

## N:P Ratio 조절에 의한 단기 영양염 첨가 바이오에세이 (NEBs) 및 1차 생산력 (엽록소-*a*)의 반응성 테스트

정 다 빈 · 안 광 국\*

충남대학교 생명과학과

### Short-term Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs) by Manipulation of TN:TP Ratios and the Response of Primary Productivity (as Chlorophyll-*a*)

Da-Bin Jeong and Kwang-Guk An\*

Department of Biological Science, College of Biological Sciences and Biotechnology,  
Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**Abstract** - The objective of this study was to determine the effects of N:P ratio on primary productivity measured as chlorophyll-*a* (CHL) using the approach of *In Situ* Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs) in Daechung Reservoir. The effects of NEBs on the N:P mass ratios were compared with the field data obtained from monthly-chemical monitoring during 2009~2012. The short-term NEBs showed that the response of primary productivity in the phosphorus spiked treatments (5, 15, 20 and 30 N:P ratios) were greater than the responses in the control (C) and nitrogen spiked treatment (N:P ratio=150, T<sub>VI</sub>). The response in the nitrogen treatment (N:P ratio=150, T<sub>VI</sub>) was less compared to control and all five treatments (T<sub>1</sub>~T<sub>VI</sub>). The outcomes of the NEBs suggest that phosphorus limited the phytoplankton growth and nitrogen addition inhibited the algal growth. In the analysis of nutrients and CHL from the ambient epilimnetic water in Daechung Reservoir, minimum N:P ratios resulted in maximum concentrations of CHL. Overall, our results suggest that the N:P ratio was the key factor in regulating the phytoplankton growth in NEB experiments.

**Key words** : N:P ratio, nutrient limitation, algal response, bioassay

## 서 론

우리나라에 분포하고 있는 호수는 대부분이 인공호로서, 특히 대형댐 인공호는 주로 음용수 공급, 하류의 홍수조절, 수력발전 생산 등의 용도로 사용되고 있다. 우리나라 대형 인공호들은 대부분 호수의 중·상류유역에

위치해 있고, 이런 지역에는 주거 및 산업시설 등 인위적인 오염원을 가지고 있어, 빠르게 부영양화 과정을 겪게 된다(MEK 2008). 인공호의 부영양화는 인(P)과 질소(N)와 같은 영양염류 증가를 동반하고, 유기물 함량을 증가시키며 수중산소 고갈과 식물성 플랑크톤 현존량의 증가 및 식물성 플랑크톤의 종조성 변화를 초래한다(Hutchinson 1975). 특히, 우리나라의 대형댐 인공호에서는 하절기에 남조류의 수화현상으로 이취미를 유발하고 호소 표면에 두꺼운 떠 혹은 막을 형성함으로써 심미적

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

불쾌감을 주는 등 수자원 이용에 있어 심각한 문제를 일으킨다(Lee *et al.* 2006; Jeong *et al.* 2011).

이러한 우리나라의 대형댐 인공호는 자연호와는 달리 인위적 과정을 거쳐 형성되었기 때문에 자연호에 비하여 시공간적인 수질변동의 역동성이 크고 수리수문학적 요인들이 큰 변이를 보이며(An 2012), 수체 내 수질 및 생태학적 반응이 크게 다르게 나타난다. 또한, 우리나라는 하절기에 연간 총강우량의 대부분이 집중되는 아시아 몬순 강우의 영향으로 여름철 대형댐 인공호의 수위변동 및 유량변동이 주기적으로 일어나며, 이로 인해 이화학적 수질 특성 및 영양염류 농도 변화와 식물성 플랑크톤(조류, 1차 생산자)의 농도가 직접적으로 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Thornton 1990; An and Kim 2003; Kim and Kim 2004).

전 세계적으로 호수생태계의 가장 큰 관심은 인(P) 혹은 질소(N)의 수체 내 유입에 따른 부영양화 현상으로서 다양한 평가방법을 이용하여 오염현상을 규명하고 있다. 호수 부영양화 평가 방법은 첫째, 정성적 평가방법, 둘째, 정량적 평가방법, 셋째, 부영양화 지수에 의한 평가방법, 넷째로 영양염 첨가실험에 의한 바이오에세이 평가법이 널리 이용되고 있다(MEK 2008). 우리나라에서는 정량평가로서 총인(TP), 총질소(TN), 용존 무기질소(DIN), 엽록소-*a* (CHL), 용존 산소(DO) 등의 수질항목이 가장 빈번하게 이용되고 있다. 그러나 이러한 단일 혹은 복수항목에 의한 평가는 부영양화의 상호기작 분석에 어려움이 있다. 부영양화의 여러 지표들 간의 상관관계를 직접적으로 평가하기 위해 영양염 첨가실험(Nutrient Spiking Experiment) 등이 이용되고 있으나 연구는 극히 미흡한 실정이다(Park and An 2012).

호소에서 식물성 플랑크톤의 번성 및 성장 제한은 질소(N)와 인(P)의 농도에 따라 결정되는 것으로 알려져 있다(Kilham 1976; An and Jones 2000). 담수에서는 인(P)의 용해도가 낮기 때문에 대체로 인과 질소 중에서도 인이 1차 제한영양염이 되고(Shindler *et al.* 1971), 인의 농도가 증가하면 질소가 2차 제한영양염으로 작용한다. 또한, 질소와 인의 상대적 비율인 N:P ratio는 식물성 플랑크톤의 성장과 종조성 변이를 예측하거나 제한영양염을 나타내는 간접적 지표로 활용되고 있다(Smith 1983; Lee 2010). Forsberg and Ryding (1980)은 식물성 플랑크톤 성장에 있어 질소와 인의 제한 변이대를 10~17로 제시하였다. 한편 질소와 인이 식물성 플랑크톤의 요구량 이상으로 과유입되는 경우에는 동일한 N:P ratio라도, 제한영양염에 따라 조절되지 않을 수 있다(Pearl *et al.* 2001). 식물성 플랑크톤의 성장에 필요한 영양염류를 추정하기 위

한 영양염 첨가실험(Nutrient Enrichment Bioassays, NEBs)은 각종 수질변수들의 잠재 영향력을 예측하고 판단하는데 있어 단순 화학적 수질항목 평가보다 유용하다고 제시되었다(Box 1983; Park and An 2012).

