

동북호 식물플랑크톤의 제한 영양염 규명: 장기 자료 분석 및 생물검정조사

정병관 · 신용식* · 장남익¹ · 김상돈¹

(목포해양대학교 해양시스템공학부, ¹국립환경연구원 영산강물환경연구소)

Nutrient Limitation of Phytoplankton in the Dongbok Lake: Analyses of Long-term data and Bioassay Experiments. Jeong, Byongkwan, Yongsik Shin*, Namik Jang¹ and Sangdon Kim¹ (Division of Ocean System Engineering, Mokpo National Maritime University, Mokpo, Chonnam 530-729, Korea; ¹Yeongsan-River Environment Research Laboratory, National Institute of Environmental Research, Kwangju 500-480, Korea)

Nutrient limitation was examined for the Dongbok Lake based on bioassay experiments and analyses of long-term monitoring data. From the results of data analyses, molar ratios of TN/TP and DIN/DIP were higher than 16 : 1 suggesting that phytoplankton growth was potentially limited by phosphorus. Phytoplankton responded to the addition of phosphates in the incubation experiments for all seasons whereas phytoplankton did not respond to other nutrients such as ammonia, nitrate and silicates. Size fraction (net and nano size) of phytoplankton also responded to the addition of phosphorus indicating that phytoplankton growth was limited by phosphorus in the Dongbok Lake. There was also a taxonomic shift from euglenophyceae to bacillariophyceae after addition of phosphate during warm season especially.

Key words : Dongbok lake, Redfield ratio, bioassay experiment

서 론

최근 인구의 급속한 증가와 산업화 및 도시화 등에 따라 급격히 증가하는 용수의 확보와 안정된 공급을 위하여 많은 인공댐들이 건설 되었으며, 이러한 인공댐의 건설로 인한 수 생태계의 환경변화와 주변의 생활하수, 축산폐수 및 공장 폐수 등에 의한 오염 부하량의 증가는 수질의 급격한 악화와 수 생태계의 교란을 초래 할 수 있다(정 등, 1994).

호수 생태계의 영양염은 제한과 증가에 따라 생리학적 수준에서 생체량, 일차생산력, 종조성에 영향을 미치게 된다(Borchardt, 1996). 식물플랑크톤은 빛과 온도가 적절하며 포식압이 낮을 경우 영양염에 의하여 제한되어진

다고 알려져 있다(권 등, 2002). 그 중에서 질소(N)와 인(P)은 식물플랑크톤 성장에 필요한 필수 영양염이며(최 등, 2003) 이들의 농도에 따라서 식물플랑크톤의 변동과 부영양화를 평가하는데 유용하게 작용할 수 있다(영산강물환경 연구소, 2006). 따라서 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염을 추정하고 검증하는 것은 수질을 관리하고, 환경정책을 세우는데 있어 중요한 문제이다. 호소에서 제한 영양염의 원활한 공급은 식물성플랑크톤의 대증식을 유발하고, 이는 수중의 종속영양 소비자들뿐만 아니라 영양물질 분포에 영향을 미친다. 또한 수체에 pH를 증가 시키며, 호소의 유기물 함량을 증가시키고, 수중 산소고갈과 그에 따른 생태계 파괴 및 악취 발생을 일으킨다. 또한 동물과 인체에 유해한 독성물질을 생산하기도 하며, 정수처리 시 응집을 저해하고, 여과지 폐색 등의 정

* Corresponding author: Tel: 061) 240-7312, Fax: 061) 240-7301, E-mail: yongsik@mmu.ac.kr

수처리장애를 유발시켜 국내 용수자원 수질악화의 가장 보편적인 주요 요인으로 등장하고 있다(박 등, 2000). 일반적으로 식물플랑크톤의 제한 영양염은 담수에서는 인, 해수에서는 질소로 알려진 경우가 많으나(Hecky and Kilham, 1988) 제한 영양염은 시·공간에 따라 다르게 나타나고 있다(Fisher *et al.*, 1992; 이 등, 2004). 제한 영양염을 판단하는 방법으로는 DIN/DIP (Redfield, 1958)가 가장 간단하며 보편적으로 이용되고 있으나 용존 영양염류의 농도가 낮은 경우 측정 오차로 인해 잘못된 해석을 할 수 있으며(이 등, 2001) 동일한 N/P라 하더라도 절대 농도가 높을 경우에는 제한 영양염을 판단하기 어렵다. 제한 영양염을 판단하는 방법으로는 실험실 또는 현장에서 식물플랑크톤을 증식 시키면서 질소, 인의 농도가 영에 도달하는지를 조사하는 mesocosm 실험이 있는데 이는 낮은 농도에서 영양염을 정확히 측정 할 수 있어야 하며, 영양염 전환 시간(nutrient turnover time), 알칼리 포스파타아제 활성도(alkaline phosphatase activity) 실험은 일부 이용되고 있으나 보편적인 방법이라고 보기는 어렵다(이 등, 2001). 현장의 식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험(algal bioassay)은 현장 조건을 잘 반영 할 수 있으며 가장 보편적으로 사용 되고 있는 방법이다. 국내에서는 팔당호에서 제한 영양염 규명에 대한 연구가 진행되었고 식물플랑크톤의 성장이 인에 의하여 제한된다고 보고된 바 있지만(최 등, 2003), 섬진강 수계인 동북호에서는 아직까지 제한 영양염에 대한 생물검정실험 결과가 보고된 바 없다. 광주광역시 및 전라남도의 중요한 상수원으로 사용되고 있는 동북호는 상류에서 갑작스런 조류의 대증식($300 \mu\text{g L}^{-1}$ 이상)이 일어난 예가 있으며, 2000년 이후에는 점진적으로 부영양화 단계로 진행되고 있는 것으로 나타났다(광주광역시 상수도사업본부, 2006). 따라서 본 연구에서는 현재 통합관리가 이루어지고 있는 섬진강 수계에서 상수원으로 관리와 관심의 대상이 되고 있는 동북호를 선정하여 장기적인 TN, TP, DIN, DIP를 이용한 TN/TP와 DIN/DIP ratio로 잠재적인 제한 영양염을 추정해 보고, 현장의 식물플랑크톤을 이용한 생물검정실험(bioassay experiment)을 실시함으로써 명확한 제한 영양염을 판단하여 동북호의 효율적인 수질 관리를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

