

이산화탄소 농도 및 유속에 따른 하천 내 미세조류의 이산화탄소 고정 효과

박효민·이상돈[†]

이화여자대학교 환경공학과

The Effect of CO₂ Fixation for Microalgae based on CO₂ Concentration and Flow Rate

Hyomin Park·Sangdon Lee[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Ewha Womans University
(Received : 18 June 2018, Revised: 05 September 2018, Accepted: 26 October 2018)

요약

최근 환경 문제로 대두되고 있는 것 중 하나는 대기 중 CO₂의 증가로 인한 기후변화이다. 이에 대한 영향으로 생태계가 변화하고 있으며, 다양한 환경문제가 발생되고 있다. 이로 인해 전 세계적으로 CO₂ 저감을 위한 다양한 연구들이 수행 중이며, 이 중 미세조류를 이용한 CO₂ 저감 방안은 환경 친화적인 방법이라 할 수 있다. 그러나 미세조류를 이용한 CO₂ 저감 방안은 대부분 단일 종을 대상으로 하고 있으며, 자연 하천을 대상으로 한 미세조류의 CO₂ 고정 효율에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그러므로 본 연구는 우리나라 하천 내 존재하는 미세조류들을 파악하고, 미세조류의 성장특성을 분석하여 최적의 배양조건을 도출 하였다. 그리고 CO₂ 농도와 주입 속도에 따른 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 변화를 분석하여 자연 하천 내 존재하는 미세조류의 CO₂ 고정효율에 대해 연구하고자 하였다. 섬강 내 존재하는 미세조류를 배양하여 동정한 결과 6종의 우점종(*Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus intermedius*, *Selenodictyum* sp., *Xanthidium apiculatum* var. *laeve*, *Cosmarium pseudoquinarium*, *Dictyosphaerium pulchellum*)이 관찰되었으며, 이 종들은 모두 녹조류에 해당하였다. 한편 이산화탄소 농도 구배(5% CO₂, 10% CO₂, 15%CO₂, 대기조건인 가스 0.038% CO₂)와 유속(0.25, 0.5LPM)이 다른 가스를 주입하여 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 변화를 살펴본 결과 이산화탄소의 농도가 증가할수록 biomass와 클로로필 a가 증가하였으며, 같은 이산화탄소 농도에서는 유속이 더 빠른 곳에서 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 양이 더 증가하였다. 또한 미세조류에 고정화된 이산화탄소의 양은 주입되는 가스의 유속이 빠를수록 고정되는 이산화탄소의 양이 더 높아지는 경향을 보였다. 본 연구는 기존의 단일 종에서 행해지는 연구가 아닌 하천 전체의 미세조류를 대상으로 수행한 연구이며, 하천 내 존재하는 미세조류의 이산화탄소 고정을 위한 최적의 조건을 도출하고, 하천 내 존재하는 미세조류로부터 고정화된 이산화탄소의 양을 정량화하여 향후 이산화탄소 감축을 위한 정책을 위한 기초자료에 이용할 수 있다는 것에 큰 의의가 있다.

핵심용어 : 미세조류, 생물학적 고정, 이산화탄소 고정, 이산화탄소 저감

Abstract

One of the recent environmental problems is climate change due to the increase of atmospheric CO₂, which causes ecological changes and various environmental problems. Therefore, various studies are being carried out to reduce CO₂ in the world in order to solve various environmental problems caused by increase of CO₂. The CO₂ reduction using microalgae is an environmentally friendly method by using photosynthesis reaction of microalgae. However, most studies using single species. There is no study on the CO₂ fixing efficiency of microalgae in natural rivers. Therefore, this study was to identify the microalgae in the Sum river and to analyze the growth characteristics of microalgae in the river to obtain optimal culture conditions. And the changes of biomass and chlorophyll-a of microalgae were analyzed according to CO₂ concentration and injection rate. The purpose of this study was to investigate the fixing efficiency of carbon dioxide in microalgae in natural rivers. Six kinds of dominant species were observed as a result of the identification of microalgae in Sum river(*Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus intermedius*, *Selenodictyum* sp., *Xanthidium apiculatum* var. *laeve*, *Cosmarium pseudoquinarium*, *Dictyosphaerium pulchellum*). All of these species were green algae. Biomass and chlorophyll-a increased with the increase of CO₂ concentration and biomass and chlorophyll-a

[†] To whom correspondence should be addressed.
Dept of Environmental Sciences and Engineering, Ewha Womans
University, Seoul 120-750, Korea
E-mail: lsd@ewha.ac.kr

increased faster flow rate at the same CO₂ concentration. Also, the quantity of CO₂ fixation on the microalgae tended to be higher when the flow rate of injected gas was faster. This study can be referred as being significant in the micro-algae in river. In addition, the optimal conditions for CO₂ fixation of microalgae in rivers and the quantification of the quantity of CO₂ fixation from microalgae in rivers can be used as basic data for future policy of CO₂ reduction.