본 연구에서는 국내 대형 인공호인 대청호에서 영양염 첨가실험(NEBs)을 실시하여 1차 생산력에 영향을 주는 영양염류와 영양염의 농도비를 분석하고 대청호의 영양염 변이 특성을 분석하여, 이를 통해 인공호의 체계적 수질관리에 기여하고자 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구대상 개황 및 조사지점

본 연구 대상인 대청호는 대전광역시와 충청북도, 청원군·옥천군·보은군에 걸쳐 금강수계의 중류에 위치하는 대형 인공호이다. 영양염 첨가실험(NEBs)을 위해 대청댐 앞 지점에서 채수를 실시하였으며, 자세한 위치는 다음과 같다.

지점: 충청북도 청원군 문의면 청남대 매표소(N 36° 30'28", E 127° 30'05")

### 2. 영양염 첨가실험(Nutrient Enrichment Bioassays, NEBs)

본 연구에서는 대형 인공호인 대청댐 앞 지점에서 채수한 샘플(70 L)은 실험실 내에서 1개의 대조군(Control)과 6개의 처리군(Treatment, T<sub>I</sub>, T<sub>II</sub>, T<sub>III</sub>, T<sub>IV</sub>, T<sub>V</sub>, T<sub>VI</sub>)에 동일한 영양염류가 혼합되도록 섞은 후 Cubitainer에 각각 10L씩 나누어 분배하였다. 대조군은 현장에서 채수한 원수를 그대로 사용하였으며, 처리군 I(T<sub>I</sub>)은 KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 용액을 이용하여 인(P) 농도 0.356 mgL<sup>-1</sup>을 첨가하였고, 처리군 II(T<sub>II</sub>)에는 0.104 mgL<sup>-1</sup>, 처리군 III(T<sub>III</sub>)에는 0.073 mgL<sup>-1</sup>, 처리군 IV(T<sub>IV</sub>)에는 0.042 mgL<sup>-1</sup>, 처리군 V(T<sub>V</sub>)에는 0.002 mgL<sup>-1</sup>을 첨가하여, 처리군 I~처리군 V의 N:P Ratios가 각각 5, 15, 20, 30, 80이 되도록 하였다. 또한 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)에는 KNO<sub>3</sub> 3 mgL<sup>-1</sup>를 첨가하여, N:P ratio가 150이 되도록 질소를 처리하였다(Table 1). 실험 과정 중 생길 수 있는 오차를 줄이기 위해 Cubitainer를 지면에서 일정 거리 떨어지게 위치시켰으며, 광조건은 실제 현장의 조건과 동일하도록 자연광만을 유지하도록 하였다.

제한 영양염에 대한 N:P 조절 실험은 2013년 9~10월 기간 동안 실시하였으며, 매일 각각의 Cubitainer에서 오전 10시에 샘플을 채수하였다. 본 분석에서는 영양염류

**Table 1.** Nutrient spiking of nitrogen (N) and phosphorus (P) and the N:P ratios in the test cubitainers for the experiments of Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs)

Test conditions		N:P ratios spiked	Concentrations spiked	Total concentration in the cubitainers		Relative enrichment of N or P
Control	C	-	-	0.021 mgL <sup>-1</sup>	(P)	-
				1.8 mgL <sup>-1</sup>	(N)	
Treatments	P-Enrichment (as KH <sub>2</sub> PO <sub>4</sub> )	T <sub>I</sub>	5	0.356 mgL <sup>-1</sup>	0.376 mgL <sup>-1</sup>	16P
		T <sub>II</sub>	15	0.104 mgL <sup>-1</sup>	0.125 mgL <sup>-1</sup>	5P
		T <sub>III</sub>	20	0.073 mgL <sup>-1</sup>	0.094 mgL <sup>-1</sup>	4P
		T <sub>IV</sub>	30	0.041 mgL <sup>-1</sup>	0.062 mgL <sup>-1</sup>	3P
		T <sub>V</sub>	80	0.002 mgL <sup>-1</sup>	0.023 mgL <sup>-1</sup>	1P
	N-Enrichment (as KNO <sub>3</sub> )	T <sub>VI</sub>	150	1.3 mgL <sup>-1</sup>	3.1 mgL <sup>-1</sup>	(N)

중 가장 중요한 부영양화 지표인 인(P)에 관계된 분석항목으로 총인(TP)과 질소(N)에 관계된 분석항목으로 총질소(TN)를 분석하였고, 부영양화의 주요 인자인 엽록소-*a*(CHL)를 측정하여 호수의 1차 생산력을 추정하였다.

각 Cubitainer에서 채수된 샘플은 GF/C 필터(Whatman glass microfiber filter)를 이용하여 여과하여 바로 엽록소-*a* 농도를 분석하였으며, 분석법은 에탄올 추출법(Sartory and Grobbelaar 1984)을 이용하였다. 흡광광도계(Spectrophotometer, Beckman DU 530)에 측정된 엽록소-*a*의 데이터는 추정 회귀식을 이용하여 실제 엽록소-*a* 농도를 계산하였다. 총질소(TN)와 총인(TP)은 수질공정시험법에 의거하여, 총질소는 흡광광도법, 총인은 아스코르빈산 환원법을 이용하여 분석하였다. 엽록소-*a*는 각 샘플 당 2회 반복 실험하였으며, 총질소와 총인은 3회 반복실험을 통하여 오차를 줄였다. 총질소와 총인의 상대비율(TN:TP ratio)은 측정된 총질소와 총인의 질량값(Mass ratio)을 동일한 단위 값으로 환산하여 두 영양염 간의 비율로 산정하였다. 추가적으로, 본 실험기간 동안의 기상상태에 따른 1차 생산력의 변이를 분석하기 위해, 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 확보한 대전 지역의 일조시간, 강수량, 일기현상, 운량, 지면온도, 평균온도 자료를 이용하였다(2013. 9. 27~2013. 10. 7).

