

## 기포탑 반응기에서 *Chlorella* HA-1의 CO<sub>2</sub> 고정화 특성

성기돈 · 이진석\* · 신철승 · 김미선 · 박순철 · 김승욱<sup>1</sup>  
한국에너지기술연구소 바이오매스 연구팀, <sup>1</sup>고려대학교 화학공학과

**CO<sub>2</sub> Fixation by *Chlorella* HA-1 Cultured in Bubble Columns. Sung, Ki-Don, Jin-Suk Lee\*, Chul-Seung Shin, Mi-Sun Kim, Soon-Chul Park, and Seung-Wook Kim<sup>1</sup>. Biomass team, KIER, 71-2 Jang-dong Yuseong-gu Taejeon, Korea, <sup>1</sup>Dept. of Chem. Eng., Korea University, Seoul, Korea** - The characteristics of CO<sub>2</sub> fixation by *Chlorella* HA-1 cultured in bubble columns were studied to achieve high photosynthetic rates per basal area. The influence of experimental conditions such as the diameter of a bubble column and gas flow rate, on photosynthesis of *Chlorella* HA-1 was investigated. The maximum productivity and the overall CO<sub>2</sub> fixation rate obtained in a 0.15 L bubble column was 1.09 g dry biomass/L-day and 1048 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-day, respectively. Light limitation has been observed in the bubble columns having a diameter larger than 3.5 cm. As the reactor volume increased, the decrease of the CO<sub>2</sub> fixation rate was remarkable. High gas flow rate was helpful to mitigate the light limitation problem.

**Key words:** CO<sub>2</sub> fixation, bubble column, photoinhibition, aeration rate, mixing

산업체에서 배출되는 이산화탄소에 의한 지구 온난화 현상이 심각하여짐에 따라 이산화탄소를 효율적으로 제거할수 있는 다양한 기술의 개발에 대한 연구가 진행되고 있다. 미세조류를 이용하는 이산화탄소 고정화 공정은 물리화학적인 방법에 비해 반응 조건이 상온, 상압이어서 장치의 건설에 필요한 초기 투자비가 낮고 이산화탄소 고정화 과정에서 생산되는 미세조류를 적절하게 가공할 경우 유용 물질을 얻을수 있다는 장점이 있다. 따라서 미세조류를 이용하여 산업체 배출가스로 부터 이산화탄소를 고정화하는 공정 개발을 위한 많은 연구가 진행되었다[2, 5, 8, 13, 17].

미세조류를 이용한 CO<sub>2</sub> 고정화 공정을 실용화하기 위해서는 적합한 반응기의 개발과 반응기의 운전 조건을 최적화하는 것이 중요하다. 산업체에서 배출되는 CO<sub>2</sub>를 효율적으로 고정화하기 위한 많은 종류의 미세조류 배양조가 제안되었다. 현재 상용화 미세조류 생산 공정에서 사용되는 모든 대형 반응기는 노지형(raceway pond)이다[1]. 그러나 노지형 반응기에서는 균체 농도가 증가함에 따라 균체 자신에 의한 음영효과(self shading effect)로 인해 반응기내 대부분의 균체가 빛의 고갈 현상을 겪는다[15]. 빛의 부족은 미세조류의 성장 속도를 떨어뜨리고 그 결과 공정의 CO<sub>2</sub> 고정화 속도는 저하된다. 이외에도 노지형 반응기에서는 운전 조건을 최적 상태로 조절하기 어렵다는 문제점이 있다.

노지형 반응기의 이러한 문제점을 해결하기 위해 다양

한 형태의 반응기에 대한 연구가 진행되고 있다[6, 8, 11, 13, 17]. 이러한 반응기중 밀폐된 관(tubing)의 내부에서 미세조류를 배양하는 공정은 높은 생산성과 반응기의 운전 조건 조절이 용이한 점(노지형 반응기와 비교할때) 이외에도 투자비와 운전 비용이 저렴하다는 장점(광섬유 반응기에 비해)이 있어 산업체 배출 CO<sub>2</sub>를 제거하는 대형 CO<sub>2</sub> 고정화 공정에 적용 가능성이 높아 주목 받고 있다[1]. 다양한 형태의 관형 반응기중 관을 수직으로 하는 수직형 관형 반응기는 기하학적 특성 때문에 수평형이나 경사형 반응기에 비해 단위 면적당 생산성을 높일수 있다는 장점이 있다. 그러므로 수직형 관형 반응기는 미세조류를 이용한 CO<sub>2</sub> 고정화 공정의 절대 속도가 낮다는 점과 그 결과 산업체에서 배출되는 CO<sub>2</sub>를 고정화하는 공정의 설치시 필요한 면적이 대단히 크다는 점을 고려할 때 우리나라와 같이 유향 부지의 확보가 어려운 장소에서 특히 우월성을 가질수 있을 것으로 기대된다. 이외에도 수직형 관형 반응기는 다른 형태의 관형 반응기에 비해 반응 기질인 CO<sub>2</sub>의 공급과 미세조류의 활성을 억제하는 대사 산물인 O<sub>2</sub>의 제거가 원활하고 배지의 혼합이 보다 잘 이루어진다는 장점이 있다.