재료 및 방법

1. 조사지역 및 시기

섬진강 수계인 동북호는 섬진강 수계의 상류에 속하며

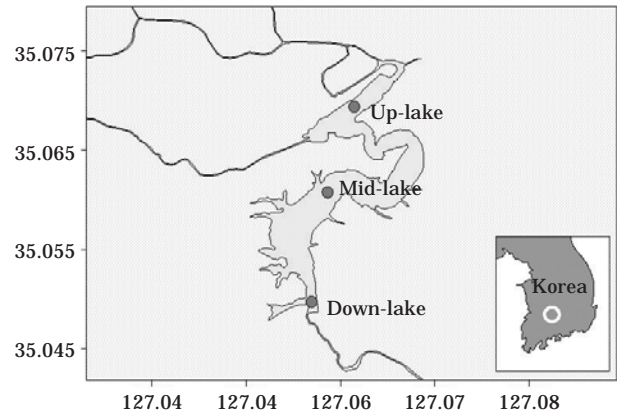


Fig. 1. Sampling stations in Dongbok Lake.

하류로는 주암호가 위치하고 있다. 행정구역상 화순군 동북면 연월리에 위치하며 광주광역시로부터 남동쪽으로 약 20 km 거리에 위치하고 있다. 유역면적은 189 km^2 이고 만수면적은 6.6 km^2 이다. 동북호는 광주광역시의 극심한 생활용수의 부족을 해결하고자 1985년에 축조되었으며, 하루 32만톤을 공급할 수 있는 취수시설을 갖추고 있으며 전라남도 및 광주광역시에 상수원을 공급하고 있다. 동북호를 대상으로 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염을 파악하기 위하여 상류부터 하류까지 3개의 정점을 선정 하였으며, 조사 시기는 2005년 8월과 10월, 2006년 1월과 3월로 나누어 총 4회에 걸쳐 계절적 특성을 파악할 수 있도록 현장 조사 및 시료채집과 생물검정 실험(bioassay experiment)을 실시하였다(Fig. 1).

2. 장기자료 분석

강수량에 따른 조사지역의 영양염 변동을 알아보기 위하여 순천시 지방기상대의 관측 자료를 이용하였으며 강수량과 각 영양염간의 상관성을 알아보기 위하여 회귀분석을 실시하였다. 동북호의 TN, TP, DIN, DIP에 대한 장기 자료는 물환경정보시스템(<http://water.nier.go.kr>)의 수질측정망 정점중에서 본 조사 정점과 동일한 중류와 하류의 자료를 이용하였으며, 그 결과를 토대로 장기적인 molar TN/TP와 DIN/DIP 비를 산출하였다.

3. 영양염 첨가 배양실험

영양염 첨가 배양실험을 위한 시료 채집은 동북호 하류의 표층수를 채수하였으며, 식물플랑크톤 포식자를 제거하기 위하여 $70 \mu\text{m}$ 여과망을 사용하여 시수를 여과하였다. 여과된 시수 1 L를 투명한 폴리탄산에스테르 병에

채우고 영양염을 첨가한 처리군과 영양염을 첨가하지 않은 대조군으로 분리하여 실험을 실시하였다. 영양염 첨가군은 암모니아 (NH_4^+), 질산염 (NO_3^-), 인산염 (PO_4^{3-}), 규산염 (Si) 그리고 모든 영양염을 첨가한 조건 (all)으로 구분하였으며, 영양염은 각각 NH_4Cl , NaNO_3 , K_2HPO_4 , $\text{Na}_2\text{SiO}_3 \cdot 9\text{H}_2\text{O}$ 형태로 첨가하였다. 실험은 두 개의 샘플을 만들어 실시하였으며 평균값으로 나타내었다. 각각의 영양염 첨가 후 농도는 현장의 영양염 농도 (ambient concentration) 범위를 고려하여 200 μM , 200 μM , 20 μM , 50 μM 이 되도록 하였다.

자연 조건의 배양을 위하여 영산호 인근의 현장에서 수조를 만들어 영산호의 물이 수조안으로 순환할 수 있도록 설계하였고, 수조에 일정한 부피의 물이 채워질 수 있도록 조절한 후 실험 샘플을 수조 안에 넣어 배양하였다 (Fig. 2).

배양이 시작된 시점에서 24시간 주기로 10일간 식물플랑크톤 생체량을 측정 하였다. 식물플랑크톤 생체량 측정은 배양 샘플에서 채취된 시료 일정량을 유리섬유 여과지 (GF/F, 직경 25 mm, 공극 0.7 μm , Whatman)로 여과 하였다. 여과된 필터들을 클로로필 추출용액인 아세톤 90% 8 mL가 담긴 차광 시험관에 넣고 12시간이 지난 후 24시간 내로 10-AU Fluorometer (Turner Designs, USA)를 사용하여 측정 하였다. 생물검정 실험시 하류 샘플의 경우 20 μm mesh를 이용하여 크기별 식물플랑크톤 (net/nano-size)의 반응을 볼 수 있도록 하였다.

가을철부터 봄철에는 배양전 샘플과 배양후의 인산염 첨가군에서의 식물플랑크톤 군집 분포 및 우점종을 알아 보기 위하여 시료 일정량을 채취하여 Lugol's solution으로 고정 후 Axioskop 2 MAT (ZEISS, Germany)으로 동정하였다. 계절별 인의 제한 정도를 파악하기 위해 배양 후 7일까지의 인산염 첨가군 클로로필 *a*와 영양염이 첨가되지 않은 대조군 클로로필 *a*의 평균값을 나누어 limitation index를 산출하였다. 대조군과 영양염 첨가군의 반응차이의 유의성을 알아보기 위하여 one-way ANOVA를 이용하여 통계분석을 실시하였다.