### 3. 장기간 영양염 변이 특성 분석

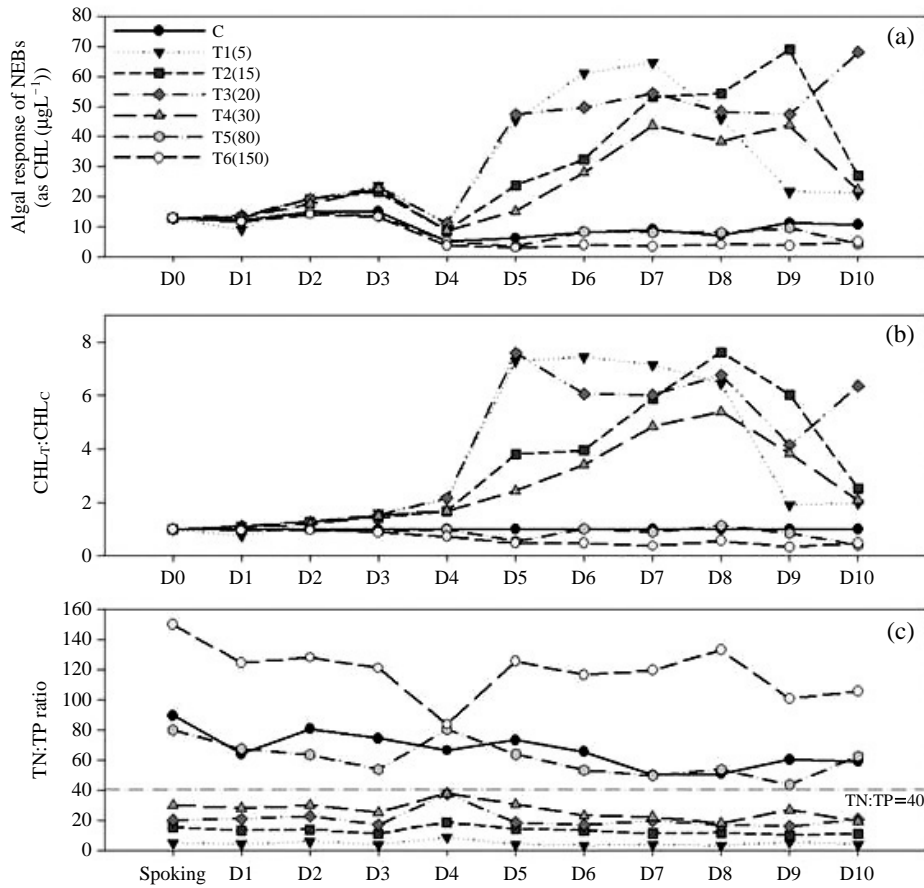
대청호의 영양 상태를 평가하기 위해 이용한 월별 수질자료는 총인(TP), 총질소(TN), 엽록소-*a*(CHL)로서 2009년부터 2012년까지 환경부 수질 측정망 자료를 분석하였다. 엽록소-*a*와 총질소, 총인은 수질공정시험법에 의하여 분석된 자료이며, 총질소와 총인의 상대비율(TN:TP ratio)은 측정된 총질소와 총인의 질량값(Mass ratio)을 동일한 단위 값으로 환산하여 두 영양염 간의 비율로 산정하였다.

## 결과 및 고찰

### 1. 영양염 첨가실험(NEBs) 및 제한 영양염류 분석

본 NEBs 실험에서 시간경과별 N:P ratio의 효과는 대조군(C)을 제외하고 처리군(T<sub>I</sub>~T<sub>IV</sub>)에서 증가하는 양상을 보였다(Fig. 1a). 엽록소-*a* 농도는 처리군 I(T<sub>I</sub>), 처리군 II(T<sub>II</sub>), 처리군 III(T<sub>III</sub>)에서 60 µgL<sup>-1</sup>의 이상의 최대치를, 처리군 IV(T<sub>IV</sub>)에서 43 µgL<sup>-1</sup> 이상의 최대치를 나타냈다. 처리군 I(T<sub>I</sub>), 처리군 II(T<sub>II</sub>), 처리군 III(T<sub>III</sub>)의 엽록소-*a* 농도는 실험 중반에 최대치를 나타내고 감소하는 양상을 보였으며, 실험기간 동안의 농도변이는 대조군에 비해 높은 값을 지속적으로 나타냈다. 처리군 V(T<sub>V</sub>)와 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)은 실험 3일 최대치를 보인 이후 10 µgL<sup>-1</sup> 이하의 농도를 유지하였으며, 실험 마지막 날 4.0 µgL<sup>-1</sup>, 5.7 µgL<sup>-1</sup>로 초기농도보다 감소한 결과를 보였다(Table 2c). 이는 처리군 V(T<sub>V</sub>)와 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)에서는 첨가해 준 인이나 질소가 식물성 플랑크톤의 성장원으로 이용되지 않았음을 알 수 있는 결과였다. 반면 처리군 I(T<sub>I</sub>), 처리군 II(T<sub>II</sub>), 처리군 III(T<sub>III</sub>), 처리군 IV(T<sub>IV</sub>)에서는 엽록소-*a* 농도가 초기 값의 3~5배까지 증가하여, 첨가된 인이 성장원으로 이용되었고 algal peak 이후 첨가된 인이 1차 생산력으로 환원됨으로써 점차 엽록소-*a*의 농도가 감소한 것으로 사료되는 결과를 보였다.

시간경과에 따른 처리군(T<sub>I</sub>~T<sub>IV</sub>)과 대조군(C)의 엽록소-*a* 농도비인 CHL<sub>T</sub>:CHL<sub>C</sub>는 전반적으로 증가하는 양상을 보였다(Fig. 1b). 실험 초기 3일 동안은 모든 처리군이 대조군과의 비율 1.5 이하로, 영양염의 첨가가 식물성 플랑크톤의 성장에 큰 영향을 주지 못하였음을 보여준다. 처리군 I(T<sub>I</sub>), 처리군 II(T<sub>II</sub>), 처리군 III(T<sub>III</sub>)에서는 실험 4일 이후 증가하며 대조군과의 비율 7.6 이상을 나타냈으나, 처리군 V(T<sub>V</sub>)에서는 전반적으로 비율 1에 근사



**Fig. 1.** The response of primary productivity, as chlorophyll-*a* concentration, in relation to the manipulation of TN:TP ratios in Nutrient Enrichment Bioassays (NEBs). Daily algal response was expressed as chlorophyll-*a* concentration (a), and as the ratios of CHL<sub>L</sub>:CHL<sub>C</sub> (b) during the test period (CHL<sub>L</sub>: concentration of each treatments; CHL<sub>C</sub>: concentration of control).

