

혼합영양 배양조건에서의 *Anabena* 배양을 위한 유기탄소(acetate 종류 및 농도) 선정 연구

홍카이 · 고시원 · 이태윤*

부경대학교 환경공학과
48513 부산광역시 남구 용소로 45
(2017년 6월 16일 접수, 2017년 7월 11일 수정본 접수, 2017년 8월 18일 채택)

Selection of Organic Carbon (Different Form of Acetate Compounds and Concentration) for Cultivation of *Anabena* under Mixotrophic Cultivation Mode

Kai Hong, Siyuan Gao and Taeyoon Lee†

Department of Environmental Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan, 48513, Korea
(Received 16 June 2017; Received in revised form 11 July 2017; accepted 18 August 2017)

요 약

본 연구는 혼합영양 배양 조건에서 acetate의 주입이 *Anabena azollae*의 성장에 미치는 영향을 파악하기 위해 수행되었다. 4가지 종류의 acetate 중 ethyle acetate가 *Anabena azollae*의 성장에 가장 효과적이라고 밝혀졌으며, 주입한 ethyle acetate의 농도가 증가할수록 성장속도는 증가하는 것을 확인하였다. 40 mM의 ethyl acetate의 경우 비성장속도는 0.979 day^{-1} , 최대바이오매스 생산성은 $0.293 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 본 연구에서 배양속도가 가장 빠른 것으로 판명되었다. Acetic acid와 butyl acetate의 경우 *Anabena azollae* 성장을 방해하는 것으로 나타났다. Aeration의 경우 0.54 vvm에서 성장속도가 가장 빨랐다. 반연속배양에서는 aeration 실험이 끝난 후 연속하여 ethyle acetate 주입을 하여 배양을 하였다. 회분식실험에 비해 반연속배양에서의 비성장속도와 최대바이오매스 생산성은 모두 감소하였지만 최대 농도는 5.91 g/L 로 가장 큰 값을 나타내었다.

Abstract – The main objective of this study was to evaluate the effects of acetate on the cultivation of anabena under mixotrophic condition. Four different types of acetates were used for the anebena cultivation. Among them, ethyl acetate was found to be the most effective and the growth rates linearly increased as the amount of ethyl acetate increased. When 40 mM of ethyl acetate was used, the highest values of specific growth rate of 0.979 day^{-1} and maximum biomass productivity of $0.293 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ were obtained. On the contrary, input of acetic acid and butyl acetate inhibited the growth of anabena. For aeration tests, 0.54 vvm was optimum for anabena cultivation. For a semi-continuous cultivation test, ethyl acetate was used after 0.54 vvm test was finished. Then, test continued under 0.54 vvm and 40 mM of ethyl acetate. Lower specific growth rate and maximum biomass productivity were obtained compared to those from batch cultivation tests. However, the greatest maximum concentration of 5.91 g/L was obtained during the semi-continuous cultivation test.

Key words: *Anabena azollae*, Mixotrophic cultivation, Specific growth rate, Maximum biomass productivity, Semi-continuous cultivation

1. 서 론

남조류(Cyanobacteria)는 대기중의 이산화탄소 및 질소고정(nitrogen fixation)을 하는 광독립(photoautotrophic) 미세조류이다. 남조류는 태양빛 에너지, 물, 이산화탄소, 그리고 필수적인 영양물질(N, P, S, K, 그리고 Fe)이 있으면 쉽게 자라는 특징이 있다[1]. 남조

류는 또한 다양한 형태의 유기물질을 포함한 농업폐수나 산업폐수를 이용하여 배양되기도 한다[2]. 남조류는 햇빛, 이산화탄소, 수중의 인과 질소 등과 같은 필수요소가 제공되어 지면 일반 육식식물에 비해 성장속도가 빠르기 때문에 바이오디젤 생산에 효과적으로 사용되어 질 수 있다. 최근의 연구에 의하면 미세조류를 이용한 바이오디젤 생산에 있어서 1갤론당 \$18 이하가 되어야 경제성이 있는 것으로 보고 되었다[3]. 현재로서는 이 기준에 맞추기가 어렵기 때문에 미세조류 생산의 전과정 모두에 대해 성능개선이 필요한 실정이다.

미세조류의 배양방식은 생산된 바이오매스의 경제성에 큰 영향을 주는 요소이므로 최적의 배양방식을 선정하는 것이 중요하다고 할 수 있다[4-6]. 배양방식은 독립영양(autotrophy), 종속영양(heterotrophy),

*To whom correspondence should be addressed.

