

# 하수의 N/P 비가 *Botryococcus braunii* 증식과 영양염류제거에 미치는 영향 Effect of N/P Ratio on the Biomass Productivity and Nutrient Removal in the Wastewater using *Botryococcus braunii*

최희정<sup>†</sup> · 이승목  
Hee-Jeong Choi<sup>†</sup> · Seung-Mok Lee

가톨릭 관동대학교 보건환경학과  
Department of Health and Environment, Catholic Kwandong University

(Received May 7, 2014; Revised September 24, 2014; Accepted September 26, 2014)

**Abstract :** The aim of this study was effect of N/P ratio on the nutrient removal in the wastewater using microalgae. For this experiment, 1 to 70 various N/P ratio was prepared and used microalgae as *Botryococcus braunii* in the wastewater. The results of this study were that 1 to 30 of N/P ratio was need for biomass productivity in the wastewater. TN removal was measured 82% for 1 to 30 N/P ratio and 73-78% for 31 to 70 N/P ratio. TP removal in 1 to 20 N/P ratio was determined up to 80%, but over 21 N/P ratio was decreased significantly and was not changed around 22% of TP removal in the 50 to 70 N/P ratio. Therefore, the optimum N/P ratio in the wastewater was 1 to 30 for biomass productivity, TN and TP removal. The correlation ( $R^2$ ) of TP removal and biomass productivity was 0.9126. However, the relationship between TN removal and biomass productivity was not found. The P content in the wastewater was influenced more than that of TN content.

**Key Words :** Microalgae, Biomass Productivity, N/P Ratio, Nutrient Removal, Wastewater Treatment

**요약 :** 본 연구는 미세조류 생장에 중요한 영향인자인 N/P ratio가 미세조류의 성장과 하수의 영양염류 제거에 미치는 영향을 알아보려고 하였다. 실험을 위하여 1-70까지의 다양한 N/P ratio를 준비하였으며, 미세조류는 *Botryococcus braunii*를 사용하였다. 실험결과 바이오매스 생산을 위하여 필요한 N/P ratio는 5-30이었다. TN의 제거율은 N/P ratio 1-30까지는 82%, 31-70까지는 73-78%의 제거율을 나타내어 TN 제거를 위한 N/P ratio는 1-30까지가 가장 좋았다. TP의 제거율 N/P ratio 1-20까지는 80% 이상의 높은 제거율을 나타내었지만, 20 이상부터는 급격하게 하락하여 50 이상에서는 22% 정도의 제거율로 변화가 없이 일정하였다. 따라서 바이오매스 생산량과 하수에서의 TN, TP의 제거를 위한 N/P ratio는 1-30이 가장 좋은 비율로 나타났다. TN, TP 제거율과 바이오매스의 생산량 상관관계는 TP 제거율과 바이오매스 생산량의 상관계수가( $R^2$ ) 0.9126으로 상관관계가 매우 높았으나, TN 제거율과 바이오매스 생산량과의 상관관계는 찾을 수가 없었다. 이는 하수에서 TP의 함량이 TN의 함량보다 바이오매스 생산량에 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

**주제어 :** 미세조류, 바이오매스 생산량, N/P 비, 영양염류 제거, 하·폐수처리

## 1. 서론

미세조류는 원핵생물(prokaryote)에 해당하는 남조류(blue-green algae, cyanobacteria)와 진핵생물(eukaryote)에 해당하는 녹조류(green algae), 규조류(diatoms), 와편모류(dinoflagellate) 등으로 구분할 수 있다. 현재 지구의 광합성의 30-50%는 조류가 담당하는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup> 이러한 미세조류는 석유과동 이후 바이오디젤을 생산할 수 있는 새로운 신재생에너지로 각광받고 있으며 또한 질소와 인을 흡수하여 폐수처리에도 이용할 수 있는 유용한 식물이다. 미세조류를 이용하는 가장 커다란 장점은 바이오오일을 생산할 경우 식량문제는 윤리적 문제에서 자유로울 수가 있고, 폐수처리에 사용할 경우 추가오염과 연관되어 있지 않아 생태학적으로 안전하며 바이오매스의 생산과 폐수처리를 동시에 할 수 있기 때문에 일거양득이다.<sup>2)</sup> 그러나 미세조류의 대량생산과 꾸준한 채집과 분석을 통해 높은 오일 함량을 가진 미세조류를 발굴하는 것은 아직도 커다란 과