하게 유지되었다. 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)은 실험기간 내내 지속적인 감소를 보이며 비율 1 미만으로 유지되었다. 이는 인이 첨가된 처리군에서는 급격한 식물플랑크톤의 성장이 나타났으나, 질소가 첨가된 처리군에서는 1차 생산력이 대조군에 비해 오히려 저하되었음을 나타내는 결과였다. 이로 보아 대청호에서 채수한 원수에서는 인에 의한 제한효과가 작용하였으며 질소에 의한 제한효과는 없었던 것으로 사료된다.

이전에 수행된 연구 결과 중 인(P)을 첨가한 처리군과 질소를 첨가한 처리군에서 대조군에 비해 높은 성장률을 보이며 인과 질소가 함께 제한영양염으로 작용하는 실험결과가 도출되었으며(Lee and An 2010), 질소가 단독으로 처리된 처리군에서 더 높은 성장률이 나온 결과도 있었으나(Lee *et al.* 2008), 본 실험에서처럼 질소가 첨가된 처리군에서 성장률이 저하되는 결과는 나타나지 않았다. 이는 질소 과다의 직접적 영향이거나 혹은 그로 인

해 극도로 높아진 N:P ratio의 영향일 것으로 보였다. 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)의 총인(TP) 농도는 대조군과 동일하였으나 1차 생산력은 저하되었는데, 이는 동일한 총인 농도에서도 TN:TP ratio에 따라 더 강한 인-제한이 작용될 수 있다는 결과로 사료되었다.

대조군(Control, C)과 모든 처리군(T<sub>I</sub>~T<sub>VI</sub>)에서 N:P ratio는 전반적으로 감소하는 경향을 보였다(Fig. 1c). 대조군(C)는 실험 초기(D<sub>0</sub>) N:P ratio 90에서 D<sub>10</sub>에 60으로 감소하였고, 처리군 V(T<sub>V</sub>)는 D<sub>0</sub>의 Spiking ratio 80에서 D<sub>10</sub>에 60으로, 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)에서는 D<sub>0</sub>의 Spiking ratio 150에서 D<sub>10</sub>에 105로 크게 감소하였다(Fig. 1c).

총질소(TN) 분석결과에 따르면, 질소를 첨가해준 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)을 제외하고는 모든 실험군에서 변동이 크게 나타났으며, 실험 초기 D<sub>0</sub>의 농도는 1.8 mgL<sup>-1</sup>에서 D<sub>10</sub>에는 평균 1.4 mgL<sup>-1</sup>(범위: 1.0~1.6 mgL<sup>-1</sup>)의 농도로 감소하였다(Table 2a). 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)은 3.1 mgL<sup>-1</sup>의 농도

**Table 2.** Raw data analysis of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP) and chlorophyll-*a* (CHL) in the control (C) and treatments of T<sub>I</sub>-T<sub>VI</sub> (a) TN (mgL<sup>-1</sup>)

Dates sampled	Control (C)	N:P Ratios					
		T <sub>I</sub> (N:P=5)	T <sub>II</sub> (N:P=15)	T <sub>III</sub> (N:P=20)	T <sub>IV</sub> (N:P=30)	T <sub>V</sub> (N:P=80)	T <sub>VI</sub> (N:P=150)
D <sub>0</sub>	1.880	1.880	1.880	1.880	1.880	1.880	1.880
D <sub>1</sub>	1.212	1.285	1.344	1.420	1.483	1.608	2.302
D <sub>2</sub>	1.493	1.665	1.346	1.467	1.435	1.330	2.190
D <sub>3</sub>	1.262	1.158	1.129	1.167	1.180	1.125	2.116
D <sub>4</sub>	1.295	2.415	1.776	2.572	1.754	1.848	1.382
D <sub>5</sub>	1.311	1.096	1.328	1.383	1.509	1.550	2.366
D <sub>6</sub>	1.084	1.100	1.150	1.275	1.250	1.273	2.100
D <sub>7</sub>	1.049	1.126	1.092	1.623	1.240	1.208	2.215
D <sub>8</sub>	1.120	1.051	1.209	1.378	1.080	1.405	2.941
D <sub>9</sub>	1.280	1.222	0.993	1.419	1.560	1.470	2.289
D <sub>10</sub>	1.255	1.287	1.087	1.611	1.039	1.419	2.454

(b) TP (mgL<sup>-1</sup>)

