

## 대청호에서의 단기 영양염 첨가 실험 및 제한 영양염류 분석

이 상 재 · 안 광 국\*

(충남대학교 생명과학과)

**Short-Term Nutrient Enrichment Bioassays and Nutrient Limitation in Daechung Reservoir. Lee, Sang-Jae and Kwang-Guk An\* (Department of Bioscience and Biotechnology, College of Biological Science and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea)**

*In situ* experiments of Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs) were conducted in the field along with in the laboratory to determine which nutrient limited phytoplankton growth as a indicator of primary productivity. For the NEBs, the water was sampled using a polyethylene-lined container and dispensed into 6 L water tank in the laboratory. The control (C, no nutrient spike) and six treatments of phosphorus (P), 2-fold phosphorus (2P), 4-fold phosphorus (4P), nitrate nitrogen ( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), 2-fold nitrate nitrogen ( $2\text{NO}_3\text{-N}$ ), and phosphorus and nitrate nitrogen (P+ $\text{NO}_3\text{-N}$ ) were set up in the lacustrine zone near the dam site, Daechung Reservoir in September, 2009 and analyzed the diel changes of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and chlorophyll-*a* (Chl-*a*) in the cubitainers. The short-term NEBs showed that algal response in the treatments spiked phosphorus (P, 2P, and 4P) were significantly ( $p < 0.05$ ) greater than the response in the control (C), and nitrogen-spike. Also, the response in 4P-treatment was greater than those in the P- and 2P-treatments. In contrast, there was no significant differences ( $p > 0.20$ ) between the  $\text{NO}_3\text{-N}$  and  $2\text{NO}_3\text{-N}$  treatment. The outcomes of the NEBs suggest that phosphorus limited the phytoplankton growth and nitrogen was not limited in this system. Furthermore, in the N+P treatments, the response was minimum, compared to all other treatments and the control, indicating that even if the system is evidently P-limited system, when added the nitrogen, the response showed the inhibition. Also, >95% of observed long-term TN:TP ratios in the ambient water showed >17, which is the criteria of P-limitation, supporting the P-limitation in the system. Overall, these results suggest that phytoplankton biomass near the dam is a direct linear function of P-loading near the watershed, if the phosphorus pool is mainly dissolved fraction.

**Key words : nutrient limitation, nutrient spike, Daechung Reservoir, chlorophyll, phosphorus**

### 서 론

호수의 부영양화는 수체내로 질소(N)와 인(P)과 같은 무기 영양염류가 다량 유입됨에 따라(Carpenter *et al.*,

1998), 식물플랑크톤에 의한 1차 생산력이 증대할 뿐만 아니라(Wetzel, 2001) 하절기의 상시적인 남조류의 수화 현상(algal bloom)을 야기시켜 수질악화와 생태계 교란 및 불쾌한 냄새, 시각적인 불쾌감 증대 등 수자원이용에 있어 심각한 문제점으로 작용하고 있다(이 등, 2006). 또한

\* Corresponding author: Tel: 042) 821-6408, Fax: 042) 822-9690, E-mail: kgan@cnu.ac.kr

