Korean J. Limnol. 41 (Special issue) : 35~41 (2008)

신구저수지 식물플랑크톤성장에 대한 제한 영양염 분석

이재연 · 이상재 · 이재훈 · 배대열 · 최지웅 · 황순진[1] · 안광국*

(충남대학교 생명과학부, [1]건국대학교 환경과학과)

Analysis of Algal Response Effects Using Nutrient Enrichment Bioassays in Shingu Reservoir. ***Lee, Jae-Yon, Sang-Jae Lee, Jae-Hoon Lee, Dae-Yeul Bae, Ji-Woong Choi, Soon-Jin Hwang[1] and Kwang-Guk An* (School of Bioscience and Biotechnology, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea; [1]Department of Environmental Sicence, Konkuk University, Seoul 143-701, Korea)***

Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs) were conducted in the laboratory during June 22~28, 2006 in order to determine primary limiting factor on the phytoplankton growth. For the NEBs, the water was sampled using a 10 L polyethylene-lined container and dispensed into 2.5 L container in the laboratory. The algal growths response in the control (C) and three treatments of phosphorus (P), 2-fold phosphorus (2P), and nitrate nitrogen (NO_3-N) were monitored during 7 days. In the cubitainers which were spiked as P (T1) and 2P (T2) Chl-*a* concentrations were decreased during the test period and the final concentrations was low than initial values. However, Chl-*a* in the cubitainers which were spiked as NO_3 (T3) and P+NO_3 (T4) showed significant increases compared to the initial values, indicating that in the short-term experiments, nitrogen seemed to be a primary limiting nutrient during the periods of NEBs experiment. Long-term ambient nutrient data of TP and TN, and TN : TP mass ratios, however, showed a potential phosphorus limitation on phytoplankton growth and previous other researchers showed a variations of limiting nutrients by nitrogen or phosphorus depending on the seasons sampled and locations. In this study nitrogen as primary limiting nutrient in the NEBs seem to be an seasonal effect rather than the consistent nitrogen limitation.

Key words : nutrient limitation, algal response, bioassay, water quality

서 론

현재 우리나라의 대부분의 저수지는 부영양 상태를 보이고 있으며, 이들 저수지는 부영양화에 따른 1차 생산력의 증가로 인하여 매년 수화현상(algal bloom)이 반복적으로 나타나고 있다(이 등, 2003; 이 등, 2007). 특히 농업용 저수지는 일반적인 담수호와는 달리 구조적인 폐쇄성을 보이고 있어 정체현상이 뚜렷하며, 수체 내 포함되어 있는 영양염이 저수지 외부로의 방출에 있어 자유롭지 못한 현상을 나타내고 있다(환경부, 2006; 김 등, 2007). 따라서 외부기원 영양염과 내부기원 영양염이 저수지내 지속적으로 축적되는 현상을 보이고 있으며, 이들에 의한 식물성플랑크톤과 남조류의 급격한 성장으로 여름철 상시적인 수화현상이 나타나고 있다(최와 김, 2002; 농업기반공사, 2005). 특히 남조류는 독성물질을 포함하고 있어 이들이 일으키는 수화현상으로 수생태계 내에 존재하는 생물뿐 아니라, 저수지의 수변구역에 접촉이 가능한 육상

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

생물에게까지 심각한 위험을 초래할 수 있기 때문에(김 등, 1995; 국립환경연구원, 1999) 남조류를 포함하는 조류의 천이와 연계하여 저수지의 영양염분포 및 제한영양염을 밝히는 것은 과도한 1차 생산력 증가의 원인을 규명하고, 부영양화 상태를 조절하기 위하여 중요한 일이다.

식물성플랑크톤의 성장은 주로 저수지에 포함되어 있는 총질소와 총인의 상대비율(TN : TP ratio)에 따라 변이를 나타내고, 이들의 제한 변이폭은 10~17로 제시되고 있다(Forsberg and Ryding, 1980). 현재 농업용 저수지의 대부분의 N:P비는 17 이상으로 인 제한 특성을 나타내는 경우가 많으나(이 등, 2007), 일부 저수지에서는 10~17의 범위를 보이고 있어 이들 저수지의 제한영양염은 계절에 따른 변이가 나타날 가능성이 존재하고 있다. 한편 수체 내 질소와 인이 조류의 성장요구치 이상으로 과도 유입될 경우, 제한영양염에 대한 성장반응은 N:P비에 따라 조절되지 않을 수도 있다고 보고된 바 있다(Pearl *et al.*, 2001).

