

## Growth and N, P removal efficiency of *Chlorella vulgaris* according to the nitrogen sources and pH condition

질소원 및 pH 조절빈도에 따른 *Chlorella vulgaris* 의 성장특성 및 하수고도처리능 평가

Su-hyun Han · Sun-jin Kim · Tae-hyeong Kim · Ki-ju Cho · Yunhee Lee · Sun-jin Hwang\*

한수현 · 김선진 · 김태형 · 조기주 · 이윤희 · 황선진\*

Department of Environmental Science and Engineering, Kyung Hee University

경희대학교 공과대학 환경공학과

**Abstract :** This study aimed to investigate growth rate and nutrient removal efficiency of *Chlorella vulgaris* according to nitrogen sources and frequency of pH adjustment. Nitrogen and phosphorus removal efficiencies were evaluated in the three different conditions using  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NH}_4^+$  as a sole nitrogen source and mixed condition. Initial nutrient concentrations in artificial wastewater were 30 mg-N/L and 3 mg-P/L similar to secondary wastewater effluent. When nitrogen source was  $\text{NO}_3^-$ , there was no inhibition on the growth of *C. vulgaris* with adjusting pH every 24 hr while growth inhibition occurred with  $\text{NH}_4^+$  caused by pH drop. N, P removal efficiencies were no significant depending on the nitrogen sources. As pH was adjusted to 7 by pH-stat, growth rate and nutrient removal efficiencies were increased compared to adjusting pH every 24 hr, however, growth rate and nutrient removal efficiencies were no significant depending on the nitrogen sources.

**Key words :** Autotrophic microalgae, *Chlorella vulgaris*, Nitrogen source, N and P removal, pH

**주제어:** 독립영양 미세조류, 클로렐라 불가리스, 질소원, 질소/인 제거, 수소이온농도

### 1. 서론

우리나라 대부분의 하폐수처리장은 활성슬러지 공법을 이용하여 운영되고 있으나, 높은 운전 비용 및 슬러지 처리 방안과 비용 등의 문제점을 갖고 있으며, 강화되는 방류수 수질기준을 맞추기 위한 대안 마련이 필요한 실정이다.

현재의 하폐수고도처리 시스템은 하폐수 내의 유기물을 제거하기 위해 폭기를 통해 호기성 미생물 생장에 필요한 산소를 공급하므로 운전비용이

높다는 단점을 가지고 있다. BOD 1 kg을 제거하기 위한 산소를 공급하기 위해서는 대략 1 kwh의 전기가 필요하며(Oswald, 2003), 이 때 폭기에 소비되는 운전비용이 전체 하폐수처리장 운영비용의 45 ~ 75 %를 차지한다.

이러한 문제 해결을 위한 대안 중 하나인 미세조류의 적용은 높은 지질 생산성과 빠른 성장속도, 비식용 자원이라는 장점으로 인해 곡물 바이오연료의 대안으로 주목받고 있으며, 동시에 하수의 3차처리에서 영양염류를 제거할 수 있는 큰 잠재력을 가지고 있어, 최근 많은 관심을 받고 있다(Pizarro et al., 2006; Khan et al., 2008).

미세조류를 이용한 하폐수고도처리기술은 기존

\* Received 23 October 2012, revised 30 November 2012, accepted 5 December 2012.

\* Corresponding author: Tel.: +82-31-201-2497, Fax: +82-31-203-4589, E-mail: sjhwang@khu.ac.kr

의 기술 보다 다양한 이점을 가지고 있다. 독립영양 미세조류는 빛을 이용하여 광합성을 통해 성장하므로 유기탄소원의 공급이 필요없고, 이산화탄소를 탄소원으로 이용하여 성장하므로 낮은 C/N비에서 질소고정이 가능하다. 또한 질소와 인을 제거함에 있어 처리비용이 적게 소요되며, 높은 질소, 인 제거효율을 기대할 수 있다.

미세조류가 광합성을 하는 동안 호기성 미생물에 산소를 공급함으로써 DO 유지를 위한 운전비용을 낮출 수 있으며, 하폐수고도처리시 발생하는 다량의 미세조류 biomass는 bio-fuel 생산, 가축사료 등 다양한 용도로 활용이 가능하다.

