

Synechocystis PCC 6803에 의한 이산화탄소의 생물학적 고정화

김 장 규 · 원 성 호 · † 김 남 기

¹현대중공업 마북리연구소, 성균관대학교 화학공학과
(접수 : 1997. 10. 16., 게재승인 : 1997. 12. 2.)

Biological Fixation of Carbon Dioxide by *Synechocystis* PCC 6803

Jang Kyu Kim¹, Sung Ho Won, and Nam Ki Kim[†]

¹Mabookri Research Institute, Hyundai Heavy Industries Co., Ltd., Yongin, Kyonggi 449-910, Korea
Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University, Suwon, Kyonggi 440-746, Korea
(Received : 1997. 10. 16., Accepted : 1997. 12. 2.)

Carbon dioxide is estimated to be responsible for 60 % of the global warming effect, and this percentage is tending upward. Studies on removal and fixation of CO₂ in the flue gas are recognized as one of the important roles of the future biotechnology. Photobiological systems have considerably higher photosynthetic efficiency than conventional biomass system. The experiment for the photosynthetic fixation of CO₂ and the biomass production was performed with various initial cell concentration in a tubular photobioreactor and a bubble column CO₂ contactor with a gas sparger of CO₂-enriched air(0.03~20%). *Synechocystis* PCC 6803 could grow at 10~20 % CO₂ content under pH control. The highest specific growth rate, 0.0258 h⁻¹, was obtained at 5% CO₂-air mixture. The maximum cell production rate, 0.2784 g/L · day, was obtained when the initial cell concentration was 0.45 g/L at 5% CO₂-air mixture. The maximum cell concentration was 2.03 g/L in the tubular photobioreactor when the light intensity was 45.5 μ E/ m² · s. This system showed 0.482 g CO₂/L · day of the CO₂ fixation.

Key Words : *Synechocystis* PCC 6803, cyanobacteria, tubular photobioreactor, carbon dioxide, biological fixation

서 론

이산화탄소의 분리제거 방법으로 쓰이는 흡수법, 흡착법, 막분리법 등의 물리화학적 분리기술은 이산화탄소를 처리하기 위해 많은 에너지를 투입하여야 하고 범지구적 순환을 고려할 때, 재이용처나 새로운 고정화 공정을 다시 거쳐야 하는 1차적 처리공정이라고 할 수 있다. 이에 비하여 광합성 미생물에 의한 처리 방법은 에너지원이 태양광이므로 운전과 유지에 상당한 비용이 절감되며, 아울러 장치 가동에 요구되는 에너지를 얻기 위한 화석연료의 사용이 최소화 될 수 있는 환경조화형 이산화탄소 고정화 처리기술이라고 할 수 있다.

이러한 생물학적 처리기술에는 광합성 미생물의 고밀도 배양에 의한 이산화탄소 고정효율에 대한 기초연구를 비롯하여, 우량균주의 검색, 고효율 배양시스템의 개발과 유효 이용기술 등이 포함될 수 있다.

이산화탄소의 생물학적 고정화는 Warburg와 Negelein(1)의

광합성 미생물에 의한 광에너지 전환효율에 대하여 연구한 이래로 많은 연구가 잇따르고 있다. Aiba와 Ogawa(2)는 *Spirulina platensis*를 사용하여 이산화탄소를 고정화 하였고, Suzuki 등(3)은 *Anacystis nidulans*의 최적성장에 있어서의 광, 이산화탄소 농도 및 온도 등의 변수에 대한 해석을 수행하였다. Pirt 등(4)은 관형반응기를 고안하여 조류의 최대 균체농도가 20 g-dry weight/L를 증가하는 배양기술을 이룩하였으며, Samon과 Leduy(5)는 *Spirulina maxima*를 평판형 광반응기에서 다단연속배양을 하여 1.17 g/L · day의 수율을 얻었다. Matsumoto 등(6)은 분류형 부유식 생물반응기를 고안하여 *Spirulina platensis* NIES 46을 배양하여 성장속도를 개선하였다. Markov 등(7)은 *Anabaena variabilis*를 실관(hollow-fiber) 광생물반응기를 이용하여 수소생성과 이산화탄소의 섭취에 대한 관계를 연구하여 150~170 mL CO₂/g dry wt. · h의 이산화탄소 소비속도와 20 mL H₂/g dry wt. · h의 수소 생성속도를 제시하였고, 실험실 규모에서의 실행 가능성을 보여주었다. Javanmaridian과 Palsson(8)은 3.2 cm²/cm³의 비표면적을 갖는 광섬유 생물반응기를 이용하여 *Chlorella vulgaris*를 10⁹ cells/mL의 고농도로 배양한 실험결과를 보고하였다.