따라서 농업용 저수지의 부영양화 상태와 수질 개선을 위해서는 우선적으로 해당 저수지의 제한영양염을 규명하는 것이 필요하다. 본 연구의 목적은 신구저수지의 조류성장의 제한영양염을 분석하고, 이를 통해 저수지의 수질개선을 위한 기초자료를 제시하는데 있다.

재료 및 방법

1. 신구저수지 개황

신구저수지는 충청남도 서천군에 위치하고 있는 소규모 농업용 저수지로서, 수표면적은 0.1 km^2, 저수량은 3.88×10^5 톤(김 등, 2004)이며, 평균 수심은 4 m로 비교적 얕은 저수지로 분류된다(Hwang *et al.*, 2003). 저수지의 경계에는 농경지가 존재하며, 이곳으로부터 영양염이 직 · 간접적으로 유입되고 있어 수체의 영양염 농도증가에 큰 영향을 끼치고 있는 것으로 나타나고 있다.

2. 영양염 첨가실험 (Nutrient Enrichment Bioassay)

제한 영양염류 평가실험은 2006년 6월 22일부터 28일까지 총 7일간 실시하였다. 평가를 위한 물은 저수지 중앙부에서 총 10 L를 채수하였으며(Fig. 1), 실험실로 이동한 후 1개의 대조군(Control)과 4개의 처리군(Treatment, T1, T2, T3, T4)에 같은 영양염류(Nutrient) 농도가 혼합 되도록 섞은 후 Cubitainer에 각각 2.5 L씩 나누어

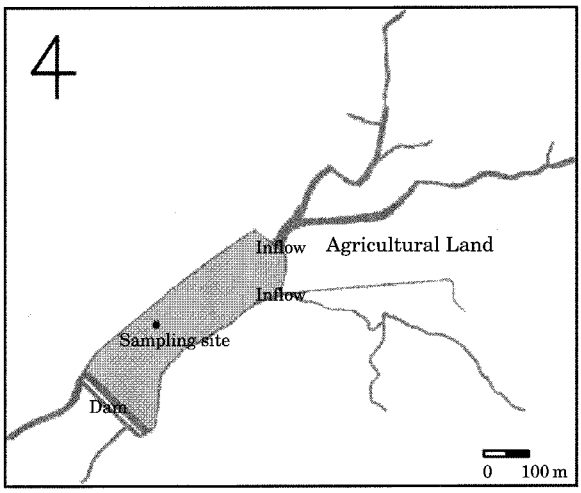

Fig. 1. A map showing the study site.

Table 1. Add Nutrient and spike concentration of each test tank for the Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs). 2P indicates two-fold spiking of the ambient phosphorus concentration.

Test condition	Volume of test tank	Nutrient spiked	Concentration spiked	Incubated temp.
Control (C)	2.5 L	-	-	20±1°C
Treatment (T1)	2.5 L	P	100 μg L^{-1} as KH_2PO_4	20±1°C
Treatment (T2)	2.5 L	2P	200 μg L^{-1} as KH_2PO_4	20±1°C
Treatment (T3)	2.5 L	NO_3	2.592 mg L^{-1} as KNO_3	20±1°C
Treatment (T4)	2.5 L	P+NO_3	100 μg L^{-1} as KH_2PO_4, 2.592 mg L^{-1} as KNO_3	20±1°C

분배하였다. 대조군은 원수를 그대로 사용하였으며, 처리군 1(T1)에는 KH_2PO_4 100 μg L^{-1}을 첨가하였고, 처리군 2(T2)에는 KH_2PO_4 200 μg L^{-1}을 첨가하여 각각 P, 2P가 되도록 하였다. 또한 처리군 3(T3)에는 KNO_3. 2.592 mg L^{-1}를 첨가하여 NO_3-N가 되도록 하였으며, 처리군 4(T4)에는 KH_2PO_4 100 μg L^{-1}과 KNO_3. 2.592 mg L^{-1}을 첨가하여 P+NO_3-N가 되도록 하였다(Table 1). 각 Cubitainer는 대형수조에 자연수를 첨가하여 그 안에 앵커를 달아 수표면에 위치하게 하여, 실외에서 20±1°C의 온도로 나타났다. 광조건은 인위적인 조작없이 실제 저수지에서의 조건과 동일하도록 인공광은 배제하고 자연광만을