부영양화로 인해 호수의 생산력 증대와 호수의 체적이 줄어드는 현상이 나타나며, 유역특성과 호수의 물리적인 구조에 따라 매우 복잡한 양상을 보인다(김과 오, 2007). 과거의 부영양화에 의한 평가가 호수의 수질 오염과 같은 일차적인 문제점으로만 판단되었으나, 최근에는 조류의 대량 번식과 이에 따른 2차적인 변화현상이 나타나고 있는 실정으로, 부영양화의 정확한 평가를 위해서 다양한 수질 항목에 대한 측정 자료의 수집이 중요한 요인이 되며, 수집된 자료의 분석 및 해석 또한 중요하게 평가되고 있다(Carson, 1976; 허 등, 2006). 일반적으로 호소의 수질과 생태적 특성에 영향을 미치는 환경인자는 수체유시간, 평균 수심, 영양염류와 유기물, 오염물질 부하율, 기타 수리수문학적 특징 등이 있다. 국내 대부분의 호수가 오염부하량이 매우 큰 인공호로서, 자연호에 비하여 시공간적인 수질변동의 역동성이 크고 수리수문학적 요인들이 큰 변이를 보이는 것으로 알려져 있다(Thornton, 1990; Wetzel, 1990; Jones *et al.*, 1997). 특히 우리나라의 하절기 문순 경우는 호소의 수질 변이에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며(안과 신, 2005), 문순강우로 인한 호수의 수위 및 유량뿐 아니라 유기물과 영양염 유입 등 전반적인 이화학적 수질 상태변화에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있어 수질관리에 더욱 어려움이 있다(An and Park, 2003).

일반적으로 북미와 유럽의 일부 담수 생태계 내에서 질소(N)에 의한 제한 영양염(Limiting factor)을 보일뿐, 대부분 인(P)에 의한 제한 영양염으로 나타나고 있다. 또한 수체내 총질소와 총인의 상대비율(TN:TP ratio)의 분석으로부터 조류의 생물량과 조류종의 천이를 예측하거나, 제한 영양염을 나타내는 간접적인 지표로 활용되고 있다(Smith, 1983). 이들의 제한 변이폭은 10~17로 제시되고 있다(Forsberg and Ryding, 1980). 현존하는 국내 호소의 대부분의 N:P비는 17 이상으로 인 제한 특성을 나타내는 경우가 많으나, 일부에서는 10~17의 변이폭을 보이고 있어 이들 호소의 제한 영양염은 계절에 따른 변이가

나타날 가능성이 존재하고 있다.

본 연구의 목적은 국내 대표적인 인공호인 대청호에서 조류성장의 제한 영양염을 분석하고, 이를 통해 향후 인공호에서의 체계적인 수질관리를 위한 기초자료를 제시하는 데 있다.

## 재료 및 방법

### 1. 대상 호소 특성

대청호는 충북 청원군 현도면과 대전 대덕구 사이의 금강 본류를 가로지르는 댐으로서, 1975년에 착공하여 1980년 12월에 완공 되었다. 대전을 비롯하여 충청 및 전북의 용수 공급, 하류의 홍수 조절, 수력발전생산 등을 담당하고 있으며, 대청호의 수리수문학적 특징은 다음과 같다(Table 1). 한편 충청북도 청원군 문의면에 위치한 대청댐 앞 지점에서 영양염 첨가 실험을 위한 채수를 실시하였다.

### 2. 영양염 첨가 실험

#### 1) 실험실 내 제한 영양염 실험

대청댐 앞 지점에서 채수한 샘플(84 L)을 이용하여, 실험실 내에서 1개의 대조군(Control)과 6개의 처리군(Treatment, T1, T2, T3, T4, T5, T6)에 동일한 영양염류가 혼합되도록 섞은 후 Cubitainer에 각각 6L씩 나누어 분배하

**Table 1.** Limnological characteristics of Daechung Reservoir.

Item	Value
Watershed area (km <sup>2</sup> )	4,134
Water surface area (km <sup>2</sup> )	72.8
Total strage (10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> )	1,490
Mean depth (m)	20
Normal water level (EL.m)	76.5
Annual mean precipitation (mm)	1,401

**Table 2.** Control and treatment with nutrient spike of each test tank for the Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs).