미세조류를 이용한 하폐수고도처리가 가능한 것은 N, P를 성장을 위한 영양소로 이용하기 때문이며, 이 중 질소는 탄소 다음으로 중요한 성분으로서 단백질을 형성하기 때문에 미세조류의 성장을 위해서는 필수적이다(Lee and Lee, 2001 ; Voltolina et al., 2005).

미세조류의 성장 및 영양염류 제거능은 환경조건에 따라 크게 달라지는데, 그 중 한 가지로 질소원의 종류를 들 수 있다. 하수처리장으로 유입되는 질소원의 형태는 Org-N,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  등으로 다양하며, 유입하수의 발생원이나 하수처리장 단계에 따라서 다양한 형태의 질소가 존재한다.

대부분의 폐수 내 존재하는 미생물들은 질소원으로  $\text{NH}_4^+$ 를 필요로 하는 반면, 미세조류는  $\text{NH}_4^+$  외에  $\text{NO}_3^-$  나  $\text{NO}_2^-$ 를 이용할 수 있는 능력이 있어, 폐수 내에 존재하는 다양한 형태의 질소원 이용이 가능하다. 그러나 질소원의 종류에 따라 섭취 및 대사기작이 달라지며, 이에 따라 수중의 pH 변화가 다르게 일어나는 것으로 알려져 있다.

미세조류는 타 질소원에 비해  $\text{NH}_4^+$ 를 선호하는 것으로 알려져 있는데, 이는 미세조류가 질소원을 최종적으로  $\text{NH}_4^+$ 의 형태로 이용하므로  $\text{NO}_3^-$ 나  $\text{NO}_2^-$ 를  $\text{NH}_4^+$ 로 환원시키는데 요구되는 에너지를 절약할 수 있기 때문이다(Quay Dortch, 1990).

그러나 질소원에 따라 대사기작이 달라져 이에 따른 pH 변화가 다르게 일어나기 때문에 pH 또한 미세조류의 성장 및 N, P 제거에 영향을 미친다.

대부분의 미세조류는 중성 pH를 선호하는 반면 몇몇 종은 높은 pH (e.g. *Spirulina platensis* at pH 9) 혹은 낮은 pH (e.g. *chlorococcum littorale* at pH 4)에서도 내성을 가지고 있다고 알려져 있다.

이에 본 연구에서는 하수고도처리를 목적으로 연구가 많이 진행되고 있는 종 중에 하나인 *C. vulgaris*를 대상 미세조류로 선정하여 pH 조절 방법 및 질소원의 종류가 미세조류의 성장 및 N, P 제거에 미치는 영향을 평가하였다.

## 2. 재료 및 실험방법

### 2.1 미세조류의 분양 및 배양

본 연구에서 사용한 *Chlorella vulgaris* (AG10194)는 KCTC(Korean collection for type culture)로부터 분양받았으며, bluegreen(BG)11 medium( $\text{NaNO}_3$  1.5 g/L,  $\text{MgSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$  0.075 g/L,  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  0.04 g/L,  $\text{CaCl}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$  0.036 g/L,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  0.02 g/L, citric acid 0.006 g/L, ferric ammonium citrate 0.006 g/L, EDTA 0.001 g/L, trace 1 mL/L)을 이용하여, 250 mL cell culture flask에서 200 mL의 working volume으로 초기 pH 7, 온도  $25 \pm 1$  °C를 유지시키며 배양하였다. 광원은 형광등을 사용하였고, 광주사 주기 Light : Dark = 24 : 0, 광량은  $100 \mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 로 설정하여 2주간 배양 후 실험에 사용하였다.

### 2.2 실험방법

#### 2.2.1. pH를 1일 간격으로 조절한 경우

본 실험에서는 BG11 medium의 N, P 농도를 각각 30 mg/L과 3 mg/L으로 조정하여 인공하수를 조제하였으며, 질소원에 따른 N, P 제

거효율을 평가하기 위해  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{NH}_4^+$ 가 각각 단독으로 존재할 때와  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{NH}_4^+$ 가 1 : 1의 비율로 동시에 존재하는 세 가지 조건을 설정하였다.

1 L의 삼각플라스크에 working volume을 600 mL로 하였으며 초기 미세조류 농도는 220 mg/L가 되도록 하였다. 무기탄소원의 공급을 위해 air pump를 이용하여 1 vvm으로 폭기시켰으며, 교반속도는 100 rpm으로 설정해 주었다. 초기 pH는 7이었으며, 하루에 한번 sampling 시 1M HCl과 1M NaOH를 이용하여 pH를 7로 조정해 주었다. 온도는 상온인  $25 \pm 1$  °C를 유지시켰다. 광원은 태양광과 유사한 혼합파장을 갖는 White LED를 사용했고, 광량은 PPFd(photosynthetic photon flux density)로 100  $\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$ 가 되도록 조절하였다. L/D cycle은 일 주기를 기준으로 12 : 12로 하여 6일 동안 운전하였다.