E-mail: badger74w@pknu.ac.kr

‡이 논문은 부경대학교 이재근 교수의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

혼합영양(mixotrophy), 그리고 광종속영양(photoheterotrophy)으로 구분되어 진다. 독립영양 배양방식은 대기중의 이산화탄소를 탄소원으로 사용하고 태양빛을 에너지원으로 하여 바이오매스를 생산한다. 종속영양 배양방식은 무기탄소인 이산화탄소를 사용하지 않고 배양액속에 포함된 유기탄소를 탄소원 및 에너지원으로 사용한다. 혼합영양 배양방식은 이산화탄소와 유기탄소를 탄소원과 에너지원으로 사용하여 바이오매스를 생산하는 방법이며, 광종속영양 배양방식은 태양빛을 이용하여 광합성을 하지만 이산화탄소를 이용하지 않고 유기탄소를 탄소원으로 사용하는 방식이다. 독립영양 방식은 오래전부터 사용되는 전통적인 방법으로 광범위하게 사용되지만 생산된 바이오매스의 농도가 낮아 수확효율을 고려하면 비경제적인 배양방식이라고 할 수 있다[7]. 대량배양 시 미세조류의 농도가 높아지면 빛이 침투할 수 없는 지역이 발생하게 되어 전체적인 배양효율을 낮추는 결과를 초래한다. 이러한 경우 혼합영양 배양방식을 적용하면 낮은 미세조류 농도에서는 독립영양 방식에 의해 미세조류가 성장하고 높은 미세조류 농도에서는 빛이 필요 없는 종속영양 방식에 의해 미세조류가 성장할 수 있다고 보고되었다[8]. 실제 혼합영양 방식을 적용한 경우 독립영양 방식에 비해 *Nannochloropsis* sp.의 경우 1.6배[9], *Neochloris oleoabundans*의 경우 1.5배[10] 이상 농도가 증가하는 것으로 보고되었다.

혼합영양 방식에서는 이산화탄소와 유기탄소가 모두 미세조류의 성장에 필수적인 요소이므로 이산화탄소의 주입량, 유기탄소의 종류, 유기탄소의 농도 등의 선정은 성공적인 배양을 위한 필수조건이라 할 수 있다. 유기탄소의 경우 glucose, xylose, rhamnose, fructose, sucrose, galactose, acetate 등이 다양한 미세조류 배양에 효과적이라는 것이 확인되었다[11]. 이 중 acetate를 이용한 미세조류 배양 및 수소 생산 연구가 최근 활발히 진행이 되고 있으며 다른 유기탄소원에 비해 저렴하고 미세조류 배양에 더욱 효과적인 것으로 보고 되었다[12].

본 연구에서는 남조류인 *Anabena azollae*를 혼합영양 배양방식으로 배양하였으며, 이때 사용되는 유기탄소원으로 acetate를 선정하여 배양에 최적인 acetate의 종류와 농도를 찾아내고자 하였다. 이 연구를 통해 혼합영양 방식으로 배양되는 *Anabena azollae*의 배양효과가 증진된다면 추후 미세조류를 이용한 바이오디젤 생산에서의 경제성을 높여 친환경에너지 보급에 크게 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

2. 실험 재료 및 방법

2-1. 사용 미세조류 및 배지

본 연구에 사용된 미세조류는 *Anabena azollae* (LIMS-PS-2162)로 한국해양미세조류은행(KMMCC, Korea)로부터 분양받았다(Fig. 1).

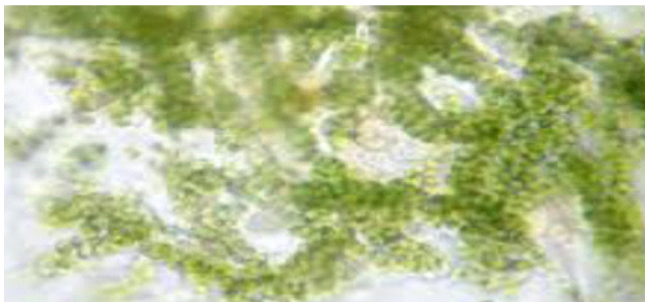


Fig. 1. Photo (×400) of *Anabena azollae* (LIMS-PS-2162).

