

팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화

최광현 · 황순진* · 김호섭 · 한명수¹

(건국대학교 지역건설환경공학과, ¹한양대학교 생명과학과)

Temporal Changes of Limiting Nutrients and Phytoplankton Growth Rate in Lake Paldang. Choi, Kwang-Hyun, Soon-Jin Hwang*, Ho-Sub Kim and Myung-Soo Han¹ (Department of Biological Systems Engineering, Konkuk University, Seoul, 143-701, Korea, ¹Department of Life Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea)

This study was conducted to determine limiting nutrients and the physiological characteristics of phytoplankton in response of nutrients in Lake Paldang from March 2002 to October 2002. A field research was conducted along with laboratory batch culture experiment to find the limiting nutrients and the growth kinetics. According to the results of Chl. *a* TP relationship, TN/TP ratio, and nutrient addition bioassay, phosphorus appeared to be a major limiting nutrient in Lake Paldang and thus the lake productivity was greatly influenced by it. P limitation for the phytoplankton of Lake Paldang varied with season, and the possibility of limitation by nitrogen and silica also occurred. The degree of P limitation was greatest during spring when the concentration of dissolved phosphorus is relatively much lower than summer and autumn. The maximum growth rate (μ_{max}) and half saturation concentration (K_u) of Lake Paldang phytoplankton ranged from 0.8~1.1 day⁻¹ and from 0.1~0.8 μM , respectively. K_u was highest during May (0.8 μM) and the lowest during September (0.1 μM). Such result may be induced by the phytoplankton cell quota that showed the lowest concentration (0.13 $\mu g P / \mu g Chl. a$) during May. The growth kinetics showed that phytoplankton growth in Lake Paldang was faster during summer and autumn than spring, suggesting that the potential of algal bloom is high after the summer monsoon season.

Key words : Phytoplankton, Limiting nutrient, Phosphorus, Growth kinetics, Maximum growth rate (μ_{max}), Half saturation concentration (K_u), Lake Paldang

서 론

호수생태계 내에서 영양염 (nutrients)은 그 제한과 증가의 정도에 따라 생리학적 수준에서는 식물플랑크톤의 성장률, 생태계 수준에서는 생물량, 일차생산력, 종 조성에 영향을 미치게 된다(Borchardt, 1996). 각각의 영양염에 대하여 식물플랑크톤은 최적성장에 적합한 농도 범위를 가지고 있으며, 성장률을 통해 식물플랑크톤의

성장역학과 영양염 흡수율을 결정할 수 있다(Holm and Armstrong, 1981). 식물플랑크톤 성장률의 정도는 호수에서 식물플랑크톤의 최대생물량과 밀접한 관계가 있다(Ahlgren, 1988).

식물플랑크톤의 개체군 성장은 온도, 광도, 영양염 농도 등의 무생물적 환경요인과 동물플랑크톤과 같은 생물학적 요소(섭식자)의 종류와 밀도에 의해 달라질 수 있다(Sterner and Grover, 1998; Wetzel, 2001). 그 중에서 질소와 인은 성장에 필요한 필수 영양염이며, 식물플

* Corresponding author: Tel: 02) 450-3748, Fax: 02) 450-5062, E-mail: sjhwang@konkuk.ac.kr

랑크톤 종간의 서로 다른 생리적 특성으로 인해 최적 성장에 필요한 이들 농도는 차이가 나타날 수 있다. 식물플랑크톤은 영양염에 대해 성장역학(growth kinetics) 측면에서 종 특이성을 가지며, 식물플랑크톤 성장역학은 평형상태에서 Monod 모델로 묘사된다(Kilham, 1978). 특히, 용존 영양염 농도와 식물플랑크톤의 성장률로 설명되는 Monod의 성장역학은 최대성장률(μ_{max})과 반포화농도(K_0)로서 결정되어지며, 이들은 조류개체군 발달과 계절적인 천이에 대한 지표가 되기도 한다(Holm and Armstrong, 1981). 식물플랑크톤의 성장역학은 수계 내의 제한 영양염을 찾아내고 영양염의 변화가 조류 발생에 미치는 영향을 예측하는 데 이용될 수 있으며, 식물플랑크톤의 우점종을 평가할 수 있고, 조류에 의한 수생태계의 부영양화를 평가하는데 유용하게 이용될 수도 있다(Tilman, 1982).

