

두 종 미세 녹조류의 연속배양을 통한 바이오매스 생산성 비교

김근호¹, 이영미¹, 김덕진², 정상화³, 김시욱^{1*}

Comparison of Biomass Productivity of Two Green Microalgae through Continuous Cultivation

Geun Ho Gim¹, Young Mi Lee¹, Duk-Jin Kim², Sang-Hwa Jeong³, and Si Wouk Kim^{1*}

접수: 2012년 1월 25일 / 게재승인: 2012년 3월 27일

© 2012 The Korean Society for Biotechnology and Bioengineering

Abstract: In the present study, the biomass productivity of two green microalgae (*Chlorella* sp. and *Dunaliella salina* DCCBC2) were assessed in a 12 L tubular photobioreactor under optimum culture conditions. In the batch culture optimization process, the *Chlorella* sp. biomass was obtained as 1.2 g/L under atmospheric air as a sole CO₂ source and other culture conditions as follows: light intensity, temperature, pH, NH₄Cl and K₂HPO₄ were 100 μE/m²/s, 27°C, 7.0, 20.0 mM and 2.0 mM, respectively. On the other hand, 2.9 g/L of *D. salina* DCCBC2 biomass production was observed under the following conditions: light intensity, temperature, pH, KNO₃ and K₂HPO₄ were 80 μE/m²/s, 27°C, 8.0, 3.0 mM and 0.025 mM, respectively. At 1% CO₂ supply to the reactor, the *Chlorella* sp. production was reached 1.53 g/L with 25% increment under the same operating conditions. In addition, the maximum *D. salina* DCCBC2 biomass was observed as 3.40 g/L at 3% CO₂ concentration. Based on the aforementioned optimized conditions, the dilution rate and maximal biomass

productivity of *Chlorella* sp. and *D. salina* DCCBC2 in the continuous cultivation were 0.4/d and 0.6 g/L/d and 0.6/d and 1.5 g/L/d, respectively.

Keywords: green microalga, *Chlorella*, *Dunaliella salina*, photobioreactor, biomass productivity

1. 서론

전 세계적으로 급격한 인구증가와 더불어 에너지 수요가 증가함에 따라 지구 온난화와 같은 환경문제, 에너지원 및 식량자원 고갈 등의 문제가 전 지구적으로 발생하고 있다. 특히, 산업화를 포함한 다양한 인간 활동으로 인해 대기 중으로 온실화 가스인 이산화탄소가 대량 방출되고, 이산화탄소를 다량 흡수할 수 있는 열대우림이 훼손됨으로써 대기 중의 이산화탄소의 농도가 산업혁명 이후 280 ppm에서 2005년 기준 380 ppm으로 증가하여 지구온난화가 가속화 되고 있다. 또한 2008년 7월에 국제유가가 배럴당 \$140.70 (두바 이유)까지 치솟아 최고치를 기록하였으며, 화석연료의 고갈로 앞으로도 지속적인 원유가의 상승이 불가피함에 따라 이를 대체할 신재생에너지원 연구 및 개발이 주목받고 있다.

특히 바이오에너지 (바이오에탄올, 바이오디젤, 바이오가스 등) 가운데 해수 혹은 담수에 분포하는 미세조류 (microalgae)를 이용한 대기 중 이산화탄소 고정화 및 이를 이용한 바이오에너지의 개발과 관련된 연구가 한창 진행 중이다 [1-3]. 특히 제철소 및 발전소에서 배출되는 이산화탄소를 이용한 미세조류 대량배양 및 바이오 에너지 생산을 위해서는 적절한 미세조류 선별 및 배양조건이 최적화가 필요

¹조선대학교 환경공학과, 조선대학교 BK21 바이오수소 생산팀
¹Department of Environmental Engineering, BK 21 Team for Biohydrogen Production, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea
Tel: +82-62-230-6649, Fax: +82-62-225-6040
e-mail: swkim@chosun.ac.kr

²한국환경공단 상하수도지원처 물산업진흥팀
²Department of Water Supply and Sewage, Korea Environment Corporation, Incheon 404-708, Korea

³조선대학교 기계공학과
³Department of Mechanical Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

Table 1. Comparison of biomass productivity of *Chlorella* sp. and *Dunaliella salina* DCCBC2 with other related green microalgae

Microalgae	Light strength	Temperature (°C)	pH	Nitrogen (mM)	Phosphorus (mM)	CO ₂ (%)	Biomass product (g/L)	Biomass productivity (g/L/d)	Ref.
<i>Chlorella</i> sp.	100 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$	27	7.0	20.0	2.0	1	1.53	0.6	in this study
<i>Chlorella</i> sp.	100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$	20	7.2	17.6	0.3	5	2.02	0.3	[12]
<i>Chlorella vulgaris</i>	3200 lux	30	6.6-8.6	2.94	1.29	6	1.31	0.1	[13]
<i>D. salina</i> DCCBC2	80 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$	27	8.0	3.0	0.025	3	3.40	1.6	in this study
<i>D. salina</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.22-0.34	[5]
<i>D. tertiolecta</i>	-	-	-	-	-	-	-	0.12	[5]