Marcus 등(9)은 *Anacystis nidulans* R2를 사용하여 개량균주를 연구하였으며, Price와 Badger(10)는 *Synechococcus* PCC 7942를 사용하여 변이주를 분리하였고, Ogawa(11)는 *Synechocystis* PCC

† Corresponding Author : Department of Chemical Engineering, SungKyunKwan University, 300 Chunchun-dong Changan-gu, Suwon, Kyonggi 440-746, Korea.
Tel : 0331-290-7243, Fax : 0331-290-7272
E-mail : nkkim@chemeng.skku.ac.kr

6803을 사용하여 고농도 이산화탄소에서 개선된 성장속도를 갖는 변이균주에 대하여 연구하였다. 또한 Takeuchi 등(12)은 이산화탄소 농도 20% 이상에서도 견딜 수 있는 *Oocystis sp.*를 발견하였다.

다양한 광합성 미생물 중에서 본 실험에 사용된 cyanobacteria (blue-green algae, 남조류)는 물을 전자공여체로 이용하여 Calvin cycle을 통해 이산화탄소를 고정화하는 호기적 광합성 (oxygenic photosynthesis) 미생물이며, 증식인자에 대한 요구성이 거의 없지만 일부는 생장을 위해 Vitamin B₁₂를 필요로 한다. 토양, 해수 및 담수 등 넓은 지역에 분포되어 있으며, 일부는 높은 염분 농도, 열 및 pH에 강한 내성을 가지고 있어서 성장조건이 열악한 환경을 갖는 지역에서도 살아남을 수 있다.

본 연구에서는 이산화탄소의 생물학적 고정화에 대한 *Synechocystis* PCC 6803의 성능을 알아보고 고정화시스템 구성에 대한 가능성을 확인하고자 하였다. 이를 위하여 관형 광생물반응기를 제작하였고 *Synechocystis* PCC 6803을 이용하여 이산화탄소 농도에 따른 균체의 성장속도와 이산화탄소 전환을 계산하였다.

재료 및 방법

균주 및 균체량 측정

실험에 사용된 균주는 *Synechocystis* 균의 *Synechocystis* PCC 6803(ATCC 27184)이다. 세포는 구형이며, 지름이 2-3 μm 로 활주운동(gliding motility)을 하고 facultative heterotroph로서 광합성 전자전달계에서 Photosystem II의 기능이 필요없이 glucose를 기질로 사용하여 성장할 수 있다(13, 14). 최적 성장 배지는 BG-11이다.

균체량 측정은 730 nm에서 흡광도를 측정하였으며, 측정된 파장은 균체가 가지고 있는 광합성 색소가 광강도에 따라 변화될 수 있으므로 색소에 의한 균체량의 측정에 대한 오차를 줄일 수 있도록 선정하였다.

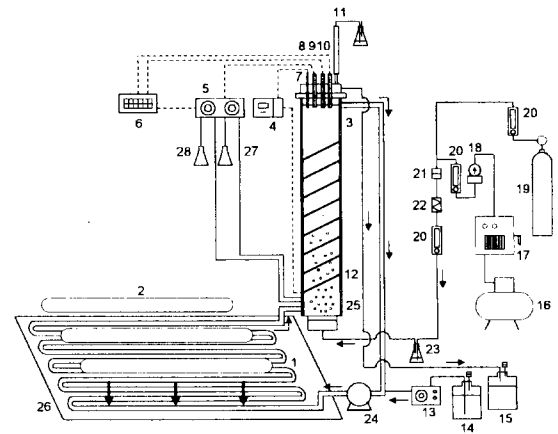
배양된 균체의 C, H, O, N의 원소성분분석을 통하여 성장에 소비된 이산화탄소의 양을 계산한다. 원소성분분석은 기초과학연구원 센터에 의뢰되어 분석되었으며, 원소분석기(Elemental Analyzer, CARLO-ERBA)가 사용되었다.

장치구성 및 실험방법

회분식 실험에는 jar-fermentor(배양부피 1.5L)가 사용되었으며, 사용된 광원은 15W 자연광 형광등으로 반응기의 측면 네 방향에서 반응기 표면 조도가 2,500 Lux가 되도록 위치를 조절하여 조사하였다. 광의 조도는 Light meter(Lutron, LX-102)를 사용하여 측정되었다.

배양온도 31 \pm 1 $^{\circ}\text{C}$, 20 rpm에서 배양을 실시하였으며, 유입되는 이산화탄소 혼합공기의 공급속도는 1 L/min이다. pH 제어에는 0.5N NaOH 용액과 0.5N HCl 용액을 사용하였다.