팔당호는 호수 표면적보다도 훨씬 넓은 유역 면적을 가지는 인공댐호의 전형적인 지형학적 특성으로 인하여 유역으로부터 높은 영양염의 부하와 이에 따른 호수생산성의 높은 잠재력을 가지고 있다. 식물플랑크톤의 영양염 제한성을 나타내는 지표인 N/P ratio에 기초할 때, 팔당호에서 과거 20여 년 동안 그 비율이 지속적으로 감소하고 있지만 현재까지도 비율이 제한성의 기준보다 상당히 높아 식물플랑크톤 성장의 제한요인은 인으로 나타나고 있다(한 등, 1993). 이 결과는 양적 측면에서 인의 상대적인 중요성이 과거 20여 년간 지속적으로 증가하고 있음을 시사한다. 따라서 팔당호에서 인의 외부 부하는 부영양화의 원인으로 지적되고 있으며(김 등, 1989, 1995; 한 등 1994), 부하량 측면에서는 남한강이(김 등, 1989), 농도 측면에서는 경안천으로부터 유입되는 인의 부하가 팔당호 조류생산에 미치는 중요성이 강조되고 있다(신 등, 2000). 또한 팔당호는 하천형 인공댐호의 특성상 계절에 따른 수리학적 체류시간의 변동이 상당히 크며, 이 영향에 따른 수체 내 영양염의 이용과 식물플랑크톤의 변이가 예측될 수 있다. 팔당호 내 식물플랑크톤의 종조성과 성장에 대하여, 한 등(1995)은 체류시간이 짧은 시기에는 하천플랑크톤의 종조성에 영향을 받으며 체류시간이 상대적으로 긴 시기동안은 영양염 농도가 높은 경안천의 식물플랑크톤의 조성에 영향을 받음을 보고한 바 있다. 이와 관련하여 팔당호 내의 단기적인 부영양화와 하계의 식물플랑크톤의 발생은 경안천으로부터 유입된 고농도의 용존성 무기인과 유기인이 정체가 시간 동안 팔당호 내에서의 이용되는 것을 뒷받침한다(홍, 2000). 팔당호의 영양염 농도는 부영양수준을 나타내고 있으며(김과 김, 1990), 계절적으로 큰 변이는

나타나지 않고 있다(한 등, 1999).

팔당호에서 수질변화와 식물플랑크톤 발생에 대한 다양한 연구가 진행되어 왔으나, 식물플랑크톤의 성장역학적 측면에서 영양염이 식물플랑크톤의 성장에 미치는 영향에 대한 연구는 아직 이루어진 바가 없다. 따라서 팔당호에 유입되는 영양염과 식물플랑크톤의 영양염 이용에 대한 생리적인 특성이나 제한 영양염의 이용률에 관한 연구는 매우 중요하다. 본 연구에서는 팔당호에서 영양염 농도에 따른 조류 성장특성의 경시적 변화를 파악하기 위하여, (1) 현장의 영양염과 엽록소 *a* 농도를 분석하여 이들의 상관성을 분석하고, (2) 실내 배양실험을 통하여 제한영양염과 조류성장역학을 평가하였다.

재료 및 방법

1. 식물플랑크톤 채집 및 수질분석

팔당호 시료 및 식물플랑크톤 채집은 2002년 3월부터 10월까지 수행하였다. 배양실험에 사용하기 위한 식물플랑크톤은 팔당댐 앞 지점에서 망목의 크기가 30 μm 인 네트로 채취하였으며 대형 동물플랑크톤을 제거하기 위해 200 μm 네트로 2회 이상 여과하였다. 시료는 수심 0, 2, 5 m에서 Van-Dorn Sampler를 이용하여 채수하여 엽록소 *a*와 총인(Total Phosphorus; TP), 용존무기인(Dissolved Inorganic Phosphorus; DIP), 그리고 총질소(Total Nitrogen; TN)를 측정하였다.

