

Spirulina Platensis NIES 39를 이용한 Polyethylene Bag 반응기에서의 이산화탄소 고정화

김영민 · 김지윤 · 이성목 · 하종명 · 권태호^{*,†} · 이재화[†]

신라대학교 공과대학 생명공학과, *전주생물소재연구소
(2009년 12월 1일 접수, 2010년 2월 23일 채택)

Carbon Dioxide Fixation using *Spirulina Platensis* NIES 39 in Polyethylene Bag

Young Min Kim, Ji-Youn Kim, Sung-Mok Lee, Jong-Myung Ha, Tae Ho Kwon^{*,†}, and Jae-Hwa Lee[†]

Department of Bioscience and Biotechnology, Collage of Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

*Jeonju Biomaterials Institute, Jeonju 561-360, Korea

(Received December 1, 2009; Accepted February 23, 2010)

현재의 값비싼 광생물반응기를 대체하기 위하여 비닐백을 소재로 한 보급형 광생물반응기를 개발하고자 본 연구를 실시하였다. 앞선 연구에서 *Spirulina platensis* NIES 39의 최적배양조건을 확립하였으며, 이를 토대로 하여 이산화탄소 고정화 연구를 실시하였다. 이산화탄소 농도 및 유속에 따른 성장은 10% CO₂, 0.1 vvm의 조건에서 가장 높은 2.677 g/L의 건조균체량을 나타냈으며, 이산화탄소 고정화량(F_{CO_2})은 4.056 g · CO₂/L, 이산화탄소 고정화속도(R_{CO_2})는 0.312 g CO₂/L/day로 나타났다. 반면, 이산화탄소 고정화 효율(FE_{CO_2})의 경우 5% CO₂, 0.1 vvm의 조건에서 나타난 데이터에 비해서 그 절반 수준인 52.372%를 나타내었다. 그리고 빛의 유무에 따른 이산화탄소 주입효과를 알아본 결과, 빛이 있는 조건에서 약 3 h 주기로 10 min간 주입하는 조건이 가장 우수한 성장 및 이산화탄소 고정화를 한 것으로 나타났으며, 빛이 없을 때는 이산화탄소 주입이 무의미하다는 결론을 얻을 수 있었다.

To replace current expensive photobioreactor, this study was conducted to develop low-cost photobioreactor made of polyethylene bag. In previous study, optimal culture conditions of *Spirulina platensis* NIES 39 have been established, and based on these, the study of biological carbon dioxide fixation has been conducted. The maximum growth was the biomass 2.677 g/L at conditions of 10% CO₂, 0.1 vvm. It was shown that F_{CO_2} was 4.056 g CO₂/L and R_{CO_2} was 0.312 g CO₂/L/day. But, compared with the data at conditions of 5% CO₂, 0.1 vvm, FE_{CO_2} was shown 52.372% which is half of it. Regarding the effect of CO₂ following illumination, the growth revealed that the input conditions, for 10 min per 3 h, were excellent in the light. CO₂ in absent light. CO₂ concentration and flow rate were 5% CO₂, 0.1 vvm, respectively. Finally, the addition of CO₂ was ineffective in the absence of light.

Keywords: CO₂ fixation, *Spirulina platensis* NIES 39, polyethylene bag, photobioreactor

1. 서 론

현재 전 세계적인 관심을 가지는 환경문제 가운데 지구온난화는 인구증가와 더불어 지나친 화석연료의 사용으로 인해 발생되었다. 이것은 대기 중에 이산화탄소와 각종 온실가스의 축적으로 지구에서 방출되는 적외선을 흡수하기 때문이라고 알려져 있다. 대기 중의 이산화탄소 농도가 증가하면서 연평균기온이 상승하였고[1], 이로 인해 극지방의 빙하가 녹아 해수면이 상승하는 등[2]의 많은 환경문제를 야기시키고 있다. 이에 대한 해결을 위하여 UN 기후협약, 발리 기후협약을 통해 탄소배출에 대한 세금을 부과하는 등 이산화탄소 저감을 위한 국제적, 제도적인 노력을 보이고 있다.

현재 이산화탄소를 처리하기 위해 흡착법이나 막 분리법 같은 물리적

방법[3-5]과 화학적 또는 생물학적방법으로 많은 해결방안이 거론되고 있다. 특히 자연계의 탄소순환 메커니즘을 이용하는 것으로써 가장 환경친화적인 방법[6,7]으로 평가되는 생물학적 이산화탄소 고정화기술의 경우 낮은 초기투자비, 상온 상압 조업에 따른 저렴한 운전비 등의 경제성 면에서 큰 장점을 지니고 있기 때문에 미세조류와 관련된 폭넓은 연구의 중요성이 부각되고 있다. 미세조류는 태양광을 주 에너지원으로 하는 광합성기작을 이용하기 때문에 기후가 온화한 하와이, 미얀마, 태국, 브라질, 중국, 영국 등에서 설치비용이 저렴한 open pond 형태로 상업화하고 있다[8,9]. 그리고 이산화탄소 고정화효율을 증진시키기 위한 광생물반응기(photobioreactor, PBR)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 상용화되고 있는데, 이러한 기술은 이산화탄소 배출이 많은 발전소, 정유공장 등에 적용할 수 있으며, 이를 위해 배기가스에 포함된 10~20% 가량의 이산화탄소 농도에 내성을 가지는 미세조류 선발 및 개량이 필수적이라고 할 수 있다[10,11].

