미치는 영향

40 L 반응기에서 단순히 내부 광원의 개수만을 증가시켜서는 lab 규모의 반응기에서의 *Chlorella* sp. HA-1 성장 속도와 동일한 값을 얻을 수 없었다. 본 연구에서는 40 L 반응기 외부에 광원을 설치하여 반응기에 공급되는 광량을 증가시켰다. 그 결과 Fig. 4에서 볼 수 있듯이, *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도는 내부 광원의 개수를 1개, 2개, 3개로 증가시켰을 때 각각 0.204, 0.306, 0.347 g/L-day이었다. 외부 광원이 존재함으로써 각각의 반응기 내부 광원의 개수에 따른 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도가 전체적으로 증가한 것을 알 수 있다. 그러나 외부 광원이 균체의 성장 속도에 미치는 영향은 내부 광원의 개수가 작을수록 컸다. 내부 광원의 개수가 1개인 경우 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도가 5배 이상 증가한 반면, 내부 광원의 개수가 3개인 경우 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도는 1.5배 정도 증가하였다. 이는 내부 광원이 1개인 경우 균체의 성장에 필요한 광량이 매우 부족하기 때문에 광량의 증가에 따라 균체성장속도의 차이가 크게 나타나는 것으로 추정된다. 결과적으로 외부 광원이 존재하면서 내부 광원이 3개인 경우, 3 L

반응기에서 얻은 *Chlorella* sp. HA-1의 성장 속도와 비슷한 결과를 보였다. 그 결과, 40 L 광생물반응기에서 총 CO₂ 고정화양도 10배 이상 증가하였다. 결국 광생물반응기를 스케일-업할 때 lab 규모의 반응기에서의 균체성장속도를 유지하기 위해서는 공급되는 광량을 어느 정도 조절하는냐가 가장 중요한 인자라는 것을 확인하였다.

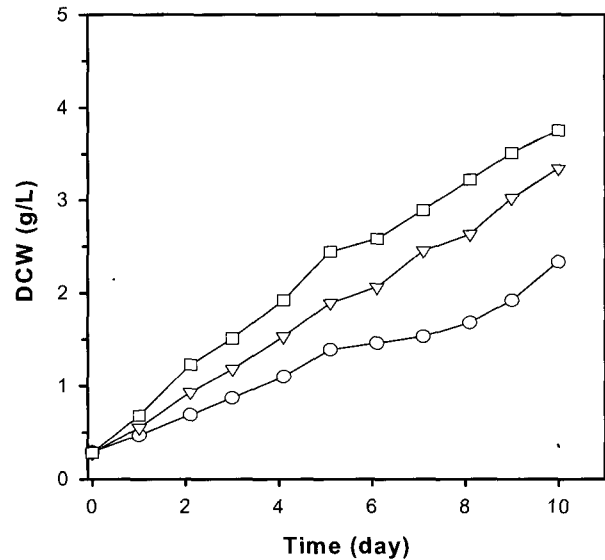


Figure 4. Cell growth curves of *Chlorella* sp. HA-1 with different number of inner light sources in 40 L photobioreactors at the presence of outer light sources. ○ : 1, ▽ : 2, and □ : 3

188 L 광생물 반응기 : 광원의 배치 및 개수가 조류의 성장에 미치는 영향

Ogbonna 등(7, 8)은 내부조사형 광생물 반응기의 스케일-업시 한 개의 광원이 최대로 영향을 미치는 반경을 고려해 다른 광원을 배치하는 것이 광원의 개수를 최소화하면서 균체성장속도를 향상시킬 수 있다고 보고하였다. 따라서 본 연구에서는 pilot 규모의 188 L 반응기 내부에 광원을 최대 배치할 수 있도록 광원 사이의 간격과 위치를 고려하여 13개의 광원을 이중 육각형 모양으로 설치하여 광원의 개수가 늘어남에 따라 광원의 간격 및 개수에 따른 영향을 모두 고려하였다. 그 결과 광원의 간격에 따른 영향을 먼저 살펴보면, Fig. 1(c)에서 보듯이 중심광원에서 다음 광원간의 거리가 7 cm 경우와 14 cm인 경우에 모두 7개의 광원을 사용하였을 때 균체성장속도는 각각 0.116 g/L-day, 0.120 g/L-day 로 크게 차이가 나지 않았다(Fig. 4). 이는 하나의 광원이 영향을 주는 거리를 14 cm 간격을 유지해도 충분하다는 것을 알 수 있다. 그러나 Fig. 5에서 13개의 광원을 모두 사용한 경우의 균체성장속도가 0.187 g/L-day임을 볼 수 있듯이 188 L 반응기에서 얻을 수 있는 최대 균체성장속도는 3 L와 40 L 반응기의 운전을 통해 얻은 균체성장속도에 비해 매우 낮은 값이다. 이는 pilot 규모의 반응기를 운전함에 있어서 반응기 내부에 위치한