관형 반응기에 의한 이산화탄소 고정화 시스템은 Figure 1과 같다. 반응기는 균체에 탄소원을 공급하는 이산화탄소 용해조와 광원으로부터 광에너지를 받아 균체의 성장이 이루어지는 관형 반응기의 두 부분으로 구성되었다. 관형 반응기는 안지름 2 cm (바깥지름 2.3 cm), 길이 150 cm의 pyrex tube 10 개를 사용하였으며, U 자형 pyrex tube를 사용하여 직렬로 연결하였다. 배



- | | | |
|-------------------------|---------------------|------------------------------|
| 1. Pyrex tube | 2. Fluorescent lamp | 3. CO ₂ contactor |
| 4. Temp. controller | 5. pH controller | 6. Recorder |
| 7. Thermocouple | 8. pH probe | 9. DO probe |
| 10. ORP probe | 11. Condenser | 12. Heating cable |
| 13. Peristaltic pump | 14. Fresh medium | 15. Reservoir |
| 16. Compressor/Air tank | 17. Air dryer | 18. Pressure regulator |
| 19. CO ₂ gas | 20. Flow meter | 21. Filter |
| 22. Mixer | 23. Humidifier | 24. Magnetic pump |
| 25. Shielding | 26. Dark room | 27. 0.5N NaOH |
| 28. 0.5N HCl | | |

Figure 1. Schematic diagram of tubular photobioreactor system.

양 부피는 4.7 L 이고, 배양액은 이산화탄소 용해조로 연속적으로 순환시켰다. 공급되는 혼합공기의 산기판은 소결된 SUS filter(pore size 20 μm)를 사용하였다.

관 내부에 흐르는 배지의 순환 유속은 3.2 L/min 로, 배양중에 균체의 관내 침적과 부착을 방지하기 위하여 Reynolds number가 4,000 이상이 되도록 하여 난류상태가 유지되게 순환 유속을 설정하였다.

사용된 광원은 형광등(SYLVANIA Gro-Lux Lamp, F20W/GRO)으로 자연광이 갖는 파장과 파장별 에너지 분포가 유사한 광을 방출하는 식물 성장용으로 제작된 lamp를 사용하였다. 관형반응기에서는 PAR(Photosynthetically Active Radiation)과 일치하는 광측정의 수단으로 반응기에 조사된 quantum의 양이 측정되었다. 사용된 계측기는 Quantum-Radiometer-Photometer (LI-COR, LI-189)이며, 측정된 광조사량의 단위는 $\mu\text{E}(\text{Einstein})/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 이다.

실험에 사용된 관형 반응기와 이산화탄소 용해조 및 배관부를 포함한 총 배양부피는 6.5 L이다.

결과 및 고찰

회분식 배양에서 성장 변화

회분식 배양기에서 이산화탄소 조성과 pH의 제어 여부에 대한 균체의 성장 변화를 보았다. 배양조건 1은 1% 이산화탄소 혼합공기를 공급하여 주면서 배양 종료까지 pH 7.1을 유지하여 주었으며, 배양조건 2는 초기 pH 7.1에서 pH의 제어없이 1% 이산화탄소 혼합공기를 공급하면서 배양되도록 하였다. 배양조

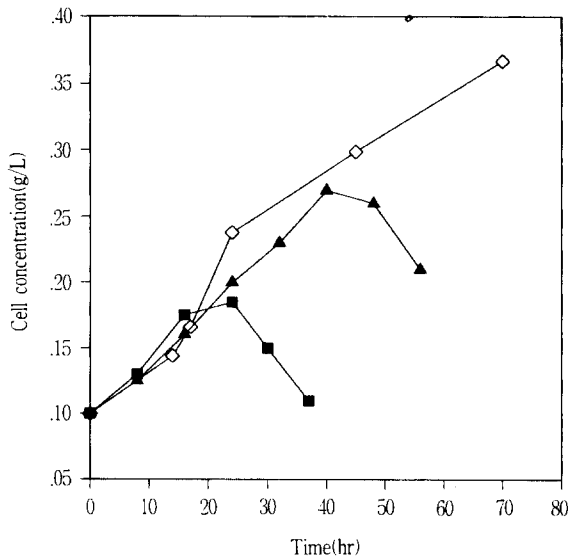
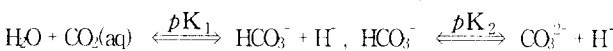


Figure 2. Growth of *Synechocystis* PCC 6803 with and without pH control.

◇ : 1% CO₂ controlled; ▲ : 1% CO₂ uncontrolled; ■ : 3% CO₂ uncontrolled

건 3은 배양 종료까지 초기 pH 7.1이 제어되지 않은 상태에서 3% 이산화탄소 혼합공기가 공급되었다. 각 조건별로 배양된 결과는 Figure 2와 같다.