† 교신저자(e-mail: jhalee@silla.ac.kr, thkwon@jbmi.re.kr)

미세조류의 배양형태는 관형, 관형, 수직형 등의 광생물반응기 (photobioreactor, PBR), 일반 노지에서 배양하는 open pond 형태가 주를 이루고 있다. 이 open pond 형태의 배양은 일교차가 적고, 적정수준의 태양광이 제공되어야 하며 유희부지가 필요하다. 상기 언급한 하와이, 미얀마, 태국, 브라질, 중국 등의 일부 지역에서는 이런 조건들이 갖추어져 있어 실용화하고 있으나, 이런 방법은 온도변화와 오염 등의 문제가 있어 생산성이 극히 낮다는 단점을 지닌다[12]. 광생물반응기의 경우 균체성장 및 유용물질 생산에 필요한 조건들을 조절함으로써 생산성을 극대화하는 시스템이기 때문에 연교차가 크고 부지확보에 어려움을 겪고 있는 우리나라에 적합하다고 할 수 있다. 따라서 우리나라에서도 광생물반응기에 대한 관심이 증가되고 있고 상용화를 위한 움직임이 활발하다. 광생물반응기는 우수한 생산성을 가진 반면에 초기 시설비와 운용비가 비싸다는 단점을 가지고 있어 실용화하기 위해서는 많은 노력이 필요하다[13]. 미국의 Green fuel사에서는 발전소에 대량의 미세조류를 배양하고 있으며, 일부 polyethylene (PE) bag 을 이용하여 배양을 수행함으로써 발전소의 배가스에 포함된 이산화탄소를 처리하고 있다. 그 외에도 세계 각국의 연구자들은 PE 재질의 bag 형태로 배양을 하고 있으며, 몇몇 연구결과가 발표되기도 하였다[14]. 하지만 국내에서는 이런 비닐재질을 이용하여 미세조류를 배양한 연구결과는 찾아보기 힘들다. Polyethylene이나 polypropylene과 같은 비닐재질을 이용할 경우 유리나 아크릴 등을 이용한 광생물반응기에 비하여 제작단가가 매우 낮기 때문에 설비단가를 절감할 수 있고, 내구성과 투과도 역시 우수하여 향후 미세조류 산업에 큰 도움이 될 것으로 생각된다.

미세조류 중 남조류에 속하는 *Spirulina platensis* 역시 광합성을 통해 이산화탄소를 고정화 할 수 있으며, 차세대 에너지 및 식량원으로서 주목 받고 있다[12]. 따라서 미세조류를 이용할 경우 지구 온난화 문제와 대체 식량원의 생산으로 현재 인류가 가지고 있는 문제점을 동시에 해결할 수 있다는 점에서 중요성을 가진다. *Spirulina platensis*는 완전식품으로 단백질, 탄수화물, 지질, 무기질, 비타민 및 섬유질로 이루어져 있으며, 각각 50~70, 10~20, 5~10, 7~13, 8~10%를 함유하고 있어 필수 영양소가 고루 갖춰진 건강보조식품으로서 많은 사람들에게 관심을 받고 있다. 또한 광합성 색소인 클로로필 a를 함유하고 있어 식품이나 음료의 천연색소로 이용되며, 의약품의 원료로서도 이용 가능하다[15]. 형태는 0.5 mm 나선형이며, 세포벽은 얇고 부드러운 녹조류에 속하는 *Chlorella* 속에 비해 식용으로 섭취 시 영양성분의 흡수력이 훨씬 우수하다. 또한 갈알칼리에 내성을 가지고 있어 폐수처리 등의 환경 분야에 적용할 수 있으며[16-18], 건강보조식품[19,20], 화장품 분야[21], 사료[22,23] 등으로 많이 이용되고 있다. 따라서 이러한 특징을 바탕으로 1차적으로 산업체의 이산화탄소를 처리하고 2차적으로 생산된 균체를 회수하여 건강보조식품이나 식품 첨가물, 사료로 이용함으로써 보다 부가가치를 높일 수 있을 것으로 생각된다.

따라서 본 연구에서는 *Spirulina platensis* NIES 39를 이용하여 이산화탄소 고정화 연구와 현재의 고가 PBR를 대체할 수 있는 저가의 비닐 백 PBR의 가능성을 제시하고자한다.