유지하도록 하였다. 제한 영양염 분석을 위해 각각의 Cubitainer에서 100 mL씩 세 개의 샘플을 격일로 오전 10시에 채수하였으며, 영양염을 분석하기 위하여 각 샘플의 식물성플랑크톤(Chl-*a*)의 양을 측정하여 농도변화를 관찰하였다.

3. Chl-*a* 농도측정

각 Cubitaner에서 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-*a*의 데이터는 회귀식을 이용하여 실제 Chl-*a* 농도를 계산하였으며, 추정 회귀식은 아래와 같다.

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

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

4. 화학 분석

본 연구에서 영양염류 제한 실험 (Nutrient Stimulation Bioassay) 분석을 위해 총질소 (Total nitrogen, TN), 총인 (Total phosphrous, TP), 엽록소-*a* (Chlorophyll-*a*, Chl-*a*)는 APHA (1985)의 방법에 의거하여 측정하였다. 또한, 2002~2005년까지 한국농촌공사에서 측정한 총질소, 총인 및 엽록소-*a*는 수질오염공정시험법에 의하여 분석된 자료로서, TN은 흡광광도법, TP는 아스코르빈산 환원법, Chl-*a*은 흡광광도법 (Spectrophotometry)을 이용하여 분석하였다. 상기 분석법의 방법은 정확도에서 약간의 차이가 있지만, 기본 분석 방법은 동일하여 농도 자료의 비교 평가시에는 방법상 거의 차이가 없는 것으로 사료되었다. 한편, TN : TP비는 측정된 총질소와 총인의 질량값 (Mass ratio)을 동단위의 값으로 환산하여 두 영양염간의 비율로 산정하였다.

결과 및 고찰

1. 영영염류의 계절변이

2002년부터 2005년까지 측정된 신구저수지의 영양염 변이에 따르면 (농업기반공사, 2002~2005), 총인 (TP)과 총질소 (TN)의 값은 매우 높게 나타나고 있었다. 총인의

