

Effect of a co-culture of *scenedesmus dimorphus* and nitrifiers on advanced wastewater treatment capacity

*Scenedesmus dimorphus*와 질산화 박테리아의 공배양이 하수고도처리능에 미치는 영향

Kyoung-Jin Choi · Shan Zhang · SeokMin Lee · Sung-Jin Joo · Sun-Jin Hwang*

최경진 · 장산 · 이석민 · 주성진 · 황선진*

Department of Environmental Engineering, Center for Environmental Studies, Kyung Hee University
경희대학교 환경공학과, 환경연구센터

Abstract : This study investigated the effect of a co-culture of *Scenedesmus dimorphus* and nitrifiers using artificial wastewater on the removal of ammonium, nitrate and phosphate in the advanced treatment. To test the synergistic effect of the co-culture, we compared the co-culture treatment with the cultures using *S. dimorphus*-only and nitrifiers-only treatment as controls. After 6 days of incubation, nitrate was removed only in the co-culture treatment and total amount of N removal was 1.3 times and 1.6 times higher in the co-culture treatment compared to those in the *S. dimorphus*- and nitrifiers-only treatments, respectively. In case of total amount of P, co-culture treatment removed 1.2 times and 12 times more P than the *S. dimorphus*- and nitrifiers-only conditions, respectively. This indicates that the co-culture improved removal rates for ammonium, nitrate, and phosphate. This further implies that there was no need for denitrification of nitrate and luxury uptake of P processes because nitrate and phosphate can be removed from the uptake by *S. dimorphus*. In addition, co-culture condition maintained high DO above 7 mg/L without artificial aeration, which is enough for nitrification, implying that co-culture has a potential to decrease or remove aeration cost in the wastewater treatment plants.

Key words : Microalgae, Nitrifiers, 공배양, Advanced wastewater treatment

주제어 : 미세조류, 질산화 박테리아, co-culture, 하수고도처리

1. Introduction

국내 하수처리장에서는 나날이 강화되는 질소와 인의 방류수 수질기준을 만족시키기 위해 고도처리를 시행하고 있는데, 생물학적 고도처리(Biological Nutrient Removal) 공법이 가장 일반적으로 사용되고 있다. 대표적인 BNR 공법인 A_2O 공법은 혐기조(anaerobic)와 무산소조(an-oxic), 호기조(aerobic)를 통해 유기물뿐 아니

라, 질소 및 인까지 동시에 제거 가능하다(Xiang et al. 2014). 생물학적 인 제거는 Phosphorus Accumulating Organisms이 혐기성 상태에서 인을 방출하고, 호기성 상태에서 인을 과잉 섭취하는 기작으로 이루어지며(Xu et al. 2013), 생물학적 질소 제거는 질산화 박테리아에 의해 ammonium이 nitrate로 전환되는 질산화와 탈질 박테리아에 의해 nitrate가 N_2 gas로 전환되는 탈질을 통해 이루어진다.

이 때 질산화 박테리아는 1 mol의 ammonium을 0.977 mol의 nitrate로 질산화하기 위해 1.83 mol의 산소($4.18 \text{ g-O}_2/\text{g NH}_4\text{-N}$)를 필요로 하

* Received 01 December 2014, revised 10 December 2014, accepted 12 December 2014.

* Corresponding author: Tel : 031-201-2497 E-mail : sjhwang@khu.ac.kr

기 때문에(Ebeling et al. 2006), 질산화가 일어나는 호기조에는 지속적으로 산소를 공급해줘야 하며, 이로 인해 폭기에 소요되는 운전비용은 전체 하폐수처리장 운영비의 40% 이상을 차지한다고 보고되고 있다(Tchobanoglous et al. 2003; Stenstrom and Rosso. 2008). 그런데 이러한 운영비에 비해 생물학적 처리를 통한 질소와 인 제거 효율은 60 ~ 70% 정도로 낮은 편이며, 방류수 수질기준을 만족시키지 못한다. 생물학적 처리 이후에 응집제 투여와 같은 화학적 처리방법을 결합시켜 인 제거 효율을 높이기도 하지만, 화학적 처리의 경우 약품비, 슬러지 처리비용 등 많은 유지관리비가 요구되므로 경제성이 떨어진다는 단점이 있다. 따라서 생물학적 고도처리(BNR) 공법 보다 질소와 인의 제거 효율을 높여 방류수 수질기준을 만족시킬 수 있는 추가적인 기술 또는 새로운 공법의 개발이 필요하다.