하며, 또한 효율적인 광생물반응기 (photobioreactor, PBR) 개발도 요구되고 있다. 특히 미세조류의 효과적인 대량배양을 위해 전 세계적으로 배양기 개발에 주력하고 있다 [4]. 광생물반응기는 형태에 따라 관형, 관형, 수직형 등이 있으며, 특히 국토면적이 좁고 사계절이 뚜렷한 우리나라의 경우 효과적인 광생물반응기의 개발이 중요하다. 최근에 다양한 형태의 광생물반응기가 보고되고 있지만 아직 만족할 만큼의 최적화된 반응기는 개발되지 못하고 있다.

일반적으로 바이오디젤을 비롯한 바이오에너지 생산과 관련하여 많은 종의 미세조류가 연구되고 있다. 특히 바이오매스 생산성에 있어서 *Chlorella vulgaris* 종은 0.02-0.20 g/L/day로 보고되어 있고 또 다른 *Chlorella* sp.는 0.02-7.70 g/L/day를 나타내 종별로 차이가 많은 것으로 알려져 있다. 또한 *Dunaliella tertiolecta*의 경우 0.12, *Dunaliella salina*는 0.22-0.34 g/L/day로 보고되어 있다 [5].

본 연구팀은 앞서 발표한 논문에서 두 종의 녹조류 *Chlorella* sp.와 *Dunaliella salina* DCCBC2를 플라스크 레벨에서 반응표면분석법 (response surface methodology)을 이용하여 최적 배양조건을 산출하였다 [6]. 또한 이들의 비생장율과 함께 바이오매스 생산량을 조사한 결과 각각 0.28과 0.54 g/L/day로 나타나 기존에 연구되고 있는 종과 거의 유사하거나 오히려 생산성이 높은 것으로 확인되었다. 본 연구에서는 앞선 연구결과에서 획득한 실험결과를 바탕으로 자체 제작한 12 L 부피의 관형-광생물반응기 (tubular-photobioreactor)를 이용하여 담수녹조류인 *Chlorella* sp.와 해양녹조류인 *Dunaliella salina* DCCBC2 두 종을 대량배양하기 위한 각 최적배양조건을 확립하고, 이 결과를 기반으로 연속배양한 후 각 미세조류 별 최대 바이오매스 생산량을 조사하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 미세조류 및 사용배지

본 연구에서 사용한 미세조류는 담수조류인 *Chlorella* sp.와 해수조류인 *Dunaliella salina* DCCBC2이며, 한양대학교 진언선 교수 연구팀으로부터 분양을 받아 사용하였다. *Chlorella* sp. 배양에 사용한 배지는 TAP (Tris-acetate-phosphate) medium [7]이고, *D. salina* DCCBC2의 배양에는 Castenholz D medium [8]을 사용하였으며, 각 배지의 조성은 다음과 같다. TAP 배지 (L 당) : 0.8 g NH₄Cl, 0.1 g CaCl₂·

2H₂O, 0.2 g MgSO₄·7H₂O, 0.3 g K₂HPO₄, 0.05 g EDTA·2H₂O, 0.005 g FeSO₄·7H₂O, 0.022 g ZnSO₄·7H₂O, 0.005228 g H₃BO₃, 0.0051 g MnCl₂·4H₂O, 0.0011 g CuCl₂·2H₂O, 0.0026 g Na₂Mo·2H₂O, 0.0016 g CoCl₂·6H₂O. D 배지 (L 당) : 58.44 g NaCl, 4.844 g Tris, 0.5055 g KNO₃, 0.91576 g MgCl₂·6H₂O, 0.12325 g MgSO₄·7H₂O, 0.0441 g CaCl₂, 0.0228 g K₂HPO₄, 0.00055 g FeCl₃, 0.00245 g EDTA, 0.000305 g H₃BO₃, 0.000198 g MnCl₂·4H₂O, 0.000023 g ZnSO₄·5H₂O, 0.00001 g CuSO₄·5H₂O, 0.000048 g NaMoO₄·2H₂O, 0.000005 g CoCl₂·6H₂O, 0.000027 g NaVO₃, 2.1 g NaHCO₃. 각 배지는 121°C에서 15분간 멸균 및 냉각 후 사용하였다.

2.2. 배양조건

각 미세조류는 조류배양실에서 미세조류용 culture flask를 이용하여 약 12일을 주기로 계대배양하면서 균주를 보존하였고, 조류배양실의 온도는 약 22~25°C로 일정하게 유지하였다. 또한, 빛의 세기는 80~110 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 설정하였고, 12시간 주기의 명과 암 조건에서 배양하였다.