Key words : biological fixation, CO₂ fixation, CO₂ reduction, microalgae

1. 서 론

최근 지구환경 문제로 대두되고 있는 것 중 하나는 대기 중 CO₂ 증가로 인해 발생하는 환경문제이다. IPCC(Intergovernmental Panel on Climate Change) 5차 보고서에 따르면 지난 30년간 지표면은 계속해서 따뜻해지고 있다(IPCC, 2013). 이러한 지구 온난화의 주범은 CO₂, CH₄, N₂O와 같은 온실가스의 증가라고 할 수 있으며, 이 중 CO₂는 전체 온실가스 배출량의 80%를 차지하고 있다(Park et al., 2015). 특히 대기 중 CO₂ 농도의 증가는 기후변화를 야기하여 생태계 변화로 인한 다양한 환경문제가 발생되고 있다. 따라서 CO₂의 증가로 인해 발생하는 여러 가지 환경문제의 해결을 위해 전 세계적으로 CO₂ 저감을 위한 여러 가지 연구가 수행 중이며, CO₂ 저감을 위한 원천 기술 개발부터 생성된 CO₂ 회수 및 재활용에 관한 연구 등 다양한 분야의 여러 가지 연구가 진행되고 있다.

온실가스를 처리하는 기술은 크게 압력연동 흡착법이나 막 분리법과 같이 배기가스 중의 CO₂를 분리하는 기술과 CO₂를 화학적 또는 생물학적으로 유용한 물질로 전환하는 고정화 기술로 분류할 수 있다. 이 중 생물학적인 방법은 태양광을 에너지원으로 하는 광합성 반응을 이용하는 것으로 환경 친화적인 방법이라 할 수 있다(Karube et al., 1992; Hall and house, 1993).

대표적인 광합성 미생물로 알려진 미세조류는 지구상에서 전체 광합성의 90%를 담당하는 것으로 추정되며, 지구 생태계의 1차 생산자로 매우 중요한 위치를 점하고 있다(Kim, 2004). 미세조류(microalgae)는 탄소동화작용을 하는 미생물 중 현미경으로 관찰 할 수 있는 단세포성 조류를 칭하며 대부분의 식물성 플랑크톤이 이에 속한다. 그러므로 광독립영양생물인 미세조류를 배양하여 CO₂를 고정하는 것은 대기의 CO₂를 감소시키고 지구온난화를 완화시킨다(Ono et al., 2003). 특히 미세조류와 같은 광합성 생물을 활용한 생물학적 전환기술은 빛 에너지를 활용하여 친환경적으로 CO₂를 바이오디젤, 항산화물질, 바이오플리머 등 다양한 고부가 유용물질로 전환할 수 있어 많은 주목을 받고 있다. 미세조류는 육상식물에 비해 빠른 성장성을 가지고 있고 해상 또는 황무지 등의 장소를 활용 할 수 있는 등 많은 장점들을 갖고 있지만 종 자체가 지닌 낮은 광합성 효율과 생산성의 한계로 인해 대규모 미세조류 공정의 상용화를 위해서는 해결해야 할 문제점들이 남아있다(Choi, 2012). 또한 현재까지 지구상에 50,000여종이 넘는 미세조류 종의 존재가 보고되었지만, 미세조류 연구는 일부 특정한 소수의 종에만 초점이 맞춰져 있다.

그러므로 미세조류를 이용한 CO₂ 고정화에 있어서 중요한 요소는 미세조류의 대량 배양 및 CO₂ 고정 효율을 높일 수 있는 환경 조건을 찾는 것이다. 이러한 연구는 해외뿐만 아니라 국내에서도 미세조류를 이용하여 CO₂를 고정시키는 연구 및 미세조류를 바이오 에너지원으로 이용하는 연구 등이 활발히 진행되고 있다. 그러나 단일 종을 이용한 연구들이 대부분이고, 자연 하천을 대상으로 하여 하천 내 존재하는 미세조류의 CO₂ 고정 효율에 대한 연구는 전무한 실정이다. 그러므로 본 연구는 우리나라 하천 내 존재하는 미세조류들을 파악하고 하천 내 미세조류의 성장특성을 분석하여 최적의 배양조건을 찾아내고자 한다. 그리고 CO₂ 농도와 주입 속도에 따른 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 변화를 분석하여 자연 하천 내 존재하는 미세조류의 CO₂ 고정효율에 대해 연구하고자 한다.

