



# 남조류 *Synechococcus* sp.의 혐기-호기법에 의한 인 과잉섭취 효율에 미치는 유기/무기 탄소원의 영향

## Effects of organic/inorganic carbon source on the biological luxury-uptake of phosphorus by cyanobacteria *Synechococcus* sp.

유미영·김윤지·최윤정·황선진\*

Mi-Yeong Yu·Yun-Ji Kim·Yun-Jeong Choi·Sun-Jin Hwang\*

경희대학교 일반대학원 환경응용과학과

Department of Applied Environmental Science, Kyung Hee University

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

### ABSTRACT

Biological phosphorus removal is accomplished by exposing PAO(phosphorus accumulating organisms) to anaerobic-aerobic conversion conditions. In the anaerobic condition, PAO synthesize PHB(polyhydroxybutyrate) and simultaneously hydrolysis of poly-p resulting phosphorus(Pi) release. In aerobic condition, PAO uptake phosphorus(Pi) more than they have released. In this study, cyanobacteria *Synechococcus* sp., which is known to be able to synthesize PHB like PAO, was exposed to anaerobic-aerobic conversion. If *Synechococcus* sp. can remove excess phosphorus by the same mechanism as PAO, synergistic effects can occur through photosynthesis. Moreover, *Synechococcus* sp. is known to be capable of synthesizing PHB using inorganic carbon as well as organic carbon, so even if the available capacity of organic carbon decreases, it was expected to show stable phosphorus removal efficiency. In 6 hours of anaerobic condition, phosphorus release occurred in both inorganic and organic carbon conditions but SPRR(specific phosphorus release rate) of both conditions was 10 mg-P/g-MLSS/day, which was significantly lower than that of PAO. When converting to aerobic conditions,

Received 5 October 2020, revised 6 November 2020, accepted 11 November 2020.

\*Corresponding author: Sun-Jin Hwang (E-mail: [sjhwang@khu.ac.kr](mailto:sjhwang@khu.ac.kr))

- 유미영 (석사과정) / Mi-Yeong Yu (Master Student)  
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 17104  
1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea
- 김윤지 (석사과정) / Yun-Ji Kim (Master Student)  
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 17104  
1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea
- 최윤정 (석사과정) / Yun-Jeong Choi (Master Student)  
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 17104  
1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea
- 황선진 (교수) / Sun-Jin Hwang (Professor)  
경기도 용인시 기흥구 덕영대로 1732, 17104  
1732, Deogyong-daero, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi-do 17104, Republic of Korea

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.

SPUR(specific phosphorus uptake rate) was about 9 mg-P/g-MLSS/day in both conditions, showing a higher uptake rate than the control condition showing SPUR of 6.4 mg-P/g-MLSS/day. But there was no difference in terms of the total amount of removal. According to this study, at least, it seems to be inappropriate to apply *Synechococcus* sp. to luxury uptake process for phosphorus removal.

**Key words:** Carbon source, *Synechococcus* sp., EBPR(Enhanced Biological Phosphorus Removal), PAO(Phosphorus Accumulating Organism), PHB(Polyhydroxybutyrate)