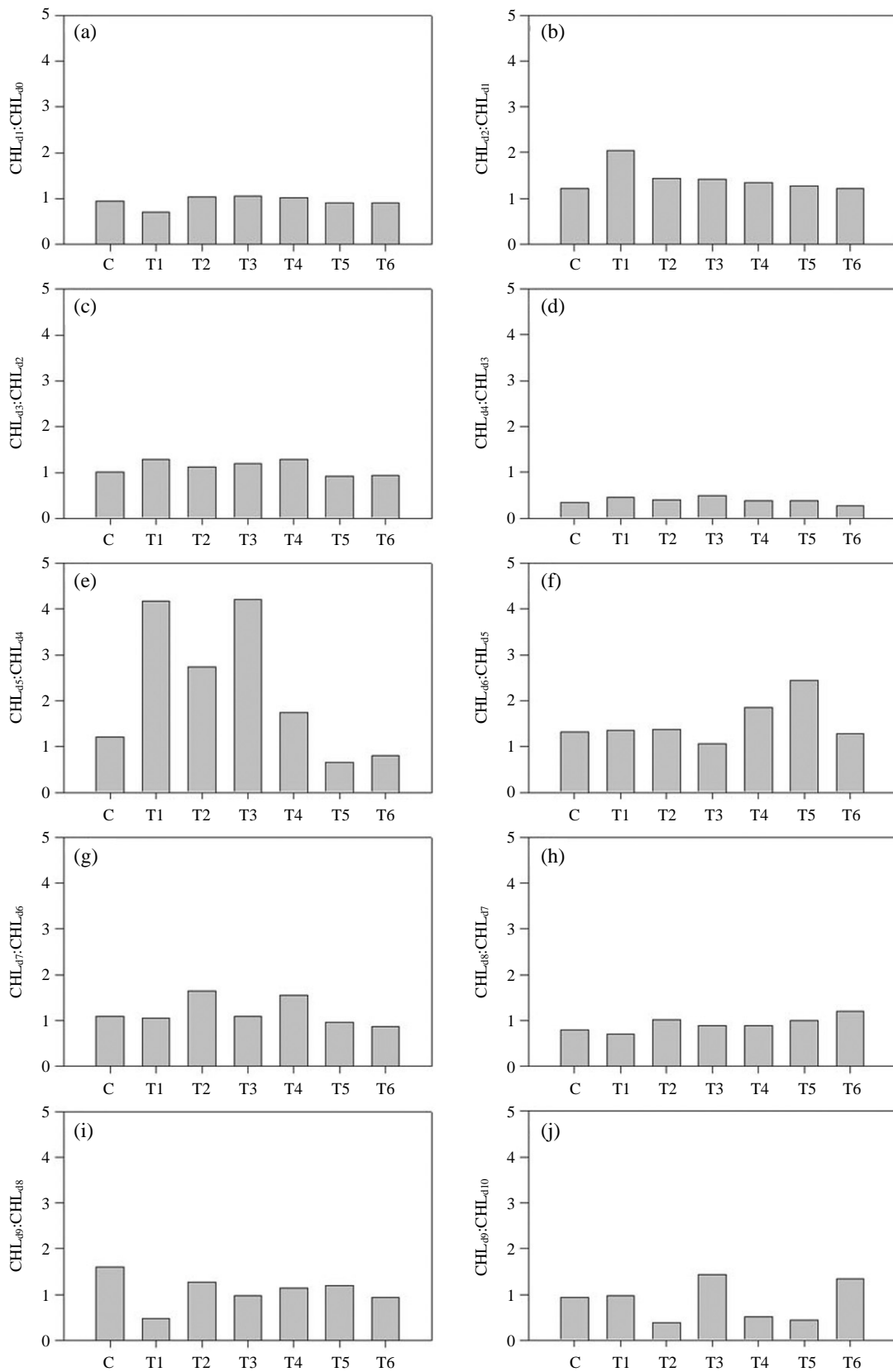
Dates sampled	Control (C)	N:P Ratios					
		T <sub>I</sub> (N:P=5)	T <sub>II</sub> (N:P=15)	T <sub>III</sub> (N:P=20)	T <sub>IV</sub> (N:P=30)	T <sub>V</sub> (N:P=80)	T <sub>VI</sub> (N:P=150)
D <sub>1</sub>	0.018	0.310	0.103	0.068	0.052	0.023	0.018
D <sub>2</sub>	0.018	0.289	0.098	0.064	0.048	0.020	0.017
D <sub>3</sub>	0.017	0.303	0.101	0.069	0.046	0.021	0.017
D <sub>4</sub>	0.019	0.284	0.095	0.068	0.046	0.023	0.016
D <sub>5</sub>	0.017	0.280	0.094	0.075	0.049	0.024	0.018
D <sub>6</sub>	0.016	0.342	0.087	0.076	0.054	0.023	0.018
D <sub>7</sub>	0.021	0.307	0.097	0.082	0.056	0.024	0.018
D <sub>8</sub>	0.022	0.332	0.105	0.083	0.060	0.026	0.022
D <sub>9</sub>	0.021	0.229	0.099	0.088	0.058	0.033	0.022
D <sub>10</sub>	0.021	0.324	0.098	0.078	0.054	0.022	0.023

(c) CHL (μgL<sup>-1</sup>)

Dates sampled	Control (C)	N:P Ratios					
		T <sub>I</sub> (N:P=5)	T <sub>II</sub> (N:P=15)	T <sub>III</sub> (N:P=20)	T <sub>IV</sub> (N:P=30)	T <sub>V</sub> (N:P=80)	T <sub>VI</sub> (N:P=150)
D <sub>1</sub>	12.1	9.0	13.2	13.5	13.0	11.7	11.6
D <sub>2</sub>	14.9	18.4	19.1	19.1	17.6	14.8	14.1
D <sub>3</sub>	15.0	23.8	21.5	22.9	22.6	13.5	13.2
D <sub>4</sub>	5.1	10.9	8.6	11.2	8.7	5.1	3.7
D <sub>5</sub>	6.2	45.4	23.7	47.3	15.1	3.4	2.9
D <sub>6</sub>	8.2	61.1	32.4	49.6	28.0	8.3	3.8
D <sub>7</sub>	9.0	64.5	53.1	54.3	43.6	8.0	3.3
D <sub>8</sub>	7.1	45.9	54.3	48.2	38.4	8.0	4.0
D <sub>9</sub>	11.4	21.6	68.9	47.3	43.7	9.6	3.7
D <sub>10</sub>	10.7	21.1	26.9	68.0	22.2	4.2	5.0

에서 최저 1.4 mgL<sup>-1</sup>로 급감한 뒤 2.9 mgL<sup>-1</sup>로 급증하는 등 큰 변동을 나타냈다. 총인 (TP) 분석 결과에 따르면, 처리군 I (T<sub>I</sub>)에서는 대체로 0.280 mgL<sup>-1</sup>에서 0.320 mgL<sup>-1</sup>의 범위에서 유지되었으나, D<sub>9</sub>에는 급감하였다. 반면 실험 기간 내내 대조군과 다른 처리군들은 모두 spiking 농도와 비슷하게 유지하였다 (Table 2b). 이에 따라 N:P ratio의 전반적인 감소 경향은 총질소의 감소에 의한 것으로 사료된다.

본 NEBs 실험에서 N:P ratio 40 미만을 유지한 처리군들에서는 1차 생산력이 증가하는 경향을 보였으나, N:P ratio 40 이상의 높은 비율을 유지한 처리군들에서는 1차 생산력의 증가가 잘 나타나지 않았다 (Fig. 1). 특히 Fig. 1(b)를 보면, 대조군과는 동일한 P 농도에서 N:P ratio가 높았던 처리군 VI의 1차 생산력이 대조군에 비하여 저하된 결과를 확인할 수 있다. 이는 N:P ratio가 높을수록 1차 생산력이 낮아지는 특성을 보인 것으로 사료된다. 또



**Fig. 2.** The ratios of  $CHL_{n+1}:CHL_n$  in the control (C) and treatments (T<sub>1</sub>-T<sub>6</sub>) during the experiments of NEBs.