2.3. 광생물 반응기 제작 및 재료

미세조류의 대량 및 연속배양을 위해 반응기의 형태, 빛의 효율, 온도 제어, 오염 제어, 가스 조절, scale-up 등을 조사한 결과, 여러 가지 사항을 검토할 때 본 연구에는 원통형태의 반응기가 가장 적절하다는 결론을 내렸고, 이에 따라 원통형태의 광생물반응기를 제작하게 되었다. Pyrex glass 재질의 원통형 광생물반응기는 직경이 15 cm이고, 길이는 70 cm이며 (총 부피 12 L), 실제 실험 시 10 L의 배양액을 제조하여 사용하였다. 각각 100% 질소와 15% 이산화탄소가 들어 있는 봄베로부터 flow meter를 사용하여 이산화탄소를 원하는 농도로 혼합하여 사용하였고, 0.2 μm air filter를 통과시켜 미생물을 제거하면서 광생물반응기에 주입하였다. 혼합된 이산화탄소를 광생물반응기 하단에 설치한 일정한 간격의 미세기공을 갖고 있는 기포발생기를 통해 주입함으로써 반응기 내 배양액으로 이산화탄소가 골고루 퍼지도록 설계하고, 또한 미세조류의 원활한 교반을 유도하였다. 광생물반응기의 거치대는 각각의 반응기가 고정될 수 있도록 steels steel로 제작하였으며, 하나의 거치대에 4개의 관형 반응기를 가로 방향으로 누어 거치하여 실험에 이용하였다. 본 연구에 사용한 광생물반응기의 개략도는 Fig. 1에 나타내었다. 한편 관형-광생물반응기를 사용한 미세조류의 연속배

양을 위해 각 광생물반응기에 신선한 배양액의 유입구와 배양 후 배양액의 유출부를 각각 설치하였다. 새로운 배양액의 유입부는 광생물반응기의 측면의 상부에, 그리고 배양된 배양액의 유출부는 반응기의 측면 하부에 위치하도록 하였다. 배양액의 유입과 유출을 위해 peristaltic pump (Cole-Parmer, Master Flex L/S)를 이용하였으며, 거치대의 하부에 바퀴를 부착한 후 벽면에 고정되어 있는 형광램프로부터 거리를 조절하여 빛의 세기를 조정하였다.

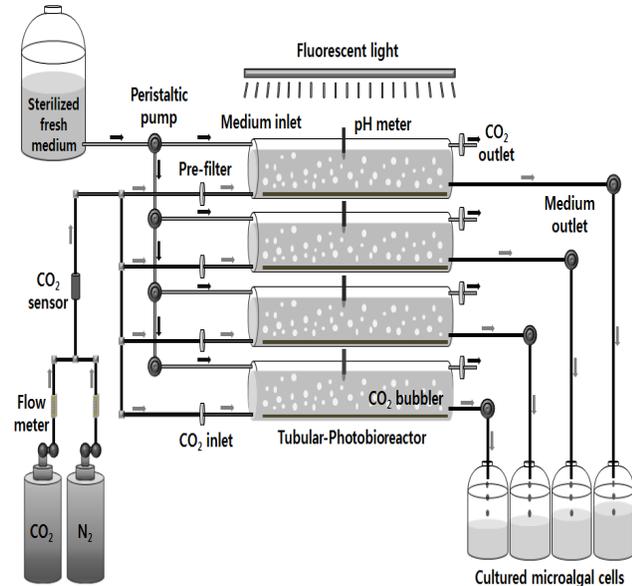


Fig. 1. Schematic diagram of tubular-photobioreactor system for continuous cultivation of microalgae.

2.4. 회분배양조건의 최적화

12 L 광생물반응기를 이용한 대량배양 및 연속배양 시 각 미세조류를 최적조건에서 배양하기 위해 먼저 대상 미세조류의 회분배양 최적조건을 확립하였다. 미세조류를 최적화된 조건에서 배양하기 위해서는 빛의 세기, 온도, pH, 이산화탄소의 농도 그리고 질소 및 인 농도와 같은 여러 인자들의 영향을 파악하는 것이 필요하다 [9-11]. 두 미세조류의 빛의 세기는 40~100 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 범위에서 20 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 의 간격으로 빛의 세기를 달리 하였으며, 배양실의 온도를 각각 23~29°C의 범위에서 2°C의 간격으로 설정하여 최적온도를 조사하였다. 그리고 주입되는 이산화탄소의 농도를 각각 0.04 (대기 중 농도), 1.0, 3.0, 5.0, 10 그리고 15%로 각각 조절하여 최적 이산화탄소농도를 조사하였다. 주입속도는 0.05 vvm으로 설정하였다. 마지막으로 최적 질소 및 인 농도를 알아보기로, *Chlorella* sp.의 경우 NH_4Cl 을 15, 20, 25 그리고 30 mM의 농도로, *D. salina* DCCBC2는 KNO_3 의 농도를 1, 3, 5 그리고 7 mM의 농도로 조절하였다. 또한 인의 경우 *Chlorella* sp.는 K_2HPO_4 를 2, 4, 6 그리고 8 mM로, *D. salina* DCCBC2는 K_2HPO_4 를 0.025, 0.1, 0.2 그리고 0.4 mM의 농도로 조절하였다. 위의 각 조건들로 조절하여 대상 미세조류를 11일 동안 배양하였으며, 각 조건들이 미세조류 성장 및 바이오매스에 미치는 영향을 알아보고 최적

조건을 확립하였다.