**주제어:** 탄소원, *Synechococcus* sp., 고효율 생물학적 인 제거, 인 축적 미생물, 폴리하이드록시부티르산

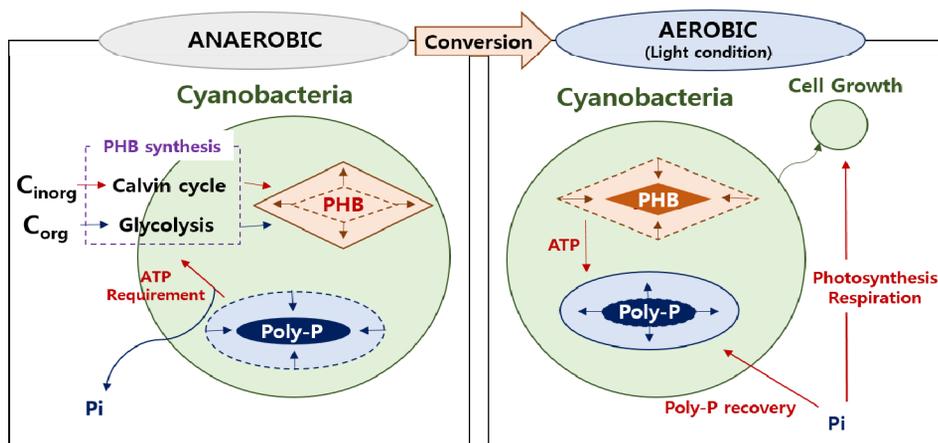
## 1. 서론

호소에 유입되어 부영양화와 같은 수계오염을 유발하는 질소와 인이 1996년 공공하수처리시설의 방류수 수질기준 항목에 포함되면서 나날이 그 규제가 강화되고 있는 실정이다. 2012년 최종 개정된 방류수 수질기준에 의하면 1일 최대 하수처리용량 500 m<sup>3</sup> 이상인 하수처리장이 I 지역에 처리수를 방류할 경우 총질소 기준 20 mg-N/L, 총인 기준 0.2 mg-P/L으로, 특히 인에 대한 규제 농도가 매우 낮다.

기존의 활성슬러지 공법은 유기물 제거가 목적인바, 질소 및 인의 제거효율이 낮아 공공하수처리시설의 94.6%에 해당하는 560개소가 고도처리공법을 채용하여 질소 및 인에 대한 방류수 수질기준을 만족시키고 있다 (MOE, 2015). 그중 가장 많이 채택되는 A<sub>2</sub>O 공법은 혐기조-무산소조-호기조로 구성되며, 이때 인의 제거는 혐기-호기 전환과정에서 인을 과잉 축적(luxury-uptake)한 PAO(phosphorus accumulating organism)를 폐슬러지로서 배제하는 과정에서 달성

된다 (Comeau et al., 1986). PAO의 세포 내 인 축적은 혐기조건에서 세포 외부의 유기탄소를 세포 내 PHB(polyhydroxybutyrate)의 형태로 저장하면서 인을 방출한 후, 이어지는 호기조건에서 세포 내 PHB를 분해하면서 방출한 인 보다 과잉의 인을 섭취하는 과정이다. 그러나 이러한 공정 중 반응슬러지 내 질산성 질소가 혐기조에 유입될 경우, 혐기조의 환원력을 저하시킬 뿐 아니라 탈질에 의해 유기물이 소비되어, PHB 합성에 필요한 유기물 가용량을 감소시키므로, 인 방출을 저해시키고 궁극적으로는 인 제거효율이 감소한다는 한계가 있다.

질소와 인의 제거효율을 획기적으로 높이기 위한 대안으로 미세조류를 이용한 하폐수처리 연구가 활발하게 진행되고 있다 (Green et al., 1996; Hammouda et al., 1995). 일부 미세조류는 무기탄소와 유기탄소 모두를 탄소원으로 사용할 수 있는 양쪽성(mixotrophic) 대사를 한다고 알려져 있으며, 박테리아 보다 높은 체내 영양염류 흡수율을 가진다고 보고되었다 (Arbib et al., 2012; Malick, 2002).



**Fig. 1.** Conceptual diagram for biological phosphorus removal through anaerobic-aerobic metabolism by cyanobacteria *Synechococcus* sp.



Mixotrophic 미세조류의 PHB 합성 및 분해에 따라 인의 과잉섭취가 가능하다면 N, P 흡수율이 높다는 특징과 더불어 무기탄소를 이용한 독립영양(autotrophic) 대사가 가능하므로, 유기물 가용량이 감소하더라도 높은 인 제거효율을 보일 것으로 기대된다. 그러나, 현재까지 미세조류의 PHB 합성 및 분해에 따른 인 제거 가능성에 대한 선행연구는 매우 미비한 실정이다.

PHB의 합성은 주로 남조류를 비롯한 원핵생물에 의해서 일어난다고 알려져 있으며(Wang et al., 2010), 특히 남조류는 성장저해 조건에서 PHB를 합성한다고 한다 (Miyake et al., 1996; Nichioka et al., 2001). 이에 본 연구에서는 Poly-P와 PHB를 합성할 수 있다고 알려진 남조류 *Synechococcus* sp.를 이용하여 혐기-호기 전환조건에서 탄소원에 따른 인 거동을 파악하고 *Synechococcus* sp.의 인 과잉섭취 가능성을 평가하여 최종적으로 남조류를 적용한 EBPR(enhanced biological phosphorus removal) system의 적용 가능성을 타진하고자 한다 (Lawry and Jensen, 1979). 본 연구의 개념도를 Fig. 1에 제시하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1 종 선정 및 배양

PHB의 합성 및 분해기작은 PAO의 인 과잉섭취에 직접적인 영향을 주는 mechanism으로 판단되어 선행 연구를 통해 PHB를 합성할 수 있는 남조류 중 PAO와 유사한 수준의 PHB를 합성할 수 있는 종을 대상으로 검토하였다.