광원의 광원간 거리보다는 광량 즉 광원의 개수가 균체의 성장에 더 큰 영향을 미친다는 것을 보여준다. 결국 현재 188 L 반응기에서 최대로 공급할 수 있는 광원만으로는 *Chlorella* sp. HA-1의 성장에 필요한 충분한 광량을 공급하기 어려우며, 스케일-업된 반응기에서 미세조류의 성장 효율을 lab 규모의 반응기에서와 비슷하게 유지하기 위해서는 반응기 외부에서 광원의 공급이 더 필요하다는 것을 확인하였다. 또한 광원 공급뿐만 아니라 이산화탄소의 물질 전달 속도에 영향을 미치는 운전 인자들에 대한 연구도 병행되어야 한다.

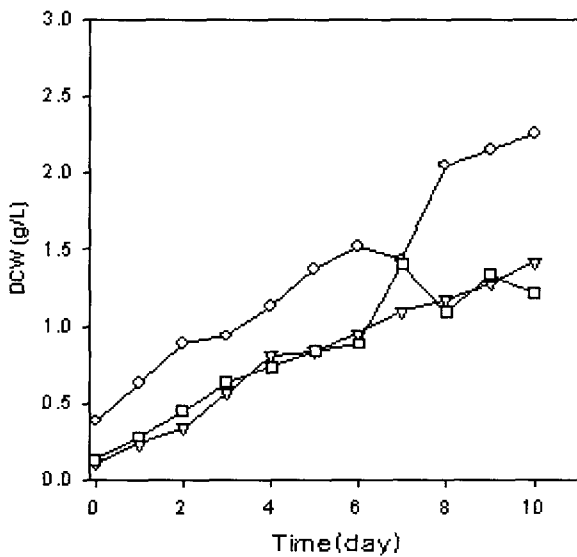


Figure 5. Cell growth curves of *Chlorella* sp. HA-1 with different number and position of inner light sources in 188 L photobioreactors. ○ : 13 total, ▽ : 7 center, and □ : 1 center & 6 outer

스케일-업에 의한 반응기 용량에 따른 효율 비교

Table 1은 광생물 반응기의 용량이 스케일-업 됨에 따라 최종 균체농도, 균체성장속도, 단위면적당 CO₂ 고정화 속도, 총 CO₂ 고정화량을 비교하였다. Lab 규모의 3 L 반응기에서 pilot 규모의 188 L 반응기로 용량이 커짐에 따라 최종균체농도와 균체성장속도는 감소하였다. 그러나 단위면적당 CO₂ 고정화량은 bench 규모의 40 L가 530 g CO₂/m²-day로 가장 높았으며, 총 CO₂ 고정화량은 188 L 반응기에서 28.05 g/L로 가장 많았다. 일반적으로 총 CO₂ 고정화량은 반응기의 스케일-업에 따라 반응기의 용량에 비례하여 증가하나, 188 L의 경우 균체성장속도가 너무 낮아 총 CO₂ 고정화량이 기대값에 비해 낮아졌다. 그러나 본 연

구를 통해 얻어진 대용량 광생물 반응기에서의 단위면적당 이산화탄소 고정화량은 다른 연구진들에 의해 보고된 수치들에 비해 매우 높은 값이다(11). 그리고 반응기 내부에 공급할 수 있는 광원의 한계를 고려하여 향후 스케일-업된 광생물 반응기의 운전에 있어서 광원 뿐만 아니라 이산화탄소의 공급 속도 및 bubbling에 의한 물질전달을 수력학적 모델로 개발함으로써 보다 향상된 CO₂ 고정화 속도를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

요 약

본 연구에서는 대량으로 배출되는 이산화탄소를 고정화하기 위해서 lab 규모의 3 L 광생물 반응기(1)를 bench 규모의 40 L와 pilot 규모의 188 L로 스케일-업 했을 때 이산화탄소의 고정화 특성을 살펴보았다. 균체성장속도 즉, CO₂ 고정화 속도는 광생물 반응기가 스케일-업 됨에 따라 감소하였으며, 단위면적당 CO₂ 고정화 양은 40 L 광생물 반응기에서 530 g CO₂/m²-day으로 가장 높았다. 반면, 총 CO₂ 고정화량은 반응기의 용량이 커짐에 따라 증가하였으며, 188 L 광생물 반응기에서 28.05 g CO₂/day를 얻었다. 광생물 반응기의 운전에 있어서 CO₂ 고정화속도의 향상은 단위면적당 CO₂ 고정화 양 및 총 CO₂ 고정화량을 증가시킨다. CO₂ 고정화속도에 영향을 미치는 운전인자 중에 가장 중요한 것은 광원으로 반응기의 스케일-업시 광원의 개수 및 배열을 조절함으로써 용량이 커짐에 따라 저감되는 CO₂ 고정화속도를 증가시킬 수 있었다. 또한 향후 스케일-업된 광생물 반응기에서의 물질전달 현상에 관한 연구를 동반함으로써 보다 높은 CO₂ 고정화속도를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