2. 실험

2.1. 균주 및 배지

본 연구에서 사용된 *Spirulina platensis* NIES 39 (KCTC AG30033)는 한국생명공학연구원 생물자원센터로부터 분양받아 사용하였다. 균주 배양에 사용된 배지는 알칼리성 무기배지인 SOT 816 medium을 변형

Table 1. Composition of C Free SOT Medium for *Spirulina platensis* (Autoclave Separately SOT-1 and SOT-2. Add Aseptically After Medium Has Stood for 24 h)

| | Components | Amount |
|---|--|--------|
| SOT-1 (Distilled water 600 mL) | NaHCO ₃ | - |
| | K ₂ HPO ₄ | 0.5 g |
| | NaNO ₃ | 2.5 g |
| SOT-2 (Distilled water 400 mL) | K ₂ SO ₄ | 1 g |
| | NaCl | 1 g |
| | MgSO ₄ · 7H ₂ O | 0.2 g |
| | CaCl ₂ · 2H ₂ O | 0.04 g |
| | FeSO ₄ · 7H ₂ O | 0.01 g |
| | Na ₂ EDTA · 2H ₂ O | 0.08 g |
| | A5 Trace-metals solution | 1 mL |
| A5 Trace-metals solution (Distilled water 1 L) | H ₃ BO ₃ | 2.86 g |
| | MnSO ₄ · 7H ₂ O | 2.50 g |
| | ZnSO ₄ · 7H ₂ O | 0.22 g |
| | Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O | 0.21 g |
| | CuSO ₄ · 5H ₂ O | 0.08 g |

하여 C source를 제외한 SOT-C medium을 사용하였고[24], 조성은 Table 1에 나타내었다. SOT-1과 SOT-2를 각각 121 °C에서 15 min간 멸균, 냉각 후 혼합하여 사용하였고, pH는 6N-NaOH를 이용하여 9.5 ± 0.2로 조절하였다.

2.2. 배양조건

실험에 사용한 균주의 전배양 조건은 1 L flask에 working volume 600 mL, 초기 pH 9.5 ± 0.2, 온도 35 °C, 교반속도 180 rpm, 광주기 12 : 12 = L : D[25,26]으로 배양하였다. 초기 접종 농도는 0.50 g/L[27], 명반응 시 형광등을 이용하여 조사하였으며, 조도는 Luxmeter (TES-1332A, TES Electrical Electronic corp., Taiwan)를 이용하여 6500 lux를 유지, 조절하였다. 그리고 전배양은 미량의 이산화탄소가 함유된 일반 air를 주입하여 이산화탄소에 대한 적응을 실시하였으며, 여기서 성장이 우수한 균주를 선별하여 본 배양을 실시하였다. Air, CO₂ 주입에 따른 배양액 증발이 일어나는데 이는 멸균된 증류수를 이용하여 매일 보정하였으며, 이산화탄소 주입에 의해 pH가 낮아졌으며, 이는 멸균된 6 N-NaOH를 이용하여 pH 9.5 ± 0.2로 보정하였다[28].

2.3. 광배양장치 구성

비닐재질(PE)을 이용하여 적절한 길이로 절단하고 아래쪽은 접합하여 배양액이 흐르지 않도록 하였다. 그리고 PE bag 배양장치는 일반적으로 알려진 밀폐용기를 잘라 PE를 고정하고, air (CO₂)주입구, sampling port, 배기구를 연결하는 용도로 사용하였으며, 수직형 광배양장치 형태로 실험을 진행하였다. Sparger는 직경 15 mm glass filter를 자체 제작하여 사용하였으며, 배양기의 중앙부에 위치시켜 주입되는 air 또는 혼합기체가 상승하면서 자연적인 배양액의 순환이 이루어지도록 하였다(Figure 1). PE를 제외한 각각의 구성을 121 °C, 15 min의 조건으로 멸균하고, 광배양기 제작과정 또한 멸균된 환경에서 실시하였다. 결과로 나타내지는 않았지만 PE의 내부를 sampling하여 오염균의 존재 여부를 확인한 결과 오염균은 나타나지 않았다. 따라서 각각의 구성은 무균상태라고 판단하고 실험을 진행하였다.

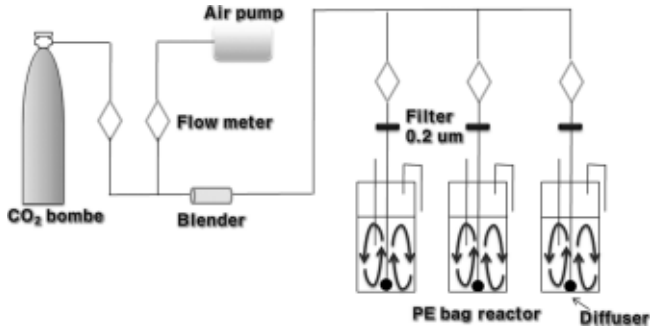


Figure 1. Schematic diagram of PE bag bioreactor for the cultivation of *Spirulina platensis* NIES 39.

2.4. 균체량 분석

균체량은 UV/Vis spectrophotometer (Optizen 2120UV, Mecacy Ltd., Korea)를 이용하여 520 nm에서 측정된 O.D 값과 건조 균체량 (dry cell weight, DCW)의 상관관계식을 이용하여 계산하였다. 건조 균체량은 항량 된 paper filter를 이용하여 여과된 균체를 105 °C에서 3 h 동안 건조시켜 그 무게를 측정하여 상관관계식을 산출하였다.

$$Dry\ cell\ weight\ (g/L) = 0.697 \times A_{520} + 0.137$$

2.5. 이산화탄소 고정화실험

본 연구에서는 이산화탄소 고정화에 관한 몇 가지 조건을 알아보는 실험을 진행해 보았다. *Spirulina platensis*의 최적 이산화탄소 농도 및 유속, 주입되는 이산화탄소량, 광원의 조사조건에 따른 이산화탄소 주입효과를 알아보기 위해서 자체 제작한 비닐백(PE) 광생물반응기에서 배양을 실시하였다.