선행연구에 따르면, PAO의 건중량 대비 PHB 합성량은 49~50%라고 알려져 있는데(Charuvan and Chalermraj, 2007; Rogers and Wu, 2009), 남조류 *Synechococcus* sp.는 영양염류 부족이라는 성장제한 조건에서 건중량 대비 26~62%의 PHB 합성능을 보였기 때문에 대상 종으로 적합할 것으로 판단했다 (Miyake et al., 1996; Nichioka et al., 2001). 또한, *Synechococcus* sp.는 무기탄소 뿐 아니라 유기탄소를 이용한 양쪽성 대사가 가능하기 때문에(Kang et al., 2004; Matson and Atsumi, 2018), 하폐수처리에 아주 적합할 것으로 기대되어 KCTC(Korean collection for type culture)에서 분양받아 본 연구에 사용하였다.

**Table 1.** Composition of BG 11 medium

Composition	Concentration (mg/L)
NaNO <sub>3</sub>	1500
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	75
K <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub>	40
CaCl <sub>2</sub> ·2H <sub>2</sub> O	36
Na <sub>2</sub> CO <sub>3</sub>	20
Citric acid	6
Ferric ammonium citrate	12
EDTA	2
ZnSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	0.22
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.81
CuSO <sub>4</sub> ·5H <sub>2</sub> O	0.079
Co(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·6H <sub>2</sub> O	0.049
Na <sub>2</sub> MoO <sub>4</sub> ·2H <sub>2</sub> O	0.39
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.86

*Synechococcus* sp.의 활성유지 및 cell 농도 확보를 위하여 남조류 배양에 주로 사용된다고 알려진 BG 11 medium(Table 1 참조)을 이용하여 남조류의 생육에 적합하도록 25±1℃, 광도 70 PPF(photosynthetic photon flux density, μmol/m<sup>2</sup>/sec) 조건의 광배양기(HB-305M, Hanbeak Co., Korea)에서 배양하였다.

### 2.2 실험 장치 및 방법

혐기-호기 전환시, 탄소원에 따른 남조류 *Synechococcus* sp.의 인 과잉제거능을 평가를 위하여, 기본적으로 혐기-호기 전환을 통해 인의 방출과 과잉섭취가 일어나는지 확인할 수 있도록, 혐기조건을 조성하지 않은 대조군(Control)에 대한 평가를 동시 진행하였다.

대조군의 무기탄소는 NaHCO<sub>3</sub>를 이용해 초기농도 100 mg-IC/L로 설정하였고, 실험군(AN/AE)은 6시간 동안 혐기조건을 조성한 후, 100 PPF의 빛을 조사하여 호기조건으로 전환시켰으며, NaHCO<sub>3</sub> 형태의 무기탄소를 주입한 실험군(AN/AE-IC)과 glucose 형태의 유기탄소를 주입한 실험군(AN/AE-OC)으로 나누어, 각각 100 mg-IC/L, 100 mg-OC/L로 초기농도를 설정해 주었다.

본 연구에서는 혐기조건을 조성하기 위하여 약 30 분간의 질소 purging을 실시하여 용존산소를 탈기시켜 주었고, 환원제로서 L-cysteine(C<sub>3</sub>H<sub>7</sub>NO<sub>2</sub>S)을 250 mg/L 농도로 첨가하여, AN/AE 조건의 DO가 0 mg/L인 것

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512

을 확인하였다. 또한, 광합성에 의한 산소발생을 방지하기 위하여 빛을 차단해 주었으며, 이때 대조군과 실험군(AN/AE)의 반응조건을 동일하게 설정하기 위해 대조군도 6시간 동안 빛을 차단하고 L-cysteine을 주입하였다.

실험에 사용된 배지의 기본성분은 BG 11과 동일하나, 질소 및 인은 실험목적에 적합하도록 조정하였다. 질소원의 경우 질산(Nitrate)은 혐기조건에서 전자수용체로서 작용하여 환원력을 저하시킬 수 있기 때문에,  $\text{NH}_4\text{Cl}$ 을 질소원으로 이용하여 5 mg-N/L로 설정하였다. 인산염 인의 경우는 1 mg-P/L로 주입해 주었다.