결 과

1. 강우와 영양염의 장기 분포

조사지역의 1992년부터 2008년까지 연 평균 강수량은 1,543 mm이며, 1998년도에 2,010 mm로 가장 많은 강수량을 나타내었고 2004년도에 1,067 mm로 가장 적은 강수량을 나타내었다. 계절적으로는 여름철인 7월부터 9월 사이에 많은 강수분포를 보였으며, 겨울철인 1월부터 2

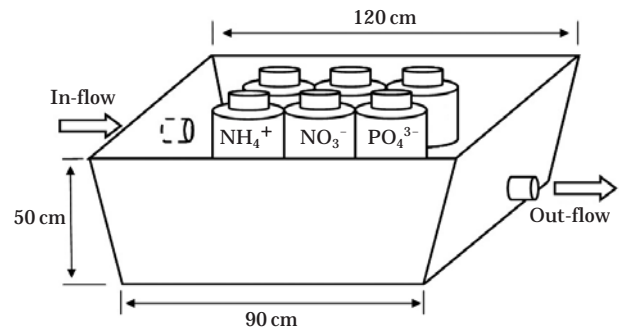


Fig. 2. Structure of water incubation: replicates were prepared for each treatment.

Table 1. Results (r^2) of linear regression analyses of precipitation vs. TN, TP, DIN and DIP from long-term monitoring data in Dongbok Lake. (* $P < 0.05$, ** $P < 0.01$)

	TN	TP	DIN	DIP
Mid-lake	0.430*	0.555**	0.456	0.114
Down-lake	0.561**	0.540**	0.477	0.130

월 사이에 적은 분포를 나타내었다 (Fig. 3).

TN농도의 장기 변화는 중류와 하류 모두 강수량과 유의한 양의 상관관계를 보이며 강수량이 많은 여름철에 농도가 증가하고 겨울철에는 상대적으로 감소하였다 (Table. 1). 중류와 하류의 장기간 TN농도의 평균값을 비교하면 중류가 0.88 mg L^{-1} , 하류가 0.84 mg L^{-1} 로 중류지역이 상대적으로 높은 농도를 나타내었다 (Fig. 4A, B). TP농도의 장기 변화 역시 TN농도와 마찬가지로 강수량과 연관성을 보이며, 장기간의 평균 TP농도 또한 중류가 0.017 mg L^{-1} , 하류가 0.016 mg L^{-1} 으로 중류지역이 하류보다 높은 농도를 나타내었다 (Fig. 4C, D).

2. 인, 질소의 molar ratio

장기간 DIN농도의 변화를 보면 강수와 유의한 양의 상관관계를 나타내었던 TN, TP와는 다르게 유의성을 나타내지 않았다. 장기간의 평균 DIN 농도는 중류지역이 0.74 mg L^{-1} 하류가 0.78 mg L^{-1} 로 하류지역이 중류보다 높은 농도를 보였다 (Fig. 5A, B). DIP 역시 강수와 관계에서 특이한 연관성을 보이지 않았으며, 장기간의 평균 농도는 중류가 0.011 mg L^{-1} 하류가 0.009 mg L^{-1} 로 하류보다는 상류에서 높은 농도를 나타내었다 (Fig. 5C, D).

수질측정망의 장기간 자료를 토대로 한 TN/TP ratio는 중류지역에서는 총 3회의 결과를 제외 하고는 16 이상이었으며, 하류의 경우에도 4회의 결과를 제외한 모든 결과

가 16 이상의 비를 나타내었다. 중류와 하류의 장기간의 평균은 각각 74.9, 78.8로 16 이상을 나타내었다 (Fig. 6A, B). DIN/DIP 역시 중류에서 2회, 하류에서 2회의 결과를 제외하고 모두 16 이상이었고 각각의 평균은 중류가 123.6 하류가 110.6로 중류가 높았으며, 이는 TN/TP 보다 월등히 높은 결과임을 알 수 있다 (Fig. 6C, D).

3. 영양염 첨가에 대한 식물플랑크톤 반응

각 조사 정점의 계절에 따른 영양염 첨가 배양실험의

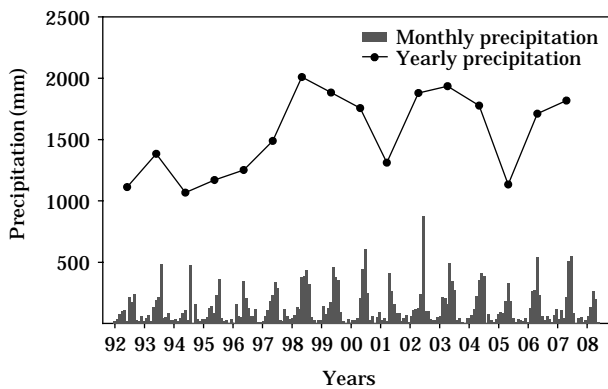


Fig. 3. Long-term variations of monthly and yearly precipitation (monthly and annual accumulation of precipitation) in the Suncheon area.

결과를 보면 인산염 첨가군과 all 첨가군에서 반응함을 알 수 있다. 여름철 상류에서는 인산염 첨가군 보다는 all 첨가군에서 높은 반응을 보였으며, 중류와 하류에서는 인산염 첨가군이 높은 반응을 나타내었다 (Fig. 7A-C). 가을철의 실험에서는 타 계절에 비하여 인산염과 all 첨가군이 가장 높게 반응하였고, 최대 클로로필 *a* 농도가 나타나는 시기는 인산염 첨가군 보다 all 첨가군이 늦게 반응하였다 (Fig. 7D-F). 겨울과 봄철에는 여름과 가을에 비하여 낮은 반응을 보이며, all 첨가군 보다는 인산염 첨가군이 높은 반응을 나타내었다. 또한 인산염 및 all 첨가군에 대한 반응시기가 배양후 3일정도에 반응을 보였던 타 계절보다 2일정도 늦게 반응하였다. 공간적으로는 중류와 하류보다는 상류에서 높게 반응하였다 (Fig. 7G-L).

하류지점의 샘플로 실시하였던 크기별 식물플랑크톤의 반응 결과에서 여름철 인산염 첨가군의 net-size와 nano-size가 서로 유사한 반응을 보이며 클로로필 *a* 역시 비슷한 농도로 반응을 하였다 (Fig. 8A, B). 가을철에는 net-size가 nano-size보다 높게 반응하였다. 겨울과 봄철의 반응은 타 계절에 비하여 낮은 농도의 클로로필 *a*를 나타내었고, 또한 인산염 첨가군에 대하여 반응 속도가 늦게 나타났다 (Fig. 8E-H). 봄철에는 net-size가 높은 반응을 보였던 타 계절과 다르게 nano-size가 높게 반응하였다 (Fig. 8).