Test condition	Volume of test tank	Nutrient spiked	Concentration spiked	Incubated Temp.
Control (C)	6 L	-	-	20 ± 1°C
Treatment (T1)	6 L	P	10 µg L <sup>-1</sup> as KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	20 ± 1°C
Treatment (T2)	6 L	2P	20 µg L <sup>-1</sup> as KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	20 ± 1°C
Treatment (T3)	6 L	4P	40 µg L <sup>-1</sup> as KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub>	20 ± 1°C
Treatment (T4)	6 L	NO <sub>3</sub>	1.5 mg L <sup>-1</sup> as KNO <sub>3</sub>	20 ± 1°C
Treatment (T5)	6 L	2NO <sub>3</sub>	3.0 mg L <sup>-1</sup> as KNO <sub>3</sub>	20 ± 1°C
Treatment (T6)	6 L	P+NO <sub>3</sub>	10 µg L <sup>-1</sup> as KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> , 1.5 mg L <sup>-1</sup> as KNO <sub>3</sub>	20 ± 1°C

였다. 대조군은 현장에서 채수한 원수를 그대로 사용하였으며, 처리군 1(T1)에는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 첨가하였고, 처리군 2(T2)에는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $20 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 첨가하였고, 처리군 3(T3)에는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $40 \mu\text{g L}^{-1}$ 을 첨가하여, 인(P)의 농도가 각각 P, 2P, 4P가 되도록 하였다. 또한 처리군 4(T4)에는  $\text{KNO}_3$   $1.5 \text{mg L}^{-1}$ 을 첨가하였고, 처리군 5(T5)에는  $\text{KNO}_3$   $3.0 \text{mg L}^{-1}$ 을 첨가하여, 질소(N)의 농도가 각각 N, 2N이 되도록 하였다. 마지막으로 6(T6)에는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $10 \mu\text{g L}^{-1}$ 와  $\text{KNO}_3$   $1.5 \text{mg L}^{-1}$ 을 첨가하여,  $\text{P}+\text{NO}_3\text{-N}$ 가 되도록 하였다(Table 2). 실험 과정 중 생길 수 있는 오차를 줄이기 위해 대조군을 비롯한 각각의 처리군은 Duplication으로 이루어졌다. 자연수를 첨가한 대형수조에 각각의 Cubitainer를 수표면에 위치하게 고정 후 수온을  $20 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 온도로 유지시켰다. 광조건은 인위적인 조작없이 실제 현장의 조건과 동일하도록 인공광은 배제하고 자연광만을 유지하도록 하였다. 제한 영양염 분석을 위해 각각의 Cubitainer에서 실험시작 3일째까지는 매일 측정하였으며, 이후에는 격일로 채수하였다. 샘플 채수시간은 매일 오전 10시에 실시하였다.

## 2) 현장적용 제한 영양염 실험

제한 영양염 평가 실험은 우리나라의 문순 강우에 의한 영향이 끝난 2009년 9월 22일부터 29일까지 대청호 댐앞지점에서 실시하였다. 실험방법과 영양염 첨가 농도는 실험실 내에서 이루어진 것과 동일하게 이루어졌으며, 다만 채수를 실험전 1회, 일주일 지난후 1회, 총 2회에 걸쳐서 실시하였다.

## 3. 제한 영양염 실험 분석

본 연구에서 제한 영양염 실험(Nutrient Stimulation Bioassay)을 위해 엽록소-a(Chlorophyll-a), 총질소(Total nitrogen, TN), 총인(Total phosphorus)를 분석하였다. 각 Cubitainer에서 채수된 샘플은 Glass Filter(Whatman GF/C) glass microfiber filter)를 이용하여 여과하여 바로 Chl-a 농도를 분석하였으며, 분석법은 에탄올 추출법(Sartory and Grobbelaar, 1984)을 이용하였다. 흡광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU 530)에 측정된 Chl-a의 데이터는 회귀식을 이용하여 실제 Chl-a 농도를 계산하였으며, 추정 회귀식은 아래와 같다.

$$\text{Chl-a } (\mu\text{g L}^{-1}) = \frac{[13.7(\text{OD}_{649} - \text{OD}_{750}) - 5.76(\text{OD}_{649} - \text{OD}_{750})] V}{V * 10}$$

(OD=Optical density; V=Sample Volume).