제로 남아 있다.<sup>3)</sup>

미세조류는 N, P 및 이산화탄소와 빛 에너지를 이용하여 N, P 및 이산화탄소를 고정하고 산소를 생성한다. 이때 C/N/P의 비율은 미세조류의 대량증식을 위한 중요한 영향 인자이다. 여러 연구 결과 일반적으로 미세조류의 성장제한(율속인자) 인자는 거의 N, P이며 조체를 형성하는데 있어서 P은 주로 에너지 관련, N은 단백질 구성 물질로 기여한다.<sup>4)</sup> Redfield<sup>5)</sup>는 해양 미세조류의 가장 일반적인 화학 양론식은 평균  $C_{106}H_{181}O_{45}N_{16}P$  즉, 가장 이상적인 C/N/P ratio는 106/16/1이라고 발표 하였으며, Woertz<sup>6)</sup>은 미세조류의 성장에 필요한 최적의 C/N/P ratio는 50/8/1 이라 보고하였다. 그러나 Klausmeier<sup>7)</sup>은 미세조류의 최적 성장을 위해서는 N/P, N/Si의 비율 이외에도 sulfur, potassium 및 미네랄과 같은 미량원소(Co, Mo, Mn)와 vitamins (Cyanocobalamin, thiamine) 과 같은 영양소간의 적절한 비율이 미세조류의 대량증식을 위한 중요한 요인이라 하였다. 이러한 미세조류의 증식은 이론적인 화학양론식과는 달리 실제 증식에서는

<sup>†</sup> Corresponding author E-mail: hjchoi@cku.ac.kr Tel: 033-649-7297 Fax: 033-647-7535

배지와 환경에 따라 그리고 종에 따라 최적 영양염류의 조건들이 달라지기 때문에 일정한 비율을 정립하기는 쉽지 않다. Geider<sup>8)</sup>는 종에 따른 최적 영양염류 요구비율의 차이가 특정 환경에서 중간경쟁을 결정한다고 하였고, Klausmeier<sup>9)</sup>은 최적의 영양염류 조건들은 서로 다른 영양염류에 의해 제한을 받을 수 있기 때문에 특히 하수에서 최적의 영양염류의 조건을 결정하는 것은 매우 어려운 일이라 하였다. 그러나 미세조류를 대량 증식하여 다양한 목적으로 사용하고 자 한다면 N/P ratio는 매우 중요하게 인식되는 영향인자이다. 미세조류를 폐수처리에 이용하는 것은 오래 전부터 시도하였지만 환경의 변화에 따라 변동이 심하고, 효율성이 낮아 lab scale의 실험에서는 뚜렷한 제거율을 나타내지만, 실제 하수처리장에 사용하는 것은 무리가 있었다. 최근에는 미세조류의 종의 다양성을 사용하여 효율적이고 효과적인 기술을 개발하는 방법이 활발하게 이루어지고 있다. 여러 연구자들에<sup>10-13)</sup> 의하면 미세조류 성장에 필요한 최적의 N/P ratio는 10-20/1이 요구된다. 그러나 일반하수에서 미세조류의 성장에 필요한 N/P ratio는 아직도 논쟁 중이다. 따라서 본 연구는 미세조류 중 지질함량이 높고 오일생산성이 뛰어난 *Botryococcus braunii*를 이용하여 생활하수를 처리할 경우 최적의 N/P ratio를 알아보려고 하였으며, 이를 이용하여 미세조류를 이용한 하·폐수처리의 효율성을 높이고, 미세조류의 생산성을 증대시키고자 하였다.