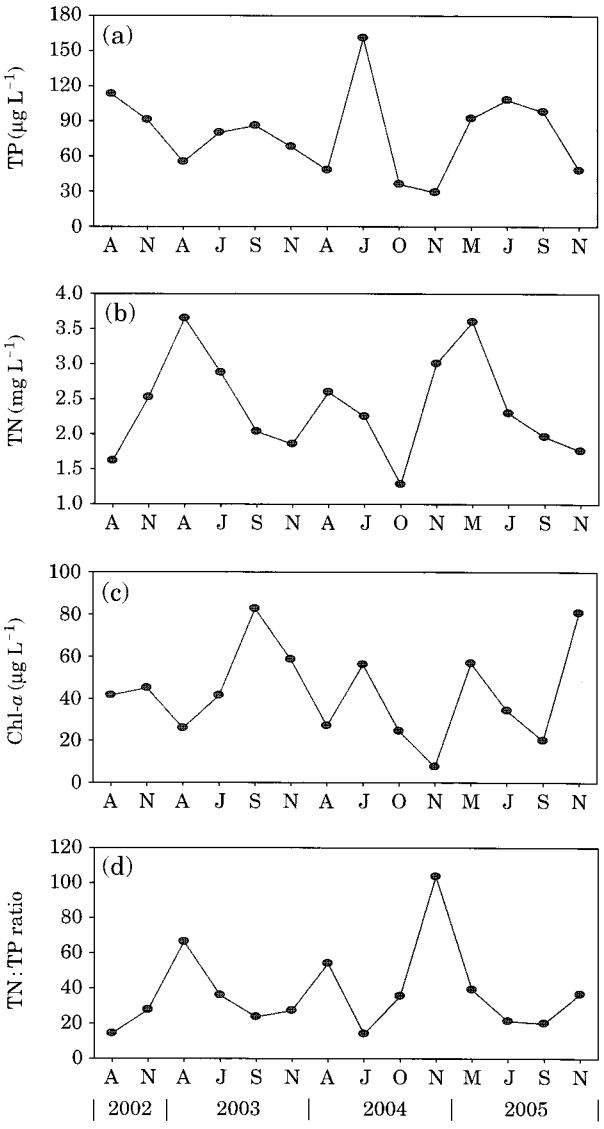

Fig. 2. Long-term seasonal variations of nutrients (TN, TP), chlorophyll-*a* (Chl-*a*), and TN : TP mass ratios during 2002~2005. In 2002-A (Aug), N (Nov), In 2003 and 2004-A (Apr), J (Jun), S (Sep), N (Nov), In 2005-M (Mar), J (Jun), O (Oct), N (Nov).

평균은 79.5 μg L^{-1}였으며, 최소 29 μg L^{-1}에서 최대 161 μg L^{-1}까지 농도변이를 보였다. 총인은 계절에 따른 변이가 크게 나타나고 있었으며, 2004년의 경우 다른 해에 비해 각 계절에 따른 변이차가 매우 크게 나타나고 있었다. 2004년 6월은 전 기간동안 가장 높은 161 μg L^{-1}로 나타난 반면, 11월은 가장 낮은 29 μg L^{-1}로 나타나 약 5배 이상의 차이를 보였다. 총인은 계절에 따른 농도차이를 보였으며, 특히 여름철이 시작되는 6월경부터 9월사

이에 가장 높은 농도를 나타내었다(Fig. 2a). 총인은 조사 기간 동안 높은 농도를 지속적으로 유지하였으며, 부영양 상태로 나타났다(Forsberg *et al.*, 1980).

총질소는 2004년 10월을 제외하고 나머지 기간 동안 1.5 mg L^{-1} 이상의 고농도를 지속적으로 유지하였으며, 총인과 마찬가지로 부영양상태로 나타나고 있었다. 총질소의 평균농도는 2.4 mg L^{-1}이었고, 계절별 변이차는 총인보다 크게 나타났으며, 조사기간 중 변이폭은 최소 1.3 mg L^{-1}에서 최대 3.6 mg L^{-1}로 나타났다. 총질소의 경우 총인과는 달리 봄에 가장 높은 농도를 유지하고 있었으며, 여름에는 농도값이 감소하는 것으로 나타났다(Fig. 2b).

Chl-*a* 변이는 계절별로 매우 큰 변이를 나타내고 있었고, 주로 여름철에 급격한 증가를 보이고 있었으며, 평균농도는 43 μg L^{-1}로 나타났다. 2003년과 2004년에는 여름철에 가장 높은 농도를 유지하였으나, 2005년 9월에는 총인의 높은 농도에도 불구하고 2005년 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 조사기간 동안 Chl-*a* 계절별 변이는 총인의 계절별 변이와는 다른 양상으로 나타났으며, 오히려 총질소와 비슷한 양상을 보이고 있었다(Fig. 2c).

2002년에서 2005년 사이 신구저수지내 TN : TP비는 모두 17 이상(평균 37)으로 나타났으며, 이에 따라 인이 제한영양염으로 작용할 것으로 사료되었다(Fig. 2d). 조사 기간중 2004년 11월에는 급격한 증가를 나타내었는데, 이 기간 동안 Chl-*a* 농도는 전 기간 중 가장 낮은 농도를 나타내었다. 이는 질소의 양의 급격한 유입에도 불구하고 인이 현저히 낮은 농도를 유지하여 1차 생산력의 감소로 나타난 결과로 볼 수 있다. 이전에 수행된 제한영양염 평가연구에 따르면, 신구저수지의 식물성플랑크톤은 인에 의한 제한이 되는 것으로 나타났으며, 인 첨가시 식물성플랑크톤의 성장률이 계절적인 변이를 나타내고, 또한 질소의 양과 인의 양을 동시에 증가시켜 첨가하였을 때, 질소에 의한 제한효과는 나타나지 않는 것으로 보고된 바 있다(김과 황, 2004).