한편, 미세조류는 빛 에너지를 이용하는 광합성을 통해 성장하는데, 이 때 이산화탄소 뿐 아니라 질소와 인도 필요로 한다. 많은 연구에서 미세조류의 질소 및 인의 제거 능력이 크다고 보고되었으며(Mallick. 2002; Arbib et al. 2012), 대표적으로 *Chlorella sp.*, *Scenedesmus sp.*, *Spirulina sp.* 등이 알려져 있다(Lee and Lee. 2001; Martinez et al. 2000; Olguín et al. 2003, Li et al. 2010). 미세조류가 이용하는 nitrogen source로는 ammonium, nitrate, nitrite와 같은 무기질소 및 urea, glutamine과 같은 유기질소가 있는데, 이 중 ammonium과 nitrate를 선호한다고 한다(Stumm and Morgan. 1996). Phosphorus source로는 inorganic orthophosphate를 이용하며, inorganic orthophosphate의 공급이 부족할 경우에는 미세조류 세포 표면에 존재하는 organic phosphate를 orthophosphate로 전환시켜 이용한다고 한다. 산소생성 관점에서 보면, 미세조류가 nitrogen source로 1 mol의 ammonium을 이용하여 광합성하는 경우 6.63

mol의 산소(15.14 g-O₂/g NH₄-N)가 생성되며, 1 mol의 nitrate를 이용하여 광합성하는 경우에는 8.63 mol의 산소(19.71 g-O₂/g NH₄-N)가 생성된다(Ebeling et al. 2006).

이러한 미세조류와 질산화 박테리아를 공배양 하게 되면, 이론적으로 둘 사이에 공생관계가 형성될 수 있다. 질산화 박테리아가 필요로 하는 산소는 미세조류의 광합성을 통해 공급되며, 질산화를 통해 생성된 nitrate는 미세조류의 성장에 필요한 질소원으로 공급될 수 있기 때문이다. 또한, 미세조류와 질산화 박테리아가 성장하면서 공통으로 이용하는 기질인 ammonium과 phosphate는 제거속도의 향상과 같은 시너지 효과도 기대해볼 수 있기 때문에, 기존의 BNR 공법보다 더 나은 질소 및 인 제거효율을 얻을 수 있을 것이다.

따라서 본 연구에서는 대조군(control)으로 미세조류 *S. dimorphus* 단일조건(이하 *S. dimorphus*-only)과 질산화 박테리아 단일조건(이하 Nitrifiers-only)을 설정하여 운전함으로써, *Scenedesmus dimorphus*와 질산화 박테리아의 공배양(이하 Co-culture)을 통해 나타나는 N, P 제거측면에서의 시너지 효과를 보다 구체적으로 파악하고자 하였다. 뿐만 아니라, 폭기 없이 오직 미세조류의 광합성을 통해 질산화에 필요한 산소를 공급하는 것이 실제로 가능한지, 이 때 DO 농도는 어느 정도로 유지될지에 대해서도 파악하고자 하였다.

2. Materials and methods

2.1 미세조류 및 질산화 박테리아의 배양

본 연구에 사용된 미세조류 *Scenedesmus dimorphus*는 KCTC(Korean Collection for Type Culture)로부터 분양 받았다. 접종하기 전 BB medium을 이용하여 total volume 1 L인 삼각플라스크에 working volume을 600 mL로 하여, pH 7, 배양온도 25 ± 1 °C, 광량이 100 μmol/m²/s인 형광등을 24시간 조사해 주

며 일주일간 배양하였다.

본 연구에 사용한 질산화 박테리아는 S하수 처리장으로부터 얻은 activated sludge를 2 L 원통형 반응기에 넣어 NH₄Cl을 주입 후 4일간 암조건에서 1 vvm으로 폭기시키면서 우점화시켰다.