## 2. 연구방법

### 2.1. 실험 장치 및 실험방법

본 연구는 환경변화에 적응력이 강하고 최대 지질생산량이 건중량의 75%에 이르고, 오일 생산성이 다른 미세조류와 비교하여 뛰어난 *Botryococcus braunii*를 한국 해양미세조류은행(KMMCC, Busan)에서 분양받아 JM 배지(Jaworski's Medium, Table 1)를 이용하여 pH (7.2 ± 3), 낮과 밤의 주기(8-16시간) 그리고 일정한 온도(20°C ± 1)의 항온기에 12일간 증식시킨 후에 사용하였다.

실험에 사용된 하수는 G 시의 생활하수이며 전처리가 끝난 하수를 채집하여 원생동물과 미생물의 오염을 막기 위해 0.45 μm의 멤브레인 필터로 필터링하여 사용하였다. 실험을 위한 반응기 총 용량은 하수 35 L에 12일 배양한 *Botryococcus braunii*를 3.5 L를 넣어 *Botryococcus braunii*와 하수의 비율을 10:1로 맞추었다. G 시의 하수성상은 Table 2에 나타내었으며 BOD/PO<sub>4</sub>-P의 비율은 19.49, PO<sub>4</sub>-P/TP의 비율은 0.89, BOD/TP의 비율은 17.28 그리고 COD/TN/TP의 비율은 22.72/4.33/1이었다.

하수의 N/P ratio가 미세조류의 성장과 영양염류 제거에 미치는 영향을 알아보려고 N/P ratio를 1-70까지 다양하게 준비하여 실험하였다. N과 P의 함량 조절을 위해서는 NaNO<sub>3</sub>와 NaH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>·H<sub>2</sub>O를 사용하여 N과 P의 물양을 계산하여 N/P ratio를 조절하였다. 초기 *Botryococcus braunii*의 농도는 1.10

± 0.7 g/L였으며, 미세조류의 광합성을 위한 광원은 430-670 nm 파장의 백색 LED를 사용하였다. 실험은 각 10일씩 총 9번을 반복 실험하여 평균 데이터를 사용하였다.

**Table 1.** A chemical composition of Jaworski's medium (unit: mg/L Deionized water)

Components	Contents [mg/L]
Ca(NO <sub>3</sub> ) <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	20
KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	12.4
MgSO <sub>4</sub> ·7H <sub>2</sub> O	50
NaHCO <sub>3</sub>	15.9
Na <sub>2</sub> HPO <sub>4</sub> ·12H <sub>2</sub> O	36
NaNO <sub>3</sub>	80
EDTA FeNa	2.25
EDTANa <sub>2</sub>	2.25
H <sub>3</sub> BO <sub>3</sub>	2.48
MnCl <sub>2</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.39
(NH <sub>4</sub> ) <sub>6</sub> Mo <sub>7</sub> O <sub>24</sub> ·4H <sub>2</sub> O	1.00
Cyanobalamin	0.04
Thiamine HCl	0.04
Biotin	0.04

**Table 2.** Characteristics of the influent wastewater

Parameter	Average concentration [mg/L]	Variation [mg/L]
BOD <sub>5</sub>	159.63	125.32 to 180.56
TCOD	209.92	185.18 to 255.45
TP	9.24	5.07 to 15.58
PO <sub>4</sub>	8.19	5.09 to 11.15
TN	40.02	33.53 to 49.24

### 2.2. 분석방법

바이오매스의 증가량을 알 수 있는 미세조류의 건조 질량은 50 mL의 샘플을 GF/C (Wattmann, 영국)로 여과한 후 105 °C에서 24시간 건조한 후 그 질량을 측정하였다.

$$C_B = (C_b - C_{b0}) / (t - t_0) \quad (1)$$

C<sub>B</sub>는 바이오매스의 양, C<sub>b</sub> 및 C<sub>b0</sub>는 t와 t<sub>0</sub>시간의 바이오매스의 양을 나타낸다.