한편 식물성플랑크톤 농도와 총질소, 총인, TN : TP비의 회귀분석을 실시한 결과, 총질소와 Chl-*a* 사이의 R^2은 0.042로 나타났으며, 유의성은 0.482으로 나타나 두 변수 사이에 상관성은 없는 것으로 나타나, 총질소는 1차 생산력 증가에 제한요소로 크게 작용하지 않는 것으로 나타났다(Fig. 3a). 총인과 식물성플랑크톤은 R^2이 0.281로 총질소에 비해 높게 나타났으며, 유의값은 0.051로 높은 상관도를 나타내었다(Fig. 3b). 또한 TN : TP비와의 비교적 높은 역상관관계를 보임으로써(Fig. 3c), 신구저수지에서 1차 생산력은 대체로 인에 의하여 영향을 받고 있는 것으로 추정되었다.

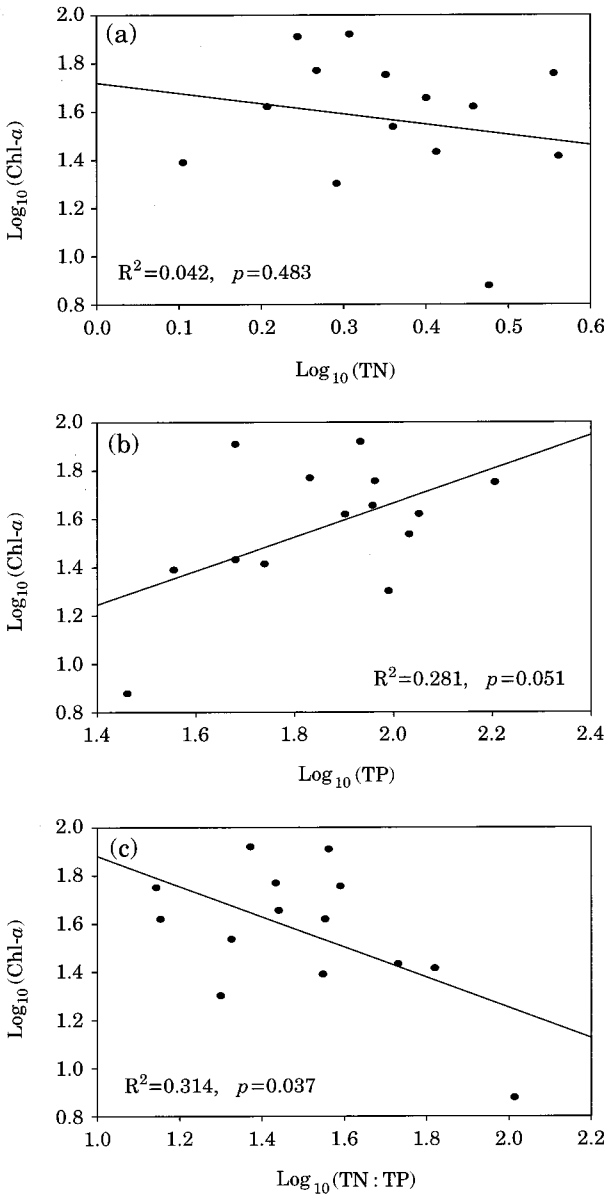

Fig. 3. Empirical models of Log_{10} (TN)-Log (Chl), Log_{10} (TP)-Log_{10} (Chl), and Log_{10} (TN : TP)-Log_{10} (Chl). All the data were log-transformed.

2. 제한 영양염류 (Limiting Nutrient) 평가

각 일자별 대조군의 Chl-*a* 농도변화에 따른 각 처리군 (Treatment) 농도 변화비는 전반적으로 시간의 흐름에 따라 감소하는 경향을 보였다(Fig. 4). 특히, T3와 T4의 경우 실험초기에는 대조군과의 비율은 거의 1로 나타나고 있었으나, 2일째부터 급격한 비율감소를 나타내었으