2.2 인공하수의 성상

본 연구에서는 modified BB medium을 인공하수(artificial wastewater)로 사용하였으며, 초기 ammonium 농도는 50 mg NH₄-N/L, nitrate 농도는 50 mg NO₃-N/L, Phosphate 농도는 15 mg PO₄-P/L로 설정해 주었다. 무기 탄소원(inorganic carbon source)으로 sodium bicarbonate(NaHCO₃)를 7 g/L 주입해 주었으며, 인공하수의 구체적인 성상은 Table 1 과 같다.

Table 1. Artificial medium composition

Component		Concentration	
NH ₄ Cl		50 mg/L	
NaNO ₃		50 mg/L	
K ₂ HPO ₄		15 mg/L	
MgSO ₄ · 7H ₂ O		75 mg/L	
CaCl ₂ · 2H ₂ O		25 mg/L	
NaCl		25 mg/L	
H ₃ BO ₃		114 mg/L	
Fe solution	FeSO ₄ · 7H ₂ O	4.98 mg/L	1 mL/L
	H ₂ SO ₄	1 mL/L	
Trace	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	8.82 mg/L	1 mL/L
	MnCl ₂ · 4H ₂ O	1.44 mg/L	
	MoO ₃	0.71 mg/L	
	CuSO ₄ · 5H ₂ O	1.57 mg/L	
	Co(NO ₃) ₂ · 6H ₂ O	0.49 mg/L	
EDTA	EDTANa ₂	5 mg/L	1 mL/L
	KOH	3.1 mg/L	

2.3 실험 방법

*S. dimorphus*와 질산화 박테리아의 공배양으로 인한 효과를 파악하기 위해, 대조군(con-

trol)으로 *S. dimorphus*-only, Nitrifiers-only 조건을 설정하였다. 접종은 TSS 농도를 기준으로 하여 *S. dimorphus*와 nitrifiers가 1 : 20 (w/w) 비율이 되도록 (TSS 농도 2200 mg/L인 *S. dimorphus* 12 ml, TSS 농도 1060 mg/L인 nitrifiers 500 ml) 해 주었다. *S. dimorphus*의 비율을 질산화 박테리아보다 20배나 낮게 설정한 것은 본 연구의 co-culture 개념이 기존의 하수처리장 폭기조에 미세조류를 일부 주입하는 것이기 때문이다.

Total volume 2.5 L의 원통형 반응기에 working volume을 2 L로 하여 batch 형태로 운전하였으며, 온도는 25±1°C, pH는 pH controller (pH 910, iSTEK) 를 이용하여 7.5±0.5로 유지해주었다. 광원은 태양광과 같은 혼합광을 갖는 White LED를 사용했고, 광량은 UV 광량계 (LI-1400, LI-COR, USA)를 사용하여 측정 후 PPF(Photosynthetic Photon Flux Density)가 70 μmol/m²/s이 되도록 조절해 주었다. 이 때 Nitrifiers-only 조건의 반응기는 빛에 의한 조류 오염을 방지하기 위해 호일로 감싸 빛을 차단해 주었다. 폭기는 Nitrifiers-only 조건에만 0.1 vvm으로 약하게 해주었으며, Co-culture 조건과 *S. dimorphus*-only 조건에는 폭기를 해주지 않았다. 침전을 방지하기 위해 세 조건 모두 150 rpm으로 교반해 주었다.

2.4 분석 방법

시료는 12시간 마다 25 mL씩 채취하여 분석하였다. 채취한 시료는 OD(Optical Density)를 660 nm에서 UV/Visible spectrophotometer (Optizen POP, Mecasys)를 이용하여 측정하였다. 그리고 (Eq. 1)를 이용하여 미세조류 성장률(Growth Rate ; GR)을 계산하였다.

$$GR = (\ln OD_t - \ln OD_0) / t \quad (\text{Eq. 1})$$

이때, OD₀는 초기 OD값을 말하며, OD_t는 t일이 지난 시점에서 OD 값이다.

또한, 0.47 μm GF/C (Whatman, NO. 1822-047, UK) 여지에 여과시킨 시료를 이용하여 DO, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 를 분석하였다. DO는 DO meter(DO-350L, Istek, Korea)를 이용하여 측정하였고, $\text{NH}_4\text{-N}$, $\text{NO}_3\text{-N}$, $\text{PO}_4\text{-P}$ 는 수질분석 kit법을 이용하여 Water Analyzer(HUMAS, Korea)로 분석했으며, IC는 TOC analyzer(TOC-V_{csn}, Shimadzu, Japan)로 측정했다.