Figure 2를 보면 pH가 제어되는 경우 지속적인 성장이 이루어지는 것에 반하여 배양액의 pH가 제어되지 않는 경우 성장이 멈추고 있어 고농도 배양을 위해서는 pH의 제어가 따라야 함을 나타내고 있다. 1%의 이산화탄소 혼합공기는 초기에 pH 유지를 위해 0.5N-NaOH 용액이 주입되었고, 성장이 진행되면서 부터는 NaOH를 추가 공급할 필요가 없었으며, 오히려 성장이 활발해지면서 pH가 상승하였고 이의 제어를 위하여 0.5N-HCl 용액이 공급되었다. 1% 이산화탄소 혼합공기가 공급되는 배양에서 pH의 제어가 없는 경우 배지는 배양이 진행되면서 pH가 상승하며, 이러한 pH 상승은 배지에 용해된 이산화탄소의 소비로 균체가 성장하고, 배지에는 bicarbonate ion(HCO₃⁻)이 축적되어 일어난다.



즉, 위와 같은 반응에 있어서 해리상수값은 $pK_1 < pK_2$ 이므로 생성된 bicarbonate가 해리되는 속도보다 커지게 되어, 소비를 위한 양보다 많은 양의 bicarbonate가 배지에 축적되었기 때문에 pH의 상승이 나타나게 된다.

관형 반응기에서 성장 변화

광강도 45.5 μE/m²·s, 배양 온도 31±1°C, pH 7.1±1의 배양 조건에서 공기와 1%, 3%, 5%, 10%, 20%로 각각 이산화탄소 조성을 달리하는 혼합공기를 1L/min의 유속으로 배지에 공급하였으며, 이에 따라 배양된 균체의 성장 경향을 Figure 3에 나타내었다.

주어진 이산화탄소 혼합공기 조성에서 가장 우수한 균체의 성

장을 보인 것은 5% 조성에서였으며, 10% 이상의 이산화탄소 혼합공기에서도 배양은 이루어졌으나 5% 조성에 비해 성장율이 낮아지고 있음을 알 수 있었다. 10% 이상의 혼합공기에 대한 성장감소는 기질에 의한 성장저해로 보여지며, 이러한 결과에 대하여 배지에 대한 이산화탄소의 용존 가능량을 검토하였다. 이산화탄소에 대한 0~60°C에서의 Henry 상수를 선형화한 후, 배지에서 이산화탄소의 농도를 평형상태로 보고 이론적으로 계산한 이산화탄소 조성별 용해도를 Table 1에 나타내었다.

배지의 pH에 따라 용존 이산화탄소와 bicarbonate의 양이 달라지게 되므로 Table 1의 계산값이 배지에서 동일량 존재한다고 볼 수는 없으나 간접적인 지표로 볼 때 배지에서는 6.45×10⁻² g/L(5% 이산화탄소 혼합공기) 이상의 농도에서는 과잉의 이산화탄소에 의한 성장저해가 있는 것으로 보인다.

일반적으로 광합성 미생물은 5~10% 이산화탄소 혼합공기에서 성장이 저해되는 것으로 알려져 있으며, 최근 분리동정된 *Oocystis* sp., *Chlorococcum littorale* 등의 일부 광합성 미생물은 20% 이산화탄소에서 성장하는 것으로 보고되고 있다(11, 15). 본 배양에서 10% 이상의 이산화탄소 혼합공기에서도 배양이 이루어진 것은 pH 제어에 따른 용존 이산화탄소에 의한 배지의 산성화 억제에 있는 것으로 보이며, 반면 5% 이산화탄소 조성의 성장과 비교한 성장감소는 용존 이산화탄소의 증가에 따

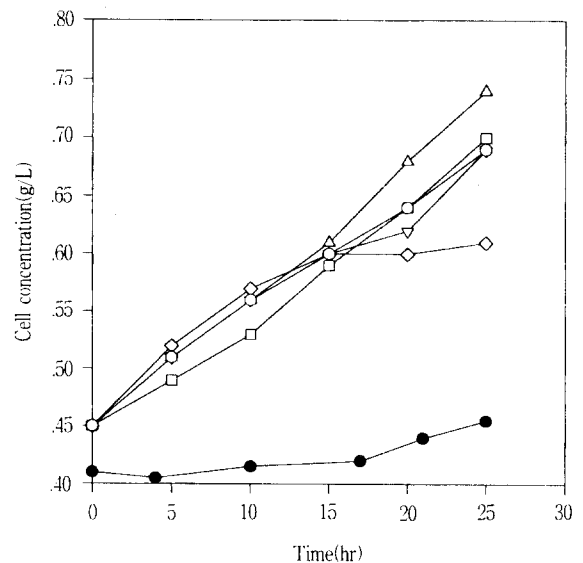


Figure 3. Effect of concentration of carbon dioxide-air mixture on the growth of *Synechocystis* PCC 6803.