Table 1. Jaworski's medium and artificial medium composition (Unit: mg/L Deionized Water)

Component	Contents	
	JW	Artificial Medium
Ca(NO ₃) ₂ ·4H ₂ O	20	200
KH ₂ PO ₄	12.4	124
MgSO ₄ ·7H ₂ O	50	—
NaHCO ₃	15.9	—
Na ₂ HPO ₄ ·12H ₂ O	36	360
NaNO ₃	80	800
EDTA FeNa	2.25	—
EDTANa ₂	2.25	—
H ₃ BO ₃	2.48	—
MnCl ₂ ·4H ₂ O	1.39	—
(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ ·4H ₂ O	1.00	—
cyanobalamin	0.04	—
thiamine HCl	0.04	—
biotin	0.04	—
CH ₃ COONH ₄	—	1930
Total PO ₄ ³⁺	18.2	138.2
Total NO ₃ ⁻	68.9	688.5

사용된 배지는 Table 1에 나타난 바와 같은 성분의 JM배지(Jaworski's Medium)와 필요 시 고농도 인과 질소 및 아세테이트를 포함한 인공 배지를 조제하여 121 °C에서 15분간 멸균하여 사용하였다.

2-2. 실험방법

*Anabena azollae*의 성장 실험은 공기 공급 속도에 따른 성장 속도를 비교하기 위해서 에어 펌프를 이용하여 공기의 공급 속도를 0, 0.12, 0.54, 그리고 1.08 vvm의 범위로 달리하였다. 광원으로는 660 nm 파장으로 발광하는 적색 LED를 사용하였는데 이는 Lee 등[13]의 연구에서 녹색계통의 조류의 배양에는 적색 LED를 사용하였을 때 가장 우수하다고 보고하였기 때문이다. 반응기는 가로 60 cm, 세로 60 cm, 높이 30 cm의 크기로 반응시스템을 제작하였으며 LED 램프는 S-tech LED사로부터 bar 형식의 LED램프를 구입하여 실험하였다. 광원은 반응기의 상부에 설치하여 위에서 아래로 광을 공급하였다. 조도 및 광량은 조도 2,260 lux, 38 μmol/m²/s로 하였으며, 조도계(IL-346 Illuminometer, Sekonic Co., Philippines)와 광량계(MQ-306,

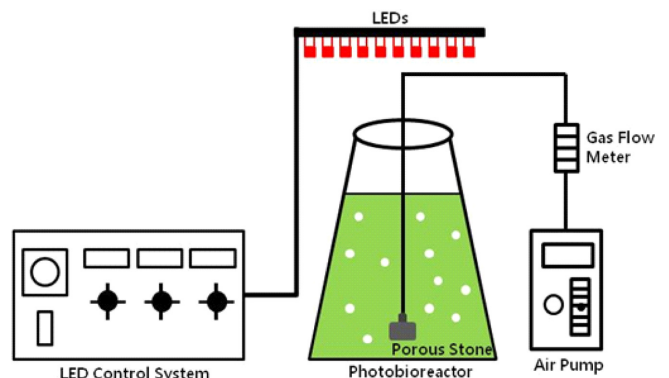


Fig. 2. Schematic diagram of the photobioreactor for the experiments on *Anabena* growth for batch and semicontinuous microalgal culture. The airstreams was adjusted by a gas flow meter. External illumination of light was provided by a continuous LED light.

Apogee Instruments, Inc., Logan, UT)를 사용하여 측정하였다. 반응 시스템은 Fig. 2와 같이 구성되었으며 반응조건에 따라 배양조의 크기는 100 혹은 500 mL로 변경하여 사용하였다.

*Anabena azollae*의 성장특성 연구는 100 혹은 500mL 용량의 코니칼 비이커를 사용하여 희석한 초기배양액을 주입하여 계획한 초기농도로 맞춘 후 파라필름을 이용해 비커의 입구를 막은 후 미세구멍을 뚫어 주었다. 공기 공급 속도 따른 성장 속도를 비교하기 위하여 반응기의 바닥 부분에 산기석(porosity)을 고정시켜 에어펌프를 조정하여 공급 속도를 조절하였다. 아세테이트 주입 실험의 경우에는 100 ml 비이커에 20 mM의 Acetic acid, ethyl acetate, butyl acetate, ammonium acetate를 넣은 후 JM 배지로 채운 후 배양 실험을 실시하였다. 온도조절은 실험실에 설치된 온도 조절장치를 이용하여 반응기의 온도를 21~23 °C로 일정하게 유지하였다. 배양액의 온도는 수온온도계를 이용하여 측정하였다.