3. Results and discussion

3.1 공배양이 *S. dimorphus*의 성장에 미치는 영향

S. dimorphus-only 및 Co-culture 조건에서의 *S. dimorphus* 성장을 OD₆₆₀로 평가했으며 Fig. 1에 나타냈다. *S. dimorphus*-only 조건과 Co-culture 조건의 경우 같은 양의 *S. dimorphus*를 접종했음에도 불구하고 Co-culture 조건에서의 초기 OD₆₆₀ 값이 더 높게 측정되었는데, 이는 접종해 준 질산화 박테리아에 의한 차이라고 할 수 있다.

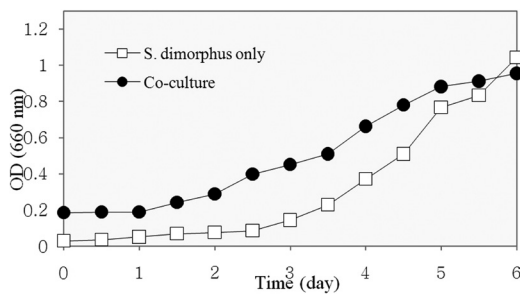


Fig. 1. Growth pattern *S. dimorphus* under the *S. dimorphus*-only and Co-culture treatments.

6일 시점까지의 *S. dimorphus* growth rate를 Eq. 1에 의해 산출한 결과, *S. dimorphus*-only 조건에서의 growth rate는 0.603 d⁻¹, Co-culture 조건에서는 0.273 d⁻¹로 *S. dimorphus*-only 조건에서 약 2배 이상의 높은 성장률을 나타냈다. 이는 Co-culture 조건에서 *S. dimorphus*와 질산화 박테리아가 공존함에

따라 기질 경쟁을 하게 되어 *S. dimorphus*가 성장에 다소 저해를 받았기 때문으로 판단된다.

3.2 공배양이 nutrient removal에 미치는 영향

S. dimorphus-only, Nitrifiers-only 및 Co-culture 조건에서의 ammonium, nitrate, nitrite, phosphate 농도 변화를 Fig. 2, Fig. 4 및 Fig 4에 나타냈다. *S. dimorphus*-only 조건(Fig. 2)에서 운전 2일 시점까지 N과 P의 소비가 거의 없는데, 이는 접종해준 *S. dimorphus*의 초기 OD₆₆₀ 값이 0.03(Fig. 1 참고)으로 매우 작았기 때문이다. 2일 이후로는 ammonium이 10.5 mg-N/L/d 속도로 소비되었으며, nitrate는 그대로 유지되는 경향이 나타났다.

이는 미세조류가 질소원으로 nitrate를 이용할 경우에는 질산환원효소 및 아질산환원효소를 이용한 환원과정을 반드시 거쳐야 하지만, ammonium을 질소원으로 이용할 경우에는 환원과정이 필요 없어 에너지를 절약할 수 있기 때문에 두 종류의 질소원 중 ammonium을 우선적으로 소비하기 때문이다(Henda et al. 2012). Phosphate는 1.5 mg-P/L/d 속도로 소비되어 운전기간 동안 총 6 mg-P/L가 제거되었다.

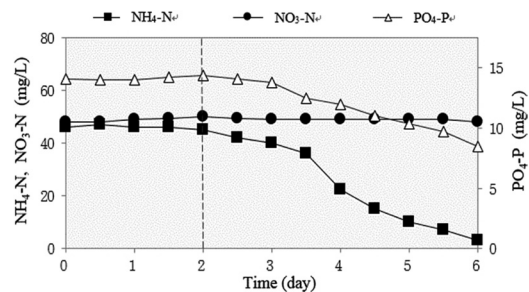


Fig. 2. Removal of NH_4 , NO_3 , PO_4 in the *S. dimorphus*-only treatment.