2. 실험 및 방법

2.1 조사지역

자연 하천 내 존재하는 미세조류 채취를 위해 2013년 8월 강원도 원주시 지정면 섬강의 물을 채수하였다. 섬강은 강원도 남서부 지역을 흐르는 강으로 길이 73.02km, 유역면적 1,303.40km²이다. 섬강은 강원도 횡성에서 시작하며 우리나라의 서쪽으로 흐르다가 원주시를 지나면서 남서쪽으로 물길을 바꾸어 경기도 및 강원도가 접하는 지점 가까이에서 남한강에 합류한다. 섬강은 비교적 강수량이 많은 지역을 통과하기 때문에 강의 수량이 많다. 그러므로 강의 수량이 많고 접근이 용이하여 채수가 수월한 지역이므로 섬강을 연구지역으로 선정하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 미세조류 균주의 배양 조건 및 미세조류의 동정

섬강 내 존재하는 미세조류 균주를 선별하기 위해 섬강에서 시료를 채수한 뒤, 멸균된 1L의 플라스크에서 2013년 8월 12일부터 3주간 배양하였다. 배양온도는 25±2°C, 광주기 12:12(L:D), 광원은 4010 lumen형광등을 사용하였고, 배양하는 동안 일반 공기를 주입하였다.

3주 후, 배양시킨 미세조류는 배양액과 함께 멸균된 1L 플라스크에 옮겨서 실험을 진행하였다. 미세조류 배양액은 12°C에서 20분간 고압멸균 시킨 3차 증류수에 F/2 medium (Guillard, 1975)를 넣어 clean bench에 24시간동안 넣어 두었다. 그리고 24시간 뒤, 멸균된 플라스크에 400ml의 배양액

과 600ml의 미세조류를 접종하여 실험을 진행하였다. 이때 배양온도는 25±2°C, 광주기는 16:8(L:D), 광원은 4010 lumen 형광등을 이용하였다. 배양시킨 미세조류는 600배울의 현미경(OS-THP)을 이용하여 관찰한 뒤 조류도감을 통해 섬강 내 존재하는 미세조류의 종류를 동정하였다.

2.2.2 이산화탄소 농도구배와 유속에 따른 미세조류 생장에 관한 실험

이산화탄소 농도에 따른 미세조류의 성장속도를 확인하기 위해 5%, 10%, 15%농도의 CO₂가스와 대기 조건의 가스(0.038% CO₂)를 준비하였다. 한편 유속에 따른 미세조류의 성장속도를 알아보기 위해 각각의 플라스크에 주입하는 CO₂가스와 대기 조건의 가스 유속을 0.25LPM(Liter per minute)과 0.5LPM으로 설정하여 가스를 주입하였다. 그리고 각각의 조건에서 13일간 미세조류를 배양하였다(Table 1). 배양온도는 25±2°C, 광주기 12:12(L:D), 광원은 4010 lumen형광등을 사용하였다.

Table 1. Culture conditions of microalgae cultured for 3 weeks

CO ₂ concentration (%)	Air flow (LPM, Liter per minute)
5% CO ₂	0.25 / 0.5
10% CO ₂	0.25 / 0.5
15% CO ₂	0.25 / 0.5
Air(0.038% CO ₂)	0.25 / 0.5

한편 미세조류의 성장속도 및 CO₂고정 효율을 구하기 위해 미세조류 세포농도를 측정하였다. 미세조류의 세포농도의 지표는 biomass와 클로로필 a를 측정하였다. 미세조류의 biomass는 균체 건조량을 이용하였다. 미세조류의 균체 건조량은 105°C에서 12시간 동안 건조시킨 0.45µm GF/C filter(Whatman)에 40ml의 미세조류 배양액을 여과시킨 뒤 105°C에서 12시간 건조시켰다. 그리고 12시간 뒤 GF/C filter의 무게 차이를 측정하여 균체 건조량을 측정하였다(Zhao et al., 2011). 그리고 미세조류의 Chlorophyll-a의 측정은 수질오염공정시험기준(Ministry of Environment, 2017)에 따라 측정하였다(eq 1). 미세조류 배양액을 0.45µm GF/F filter(Whatman)로 여과시킨 뒤 acetone(9+1) 10ml 용액에 넣고 4°C의 냉장고에서 24시간 방치하였다. 그리고 500g의 원심력으로 20분간 원심분리를 한 뒤 상등액을 취하였다. 그리고 UV-spectrophotometer(agilent 8453)를 이용하여 630nm, 645nm, 663nm, 750nm에서 흡광도를 측정한 뒤 다음의 수식을 이용하여 각 시료에 해당하는 클로로필 a의 양을 계산하였다. 모든 실험은 3번씩 반복하였다.

$$Chlorophyll - a(mg/m^3) = \frac{(11.64X_1 - 2.16X_2 + 0.10X_3) \times V_1}{V_2} \quad (eq 1.)$$

X₁ : OD663 - OD750

X₂ : OD645 - OD750

X₃ : OD630 - OD750

OD : Optical Density

V₁ : Quantity of supernatant (mL)

V₂ : Quantity of filtered sample (L)