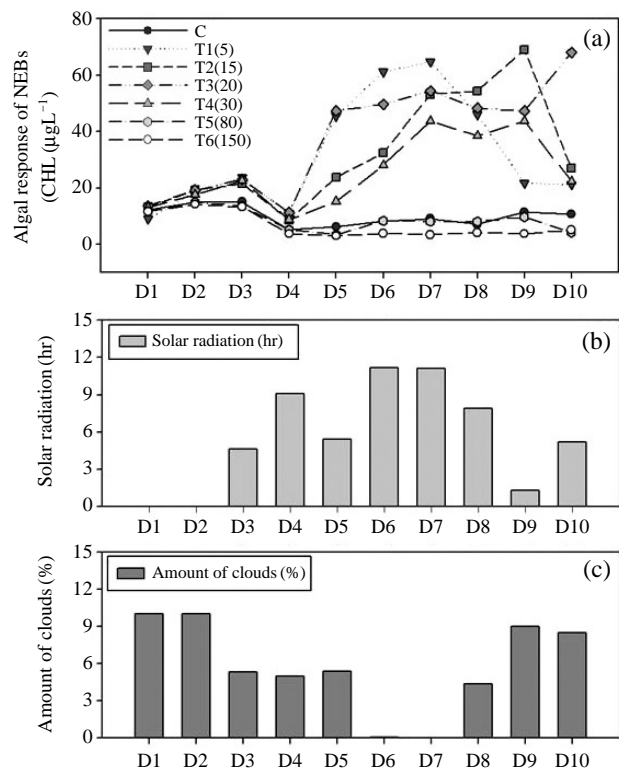
**Table 3.** Solar radiation, precipitation, weather condition, cloud amount, surface air temperature and mean temperature. The data were obtained from Korea Meteorological Administration (KMA)

Experimental dates of NEBs	Solar radiation (hr)	Precipitation (mm)	Weather condition	Cloud amount (%)	Surface air temperature (°C)	Mean temperature (°C)
D <sub>1</sub>	0	0.1*	Rain	10	19.6	17.8
D <sub>2</sub>	0	40.3	Rain, heavy fog	10	19.2	18.8
D <sub>3</sub>	4.6	0.1*	Rain, heavy fog	5.3	24.2	21.1
D <sub>4</sub>	9.1	0		5	26.1	21.8
D <sub>5</sub>	5.4	4	Rain, heavy fog, light fog	5.4	22.1	19.4
D <sub>6</sub>	11.2	0		0.1	20	15.5
D <sub>7</sub>	11.1	0		0	21.9	16.5
D <sub>8</sub>	7.9	0		4.4	22.3	18.9
D <sub>9</sub>	1.3	0.1*	Rain	9	21.7	21.6
D <sub>10</sub>	5.2	0		8.5	26.8	23.9

한, 이전에 수행된 연구 중 높은 질소 농도가 식물성 플랑크톤의 성장에 더 심한 인-제한 작용을 유도한다는 결과가 나타난 바 있어 (Kim *et al.* 2007), 본 실험결과에서 보인 1차 생산력과 N:P ratio 간의 역-상관관계를 뒷받침할 수 있을 것으로 사료된다.

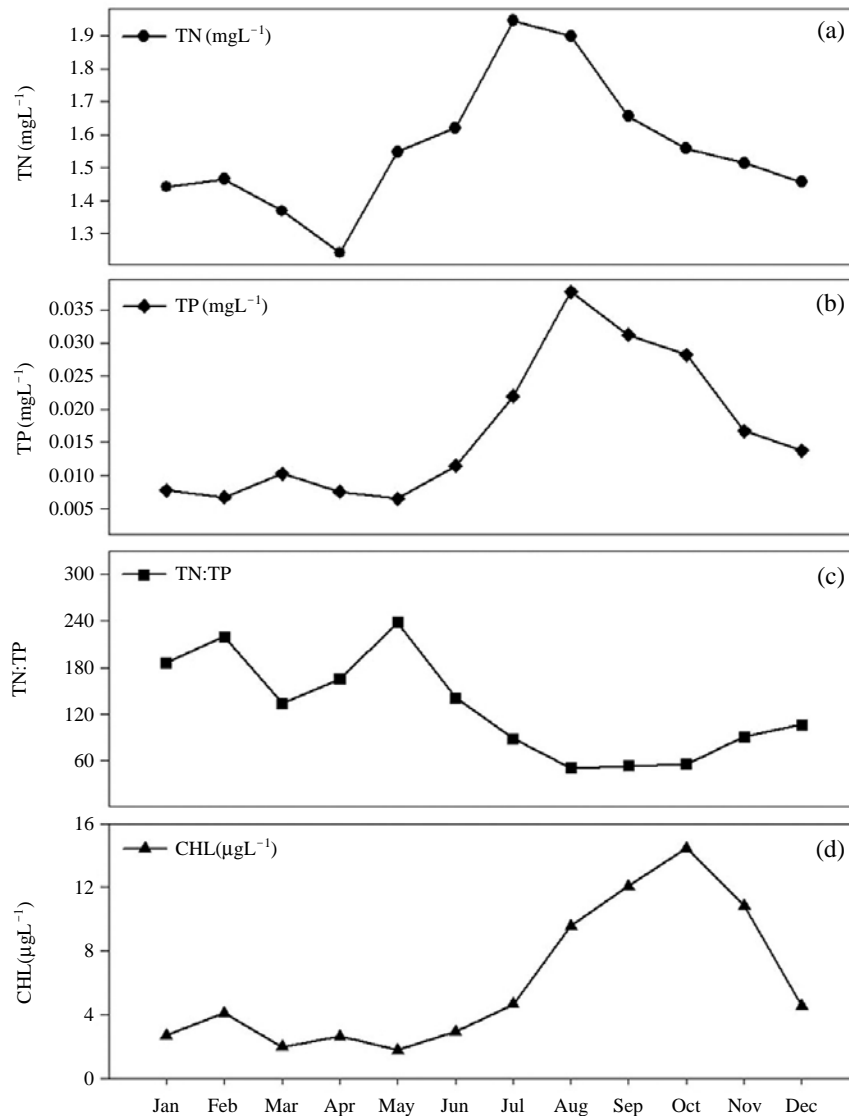
각 일별 엽록소-*a*의 전달대비 농도 분석에 따르면, D<sub>5</sub>에는 처리군 I(T<sub>I</sub>)과 처리군 III(T<sub>III</sub>)에서 비율 4를 상회하는 값을 나타냈고, 처리군 II(T<sub>II</sub>)와 처리군 IV(T<sub>IV</sub>)에서도 비율 1 이상의 값을 보였다(Fig. 2) D<sub>6</sub>~D<sub>7</sub>까지 처리군 I(T<sub>I</sub>), 처리군 II(T<sub>II</sub>), 처리군 III(T<sub>III</sub>), 처리군 IV(T<sub>IV</sub>)는 비율 1 이상으로 엽록소-*a*가 증가하였으나, D<sub>8</sub>부터 평균 0.9의 비율로 성장이 점차 저하되는 추이를 보였다. 대조군과 처리군 V(T<sub>V</sub>)는 실험 기간 동안 평균 비율 1을 유지하였으며, 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)은 평균 0.9의 비율을 보이며 낮은 1차 생산력 반응을 보였다.