배양기간 동안 대조군의 전체 생체량 (chlorophyll *a*) 평

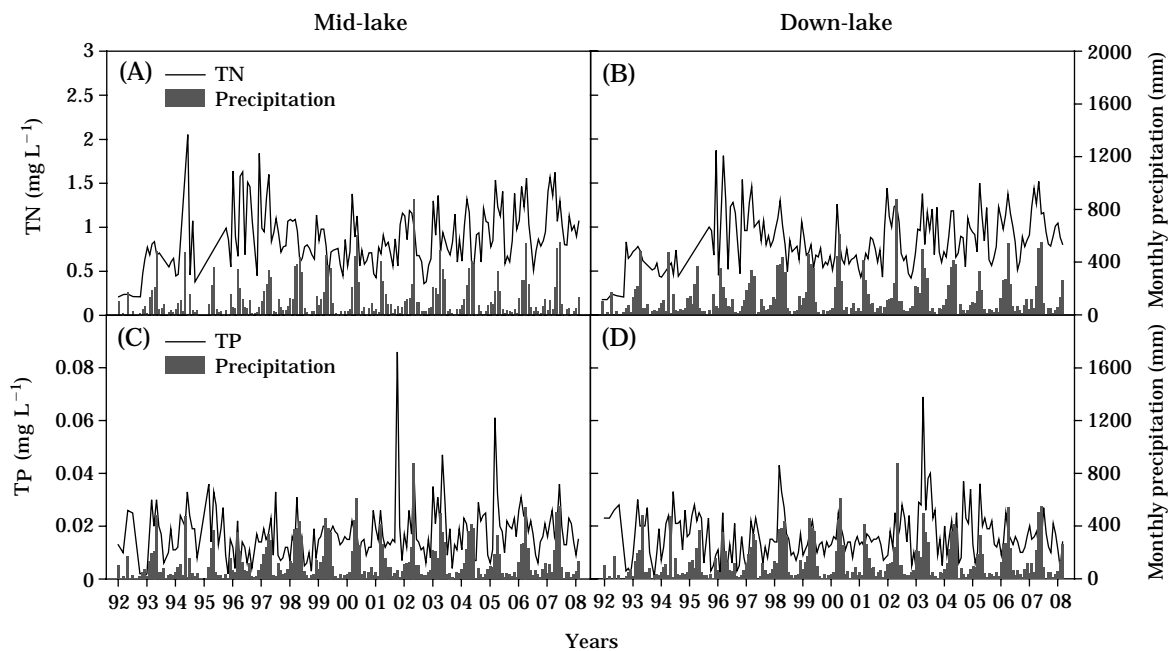


Fig. 4. Temporal variations of TN, TP and precipitation during 1992~2008.

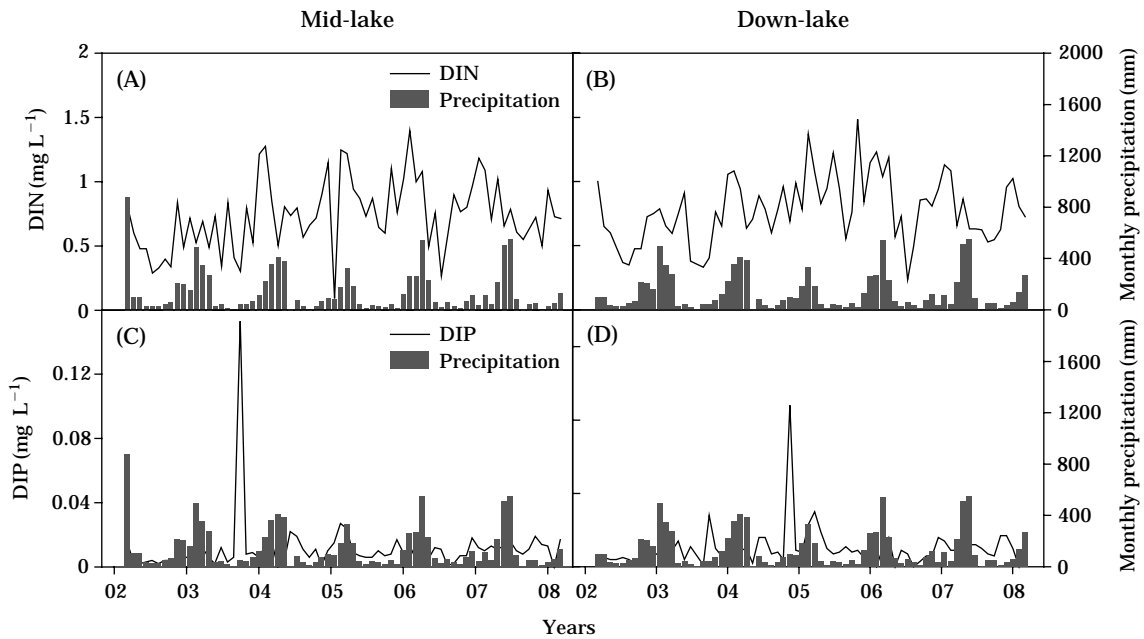


Fig. 5. Temporal variations of DIN, DIP and precipitation during 2002 ~ 2008.