엽록소 *a* 농도 측정을 위해 일정량의 시료를 GF/F filter로 여과하였고, 여과지가 포함된 시험관에 100% 메탄올 10 ml를 첨가한 후 24시간 동안 4°C 냉장고에 보관하여 엽록소를 추출한 후 흡광광도계(Optizen 2120UV)를 이용하여 측정하여 Marker가 제시한 식에 따라 계산하였다(Marker, 1972; Marker *et al.*, 1980). 총인은 persulfate를 이용하여 시료 내에 존재하는 인을 인산염으로 산화시켜 ascorbic acid법으로 측정하였으며, 용존무기인은 시료를 GF/F filter를 이용하여 여과한 후 여과액을 ascorbic acid 법으로 발색시켜 885 nm에서 흡광도를 측정하여 정량하였다(APHA *et al.*, 1995). 총질소는 시료를 과황산칼륨으로 분해한 후 cadmium reduction method를 이용하여 분석하였다(APHA *et al.*, 1995).

2. 식물플랑크톤의 제한영양염 평가실험

담수에서 식물플랑크톤의 성장에 제한영양염으로 작용할 수 있는 인, 질소, 그리고 규소에 대한 제한영양염

실험에 사용한 배양액은 수심 0, 2, 5 m 수심에서 채취한 물을 GF/F 여과지로 여과한 후 혼합하여 사용하였다. 배양액에는 식물플랑크톤이 이용하기에 충분한 영양염 농도로서 질소 (2 mg N/l), 인 (100 µg P/l), 규소 (1 mg Si/l)를 첨가하였고, 식물플랑크톤의 밀도는 약 5,000 cells/ml로 접종하였다. 실험은 배양기 내에서 팔당호 표수층내의 광조건의 범위를 만족할 수 있는 150 µmol · m⁻² · s⁻¹ 광도와 20°C 온도조건에서 6일간 실시하였다. 배양기간 동안 시료 내 식물플랑크톤의 생물량은 엽록소 a 농도로 상기한 방법에 따라 측정하였다.

3. 식물플랑크톤의 성장률 평가실험

식물플랑크톤 성장률 실험에 사용된 배양액은 인이 첨가되지 않은 STM배지 (Table 1)를 사용하였으며, 실험은 인을 첨가하지 않은 대조구와 K₂HPO₄를 첨가하여 인의 농도를 30, 50, 100, 150 µg/l로 조절된 조건에서 수행하였다. 또한 규소의 농도가 0.5 mg/l 이하로 감소하면 규조류 종들의 다른 종들과의 경쟁에서 효과적으로 생존할 수 없으므로 (Wetzel, 2001) 규조류의 성장에 필요한 규소가 포함되어 있지 않은 STM배지에는 규소 (silicate)를 1 mg/l를 첨가하여 규조류의 성장에 제한을 받지 않도록 하였다. 식물플랑크톤의 초기밀도는 5,000 cells/ml를 유지하도록 배양액에 접종하였다. 성장실험은 팔당호 표수층내의 광조건의 범위를 만족할 수 있는 150 µmol · m⁻² · s⁻¹ 광도와 14 : 10 (Light : Dark)의 광주기를 가지는 배양기에서 수행하였다. 배양온도는 식물플랑크톤채집 시기의 현장 온도에 맞추어 수행하였다. 배양 기간동안 시료 내 식물플랑크톤의 생물량은 엽록소 a 농도로 상기한 방법에 따라 측정하였다.

인 농도에 따른 식물플랑크톤의 성장률(µ)은 각각의 인농도 조건에서 식물플랑크톤 생물량이 지수적으로 증가하는 단계에서의 성장률을 아래 식과 같이 계산하였고 (APHA *et al.*, 1995), 최대성장률(µ_{max})과 반포화농도

(K_a)는 steady state 조건을 가정하여 Monod 모델에 따라 Sigma plot (Version 7.0, SPSS Inc)을 이용하여 계산하였다.

$$\mu \text{ (day}^{-1}\text{)} = \ln (X_2/X_1)/(T_2 - T_1)$$

X₂ : T₂ 시간 경과 후 엽록소 a 농도 (µg/l)
 X₁ : 초기 엽록소 a 농도 (µg/l)
 (T₂-T₁) : 배양실험 경과 시간 (day)

4. 통계분석

수질 항목 간의 상호관계는 Pearson's correlation analysis를 이용하여 분석하였으며, 통계적 유의성은 P < 0.05을 기준으로 하였다 (SPSS 10.0). 영양염의 첨가에 따른 식물플랑크톤 성장량차이는 one-way ANOVA 및 Duncan-test를 통해 비교하였다 (SPSS 10.0).