반연속 배양은 바이오매스의 농도가 최대치에 도달하였을 때, 용액의 일부를 새로운 배지로 희석하여 배양하는 방법이다. 새로운 용액으로의 치환정도를 표현하는 식은 다음과 같이 표시한다. 여기서, D 는 치환율, V_r 은 반응기에서 운전되고 있는 배양액의 부피, V_n 은 치환된 용액의 부피를 의미한다.

$$D = V_n / V_r \quad (1)$$

미세조류의 성장은 UV 흡광광도계(UV-vis Spectrophotometer SP 3000, Optima, Tokyo)를 이용하여 약 2 mL의 샘플을 취한 후 660 nm 파장에서 흡광도를 측정하여 관찰하였다. 미세조류 바이오매스량(g/L)과 흡광도의 관계는 흡광도 측정 후 샘플을 원심분리기에 넣어 고액분리하고 냉동건조한 후 측정된 바이오매스량을 이용하여 구하였다.

주어진 배양 조건에서의 *Anabena azollae*의 비증식속도(specific growth rate)는 다음의 식으로 계산하였다.

$$\mu_{max} = (\ln N_2 - \ln N_1) / (t_2 - t_1) \quad (2)$$

여기서, μ_{max} 는 비증식속도(day^{-1}), N_1 및 N_2 는 대수증가 단계에서의 초기($t=0$) 및 일정 배양 시간 후의 *Anabena azollae*의 최대 농도(g/L), 그리고 t 는 배양 시간(day)을 나타낸다.

최대바이오매스 생산성(maximum biomass productivity)는 다음의 식으로 계산하였다.

$$P_{max} = (X_f - X_0) / (t_f - t_0) \quad (3)$$

여기서, P_{max} 는 최대 바이오매스 생산성(g/L/day), X_f 는 최종 배양시간(t_f)에 측정된 바이오매스의 농도를 의미한다.

배지 내 *Anabena azollae*의 성장에 필요한 성분인 질소와 인의 농도 변화를 분석하기 위해 COLORIMETER (DT/870, Hach, U.S.A.)를 사용하여 분석하였다. 질소 측정에서는 배지의 질소원으로 nitrate가 사용되었으므로 NO_3^- -N (method 10020)를 측정하였고, 인의 경우 phosphate가 사용되었으므로 PO_4^{3-} (method 8114)를 측정하였다. NO_3^- -N와 PO_4^{3-} 의 측정 시 각각의 측정 농도는 0~30.0 mg/L, 0~45.0 mg/L 였고 오차 범위는 ± 0.5 mg/L, ± 0.1 mg/L 였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. *Anabena azollae* 초기 농도에 따른 성장특성

세포의 초기 농도를 다르게 하기 위해 원 배양용액으로부터 배양

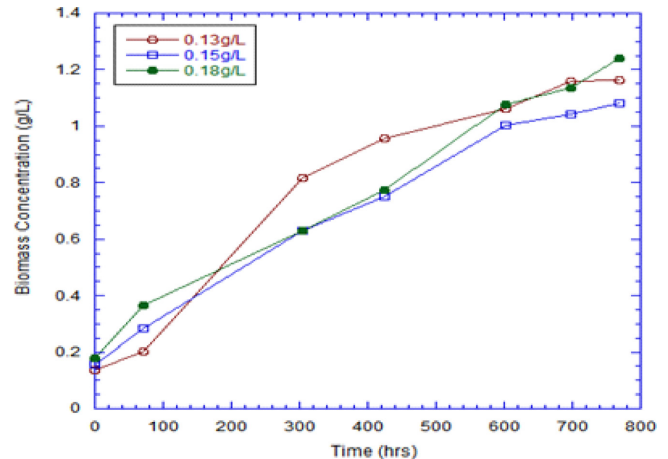


Fig. 3. Growth curves of *Anabena azollae* for the experiments on different initial concentrations of *Anabena* growth for batch microalgal culture.

액을 추출한 후 100 ml 비이커에 배양액 40, 60, 그리고 80 ml를 넣은 후 JM 배지를 추가하여 100 ml로 맞추었다. 초기 농도는 각각 0.13 g/L, 0.15 g/L, 0.18 g/L였으며, 초기 농도에 따른 *anabena*의 성장 특성은 Fig. 3에 표시하였다. 비성장속도와 최대바이오매스 생산성은 Table 2에 요약하였다.

초기 농도가 0.13 g/L인 경우에는 초기배양에서부터 600 시간까지는 성장속도가 빨랐으나 이후에는 다른 실험과 비슷한 성장 특성을 보이고 있다. 비성장속도는 초기농도가 증가함에 따라 0.147, 0.097, 0.064 day^{-1} 로 감소하였으나 최대바이오매스 생산성은 반대로 0.028, 0.026, 0.031 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 증가하는 것을 알 수 있었다. 본 실험조건에서는 초기농도가 *anabena*의 성장특성에 크게 영향을 주지 않는 것으로 판단된다.