하수의 BOD, TCOD, TN, TP, PO<sub>4</sub>-P의 함유량은 공정시험법을 이용하여 측정하였으며, TN과 TP 제거율은 수질오염공정시험기준법과 (주)휴마스 kit를 이용하여 측정, 비교하여 평균 값을 사용하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. Biomass productivity by various N/P ratio

미세조류 성장에 많이 소요되는 원소는 C, H, O, N, P, K

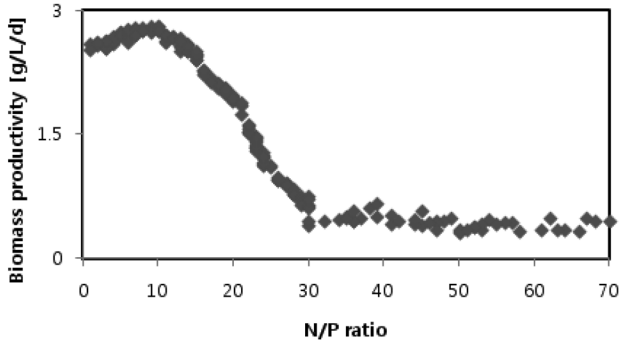


Fig. 1. The relationship between biomass productivity and N/P ratio.

등에서 C, H, O 등은 물과 대기 중의 이산화탄소로부터 계속적으로 공급받을 수 있으므로 N, P, K 등의 원소의 공급에 따라 미세조류의 생장은 조절될 수 있다.<sup>14)</sup> 특히 N은 단백질 합성의 주요성분이며, P는 DNA, RNA, ATP 등의 구성물질로 미세조류의 생장에 필수적인 요소이다.<sup>15)</sup> Klausmeier<sup>9)</sup>은 미세조류가 N과 P를 세포에 더 이상 저장하지 않고 생장에 필요한 최소한의 N, P의 비율을 유지할 때를 optimum N/P ratio라 하였다. 실험결과 미세조류의 biomass productivity는 N/P ratio 15까지는 커다란 변화없이 약간 증가하였으나, 그 후에는 큰 폭으로 감소하다가 N/P ratio 30-70까지는 N/P ratio에 관계없이 biomass productivity는 변화가 없었다(Fig. 1). 따라서 biomass productivity를 위하여 필요한 N/P ratio는 5-30이라고 할 수 있으며, optimum N/P ratio는 30이었다. 즉, 하수에서 P가 절대적으로 부족한 상태에서 N의 과량함유는 바이오매스의 생산량에 영향을 주지 못하였다. Rhee<sup>16)</sup>는 *Scenedesmus*를 이용한 최적의 N/P ratio 실험에서 미세조류 생장에 소요되는 N/P ratio는 5-80까지 라고 보고하였으며, Klausmeier<sup>17)</sup>은 8.2-45까지를 미세조류 생장에 필요한 N/P ratio라 하였다. 그러나 Li<sup>18)</sup>은 *Scenedesmus*를 대상으로 성장을 위한 N/P ratio는 5-8이라 하였고, Wang<sup>19)</sup>은 *Chlorella* sp.를 이용하여 실험한 결과 N/P ratio는 6.8-10의 범위를 제시하였다. 각 연구자마다 최적의 N/P ratio가 다른 이유는 미세조류가 그만큼 환경적인 요인에 영향을 많이 받는다는 의미이기도 하다. 특히 일정한 조건을 만들어 미세조류의 성장을 실험하지 않고 실 하·폐수를 이용하여 실험을 할 경우에는 빛과 영양염류 등의 외부 환경적인 인자의 영향력은 더욱 커서 미세조류의 성장을 위한 N/P ratio의 범위는 크게 흔들리는 것으로 나타나는 것으로 생각된다. 실제로 실험실에서 JM배지를 이용하여 *Botryococcus braunii*의 성장을 위한 N/P ratio를 실험한 결과 5-10의 범위가 측정되었으나 실 하·폐수를 이용하여 실험

한 본 실험은 5-30으로 범위가 넓게 나타났다.

Table 3에 다양한 N/P ratio에 따른 바이오매스 생산량, TN과 TP제거율을 나타내었다. N/P ratio에 따른 바이오매스 생산량은 N/P ratio 1-20까지는 평균 2.30 [g/L/d]를 나타내었으나 31 이상에서는 0.40-0.45 [g/L/d]가 측정되어 N/P ratio 1-20까지가 N/P ratio 31-70까지 보다 5.11-5.88배 더 많은 바이오매스 생산량을 나타내었다. 그리고 N/P ratio 30 이상은 바이오매스 생산량이 매우 낮았다. Redfield<sup>5)</sup>는 해양미세조류의 N/P ratio를 연구한 결과 16/1이 해양에서 미세조류의 생장에 가장 좋은 비율이라고 보고하였으나, 본 실험결과 바이오매스의 생산을 위해서는 1-20의 N/P ratio가 가장 좋았다. 이는 미세조류의 생장은 하수의 환경적인 영향을 많이 받기 때문에 하수의 성상과 종에 따라 최적의 생장에 필요한 N/P ratio가 변화되어 나타나는 것이라 생각된다.