● : 0.03% CO₂ (air); ◇ : 1% CO₂; ▽ : 3% CO₂; △ : 5% CO₂; □ : 10% CO₂; ○ : 20% CO₂

Table 1. Calculated solubilities of carbon dioxide from Henry's constants(at 31°C).

| Content (v/v%) | 0.03 (air) | 1 | 3 | 5 | 10 | 20 |
|------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|-----------------------|
| Solubility (g/L) | 3.87×10 ⁻³ | 1.29×10 ⁻² | 3.87×10 ⁻² | 6.45×10 ⁻² | 1.29×10 ⁻¹ | 2.58×10 ⁻¹ |

른 기질저해로 생각된다.

위의 같은 이산화탄소 조성에 따른 배양결과에 대하여 성장관계를 고찰하면, Ogbonna 등(16)은 *Chlorella pyrenoidosa* C-212와 *Spirulina platensis* M-135의 성장을 나타내기 위해 사용한 성장속도식은 기질의 항을 광에너지의 초기 광강도로 대체하여 Monod 모델과 동일한 형태로 다음과 같이 표현하고 있다.

$$\mu = \frac{\mu_{max} \times I_0}{K_L + I_0}$$

I_0 : 입사 광강도 ($\mu E/m^2 \cdot s$)

Molina Grima 등(17)은 기질에 따른 배양과 관련지어 표현된 Moser 모델이나 Bannister 모델과 유사한 형태로 다음과 같이 나타내고 있다.

$$\mu = \frac{\mu_{max} I_{mn}^n}{I_k^n + I_{mn}^n}$$

I_{mn} : 평균 광강도 ($\mu E/m^2 \cdot s$)
 I_k : 광에 대한 균체의 친화력을 나타내는 상수 ($\mu E/m^2 \cdot s$)

위의 모델들은 Monod 모델과 기본 형태를 같이 하고 있음을 알 수 있다. 따라서 Monod 모델을 기본으로 하여 Moser의 비성장 속도식, 그리고 저해작용을 받는 경우에 대한 Andrew의 비성장 속도식에 대하여 유일 탄소원인 이산화탄소를 기질로 고려한 성장속도에 대한 비교를 통하여 실험에 사용된 *Synechocystis* PCC 6803의 성장속도식을 알아보았다.

실험값과 비교한 결과는 Figure 4와 같다. 일반적인 성장속도에 관련된 Monod 모델 등은 지속적인 성장에 의하여 최고값에 이르게 되므로 본 실험에서 얻어진 결과와는 다소 상이한 경향을 보이고 있음을 알 수 있다. 이산화탄소 조성에 따른 배양결과는 기질에 의한 성장저해에 적용되는 Andrew 모델에 대하여

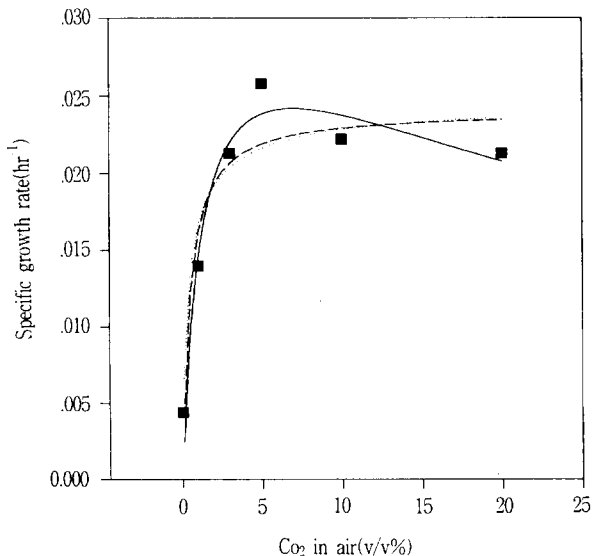


Figure 4. Comparison of growth rate models with experimental data.

----- Monod model, Moser model,
 _____ Andrew model, ■ Experimental

$$\mu = 0.0329 \frac{c}{1.247 + c + c^2/38.45}$$

c : 이산화탄소 조성

와 같은 상수값을 가지면서 실험값과 경향을 같이하였다.

초기균체농도에 따른 성장 변화

광생물 반응기에서 배지에 적정 균체량을 보유한다는 것은 최대의 광에너지 전환효율과 최대의 균체생성량을 얻기 위한 기본 전제가 된다. 단위시간당 균체의 생산을 최대로 하기 위한 연속 배양의 경우 적절한 균체량을 알아내고 배지에서의 균체농도를 조절하여 배양을 진행함으로써 최대 균체생성량을 얻을 수 있다. 이러한 목적에 따라 이산화탄소 조성 5%(v/v%)에서 초기 접종 균체농도에 따른 단위 시간당 균체생장을 비교하였다.