결과 및 고찰

1. 팔당호 엽록소 a, 인, 질소 농도의 경시적 변화

2002년 3월부터 10월까지 표수층 (0~5 m)의 엽록소 a와 인농도의 경시적 변화를 조사한 결과, 표수층의 엽록소 a 농도는 7월에 가장 높았으며 (48.6 ± 17.6 µg/l), 강우로 인한 탁류의 유입이 있었던 8월에 낮았다 (12.9 ± 8.7 µg/l) (Fig. 1). 용존무기인 (DIP)은 조사기간 동안 전반적으로 매우 낮은 농도로 존재하였으며 (< 10 µg P/l), 특히 봄철 그 중에서 5월에 가장 낮은 농도 (2.2 ± 0.7 µg P/l)를 나타냈고, 강우로 인한 탁류의 유입이 있었던 8월에 높은 농도 (18.2 ± 7.8 µg P/l)를 보였다. 총인 (TP) 농도는 식물플랑크톤의 생물량이 가장 많았던 7월 (61.1 ± 12.9 µg P/l)과 강우로 인한 탁류의 유입이 있었던 8월 (69.4 ± 1.0 µg P/l)에 높은 농도를 나타냈으며, 6월에 가장 낮은 농도 (28.3 ± 3.9 µg P/l)를 나타냈다. 총인 농도와 엽록소 a의 농도는 비슷한 경시적인 경향을 보였으며, 탁류의 유입이 있었던 8월을 제외한 식물플랑크톤의 생물량과 총인은 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다 (r² = 0.70, n = 7, P < 0.001). 총질소 농도는 총인 농도와 마찬가지로 강우로 인한 탁류의 유입이 있었던 8월 (2.9 ± 0.1 mg N/l)에 높은 농도를 나타냈으며, 6월에 가장 낮은 농도 (1.6 ± 0.0 mg N/l)를 나타냈다. 이 결과는 하천의 수리적 영향을 크게 받는 인공댐호의 특성을 반영하는 현상이며, 체류시간이 짧아 댐 호 내 수리학적 교란이 큰 경우에는 유입되는 영양염의 농도가 높다고 할지라도

Table 1. Compositions of STM medium.

Macro nutrients (mg/l)		Micro nutrients (µg/l)	
NaNO ₃	25.5	H ₃ BO ₃	186
NaHCO ₃	15.0	MnCl ₂	264
K ₂ HPO ₄	1.04	ZnCl ₂	3.27
MgSO ₄ · 7H ₂ O	14.7	CoCl ₂	0.78
MgCl ₂	5.7	CuCl ₂	0.009
CaCl ₂ · 2H ₂ O	41.4	Na ₂ MoO ₄ · 2H ₂ O	7.26
		FeCl ₃	9.6
		Na ₂ EDTA · 2H ₂ O	300

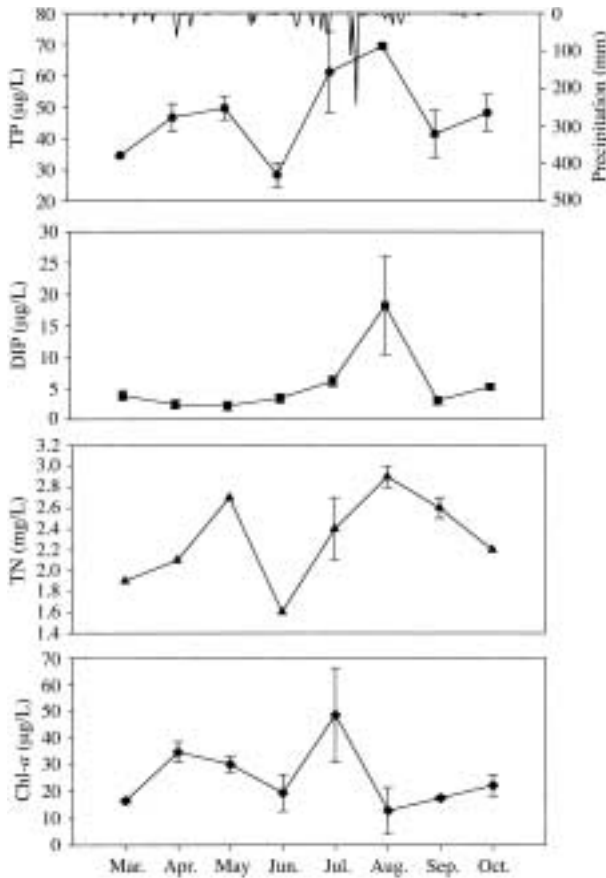


Fig. 1. Temporal changes of TP, DIP, TN, Chl. a concentration and Precipitation (mm) in Lake Paldang (—: precipitation).