### 3.2. N/P ratio and TN removal

질소는 미세조류의 생장에 중요한 구성성분으로 지수적 성장에서 유기물의 10%를 차지한다.<sup>5)</sup> 미세조류의 질소섭취 기작은 먼저 nitrate는 nitrate reductase에 의해 nitrite로 환원되고, nitrite는 nitrite reductase에 의해 ammonium으로 환원되며 ammonium은 glutamine synthetase와 glutamate synthetase에 의해 amino acids의 형태로 축적이 된다.<sup>20-22)</sup> Fig. 2에 N/P ratio에 따른 TN의 제거율을 나타내었다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 TN의 제거율은 N/P ratio에 상관없이 거의 일정하게 측정되었다. 즉, TN의 제거율은 N/P ratio에 영향을 받지 않았다. N/P ratio 1-30까지는 82%의 높은 제거율을 나타내었고, 31-70까지는 73-78%의 제거율을 나타내었다. N/P ratio 1-30이 31-70보다 약 4-9% 이상의 많은 제거율을 나타내었다. 그러나 N/P ratio 30이 넘으면서 약간 제거율이 떨어지기는 했으나 거의 변화가 없었다.

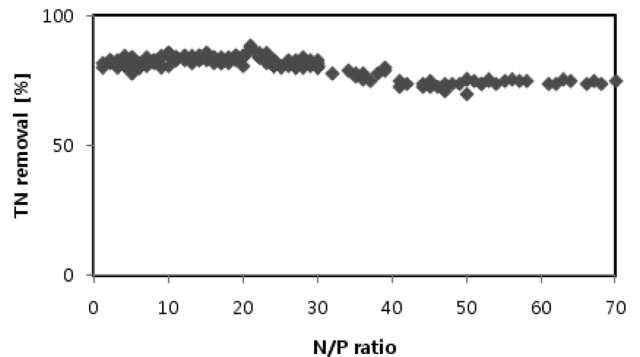


Fig. 2. The correlation of TN removal and N/P ratio.

Table 3. Biomass productivity and nutrient removal by various N/P ratio in the wastewater

N/P ratio	1-10	11-20	21-30	31-40	41-50	51-60	61-70
Biomass productivity [g/L/d]	2.69±0.22	2.30±0.4	1.14±0.37	0.45±0.17	0.43±0.09	0.41±0.08	0.40±0.08
TN removal [%]	82.33±6.23	83.90±2.90	82.81±2.81	78.08±3.08	74.90±3.29	74.63±2.40	73.29±2.50
TP removal [%]	85.52±4.54	80.98±3.98	59.00±6.35	44.15±5.15	34.00±4.36	22.70±3.10	21.50±2.90

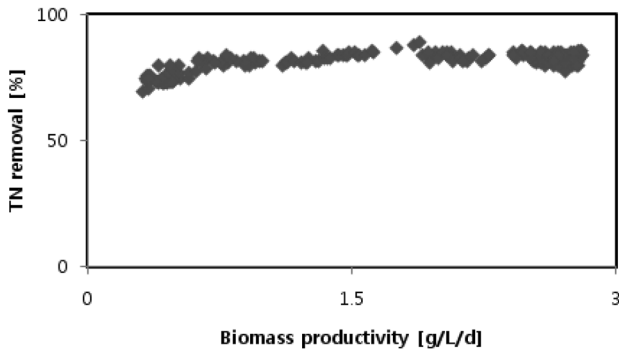


Fig. 3. The relationship between biomass productivity and TN removal.