관형 반응기에서도 미세조류의 배양이 진행되어 균체 농도가 높아지면 노지형 반응기에서와 마찬가지로 광 에너지의 부족 현상이 일어나게된다. 지금까지의 관형 반응기에서 CO<sub>2</sub> 고정화 공정 연구에서는 연구에 사용한 관형 반응기의 크기를 소형으로(직경 5 cm이하) 하여 광 부족 현상을 줄이고 이 문제점을 거의 다루지 않고 있다[4, 6, 19]. 그러나 산업체 배출 가스로부터 CO<sub>2</sub>를 고정화하는 공정에 적용하기 위해서는 대형 반응기의 개발이 필요하

\*Corresponding author  
Tel. 82-42-860-3553, Fax. 82-42-860-3132  
E-mail: bmislee@sun.kier.re.kr

다. 이러한 대규모 수직형 관형 반응기의 경우 반응기 직경의 증가에 따른 반응기 내부에서의 광 부족 현상은 불가피할 것으로 예상된다. 따라서 대형 관형 반응기에서의 광 활용 효율을 높이기 위해서는 반응기의 scale-up에 따른 광 고갈 현상에 대한 정량적인 분석이 필요하다.

본 연구에서는 다양한 크기의 기포탑 반응기에서 운전 조건(빛의 세기)의 변화에 따른 광 활용 효율(바이오매스 생산성)을 측정하여 반응기의 scale-up에 따른 미세조류의 CO<sub>2</sub> 고정화 특성을 분석하였다. 본 연구에서 얻어진 결과는 생산성이 높은 수직형 관형 반응기의 개발과 운전 조건을 최적화하는데 유용한 정보로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 재료 및 방법

### 미세조류 및 배양 배지

본 연구에 사용한 미세조류는 CO<sub>2</sub>에 대한 내성과 성장 속도가 높은 담수성 종인 *Chlorella* HA-1이고 일본 국립 환경연구소(National Institute of Environmental Studies, NIES)에서 구입하였다. 미세조류 배양용 배지로는 다음과 같은 조성을 갖는 M4N배지를 사용하였다[16]. 배지 1 L에 KNO<sub>3</sub> 5.0 g, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 1.25 g, MgSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 2.5 g, FeSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 3 mg, H<sub>3</sub>BO<sub>3</sub> 2.86 mg, MnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 2.5 mg, ZnSO<sub>4</sub> · 7H<sub>2</sub>O 0.22 mg, CuSO<sub>4</sub> · 5H<sub>2</sub>O 0.08 mg, Na<sub>2</sub>MoO<sub>4</sub> 0.021 mg를 첨가, 용해후 pH는 6으로 조절하였다.

### 미세조류의 light 흡수 실험

일정 농도의 *Chlorella* HA-1 균체 용액을 폭이 각각 2, 3, 4.5, 6, 8 cm(두께 3 mm)인 아크릴 재질의 직육면체 용기(10×10 cm)에 넣고 앞 면에서 빛을 조사하고 뒷 면에서 통과한 빛의 세기를 quantum sensor(Li-250, Li-Cor Inc., USA)로 측정하였다. 측정중 균체가 균일하게 분산되도록 magnetic stirrer를 사용하여 교반하였다. 광원으로는 형광등과 할로겐등을 사용하여 반응기 표면에서 빛의 세기를 각각 192 mol/m<sup>2</sup>-sec와 1860 mol/m<sup>2</sup>-sec로 조절하였다. 이와같은 빛의 세기는 옥내 CO<sub>2</sub> 고정화 실험의 조도 값과 우리나라의 맑은 날 최대 일사량을 각각 기준하여 정하였다.