3-2. 공기주입 속도에 따른 *Anabena azollae*의 성장특성

공기 주입은 배양액에 대기중의 이산화탄소 공급 및 배양액의 혼합을 통해 광합성에 필요한 빛을 내부로 유입시키는 역할을 하게 된다[4,13]. 공기 주입에 따른 *Anabena azollae*의 성장곡선은 Fig. 4에 나타내었다.

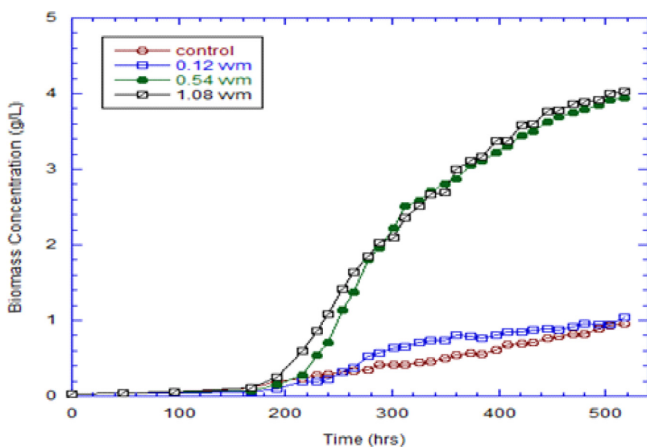
공기를 주입하지 않은 control과 0.12 vvm의 경우 성장이 매우 느렸으나, 0.54 vvm의 공기주입 시 성장이 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 0.54 vvm 보다 약 2배정도 공기공급을 증가시킨 경우에도 0.54 vvm과 거의 흡사한 결과를 보여주었다. 비성장속도의 경우 0.54 vvm에서 0.345 day^{-1} 로 가장 높았으며 최대바이오매스 생산성도 0.181 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 로 1.08 vvm 실험에서 도출한 0.184 $\text{g L}^{-1} \text{d}^{-1}$ 과 차이가 나지 않는 것을 확인하였다. 이는 공기주입의 경우 실험조건에 따라 최적의 값이 존재한다는 기존의 연구결과와 일치한다[13]. 공기를 주입할 경우에는 미세조류의 농도 증가에 따른 그림자효과로 인한 빛의 투과성 저해를 극복할 수 있으며 또한 공기중에 포함된 소량의 이산화탄소의 지속적 주입을 통해 광합성에 의한 과도한 pH 상승을 막을 수 있다.

3-3. 다양한 형태의 acetate 주입에 따른 *Anabena azollae*의 성장특성

혼합영양 방식의 배양에 있어서 유기탄소는 탄소원 및 에너지원으로 작용하기 때문에 매우 중요한 역할을 하게 된다[11]. 다양한 중

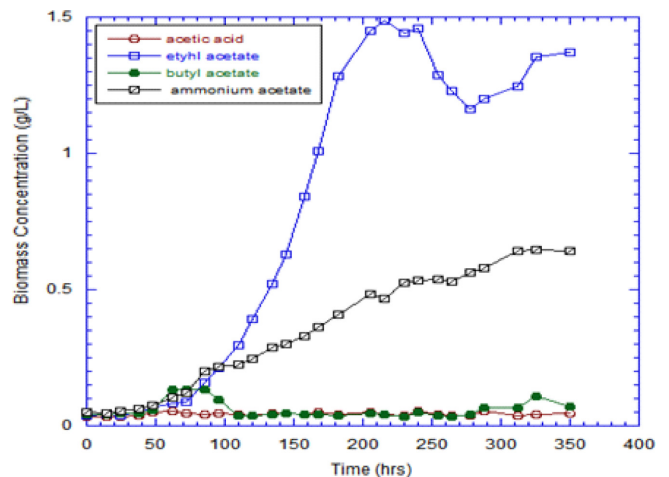
Table 2. Test conditions and results of specific growth rate (μ_{max}), maximum biomass productivity (P_{max}), and maximum cell concentrations (C_{max})