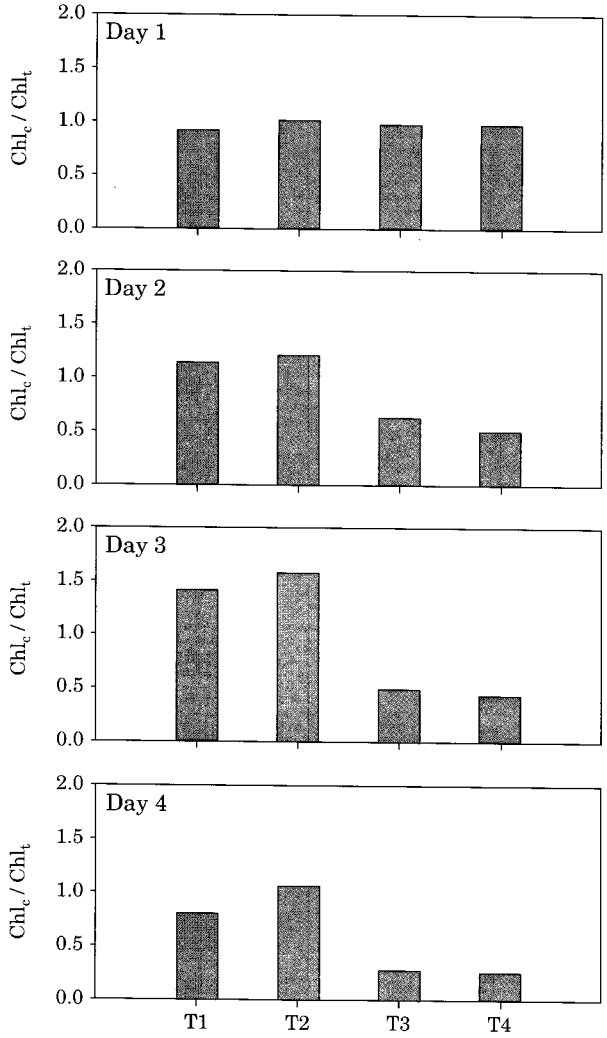

Fig. 4. Experimental results for Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs) in the four different treatments. Daily algal was expressed as Chl_c/Chl_t in each treatment during the test period (Chl_c: concentration of control; Chl_t: concentration of each treatment).

며 실험 마지막 날에는 약 0.25의 비율로 나타났다. 그러나 T1과 T2는 초기비율과 마지막 날의 비율에 큰 차이를 보이지 않았으며, 오히려 실험 중간 시기에는 대조군에 비해 높은 비율을 나타내기도 하였다. 이는 질소가 첨가된 처리군에서 식물성플랑크톤의 농도의 급격한 증가가 이루어졌으나 인이 첨가된 처리군에서는 별 영향을 미치지 않았음을 나타내는 것이었으며, 일반적으로 인 제한효과가 나타나는 것과는 달리 질소에 의한 제한효과가 크게 작용하는 것으로 사료되는 결과였다.

한편, T1과 T2에서 각각의 Chl-*a* 농도는 초기농도

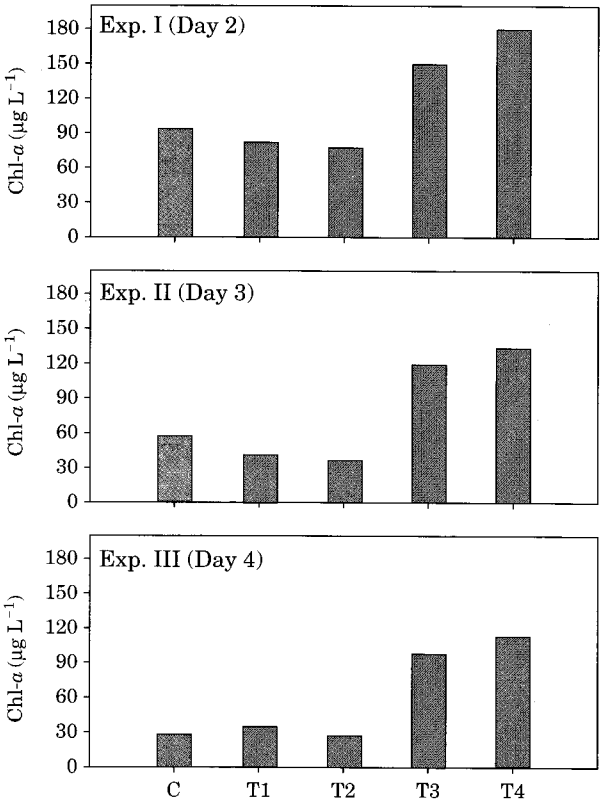

Fig. 5. Algal response, expressed as Chl-*a* concentration, in the control and four treatments in the Exp I (Day 2), Exp II (Day 3), and Exp. (Day 4).