### 2.2.2. pH 7로 유지한 경우

pH를 7로 일정하게 유지시켜주는 조건에서 질소원에 따른 미세조류 성장량 및 N, P 제거능을 평가하였다. pH controller와 정량펌프를 설치하였고, 1M NaOH와 1M HCl을 이용하여 pH가 7로 유지되도록 하였다. 2.2.1의 1 L 용량의 실험에서는 pH 제어가 용이하지 않아 pH 제어가 가능하도록 working volume 2 L의 반응기를 제작하여 실험을 진행하였으며, 본 실험에서는 폭기만으로도 교반효과가 있었기 때문에 다른 교반장치는 설치하지 않았다. 기타 조건은 pH를 1일 간격으로 조절한 실험과 동일하게 설정하였다.

## 2.3 분석방법

미세조류 성장량 파악을 위해 dry weight를 측정했으며, standard method 방법에 따라 측정이 이루어졌다(Andrew, 2005).

미세조류의 N, P 제거속도 및 제거량 등을 파

악하기 위해, 인공하수 내  $\text{NO}_3^-$ -N 및  $\text{NH}_4^+$ -N,  $\text{PO}_4^{3-}$ -P를 측정했으며, Water analyzer(HS-3300, HUMAS)로 분석하였다.

pH 측정은 pH meter(pH-200L, iSTEK)를 사용하였고, chlorophyll-a는 Standard method에 따라 분석하였다(Andrew, 2005).

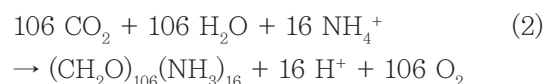
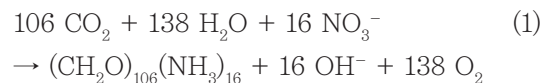
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 pH를 1일 간격으로 조절한 경우

#### 3.1.1 미세조류 성장량 및 pH 변화

질소원에 따른 *C. vulgaris*의 성장량을 비교한 결과(Fig. 1, a), 질소원이  $\text{NO}_3^-$ 일 때 성장이 가장 우수했으며,  $\text{NH}_4^+$ 일 경우 가장 저조하였다. 6일째에서의 dry weight 값은  $\text{NO}_3^-$ 의 경우 360 mg/L,  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{NH}_4^+$ 를 혼합하여 주입한 경우 280 mg/L,  $\text{NH}_4^+$ 인 경우 240 mg/L의 순으로 측정되어,  $\text{NH}_4^+$ 에 비해  $\text{NO}_3^-$ 를 주입한 경우 *C. vulgaris*의 성장량이 약 70 % 높게 나타났다.

pH는 하루 중 정해진 시간에 1회 pH 7로 조정해 주었으며, 이 때의 질소원에 따른 pH 변화를 Fig. 1(b)에 나타내었다.  $\text{NO}_3^-$ 의 경우, 수중의 pH가 8.8까지 증가하였는데 이는 미세조류가  $\text{NO}_3^-$ 를  $\text{NH}_4^+$ 로 환원시키는 과정에서 수중의  $\text{H}^+$  이온을 소모하고  $\text{OH}^-$  이온을 방출했기 때문이다. 반면,  $\text{NH}_4^+$ 를 주입한 경우는 미세조류가 체내합성에  $\text{NH}_4^+$ 를 이용하면서  $\text{H}^+$  이온을 방출하여 수중의 pH가 감소하는 결과를 보였다. Martinez, M. E. (2000)에 의하면 이와 관련한 기작은 아래의 식(1), (2)와 같다.