2.2.3 고정화된 이산화탄소의 양

미세조류 내 고정화된 이산화탄소 양은 특정시간에서의 미세조류농도 및 초기 미세조류농도, 미세조류의 탄소함량, 이산화탄소의 분자량과 탄소의 원자량의 비를 구한 뒤, 다음의 수식을 이용하여 계산하였다(eq 2.)(Kim et al., 2014; Mohsenpour et al., 2016).

$$F_{CO_2} = C_c(X - X_0) \frac{M_{CO_2}}{M_C} \quad (g \cdot CO_2/L) \quad (eq 2.)$$

F_{CO₂} : The quantity of CO₂ fixation (g · CO₂/L)

X : Algae concentration at specific time (g/L)

X₀ : The concentration of the initial algae (g/L)

C_c : Carbon content of algae (0.507 carbon/g dry weight)

M_{CO₂} : Molecular weight of CO₂ (44g/mol)

M_C : Atomic weight of carbon (12g/mol)

3. 결과 및 고찰

3.1 미세조류의 동정

미세조류를 20일 배양시킨 후 현미경을 통해 관찰한 뒤, 조류도감을 통해 종을 동정하였다. 그 결과 배양액에서 *Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus intermedius*, *Selenodictyum* sp., *Xanthidium apiculatum* var. *laeve*, *Cosmarium pseudoquinarium*, *Dictyosphaerium pulchellum* 등 총 6종의 우점종을 관찰 할 수 있었으며, 관찰 된 6종 모두 녹조류(Chlorophyta)에 해당하는 것으로 나타났다(Table 2).

Table 2. List of species observed after incubation

	Scientific Names
Chlorophyta	<i>Ankistrodesmus falcatus</i>
	<i>Scenedesmus intermedius</i>
	<i>Selenodictyum</i> sp.
	<i>Xanthidium apiculatum</i> var. <i>laeve</i>
	<i>Cosmarium pseudoquinarium</i>
	<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>

3.2 Biomass

CO₂ 농도 구배를 다르게 하여 주입하여 배양한 미세조류의 biomass와 대기 조건의 가스를 주입하여 배양한 미세조류의 biomass를 비교하였다. 그 결과 CO₂를 주입한 모든 곳에서 미세조류의 biomass가 시간이 경과할수록 더 크게 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig. 1).

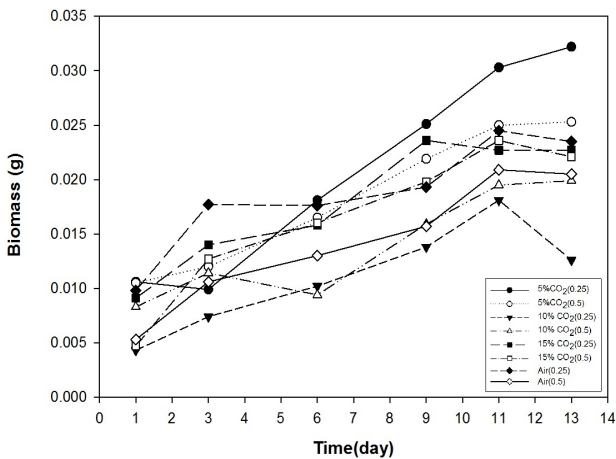


Fig. 1. Change of biomass over time with different CO₂ concentration of air flows

같은 CO₂농도에서 유속의 차이에 따른 미세조류의 biomass의 증가를 살펴본 결과 5% CO₂를 주입해준 곳에서는 가스를 0.25LPM으로 주입해준 곳이 미세조류의 biomass 증가하였지만 5% CO₂를 주입한 곳을 제외한 나머지는 가스의 유속을 0.5LPM으로 주입해준 곳이 미세조류의 biomass가 더 증가하였다.

CO₂농도 구배와 유속차이에 따른 미세조류의 biomass를 측정된 결과 미세조류의 biomass가 가장 많이 증가한 곳은 5% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳이었으며, 그 다음으로는 15% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳, 대기 조건의 가스를 0.5LPM으로 주입한 곳, 5% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳, 15% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳, 대기 조건의 가스를 0.25LPM으로 주입한 곳, 10% CO₂를 0.5LPM, 10% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳의 순으로 나타났다.