Working volume 0.5 L에 *Synechococcus* sp.를 0.5 OD로 접종한 후, 초기 pH를 8.5로 조정하였으며, 회분식 운전을 통해 인의 제거가 완료되는 시점까지 실험을 진행하였다.

## 2.3 분석방법

미세조류의 성장량을 평가하기 위하여 MLSS 및 OD 분석을 실시하였다. OD 분석은 미생물 정량에 일반적으로 사용되는 660 nm의 파장대를 이용하여 충분한 교반 후에 spectrophotometer (Optizen POP, Mecasys, KOREA)를 이용하여 측정했다.

시료는 0.2  $\mu\text{m}$  공극을 가진 syringe filter(Minisart 25 RC, Germany)를 이용한 후 얻어진 여액을 이용하여 탄소 및 인산염 분석을 실시했다. 잔류 유기탄소 및 무기탄소는 TOC analyzer(TOC-V, SHIMADZU Co., Japan)를 이용하여 분석하였고, 인산염( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 수질분석 kit법을 이용하여 water analyzer(model HS-3300, HUMAS, KOREA)로 분석하였다. 용존산소는 DO meter(DO-K3000, IStek, Korea), pH는 pH meter(pH-200L, IStek, Korea)를 이용하여 측정하였다.

## 3. 결 과

### 3.1 *Synechococcus* sp.의 성장량

Control 조건과 AN/AE 조건에 대한 *Synechococcus* sp.의 성장량 평가를 실시하였으며 각 그래프에서 회색 명암에 해당하는 부분은 control 조건과 AN/AE 각 조건에 대하여 각각 6시간 암조건과 6시간 혐기조건을 나타낸다. 이 때 control 조건은 별도의 혐기 조성 과정을 거치지 않아 호기조건으로 유지되었다. 이후

100 PPFd의 광을 조사하여 광합성에 의해 발생하는 산소를 이용하여 호기조건을 조성해 주었다.

성장량 평가를 위하여 OD와 MLSS를 측정한 결과, 모든 조건에서 빛이 조사되지 않은 초기 6시간 동안 유의한 성장은 관찰되지 않았다 (Fig. 2., Fig. 3.). 남조류는 크게 광합성과 세포호흡 대사를 수행하며 그 중 광합성은 빛 에너지를 이용하여 biochemical reductant인  $\text{NADPH}_2$ 와 high energy compound인 ATP로 전환시켜 조류가 성장할 수 있도록 하는데, 빛이 차단된 실험 초기 6시간 동안 광합성 대사가 저해되어 남조류의 성장이 일어나지 않았던 것으로 사료된다.

이후 100 PPFd의 광조사를 통해 호기조건으로 전환시켰을 때, 무기탄소를 공급해준 Control 조건과 AN/AE-IC 조건에서 성장속도 및 성장량은 비슷한 수준을 나타내었다. 따라서 6시간의 혐기조건 노출은 *Synechococcus* sp.의 성장에 저해를 일으키지 않는 것으로 판단된다.

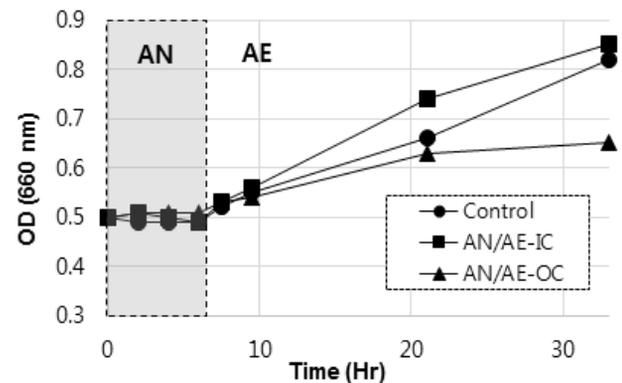


Fig. 2. Effects of anaerobic condition on *Synechococcus* sp. according to carbon source.

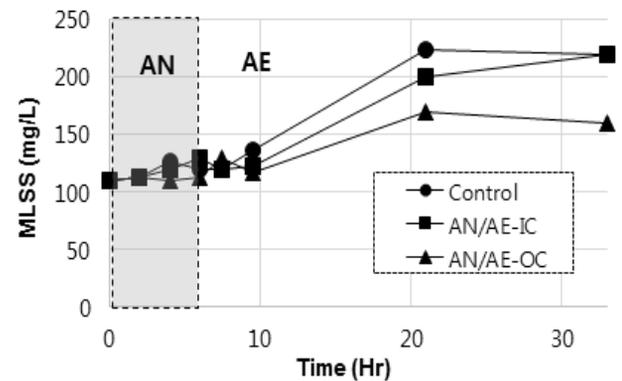


Fig. 3. Effects of anaerobic condition on *Synechococcus* sp. growth according to carbon source.