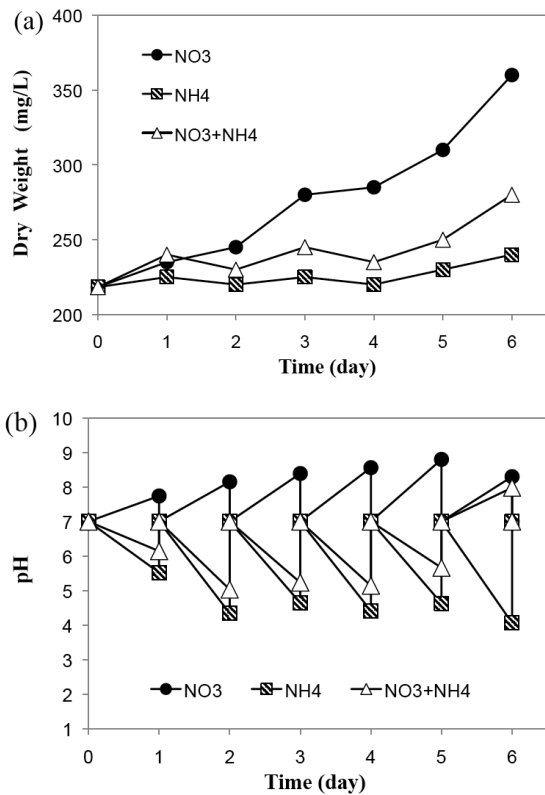


Fig. 1. Growth curves of *C. vulgaris* (a) and pH curves (b) according to nitrogen sources

일반적인 미세조류의 활성 pH 범위는 pH 6 ~ 10으로 알려져 있는데, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 경우에는 pH가 4까지 감소하여 Fig. 1의 (a)와 같이 *C. vulgaris*의 성장에 치명적인 저해를 야기한 것으로 판단된다.

Nianjun Xu(2001)는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 존재하는 배지 내에서의 pH의 감소는 미세조류 성장률을 감소시키는 반면, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 질소원일 때의 pH 증가는 미세조류 성장률을 증가시키는 등 악영향을 미치지 않는다고 보고하였고, Yongmanitchai et al.(1991)는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>에 비해 배지 내 pH 변화가 적기 때문에 미세조류를 위한 단일질소원으로 널리 사용된다고 보고하고 있다.

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 혼합하여 주입한 경우, 3일까지는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 결과와 마찬가지로 pH가 감소하여 성장이 저조하였다가 4일째부터 pH가 증가

함에 따라 dry weight이 증가하기 시작하는 결과를 나타냈다

### 3.1.2 질소 및 인 제거율

질소원에 따른 N, P 제거효율을 평가한 결과, *C. vulgaris*에 의한 질소제거 및 chlorophyll-a 함량변화는 Fig. 3 (b)와 같이 나타났다.

질소가 고갈됨에 따라 chlorophyll-a의 함량이 감소하는 경향이 나타났는데, 이는 질소가 chlorophyll-a의 중심원소인 Mg<sup>2+</sup>과 직접 연결되어 있는 주요 구성성분이기 때문이다(Fig. 2).

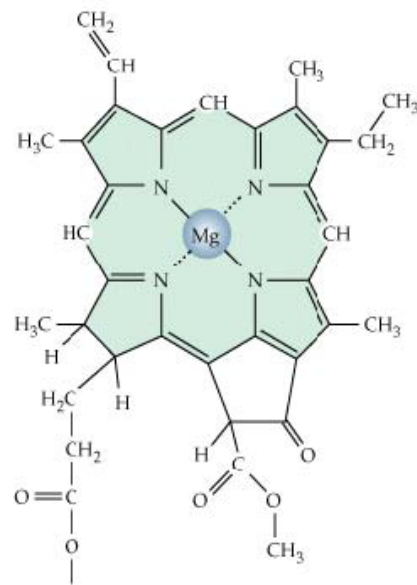


Fig. 2. The structure of chlorophyll-a

즉, 외부 질소원이 충분할 때는 Chlorophyll이 축적되지만, 외부 질소원이 고갈되면 내부 질소원인 chlorophyll이 세포 합성에 이용하여 chlorophyll-a가 감소한 것으로 판단된다 (Yanqun Li et al., 2008).

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 혼합하여 주입한 경우, 4일까지는 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>가 제거되고 이후 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>가 제거되는 결과가 나타났는데(Fig. 3, a), 이는 pH가 감소하다 증가하는 결과와 일치한다.