먼저 *Spirulina platensis*의 최적 이산화탄소 농도 및 유속을 선정하기 위해서 air (0.038% CO₂), 5% CO₂, 10% CO₂를 각각 0.1 vvm, 0.2 vvm으로 실험을 진행하였다. 배양온도 35 °C, 6500~7000 lux, working volume 500 mL, 초기접종농도 0.6 g/L, 배양 중 pH 9.5 ± 0.2, 12 : 12 = L : D의 조건으로 실험을 진행하였다. 그리고 이산화탄소 농도와 유속은 자체 제작한 조절장치를 이용하여 조절하였으며, 주입되는 기체는 0.2 μm의 필터를 통과시켜 기체에 포함된 오염균을 배제시켰다. 실험 환경은 온도와 조도가 적절히 조절되는 incubator 내부에서 실시하였다.

*Spirulina platensis*의 이산화탄소 고정화 데이터를 측정하기 위하여 이론치를 산출해보았다. C free SOT medium에는 C source가 존재하지 않기 때문에 *Spirulina platensis*는 완벽한 독립영양적으로 성장이 이루어진다고 가정하고 측정하였다. 미세조류의 성장으로부터 고정화된 이산화탄소의 양(F_{CO_2} , g/L)은 특정시간에서의 균체농도(X , g/L) 및 초기 균체농도 (X_0 , g/L), 조류의 탄소함량(C_c , 0.507 g carbon/g DCW), 유출수 내의 균체농도(X , g/L) 및 이산화탄소의 분자량(M_{CO_2} , 44 g/mol)과 탄소의 원자량(M_c , 12 g/mol)의 비로부터 다음의 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$F_{CO_2} = C_c(X - X_0) \frac{M_{CO_2}}{M_c} \tag{1}$$

그리고 이산화탄소의 고정화속도(R_{CO_2} , g/L/day)는 배양과정에 있어서 균체의 탄소함량이 일정하다는 가정하에 상기 식 (1)을 미분하여 식 (2)와 같이 표기할 수 있다[29].

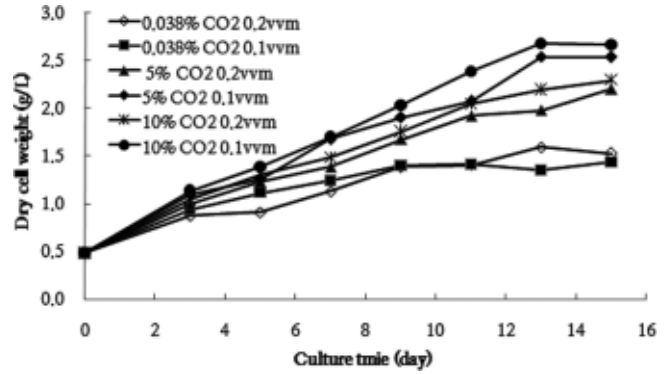


Figure 2. The influence of CO₂ concentration and flow rate on growth of *Spirulina platensis* NIES 39.

$$R_{CO_2} = \frac{dF_{CO_2}}{dt} = C_c \frac{M_{CO_2}}{M_c} \frac{dX}{dt} \tag{2}$$

이산화탄소 고정화율은 주입한 이산화탄소량을 산정하여 고정화된 이산화탄소량과의 백분율로 나타낼 수 있으며, 주입한 이산화탄소량은 증량으로 환산하여 측정하였다. 이때 이산화탄소의 부피를 증량으로 환산하기 위해서 van der Waals의 이상기체 보정식을 이용하였다. 0 °C, 1기압에서의 이상기체 방정식을 35 °C, 1기압의 실제 기체방정식으로 보정하여 사용하였다. 이 식은 정확하진 않더라도 실제치와 가까운 근사치를 얻기 위해 다음 식 (3)을 이용하여 보정하였다.

$$PV = nRT \Leftrightarrow \frac{P}{nR} = \frac{T}{V} \Leftrightarrow \frac{T}{V} = \frac{T^i}{V^i} \tag{3}$$

따라서 CO₂ 1 mol (44 g)의 0 °C, 1기압에서의 이상기체부피는 22.4 L이지만, 본 균주의 최적배양 조건인 35 °C, 1기압에서의 실제기체부피는 25.3 L이라는 값을 얻을 수 있다. 이러한 이론을 바탕으로 각각의 이산화탄소 고정화량과 고정화속도 그리고 고정화효율을 측정해 보았다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이산화탄소 농도 및 유속에 따른 양상

이산화탄소 농도 및 유속에 따른 영향을 알아보기 위해서 농도와 유속을 달리하여 최적 조건을 선정하였다(Figure 2). 각 조건에 따른 성장양상은 전체적으로 13일을 기점으로 성장이 저하되는 것을 알 수 있었으며, 결과는 이산화탄소 농도가 높을수록 성장이 우수하였으며, 유속의 경우 0.2 vvm보다 0.1 vvm의 조건이 보다 우수한 성장을 하는 것으로 나타났다. 5% CO₂ 0.2 vvm과 10% CO₂ 0.1 vvm을 비교해볼 때, 공급되는 이산화탄소량은 시간당 300 mL로 동일하지만 나타나는 성장양상을 비교했을 때는 유속이 빠른 경우 충분히 액상으로 녹아들 어가지 못하여 균체가 필요로 하는 탄소원이 부족했음을 의미한다. 따라서 최적 유속은 0.1 vvm이 적절하다고 볼 수 있다. 또한 이산화탄소 농도가 증가할수록 균체 성장이 우수하였으며, 10% CO₂, 0.1 vvm에서의 균체생산량은 약 2.677 g/L로 가장 우수한 결과를 나타내었다. 또한 이산화탄소에 대한 성장저해효과도 관찰되지 않았다.