식물플랑크톤의 생산성과 성장은 부유성물질에 의한 빛의 제한에 더욱 크게 영향을 받게 된다. 이는 유입수로부터 무기현탁물질이 유입되었을 때 팔당호 내 일차생산이 빛에 의해 제한된 결과와도 일치하며 (김과 김, 1990), 본 연구에서 8월의 결과 (Fig. 1)가 이러한 상황을 반영하는 것으로 보인다.

질소에 비하여 인의 농도는 엽록소 a 농도에 유의한 영향을 주어 결과적으로 TN/TP ratio에 따라 식물플랑크톤 생물량의 경시적 변화를 보였으며 (Fig. 2), TN/TP ratio와 식물플랑크톤의 생물량은 유의한 역상관 관계를 나타냈다 ($r^2 = 0.65$, $n = 7$, $P < 0.001$). 이러한 결과는 팔당호의 식물플랑크톤은 질소보다 인에 의해 영향을 크게 받음을 의미하는 것이며, 또한 식물플랑크톤의 영양염 제한성 여부를 판단하는 기준이 되는 현장의 N/P ratio (무계기준)로 평가할 때 팔당호는 높은 인 제한 호수로 판단할 수 있다 (Redfield, 1958; Hecky and Kilham, 1988).

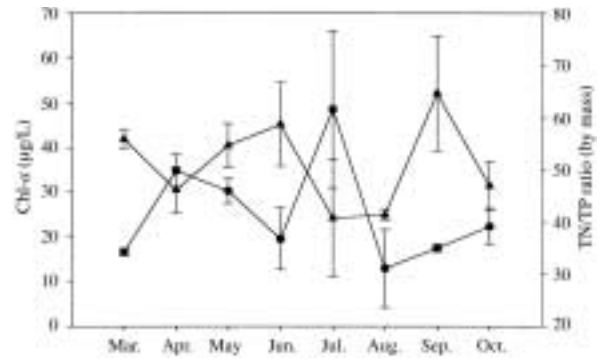


Fig. 2. Temporal changes of TN/TP ratio and Chl. a concentration in Lake Paldang, 2002 (●: Chl. a, ▲: TN/TP ratio).

팔당호는 다른 계절에 비해 봄철의 용존 무기인이 상대적으로 훨씬 낮아 이 시기에 높은 인 제한을 나타낸다.

2. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염 평가

영양염 첨가에 의한 식물플랑크톤의 생체량 증가를 기초로 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염을 평가할 때, 전반적으로 현장의 영양염 분석결과에서 팔당호 수환경이 인 제한 상태인 것과 일치하여 인에 의한 식물플랑크톤 증가가 뚜렷하였으나, 시기별로 각 영양염에 따른 차별적인 제한정도가 관찰되었다 (Fig. 3). 인 첨가에 따른 식물플랑크톤의 증가는 여름과 가을에 비해 봄철에 높게 나타났으며 ($P > 0.05$, ANOVA), 이는 팔당호 내 용존무기인의 농도의 계절적인 변화와 관련된 것으로 판단된다 (Fig. 1). 즉, 수체 내 존재하는 용존 무기인의 농도가 여름과 가을에 비해 봄철에 매우 낮았으므로 높은 인 제한상태에서 봄에 발생한 팔당호 식물플랑크톤이 첨가된 인에 의해 큰 영향을 받았기 때문으로 추정된다.

전반적으로 질소와 규소가 첨가된 배지에서의 식물플랑크톤 증가량은 영양염 첨가가 없는 배지에서의 증가량과 비교할 때 큰 차이가 나타나지 않았다 ($P > 0.05$, ANOVA, Fig. 3). 그러나, 여름 (6, 7, 8월)과 초가을 (9월)에는 식물플랑크톤발달에 대한 질소의 상대적 중요성이 높게 평가되었으며, 특히 집중강우로 인한 탁류의 영향이 있었던 8월에는 식물플랑크톤 생물량 증가에 대해 질소의 영향이 인보다 더 크게 나타났다 (Fig. 3). 이는 8월중에 강우와 함께 외부에서 많은 양의 인의 유입으로 인하여 호 내의 인 농도가 매우 높았던 것과 밀접한 관련이 있었을 것으로 추정된다.