Fig. 3에 TN 제거율과 바이오매스 생산량과의 상관관계를 나타내었다. TN의 제거율은 1.5 [g/L/d] biomass productivity 까지는 상승했으나 그 이상에서는 바이오매스의 생산량에 영향을 받지 않고 거의 일정하게 나타남으로써 본 실험에서는 TN 제거율과 바이오매스의 상관관계를 찾을 수가 없었다. 즉, N의 함량은 바이오매스의 생산량에 많은 영향을 미치지 않았다. Hall<sup>12)</sup>은 호수에서 N/P ratio가 미세조류의 성장에 미치는 영향을 실험한 결과 P와 비교하여 N이 미세조류의 biomass 성장에 미치는 영향은 미미하며, Ong<sup>23)</sup>은 광생물 반응기를 이용하여 N/P ratio에 따른 *Chlorella* sp. 증식과 영양염류 제거 실험에서 TN의 제거율과 바이오매스 생산량과의 상관관계를 밝히지 못했다.

### 3.3. N/P ratio and TP removal

Fig. 4에 N/P ratio에 따른 TP의 제거율은 나타내었다. TN의 제거율과는 반대로 TP의 제거율은 바이오매스의 생산량에 많은 영향을 받았다. 하수의 N 양이 증가하고 P의 양이 감소함에 따라 TP의 제거율은 급격하게 감소하였다. 실험 결과 N/P ratio 1-10까지는 평균 85.52%의 제거율을 나타내어 50-70 N/P ratio와 비교하여 60% 이상의 높은 제거율을 나타내었다(Table 3). Fig. 4에서 볼 수 있듯이 N/P ratio에 따른 TP제거율은 1-20까지는 80% 이상의 높은 제거율을 나타내었지만, 20 이상부터는 급격하게 하락하여 50 이상에서는 22% 정도의 제거율로 변화가 없이 일정하였다. 따라서 하·폐수에서 TP제거를 위한 N/P ratio는 20까지가 최적

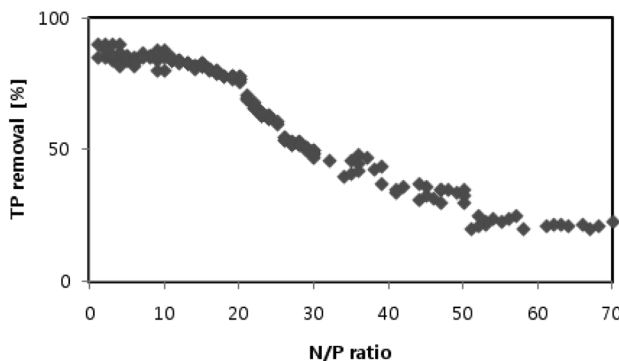


Fig. 4. The correlation of TP removal and N/P ratio.

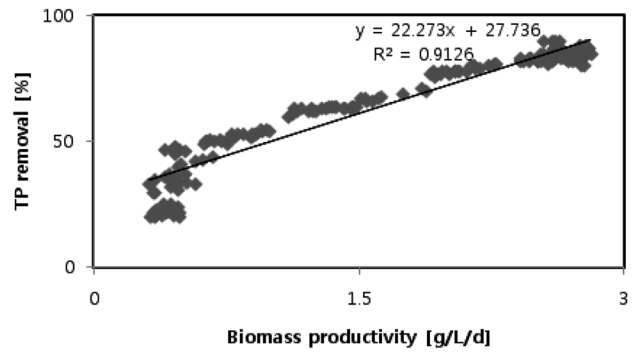


Fig. 5. The relationship between biomass productivity and TP removal.

의 조건이었다.