2.5. 연속배양을 위한 희석률 조사

미세조류를 광생물반응기를 이용하여 연속배양하기 위해 최적화된 조건에서의 미세조류 배양을 통해 각 희석률 (dilution rate, D)을 조사하고, 각 희석률에 따른 미세조류 별 최대 바이오매스 생산성 (biomass productivity, $\text{g}/\text{L}/\text{d}$)을 산출하였다. 연속배양은 회분 배양과 달리 지속적으로 반응기에 일정 부피의 배양액이 공급됨과 동시에 반응기 내의 기존 배양액이 회수됨으로써 반응기 내의 배양액 부피를 일정하게 유지할 수 있으며, 미세조류의 최종 농도는 제한적으로 공급되는 배지의 농도에 따라 달라진다.

Fig. 1에서처럼 4개의 관형-광생물반응기에 각각 멸균된 10 L의 배양액을 준비하고 일정농도의 각 미세조류를 11일 동안 배양한 후 12일이 되었을 때 각 희석률에 따른 연속배양을 19일간 진행하였다. 그리고 연속배양을 위해 새로운 배양액을 멸균한 후 희석률에 따라 peristaltic pump의 속도를 일정하게 설정하여 배양액을 공급하였으며, 각 배양액의 공급 속도와 동일한 속도로 배양된 배양액을 회수하여 바이오매스의 생산량 및 생산성을 조사하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 회분배양 최적조건 확립

본 연구실에서는 이미 플라스크를 이용한 반응표면분석법을 통해 미세조류별 pH, 질소 그리고 인 농도에 대한 각 조건별 최적조건을 분석한 바 있다. *Chlorella* sp.의 경우, pH 7.0, NH_4Cl 17.0 mM 및 K_2HPO_4 2.0 mM로 조사되었으며, *D. salina* DCCBC2의 경우, pH 8.0, KNO_3 3.3 mM 및 K_2HPO_4 0.0375 mM로 각각 조사되었다 [6]. 플라스크 상에서의 미세조류 별 최적화 조건을 바탕으로 관형-광생물반응기에서 각 미세조류별로 pH, 질소 및 인 농도, 빛의 세기 그리고 배양 온도 등의 회분배양 최적화 조건을 산출하였다. 그 결과 플라스크를 이용하여 얻은 결과와 유사한 최적 배양조건을 관형 반응기에서도 얻을 수 있었다. *Chlorella* sp.의 경우는 pH 7.0, NH_4Cl 20.0 mM 및 K_2HPO_4 2.0 mM로 조사되었으며, 이외에 빛의 세기는 100 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$ 그리고 배양온도는 27°C로 나타났다 (Fig. 2(a-b)). 한편 *D. salina* DCCBC2의 경우도 pH 8.0, KNO_3 3.0 mM 및 K_2HPO_4 0.025 mM로 각각 조사되었으며, 빛의 세기는 80 $\mu\text{E}/\text{m}^2/\text{s}$, 온도는 27°C로 나타났다 (Fig. 2(c-d)). 본 연구에서는 12 L 관형 광생물반응기를 이용하여 앞서 회분배양 시 산출한 최적배양조건 하에서 *Chlorella* sp.의 시간에 따른 바이오매스 생산량의 변화를 측정하였으며, 11일 배양 후 1.2 g/L의 바이오매스를 생산하였다 (Fig. 3(a)). 또한, *D. salina* DCCBC2의 경우에는 11일 배양 후 2.9 g/L의 바이오매스 생산량이 얻어졌다 (Fig. 3(b)). 두 종의 미세조류를 비교해 볼 때 동일한 시간 내에 *D. salina* DCCBC2가 *Chlorella* sp.보다 2배 이상 많은 바이오매스를 생산하였으며, 이는 향후 바이오매스를 생산한다는 목적 하에서는 *D. salina* DCCBC2가 유리하다는 것을 의미한다.