5% 이산화탄소 혼합공기 조성에서의 최대의 균체생성을 갖는 조건을 보기 위하여 0.23 g/L, 0.45 g/L, 0.7 g/L, 1.1 g/L, 1.8 g/L로 초기균체농도를 변화시켜 배양을 하였다. 단위시간당 균체 생성량은 선형적인 성장구간에 대하여 구해졌으며, 배양시간은 광의 흡수와 간섭에 따른 영향을 적게하기 위하여 낮은 농도에 대하여는 50 시간 이하의 배양시간을, 나머지는 100 시간을 전후한 배양시간을 유지하였다. 균체의 성장 결과는 Figure 5와 같다.

초기균체농도의 증가에 따라 단위 시간당 균체 생성량이 지속적으로 증가하는 것은 아니었으며, 0.45 g/L일 때 단위 시간당 균체 생성량이 0.278 g/L·day로 가장 많았고, 0.23 g/L에서 단위시간당 균체생성량이 적은 것은 주어진 광을 이용하기 위한 초기균체량이 너무 적기 때문인 것으로 보인다.

균체농도에 의한 광흡수와 산란에 따른 광이용 효율에 대하여 수치적인 관계식을 구하지는 않았으나 실험결과에 따라 초기균체농도가 클수록 선형구간의 기울기가 점차 낮아짐을 알 수 있으며, 초기농도 1.8 g/L에서 시작된 배양에서는 균체 농도 2.03 g/L에서 성장이 정상상태를 유지하였다. 이때의 광강도는 $45.5 \mu E/m^2 \cdot s$ 이었다. 균체의 성장에 따라 광투과율이 극히 저하되므로 균체가

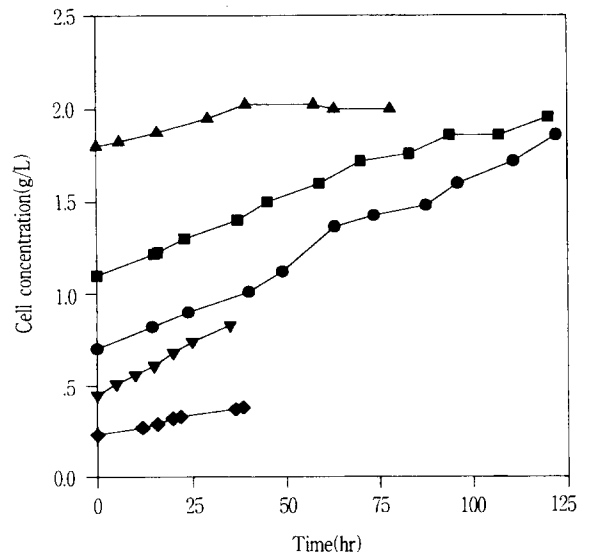


Figure 5. Growth of *Synechocystis* PCC 6803 with initial cell concentration (5% carbon dioxide-air mixture).

◆ : 0.23→0.38 g/L; ▼ : 0.45→0.74 g/L; ● : 0.7→1.86 g/L;
 ■ : 1.1→1.957 g/L; ▲ : 1.8→2.03 g/L

성장을 위한 에너지를 충분히 공급받지 못하고 성장속도와 사멸속도가 같아 성장이 정체를 이룬 상태이며, 이 농도는 구성된 시스템의 배양조건 하에서 최대 균체농도가 되었다. 초기균체농도에 따른 균체 생성량은 초기균체농도 0.45 g/L → 0.7 g/L → 1.1 g/L → 1.8 g/L → 0.23 g/L의 순서로 이루어져 반응기 내에서의 적정 균체농도 유지가 최대의 이산화탄소 고정화의 관건이 되고 있음을 보여 주었다.

이산화탄소 전환율

배양된 *Synechocystis* PCC 6803의 C, H, N, O, S의 구성비율은 다음과 같다.

C = 47.24%, H = 7.96%, N = 10.72%, O = 27.89%, S = 0.24%

구해진 조성에 의하여 *Synechocystis* PCC 6803의 분자식은 C₁₁₀H_{2,022}N_{0.194}O_{0.443}S_{0.002}로 계산되었으며, 분자량은 23.89 g/mol 이 되었다.

배양된 1 g의 세포에 대하여 수율계수, Y_{x/Carbon}는

$$Y_{x/Carbon} = \frac{1 \text{ g - cell}}{0.4724 \text{ g - Carbon}} = 2.116 \text{ g - cell/g - Carbon}$$

이 되며, 이산화탄소에 대하여는

$$Y_{x/CO_2} = \frac{1 \text{ g - cell}}{0.4724 \text{ g - Carbon} \cdot \frac{44 \text{ g - CO}_2}{12 \text{ g - Carbon}}} = \frac{1 \text{ g - cell}}{1.7321 \text{ g - CO}_2} = 0.577 \text{ g - cell/g - CO}_2$$

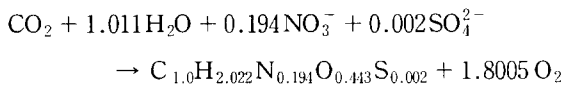
의 값을 나타내었다.