Test condition		μ_{max} (day ⁻¹)	P_{max} (g/L/d)	C_{max} (g/L)
Batch	Initial Con. (g/L)	0.13	0.147	0.028
		0.15	0.097	0.026
		0.18	0.064	0.031
	Aeration (vvm)	0	0.184	0.043
		0.12	0.309	0.047
		0.54	0.345	0.181
		1.08	0.286	0.184
	Acetate Compounds (20 mM)	Acetic acid	dead	dead
		Ethyl acetate	0.503	0.092
		Butyl acetate	dead	dead
		Ammonium acetate	0.143	0.041
	Ethyl acetate	5 mM	0.376	0.103
		10 mM	0.458	0.126
		20 mM	0.558	0.230
		30 mM	0.776	0.289
		40 mM	0.979	0.293
Semi-continuous	Aeration (0.54 vvm)	First period	0.345	0.181
	Aeration (0.54 vvm) + Ethyl acetate (40 mM)	Second period	0.145	0.143

**Fig. 4. Growth curves of *Anabena azollae* for the experiments on different aerations for batch microalgal culture.**

류의 유기탄소가 혼합영양 배양에 사용되고 있으며 이중 acetate를 이용한 연구가 최근 활성화되고 있다. 이에 본 연구에서는 acetic acid, ethyl acetate, butyl acetate, ammonium acetate를 선정하여 이를 배양에 유기탄소원으로 사용하였다. 각 100 ml 코니칼 비이커에 20 mM의 acetate를 함유한 용액을 주입 후 20 ml의 미세조류 배양액을 넣은 후 JM 배지를 채워주었다.

Acetate를 첨가한 경우의 *Anabena azollae*의 성장곡선은 Fig. 5에 표시하였다. Acetic acid와 butyl acetate를 첨가한 경우에는 *Anabena*가 성장하지 않았으나 ethyl acetate와 ammonium acetate를 첨가한 경우에는 시간에 따라 성장하는 것이 확인되었다. acetic acid를 투입하였을 경우에는 pH가 5이하로 감소하여 미세조류가 성장하지 못하였으며, butyl acetate의 경우에도 pH가 6정도로 감소하여 미세조류의 성장을 저해하는 것으로 판단되었다. 이 중 ethyl acetate를 첨가한 경우에는 비성장속도가 0.503 day⁻¹로 가장 높았으며 ammonium acetate의 경우보다 3배 이상 큰 값을 나타내었다. 최대바이오매스 생산성도 0.092 g L⁻¹ d⁻¹로 ammonium acetate의 0.041 g L⁻¹ d⁻¹ 보

**Fig. 5. Growth curves of *Anabena azollae* for the experiments on different types of acetate compounds (20 mM of acetate was used for each test).**

다 2배 이상 큰 값을 나타내었다. 따라서, *Anabena* 배양에는 ethyl acetate를 유기탄소원으로 사용하는 것이 가장 효과가 큰 것으로 파악되었다.

3-4. 최적 ethyl acetate 투입량 선정 실험

위의 실험에서 ethyl acetate가 가장 효과적인 유기탄소원으로 판명이 되었으므로 최적 투입량을 알아보기 위해 100 ml 코니칼 비이커에 5, 10, 20, 30, 40 mM의 ethyl acetate를 주입한 후 *Anabena* 배양액과 JM 배지를 채운 후 배양을 하였다. 배양 결과는 Fig. 6에 표시하였다.

Ethyl acetate의 투입량이 증가할수록 비성장속도와 최대바이오매스 생산성도 투입량에 비례하여 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 40 mM의 ethyl acetate를 주입하였을 경우 비성장속도는 0.979 day⁻¹, 최대바이오매스 생산성은 0.293 g L⁻¹ d⁻¹이었으며 최대 농도는 2.08 g/L로 급격히 배양속도가 증가하는 것을 알 수 있었다(Fig. 7).

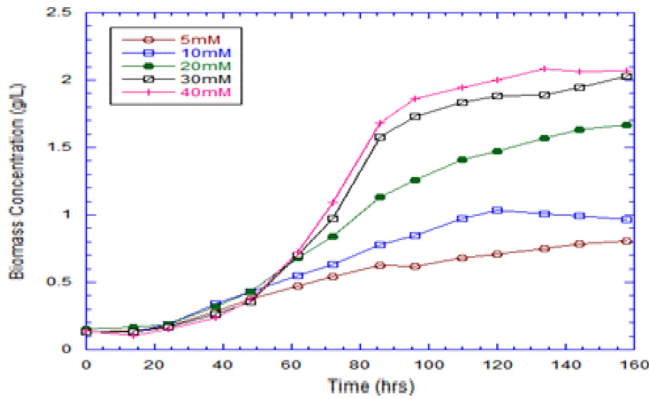


Fig. 6. Growth curves of *Anabena azollae* for the experiments on different concentrations of ethyl acetate.