반면 유기탄소를 공급한 AN/AE-OC 조건에서는 낮은 성장속도 및 성장량을 보였는데, 이는 무기탄소 부족에 따라 photooxidative damage가 발생했기 때문으로 사료된다. 선행연구에 따르면 photooxidative damage는 무기탄소의 부족으로 인해 발생할 수 있으며, 이 경우 세포 내 엽록체가 파괴되어 광합성 효율을 저하시킨다고 알려져 있다 (Shimakawa et al., 2017). 본 연구에서의 AN/AE-OC 조건도 같은 맥락에서 무기탄소가 부족하여 photooxidative damage가 발생함에 따라 엽록체가 파괴되고, 이에 따라 호기조건에서 광합성 효율이 저해되어 낮은 성장량을 보인 것으로 사료된다.

### 3.2 탄소 및 인 거동

*Synechococcus sp.*는 탄소원으로써 무기탄소와 유기탄소를 모두 이용할 수 있는 mixotrophic 미생물에 해당하며, autotrophic 대사 및 heterotrophic 대사 모두 탄소가 acetyl-CoA로 전환되는 과정을 수반한다. Autotrophic 대사와 heterotrophic 대사는 acetyl-CoA 합성시, 각각 캘빈 회로와 해당과정을 거치므로 서로 다른 에너지 요구량을 나타낼 것이며, 그에 따라 인 방출능 및 제거능에 차이를 보일 것으로 판단하였다. 이에 혐기-호기 전환시, 탄소원에 따른 *Synechococcus sp.*의 인 대사를 평가하기 위하여, 배지 내 인 농도 변화를 Fig. 4.에 나타내었다.

혐기조건을 조성해 준 AN/AE-IC, AN/AE-OC 조건 모두 혐기조건에서 인의 방출이 일어남을 확인할 수 있었다. 이때의 인 방출속도를 SPRR(specific phosphorus release rate)로 계산한 결과, 두 조건 모두 약 10 mg-P/g-MLSS/day로 계산되었다. 선행연구에 따르면 PAO의 SPRR 값은 35~192 mg-P/g-MLSS/day로 알려져

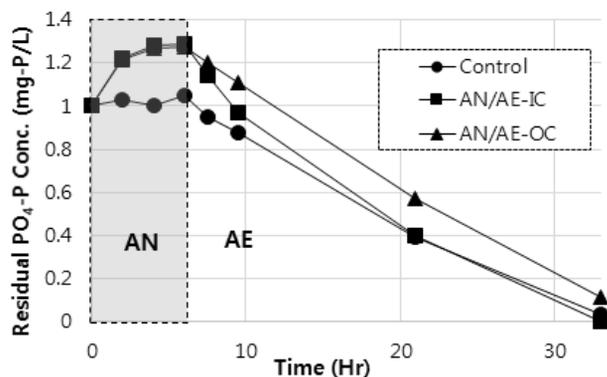


Fig. 4. Residual PO<sub>4</sub>-P concentration according to carbon source.

있는데, 이와 비교했을 때, 상당히 느린 방출속도를 보였다 (Frison et al., 2013; Frison et al., 2014).

호기조건에서 control 조건, AN/AE-IC, AN/AE-OC 조건에서의 SPUR(Specific phosphorus uptake rate)는 각각 6.4 mg-P/g-MLSS/day, 8.8 mg-P/g-MLSS/day, 9.2 mg-P/g-MLSS/day로 계산되었다. Control 조건에 비해 AN/AE 조건에서 우세한 SPUR 값을 나타내는 것으로 보아, 6시간의 혐기조건에 따른 *Synechococcus sp.*의 인 대사능 저해는 일어나지 않은 것으로 판단되고 이는 성장량 역시 저해를 받지 않았다는 연구결과와 동일한 경향성을 보인다.