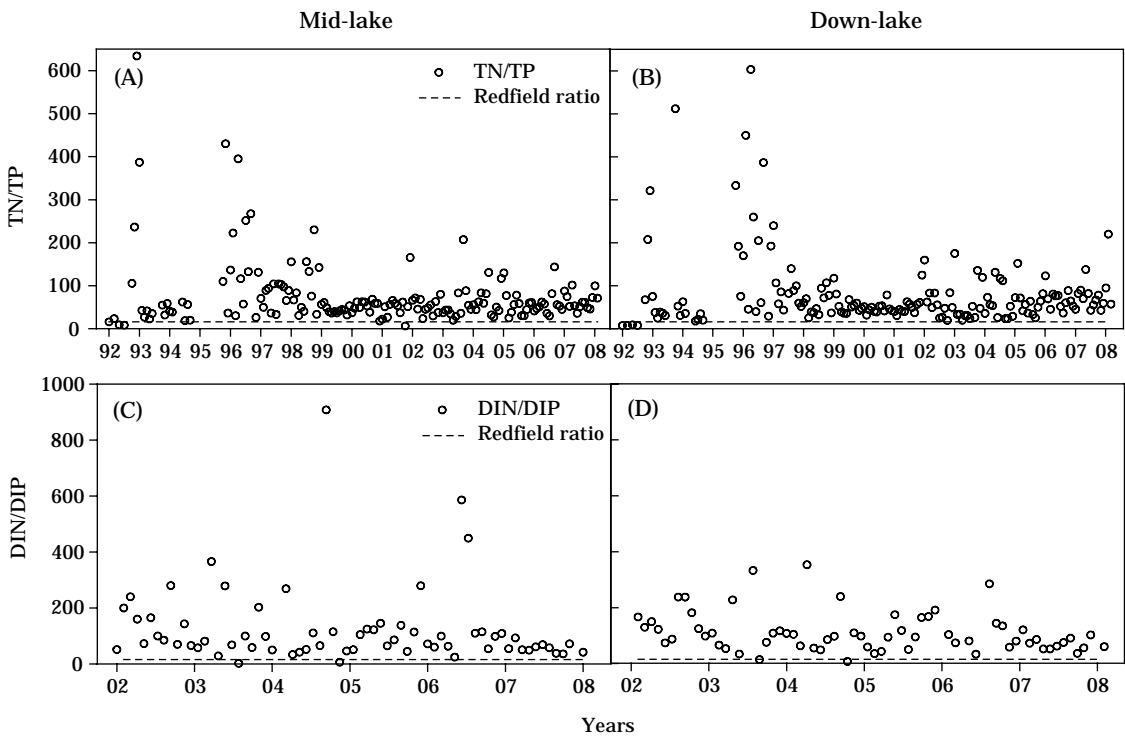


Fig. 6. Temporal distributions of TN/TP and DIN/DIP during 1992 ~ 2008 and 2002 ~ 2008 respectively.

균값보다 높은 평균값을 나타낸 실험군을 one-way ANOVA로 통계 비교 분석한 결과에서 암모니아, 질산염, 규산염 첨가군에서는 유의성을 보이지 않았으며 ($P >$

0.05), 인산염 첨가군에서는 모든 계절에서 유의성을 나타내었고 ($P < 0.01$), 모든 영양염을 첨가한 all에서는 봄철 배양시를 제외한 모든 실험기간동안 유의성을 나타냈

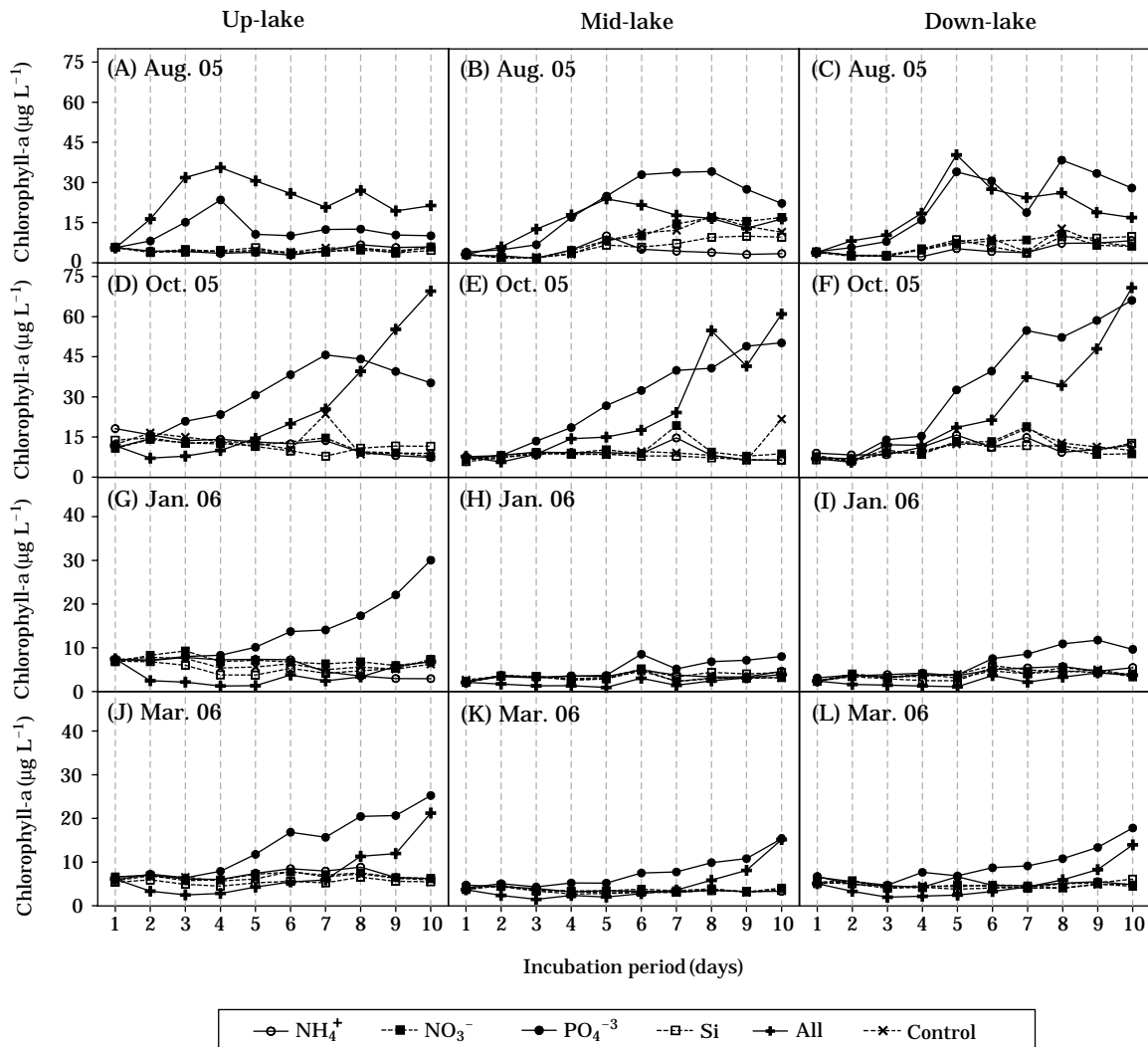


Fig. 7. Changes of chlorophyll a concentrations during the incubation period.