원소분석 결과를 토대로 따라 균체 생성에 대한 양론식을 보면 다음과 같다.

Table 2. Growth of photosynthetic microorganisms in various conditions.

| Photosynthetic microorganism | Reactor | Light intensity | Cell production | Working volume | Specific growth rate |
|--|--|----------------------------|--|--------------------------------------|--|
| <i>Synechococcus</i> sp.(18) | OFR ¹⁾ (filtration culture) | 20 μE/m ² · s | 6.76→7.76 g/L (12h culture) | 2.5L | |
| <i>Isochrysis galbana</i> AL II-4(19) | T-PBR ²⁾ (inner dia.2.6cm) | outdoor culture | 0.32g/L · day (max. cell conc. 4 g/L) | 50L | -avg. 0.016 h ⁻¹ -daylight period(9h) 0.042 h ⁻¹ |
| <i>Acrosiphonia coalita</i> (20) | ST-PBR ³⁾ (inner dia. 13cm) | 77 μE/m ² · s | 200→1.083 mg/L (15day culture) | 3L | 0.185 day ⁻¹ |
| <i>Chlorella vulgaris</i> (8) | OFR s/v ratio 3.2cm ² /cm ³ | 1.7 mW/cm ² | 0.3-0.4 g/L · h | -reactor 0.6L -total 1L | |
| <i>Spirulina maxima</i> (5) | FTR ⁴⁾ (light path 5cm) | 30 klux | -areal prod. 60.5 g/m ² · day -volumetric prod. 1.17 g/L · day | 64L | |
| <i>Spirulina platensis</i> M-135(16) | Rectangular reactor | 200 μE/m ² · s | 169.7±34.7 g/m ³ day | 200L | 0.083h ⁻¹ |
| <i>Chlorella pyrenoidosa</i> C-212(16) | | 300 μE/m ² · s | 50.6±14.2 g/m ³ day | | 0.286h ⁻¹ |
| this study | T-PBR | 45.5 μE/m ² · s | 0.0116 g/L · h (max. cell conc. 2.03 g/L) | -tubular reactor 4.7L -total 6.5L | 0.0258h ⁻¹ |

- 1) optical fiber reactor
- 2) tubular photobioreactor
- 3) stirred tank photobioreactor
- 4) flat tank reactor



초기균체농도와 이산화탄소 조성에 따른 실험에서 얻어진 결과 가운데 $45.5 \mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 의 광강도 조건 하에서 가장 우수한 성장을 보인 5% 이산화탄소 혼합공기 조성과 초기농도 $0.45 \text{g}/\text{L}$ 로부터 얻어진 성장 결과로부터 산출된 이산화탄소의 고정화 속도는 $0.482 \text{g-CO}_2/\text{L} \cdot \text{day}$ 가 되었다.

Table 2에는 본 반응기에서 배양된 결과를 다른 균주나 반응기에서 성장된 결과와 비교하였다. 배양 목적과 균주, 반응기의 형태가 각각 달라 객관적인 비교가 어려웠으나 전반적인 광합성 미생물의 성장속도나 균체 생성량에 대한 배양 결과는 다소 낮게 나타났다. 그러나 본 실험에 사용된 균주가 wild type으로서 성장 개선에 대하여 어떠한 유전적 조작이 이루어지지 않은 상태이기 때문에 향후 균주 개발에 따른 이산화탄소 고정화능의 개선이 기대된다.

요 약

광합성 미생물의 고농도 배양에 의한 이산화탄소 고정능에 대한 기초 연구로써 관형 광생물반응기를 이용하여 이산화탄소 조성 및 초기균체농도에 따른 성장 경향을 보았다. 배지의 pH가 제어되고 있는 조건하에서 20% 이산화탄소 혼합공기가 공급되는 조건에서도 성장이 이루어졌다. $45.5 \mu\text{E}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ 의 광강도에서 5% 이산화탄소 혼합공기 조성과 $0.45 \text{g}/\text{L}$ 의 초기균체농도에서 성장속도가 가장 우수하였으며, 비성장속도는 0.0258h^{-1} 를 나타냈고, 단위 시간당 균체생성량은 $0.278 \text{g}/\text{L} \cdot \text{day}$ 이다. 관형 반응기에서 최대균체농도는 $2.03 \text{g}/\text{L}$ 까지 배양되었다. 배양된 균체의 원소성분분석을 통하여 *Synechocystis* PCC 6803의 분자식은 $\text{C}_{1.0}\text{H}_{2.022}\text{N}_{0.194}\text{O}_{0.443}\text{S}_{0.002}$ 로 계산되었고, 이산화탄소 고정화속도는 $0.482 \text{g-CO}_2/\text{L} \cdot \text{day}$ 의 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