팔당호의 현장 영양염 농도에 의해 평가한 (예를 들면,

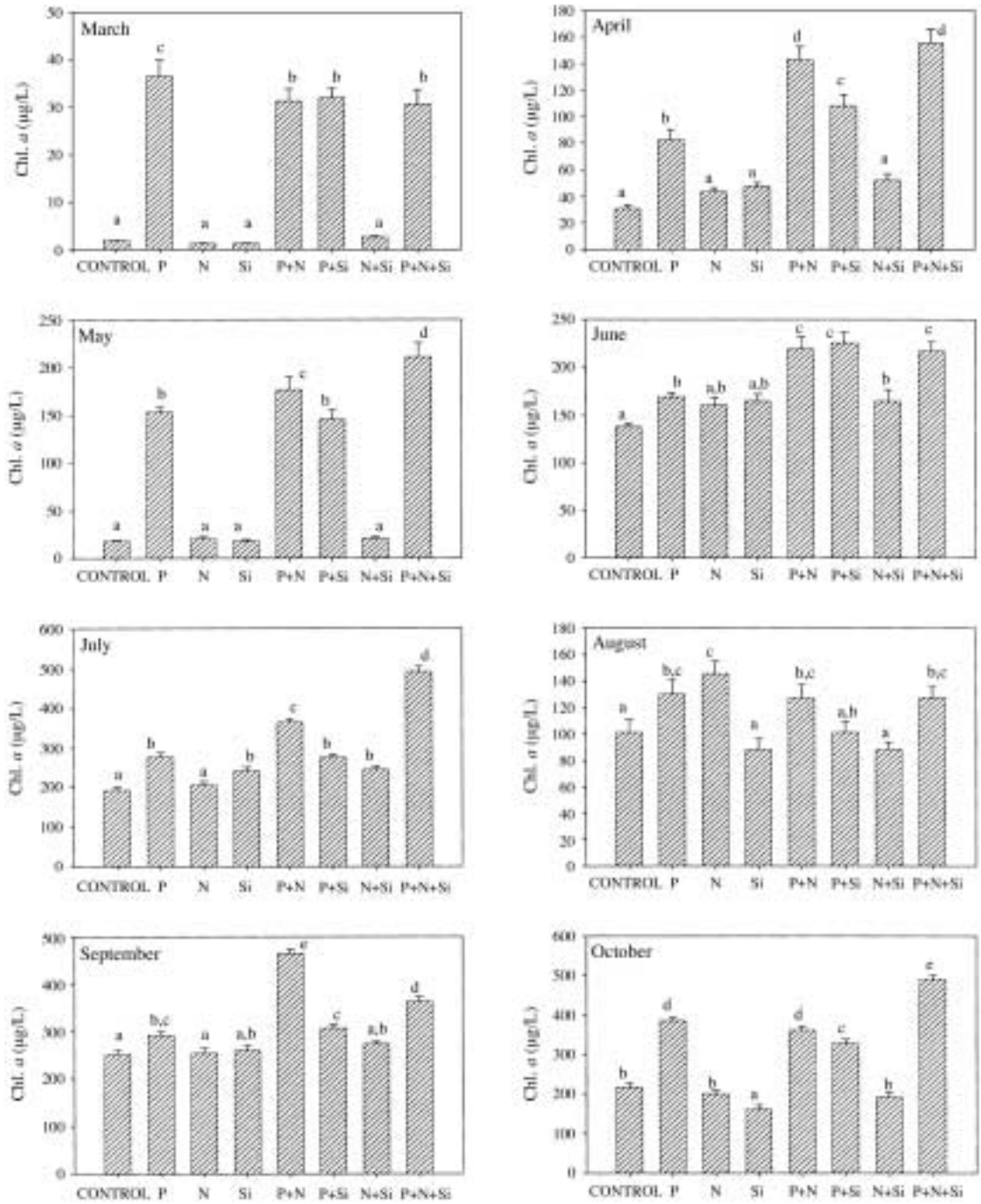


Fig 3. Comparison of algal growth shown as Chl. a increase in nutrients addition experiment during 6th days (March~October, 2002). Statistical difference designated by the alphabet was analyzed by Duncan-test. Different alphabets indicate statistical differences at $P < 0.05$.