다 ($P < 0.05$).

영양염 첨가 배양 실험 기간 중 가을철 우점종 변화는 상류와 하류에서 유글레나류인 *Trachelomonas planktonica*가 각각 45.1%와 45.6%의 우점 하였으나 배양 후인 인산염 첨가군에서는 상류와 중류에서 규조류인 *Nitzschia palea*와 *Aulacoseria ambigua*가 우점하였고, 중류의 경우에는 *Aulacoseria ambigua*의 우점율이 배양전보다 배양 후에 3.6% 증가하는 결과를 보여주었다. 또한 하류의 경우에는 *Trachelomonas planktonica*의 우점율이 배양전에 비하여 9.5%가 감소하였다. 겨울철에는 배양전 상류에서는 *Nitzschia sp.*가 91.2%로 극우점 하였으며 중류와 하류에서는 *Aulacoseira sp.*와 *Nitzschia sp.*가 각각 27.7%, 55.4%로 우점하였다. 배양 후에는 상류에서는 *Nitzschia sp.*, 중류와 하류에서는 *Aulacoseira sp.*가 각각

59.7%, 42.5%, 34.6%로 우점 하였다. 봄철의 경우, 배양 전에는 *Nitzschia sp.*가 모든 정점에서 우점하였으나 배양 후에는 중류의 인산염 첨가군에서는 *Aulacoseira sp.*가 35.1%로 우점하였다 (Table 2).

Limitation index의 결과를 보면, 계절별로 여름에 높고 겨울에 가장 낮은 수치를 나타내었다. 여름철에는 하류에서 3.57로 가장 높았으며 상류가 2.95로 가장 낮았다. 겨울철의 경우에는 여름철과 반대로 상류에서 1.62로 가장 높았으며, 하류가 1.20으로 가장 낮은 값을 나타내었다 (Fig. 9).

고 찰

영양염 농도 변화에 따른 식물플랑크톤의 영양염 흡수

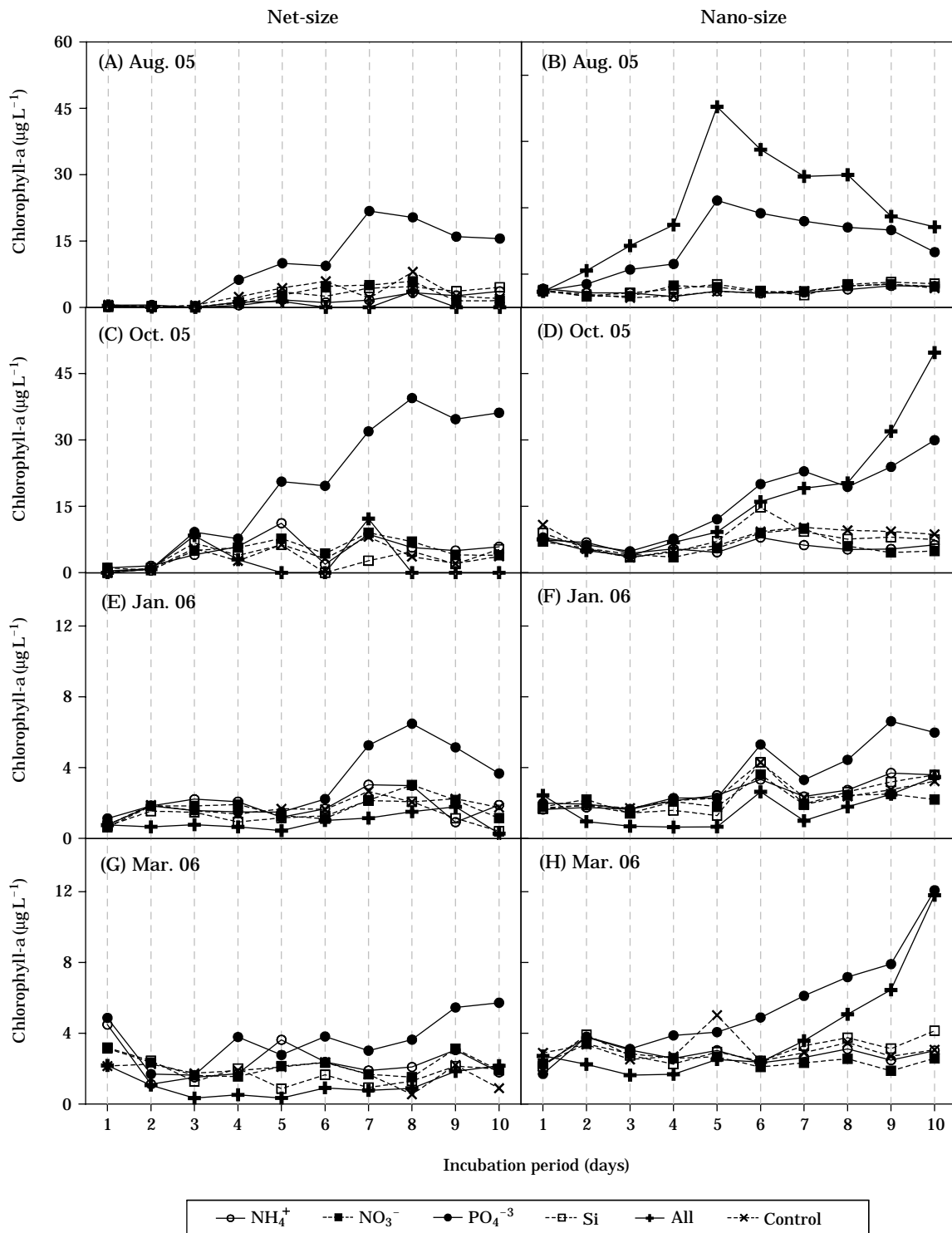


Fig. 8. Response of size-fractionated phytoplankton to the addition of nutrients.

율을 나타낸 반응 곡선에서 영양염이 일정한 농도까지 증가하게 되면 식물플랑크톤의 영양염 흡수율이 증가하

지 않고 안정화 상태가 되는데 이를 포화 수준이라고 한다. 선행 연구에 의하면 질산염은 약 0.056 mg L⁻¹의 농

Table 2. Change of the dominant species in bioassay experiments: Before and after the additions of phosphate (PO_4^{3-}).