엽록소-a를 비롯하여 총질소, 총인은 수질공정시험법에 의하여 분석된 자료로서, 총질소는 흡광광도법, 총인은 아스코르빈산 환원법을 이용하여 분석하였다. 엽록소-a는 각 샘플당 2회 반복 실험하였으며, 총질소와 총인은 3회 반복 실험을 통하여 오차를 줄였다. 한편 총질소와 총인의 상대비율(TN:TP ratio)은 1993년부터 2008년까지 환경부 수질 측정망(<http://water.nier.go.kr/>) 자료를 활용하여 측정된 총질소와 총인의 질량값(Mass ratio)을 동일한 단위 값으로 환산하여 두 영양염 간의 비율로 산정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 실험실 내 제한 영양염 평가

실험실 내에서 이루어진 실험에서 시간이 지남에 따라 대조군(Control)의 Chl-a는 초기농도  $5.9 \mu\text{g L}^{-1}$ 에서  $6.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 거의변화가 없었던 반면 영양염을 첨가해준 6개의 처리군에서는 Chl-a 농도가 점차 증가하는 양상을 보였다(Fig. 1). 특히 인(P)을 첨가한 처리군 T1, T2, T3에서 뚜렷히 증가하는 경향을 보였는데, 처리군 3에서 6일째 되던 날 Chl-a의 농도가 최대  $33.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 까지 나타났다. 이는 인이 첨가된 처리군에서 식물플랑크톤의 농도의 급격한 증가가 이루어졌으나 질소가 첨가된 처리군에서는 크게 영향을 미치지 않았음을 나타내는 것이었으며, 일반적으로 호소의 제한 영양염이 인 제한효과가 나타난다는(김과 황, 2004) 이전 연구결과와 일치하였다.

총질소의 분석에 따르면 실험 이틀날까지 모든 처리군에서 증가하는 경향을 보였다. 현장 원수에 비해 질소를 2배 더 첨가해준 처리군 5(T5)에서는 초기 농도에 비해 약 5배 이상 증가하였다(Fig. 1). 하지만 동일한 기간에 Chl-a 농도의 변화는 나타나지 않아 질소에 의한 영양염 변이는 나타나지 않았다. 이는 대청호 내 질소가 인에 비해 충분히 공급되고 있는 것으로 사료된다.

총인의 분석에 따르면 처리군 3(T3)과 처리군 4(T4)에서 다른 처리군들에 비해 월등히 상승하는 경향을 보였는데, 실험 이틀째  $81.2 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 최대치를 나타냈다(Fig. 1). 이후 점차 감소하는 추세를 보였는데, 이는 실험 기간동안 충분한 일조량을 확보해주었으므로 식물플랑크톤의 성장원으로 인이 이용되었음을 나타내는 결과이다. 같은 기간 내 Chl-a 분석결과에 따르면 첨가된 인이 1차 생산력으로 환원됨에 따라 Chl-a 농도가 증가하였다.