호기조건으로 전환 시 AN/AE 조건은 control 조건 대비 비슷한 성장량을 나타내었으나 혐기조건에서 방출한 인을 추가적으로 섭취하였기 때문에 높은 SPUR 값을 보였고 특히 무기탄소 조건 보다 유기탄소 조건에서 다소 빠른 경향을 나타내었으나, 인 제거 총량 관점에서 모든 조건 간의 유의한 차이는 없는 것으로 판단된다. 또한 *Synechococcus sp.*의 SPUR 값은 AN/AE-OC 조건에서 9.2 mg-P/g-MLSS/day로 최대값을 보였으나 박테리아의 SPUR 값이 20~60 mg-P/g-MLSS/day인 것에 비하여 현저하게 낮은 속도를 보인다 (Frison et al., 2013; Frison et al., 2014).

혐기조건에서 인을 방출함에 따라 호기조건에서 인 과잉제거가 가능할 것으로 예상하였으나, 인 제거 속도 및 총량 측면에서 control 조건 대비 유의한 차이가 없었다. 이러한 실험 결과에 따라 혐기-호기 전환법에 적용한 *Synechococcus sp.*의 인 대사는 PAO와 상당히 다른 대사과정을 갖는 것으로 사료되나, 현재로서는 정확한 메커니즘 파악은 어려운 상태이다. 또한 탄소원에 따라 PHB를 합성하는 기작이 다르므로 인 방출 및 제거속도에 차이가 있을 것이라고 예상하였으나, 탄소원에 따른 인 제거도 유의한 차이가 없었다.

혐기조건에서 PAO는 세포 외부의 유기탄소를 세포 내 PHB의 형태로 저장하며 이 과정에서 세포 내 poly-P를 가수분해하여 에너지를 얻고 이에 따라 인 방출이 일어난다. *Synechococcus sp.*의 인 방출이 PAO와 같이 cell 외부 탄소를 PHB로 합성하는 과정에서 일어나는 기작이라면, 그에 따른 탄소소비가 일어날 것으로 예상되어 배지 내 잔류탄소를 분석하였다 (Fig. 5., Fig. 6.).

본 연구에 앞서 혐기-호기 전환 및 탄소원을 제외한 실험조건을 동일하게 설정해 주기 위하여 Control 조건

에도 L-Cysteine을 주입하였다. L-Cysteine 주입으로 인해 control 및 AN/AE-IC 조건에서도 약 75 mg-OC/L의 탄소가 측정되었다. 이때 L-Cysteine은 AN/AE 조건에 혐기조건을 조성할 때 질소 purging으로 제거되지 않을 수 있는 배지 내 미량 산소 탈기를 위해 주입한 것이나, 질소 purging을 하지 않은 control 조건의 경우, L-Cysteine을 주입하였더라도 DO level은 혐기수준으로 떨어지지 않았다.

AN/AE-IC와 AN/AE-OC 모두 혐기조건에서 인을 방출한 것으로 보아, 혐기조건에서 PHB 합성에 따른 탄소원 소비를 예상하였으나, AN/AE-OC 조건에서는 혐기구간에서 인 방출에도 불구하고 탄소소비는 일어나지 않았다. PAO의 경우 외부 유기탄소를 섭취하여 PHB를 합성하는 과정에서 인의 방출이 일어나는데, *Synechococcus* sp.의 경우 유기탄소를 소비하지 않았으나 인의 방출이 일어난다는 점에서 PAO와 상이한 인 방출 매커니즘을 가지는 것으로 판단된다. AN/AE-IC

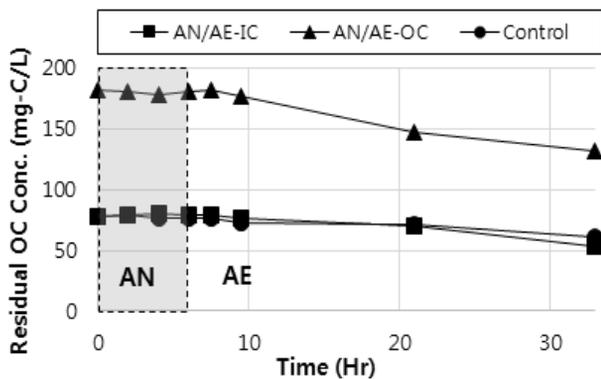


Fig. 5. Residual organic carbon concentration according to carbon source.