Fig. 5에 TP제거율과 바이오매스 생산량의 상관관계를 나타내었다. TN과 바이오매스의 상관관계와는 달리 TP의 제거율은 바이오매스의 생산량과 거의 비례하였으며 상관관계수는( $R^2$ ) 0.9126으로 나타났다. 이는 미세조류의 증식에는 N보다는 P의 양이 많은 영향을 미친다고 볼 수 있다. 반대로 영양염류가 많은 호수나 하천에 미세조류의 증식을 막기 위해서는 인의 양을 절대적으로 감소시키면 바이오매스의 생산량을 감소시킬 수 있다. Schindler<sup>24)</sup>은 캐나다의 호수 227개를 1969-2005년에 걸쳐 37년간 조사한 결과 조류의 biomass는 수중의 총인의 농도에 비례적으로 증가하는 것을 확인하였으며, N의 공급을 감소시키는 것에 의해서는 호수의 부영양화를 줄이지 못한다고 보고하였다. 즉, 호수의 부영양화를 줄이기 위해서는 P의 유입을 줄여야 한다고 강조하였다. Min<sup>25)</sup>은 *Chlorella* sp.를 이용하여 하수에서 영양염류 제거 실험을 한 결과 0.9872의 바이오매스 생산량과 TP 제거율의 상관관계를 보고하였고, Stelzer<sup>26)</sup> 또한 0.9684의 상관관계를 제시하여 바이오매스 생산량과 TP의 제거율과는 높은 상관관계가 있음을 보고하였다.

## 4. 결론

하수의 N/P ratio가 미세조류(*Botryococcus braunii*)의 성장과 영양염류 제거에 미치는 영향을 알아보기 위하여 1-70까지의 다양한 N/P ratio를 비교 실험한 결과는

- 1) biomass productivity를 위하여 일반하수에서 필요한 N/P ratio는 5-30이었다.
- 2) TN제거율은 N/P ratio 1-30까지는 82%의 높은 제거율을 나타내었고, 31-70까지는 73-78%의 제거율을 나타내어, N/P ratio에 따른 TN제거율은 큰 변동이 없었다.
- 3) TP 제거율은 N/P ratio 1-20까지는 80% 이상의 높은 제거율을 나타내었지만, 20이상부터는 급격하게 하락하여 N/P ratio 50 이상에서는 약 22% 정도의 제거율로 변화가 없이 일정하였다.
- 4) TP 제거율은 바이오매스의 생산량과 거의 비례하였으

며 상관계수는( $R^2$ ) 0.9126으로 나타났다. 그러나 TN의 제거율과 바이오매스 생산량과의 상관관계는 찾을 수가 없었다.

## Acknowledgement

본 연구는 한국연구재단 여성과학자(2013006899) 지원 사업으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