NEBs 실험 동안의 일조시간을 살펴보면 D<sub>1</sub>과 D<sub>2</sub>는 일조시간 0 hr, 3일은 4.6 hr로 일조량이 적었고, 4일 9.1 hr로 증가하여 실험 8일까지 전반적으로 높은 일조량이 지속되었다(Table 3). 또한 운량은 실험 1일과 2일 10%에서 실험 6일과 7일 약 0%로 감소하였고, D<sub>9</sub>와 D<sub>10</sub>일에는 약 8%로 증가하였다(Table 3). 같은 기간의 NEBs 실험 결과와 비교분석한 결과, 일조시간이 짧고 운량이 많았던 실험 초반에는 1차 생산력의 성장률이 낮았으며 일조시간이 길고 운량이 적은 실험 중반에는 성장률이 최대치를 이루었다(Fig. 3). NEBs 실험에서 실험 초반에는 일조시간이 적고 강수가 있는 등 식물성 플랑크톤의 성장에 충분한 일조량이 제공되지 않았던 것으로 보이며, 이에 따라 식물성 플랑크톤의 성장이 제한된 것으로 사료된다. 반면 대조군과 처리군 V(T<sub>V</sub>), 처리군 VI(T<sub>VI</sub>)은 일기상태와 관계없이 실험 기간 내내 낮은 성장률을 보였는데, 이는 이들 실험군이 기상상태의 영향보다 N:P ratio의 영향을 더 크게 받았기 때문으로 사료된다.

**Fig. 3.** Daily algal response (as a CHL) of NEBs and the weather conditions during the NEBs tests.

## 2. 대청호에서의 장기간 영양염 변이 특성 분석

2009년부터 2012년까지 측정된 대청댐의 영양염 변이에 따르면, 총질소는 매우 높게, 총인(TP)은 매우 낮게 나타났다. 총질소(TN)의 평균 농도는  $1.6 \text{ mgL}^{-1}$  (범위:  $1.1 \sim 2.6 \text{ mgL}^{-1}$ )로 국내 호소수질기준으로 평가할 때 “매우 나쁨”으로 나타났다, 우리나라 환경부의 N:P ratio 규정에 의거할 때 총질소(TN)의 “매우 나쁨”은 무시해도 될 것으로 분석되었다. 총질소(TN) 농도는 월별변이가 컸



**Fig. 4.** Variations of monthly mean of nutrients (TN, TP), mass TN:TP ratios and chlorophyll-*a* (CHL) in Daechung Reservoir during 2009~2012.

며 대체로 봄철에 낮았고 여름철에 높은 경향을 보였다 (Fig. 4a). 총인 (TP)의 평균 농도는  $0.017 \text{ mgL}^{-1}$  (범위:  $0.005 \sim 0.068 \text{ mgL}^{-1}$ )로 국내 호소수질기준에 따르면 “ 좋음 ”으로 평가된다. 총인은 계절에 따른 변이가 크게 나타났는데, 매년 겨울부터 초여름까지 평균  $0.010 \text{ mgL}^{-1}$  (범위:  $0.005 \sim 0.010 \text{ mgL}^{-1}$ )로 비슷한 농도를 유지하다, 여름철 최고치로 증가하는 추세를 보였다. 매년 7~10월 사이에 그해 최고 농도를 보였고, 특히 2011년 7~8월  $0.060 \text{ mgL}^{-1}$  이상으로 매우 큰 농도를 나타냈다 (Fig. 4b).

조사기간 동안 총질소 (TN)와 총인 (TP)을 월별 강우 자료와 비교하여 변화양상을 분석해보면, 2010년과 2012

년에는 총질소의 최고치가 집중강우보다 먼저 나타났고, 2011년에는 동시에, 2009년에는 집중강우 후에 최고치를 보였다 (Fig. 4a). 이로 보아 총질소의 최고치가 나타나는 시기와 집중강우의 시기가 비슷하게 겹치지만 인과관계는 없는 것으로 사료되었다. 또 총질소의 농도는 집중 강우 후에 감소하는 경향을 보이는데, 이는 집중강우로 인한 수체 내 질소가 희석되었기 때문으로 사료된다.

2009년부터 2012년 사이 대청댐의 TN:TP ratio는 평균 149.9 (범위: 28~342)로 매우 높게 나타났으며, 이에 따라 인이 제한영양소로 작용할 것으로 사료되었다 (Fig. 4c). N:P ratio는 총인의 급증에 따라 대체로 9월 전후로 최저



농도를 보였고(Fig. 4c), 엽록소-*a* 농도는 N:P ratio가 최저치를 보인 이후 최대로 상승하는 경향이 나타났다(Fig. 4d). 또한 2009년부터 2012년, 4년간의 월별 평균 수질데이터를 이용한 회귀분석 결과, 엽록소-*a*에 대한 TP의 설명력( $R^2=0.71$ ,  $p<0.01$ ,  $n=12$ )에 비하여 N:P ratio의 설명력( $R^2=0.75$ ,  $p<0.0001$ ,  $n=12$ )이 더 높은 것으로 나타났다. 이러한 결과들로 볼 때, 엽록소-*a* 농도가 최대치를 보인 시기는 TP의 급증보다 N:P ratio의 최저치가 나타나는 추이에 따르는 것으로 사료된다.