### 2. 현장적용 제한 영양염 평가

현장에서 이루어진 제한 영양염 평가 결과 실험실 내에

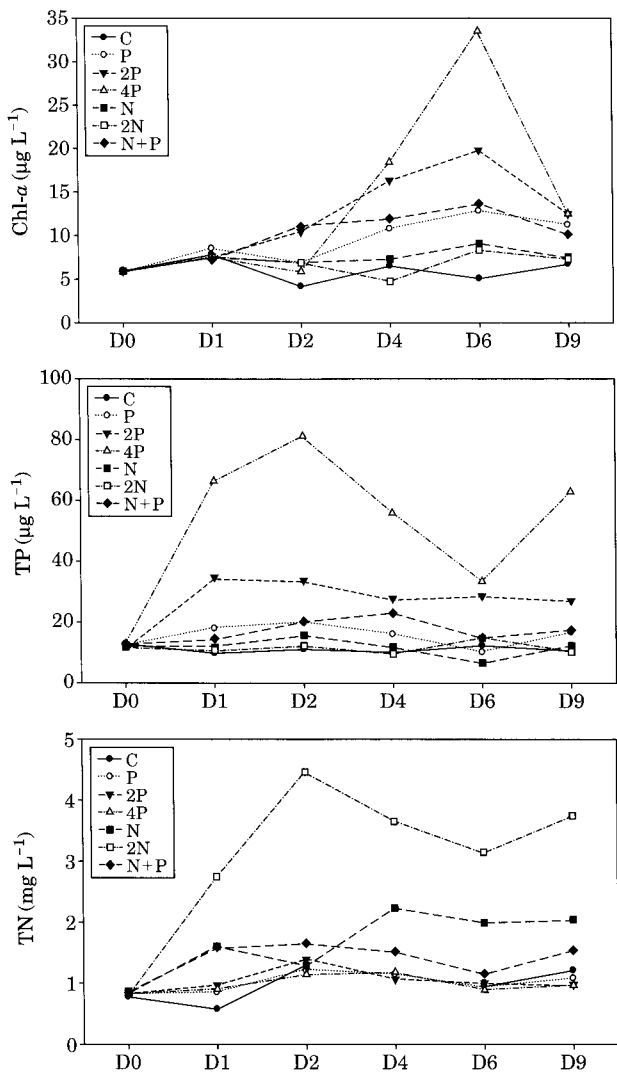


Fig. 1. Variations of chl-a and nutrients along with Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs).

서 이루어진 것과 유사한 결과를 보였다. 질소를 첨가해 준 처리군 4(T4)와 처리군 5(T5)에 비하여 인을 첨가한 처리군 T1, T2, T3에서 실험전 초기 농도에 비해 실험 종료 후 최종 농도가 뚜렷히 증가한 것으로 나타났으며, 특히 첨가한 인의 양을 원수에 비해 2배(2P) 4배(4P) 증가시킬수록 식물플랑크톤의 최종농도는 각각  $27.7 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $32.7 \mu\text{g L}^{-1}$ 로 더욱 증가하는 경향을 보였다(Fig. 2). 또한 현장에서 실시한 실험결과가 실험실 내에서 이루어진 것에 비해 2배 정도 높은 Chl-a의 최종 농도를 보였는데, 이는 현장에서 식물플랑크톤 성장에 적합한 온도가 유지 되었으며, 일조량 등 기후환경이 적합하게 이루어진 것으로 사료된다.