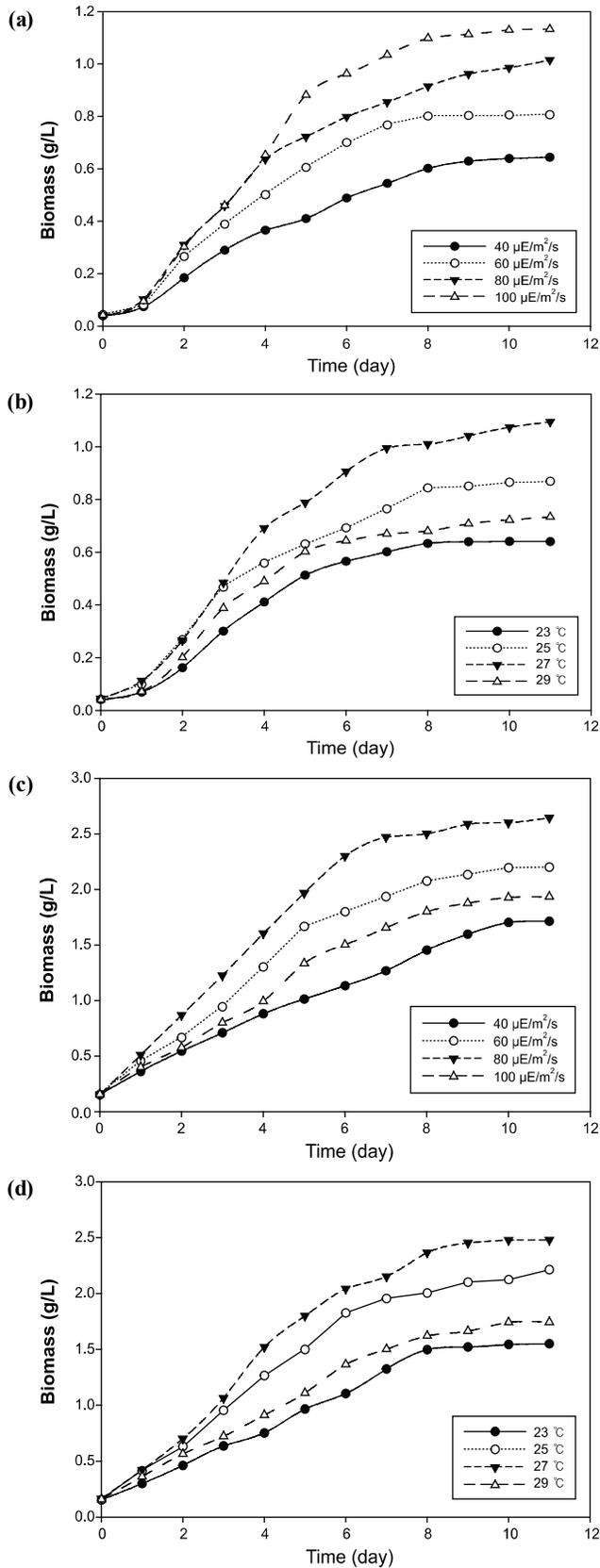


Fig. 2. Effect of light intensity, and temperature on microalgal biomass production in a 12 L photobioreactor. (a-b) *Chlorella sp.*; (c-d) *Dunaliella salina* DCCBC2.

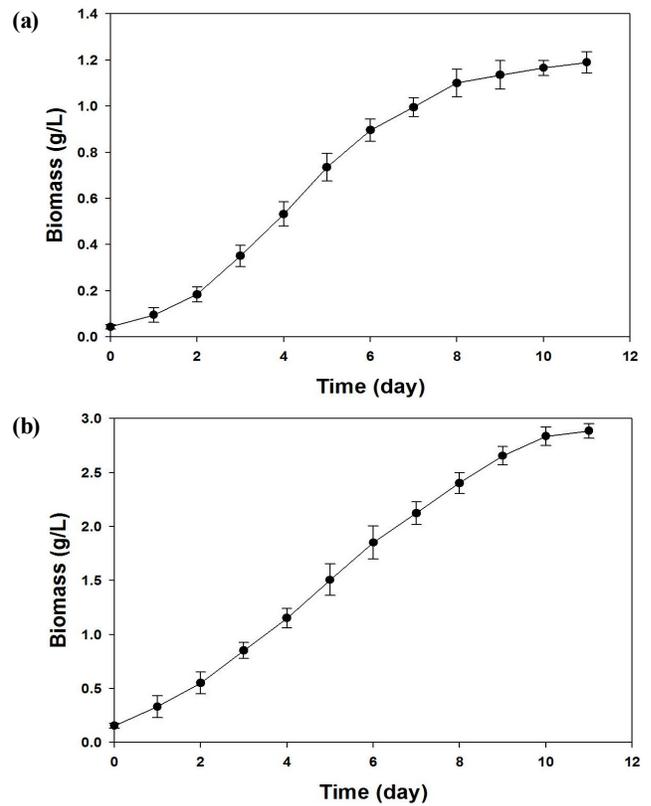


Fig. 3. Biomass productions of two green microalgae under the optimum batch culture condition in a 12 L photobioreactor. (A) *Chlorella sp.*; (B) *Dunaliella salina* DCCBC2.