### 광 생물 반응기

길이가 75 cm인 다양한 직경의 반응기(2 cm o.d.(150 ml 운전 부피), 3.5 cm o.d.(600 ml ), 8 cm o.d.(3 L ), 12 cm o.d.(6 L ), 20 cm (16 L ))를 pyrex 유리로 제작하였다. 반응기에 공급되는 가스중의 CO<sub>2</sub> 농도는 100% CO<sub>2</sub>와 공기의 양을 각각 mass flow controller(905C-PS-BM-11, Sierra Instruments Inc., USA)를 사용하여 1:9

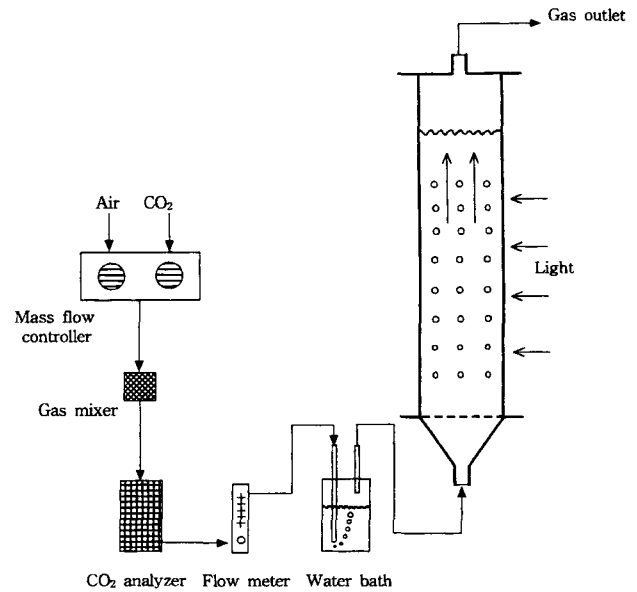


Fig. 1. Schematic diagram of CO<sub>2</sub> fixation system with a bubble column bioreactor.

(부피 비)로 조절한 후 기체 혼합 장치를 통과 시켜 균일하게 섞이도록 한후 0.45 μm 필터를 통해 반응기에 공급하였다(Fig. 1). 반응기에 공급되는 광 에너지는 형광등으로 공급하였다. 반응기의 배지 온도는 약 30°C로 유지하였고 공급 가스량은 실험 조건에 따라 각각 0.2, 1 vol/vol-min(vvm)로 조절하였다. 가스 공급에 의한 배지의 증발 손실을 막기 위해 가스는 수조(water bath)를 통해 평형을 이룬 뒤 반응기에 공급되었다. *Chlorella* HA-1은 1 L 삼각플라스크에서 약 7일간 순수 배양하여 균체 농도가 1 g/l에 도달하면 수확하여 원심분리와 멸균 증류수를 사용한 세척을 2-3차례 반복하여 사멸 균체와 독성 물질을 제거하였다. 세척 농축 균체를 미리 멸균된 배지에 접종하여 초기 균체 농도를 0.4-0.5 g/l로 조절한후 CO<sub>2</sub> 고정화 실험을 시작하였다. 반응기는 필요시 0.2% NaClO 용액으로 살균 처리하였다.

### 분석

광 에너지는 quantum meter(LI-250, LI-COR Inc., USA)를 사용하여 측정하였다. 배지중 미세조류 농도는 분광광도계(HP-8452A, Hewlett-Packard Inc., USA)를 사용하여 660 nm에서 측정하였다. 균체 건조량=0.196×흡광도의 관계를 가졌다(상관 계수=0.99). 공급 가스중의 CO<sub>2</sub>농도는 CO<sub>2</sub> 분석장치(IR-8400, Summit Analyzers Inc., U.K.)를 사용하여 온-라인 분석하였다. 미세조류에 의해 흡수된 CO<sub>2</sub> 양은 균체 배양을 위해 외부에서 CO<sub>2</sub>이 아닌 다른 탄소원을 공급하지 않았으므로 생성된 균체 성분중 탄소는 CO<sub>2</sub>로 부터 공급되었다. 따라서 미세조류에 의해 고정화된 CO<sub>2</sub> 양은 미세조류의 성분 분석 결과와 물질

수지 관계식을 이용하여 간접 결정하였으며 균체 생성량과 흡수된 CO<sub>2</sub>는 1:2(무게비)의 관계를 가졌다. 미세조류의 성분은 원소 분석기(C.H.N.-1000 Elemental Analyzer, LECO Co., USA)를 사용하여 측정하였다.

**결과 및 고찰**

***Chlorella* HA-1의 light 흡수 실험**

미세조류 배양 공정에서 균체의 음영 효과에 의한 빛의 감소 현상을 조사하기 위해 균체 농도와 빛의 투과 깊이를 변수로 하는 실험을 수행하여 Table 1에 나타난 결과를 얻었다. 형광등과 할로겐등을 광원으로 하였으며 할로겐등을 광원으로 하였을 때 투과율은 팔호내의 값으로 표기하였다. Table 1에 나타난 바와 같이 광원의 종류에 관계없이 빛의 투과율은 대체로 비슷하였다. 빛의 투과율과 균체 농도, 빛의 투과 깊이에 대한 정량 관계를 조사하기 위해 Table 1의 결과를 아래 식으로 표현되는 Beer 법칙을 사용하여 해석하였다.