총질소와 총인의 분석결과 역시 실험실에서 이루어진

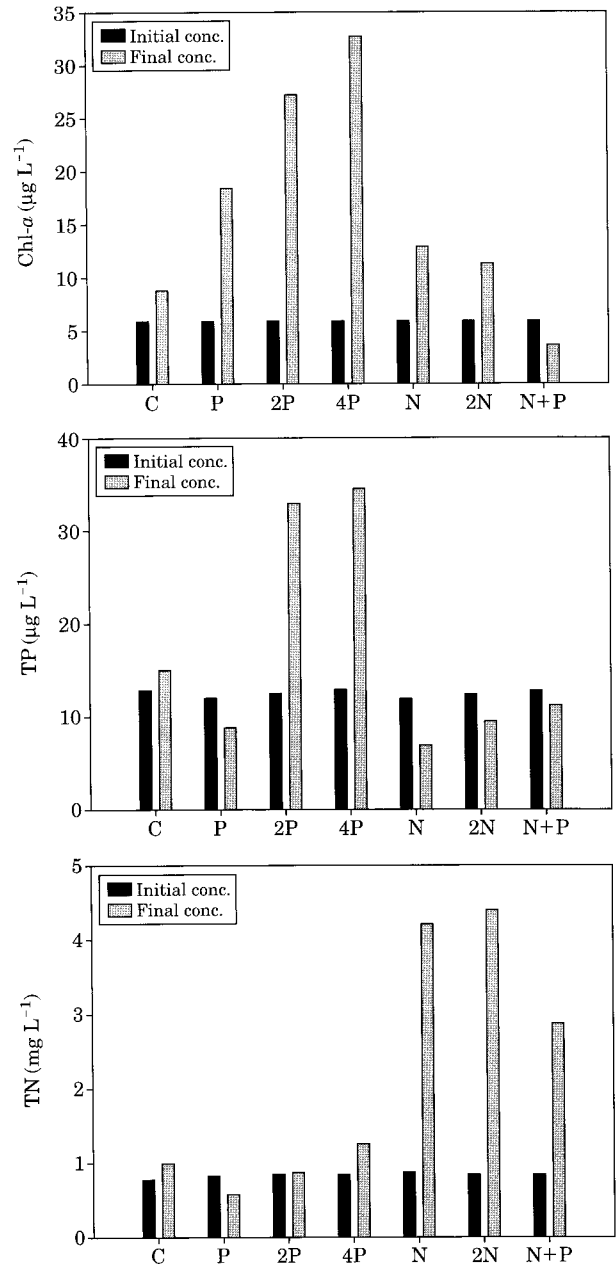


Fig. 2. *In situ* variations of chl-a and nutrients along with Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs).

결과와 동일하게 나타났다. 인을 첨가해준 처리군 2와 처리군 3에서 각각  $32.9 \mu\text{g L}^{-1}$ ,  $34.5 \mu\text{g L}^{-1}$ 으로 최대값을 나타냈으며, 질소를 첨가한 처리군 4와 처리군 5에서 각각  $4.2 \text{mg L}^{-1}$ ,  $4.5 \text{mg L}^{-1}$ 으로 초기 농도에 비해 약 5배 증가한 것으로 나타났다(Fig. 2). 같은 기간에 인이 처리된 실험구에는 식물플랑크톤 성장이 대조구를 비롯하여 다른 처리군들에 비하여 월등히 높게 나타났다. 한편 질소와 인을 모두 첨가한 곳에서는 식물플랑크톤의 성장률

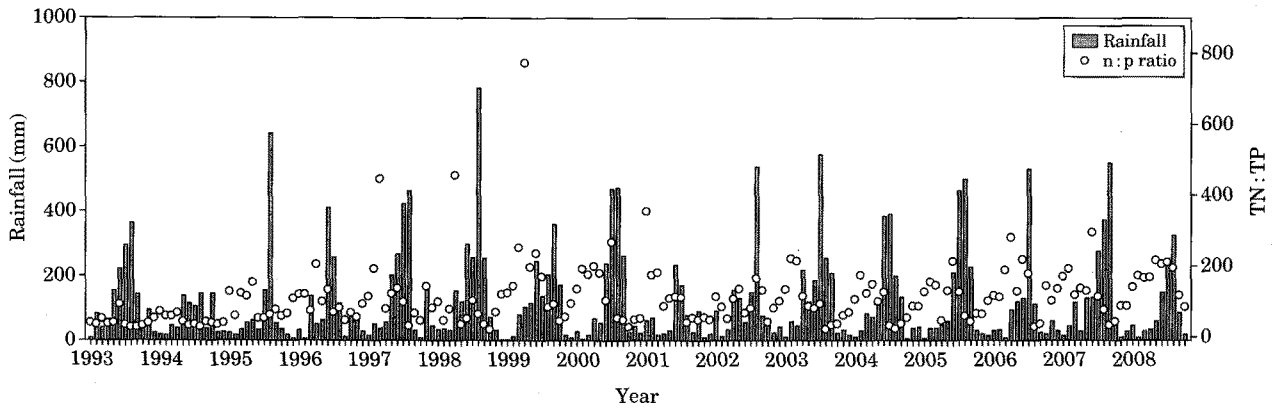


Fig. 3. Pattern analysis of n : p variance with precipitation in the long term monitoring.