이 결과를 이용해서 이산화탄소 농도 및 유속에 따른 각각의 고정화 parameter를 알아보았다(Figure 3). 이산화탄소 고정화값은 13일 동안

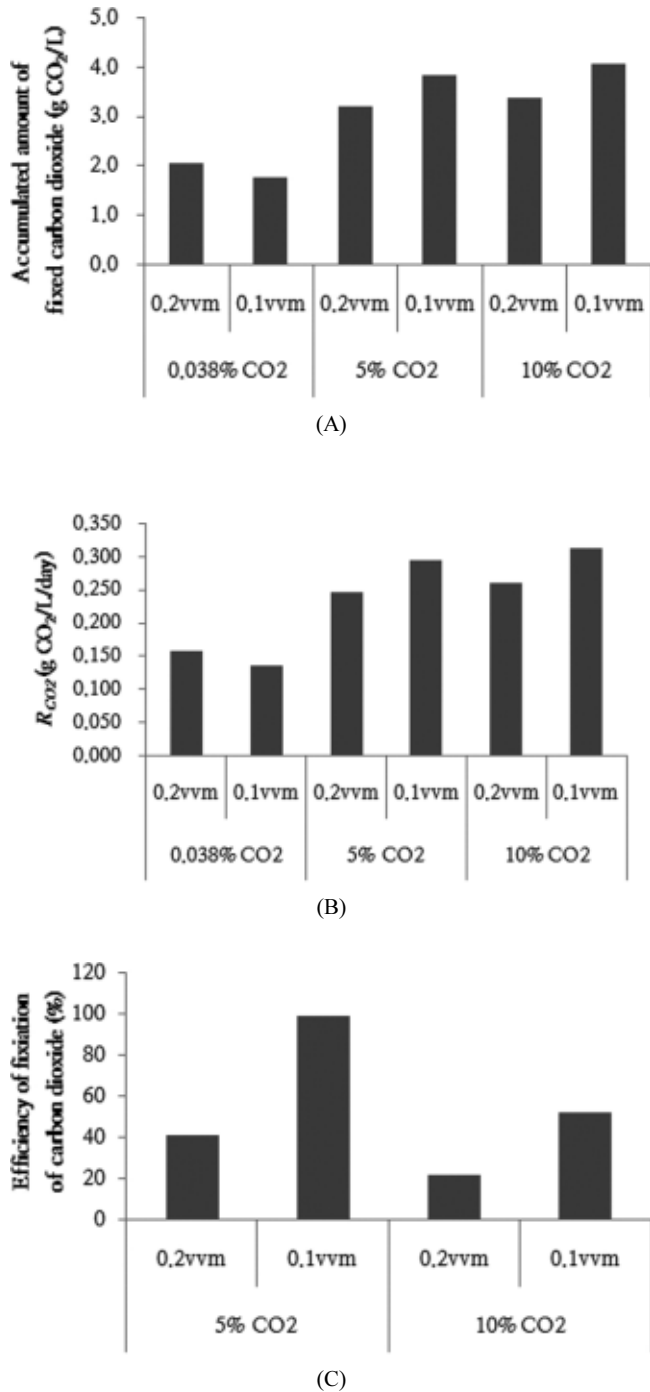


Figure 3. The accumulated amount of fixed CO₂ (A), CO₂ fixation velocity R_{co2} (B) and CO₂ fixation efficiency (C) of *Spirulina platensis* NIES 39 under the different conditions.

배양한 결과를 토대로 산정하였다. 먼저 고정화량과 속도는 균체의 성장과 비례하기 때문에 성장양상과 같은 경향을 나타내어 10% CO₂, 0.1 vvm에서 이산화탄소 고정화량 4.056 g/L로 가장 높게 나타났다. 그리고 고정화속도는 0.312 g/L/day로 가장 높게 나타났으며, air를 주입한 실험군에 비해서 약 두 배 가량 높게 나타났다. 이산화탄소 고정화효율을 알아본 결과 가장 높은 성장을 한 10% CO₂, 0.1 vvm에서는 52.372%로 주입한 이산화탄소량과 비교하여 절반정도만 탄소원으로