## 적 요

본 연구는 식물성 플랑크톤의 1차 생산력에 대한 N:P ratio의 영향을 분석하기 위해 “영양염 첨가실험(NEBs)”을 실시하였다. 영양염 첨가실험(NEBs)에 의한 N:P Ratio의 영향은 대청호에서 측정된 수질데이터와 비교분석하였다. 단기 영양염 첨가실험 결과, 인(P)을 첨가한 처리군들(N:P Ratio=5, 15, 20, 30)에서의 1차 생산력의 반응이 대조군(Control)과 인(P)을 첨가한 처리군(N:P Ratio=80,  $T_V$ ), 질소(N)를 첨가한 처리군(N:P Ratio=150,  $T_{VI}$ )에서보다 높았다. 또한 질소(N)를 처리한 처리군에서는 대조군과 모든 처리군에서보다 1차 생산력의 반응이 유의하게 작았다. 영양염 첨가실험의 결과, 식물성 플랑크톤의 성장에 인이 제한영양염으로 작용하고 있었으며, 질소첨가(Spiking N)는 식물성 플랑크톤의 성장을 억제하는 것으로 사료된다. 대청호의 영양염 변이 분석 결과, 최소 N:P Ratio에서 엽록소-*a*의 최대농도가 나타났고, N:P Ratio는 식물성 플랑크톤의 성장에 대한 핵심 조절자로 사료되었다. 본 연구결과를 종합해 볼 때, N:P Ratio가 식물성 플랑크톤의 성장을 조절하는 핵심 인자로 작용 할 것으로 사료된다.

## 사 사

본 연구는 환경부 국가장기생태 연구의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## REFERENCES

An KG. 2012. Trophic conditions of man-made reservoirs within Keum-River watershed and geographical dynamics in

- empirical relations of chlorophyll-*a* to some other parameters. Korean J. Limnol. 45:82-92.
- An KG and JR Jones. 2000. Temporal and spatial patterns in ionic salinity and suspended solids in a reservoir influenced by the Asian monsoon. Hydrobiologia 436:179-189.
- Box JD. 1983. Temporal variation in algal bioassays of water from two productive lakes. Archive For Hydrobiologie (Supplement) 67:81-103.
- Forsberg G and SO Ryding. 1980. Eutrophication parameter and trophic state indices in 30 Swedish waste receiving lakes. Arch. Hydrobiol. 89:189-207.
- Hutchinson GE. 1975. A treatise on limnology. Vol. 1, Geography, Physics and Chemistry. John Wiley & Son, INC., New York, pp. 10-15.
- Jeong DH, JJ Lee, KY Kim, DH Lee, SH Hong, JH Yoon, SY Hong and TS Kim. 2011. A study on the management and improvement of alert system according to algal bloom in the Daechong Reservoir. J. Environ. Imp. Assess. 20:915-926.
- Kilham SS. 1976. Dynamics of Lake Michigan natural phytoplankton communities in continuous cultures along a Si:P loading gradient. Canadian J. fisheries aquatic Sci. 43:351-360.
- Kim BC and YH Kim. 2004. Phosphorus cycle in a deep reservoir in Asian monsoon area (Lake Soyang, Korea) and the modeling with a 2-D hydrodynamic water quality model [CE-QUAL-W2]. Korean J. Limnol. 37:205-212.
- Kim HS, SJ Hwang, JK Shin, KG An and CG Yoon. 2007. Effects of limiting nutrients and N:P ratios on the phytoplankton growth in a shallow hypertrophic reservoir. Hydrobiologia 581:255-267.
- Lee EH, DI Seo, HD Hwang, JH Yun and JH Choi. 2006. Causes of fish kill in the urban streams 1- field surveys and laboratory experiments. J. Korean Soc. Water Wastewater. 20: 573-584.
- Lee JY, SJ Lee, JH Lee, DY Bae, JW Choi, SJ Hwang and KG An. 2008. Analysis of algal response effects using nutrient enrichment bioassays in Shingu reservoir. Korean J. Limnol. 41:35-41.
- Lee SH. 2010. Effect of nutrient concentration and stoichiometry on the phytoplankton growth and phosphorus uptake. Unpublished master's thesis, Konkuk University, Seoul.
- Lee SJ and KG An. 2010. Short-term nutrient enrichment bioassays and nutrient limnitation in Daechung Reservoir. Korean J. Limnol. 43:136-141.
- MEK (Ministry of Environment, Korea). 2008. A Development on method of algae removal for water quality improvement bu suing compacted equipment in eutrophic lakes. p.14.
- Park HM and GK An. 2012. Long-term water quality fluctua-

- tions in Daechung Reservoir and the limiting nutrient evaluation using in situ enclosure nutrient enrichment bioassays (NEBs). *J. Korean Soc. Water Environ.* 28:551-560.
- Pearl HW, RS Fulton, PH Moisander and J Dyble. 2001. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. *Scientific World J.* 1:76-113.
- Sartory DP and JU Grobbelaar. 1984. Extraction of Chlorophyll-*a* from freshwater phytoplankton for spectrophotometric analysis. *Hydrobiologia* 114:117.
- Schindler DW, FAJ Armstrong, SK Holmgren and GJ Brunskill. 1971. Eutrophication of Lake 227, experimental lake area, Northwestern Ontario Canada, by addition of phosphate and nitrate. *J Fish Res Board Canada* 28:1763-1782.
- Smith VH. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue algae in lake phytoplankton. *Science* 221:669-671.
- Thornton KW. 1990. Perspectives on reservoir limnology, *Reservoir Limnology : ecological perspectives*, KW Thornton, *et al.* (eds.), John Wiley & Son, INC., New York, pp.1-4.

Received: 31 October 2013

Revised: 19 November 2013

Revision accepted: 19 November 2013