CO₂농도 구배와 유속의 차이에 따라 미세조류의 biomass를 측정된 결과 시간이 지남에 따라 미세조류의 biomass가 증가하지만 11일을 기점으로 생장이 저하되는 경향이 나타났으며, *Spirulina platensis* 종을 배양한 실험 역시 각 조건에 따른 미세조류의 성장양상은 전체적으로 13일을 기점으로 생장이 저하되는 것을 알 수 있었다(Kim, 2010)(Fig. 1). CO₂농도 차이에 따른 미세조류의 biomass를 비교한 결과 5% CO₂를 주입한 곳과 15% CO₂를 주입한 곳이 대기 조건의 가스를 주입한 곳보다 미세조류의 biomass가 더 높게 나타났다. 녹조류인 *C. vulgaris*와 *G.membranacea*에 대기 조건의 가스, 5% CO₂, 15% CO₂를 주입하여 biomass를 비교한 결과에서도 본 실험과 같이 5% CO₂와 15% CO₂를 주입한 곳의 biomass가 더 크게 나타났다(Mohsenpour et al., 2016). CO₂농도가 높은 조건에서 미세조류의 biomass가 더 높게 나타나는 이유는 미세조류는 광합성을 할 때 CO₂를 탄소원으로 이용하여 세포 내 구성성분을 합성하므로 biomass의 증가 속도와 CO₂의 고정효율은 비례하게 된다(Lee et al., 1995). 그러므로 CO₂의 농도 증가 할수록 미세조류의 성장속도는 증가하며(Yang and Gao, 2003), 미세조류의 biomass도 증가하게 되는 것이다.

주입되는 가스의 유속에 따른 미세조류의 biomass 차이를

비교한 결과, 10% CO₂, 15% CO₂, 대기 조건의 가스를 주입한 곳에서는 0.5LPM의 유속으로 더 빠르게 가스를 주입한 곳의 미세조류의 biomass가 더 높게 나타났다. 녹조류인 *Spirulina platensis* 종에 50ml/min와 150ml/min으로 CO₂를 주입한 실험에서도 더 빠른 유속으로 CO₂를 공급해 준 곳의 biomass가 더 증가하였다(Kim et al., 2003). 그 이유는 유속이 빠르면 CO₂공급이 더 원활해지기 때문에 주입하는 CO₂의 유속이 더 빠른 곳의 biomass가 더 높게 나타나는 것으로 판단된다.

3.3 Chlorophyll-a

CO₂농도 구배와 유속의 차이에 따른 클로로필 a의 차이를 알아보기 위하여 630nm, 645nm, 663nm, 750nm에서 흡광도를 측정하였다. 그 결과 시간이 경과함에 따라 미세조류에 존재하는 클로로필 a의 양은 점차 증가하는 것을 알 수 있었다.

각각의 CO₂농도 구배에 따른 미세조류의 클로로필 a를 비교한 결과, 대기 조건의 가스를 0.5 LPM으로 주입한 곳의 클로로필 a 농도가 가장 큰 것으로 나타났으며, 그 다음으로는 5% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳의 클로로필 a가 증가한 것을 알 수 있었다(Fig. 2).

같은 CO₂농도에서 유속의 차이(0.25LPM, 0.5LPM)에 따른 미세조류의 클로로필 a의 증가를 살펴본 결과 10% CO₂를 주입해준 곳에서는 가스의 유속을 0.25LPM으로 주입해준 곳이 미세조류의 클로로필 a의 성장이 더 크게 나타났다. 하지만 5% CO₂를 주입해준 곳, 15% CO₂를 주입해준 곳, 그리고 대기 조건의 가스를 주입해준 곳에서는 가스의 유속을 0.5LPM으로 주입해준 곳의 미세조류의 클로로필 a의 증가가 더 크게 나타났다.

CO₂농도 구배와 유속차이에 따른 미세조류의 클로로필 a를 측정된 결과 미세조류의 클로로필 a가 가장 많이 증가한 곳은 대기 조건의 가스를 0.5LPM으로 주입한 곳이었으며, 그 다음으로는 5% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳, 5% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳, 10% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳,

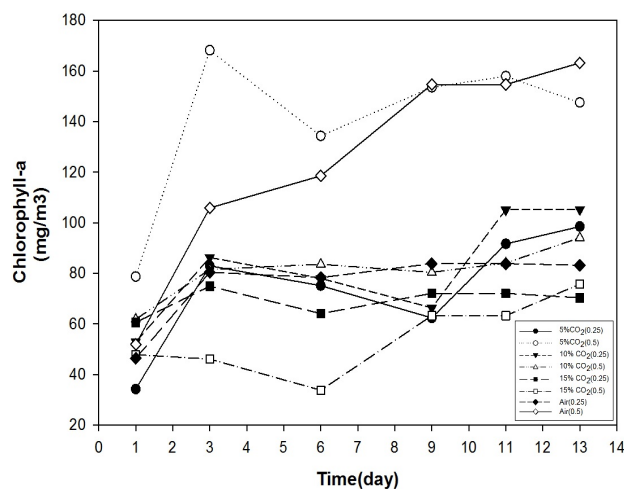


Fig. 2. Change of Chlorophyll-a over time with different CO₂ concentration of air flows

대기 조건의 가스를 0.25LPM으로 주입한 곳, 10% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳, 15% CO₂를 0.5LPM, 15% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳의 순으로 나타났다.