Table 2. Biomass Production, Fixed CO₂ Amount, Fixation Rate and Fixation Efficiency of *Spirulina platensis* NIES 39 at the Different Conditions

| | X _{max} (g/L) | F _{co2} (gCO ₂ /L) | R _{co2} (gCO ₂ /L/day) | FE _{co2} (%) |
|--------------------------------|------------------------|--|--|-----------------------|
| 0.038% CO ₂ 0.2 vvm | 1.596 | 2.064 | 0.159 | · |
| 0.038% CO ₂ 0.1 vvm | 1.349 | 1.766 | 0.136 | · |
| 5% CO ₂ 0.2 vvm | 1.982 | 3.192 | 0.246 | 41.218 |
| 5% CO ₂ 0.1 vvm | 2.542 | 3.819 | 0.294 | 98.615 |
| 10% CO ₂ 0.2 vvm | 2.196 | 3.369 | 0.259 | 21.748 |
| 10% CO ₂ 0.1 vvm | 2.677 | 4.056 | 0.312 | 52.372 |

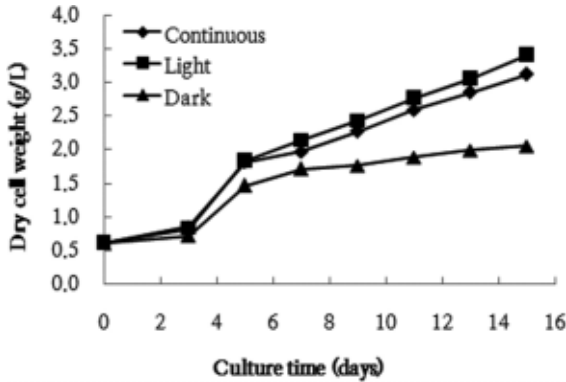
이용한 반면, 5% CO₂, 0.1 vvm에서 98.615%로 주입한 이산화탄소를 거의 대부분 이용한 것으로 나타났다. 따라서 향후 온실가스 저감연구에 있어 상기 조건이 최적이라고 생각이 되며, 이후 실험은 5% CO₂, 0.1 vvm 조건으로 진행하였다.

배양기간 동안에 pH를 유지하기 위해서 borate-NaOH, ammonium hydroxide buffer를 농도별로 사용하여 buffer 사용 가능성을 알아보았다. 데이터로 나타내진 않았지만, ammonium hydroxide buffer의 경우 균체에 독성을 나타냈으며, borate-NaOH buffer의 경우 성장저해효과를 나타내지 않아 농도별로 처리해보았다. Air의 경우 어느 정도 완충효과가 있었으며, 이산화탄소 주입 시 buffer의 농도가 증가할수록 완충효과가 강하게 나타났지만, 본 연구에서 필요로 하는 최적 pH 범위를 벗어났으며, 떨어진 pH는 최적치로 보정하는데 필요한 NaOH의 양이 많이 소요되기 때문에 적용할 수 없었다. 따라서 본 연구에서는 buffer의 사용은 배제시키고 이산화탄소 주입 후 멸균된 6 N-NaOH를 첨가함으로써 보정하는 방법을 이용한 결과, pH 변화는 배양 후반부로 갈수록 작았으며, 이는 주입된 이산화탄소가 중탄산염을 형성하면서 어느 정도의 완충효과를 나타낸 것으로 생각된다.

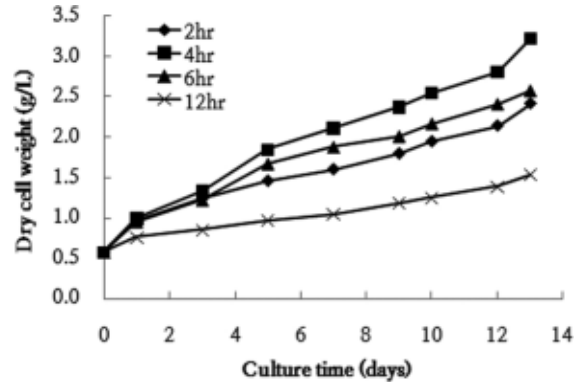
3.2. 빛의 조사 및 이산화탄소 주입조건에 따른 이산화탄소 고정화 연구

미세조류의 광합성 메커니즘에서 항시 이산화탄소를 필요로 하는 것은 아닐 것이라는 가정 하에 다음과 같은 실험을 하였다(Figure 4). 5% CO₂, 0.1 vvm의 조건으로 각각 빛이 존재할 때 이산화탄소를 주입하거나('Light') 빛이 없을 때 이산화탄소를 주입하거나('Dark') 그리고 항상 이산화탄소를 주입할 경우('Continuous') 실질적으로 이산화탄소가 고정화되는 효율을 알아보았다. 그 결과, 이산화탄소는 'Light'의 경우 즉, 광합성을 할 수 있는 광배양 기간 동안에만 이산화탄소를 주입한 실험 조건에서 가장 높은 결과를 나타냈다. 'Dark'의 경우, 균체의 성장은 2.056 g/L, 이산화탄소 고정화량 2.676 g · CO₂/L을 나타냈으며, 이 수치는 'Light'의 균체량 3.406 g/L, 이산화탄소 고정화량 5.186 g · CO₂에 비해서 절반 수준 밖에 되지 않았다. 그리고 'Light'와 'Continuous'의 데이터를 비교했을 때, 많은 이산화탄소를 넣어도 빛이 없을 때는 미세조류가 탄소원으로 충분히 이용하지 못하는 것을 알 수 있었다.