과 큰 차이가 없었다(Fig. 2). 이는 단순히 수체 내 영양염 농도에 의해 예측되기 보다는 식물플랑크톤의 생리적 특성도 고려될 필요성이 제기된다. 영양염 첨가에 따른 조류 성장 반응은 세포내 영양염 농도와 직접적 관계를 가지고 있으며, 또한 세포내 영양염 농도는 종마다 특이성을 가진다(Fuhs, 1969; Davis, 1970; Rhee, 1973).

현장연구에서 남조류 발생이나 잠재적인 제한 영양염에 대한 평가는 대부분 총질소와 총인의 상대비율(TN:TP ratio)을 기준으로 설명되고 있다(Forsberg and Ryding, 1980; Smith, 1983). 지난 15년간 장기간 측정된 수질 자료에 의하면 대청댐앞 지점에서 계절에 따른 평균 총질소와 총인의 상대비율의 변이가 크게 나타났다(Fig. 3). 특히 하절기 장마에 의한 영향을 받는 8월부터 수체가 안정되는 11월까지의 총질소와 총인의 상대비율이 평균 70 미만으로 나타나 전체 평균인 106.8보다 훨씬 낮게 나타났다. 이는 우리나라 몬순 강우기 동안 질소의 농도는 큰 변화가 나타나지 않았으나 인의 유입량이 급격히 증가로 인한 것으로 사료된다. 본 연구가 총질소와 총인의 상대비율이 낮은 시기인 9월에 실시 되었음에도 불구하고 여전히 인에 의해 영양염 제한이 나타난 것을 볼 때, 대청호에서 계절적 변이와 상관없이 대부분의 시기에 인 제한 영향을 미쳤을 것으로 유추해 볼 수 있다. 그러나 영양염 제한에 대한 시간적, 공간적 변이를 지속적으로 평가하여 이들 간의 역동성에 관하여 분석하여 체계적인 호소관리가 필요한 것으로 판단되었다.

## 적 요

본 연구는 국내 대표적 인공호수인 대청호에서의 식물

플랑크톤의 1차 생산력을 알아보기 위하여 실험실과 현장에서 영양염 첨가 실험을 실시하였다. 실험을 위한 샘플을 2009년 9월 대청댐 앞 정수대 지점에서 채수 하였으며, 채수한 샘플은 Cubitainer에 6L씩 분배하였다. 대조군은(Control) 영양염 첨가 없이 원수 그대로 사용하였으며 6개의 처리군(Treatment)에는  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ 와  $\text{KNO}_3$ 을 이용하여 P, 2P, 4P,  $2\text{NO}_3\text{-N}$ ,  $2\text{NO}_3\text{-N}$  그리고 질소와 인은 동시에 첨가한 P+ $\text{NO}_3\text{-N}$ 의 농도로 영양염을 첨가하였다. 엽록소-a(Chlorophyll-a)와 총질소(TN), 총인(TP)의 농도 변화를 매일 동일한 시간에 분석을 실시하였다. 단기 영양염 실험에서 인을 첨가해준 실험군은 대조군이나 질소를 첨가해준 처리군에 비해 식물플랑크톤의 성장이 뚜렷이 나타났으며, 이들 간의 높은 유의 수준을 보였다( $p < 0.05$ ). 또한 가장 높은 인의 농도를 첨가한 4P 처리군에서 P, 2P 처리군보다 높은 조류 성장률을 보였다. 반면 질소를 첨가한 처리군에서는 조류성장과 유의성을 보이지 않았다( $p > 0.20$ ). 영양염 첨가 실험결과 일반적으로 담수 생태계가 인에 의해 제한 된다는 다른 연구결과들과 일치하는 것으로 나타났다. 한편 인과 질소를 동시에 첨가한 처리군에서 가장 낮은 조류 성장률을 보였는데, 이는 제한 영양염이 인에 의해 작용 하더라도 질소와 함께 첨가될 경우 조류 성장 억제 될 수 있는 것으로 사료된다. 과거 장기간 측정된 대청댐의 상대비율(TN:TP ratio)에 따르면 전체의 95% 이상이 17을 월등히 상회하는 값을 보여(Forsberg and Ryding, 1980), 총인과 총질소의 상대 비에 의해서도 인에 의한 제한 영양염 효과가 나타났다. 결과적으로 대청호의 정수대 부근에서 용존인이 일정량 이상 충분히 유지될 경우, 용존인은 식물플랑크톤의 생산력과 강한 양의 상관관계를 보이는 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 국가장기생태 연구의 일환으로 수행되었음.