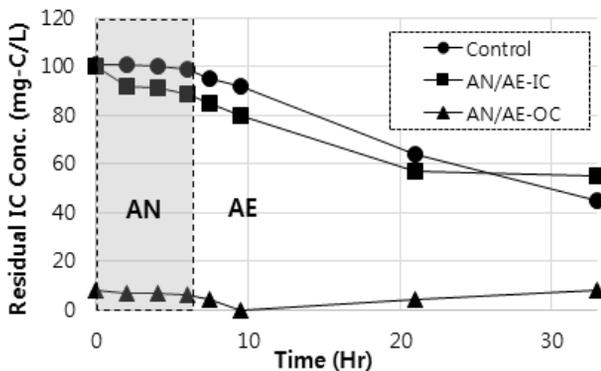


Fig. 6. Residual inorganic carbon concentration according to carbon source.

조건에서는 미미한 탄소소비가 일어났지만, 현재로서는 인 방출과 탄소원 소비 패턴을 연관시켜 *Synechococcus* sp.의 인 방출 기작을 설명하기에는 어려운 상황이다.

혐기-호기 전환법에 적용한 *Synechococcus* sp.는 혐기조건에서 인을 방출하였다더라도 인 제거 총량 개념에서 control 조건 대비 제거효율이 증대되는 결과를 얻을 수 없었으며, *Synechococcus* sp.의 SPRR 및 SPUR 값을 PAO와 비교하였을 때 현저히 낮은 값을 보였다. 따라서 *Synechococcus* sp.는 방출한 인보다 더 많은 양의 인을 섭취하는 PAO와 상당히 다른 대사과정을 가지는 것으로 생각된다. 이러한 실험결과에 따라 혐기-호기법에 *Synechococcus* sp.를 적용하는 것은 부적합한 것으로 사료된다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 PAO와 같이 PHB를 합성할 수 있다고 알려진 남조류 *Synechococcus* sp.를 혐기-호기법에 적용하였을 때의 생물학적 인 과잉제거 가능성을 평가하였다. *Synechococcus* sp.는 mixotrophic 미생물에 해당하므로 유기 및 무기 탄소원에 따라 PHB 합성 기작이 상이하여 인 제거효율이 달라질 것으로 예상하였고, 이에 탄소원을 달리하였을 때 인 제거능을 평가하여 *Synechococcus* sp.의 인 과잉제거 가능성을 평가하였다.

차광 조건에서 *Synechococcus* sp.의 성장량에 유의한 차이가 없었는데, 이는 남조류의 광합성과 세포 호흡 중 빛 에너지를 이용하여 조류를 성장시키는 광합성 대사가 일어나지 않았기 때문으로 사료된다. 이후 호기조건으로 전환하였을 때 AN/AE-OC 조건에 한하여 성장량에 저해가 발생한 것을 확인할 수 있었는데, 이는 무기탄소 부족에 따라 *Synechococcus* sp.에 photooxidative damage가 발생하여 광합성 효율이 저하되었기 때문으로 판단되었다.

혐기조건에서 *Synechococcus* sp.는 10 mg-P/g-MLSS/day의 속도로 인을 방출했는데, 이는 선행연구에서 평가된 박테리아 PAO의 인 방출에 비해 상당히 느린 속도였다. 호기조건에서는 인을 방출했던 AN/AE 조건의 경우, control 조건보다 약간 높은 SPUR 값을 보였으나, 인 제거 총량 측면에서는 유의한 차이가 없었다고 할 수 있다. 또한, 탄소원에 따라 인 방출 및 제거속도에 차이가 있을 것이라고 예상하였으나, 기대와 달리 탄소원에 따른 인 제거 역시 유의한 차이가 없었다.



혐기조건에서 인 방출에 따른 탄소원 소비를 예상하였으나, AN/AE-OC 조건에서는 인 방출에도 불구하고 탄소소비는 일어나지 않았으며, AN/AE-IC 조건에서는 미미한 탄소소비가 일어났지만 탄소원 소비와 인 방출 간의 상관관계를 설명하기엔 아주 적은 양이었다.

결론적으로, 남조류를 혐기-호기법에 적용하였을 때, PAO와 같이 인의 과잉섭취여부를 확인하기 위해, 본 연구에선 가능성이 높다고 판단된 *Synechococcus* sp.를 선정해 EBPR system에 대한 적용 가능성을 실험적으로 검토한 결과, *Synechococcus* sp.의 인 과잉제거에 의한 인 제거효율은 거의 없다고 판단되었다. 향후, PHB를 합성할 수 있다고 알려진 다른 남조류 종에 대한 인 과잉 제거 가능성 평가를 위한 연구를 지속할 필요가 있다.