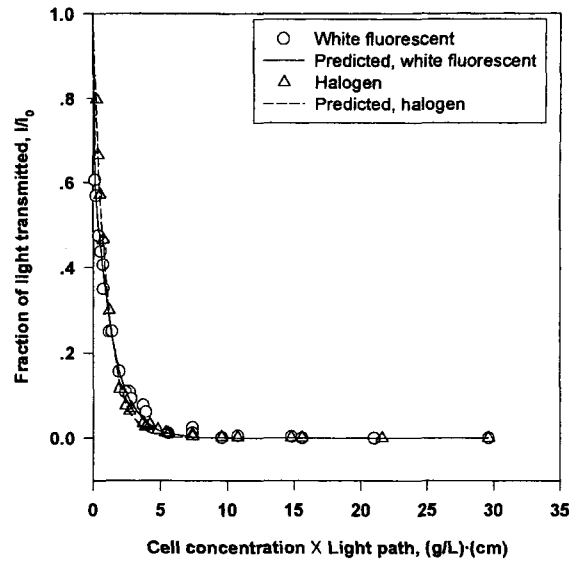
$$I/I_0 = e^{-(B \cdot C \cdot X)}$$

단 B: 실험 상수

C: 미세조류 균체 농도

X: 투과 깊이

Beer법칙에 의한 예측 값과 실험 측정치의 비교 결과를 Fig. 2에 나타냈다. Fig. 2의 x축과 y축은 균체 농도에 깊이를 곱한 값과 반응기에 입사한 빛 중 투과된 분율로 각각 정하였다. 그림에서 보는 바와 같이 조사된 빛 중 투과된 분율에 대한 실험 측정값은 Beer 법칙에 의한 예측치와 잘 일치하였으며 실험 데이터의 curve fitting에 의해 결정한 B의 값은 형광등 광원의 0.74와 할로겐등의 경우 1.02로 광원의 종류에 따라 달랐다. 이와 같은 값은 *Chlorella pyrenoidosa* 용액에 대한 가시 단일 파장(파장의 길이 범위 440 nm-680 nm) 투과 실험에서 실험에 사용한 파장의 길이에 따라 B의 값이 0.4-1.9의 범위를 가진 결과[13]을 고려할 때 타당한 것으로 판단된다. 또한 광원에 따른 빛 투과 계수 값(B)의 차이는 형광등과 할로겐 등의 파장 분포가 다른데 따른 것으로 판단된다.



**Fig. 2. The fraction of light transmitted by *Chlorella* HA-1 suspension.**

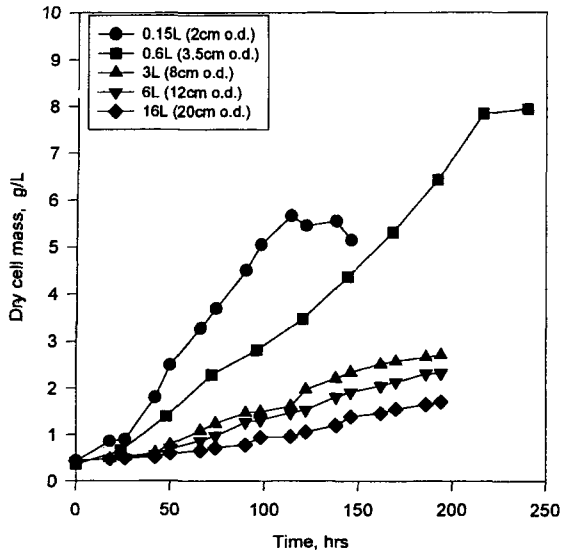
Fig. 2를 이용하면 *Chlorella* HA-1 배양시 반응기에서 빛이 공급되는 부분에 대한 정량적인 정보를 확보할 수 있다. 예로서 *Chlorella* HA-1 농도가 2g/l인 관형 반응기 표면에서의 빛의 세기가 16Klux(=192 μmol/m<sup>2</sup>-sec[13])이면 반응기 표면으로부터 1 cm 깊이에서의 빛의 세기는 약 1.6Klux임을 Fig. 2를 사용하면 알 수 있다. *Chlorella* 종의 광합성 활성이 유지되는 최소 빛의 세기가 7.64 μmol/m<sup>2</sup>-sec[12]임을 고려할 때 반응기의 대부분이 광제한 조건하에 있게 됨을 예측할 수 있다. 또한 최대 일사량과 동일한 조건인 1860 μmol/m<sup>2</sup>-sec의 경우 균체 농도와 빛의 투과 깊이의 곱이 5.38이하인 조건에서 충분한 빛이 공급됨을 알 수 있다. 그러므로 노지형 반응기에서 얻을 수 있는 최대 농도인 2 g/l의 *Chlorella* HA-1 배양액의 경우 반응기 표면으로부터 2.68 cm 깊이까지만 충분한 빛이 공급됨을 알 수 있다. 균체 농도가 더 높은 관형 반응기의 경우 빛의 투과 깊이는 더욱 줄어들게 되어 빛 제한 현상이 더욱 심각할 것으로 예측된다.