## 인 용 문 헌

- 김종구, 오승철. 2007. 군산지역 저수지의 수질특성 및 부영양화 평가. *한국환경과학회지* **16**(3): 357-367.
- 김호섭, 황순진. 2004. 부영양 저수지에서 식물플랑크톤 성장에 대한 제한영양염과 질소/인 비의 영향. *한국육수학회지* **37**(1): 36-46.
- 안광국, 신인철. 2005. 산간 계류성 하천의 계절적 수질변동에 대한 몬순강우의 영향. *한국육수학회지* **38**(1): 54-62.
- 이은형, 서동일, 황현동, 윤진혁, 최재훈. 2006. 도시 하천에서의 어류 폐사 원인 분석. *대한상하수도학회* **20**(4): 573-584.
- 허진, 신재기, 박성원. 2006. 하천 및 호소 수질관리를 위한 용존 자연유기물질 형광특성 분석. *대한환경공학회지* **28**: 940-948.
- An, K.G. and S.S. Park. 2003. Influence of seasonal monsoon on the trophic state deviation in an asian reservoir. *Water, Air, and Soil Pollution* **145**: 267-287.
- Carlson, R.E. 1976. A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography* **22**: 361-369.
- Carpenter, S.R., J.J. Cole, J.F. Kitchell and M.L. Pace. 1998. Impact of dissolved organic carbon, phosphorus and grazing on phytoplankton biomass and production in experimental lakes. *Limnology and Oceanography* **43**: 73-80.
- Davis, A.G. 1970. Iron, chelation and the growth of marine phytoplankton. 1. Growth kinetics and chlorophyll production in cultures of the euryhaline flagellate *Dunalliella tertiolecta* under iron-limiting conditions. *J. Mar. Biol. Assoc. U.K.* **50**: 65-86.
- Forsberg, O. and S.O. Ryding. 1980. Eutrophication parameter and trophic state indices in 30 Swedish wastewater-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.
- Fuhs, G.W. 1969. Phosphorus content and rate of growth in the diatom *Cyclotella nana* and *Thalassiosira fluviatilis*. *J. Phycol.* **5**: 305-321.
- Jones, J.R., M.F. Knowlton and K.-G. An. 1997. Developing a paradigm to study and model the eutrophication process in Korean reservoirs. *Korean Journal of Limnology Special Issue* **30**: 463-471.
- Rhee, G.Y. 1973. A continuous culture study of phosphate uptake, growth rate and polyphosphate in *Scenedesmus* sp. *J. Phycol.* **9**: 495-506.
- Sartory, D.P. and J.U. Grobbelaar. 1984. Extraction of chlorophyll-*a* from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia* **114**: 177.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Sci.* **221**: 669-671.
- Thornton, K.W. 1990. Perspectives on reservoir limnology. p. 1-4. *In: Reservoir Limnology: ecological perspectives* (Thornton, K.W. et al., eds.). John Wiley & Sons, New York.
- Wetzel, R.G. 1990. Reservoir ecosystems: conclusions and speculations. p. 227-238. *In: Reservoir Limnology: Ecological perspectives* (Thornton, K.W. et al., eds.). John Wiley & Sons, New York.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology*, 3rd eds. Academic Press, pp 239-288.

(Manuscript received 2 January 2010,  
Revision accepted 1 March 2010)