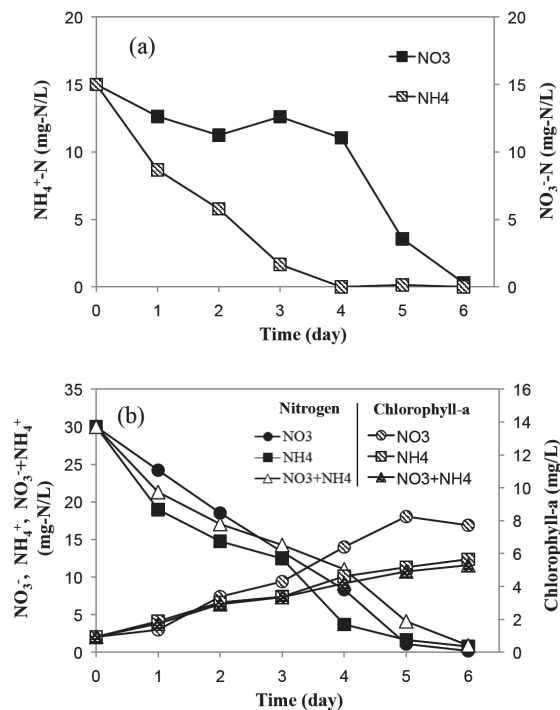


Fig. 3.  $\text{NO}_3^-$  and  $\text{NH}_4^+$  removal with mixed nitrogen sources (a) and nitrogen removal and Chlorophyll-a content of *C. vulgaris* according to nitrogen sources (b)

미세조류는 질소원이  $\text{NO}_3^-$ 인 경우,  $\text{NO}_3^-$ 를 체내로 흡수한 후 질산환원효소(nitrite reductase)에 의해  $\text{NO}_2^-$ 로 환원시키고, 이어  $\text{NO}_2^-$ 를 아질산환원효소(nitrate reductase)에 의해  $\text{NH}_4^+$ 로 환원시킨 후, glutamine synthetase와 glutamate synthetase를 이용하여 최종적으로 amino acids로 축적시킨다(Perez-Garcia et al., 2011). 따라서  $\text{NH}_4^+$ 와  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$  등의 다양한 질소원을 이용할 수 있지만, 타 질소원에 비해  $\text{NH}_4^+$ 를 선호하는 것으로 확인되고 있다.

이는 이론적으로  $\text{NO}_3^-$ 를  $\text{NH}_4^+$ 로 환원시키는 데 요구되는 에너지를 절약할 수 있기 때문이며(Syrett 1981), 몇몇 연구는 미세조류의 세포 내 질산염 환원효소가 부족하기 때문에 암모늄이 질산염 보다 미세조류에 의해 흡수가 쉽다고 보고하고 있다(Hyenstrand et al., 2000;

Cromar et al., 1996). 이러한 이유 때문에 대부분의 미세조류는  $\text{NH}_4^+$ 가 고갈되었을 경우에만  $\text{NO}_3^-$ 를 흡수하기 시작한다고 보고되고 있다 (Flores et al., 1980).

그러나  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{NH}_4^+$ 를 각각 단독으로 주입한 경우에는 각 질소원에 따른 총 질소 제거결과에 유의한 차이가 나타나지 않았다. 이를 통해 미세조류는  $\text{NO}_3^-$ 에 비해  $\text{NH}_4^+$ 를 선호하는 반면, 질소원으로  $\text{NO}_3^-$ 만 존재할 경우에는  $\text{NH}_4^+$ 와 비교하여 유사한 소비속도로  $\text{NO}_3^-$ 를 소비하는 것으로 판단된다.

질소원에 따른 인 제거속도 및 제거량에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 4). 3일째까지 많은 양의 인이 제거되었으며, 3일동안의 제거속도는 질소원이  $\text{NO}_3^-$ 일 경우 0.84 mg/L/d,  $\text{NH}_4^+$ 일 경우 0.79 mg/L/d,  $\text{NO}_3^-$ 와  $\text{NH}_4^+$ 를 혼합하여 주입한 경우 0.91 mg/L/d로, 평균 약 0.85 mg/L/d으로 계산되었다.

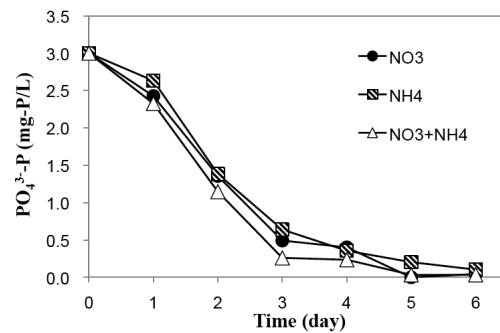


Fig. 4.  $\text{PO}_4^{3-}\text{-P}$  removal of *C. vulgaris* according to nitrogen sources.