Nitrifiers-only 조건(Fig. 3)에서는 AOB (Ammonia Oxidizing Bacteria)에 의해 ammonium이 5.6 mg-N/L/d의 속도로 소비되었

으며, Phosphate는 운전기간 6일 동안 매우 느린 속도 0.1 mg-P/L/d로 거의 제거되지 않았다. Phosphate가 모든 미생물의 성장 및 핵산, DNA 합성 등에 필수적인 영양물질임에도 불구하고, Nitrifiers-only 조건에서의 phosphate 제거율이 *S. dimorphus*-only 조건에 비해 현저히 적은 이유는 미세조류와 nitrifiers의 biomass 생성량에 차이가 있기 때문이다. Ebeling et al. (2006)에서는 미세조류와 nitrifiers가 똑같이 1 g NH₄-N을 이용하여 대사하는 경우, 미세조류는 15.85 g VSS, nitrifiers는 0.2 g VSS를 생성한다고 보고하였다. 즉, 미세조류가 nitrifiers에 비해 약 80배 높은 biomass 생성량을 갖는다.

따라서 미세조류가 nitrifiers에 비해 biomass 생성 및 유지를 위해 필요로 하는 phosphate 양이 훨씬 많으며, 이로 인해 *S. dimorphus*-only 조건에서의 phosphate 제거율이 Nitrifiers-only 조건에 비해 높게 나타난 것이다.

Co-culture 조건(Fig. 4)에서는 *S. dimorphus*와 nitrifiers가 동시에 ammonium을 소비하여 5일째에 고갈되었는데, 소비된 ammonium mass balance를 구한 결과 운전 2일 시점을 기준으로 독특한 결과를 보였다.

소비된 ammonium mass balance는 운전기간 동안 제거된 ammonium의 양을 (a), 질산화로 발생한 nitrite 및 nitrate의 양을 (b), *S. dimorphus*에 의해 uptake 된 ammonium을 (c)라 할 때, a = b + c로 표현된다. 여기서 소비된 ammonium mass balance를 구하는 식은 Karya et al.(2013)를 참고하였으나, ammonium uptake by nitrifiers는 mass balance 식에 반영하지 않았다. 양론적으로 질산화 박테리아는 1 g의 NH₄-N를 이용하여 0.98 g-N을 nitrate로 질산화하며, 나머지 0.02 g-N만을 체내로 흡수하므로 질산화 박테리아가 체내로 흡수하여 제거한 질소의 양은 무시할 수 있을

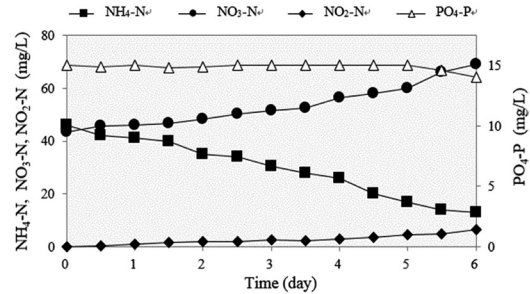


Fig. 3. Removal of NH₄, NO₃, NO₂, PO₄ in the Nitrifiers-only treatment.

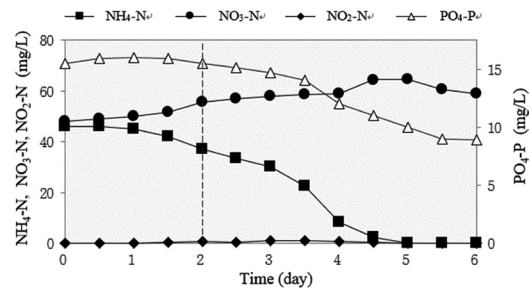


Fig. 4. Removal of NH₄, NO₃, NO₂, PO₄ in the Co-culture treatment.

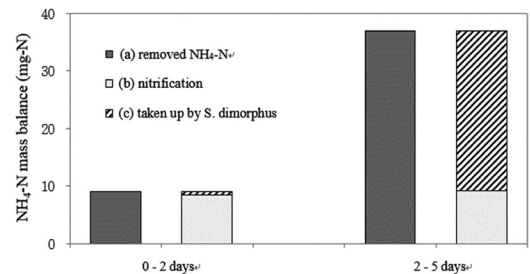


Fig. 5. Distribution of NH₄-N between nitrification and utilization by *S. dimorphus* in the Co-culture treatment.

정도로 작기 때문이다. Karya et al.(2013)의 ammonium mass balance 결과에서도 질산화 박테리아 체내로 흡수되어 소비된 ammonium은 2% 보다 낮은 값을 나타냈다.