3.2. 대량배양을 위한 이산화탄소 농도 최적화

위의 최적조건 하에서 12 L 광생물반응기를 이용하여 각 대상 미세조류에 0.04~15%의 CO₂를 각각 0.05 vvm 속도로 주입하면서 각 농도에 따른 미세조류 별 성장 및 바이오매스량을 조사한 후, 공기를 주입할 때와의 바이오매스 생산량과 비교하였다 (Fig. 4). *Chlorella sp.*는 CO₂의 농도가 1%로 주입되는 조건에서 11일 동안 1.53 g/L을 생산하여 가장 높은 바이오매스량을 나타내었으며, 0.5%의 CO₂ 농도에서는 1.47 g/L를 생산하였다. 즉, 공기를 주입하여 배양할 때 (1.2 g/L)보다 최대 약 25% 증가한 바이오매스량을 나타내었다. 반면 CO₂ 농도가 점차 고농도로 갈수록 오히려 성장에 저해를 받는 것으로 나타났으며, 10% 이상에서는 거의 생장이 이루어지지 않았다. *D. salina* DCCBC2는 3%의 CO₂ 농도 하에서 가장 높은 바이오매스량 (3.4 g/L)을 나타내었으며, 0.04, 0.5 및 1%의 CO₂에서는 2.9, 3.1 및 3.1 g/L로 각각 조사되었다. *Chlorella sp.*와 마찬가지로 공기를 주입하였을 때 (2.9 g/L) 보다 약 10% 많은 바이오매스량을 나타내었다. *D. salina* DCCBC2이 경우도 CO₂ 농도가 점차 고농도로 갈수록 성장에 저해를 받는 것으로 나타났으나 10%에서도 어느 정도는 생장이 이루어져 *Chlorella sp.*에 비해 고농도의 CO₂의 농도에 대해 어느 정도 저항성이 있는 것으로 보인다. 결국 대기 중 CO₂나 발전소 배출가스 중 CO₂를 제거하기 위해 미세조류를 이용할 경우 *D. salina* DCCBC2을 사용하는 것이 더욱 효과적인 것으로 사료된다.

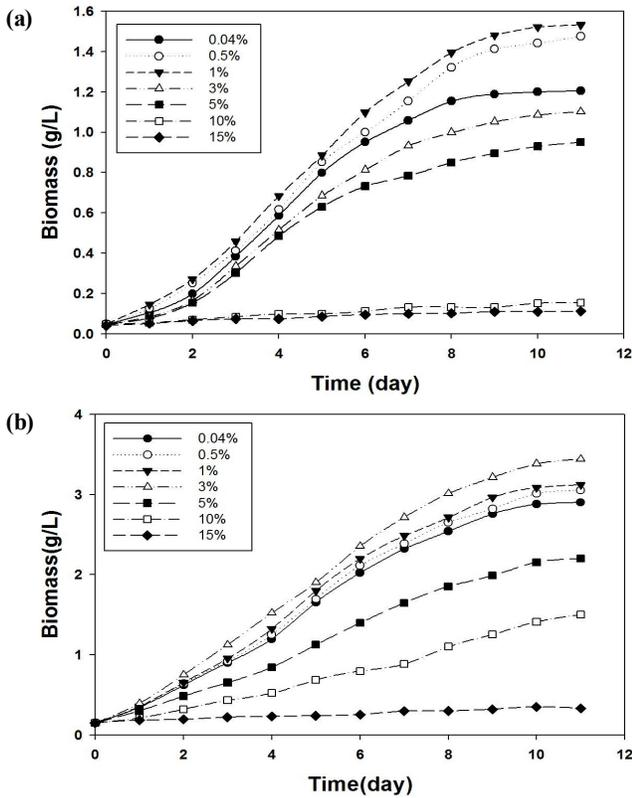


Fig. 4. Effect of CO₂ on microalgal biomass production in a 12 L photobioreactor. (a) *Chlorella sp.*; (b) *D. salina DCCBC2*.