## 3.2 pH 7로 유지한 경우

### 3.2.1 미세조류의 성장량

Fig. 5에 제시한 pH 7 유지조건에서의 *C. vulgaris* 성장량은 모든 조건에서 평균 926 mg/L로, pH를 1일 간격으로 조절한 경우와 비교하여  $\text{NH}_4^+$ 의 경우 약 4배가 증가했으며,  $\text{NO}_3^-$ 의 경우도 약 2.5배 증가하는 결과를 나타



났다(Table 1). 이는 pH가 적정범위로 유지됨에 따라 미세조류가 항상성을 유지하기 위해 필요로 하는 에너지를 성장에 사용했기 때문으로 판단된다.

그러나 질소원의 종류에 따라서는 pH 7로 유지된 것과 관계없이 세 경우 모두 유사한 성장결과를 보였으며, 6일 동안의 growth rate을 계산한 결과 역시 모든 질소원에서 유의한 차이 없이 약 0.17 day<sup>-1</sup>을 나타냈다.

한편, Quay Dortch (1990)의 연구에 따르면, 질소원이 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>일 경우 성장량은

NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 비교하여 유사하거나 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>일 때가 오히려 우수했지만, 그 원인에 대한 상세한 고찰은 제시되어 있지 않았다.

미세조류가 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 직접 이용할 수 있는데 비해 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>의 경우에는 2단계에 걸친 환원과정을 거쳐야 하기 때문에 요구되는 환원효소량이 많아지고 소비되는 에너지가 높아져 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>보다 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>를 선호한다고 알려져 있지만, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>를 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>로 환원시키는데 소요되는 에너지의 양이 매우 적어 결과적으로는 유의한 차이가 나타나지 않은 것으로 판단된다.

또한, 본 연구에서는 3일째까지 광을 조사하는 동안 dry weight과 N, P의 분석주기를 24시간에서 6시간으로 단축하여 L/D cycle에 따른 *C. vulgaris*의 성장 및 N, P 제거경향을 세분화하여 관찰하였다. 그 결과, 미세조류의 성장은 예상대로 대부분 광이 조사되는 동안 일어났으며, 암조건 동안에는 성장을 거의 하지 않는 결과를 나타냈다. 이는 명반응에 의해 생성

된 ATP, NADPH와 같은 대사산물이 암조건에서 고갈된 후부터는 대사가 진행되지 않기 때문으로 판단된다.

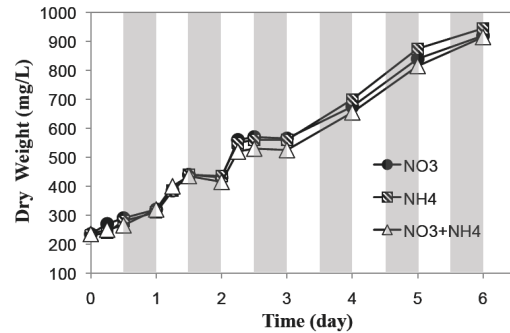


Fig. 5. Growth curves of *C. vulgaris* according to nitrogen sources (pH was maintained 7)

### 3.2.2 pH 7 연속적 유지시 질소 및 인 제거

pH 7로 유지하는 조건에서 질소원에 따른 N, P 제거효율 평가실험을 진행한 결과, *C. vulgaris*에 의한 질소제거 및 chlorophyll-a 함량 변화는 Fig. 6와 같다.

질소원의 종류에 따라 타 조건에 비해 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>의 경우 약간 빠르게 감소되는 것으로 보이나, 고갈 시점에는 거의 차이가 없는 것으로 나타났다.

그러나 pH를 1일 간격으로 조절한 경우와 비교했을 때, 질소고갈 및 chlorophyll-a의 감소 시점이 3일 정도 빨라진 것을 볼 수 있으며, 질소 제거속도가 약 2배 증가하는 것으로 계산되었다(Table. 1).

그리고 Fig. 6에서 알 수 있듯이, dry weight

Table 1. Growth rate and N, P removal of *C. vulgaris* according to nitrogen sources with adjusting pH every 24 hr and maintaining pH 7.