이를 Fig. 5에 나타냈으며, 운전 2일 시점까지는 소비된 ammonium의 94%가 질산화에 쓰였으나, 2일 시점 이후로는 25%만이 질산화에, 나머지 75%는 *S. dimorphus*에 의해 uptake 된 것을 알 수 있다. 이와 같은 ammonium mass balance의 변화가 나타나는 이

유는 *S. dimorphus*의 성장패턴(Fig. 1 참고)과 관련이 있다. *S. dimorphus*의 성장이 느린 구간(lag phase)에서는 *S. dimorphus*가 필요로 하는 ammonium 양도 적으며, 대수성장 구간에서는 필요로 하는 ammonium의 양이 많다. 따라서 *S. dimorphus*의 성장이 느린 2일까지의 구간에서는 대부분의 ammonium이 질산화에 쓰였고, 급격히 성장하는 2일 이후 구간에서는 75%의 ammonium이 *S. dimorphus*에 의해 uptake 되었다고 판단된다.

Co-culture 조건에서 nitrate는 질산화로 인해 5일 시점까지 증가하다가, 이후 감소하는 경향이 나타났다. (Fig. 4) 질산화로 생성된 17 mgN/L의 nitrate는 ammonium이 고갈된 5일 이후 *S. dimorphus*에 의해 약 4 mg-N/L/d의 속도로 제거되었는데, 여기서 중요한 점은 질산화가 일어나는 구간에서 질산화로 생성된 nitrate를 *S. dimorphus*가 바로 uptake 했을 가능성에 관한 부분이다.

*S. dimorphus*가 질산화로 발생한 nitrate를 바로 uptake 했다면 질산화율이 낮게 평가될 수 있기 때문이다. 그런데 질산화가 일어나던 0 ~ 5일은 질소원으로써 ammonium과 nitrate가 모두 존재하던 구간으로, 미세조류는 nitrate 보다 ammonium을 더 선호하며 우선적으로 이용하기 때문에, 이 구간에서 질산화로 발생한 nitrate는 *S. dimorphus*에 의해 uptake 되지 않았을 것으로 판단되었다. Co-culture 조건에서 phosphate는 *S. dimorphus*와 질산화 박테리아의 체내 흡수를 통해 1.8 mg-P/L/d의 속도로 꾸준히 소비되었다. (Fig. 4) 이 때 phosphate의 대부분은 *S. dimorphus*에 의해 소비된 것으로 판단된다.

3.3 공배양의 우수성

Co-culture 조건에서의 nutrient removal 결과를 *S. dimorphus*-only 및 Nitrifiers-only와 비교하여 Table 2에 정리하였다. Am-

Table 2. Summary of NH_4 , NO_3 and PO_4 removal in the *S. dimorphus*-only, Nitrifiers-only and Co-culture treatment

	<i>S. dimorphus</i> only	Nitrifiers only	Coculture
$\text{NH}_4\text{-N}$ removal rate (mg-N/L/d)	10.5	5.6	12.3
$\text{NO}_3\text{-N}$ removal rate (mg-N/L/d)	0	0	4
Total removed N amount (mg-N)	42	34	54
$\text{PO}_4\text{-P}$ removal rate (mg-P/L/d)	1.5	0.1	1.8
Total removed P amount (mg-P)	6	0.6	7.2

monium removal rate는 Co-culture 조건이 다른 두 조건들에 비해 높았는데, 특히나 Nitrifiers-only 조건에 비해서는 2.2배 정도 빠른 것으로 나타났다. Ammonium은 *S. dimorphus*와 nitrifiers가 공통으로 이용하는 nutrient이기 때문이다. 질산화를 통해 생성된 nitrate는 ammonium에 이어 *S. dimorphus*의 흡수로 제거되기 때문에 nitrate는 세 조건 중 오직 Co-culture 조건에서만 제거되었으며, 운전기간 동안 제거된 질소의 경우, Co-culture 조건이 *S. dimorphus*-only 조건에 비해 1.3배, Nitrifiers-only 조건에 비해 1.6배 높은 것으로 나타나, Co-culture 조건의 질소 제거능이 우수하다는 사실이 확인되었다.