3.3. 연속배양을 위한 최적 희석률 및 바이오매스 생산성

Fig. 5에 나타난 바와 같이 관형-광생물반응기를 이용한 연속배양 조건을 탐색하기 위해 *Chlorella sp.*와 *D. salina DCCBC2*의 희석률과 시간에 따른 바이오매스 생산성을 알아보았다. 본 실험에서 얻은 최적 CO₂ 농도로 맞춰 *Chlorella sp.*는 1%, *D. salina DCCBC2*는 3%의 CO₂를 공급하면서 배양하였다. 배양액에 중균을 접종한 후 11일 동안 배양한 후 최대 성장을 보일 때부터 신선한 배지를 공급하면서 총 19일간 배양하였다. *Chlorella sp.*는 희석률이 0.4/d일 때 최대 0.60 g/L/d의 생산성을, *D. salina DCCBC2*는 희석률이 0.6/d일 때 1.50 g/L/d의 가장 높은 바이오매스 생산성을 나타내었다. 희석률이 0.2, 0.6, 0.8 그리고 1.0/d 일 때 *Chlorella sp.*의 바이오매스 생산성은 각각 0.31, 0.55, 0.49 그리고 0.37 g/L/d로 조사되었으며, *D. salina DCCBC2*는 0.71, 1.30, 1.40 그리고 1.30 g/L/d로 각각 조사되었다. 최적 희석률보다 희석률이 커질수록 점차적으로 바이오매스 양 및 생산성은 감소하였다. 이는 미세조류의 성장속도보다 빠른 속도로 새로운 배양액이 유입되면서 반응기 내 배양액의 유출 속도가 빨라 반응기 내의 미세조류가 제대로 증식을 하지 못하고 희석되기 때문이다. 최적조건 하에서 10 L 배양액을 이용하여 19일 동안 각 미세조류를 연속배양하면서 획득한 바이오매스 건조 생산량을 비교해 보았을 때 *Chlorella sp.*는 114 g, *D. salina DCCBC2*는 285 g의 미세조류를 생산하였다. 결국 *Chlorella sp.*보다는 *D. salina DCCBC2*가 미세조류 바이오매스 생산에 더욱 유리하다는 것

을 알 수 있었다.

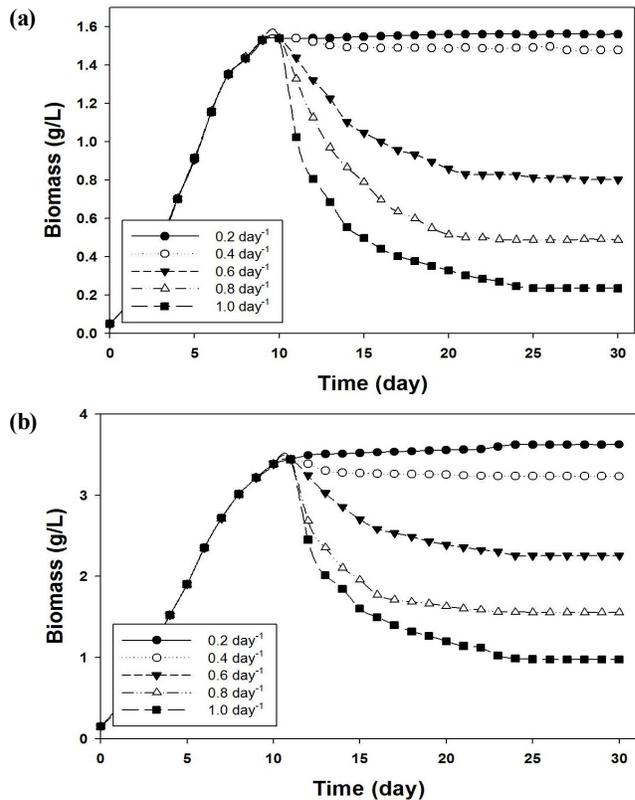


Fig. 5. Investigation of dilution rate (D) to obtain maximum biomass productivity during continuous cultures of two microalgae in a 12 L photobioreactor. (a) *Chlorella sp.*; (b) *D. salina DCCBC2*.

지금까지 나타난 두 종 미세 녹조류의 바이오매스 생산량을 같은 속의 다른 미세조류와 비교한 결과, *Chlorella* 종들은 종에 따라 많은 차이를 보이고 있다 [5]. 부피당 바이오매스 생산성을 보면 *C. emersonii*는 0.036-0.041 g/L/d를 보인 반면 *C. protothecoides*는 2.00-7.70으로 매우 높은 생산성을 보이고 있다. Ryu 등 [12]은 *Chlorella sp.* AG10002를 이용하여 빛의 세기 100 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 배양온도 20°C, pH 7.2, NaNO₃ 17.6 mM, KH₂PO₄ 0.3 mM 그리고 CO₂ 5%의 조건 하에서 2.02 g/L의 바이오매스를 생산하였고, 이때의 생산성은 0.3 g/L/d로 보고하였다. 또한 *C. vulgaris*는 43 $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$, 30°C, pH 6.5-8.6, NaNO₃ 2.94 mM, KH₂PO₄ 1.29 mM 그리고 6% CO₂의 조건에서 1.3 g/L의 바이오매스와 1.0 g/L/d의 생산성을 보였다 [13]. 따라서 본 연구에서 사용한 *Chlorella sp.*의 생산성을 다른 종과 비교하였을 때 아주 우수하지는 않았지만 비교적 높은 생산성을 나타낸 것으로 사료된다. 한편 *Dunaliella* 속의 생산성은 대략 0.09-0.34 g/L/d로 비교적 생산성이 낮은 것으로 보고되어 있다. *D. salina*는 0.22-0.34 g/L/d를 [14], *D. tertiolecta*는 0.12 g/L/d의 생산성을 보였다 [5]. 이에 비해 본 연구실에서 사용한 *D. salina DCCBC2*는 1.5 g/L/d의 바이오매스 생산성을 보여 매우 우수한 결과를 도출할 수 있었다. 결론적으로 *D. salina DCCBC2*의 바이오매

스 생산성은 *Dunaliella* 속뿐만 아니라 *Chlorella* 속의 어떤 종보다도 우수한 바이오매스 생산성을 보인 것으로 확인되었다.