**기포탑에서 CO<sub>2</sub> 고정화 실험**

**Table 1. Fraction of light transmitted through *Chlorella* HA-1 culture (light source: Fluorescent bulb, halogen bulb)**

깊이(cm)	균체농도(g/l)					
	0.1	0.5	1	2	4	4
1.4	0.6563 (-)*,**	0.4063 (-)**	0.25 (-)	0.0938 (0.071)	0.0113 (0.0110)	0.0113 (0.0110)
2.4	0.5688 (0.7742)	0.2500 (0.2903)	0.1094 (0.0774)	0.0375 (0.0194)	0.0016 (0.0026)	0.0016 (0.0026)
3.9	0.475 (0.6452)	0.1563 (0.1161)	0.0625 (0.0274)	0.0125 (0.0042)	0.0007 (0.0005)	0.0007 (0.0005)
5.4	0.4375 (0.5548)	0.1094 (0.0645)	0.0375 (0.0129)	0.0063 (0.0026)	0.0007 (0.0005)	0.0007 (0.0005)
7.4	0.35 (0.4516)	0.0781 (0.0355)	0.025 (0.0097)	0.0044 (0.0016)	0.0005 (0.0004)	0.0005 (0.0004)

\*Values in parentheses represent the fractions of light transmitted with halogen bulb. \*\*Not determined.



**Fig. 3. Growth of *Chlorella* HA-1 in bubble columns.**  
 Experimental conditions: light intensity=95  $\mu\text{mol}/\text{m}^2 \cdot \text{sec}$ ;  $T=30^\circ\text{C}$ ;  
 $y_{\text{CO}_2}=10\%$ ; gas flow rate=0.5 vvm.

반응기의 직경에 따른 CO<sub>2</sub> 고정화 생산성 기포탑 반응기의 크기에 따른 CO<sub>2</sub> 고정화 능력을 조사하기 위해 동일한 조건하에서 *Chlorella* HA-1을 배양하며 CO<sub>2</sub> 고정화 실험을 행한 결과를 Fig. 3에 나타냈다. 그림에 나타낸 바와 같이 직경 2 cm 반응기(배지 부피: 150 ml)의 경우 접종후 약 24시간의 lag phase를 거친후 선형 증식기에 들어가 76시간 동안 거의 일정한 증식 속도를 나타냈다. 본 반응기에서의 선형 증식기중 평균 균체 생산성(overall biomass productivity)과 최대 균체 농도는 각각 1.097 g/l-day, 5.65 g/l이었다. 본 실험은 거품 발생이 심하여 균체의 유실 문제가 나타난 배양 시작 7일후 중단하였다. Watanabe 등[17, 18]은 내경이 1 cm인 코일 형태의 관형 반응기에서 *S. platensis*와 *Chlorella* HA-1을 배양하여 최대 균체 생산성을 각각 0.51 g/l-day와 0.685 g/l-day로 본 연구의 결과치보다 다소 낮았다. 그러나 CO<sub>2</sub> 고정화 반응기의 효율성을 결정하는 주요 인자인 단위 면적당 균체의 생산성과 CO<sub>2</sub> 고정화 속도를 비교하면 수직형 관형 반응기의 우월성은 뚜렷하다. 본 연구에서 얻은 반응기의 단면적을 기준한 회분식 배양 중 평균 균체 생산성과 CO<sub>2</sub> 고정화 속도는 각각 524.04 g/m<sup>2</sup>-day와 1048.1 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-day인데 비해 Watanabe 등에 의해 보고된 코일 형태 관형 반응기의 단위 면적당 CO<sub>2</sub> 고정화 속도는 54 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-day에 불과하였다[17]. 그러므로 동일한 용량의 CO<sub>2</sub> 고정화 반응기를 설치하는데 필요한 면적은 bubble column이 코일형 반응기에 비해 약 1/20로 축소될 수 있음을 보여준다. 이러한 장치 설치에 필요한 면적의 축소는 유휴 부지의 확보가 어려운 우리나라의 경우 특히 적용 가능성이 높음을 시사한다. 이와같

**Table 2. Summary of experimental results for CO<sub>2</sub> fixation by *Chlorella* HA-1 cultured in bubble columns**

반응기 직경, cm	총괄 균체 생산성, g/l-day	최대 균체 농도, g/l	면적당 CO <sub>2</sub> 고정화 속도, g CO <sub>2</sub> /m <sup>2</sup> -day
2	1.097	5.65	1048
3.5	0.831	7.84	794
8	0.33	2.66	315
12	0.241	2.32	230
20	0.156	1.71	149

이 bubble column에서의 높은 단위 면적 기준 CO<sub>2</sub> 고정화 속도는 반응기의 기하학적 특성에 따른 것으로 Yoshihara등도 유사한 결과를 보고하였다[19].