또한, Co-culture 조건에서의 Phosphate removal rate는 *S. dimorphus*-only 조건과는 큰 차이가 없었으나, Nitrifiers-only 조건에 비해서는 18배나 높은 값을 보였다. 동일한 운전기간 동안 제거된 인의 경우, Co-culture 조건이 *S. dimorphus*-only 조건에 비해 1.2배, Nitrifiers-only 조건에 비해 12배나 높은 값을 나타내어, 인 제거 역시 Co-culture 조건이 우수하다는 결과를 얻을 수 있었다.

Phosphate도 nitrifiers와 *S. dimorphus*가 biomass 생성 및 유지를 위해 공통적으로 이용하는 substrate이기 때문에 co-culture 조건에서의 제거속도가 가장 높은 것이다. 하지만 기본

적으로 nitrifiers가 biomass 생성 및 유지를 위해 uptake하는 phosphate의 양은 *S. dimorphus* 보다 현저히 작기 때문에(Fig. 2, Fig. 3), co-culture 조건과 *S. dimorphus*-only 조건에서의 phosphate 소비속도는 비슷한 것으로 판단된다.

3.4 광합성에 의한 DO 공급 효과

S. dimorphus-only, Nitrifiers-only 및 Co-culture 조건에서의 DO 농도 변화를 Fig. 6에 나타냈다. 0.1 vvm으로 폭기를 해 주었던 Nitrifiers-only 조건은 DO가 6 mg/L 정도로 유지되었다. *S. dimorphus*-only 조건은 폭기를 해 주지 않았음에도 불구하고 광합성 대사에 의해 DO가 약 9 mg/L 까지 상승하였으며, 점차 감소하여 saturation level(25°C)인 8.3 mg/L로 유지되는 경향이 나타났다. *S. dimorphus*를 포함한 대부분의 미세조류는 autotrophic 광합성 대사를 할 때 N과 P를 필요로 하며, 전술한 바와 같이 1 mg-N을 이용하여 약 15 mg-O₂를 생성하므로(Ebeling et al, 2006) 광합성 대사만으로 DO가 충분히 공급될 수 있었다고 판단된다.

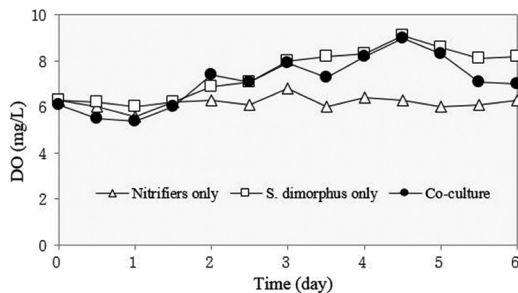


Fig. 6. Changes in DO in the *S. dimorphus*-only and Nitrifiers-only and co-culture treatments.

Co-culture 조건에서도 폭기 없이 오직 광합성에 의해 높은 DO가 유지되었다. *S. dimorphus*의 성장률이 매우 낮았던 운전 초반에는 질산화로 인해 DO가 다소 감소하였으나, *S. dimorphus*가 성장함에 따라 DO가 약 9 mg/L까

지 상승하고, 이후 점차 감소하여 약 7 mg/L로 유지되는 경향이 나타났다. 이러한 결과는 1 mg의 NH₄-N이 질산화되기 위해 약 4.2 mg-O₂의 산소가 필요한데 반해, 광합성을 통해서 15 mg-O₂/mgN의 양론 비율로 산소가 공급되기(Ebeling et al, 2006) 때문인 것으로 판단된다.

4. Conclusion

본 연구에서는 *S. dimorphus*를 대상 미세조류로 선정하여 *S. dimorphus*-only, Nitrifiers-only 및 Co-culture 조건에서 유기물이 배제된 인공하수를 이용하여 ammonium 뿐만 아니라 nitrate, phosphate 제거측면에도 주목하여 *S. dimorphus*와 질산화 박테리아의 공배양에 따른 영양염류 제거속도 및 제거량에 대한 시너지 효과를 파악하였다.

6일간의 batch 운전결과, Co-culture 한 조건의 질소 제거량은 *S. dimorphus*-only 조건보다 1.3배, Nitrifiers-only 조건보다 1.6배 높은 것으로 나타났으며, 인 제거량의 경우는 *S. dimorphus*-only 조건의 1.2배, Nitrifiers-only 조건에 비해서는 무려 18배나 높은 것으로 나타났다. 또한 Co-culture 조건에서는 폭기 없이, 오직 광합성을 통해 질산화에 필요한 산소가 충분히 공급되어, DO가 7 mg/L 이상으로 높게 유지되었다.