42.7 μg L^{-1}와 38.6 μg L^{-1}에서 실험종료 시에 34.6 μg L^{-1}와 26.3 μg L^{-1}으로 감소하였다(Fig. 5). T1과 T2의 식물성플랑크톤의 농도는 일자가 지남에 따라 점차 감소양상을 나타내었으며, 실험기간동안의 농도변이는 대조군(Control)에 비하여서도 낮은 값을 지속적으로 나타내고 있었다. 이는 실험기간동안 충분한 일조량을 확보해 주었음에도 불구하고, 식물성플랑크톤의 성장원으로서 인이 이용되지 않았음을 나타내는 결과였다. 이에 반하여, 질소가 첨가된 T3와 T4는 Chl-*a* 농도의 뚜렷한 증가를 나타냈으며, 각각의 농도는 40 μg L^{-1}와 39.7 μg L^{-1}에서 98.4 μg L^{-1}와 112.8 μg L^{-1}으로 약 2~3배 증가한 것으로 나타났다. 최초 질소가 첨가된 날에는 149.2 μg L^{-1}와 180.5 μg L^{-1}까지 증가하였으며, 이후 첨가된 질소가 1차 생산력으로 환원됨으로써 점차적으로 Chl-*a*의 농도는 감소하였다. 본 실험기간 동안에는 질소에 의한 제한효과가 뚜렷하게 나옴으로써 기존 저수지에서의 1차 생산력에 대한 인 제한효과와는 상반된 결과로 나타났다. 이전 연구결과에서 대조군에 비하여 질소가 처리된 곳에서 성장

률이 높게 나와 인과 질소 모두 제한요소로 작용하는 실험결과가 도출되기도 하였으나(김과 황, 2004), 본 연구 결과처럼 인이 처리된 곳에서 대조군에 비해 성장률이 낮고, 질소가 처리된 곳에서 가장 높은 성장률은 보인 경우는 나타나지 않았다. 이전 연구에서 가장 높은 성장률을 보인 것은 인 혹은 인과 질소가 동시에 처리된 곳에서만 나타났으며, 질소가 단독으로 처리된 곳에서의 높은 성장률은 나타나지 않았다. 신구저수지는 계절에 따른 TN : TP비의 변이가 크게 나타나고 있는데, 2004년의 6월의 경우 TN : TP비는 17 이하로 나타났으며(Fig. 2), 인의 농도는 2002년에서 2005년 중 가장 높게 나타나고 있었으나, 질소의 농도는 상대적으로 낮은 농도로 나타나고 있었다. 이 시기의 1차 생산력의 변화에 대한 평가가 실시되지 않아, 무엇이 제한영양염으로 작용하였는지 알 수 없으나, 17 이하의 TN : TP비를 감안하였을 때, 이 당시에도 질소에 의한 제한이 일어났으리라 유추해 볼 수 있다. 따라서 본 실험을 위한 채수가 실시된 시기와 같은 TN : TP비를 형성하여 제한영양염 평가실험 시 질소제한의 결과를 나타내는데 영향을 미쳤을 것으로 사료되었다. 그러나 이 부분에 대해서는 향후 계절에 따른 제한영양염 평가실험을 지속적으로 실시하여 실제 신구저수지에서 질소에 의한 제한효과가 계절주기에 따라 나타나는지 확인할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