4. 결론

12 L 관형 광생물반응기에서 두 종의 녹조류 *Chlorella* sp. 와 *D. salina* DCCBC2의 최적 회분배양 조건과 바이오매스 생산량을 조사하였다. CO₂ 공급원으로써 공기를 주입하고, 빛의 세기 100 µE/m²/s, 배양온도 27°C, pH 7.0, NH₄Cl 17.0 mM 및 K₂HPO₄ 2.0 mM의 조건에서 배양하였을 때 *Chlorella* sp.의 경우 1.2 g/L의 바이오매스를 생산하였다. *D. salina* DCCBC2는 빛의 세기 80 µE/m²/s, 온도 27°C, pH 8.0, KNO₃ 3.3 mM 및 K₂HPO₄ 0.0375 mM의 조건에서 2.9 g/L의 바이오매스를 생산하였다. 위 조건에서 공기 대신에 CO₂의 농도를 1%로 하여 주입할 때 *Chlorella* sp.는 1.53 g/L의 바이오매스를 생산하였고, *D. salina* DCCBC2는 CO₂의 농도를 3% 주입하였을 때 3.40 g/L을 생산하였다. 이들 최적화된 조건하에서 연속배양하면서 최적 희석률을 조사한 결과, *Chlorella* sp.는 0.4/d이었고, *D. salina* DCCBC2는 0.6/d이었으며, 이때의 각 바이오매스 생산성은 0.6 g/L/d 및 1.5 g/L/d로 나타났다.

감사

본 연구는 2010년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술연구원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제입니다 (과제번호: 20103020090020).

References

- Oh, H. M. (2009) Maeil Business Newspaper, Column, 12 June.
- Oh, H. M. (2009) Bioin Special Zine "Bioenergy" Biotech Policy Research Center.
- Jo, B. H. and H. J. Cha (2010) Biodiesel production using microalgal marine biomass. *Kor. J. Biotechnol. Bioeng.* 25: 109-115.
- Ugwu, C. U., H. Aoyagi, and H. Uchiyama (2008) Photobioreactors for mass cultivation of algae. *Bioresour. Technol.* 99: 4021-4028.
- Mata, T. M., A. A. Martins, and N. S. Caetano (2010) Microalgae for biodiesel and other applications. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14: 217-232.
- Kim, W. D., J. M. Park, G. H. Gim, S. H. Jeong, C. M. Kang, D. J. Kim, and S. W. Kim (2012) Optimization of culture conditions and comparison of biomass productivity of three green algae. *Bioprocess Biosyst. Eng.* 35: 19-27.
- Harris, E. H. (1989) *The Chlamydomonas Sourcebook: A Comprehensive Guide to Biology and Laboratory Use.* Academic Press, San Diego, CA. USA.
- Castenholz, R. W. (1969) Thermophilic blue-green algae and the thermal environment. *Bact. Rev.* 33: 476-504.
- Converti, A., A. A. Casazza, E. Y. Ortiz, P. Perego, and M. D. Borghi (2009) Effect of temperature and nitrogen concentration on the growth and lipid content of *Nannochloropsis oculata* and *Chlorella vulgaris* for biodiesel production. *Chem. Engineer. Process.* 48: 1149-1151.
- Pal, D., I. Khozin-Goldberg, Z. Cohen, and S. Boussiba (2011) The effect of light, salinity, and nitrogen availability on lipid production by *Nannochloropsis* sp.. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* 90: 1429-1441.
- Yang, Y. and K. Gao (2003) Effect of CO₂ concentration on the freshwater microalgae, *Chlamydomonas reinhardtii*, *Chlorella pyrenoidosa* and *Scenedesmus obliquus* (Chlorophyta). *J. Appl. Phycol.* 15: 1-11.
- Ryu, H. J., K. K. Oh, and Y. S. Kim (2009) Optimization of the influential factors for the improvement of CO₂ utilization efficiency and CO₂ mass transfer rate. *J. Ind. Eng. Chem.* 15: 471-475.
- de Morais, M. G. and J. A. V. Costa (2007) Carbon dioxide fixation by *Chlorella kessleri*, *C. vulgaris*, *Scenedesmus obliquus* and *Spirulina* sp. cultivated in flasks and vertical tubular photobioreactor. *Biotechnol. Lett.* 29: 1349-1352.
- Griffiths, M. J. and S. T. L. Harrison (2009) Lipid productivity as a key characteristic for choosing algal species for biodiesel production. *J. Appl. Phycol.* 21: 493-507.