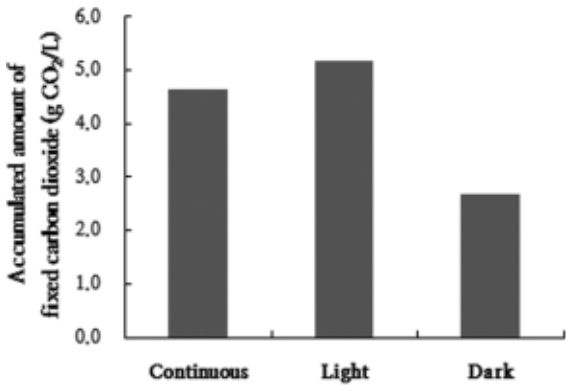
이 결과를 바탕으로 하여 상기 'Light'의 조건에서, 지속적으로 넣는 것보다 일정한 간격을 두고 주입할 경우 어떤 양상이 나타나는지 알아보았다(Figure 5). 실험은 각각 'Light'조건(광배양시기, 12 h) 하에서 2, 4, 6, 12 h 간격으로 각각 10 min, 0.1 vvm으로 주입한 결과를 차례로 '2 h', '4 h', '6 h', '12 h'로 각각 표기하여 그래프에 나타내었다. '4 h'의 경우 균체성장 3.215 g/L, 이산화탄소 고정화량 4.905 g



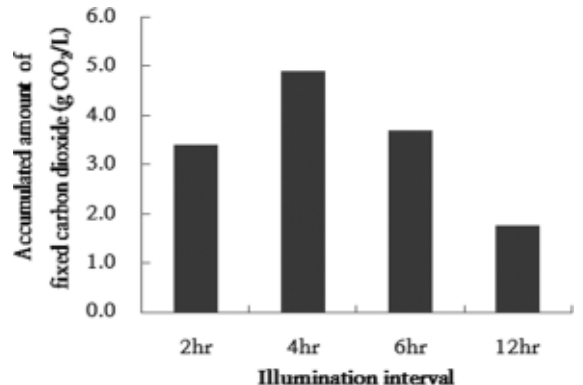
(A)



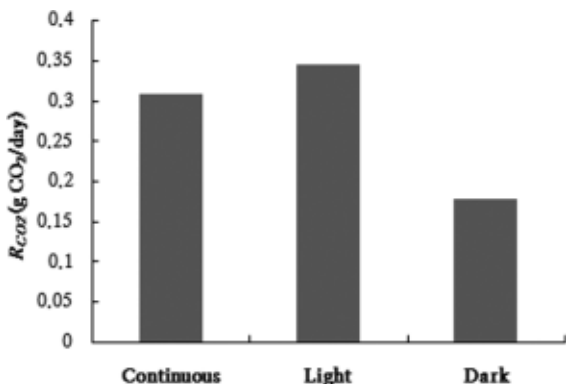
(A)



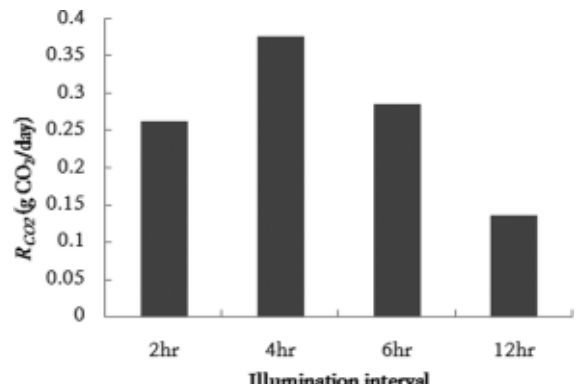
(B)



(B)



(C)



(C)

Figure 4. The growth (A), accumulated amount of fixed CO₂ (B) and CO₂ fixation velocity R_{CO_2} (C) of *Spirulina platensis* NIES 39 under the different conditions. Continuous : continuously illuminate at light and dark period, Light : illuminate at light period, Dark : illuminate at dark period.

으로 가장 우수한 결과를 보였으며, '2 h'의 경우 주입되는 이산화탄소의 양이 미세조류가 탄소원으로 이용할 수 있는 양에 비하여 과다한 양이며, 약간의 성장 저해효과도 나타났다. 그리고 '6 h', '12 h'의 경우 이산화탄소가 부족하여 성장이 낮았으며, '12 h'의 경우 '4 h'에 비해서 절반도 못 미치는 성장을 하였다.

Figure 5. The growth (A), accumulated amount of fixed CO₂ (B) and CO₂ fixation velocity R_{CO_2} (C) of *Spirulina platensis* NIES 39 under the different illumination interval.

4. 결 론

앞선 연구에서 *Spirulina platensis*의 최적배양조건을 규명하였으며, 본 실험에서는 이산화탄소 고정화를 위한 보급형 광생물반응기의 가능성을 알아보려고 이산화탄소 농도 및 유속선정, 최적의 이산화탄소 공급조건 등을 알아보았다. 그 결과, 이산화탄소 농도와 유속은 각각 5% CO₂, 0.1 vvm로 선정하였으며, 이 조건을 기본으로 빛이 있는 조건에서 4 h 마다 10 min 동안 이산화탄소를 주입하는 경우가 가장 높은 결과를 가져왔다. 이산화탄소를 10%로 주입하였을 때 균체의 성장이

보다 우수한 결과를 나타냈으나, 이산화탄소 고정화 효율을 비교해 본 결과 이산화탄소 농도 5%의 조건에서 더 우수하다는 것을 알 수 있었다. 따라서 상기조건을 최종적으로 선정하였으며, 이산화탄소 고정화를 위한 비닐백 광생물반응기의 이용가능성을 어느 정도 확인하였다. 이 결과를 토대로 scale-up 연구와 현재 5% CO₂에 최적성장을 나타내는 균주를 보다 높은 농도의 CO₂를 고정화할 수 있는 균주 개발에 관한 연구결과를 논할 것이다.