	1일 간격으로 pH 7로 조절			pH 7 연속적으로 유지		
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> +NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>
6일째 dry weight [mg/L]	360	240	280	920	945	915
Growth rate [day-1]	0.08	0.02	0.04	0.23	0.24	0.23
N removal rate [mg/L/d]	5.0	4.9	4.8	9.4	9.7	9.9
P removal rate [mg/L/d]	0.5	0.4	0.5	1.92	1.92	1.87

의 결과와 마찬가지로, 대부분의 질소는 광을 조사해 준 동안 제거되는 것으로 나타났다. 광조건 동안의 질소 제거속도는 모든 질소원의 조건에서 평균 16.2 mg/L/d 로 계산되었고, 암조건에서는 3.1 mg/L/d 가 제거되는 것으로 계산되어, 암조건에 비해 광조건시 질소제거가 약 5배 빠른 것으로 나타났다.

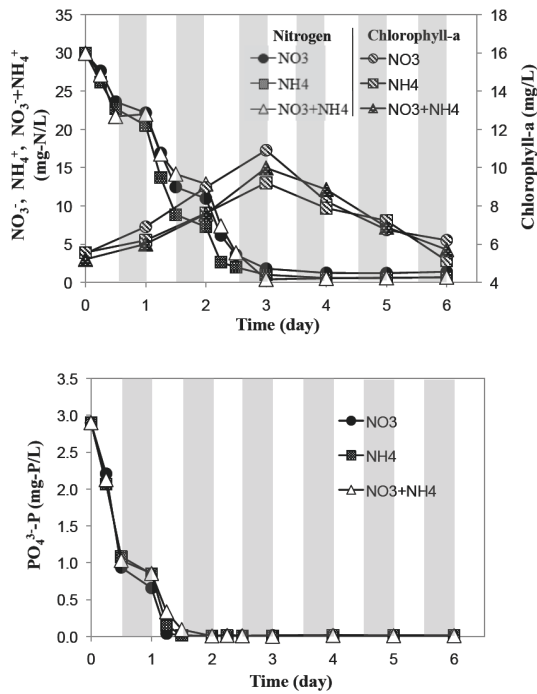


Fig 6. Nitrogen removal and chlorophyll-a content(a) and PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>-P removal(b) of *C. vulgaris* according to nitrogen sources as pH was maintained 7

pH를 1일 간격으로 조절한 경우와 마찬가지로 pH 7로 연속적으로 유지한 경우에도 질소원에 따른 인 제거속도 및 제거량에는 유의한 차이가 없는 것으로 나타났다(Fig. 6, b).

그러나 pH를 1일 간격으로 조절했을 때에 비해 인 제거속도가 3.7 ~ 4.8배까지 증가하는 것으로 계산되어(Table. 1) 2일만에 인이 모두 제거되는 결과를 나타냈다. 질소와 마찬가지로 인 경우에도 암조건에서는 평균 0.3 mg/L/d가 제거된 반면, 광조건에서는 평균 2.6 mg/L/d가

제거되는 것으로 계산되어 인 제거효율이 약 10배 높은 것으로 나타났다.

이상의 결과들로부터 광조사 주기를 L : D = 24 : 0 으로 증가시킨다면 처리수의 N, P 농도가 각각 30 mg-N/L와 3 mg-P/L 일 경우, 운전 1일만에 국내 공공하수처리시설의 방류수 수질기준(Ⅲ 지역 기준, 1일 하수처리용량 500 m<sup>3</sup> 미만 50 m<sup>3</sup> 이상 - T-N : 20 mg/L 이하, T-P : 2 mg/L 이하)을 만족시킬 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 pH 7을 1일 간격으로 조절한 경우와 연속적으로 유지한 경우에 대해 *C. vulgaris*를 이용하여 유입하수에 존재 가능한 질소원의 종류에 따른 미세조류의 성장 및 N, P 제거능을 평가하였다.

pH를 1일 간격으로 조절한 경우, 질소원이 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>인 경우에는 pH가 8.8까지 증가하는 반면, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>인 경우에는 pH가 4까지 감소하여 미세조류의 성장에 저해를 미치는 것으로 나타났다.

pH 7로 연속적으로 유지한 경우에는 질소원에 따른 미세조류의 성장과 영양염류 제거능에 유의한 차이가 없는 것으로 나타났으나, pH를 1일 간격으로 조절했을 때에 비하여 *C. vulgaris*의 성장량은 조건에 따라 2.5 ~ 4배까지 증가했으며, 성장속도와 N, P 제거속도가 각각 4.6배, 2.0배, 3.8배 빨라지는 것으로 나타났다.