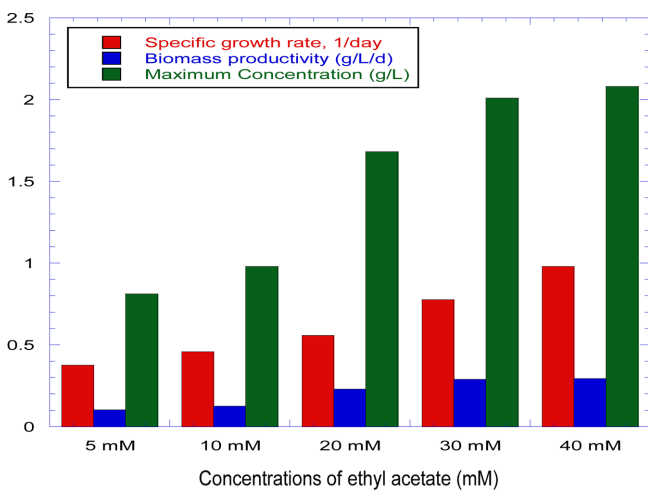


Fig. 7. Results of specific growth rate, maximum biomass productivity, and maximum cell concentrations for the tests with different amount of ethyl acetate.

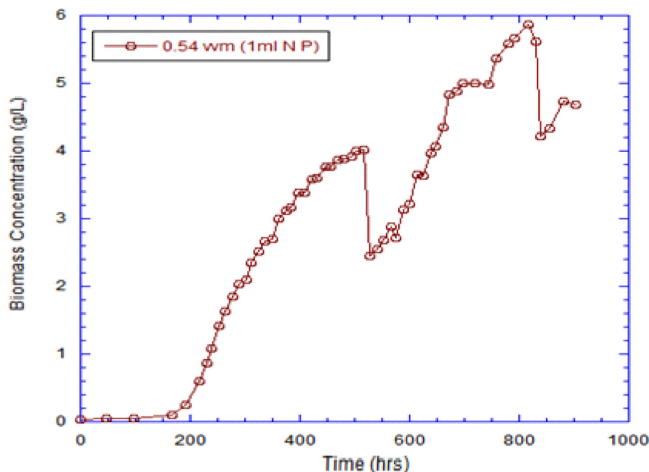


Fig. 8. Results of growth curve for anabena cultivated with 0.54 vvm at first phase and then diluted with 40% of 0.1 M ethyl acetate at second phase with 0.54 vvm.

3-5. 공기주입과 ethyl acetate 주입의 혼합효과

공기와 ethyl acetate의 동시 주입이 anabena의 배양에 미치는 영향을 파악하기 위해 3.2에서 0.54 vvm 실험을 계속 연장하여 후속

실험을 실시하였다. 0.54 vvm 실험에서 최고 농도에 도달한 후 40%의 배양액을 0.1 M의 ethyl acetate로 치환하여 최종적으로 40 mM로 맞추어 주었다. 이 후 0.54 vvm의 공기를 주입하여 배양 특성을 파악하였고 결과는 Fig. 8에 나타내었다.

Ethyl acetate로 치환한 후의 비성장속도는 0.145 day^{-1} 로 0.54 vvm 실험의 0.345 day^{-1} 보다 감소한 것으로 나타났으며, 최대바이오매스 생산성도 0.181 에서 $0.143 \text{ g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$ 로 감소하였다. 이는 희석 후의 초기 농도가 높기 때문에 anabena의 성장이 빠르더라도 비성장속도와 최대바이오매스 생산성은 낮은 값을 나타내게 된다. 최대 농도의 경우 0.54 vvm 실험의 경우 3.92 g/L 였으나, ethyl acetate를 투입한 경우에는 5.91 g/L 로 크게 증가한 것을 알 수 있다.

4. 결 론

혼합영양 배양에서의 anabena의 생산성을 높이기 위한 acetate의 종류와 농도 결정을 위한 실험을 수행하였고 공기주입이 acetate를 유기탄소원으로 한 배양에 미치는 영향을 파악하였다.

- (1) Anabena의 초기농도는 성장속도에 큰 영향을 주지 않았다.
- (2) 공기주입의 경우 0.54 vvm에서 가장 높은 비성장속도와 최대 바이오매스 생산성을 보여주었다.
- (3) 4종류의 acetate를 배양에 사용하였는데 acetic acid와 butyl acetate의 경우 anabena가 성장을 하지 못하였으나 ethyl acetate와 ammonium acetate의 경우에는 anabena의 성장이 급격히 증가하는 것을 확인하였다. 이 중 ethyl acetate는 사용된 acetate 중에서 가장 효과가 좋은 것으로 판명되었다.
- (4) Ethyl acetate를 첨가한 배양실험에서는 농도를 5 mM에서 40 mM로 변화시켰으며 농도가 증가함에 따라 비성장속도, 최대바이오매스 생산성, 그리고 최대농도 모두 증가하였다.
- (5) 0.54 vvm 공기 주입 실험 후 ethyl acetate를 첨가한 실험에서는 비성장속도, 최대바이오매스 생산성 모두 감소하였으나 최대 농도는 가장 높은 5.91 g/L 값을 나타내었다.