TN/TP ratio) 결과는 연중 식물플랑크톤 발생에 대한 인의 제한성을 제시하고 있으나(한 등, 1993), 영양염 첨가에 의한 식물플랑크톤성장 잠재력(algal growth potential)을 평가한 본 연구의 결과는 팔당호 인의 제한정도

가 계절별로 차이가 나는 것을 보여주고 있다. 이러한 사실은 팔당호는 하천의 특성을 반영하여 수리학적 체류시간이 불규칙할 뿐만 아니라 강우와 관련된 외부로부터의 영양염과 부유성 현탁물질의 유입이 수계 내에

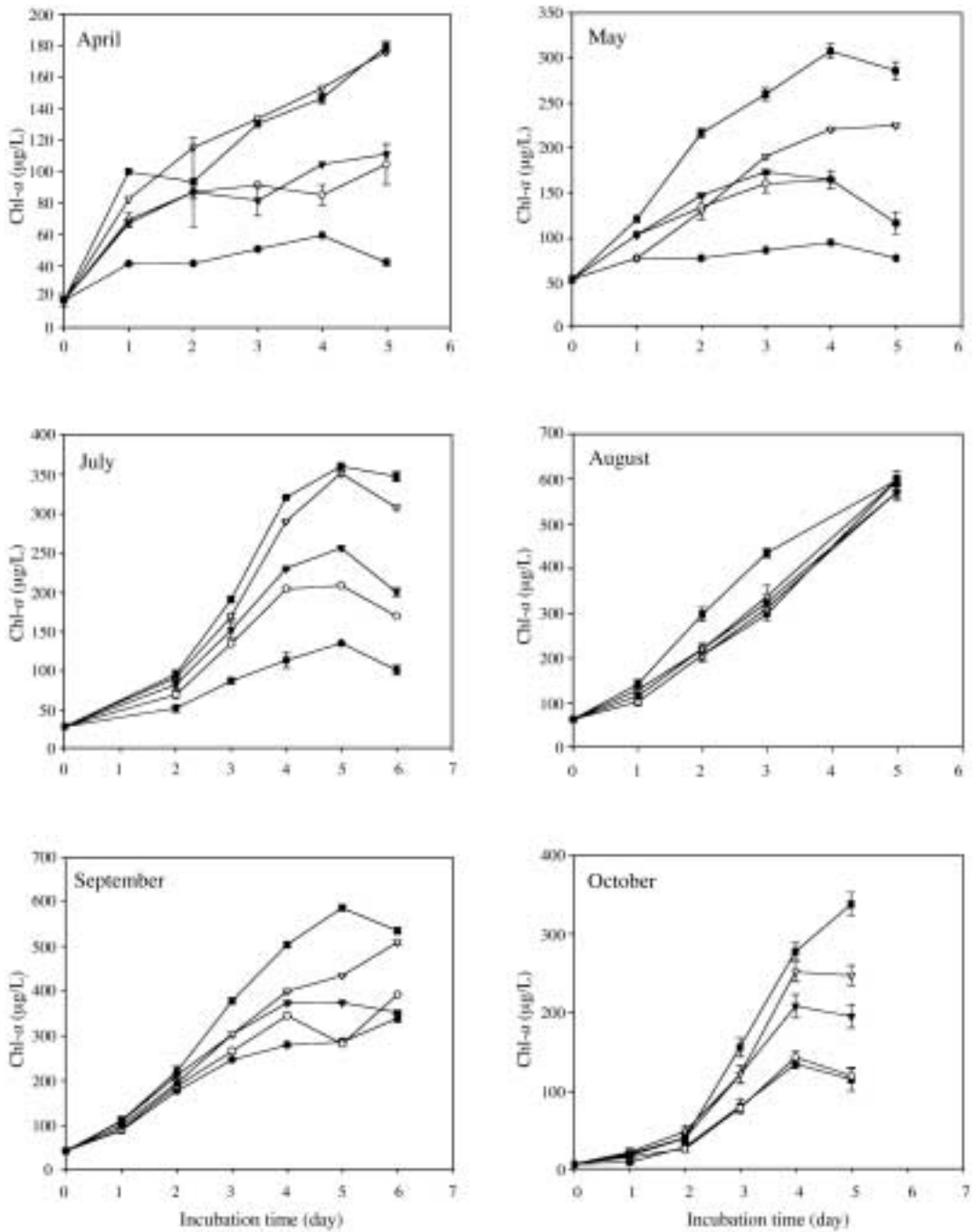


Fig. 4. Seasonal algal growth shown as Chl. *a* increases in different P concentrations added in STM medium using algal assemblages of Lake Paldang, 2002 (● : Control, ○ : 30 µg P/l, ▲ : 50 µg P/l, △ : 100 µg P/l, ■ : 150 µg P/l).

서의 식물플랑크톤에 의한 영양염 이용성에 영향을 미치는 것과 관련지을 수 있을 것으로 본다(황 등, 2002). 식물플랑크톤의 성장을 제한하는 다른 요인들이 팔당호에서도 그대로 적용된다고 가정할 때, 팔당호의 식물플랑크톤성장은 이러한 계절적 특성을 반영하며 봄과 가

을의 높은 인 제한으로부터 여름동안 인의 제한정도가 약화되고 질소의 제한성이 상대적으로 증가하는 것으로 설명할 수 있다. 이러한 사실로부터 팔당호의 식물플랑크톤은 단일 영양염에 의해 연중 제한되기 보다는 시기에 따라 최소한 인, 질소, 규소를 포함하는 세 가지 또는

Table 2. Growth kinetic parameters for phytoplankton assemblages in Lake Paldang, 2002.

Month	Dominant algal species	DIP (Dissolved Inorganic Phosphorus) (µg/l)	Growth kinetics			
			μ_{max} (day ⁻¹)	K_u (µM)	μ_{max}/K_u	Q_m (µgP/µg Chl. a)