현장적용을 고려할 경우, 질소원이 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>인 경우에는 pH 감소로 인한 미세조류 성장저해와 pH 조절을 위한 추가 약품주입이 필요하며, 낮은 pH로 인해 하수처리공정 설비의 부식 등이 발생할 수 있다는 문제점이 있다.

따라서 장기적인 하수처리장 운영을 고려했을 때, *C. vulgaris*의 성장 및 N, P 제거에 가장 적합한 질소원은 추가 약품주입을 필요로 하지 않고 pH 조절이 용이한 장점이 있는 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>로 판단되며, pH를 적정범위로 제어해 줄 필요가 있다.

## 사 사

이 논문은 환경부의 폐기물에너지화·자원화 전문인력양성사업으로 지원되었습니다.

## 참고문헌

- Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesceri, Eugene W. Rice, Arnold E. Greenberg (2005) 21<sup>st</sup> Edition Standard methods for the examination of water & wastewater, Centennial Edition, APHA AWWA WEF
- C. Pizarro, W. Mulbry, D. Blersch, P. Kangas (2006) An economic assessment of algal turf scrubber technology for treatment of dairy manure effluent, *Ecol. Eng.*, **26**, 321–327
- Cromar NJ, Fallowfield HJ, Martin NJ (1996) Influence of environmental parameters on biomass production and nutrient removal in a high rate algal pond operated by continuous culture, *Wat. Sci. Technol.*, **34**, 133–140
- D. Voltolina, H. Gómez-Villa, G. Correa (2005) Nitrogen removal and recycling by *Scenedesmus obliquus* in semicontinuous cultures using artificial wastewater and a simulated light and temperature cycle, *Bioresour. Technol.*, **96** (3), 359–362
- Flores E, Guerrero MG, Losadh M (1980) Short term ammonium inhibition of nitrate utilization in *Anacystis nidulans* and other cyanobacteria, *Arch. Microbiol.*, **128**, 137–140
- Hyenstrand, P., Rydin, E. & Gunnerhed, M. (2000) Response of pelagic cyanobacteria to iron additions—enclosure experiments from Lake Erken., *J. Plankton Res.*, **22**, 1113–1126
- Khan, M., Yoshida, N. (2008) Effect of L-glutamic acid on the growth and ammonium removal from ammonium solution and natural wastewater by *Chlorella vulgaris* NTM06, *Bioresource Technology*, **99**, 575–582.
- K. Lee, C.-G. Lee (2001) Effect of light/dark cycles on wastewater treatments by microalgae, *Biotechnol. Bioprocess Eng.*, **6** (3), 194–199
- Martinez, M.E., Sanchez, S., Jimenez, J.M., Yousfis, F.E., Munoz, L. (2000) Nitrogen and phosphorus removal from urban wastewater by the microalga *Scenedesmus obliquus*, *Bioresource Technology*, **73** (3), 263–272
- Oswald, W. J. (2003) My sixty years in applied algology. *Journal of Applied Phycology*, **15**, 99–106
- Perez-Garcia, O., Escalante, F.M.E., de-Bashan, L.E., Bashan, Y. (2011) Heterotrophic culture of microalgae: Metabolism and potential products, *Water Research*, **45** (1), 11–36
- Syrett, P. J. (1981) Nitrogen metabolism of microalgae. Physiological bases of phytoplankton ecology, *Can. Bull. Fish. Aquat. Sci.* **210**, 182–210
- Xu N, Zhang X, Fan X, Han L, Zeng C (2001) Effects of nitrogen source and concentration on growth rate and fatty acid composition of *Ellipsioidion* sp. (Eustigmatophyta). *J. Appl. Phycol.*, **13**, 463–469
- Yanqun Li, Mark Horsman, Bei Wang, Nan Wu, Christopher Q. Lan (2008) Effects of nitrogen sources on cell growth and lipid accumulation of green alga *Neochloris oleoabundans*, *Appl Microbiol Biotechnol*, **81**, 629–636
- Yongmanitchai W, Ward OP (1991) Growth of and omega-3 fatty acid production by *Phaeodactylum tricornutum* under different culture conditions, *Appl. Environ. Microbiol*, **57** (2), 419–425
- Quay Dortch (1990) The interaction between ammonium and nitrate uptake in phytoplankton, *MARINE ECOLOGY PROGRESS SERIES*, **61**, 183–201