감 사

본 연구는 청정에너지기술개발사업 (과제번호 96C-CD02-P-01)의 일환으로 에너지관리공단과 라파즈 한라시멘트의 연구비 지원 및 과학기술부의 국가지정 연구실 사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Lee, J. Y., H. A. Kang, and J. W. Yang (1999), The characteristics of carbon dioxide fixation by *Chlorella* sp. HA-1 in semi-continuous operation, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 14(6), 742-746.

Table 1. Comparison of CO₂ fixation efficiencies in lab-scale (3 L), bench-scale (40 L), and pilot-scale (188 L) photobioreactors

반응기 용량	최대균체농도 g/L	균체성장속도 g/L-day ^{a)}	단위면적당 CO ₂ 고정화 속도 g CO ₂ /m ² -day ^{b)}	총 CO ₂ 고정화량 g CO ₂ /day	Reference
3 L	4.05	0.413	208	1.32	1
40 L	3.75	0.347	530	10.41	
188 L	2.25	0.187	357	28.05	

^{a)} 균체성장속도 = (최종균체농도-초기균체농도) / 시간
^{b)} 단위면적당 CO₂ 고정화속도 = 균체성장속도 × 1.6 × 운전부피 / 단위면적

2. Terry, K. L. and L. P. Raymond (1985), System design for autotrophic production of microalgae, *Enzyme Microb. Technol.* **7**, 474-487.
3. Tredici, M. R. Tredici, and G. C. Zittelli (1998), Efficiency of sunlight utilization: tubular versus flat photobioreactors, *Biotechnol. Bioeng.* **57**(2), 186-197.
4. Watanabe, Y. and D. O. Hall (1996), Photosynthetic production of the filamentous cyanobacterium *Spirulina platensis* in a cone-shaped helical tubular photobioreactor, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **44**, 693-698.
5. Mori, K. (1995), Photoautotrophic bioreactor using visible solar rays condensed by fresnel lenses and transmitted through optical fibers, *Biotechnol. Bioeng. Symp.* **15**, 331-345.
6. Hirata, S., M. Hayashitana, M. Taya, and S. Tone (1996), Carbon dioxide fixation in batch culture of *Chlorella* sp. using a photobioreactor with a sunlight-collection device, *J. Ferm. Bioeng.* **81**(5), 470-472.
7. Ogbonna, J. C., H. Yada, H. Masui, and H. Tanaka (1996), A novel internally illuminated stirred tank photobioreactor for large-scale cultivation of photosynthetic cells, *J. Ferm. Bioeng.* **82**(1), 61-67.
8. Ogbonna, J. C., T. Soejima, and H. Tanaka (1999), An integrated solar and artificial light system for internal illumination of photobioreactors, *J. Biotechnol.* **70**, 289-297.
9. Richmond, A. and C. W. Zhang (2001), Optimization of a flat plate glass reactor for mass production of *Nannochloropsis* sp. outdoors, *J. Biotechnol.* **85**, 259-269.
10. Ogbonna, J. C. and H. Tanaka (1997), Industrial-size photobioreactors, *Chemtech.* **27**, 43-49.
11. Sung, K. D., J. S. Lee, C. S. Shin, M. S. Kim, S. C. Park, and S. W. Kim (1998), CO₂ fixation by *Chlorella* HA-1 cultured in bubble columns, *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.* **26**(1), 1-6.
12. Vernerey, A., J. Albiol, C. Lasseur, and F. Godia (2001), Scale-up and design of a pilot-plant photobioreactors for the continuous culture of *Spirulina platensis*, *Biotechnol. Prog.* **17**, 431-438.
13. Csogor, Z., M. Herrenbauer, I. Perner, K. Schmidt, and C. Posten (1992), Design of a photobioreactor for modelling purpose, *Chem. Eng. Pro.* **38**, 517-523.
14. Lee, C. G. (1999), Calculation of light penetration depth in photobioreactors, *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **4**, 78-81.
15. Yun, Y. S., J. M. Park, and B. Volesky (1999), Modeling of microalgal photosynthetic activity depending on light intensity, light pathlength and cell density, *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* **14**(4), 414-421.
16. Watanabe, Y., N. Ohmura, and H. Saiki (1992), Isolation and determination of cultural characteristics of microalgae which functions under CO₂ enriched atmosphere, *Energy Convers. Mgmt.* **33**(5-8), 545-552.