직경 2 cm bubble column에서는 빛의 고갈 현상 보다는 *Chlorella* HA-1 배지의 색깔이 고유의 진한 녹색을 띠지 못하고 연록색으로 바뀌는 것으로 볼 때 photoinhibition 현상[7]이 있으며 과도한 광에 의해 *Chlorella* HA-1의 성장이 억제된 것으로 생각된다. 이러한 photoinhibition 현상에 대해 더 조사하기 위해 직경 3.5 cm bubble column(배지 부피: 600 ml)에서 *Chlorella* HA-1을 배양하는 실험을 하였다. Fig. 3에 나타낸 바와 같이 배양 시작 9일후 최대 균체 농도인 약 7.84 g/l에 도달하였으며 직경 2 cm 반응기의 최대 균체 농도에 비해 오히려 높았다. 그러나 최대 균체 생산성은 0.831 g/l-day로 직경 2 cm 150 ml 반응기에서의 균체 생산성에 비해 낮았다. 배양액중 균체 농도가 2.5 g/l를 넘어서면 빛의 고갈현상으로 균체의 비 증식 속도는 서서히 감소하기 시작하였다. 이러한 결과는 앞에 기술한 *Chlorella* HA-1의 빛 흡수 실험에서 균체 농도 2 g/l일 때 0.6 cm 깊이까지 CO<sub>2</sub> 고정화에 충분한 빛이 공급된다는 예측치와 비교할 때 빛의 고갈 효과가 현저하게 낮았다. 이와같은 차이는 CO<sub>2</sub> 가스 공급에 의해 반응기내 균체의 혼합 효과에 의해 균체가 빛이 충분한 영역으로 순간 이동이 가능하여 빛의 고갈 현상이 줄어들었기 때문으로 판단된다. 또한 미세조류 배양액은 조류 특유의 진한 녹색을 나타내 photoinhibition 현상이 없었음을 보여준다. 그러나 직경이 8 cm인 반응기(배지 부피 3 L)에서는 균체 생산성과 최종 균체 농도가 0.33 g/l-day와 2.56 g/l로 직경 3 cm인 반응기에서 얻은 균체 생산성과 최대 균체 농도의 47%와 32%로 매우 낮았으며 광합성에 필요한 빛의 고갈 현상이 심각함을 보여준다. Table 2에 반응기의 직경에 따른 균체 생산성과 최대 균체 농도 및 CO<sub>2</sub> 고정화 속도에 대한 실험 결과를 요약하였다. Fig. 4에는 반응기의 직경과 CO<sub>2</sub> 고정화 속도의 관계를 나타냈다. 기포탑의 직경이 2 cm보다 커짐에 따라 미세조류 배양 공정에 의한 CO<sub>2</sub> 제거 속도가 급격하게 감소함을 보여준다.

**가스 유량의 영향**

CO<sub>2</sub> 고정화 공정의 실용화를 위해서는 반응기의 대형

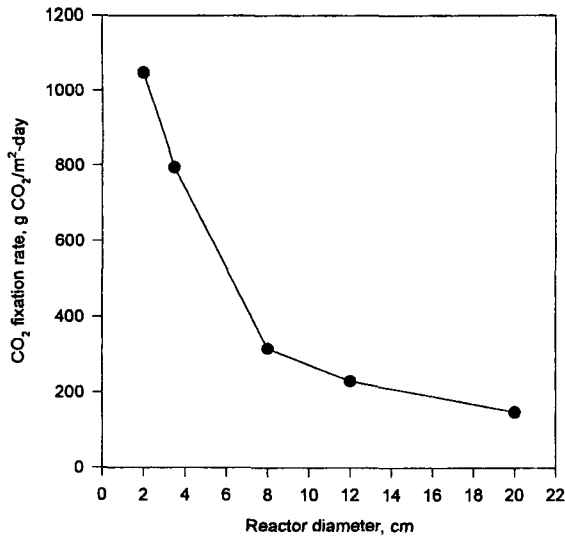


Fig. 4. CO<sub>2</sub> fixation rates by *Chlorella* HA-1 cultured in bubble columns.