## Reference

- Di Pippo, F., Ellwood, N., Guzzon, A., Siliato, L., Michelletti, E., de Philippis, R. and Albertano, P., "Effect of light and temperature on biomass, photosynthesis and capsular polysaccharides in cultured phototrophic biofilms," *J. Appl. Phycol.*, **24**(2), 1~10(2011).
- 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).
- Wijffels, R. H. and Barbosa, M. J., "An outlook on microalgal biofuels," *Science*, **329**(5993), 796~799(2010).
- Nieuwerburgh, L. V., Wänstrand, I. and Snoeijs, P., "Growth and C:N:P ratios in copepod grazing on N- or Si-limited phytoplankton blooms," *Hydrobiologia*, **514**(1-3), 57~72(2004).
- Redfield, A. C., Ketchum, B. H. and Richards, F. A., "The influence of organisms on the composition of sea-water," In: Hill, N. (Ed.), *In the Sea*, 2<sup>nd</sup> edition. Wiley, New York, USA, pp. 26~77(1963).
- Woertz, I., Fulton, L. and Lundquist, T., "Nutrient removal and greenhouse gas abatement with CO<sub>2</sub> supplemented algal high rate ponds," Water Environment Federation, October 12-14, Orlando, Florida, pp. 7924~7936(2009).
- Klausmeier, C. A., Litchman, E. and Simon, A. L., "Phytoplankton growth and stoichiometry under multiple nutrient limitations," *Limnol. Oceanogr.*, **49**(4), 1463~1470(2004a).
- Geider, R. J. and Roche, J. L., "Redfield revisited: variability of C:N:P in marine microalgae and its biochemical basis," *Eur. J. Phycol.*, **37**(1), 1~17(2002).
- Klausmeier, C. A., Litchman, E., Daufresne, T. and Levin, S. A., "Phytoplankton stoichiometry," *Ecol. Res.*, **23**(3), 479~485(2008).
- Baird, M. E. and Middleton, J. H., "On relating physical limits to the carbon:nitrogen ratio of unicellular algae and benthic plants," *J. Mar. Systems*, **49**(1-4), 169~175(2004).
- Fulton, L., "Nutrient removal by algae grown in CO<sub>2</sub>-enriched wastewater over a range of nitrogen:phosphorus ratios," Master's thesis, Civil and Environmental Engineering Department, California Polytechnic State University, San Luis Obispo. pp. 1~42(2009).
- Hall, S. R., Smith, V. H., Lytle, D. A. and Leibold, M. A., "Constraints on primary producer N:P stoichiometry along N:P supply ratio gradients," *Ecology*, **86**(7), 1894~1904(2005).
- Havens, K. E., James, R. T., East, T. L. and Smith, V. H., "N:P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution," *Environ. Pollut.*, **122**(3), 379~390(2003).
- Ahn, C. Y., Lee, J. Y. and Oh, H. M., "Control of microalgal growth and competition by N:P ratio manipulation," *Kor. J. Environ. Biol.*, **31**(2), 61~68(2013). (In Korean).
- Conely, D. J., Paerl, H. W., Howarth, R. W., Boesch, D. F., Seitzinger, S. P., Havens, K. E., Lancelot, C. and Linkens, G., "Controlling eutrophication; Nitrogen and phosphorus," *Science*, **323**(5917), 1014~1015(2009).
- Rhee, G. Y. and Gotham, I. J., "Optimum N/P ratios and coexistence of planktonic algae," *J. Phycol.*, **16**(4), 486~489(1980).
- Klausmeier, C. A., Litchman, E., Daufresne, T. and Levin, S. A., "Optimal nitrogen-to-phosphorus stoichiometry of phytoplankton," *Nature*, **429**(6988), 171~174(2004b).
- Li, X., Hu, H. Y. and Yang, J., "Lipid accumulation and nutrient removal properties of a newly isolated freshwater microalga, *Scenedesmus* sp. LXI, growing in secondary effluent," *New Biotechnol.*, **27**(1), 59~63(2010).
- Wang, C., Yu, X., Lv, H. and Yang, J., "Nitrogen and phosphorus removal from municipal wastewater by green alga *Chlorella* sp.," *J. Environ. Biol.*, **34**, 421~425(2013).
- Choi, H. J., Lee, J. M. and Lee, S. M., "A novel optical panel photobioreactor for cultivation of microalgae," *Water Sci. Technol.*, **67**(11), 2543~2548(2013).
- Kahlert, M., "Horizontal variation of biomass and C:N:P ratios of benthic algae in lakes," *Hydrobiologia*, **489**(1-3), 171~177(2002).
- Aslan, S. and Kapdan, I. K., "Batch kinetics of nitrogen and phosphorus removal from synthetic wastewater by algae," *Ecol. Eng.*, **28**(1), 64~70(2006).
- Ong, S. C., Kao, C. Y., Chiu, S. Y., Tsai, M. T. and Lin, C. S., "Characterization of thermal-tolerant mutants of *Chlorella* sp. with high growth rate and application in outdoor photobioreactor cultivation," *Bioresour. Technol.*, **101**(8), 2880~2883(2010).
- Schindler, D. W., Hecky, R. E., Findlay, D. L., Stainton, M. P., Parker, B. R., Paterson, M. J., Beaty, K. G., Lyng, M. and Kasian, S. E. M., "Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment," *Proc. Nat. Academy Sci. United States Am.*, **105**(32), 11254~11258(2008).
- Min, M., Wang, L., Li, Y., Mohr, M. J., Hu, B., Zhou, W., Chen, P. and Ruan, R., "Cultivation *Chlorella* sp. in a pilot-scale photo bioreactor using centrate wastewater for microalgal biomass production and wastewater nutrient removal," *Appl. Biochem. Biotechnol.*, **165**(1), 123~137(2011).
- Stelzer, R. S. and Lamberti, G. A., "Effects of N:P ratio and total nutrient concentration on stream periphyton community structure, biomass, and elemental composition," *Limnol. Oceanogr.*, **46**(2), 356~367(2001).