Station	Oct. 05		Jan. 06		Mar. 06	
	Before	After	Before	After	Before	After
Up-lake	<i>Trachelomonas planktonica</i> (45.1%)	<i>Nitzschia palea</i> (22.0%)	<i>Nitzschia</i> sp. (91.2%)	<i>Nitzschia</i> sp. (59.7%)	<i>Nitzschia</i> sp. (42.6%)	<i>Nitzschia</i> sp. (54.6%)
Mid-lake	<i>Aulacoseria ambigua</i> (10.2%)	<i>Aulacoseria ambigua</i> (13.8%)	<i>Aulacoseira</i> sp. (27.7%)	<i>Aulacoseira</i> sp. (42.5%)	<i>Nitzschia</i> sp. (61.5%)	<i>Thalassiosira</i> sp. (35.1%)
Down-lake	<i>Trachelomonas planktonica</i> (45.6%)	<i>Trachelomonas planktonica</i> (36.1%)	<i>Nitzschia</i> sp. (55.4%)	<i>Aulacoseira</i> sp. (34.6%)	<i>Nitzschia</i> sp. (60.0%)	<i>Nitzschia</i> sp. (57.4%)

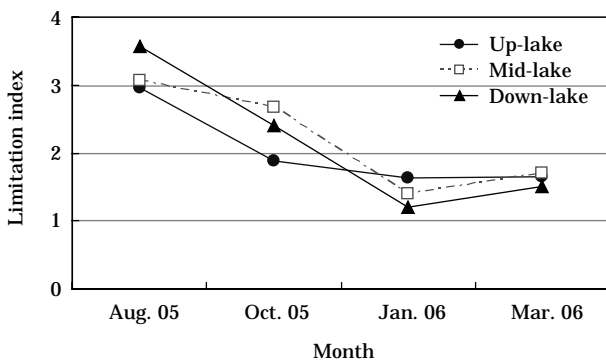


Fig. 9. Seasonal variations of nutrient limitation index for phosphorus in the Dongbok Lake.

도 범위에서 포화 수준에 도달하며, 인산염의 경우에는 약 0.022 mg L^{-1} 의 농도에서 포화 수준에 도달한다고 보고된 바 있다 (Furnas *et al.*, 1978; Loftus *et al.*, 1979). 이러한 결과를 바탕으로 동북호의 TN, DIN의 농도와 TP, DIP의 절대농도를 비교하면 질소는 포화 수준 이상의 농도를 보였으며, 인산염은 포화 수준 이하의 농도를 나타내었다. 따라서 본 지역은 인보다는 질소의 공급이 원활한 지역이라 할 수 있다.

수체 내 N/P는 조류의 생물량과 조류 종의 천이를 예측하거나 조류 성장에 대한 영양염 제한을 나타내는 간접적인 지표로 활용되고 있다 (Smith, 1983; Fugimoto and Sudo, 1997; Seppälä *et al.*, 1999). 제한 영양염에 대한 N/P의 변이대는 식물플랑크톤 세포내 물질 함량비로 알려진 Redfield ratio (106C : 16N : 1P)의 원자비가 일반적으로 활용되고 있으나 (Redfield, 1963) 간혹 종에 따라 다르게 나타나는 종 특이성을 보여주고 있다 (Forsberg and Ryding, 1980; Hecky and Kilham, 1988). 본 연구에서는 단순히 일반적으로 활용되는 Redfield ratio를 사용

하여 조사 호소의 잠재적 제한영양염의 경향을 파악하였는데 동북호에서 대부분의 시기에 TN/TP와 DIN/DIP가 16 이상으로 나타났으며, 이는 인이 식물플랑크톤 성장의 제한하는 잠재적인 요인임을 확인할 수 있었다.

각 호소의 수질 관리를 위해서는 호수에서 조류의 성장을 제어하는 영양염류가 무엇인가를 실험적으로 찾아내는 것은 중요하다. 식물플랑크톤의 제한 영양염은 여러 접근법에 의해서 평가될 수 있는데 위에서 언급한 호소의 절대농도와 N/P는 세포내 축적된 영양염이나 광물질화 과정에 의해 공급될 수 있는 영양염 등을 파악하지 못하므로 실제 제한 영양염을 반영하지 못한다. 그러므로 실질적 제한 영양염을 파악하기 위해서는 세포내 영양염 함량, 영양염 흡수 속도, 영양염 첨가 배양실험 등이 병행되어야 한다 (Hecky and Kilham, 1988; Graziano *et al.*, 1994; Seppälä *et al.*, 1999). 호수에 있어서 조류의 번성은 영양염중 인이나 질소의 농도에 따라 결정되며 담수 호에서는 대체로 인이 더 중요한 것으로 알려져 있다 (Schindler *et al.*, 1977). 본 연구 조사 대상인 동북호의 조사하였던 모든 계절에서 인산염이 제한영양염인 것으로 검정되었다. 또한 크기에 따른 반응에서도 net-size와 nano-size에서도 인에 대하여 반응을 나타내었다. 모든 조사시기에 반응한 인산염 첨가군 중 겨울과 봄철에 상대적으로 낮은 반응을 보인 것은 본 실험이 실험실 배양이 아닌 현장 배양으로 시기적으로 낮은 광량과 온도에 기인한 것으로 사료된다. 실제로 여름철에 높은 수치를 나타내고 겨울에 낮은 수치를 나타낸 limitation index가 이러한 사실을 뒷받침한다. 연안역과 같이 복잡한 조류가 생성되는 곳이 아닌 호소수이기 때문에 각 수계에서의 공간별 큰 차이 없이 인산염이 제한영양염으로 작용할 것으로 판단된다. 실험기간동안 우점종의 변화를 보면 가을철에 유글레나류인 *Trachelomonas planktonica*가 상류와 하류에서 우점 하였지만, 배양후 인산염 첨가군에서

는 상류는 규조류인 *Nitzschia palea*로 우점종이 변화하였고, 하류의 우점종인 *Trachelomonas planktonica*의 우점율이 45.6%에서 36.1%로 감소하였다. 다른 기간의 실험에서는 배양전과 배양후 인산염 첨가군에서 모두 규조류가 우점하였으나 우점율과 종의 변화를 나타내었다. 가을철 실험의 우점종 변화에서 상류지역이 유글레나류에서 규조류로 우점종이 변화는 결과와 하류지역의 유글레나류의 우점율 감소 등을 볼 때 인산염에 대하여 규조류가 민감한 반응을 보일 것이라 추정된다.