화와 미세조류의 고농도 배양은 필수조건이다. 그러나 앞에 기술한바와 같이 반응기의 직경이 증가하거나 반응기내 미세조류 농도가 증가하면 빛의 고갈로 균체의 생산성과 CO<sub>2</sub> 고정화 속도가 급격하게 떨어지게 된다. 미세조류의 광 활용 효율을 높이기 위해 공급 가스의 유량 증가에 의한 혼합 효과에 따른 균체의 생산성 변화를 조사하였다. 공급 가스에 의한 배지의 증발, 농축 효과를 막기 위해 수조를 통과하며 수분으로 포화된 후 반응기에 공급되었다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 조사 대상 반응기 모두에서 공급 가스 유량을 증가시킬 때 균체 생산성이 각 경우마다 증가율은 달랐지만 높아졌다. 빛의 고갈

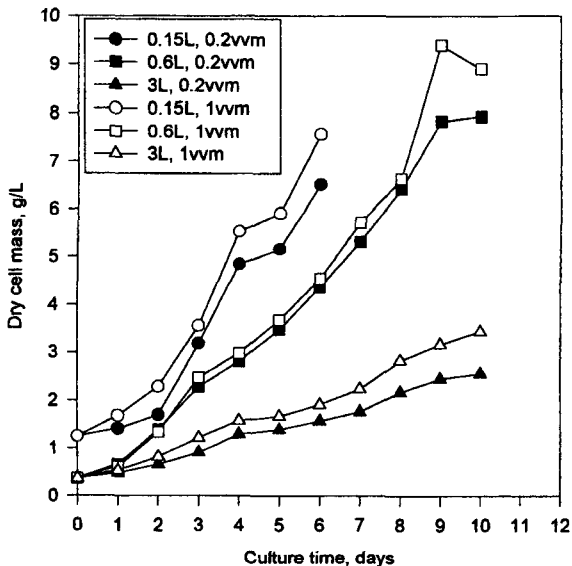


Fig. 5. Effect of gas flow rates on the growth of *Chlorella* HA-1 in bubble columns.

Experimental conditions; Light intensity=190 μmol/m<sup>2</sup> · sec; T=30°C; y<sub>CO<sub>2</sub></sub>=10%.

현상이 비교적 적은 직경 3.5 cm bubble column에서는 가스 공급 유량이 0.2 vvm과 1 vvm일 때 최종 균체 농도는 각각 7.94, 8.9 g/l로 균체 농도가 약 12% 증가하였다. 그러나 빛의 고갈 현상이 비교적 뚜렷한 3 L 반응기의 경우 가스 공급 유량이 1 vvm일 때 최종 균체 농도는 3.43 g/l로 0.2 vvm일 때 균체 농도 2.56 g/l에 비해 약 34% 높아 공급 가스 유량 증가에 따른 균체 농도의 상승 효과가 더욱 컸다. 이러한 상승 효과는 공급 가스의 유량이 높아짐에 따라 반응기내 균체의 혼합이 활성화되어 균체가 명-암 영역으로 보다 자주 이동하여 빛의 고갈 현상이 감소하였기 때문으로 판단된다. 이와같은 flashing light 효과는 다른 연구팀들에 의해서도 보고된바 있다[3, 9, 14]. 그러므로 반응기내 유체의 흐름을 와류로 유지하는 것이 균체 생산성을 높이는 데 필요 조건으로 밝혀졌다. 그러나 공급 가스의 유량 증가는 전단 응력의 증가를 수반하므로 전단 응력에 민감한 미세조류 종의 배양에는 주의하여 사용할 필요가 있다.

요 약

수직 관형 반응기(기포탑)에서 담수성 미세조류인 *Chlorella* HA-1의 CO<sub>2</sub> 고정화 특성을 조사하였다. *Chlorella* HA-1의 배양액은 균체 자체에 의한 음영효과(self-shading effect)로 균체의 농도가 증가하면 빛의 투과 깊이는 급격하게 감소하는 것으로 밝혀졌다. 기포탑 반응기에서의 균체 생산성은 반응기의 직경에 반비례하여 가장 작은 직경 2 cm 반응기에서 균체 생산성과 CO<sub>2</sub> 고정화 속도가 각각 1.097 g/l와 1048 g CO<sub>2</sub>/m<sup>2</sup>-day로 가장 높았다. 그러나 직경 2 cm 반응기의 경우 photoinhibition 현상이 나타났으며 그 결과 최종 균체 농도는 직경 3.5 cm 반응기의 7.84 g/l에 비해 30% 낮은 5.65 g/l이었다. 기포탑 반응기의 직경이 2 cm 이상이면 CO<sub>2</sub> 고정화 속도가 급격하게 떨어지는 것으로 밝혀졌다. 이와같은 CO<sub>2</sub> 고정화 속도의 감소는 광합성에 필요한 빛이 반응기 내부로 충분히 전달되지 않아 대부분의 미세조류가 CO<sub>2</sub> 고정화에 빛을 효율적으로 활용할 수 없었기 때문으로 생각된다. 기포탑 반응기에 공급하는 CO<sub>2</sub> 가스 유량을 증가시키면 미세조류의 생산성이 높아졌으며 반응기의 직경이 커질수록 생산성의 상승 효과는 뚜렷하였다. 이와같은 균체의 생산성 향상은 균체가 명-암영역으로 활발하게 이동하여 빛의 활용 효율을 높일 수 있었기 때문으로 생각된다. 따라서 반응기내 미세조류가 명-암영역으로 활발하게 이동하도록 하는 장치 또는 운전기술의 적용이 필요함을 보여준다.