1. Waburg, O. and E. Negelein (1923), *Z. Physik. Chem.*, **106**, 191.
2. Aiba, S. and T. Ogawa (1977), Assessment of Growth Yield of a Blue-green alga, *Spirulina platensis*, in Axenic and Continuous Culture, *Journal of General Microbiology*, **102**, 179-182.
3. Suzuki, T., K. Nishimura, K. Ohtaguchi, and K. Koide (1991), Chemometrics Approach to the Analysis of a Synergism of Temperature, Light Intensity and Carbon Dioxide Concentration on the Growth of *Anacystis nidulans*, *Journal of Chemical Engineering of Japan*, **24** (5), 563-568.
4. Pirt, S. J., Y. K. Lee, M. R. Walach, M. W. Pirt, H. H. M. Balyuzi, and M. J. Bazin (1983), A Tubular Bioreactor for Photosynthetic Production of Biomass from Carbon Dioxide: Design and Performance, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **33B**, 35-58.
5. Samon, R. and A. Leduy (1985), Multistage Continuous Cultivation of Blue-green alga *Spirulina maxima* in the Flat Tank Photoreactors with Recycle, *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, **63**, 105-112.
6. Matsumoto, M., N. Hanagata, H. Uehara, and Y. Fukujū (1994), 光合成微生物を利用したCO₂固定化技術の研究, 三井造船技報, **151**, 1-6.
7. Markov, S. A., M. J. Bazin, and D. O. Hall (1995), Hydrogen Photoproduction and Carbon Dioxide Uptake by Immobilized *Anabaena variabilis* in a Hollow-fiber Photobioreactor, *Enzyme and Microbial Technology*, **17**, 306-310.
8. Javanmardian, M. and B. O. Palsson (1991), High-Density Photoautotrophic Algal Cultures: Design, Construction, and Operation of a Novel Photobioreactor System, *Biotechnology and Bioengineering*, **38**, 1182-1189.
9. Marcus, Y., R. Schwarz, D. Friedberg, and A. Kaplan (1986), High CO₂ Requiring Mutant of *Anacystis nidulans* R₂, *Plant Physiol.*, **82**, 610.
10. Price, G. D. and M. R. Badger (1989), Isolation and Characterization of High CO₂-Requiring Mutants of the Cyanobacterium *Synechococcus* PCC 7942, *Plant Physiol.*, **91**, 514-525.
11. Ogawa, T. (1990), Mutants of *Synechocystis* PCC 6803 Defective in Inorganic Carbon Transport, *Plant Physiol.*, **94**, 760-765.
12. Takeuchi, T., K. Utsunomiya, K. Kobayashi (1992), Carbon dioxide Fixation by a Unicellular Green alga *Docgstis* sp. *Journal of Biotechnology*, **25**(3), 261.
13. Bergy's Manual of Systematic Bacteriology (1989), Vol. 3, Section 19, pp. 1742-1746, Williams & Wilkins Co.
14. Anderson, S. L. and L. McIntosh (1991), Light-Activated Heterotrophic Growth of the Cyanobacterium *Synechocystis* sp. Strain PCC 6803: a Blue-Light -Requiring Process, *Journal of Bacteriology*, **173**(9), 2761-2767.
15. Karube, I., T. Takeuchi, and D. J. Barnes (1992), Biotechnological Reduction of CO₂ Emissions, *Advances in Biochemical Engineering/Biotechnology*, **46**, 63-79.
16. Ogonna, 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. Ferment. Bioeng.*, **79**(2), 152-157.
17. Molina Grima, E., F. Garcia Camacho, J. A. Sanchez Perez, J. M. Fernandez Sevilla, F. G. Acien Fernandez, and Contreras Gomez, A. (1994), A Mathematical Model of Microalgal Growth in Light-Limited Chemostat Culture, *J. Chem. Tech. Biotechnol.*, **61**, 167-173.
18. Takano, H., H. Takeyama, N. Nakamura, K. Sode, J. G. Burgess, E. Manabe, M. Hirano, and T. Matsunaga (1992), CO₂ Removal by High-Density Culture of a Marine Cyanobacterium *Synechococcus* sp. Using an Improved Photobioreactor Employing Light-Diffusing Optical Fibers, *Applied Biochemistry and Biotechnology*, **34/35**, 449-458.

19. Molina Grima, E., J. A. Sanchez Perez, F. Garcia Camacho, J. L. Garcia Sanchez, F. G. Acien Fernandez, and D. Lopez Alonso (1994), Outdoor Culture of *Isochrysis galbana* ALII-4 in a Closed Tubular Photobioreactor, *Journal of Biotechnology*, **37**, 159-166.
20. Rorrer, G. L., C. Zhi, and M. Polne-Fuller (1996), Development and Bioreactor Cultivation of a Novel Semidifferentiated Tissue Suspension Derived from the Marine Plant *Acrosiphonia coalita*, *Biotechnology and Bioengineering*, **49**, 559-567.