적 요

본 연구는 2006년 6월 22일부터 28일까지 식물성 플랑크톤의 1차 생산력을 알아보기 위하여 영양염 첨가 실험을 실시하였다. 평가를 위한 샘플은 저수지 중앙부에서 총 10 L를 채수하였으며, Cubitainer에 각각 2.5 L씩 분배하였다. 대조군은 원수를 그대로 사용하였으며, 처리군 1에는 KH_2PO_4을 첨가하였고, 처리군 2에는 2배 더 많은 KH_2PO_4을 첨가하여 각각 P, 2P가 되도록 하였다. 또한 처리군 3에는 KNO_3를 첨가하여 NO_3-N가 되도록 하였으며, 처리군 4에는 KH_2PO_4와 KNO_3을 첨가하여 P+NO_3-N가 되도록 하여 7일 동안 변화를 관찰하였다. P (T1)와 2P (T2)가 처리된 Cubitainer의 엽록소-*a* 농도는 실험기간 동안 점점 감소하였고, 초기의 농도에 비하여 훨씬 낮은 수치를 보였다. 그러나, NO_3 (T3)와 P+NO_3 (T4)가 처리된 Cubitainer의 경우, 초기의 엽록소-*a* 농도에 비하여 뚜렷하게 증가하는 것으로 나타났다. 단기 실험의 경우 질소가 일차적인 제한요인으로 작용한 것으로 사료되었다. 장기간에 걸친 TP, TN, TN : TP mass ratios의 자료에 따르면, 인이 식물 플랑크톤의 성장에 제한요인으로 작용하였고, 채집된 시기와 장소에 따라 제한염류가 변하는 것으로 연구되어 졌다. 본 연구에서 질소는 1차 제한영양염류로 작용하였고 계절적인 영향에 의한 것으로 사료되었다.

사 사

본 연구는 농림부 핵심 전략 연구과제 "생물조절(먹이연쇄)을 통한 농업용저수지 수질관리 기법개발"(306009-03-2-CG000)에 의해 수행되었음.

인 용 문 헌

국립환경연구원. 1999. 호소내 조류 대 발생에 대한 수면제어 기술에 관한연구(II). 팔당호 수역을 중심으로 한 제어기술의 개발.

김범철, 김은경, 표동진, 박호동, 허우명. 1995. 국내 호수에서의 남조류 독소발생. 한국물환경학회지 **11**(3): 231-237.

김범철, 사승환, 김문숙, 이윤경, 김재구. 2007. 국내 호수의 제한영양소와 하수처리장 방류수 인 기준 강화의 필요성. 한국물환경학회지 **23**(4) : 512-517.

김호섭, 황순진. 2004. 얕은 부영양 저수지의 육수학적 특성-계절에 따른 수질변화. 육수지 **37**(2): 180-192.

농업기반공사. 2002~2005. 농업용수 수질측정망 조사 보고서.

농업기반공사. 2005. 효율적인 농업용 저수지 용수확보 및 이용방안 연구. 농어촌연구원.

이재수, 김영철, 황길순. 2003. 장마 전, 후의 농업용 저수지 퇴적물의 변화분석. 대한토목학회 **23**(4): 359-368.

이재연, 이재훈, 신경훈, 황순진, 안광국. 2007. 우리나라 농업용 저수지의 영양상태 및 수질특성. 육수지 **40**(2): 223-233.

최광현, 황순진, 김호섭, 한명수. 2003. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화. 육수지 **36**(2): 139-149.

최선화, 김호일. 2002. 우리나라 수자원과 농업용수 수질오염 실태. 농어촌과 환경 **12**(1): 93-103.

환경부. 2006. 환경백서.

APHA. 1985. Standard methods for the examination of water and waste water. 16th ed. New York, American Public Health Association. pp. 1067-1072.

Forsberg, O. and S.-O. Ryding. 1980. Entrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waster-eceiving lakes. *Arch. Hydrobiol.* **89**: 189-207.

Hwang, S.J., C.G. Yoon and S.K. Kweon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. Paddy & Envi-

ronment 1: 43-52.

Ministry of Environment. 2001. A study on development of lake environment survey method in Korea, Seoul, p. 31.

Paerl, H.W., R.S. Fulton, P.H. Moisander and J. Dyble. 2001. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *The Scientific World Journal* 1: 76-113.

Sartory, D.P. and J.U. Grobbllaar. 1984. Extraction of chlorophyll-*a* from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia* **114**: 177

Vollenweider, R.A. 1968. Scientific fundamentals of the eutrophication of lake and flowing waters, with particular reference to nitrogen and phosphotus as factors in eutrophication. Thechnical Report DAS/CSI/68.27. Organization for Economic Co-operation and Development, Paris, France.

(Manuscript received 31 December 2007,
Revision accepted 4 February 2008)