클로로필은 식물이 광합성을 하는 데 필요한 빛을 흡수하는 색소이며, 그 중 클로로필 a는 세균을 제외한 모든 광합성 생물에 존재하므로 클로로필 a의 양으로 식물플랑크톤의 대략적인 현존량을 알 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 클로로필 a를 측정하여 그 변화를 미세조류 생장의 지표로 판단하고자 하였다. 본 연구에서 CO₂ 농도 차이에 따른 클로로필 a의 차이를 비교한 결과 5% CO₂와 10% CO₂를 0.25 LPM으로 주입해준 곳이 대기 조건의 가스를 주입한 곳보다 클로로필 a의 양이 더 높게 나타났다. 이와 비슷한 연구인 녹조류인 *Chlamydomonas reinhardtii*와 *Chlorella pyrenoidosa*, *Scenedesmus obliquus* 종에 다른 농도의 CO₂를 공급하여 미세조류의 광합성의 효율을 살펴본 결과, 미세조류에 공급되는 CO₂농도가 높은 곳에서 광합성의 효율이 더 높은 것을 알 수 있었다(Yang and Gao, 2003). 이러한 결과는 이산화탄소 농도가 증가함에 따라 미세조류의 광독립영양 성장성이 향상된다는 것을 알 수 있다.(Sung et al., 2017)

한편 주입되는 가스 유속에 따른 미세조류의 클로로필 a의 증가를 살펴본 결과 5% CO₂, 15% CO₂, 대기 조건의 가스를 주입한 곳에서는 0.5LPM의 유속으로 가스를 주입한 곳의 미세조류의 클로로필 a가 더 높게 나타났다. 녹조류 중 하나인 *Nannochloropsis oculata*종에 다른 농도의 CO₂를 공급하여 미세조류 성장을 이용한 실험 결과에서도 미세조류에 5% CO₂를 주입한 곳의 세포의 성장이 CO₂를 주입하지 않은 곳보다 2배정도 높은 성장률을 보였고, CO₂를 공급하였을 때 1.64배 높은 클로로필 함량을 보였다. 그러므로 일정량의 CO₂공급은 균체의 성장을 촉진시킬 뿐만 아니라 클로로필 함량 증가에 중요한 요소가 되며, 클로로필 생합성은 미세조류 성장과 깊은 연관이 있는 것으로 판단되어진다(Park et al., 2010).

3.4 고정화된 CO₂의 양

CO₂의 농도 구배에 따라 고정화 된 CO₂의 양을 비교하기 위해 CO₂를 주입한 곳과 대기 조건의 가스를 주입한 곳의 고정화 된 CO₂의 양을 비교하였다. 그 결과 5% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳과 15% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳은 대기 조건의 가스를 주입한 곳보다 고정화 된 CO₂ 양이 각각 1.58배, 1.14배 더 높은 효율을 나타냈으며, 이를 제외한 나머지는 대기 조건의 가스를 주입한 곳이 고정화 된 CO₂의 양이 더 높게 나타났다. 15% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳의 고정화 된 CO₂ 양은 대기 조건의 가스를 공급한 곳과 비교하였을 때 0.99배 고정 효율을 나타냈으며, 5% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳은 0.97배, 10% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳은 0.76배, 10% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳은 0.60배의 고정 효율을 나타냈다.

주입되는 가스의 유속(0.25LPM, 0.5LPM)에 따른 고정화 된 CO₂를 계산한 결과, 5% CO₂를 0.25LPM의 속도로 주입

한 곳은 0.5LPM으로 CO₂를 주입한 곳보다 고정화 된 CO₂ 양이 대략1.5배 정도 더 높게 나타났다. 그러나 5% CO₂를 주입한 곳을 제외한 나머지에서는 0.5LPM의 속도로 CO₂를 주입한 곳이 고정화 된 CO₂ 양이 더 높게 나타났으며, 10% CO₂를 주입한 곳은 0.5LPM으로 CO₂를 주입한 곳이 0.25LPM으로 CO₂를 주입한 곳보다 1.40배, 15% CO₂를 주입한 곳은 1.28배, 대기 조건의 가스를 주입한 곳은 1.11배로 고정화 된 CO₂의 양이 더 많았다.

한편 CO₂의 농도구배와 유속차이에 따른 고정화 된 CO₂ 양의 차이를 계산하였다. 그 결과 5% CO₂를 0.25LPM으로 주입해준 곳의 고정화 된 CO₂의 양이 0.0402g-CO₂/L로 가장 높게 나타났으며, 그 다음으로는 15% CO₂를 0.5LPM으로 주입해준 곳, 대기 조건의 가스를 0.5LPM으로 주입해준 곳, 5% CO₂를 0.5LPM으로 주입해준 곳, 대기 조건의 가스를 0.25LPM으로 주입해준 곳, 15% CO₂를 0.25LPM으로 주입해준 곳, 10% CO₂를 0.5LPM으로 주입해준 곳, 10% CO₂를 0.25LPM으로 주입해준 곳의 순으로 나타났다.