결과적으로, Co-culture를 통해 ammonium, phosphate와 같이 *S. dimorphus*와 질산화 박테리아가 공통으로 이용하는 nutrient의 제거효율을 높일 수 있으며, 질산화를 통해 생성된 nitrate는 기존의 탈질공정 없이 phosphate는 기존의 luxury uptake 공정 없이 *S. dimorphus*의 흡수로 제거될 수 있다는 사실을 알 수 있었다. 뿐만 아니라, Co-culture 조건에서 폭기 없이 오직 광합성을 통해 질산화에 필요한 산소가 충분히 공급되었다는 점은, 기존 하폐수 고도처리 공정 중 호기조에서의 송풍 비용을 대폭 줄일 수 있다는 긍정적인 가능성을 보여주는

결과라고 할 수 있다.

사 사

이 논문은 2014년도 정부 (미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업입니다. (No. 2013R1A2A2A03067619)

References

- Arbib, Z., Ruiz, J., Alvarez, P., Garrido, C., Barragan, J., Perales, J. A. (2011) "Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic by *Chlorella vulgaris*" *International Journal of Phytoremediation*, **13**, 884-896.
- Ebeling James M., Timmons Michael B., Bisogni J.J., (2006) Engineering analysis of the stoichiometry of photoautotrophic, autotrophic, and heterotrophic removal of ammonia-nitrogen in aquaculture systems. *Aquaculture* **257**, 346-358.
- Karya N.G.A.I., Steen N.P. van der., Lens P.N.L., (2013) Photo-oxygenation to support nitrification in an algal-bacterial consortium treating artificial wastewater. *Bioresource Technology* **134**, 244-250.
- Lee, K. Y., Lee, C.G., (2001) "Effect of light/dark cycles on wastewater treatments by microalgae. *Biotechnol. Bioprocess Eng.* **6**, 194-199.
- Li Y, Wang B, Wu N, Lan C. (2008) "CO₂ bio-mitigation using microalgae." *Applied Microbiology and Biotechnology* **79**(5), 707-718.
- Mallick N. (2002) "Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal : a review. *BioMetals*. **15**, 377-390.
- Martinez, M.E., Sanchez, S., Jimenez, J.M., El Yousfi, F., Munoz, L. (2000) "Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*" *Bioresource Technology*. **73**, 263-272.
- Ministry of environment (MOE), (2010) *National Plan for Energy Saving and Production in Sewage Treatment Plant*, Republic of Korea, pp. 4-8.
- Olguín, E.J., Galicia, S., Mercado, G., Perez, T. (2003) "Annual productivity of *Spirulina* (*Arthrospira*) and nutrient removal in a pig wastewater recycle process under tropical conditions. *J. Appl. Phycol.* **15**, 249-257.
- Stenstrom M.K., Rosso D., (2008) *Aeration and mixing*. In: Henze M., van Loosdrecht M.C.M., Ekama G.A., Brdjanovic D. (Eds.), *Biological wastewater treatment*, IWA Publishing, London.
- Stumm W., Morgan J.J., (1996) *Aquatic Chemistry: Chemical Equilibria and Rates in Natural Waters*, John Wiley & Sons Inc., New York, 1022.
- Tchobanoglous G., Burton F.L., Stensel H.D., (2003) *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*, McGraw-Hill, New York, NY.
- Xiang HU., Li XIE., Hojae SHIM., Shanfa ZHANG., Dianhai YANG., (2014) Biological Nutrient Removal in a Full Scale Anoxic/Anaerobic/Aerobic/Pre-anoxic-MBR Plant for Low C/N Ratio Municipal Wastewater Treatment. *Chinese Journal of Chemical Engineering* **22**(4) 447-454.
- Xu Dechao., Chen Hongbo., Li Xiaoming., Yang Qi., Zeng Tianjing., Luo Kun., Zeng Guangming., (2013) Enhanced biological nutrient removal in sequencing batch reactors operated as static/oxic/anoxic (SOA) process. *Bioresource Technology* **143**, 204-211.