종합하면, 동북호의 장기간 TN, TP와 DIN, DIP 농도에서 질소가 인보다 원활히 공급되는 지역임을 알 수 있었다. 장기간의 TN/TP와 DIN/DIP ratio에서 16 이상의 비를 나타냄으로서 본 지역에서의 식물플랑크톤은 인에 의해 성장이 제한될 수 있는 것으로 추정되었고, 영양염 첨가 배양 실험에서는 인산염 첨가군과 all 첨가군에서 반응을 나타내면서 인이 제한 영양염으로 작용하고 있는 것으로 검정되었다. 본 연구의 생물검정실험에서 동북호의 식물플랑크톤 군집중에서는 규조류가(특히 가을철) 인에 대하여 민감하게 반응하는 것으로 나타나 첨가 영양염에 대한 종의 특이성도 어느 정도 확인 할 수 있었지만 특정 종의 변화 및 우점의 원인을 정확하게 파악하기 위해서는 이를 위한 추가적인 실험이 필요할 것으로 사료된다.

적 요

동북호의 식물플랑크톤 성장을 제한하는 영양염을 파악하기 위하여 기존자료 분석과 계절별 영양염 첨가 배양 실험을 실시하였다. 장기간 자료를 분석한 결과, TN과 TP는 강우와 유의한 상관성을 보였지만 DIN, DIP는 강우와 유의한 상관성을 나타내지 않았다. TN/TP와 DIN/DIP는 16 이상의 결과를 나타냄으로서 인산염에 의하여 식물플랑크톤의 성장이 잠재적으로 제한될 수 있음을 확인하였다. 영양염 첨가 배양 실험을 수행한 결과, 모든 계절에서 클로로필 *a*가 인산염 첨가군에 반응을 나타내었지만 암모니아, 질산, 규산염과 같은 영양염에 대해서는 크게 반응하지 않았다. 또한 크기에 따른(net and nano size) 식물플랑크톤의 반응 역시 인산염에서 반응을 나타냄으로서 인산염이 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 영양염임을 검정하였다. 가을철 배양실험에서 배양 전과 배양 후 인산염 첨가군의 우점종 변화를 보면, 배양 전에는 일부 유글레나류가 우점을 나타내었지만, 배양 후 인산염 첨가군에서는 규조류의 우점을 나타내었다.

인 용 문 헌

- 광주광역시 상수도사업본부. 2006. 동북호 수질보전 종합대책 보고서.
- 권기영, 김창훈, 강창근, 문창호, 박미옥, 양성렬. 2002. 생물검정 실험에 의한 섬진강 하구역 식물플랑크톤 성장의 제한영양염 평가. 한국수산학회지 **35**(5): 455-462.
- 박혜경, 서용찬, 박병환, 이덕길. 2000. 남조류 및 규조류 염소소독부산물 생성특성에 관한 연구. 한국물환경학회 공동출제 학술발표회 논문집 Vol.2000, p. 123-126.
- 영산강 물환경 연구소. 2006. 영산강·섬진강 수계의 부영양화 기작 및 이화학적 평가조사. 환경부.
- 이영식, 이재성, 정래홍, 김성수, 고우진, 김귀영, 박중수. 2001. 광양만에서 식물플랑크톤증식의 제한영양염. 한국해양학회지 **6**(3): 201-210.
- 이영식, 유 준, 권기영, 최용규, 조은섭. 2004. 광양만에서 식물플랑크톤증식 제한영양염의 시,공간적 변동 특성. 대한환경공학회지 **26**(8): 890-895.
- 정준, 김한순, 김용재. 1994. 낙동강 하구댐의 식물플랑크톤 군집구조. 한국육수학회지 **27**(1): 33-46.
- 최광현, 황순진, 김호섭, 한명수. 2003. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화. 한국육수학회지 **26**(2): 139-149.
- Borchardt, M.A. 1996. Nutrients. In: R.J. Stevenson, M.L. Bothwell, R.L. Low (Eds), Algal ecology, Academic Press, New York p. 184-227.
- Fisher, T.R., E.R. Peele, J.W. Ammerman and L. Harding. 1992. Nutrient limitation of phytoplankton in Chesapeake Bay. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **82**: 51-63.
- Forsberg, O., S.-O. Ryding, A. Forberg and A. Claesson. 1978. Water chemical analyses and/or algal assay? Sewage effluent and polluted lake water studies. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 252-363
- Fujimoto, N. and R. Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under various N:P supply ratios and temperatures. *Limnol. Oceanogr.* **42**: 250-256.
- Furnas, M.J., G.L. Hitchcock, and R. Briseñas, 1978. Nutrient-phytoplankton relationships in Narragansett Bay during the 1974 summer bloom. *Estuarine Processes* Vol. 1.
- Graziano, L.M., R.J. Geider, W.K.W. Li and M. Olaiola. 1996. Nitrogen limitation of North Atlantic phytoplankton: analysis of physiological condition in nutrient enrichment experiments. *Aquat. Microb. Ecol.* **11**: 53-64.
- Hecky R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environment: A review of recent evidence on the effects of enrichment.

- Limnol. Oceanogr.* **33**(4): 796-822.
- Loftus, M.E., A.R. Place and H.H. Seliger, 1979. Inorganic carbon requirements of natural populations and laboratory cultures of some Chesapeake Bay phytoplankton. *Estuaries* **2**(4): 236-248.
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Amer. Sci.* **46**: 205-255.
- Redfield, A.C., F.A. Ketchum and B.H. Richards, 1963. The influence of organisms on the composition of sea-water. New York, p. 22-77.
- Schindler, D.W. 1977. Evolution of phosphorus limitation in lakes. *Sci.* **195**: 260-262.
- Smith, V.H. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. *Sci.* **221**: 669-671.
- Seppälä, J., T. Tamminen and S. Kaitala. 1999. Experimental evaluation of nutrient limitation of phytoplankton communities in the Gulf of Riga. *J. Mar. Syst.* **23**: 107-126.
- (Manuscript received 22 July 2008,
Revision accepted 3 September 2008)