실험 결과를 통해 고정화 된 CO₂의 양은 5% CO₂를 0.25LPM으로 주입한 곳과 15% CO₂를 0.5LPM으로 주입한 곳, 대기 조건의 가스를 0.5LPM으로 공급해 준 곳의 순서대로 고정화 된 CO₂의 양이 나타났으며, 5% CO₂를 주입한 곳을 제외한 나머지 조건에서는 0.5LPM의 유속으로 가스를 공급해 준 곳의 CO₂ 고정효율이 더 높았다. 본 연구를 통해 하천에서 미세조류를 통해 고정화된 CO₂의 양은 CO₂의 농도보다는 공급되는 유속에 영향을 더 많이 받는 것으로 판단되며, 고정화 된 CO₂의 양은 5% CO₂를 주입해준 곳을 제외한 나머지 곳들은 CO₂의 농도가 높고, 주입되는 가스의 유속이 빠를수록 CO₂가 고정되는 양이 더 높아지는 경향을 확인할 수 있었다.

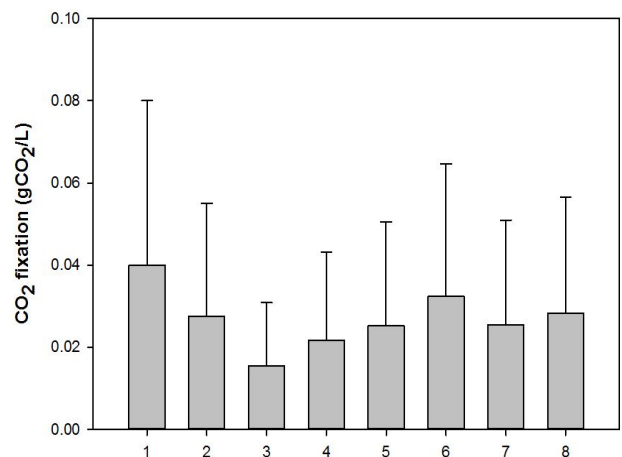


Fig. 3. CO₂ fixation of microalgae according to CO₂ concentration and flow rate (1 is 5% CO₂ concentration and flow rate is 0.25 LPM, 2 is 5% CO₂ concentration and flow rate is 0.5 LPM, 3 is 10% CO₂ concentration and flow rate is 0.25 LPM, 4 is 10% CO₂ concentration and flow rate is 0.5 LPM, 5 is 15% CO₂ concentration and flow rate is 0.25 LPM, 6 is 15% CO₂ concentration and flow rate is 0.5 LPM, 7 is air and flow rate is 0.25 LPM, 8 is 5% CO₂ concentration and flow rate is 0.5 LPM)

CO₂ 고정량과 biomass, CO₂ 고정량과 클로로필, CO₂ 고정량과 유속과의 유의미한 관계를 판단하기 위해 SPSS(IBM SPSS Statistics version 23)를 이용하여 T검정을 실시하였다. 그 결과 CO₂ 고정량과 biomass의 차이는 유의 확률은 0.000*으로 매우 유의한 것으로 나타났으며, CO₂ 고정량과 클로로필의 차이의 유의확률 역시 0.003*으로 매우 유의한 수준으로 나타났다. 그러나 CO₂ 고정량과 유속의 차이는 유의확률이 0.867로 두 집단간의 차이는 통계적으로 유의하지 않은 것을 알 수 있었다.

4. 결 론

본 실험은 우리나라 강원도에 위치하고 있는 섬강 내 존재하는 미세조류들을 파악하고, CO₂농도 구배 및 CO₂ 유속에 따른 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 변화를 분석하여 고정화 된 CO₂의 양을 도출하고자 하였다.

섬강 내 존재하는 미세조류 배양하여 동정한 결과 6종의 우점종(*Ankistrodesmus falcatus*, *Scenedesmus intermedius*, *Selenodictyum sp.*, *Xanthidium apiculatum var. laeve*, *Cosmarium pseudoquinarium*, *Dictyosphaerium pulchellum*)이 관찰되었으며, 이 종들은 모두 녹조류에 해당하였다.

한편 CO₂ 농도 구배(5% CO₂, 10% CO₂, 15% CO₂, 대기 조건의 가스 0.038% CO₂)와 유속(0.25LPM, 0.5LPM)이 다른 가스를 주입하여 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 변화를 살펴본 결과 CO₂의 농도가 증가 할수록 biomass와 클로로필 a가 증가하였으며, 같은 CO₂ 농도에서는 유속이 더 빠른 곳에서 미세조류의 biomass와 클로로필 a의 양이 더 증가하였다. 또한 미세조류에 고정화된 CO₂의 양은 주입되는 가스의 유속이 빠를수록 고정 되는 CO₂ 양이 더 높아지는 경향을 보였다.