Nomenclature

vvm : ratio of air volume per reactor volume per minute (dimensionless)

μ_{max} : maximum specific growth rate (d^{-1})

P_{max} : maximum biomass productivity ($\text{g L}^{-1} \text{ d}^{-1}$)

감 사

본 연구는 한국연구재단 중견연구지원사업(C-D-2016-1326)의 지원으로 수행이 되었습니다.

References

1. Markou, G., Vandamme, D. and Muylaert, K., "Microalgal and Cyanobacterial Cultivation: the Supply of Nutrients," *Water Res.*, **65**(15), 186-202(2014).
2. Markou, G. and Georgakakis, D., "Cultivation of Filamentous Cyanobacteria (blue-green algae) in Agro-industrial Wastes and Wastewaters: a Review," *Appl. Energy*, **88**(10), 3389-401(2011).

3. Pete, R., Klise, G. and Wu, B., "Resource Demand Implications for US Algae Biofuels Production Scale-up," *Appl. Energy*, **88**(10), 3377-3388(2011).
4. Canter, C. E., Blowers, P., Handler, R. M. and Shonnard, D. R., "Implications of Widespread Algal Biofuels Production on Macronutrient Fertilizer Supplies: Nutrient Demand and Evaluation of Potential Alternate Nutrient Sources," *Appl. Energy*, **143**(1), 71-80(2015).
5. Pittman, J. K., Dean, A. P. and Osundeko, O., "The Potential of Sustainable Algal Biofuel Production Using Wastewater Resources," *Bioresour. Technol.*, **102**(1), 17-25(2011).
6. Chen, H., Qiu, T., Rong, J., He, C. and Wang, Q., "Microalgal Biofuel Revisited: An Informatics-based Analysis of Developments to Date and Future Prospects," *Appl. Energy*, **155**(1), 585-598(2015).
7. Endo, H., Sansawa, H. and Nakajima, K., "Studies on *Chlorella Regularis*, Heterotrophic Fast-growing Strain II. Mixotrophic Growth in Relation to Light Intensity and Acetate Concentration," *Plant Cell Physiol.*, **18**(1), 199-205(1977).
8. Zhan, J., Rong, J. and Wang, Q., "Mixotrophic Cultivation, a Preferable Microalgae Cultivation Mode for Biomass/bioenergy Production, and Bioremediation, Advances and Prospect," *International Journal of Hydrogen Energy*, **7**(12), 1-13(2016).
9. Andrade, M. R. and Costa, J. A. V., "Mixotrophic Cultivation of Microalga *Spirulina Platensis* Using Molasses as Organic Substrate," *Aquaculture*, **264**(1-4), 130-134(2007).
10. Giovanardi, M., Ferroni, L., Baldissarotto, C., Tedeschi, P., Maietti, A. and Pantaleoni, L., "Morphophysiological Analyses of *Neochloris Oleoabundans* (Chlorophyta) Grown Mixotrophically in a Carbon-rich Waste Product," *Protoplasma*, **250**(1), 161-174(2013).
11. Gim, G. H., Kim, J. K., Kim, H. S., Kathiravan, M. N., Yang, H. and Jeong, S. H., "Comparison of Biomass Production and Total Lipid Content of Freshwater Green Microalgae Cultivated Under Various Culture Conditions," *Bioprocess Biosyst. Eng.*, **37**(2), 99-106(2014).
12. Jurado-Oller, J. L., Dubini, A., Galvan, A., Fernandez, E. and Gonzalez-Ballester, D., "Low Oxygen Levels Contribute to Improve Photohydrogen Production in Mixotrophic Non-stressed *Chlamydomonas* Cultures," *Biotechnology for Biofuels*, **8**(1), 149-163(2015).
13. Lee, J. K., Koh, T. H., Kim, S. K. and Lee, T. Y., "A Study on the Adsorptive Removal of Heavy Metals Using Inflated Vermiculites," *Journal of Korean Geo-Environmental Society*, **10**(6), 61-68(2009).