감 사

본 과제(결과물)는 지식경제부의 지원으로 수행한 에너지자원인력 양성사업의 연구결과입니다.

참 고 문 헌

1. S. H. Schmeider, *Science*, **243**, 771 (1989).
2. L. Binaghi, A. D. Borghi, A. Lodi, A. Converti, and M. D. Borghi, *Proc. Biochem.*, **38**, 1241 (2003).
3. H. K. Park, H. J. Park, and B. S. Kang, *DCER Techinfo part I*, **3**, 100 (2004).
4. I. H. Lee, S. I. Kim, and J. Y. Park, *Ind. Chem.*, **18**, 239 (2007).
5. H. D. Hwang, H. Y. Shin, H. H. Kwak, and S. Y. Bae, *Korean Chem. Eng. Res.*, **44**, 588 (2006).
6. T. Karube, T. Takeuchi, and D. J. Barnes, *Adv. Biochem. Eng. Biotechnol.*, **46**, 63 (1992).
7. D. O. Hall and J. I. House, *Energy Convers. Manag.*, **34**, 889 (1993).
8. A. V. C. Jorge, A. L. Giani, I. P. A. Daniel, M. M. Guilherme, and T. K. Roselini, *World J. Microbial. Biotechnol.*, **16**, 15 (2000).
9. M. Tredici, G. C. Zitelli, S. Biagiolini, and R. Materassi, *Bull. Inst. Oceanogr.*, **12**, 89 (1993).
10. H. M. Oh, J. S. Kim, and S. J. Lee, *Kor. J. of Environ. Biol.*, **16**, 291 (1998).
11. T. H. Kim, K. D. Sung, J. S. Lee, J. Y. Lee, S. J. Oh, and H. Y. Lee, *Kor. J. Appl. Microbiol. Biotechnol.*, **25**, 235 (1997).
12. S. M. Jeon, I. H. Kim, J. M. Ha, and J. H. Lee, *J. Korean Ind. Eng. Chem.*, **19**, 145 (2008).
13. D. S. Joo, C. K. Jung, C. H. Lee, and S. Y. Cho, *J. Korean Fish. Soc.*, **33**, 475 (2000).
14. F. Martínez-Jerónimo and F. Espinosa-Chávez, *J. Appl. Phycol.*, **6**, 423 (1994).
15. C. O. Rangel-Yagui, E. D. G. Danesi, J. C. M. Carvalho, and S. Sato, *Bioresour. Technol.*, **92**, 133 (2004).
16. R. Rippka, J. Deruelles, J. B. Waterbury, M. Herdman, and P. G. Roughan, *J. Sci. Food Agric.*, **47**, 295 (1989).
17. S. C. Babu and B. Rajasekaran, *Food Policy*, **9**, 405 (1991).
18. E. W. Becker and L. V. Vanattaraman, *Biomass*, **4**, 105 (1984).
19. O. Ciferri, *Microbiol. Rev.*, **47**, 551 (1983).
20. L. M. Mosulishvili, E. I. Kirkesali, A. I. Belokobylsky, A. I. Khizanishvili, M. V. Frontasyeva, S. S. Pavlov, and S. F. Gundorina, *J. Pharm. Biomed. Anal.*, **30**, 87 (2002).
21. J. Lu, G. Yoshizaki, K. Sakai, and T. Takeuchi, *Fish. Sci.*, **68**, 51 (2002).
22. A. Vonshak, *Biotechnol. Adv.*, **8**, 709 (1990).
23. T. Ogawa and G. Terui, *J. Ferment. Technol.*, **48**, 361 (1970).
24. M. G. Morais and J. A. V. Costa, *J. Biotechnol.*, **129**, 439 (2007).
25. C. C. Reichert, C. O. Reinehr, and J. A. V. Costa, *Braz. J. Chem. Eng.*, **23**, 23 (2006).
26. A. Vonshak, A. Abeliovich, S. Boussiba, S. Arad, and A. Richmond, *Biomass*, **2**, 175, (1982).
27. L. H. Pelizer, E. D. G. Danesi, C. O. Rangel, C. E. N. Sassano, J. C. M. Carvalho, S. Sato, and I. O. Moraes, *J. Food Eng.*, **56**, 371 (2003).
28. D. Soletto, L. Binaghi, L. Ferrari, A. Lodi, J. C. M. Carvalho, M. Zilli, and A. Converti, *Biochem. Eng. J.*, **39**, 369 (2008).
29. Y. S. Yun, J. M. Prak, and B. volesky, *Kor. J. Chem. Eng.*, **37**, 800 (1999).