본 연구는 기존의 단일 종에서 행해지는 연구가 아닌 하천 전체의 미세조류가 대상인 점에서 큰 의미가 있다. 그러나 CO₂농도와 유속의 차이만 고려하여 CO₂ 고정효과에 관한 연구를 진행하였다는 점에서 연구의 한계가 있다. 그러므로 추후 미세조류의 광합성에 영향을 미치는 온도, 광량, 광주기 및 실험기간 등을 달리한 연구를 통해 CO₂의 고정효과에 대한 추가 연구가 필요할 것이다. 한편 이 연구는 하천 내 존재하는 미세조류의 CO₂ 고정을 위한 최적의 조건을 도출하고, 미세조류로부터 고정화된 CO₂의 양을 정량화하여 향후 CO₂ 감축을 위한 정책 및 바이오디젤 생산을 위한 기초자료로 이용할 수 있다는 것에 의의가 있다.

사 사

본 연구는 2013년도 정부재원(미래창조과학부 여대학(원)생 공학연구팀제 지원사업)및 서울지역환경기술개발센터 연구개발사업(2017), 한국연구재단(2017R1D1A1B03029300)의 일환으로 수행되었습니다.

References

- Choi, WJ (2012). Influence of Chemical CO₂-Absorbents on Microalgal Growth and Carbon Fixation in Photobioreactor, Master's Thesis, Myungji University, Gyeonggi-do, Korea. [Korean Literature]
- Guillard, RR (1975). Culture of phytoplankton for feeding marine invertebrates, Culture of marine invertebrate animals, Springer, pp. 29-60.
- Hall, D and House, J (1993). Reducing atmospheric CO₂ using biomass energy and photobiology, Energy conversion and management, 34(9-11), pp. 889-896. [DOI: 10.1016/0196-8904(93)90033-7]
- IPCC (2013). The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom/New York, NY, USA.
- Karube, I., Takeuchi, T and Barnes, D (1992). Biotechnological reduction of CO₂ emissions, Modern biochemical engineering, Springer, pp. 63-79.
- Kim, M., Kim, S and Jeong, S (2014). Real-time measurement of contents of carbon dioxide according to growth of microalgae. Proceedings of the 2014 conference of the Korean Society of Mechanical Engineers, pp. 2857-2858. [Korean Literature]
- Kim, T (2004). Industrial utility of microalgae, Tech news brief, Korea Institute of Science and Technology Information (KISTD). [Korean Literature]
- Kim, YM (2010). The study of biological carbon dioxide fixation using microalgae, Master's Thesis, Silla University, Busan. [Korean Literature]
- Kim, YS, Park, HI and Park, DW (2003). Growth characteristics of spirulina platensis at different carbon dioxide concentration and flow rate. Proceedings of the 2003 conference of the Korean Society of Environmental Engineers, pp. 1357-1358. [Korean Literature]
- Lee, SB, Park, CB and Seo, IS (1995). Development of biological carbon fixation process, Chemil Industry and Technology 13(4), pp. 347-353. [Korean Literature]
- Ministry of Environment (2017). Water pollution process test standard. [Korean Literature]
- Mohsenpour, SF and Willoughby N (2016). Effect of CO₂ aeration on cultivation of microalgae in luminescent photobioreactors, Biomass and Bioenergy, 85, pp. 168-77. [DOI: 10.1016/j.biombioe.2015.12.002]
- Ono, E and Cuello JL (2003). Selection of optimal microalgae species for CO₂ sequestration. Proceedings of Second Annual Conference on Carbon Sequestration Alexandria, VA, Citeseer.
- Park, H, Chun, S and Lee, S (2015). Study on effect on CO₂

- flux of wetland soil by feces of Korean water deer (*Hydropotes inermis*) *J. of Wetlands Research*, 17(3), pp. 283–292. [DOI: 10.17663/JWR.2015.17.3.283] [Korea Literature]
- Park, HJ, Jin, EJ, Jung, T., Joo, H and Lee JH (2010). Optimal Culture Conditions for Photosynthetic Microalgae *Nannochloropsis oculata*, *Applied Chemistry for Engineering*, 21(6), pp. 659–663. [Korean Literature]
- Sung, YJ, Kwak, HS, Choi, HS and Sim SJ (2017). Growth Analysis of *Chlamydomonas reinhardtii* in Photoautotrophic Culture with Microdroplet Photobioreactor System, *Korean Chem. Eng. Res.*, 55(1), pp. 80–85. [DOI: 10.9713/kcer.2017.55.1.80] [Korean Literature]
- Yang, Y and Gao, K (2003). Effects of CO₂ concentrations on the freshwater microalgae, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* (*Chlorophyta*). *J. of Applied Phycology*. 15(5), pp. 379–89.
- Zhao, B., Zhang, Y., Xiong, K., Zhang, Z., Hao X and Liu, T (2011). Effect of cultivation mode on microalgal growth and CO₂ fixation, *Chemical engineering research and design*. 89(9), pp. 1758–62. [DOI: 10.1016/j.cherd.2011.02.018]