## 사 사

이 논문은 2019년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구이며 (NRF-2019R1A2C1084155) 이에 감사드립니다.

## References

- Arbib, Z., Ruiz, J., Alvarez, P., Garrido, C., Barragan., J. and Perales, J.A. (2011). Effect of nitrogen and phosphorus concentration on their removal kinetic by *Chlorella vulgaris*, *Int. J. Phytoremediation*, 884-896.
- Charuvan Kasemsap and Chalermraj Wantawin. (2007). Batch production of polyhydroxyalkanoate by low-polyphosphate-content activated sludge at varying pH, *Bioresour. Technol.*, 98, 5, 1020-1027.
- Comeau, Y., Hall, K.J., Hancock, R.E.W., Oldham, W.K. (1986). Biochemical model for enhanced biological phosphorus removal, *Water Res.*, 20(12), 1511-1521.
- Green, F.B., Bernstone, L.S., Lundquist, T.J. and Oswald, W.J. (1996). Advanced Integrated Wastewater Pond Systems for Nitrogen Removal, *Water Sci. Technol.*, 33(7). 207-217.
- Hammaouda, O., Gaver, A. and Abdelraouf, N. (1995). Microalgae and wastewater treatment, *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 31(3), 205-210.
- Mallik, N. (2002). Biotechnological potential of immobilized algae for wastewater N, P and metal removal : a review., *BioMetals*, 15, 377-390.
- Masato Miyake, Mayumi Erata and Yasuo Asada. (1996). A thermophilic cyanobacterium, *Synechococcus* sp. MA19, Capable of Accumulating Poly-β-Hydroxybutyrate, *J. Ferment. Bioeng.*, 82, 5, 512-514.
- Michael Rodgers and Guangxue Wu. (2010). Production of polyhydroxybutyrate by activated sludge performing enhanced biological phosphorus removal, *Bioresour. Technol.*, 101, 3, 1049-1053.
- Ministry of Life and Wastewater, Ministry of Environment. (2015). 2014 public sewage treatment facility operation management analysis results, 1-18.
- Morgan M Matson and Shota Atsumi. (2018). Photomixotrophic chemical production in cyanobacteria, *Curr. Opin. Biotechnol.*, 50, 65-71.
- Motomu Nichioka, Katsuya Nakai, Masato Miyake, Yasuo Asada and Masahito Taya. (2001). Production of poly-β-hydroxybutyrate by thermophilic cyanobacterium, *Synechococcus* sp. MA19, under phosphate-limited conditions, *Biotechnol. Lett.*, 23, 4, 1095-1099.
- Nelson H. Lawry and Thomas E. Jensen. (1979). Deposition of condensed phosphate as an effect of varying sulfur deficiency in the Cyanobacterium *Synechococcus* sp. (*Anacystis nidulans*), *Arch. Microbiol.*, 120, 1-7.
- Nicola Frison, Letizia Zanetti, Evina Katsou, Simons Malamis, Francocecchi and Francesco Fatone. (2013). Production and use of short chain fatty acids to enhance the via-nitrate biological nutrients removal from anaerobic supernatant, *Chem. Eng. Trans.*, 32, 157-162.
- Nicola Frison, Evina Katsou, Simos Malamis and Francesco Fatone. (2014). A novel scheme for denitrifying biological phosphorus removal via nitrate from nutrient-rich anaerobic effluents in a short-cut sequencing batch reactor, *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 91, 1, 190-197.
- Ruijuan Kang, Jing Wang, Dingji Shi, Wei Cong, Zhaoling Cai and Fan Ouyang. (2004). Interactions between organic and inorganic carbon sources during mixotrophic cultivation of *Synechococcus* sp., *Biotechnol. Lett.*, 26, 1429-1432.
- Shimakawa G, Watanabe S and Miyake C. (2017). A carbon dioxide limitation-inducible protein, ColA, supports the growth of *Synechococcus* sp. PCC 7002, *Mar. Drugs.*, 15(12), 1-15.
- Wang Chaogang, Hu Zhangli, Lei Anping and Jin Baohui. (2010). Biosynthesis of poly-3-hydroxybutyrate (PHB) in the transgenic green alga *Chlamydomonas reinhardtii*, *J. Phycol.*, 46(2), 396-402.

pp. 393-402

pp. 403-410

pp. 411-423

pp. 425-435

pp. 437-443

pp. 445-462

pp. 463-471

pp. 473-480

pp. 481-493

pp. 495-502

pp. 503-512