감사의 글

본 연구는 환경부와 과학기술처 주관 핵심 선도기술

개발 사업(G-7)의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Borowitzka, M. A. 1994. Large-scale algal culture systems: The next generation. *Australian Biotechnology* **4**: 212–215.
2. Cho, J. H. and J. W. Yang. 1995. CO<sub>2</sub> fixation technology by microalgae. *Recent Advances in Bioprocess Engineering* **3**: 157–165.
3. Grobbelaar, J. U. 1991. The influence of light/dark cycles in mixed algal cultures on their productivity. *Biores. Technol.* **38**: 189–194.
4. Harker, M., A. J. Tsavalos, and A. J. Young. 1996. Autotrophic growth and carotenoid production of *Haematococcus pluvialis* in a 30 liter air-lift photobioreactor. *J. Ferm. Bioeng.* **82**: 113–118.
5. Lee, S. B., C. B. Park, and I. S. Suh. 1995. Development of biological CO<sub>2</sub> fixation process. *Chemical Industry and Technology* **13**(4): 13–19.
6. Miyamoto, K., O. Wable, and J. R. Benemann. 1988. Vertical tubular reactor for microalgae cultivation. *Biotechnol. Letts.* **10**: 703–708.
7. Myers, J. 1953. Growth characteristics of algae in relation to the problems of mass culture, p. 53. In J. S. Burlew(ed.), *Algal Culture; From Laboratory to Pilot Plant*, Carnegie Institution, Washington, D.C.
8. Nishikawa, N., K. Honnami, A. Hirano, Y. Ikuta, Y. Hukuda, M. Negoro, M. Kaneko, and M. Hada. 1992. Reduction of carbon dioxide emission from flue gas with microalgae cultivation. *Energy Convers. Mgmt.* **33**: 553–560.
9. Ogbonna, J. C., H. Yada, and H. Tanaka. 1995. Effect of cell movement by random mixing between the surface and bottom of photobioreactors on algal productivity. *J. Ferm. Bioeng.* **79**(2): 152–157.
10. Ogbonna, J. C., H. Yada, and H. Tanaka, 1995. Kinetic study on light-limited batch cultivation of photosynthetic cells. *J. Ferm. Bioeng.* **80**(3): 259–264.
11. Richmond, A., S. Boussiba, A. Vonshak, and R. Kopel. 1993. A new tubular reactor for mass production of microalgae outdoors. *J. Appl. Phycol.* **5**: 327–332.
12. Scurlock, J. M. O. 1993. Biomass production and data, p. 442. In D.O. Hall and J. M. O. Scurlock(eds.), *Photosynthesis and Production in a Changing Environment: a Field and Laboratory Manual*. Chapman & Hall, London.
13. Takano, H., H. Takeyama, N. Nakamura, K. Sode, J. G. Burgess, E. Manabe, M. Hirano, and T. Matsunaga. 1992. CO<sub>2</sub> removal by high density culture of a marine cyanobacterium *Synechococcus* sp. using an improved photobioreactor employing light diffusing optical fibers. *Appl. Biochem. Biotechnol.* **34/35**: 449–458.
14. Terry, K. L. 1986. Photosynthesis in modulated light: Quantitative dependence of photosynthetic enhancement on flashing rate. *Biotech. Bioeng.* **28**: 988–995.
15. Vonshak, A. and A. Richmond. 1985. Problems in developing the biotechnology of algal mass production. *Plant & Soil.* **89**: 129–135.
16. Watanabe, Y., N. Ohmura, and H. Saiki. 1992. Isolation and determination of cultural characteristics of microalgae which functions under CO<sub>2</sub> enriched atmosphere. *Energy Convers. Mgmt.* **33**(5-8): 545–552.
17. Watanabe, Y., J. Noue, and D. O. Hall. 1995. Photosynthetic performance of a helical tubular photobioreactor incorporating the cyanobacterium *Spirulina platensis*. *Biotechnol. Bioeng.* **47**: 261–269.

(Received August 28, 1997)