April	<i>Asterionella fomsosa</i> <i>Aulacoseira ambigue</i>	2.4±0.7	1.0	0.3	3.3	0.39
May	<i>Aulacoseira granulata</i>	2.2±0.7	0.8	0.8	1.0	0.13
July	<i>Anabaena spiroides</i> <i>Microcystis aeruginosa</i>	6.1±0.9	1.0	0.3	3.3	0.36
August	<i>Aulacoseira ambigue</i>	18.2±7.8	0.8	0.3	2.7	0.39
September	<i>Asterionella fomsosa</i>	3.0±0.6	0.8	0.1	8.0	0.59
October	<i>Aulacoseira ambigue</i> <i>Cryptomonas erosa</i>	5.2±0.3	1.1	0.4	2.7	3.11

그 이상의 영양염에 의해 제한된다고 판단할 수 있다.

3. 인 농도에 따른 팔당호 식물플랑크톤의 성장특성

인 농도에 따른 식물플랑크톤의 최대 성장은 배양 후 4~5일째 나타났으며, 4월을 제외하고는 인 농도가 높은 조건일수록 식물플랑크톤의 생물량은 증가하였다 (Fig. 4). 엽록소 증가에 따른 식물플랑크톤의 성장패턴은 계절에 따른 차이를 나타냈으며, 이는 수중의 인산염농도의 이용효율과 관련이 있었을 것으로 추정된다. 즉, 배양 시작 후 처음 1일 동안의 대조구에 대한 인 첨가구의 엽록소 a의 증가량은 수중 인산염 농도가 가장 낮았던 4월과 5월에 가장 높았고 여름과 초가을 (특히, 8, 9, 10월)에는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이 결과는 4, 5월에 발생한 식물플랑크톤은 상대적으로 높은 인제한 상태를 반영하며 (Fig. 1), 결과적으로 세포 내 인농도 (cell quota)가 상대적으로 낮은 것과 관련될 수 있을 것이다 (Table 2). 특히, 8월의 경우에는 인 농도 구배에 따른 성장률의 뚜렷한 차이는 없었다. 제한영양염 실험결과에서 나타난 바와 같이 탁류가 유입된 8월의 팔당호 수환경이 다른 시기와는 달리 외부로부터 인의 공급이 충분해짐에 따라 식물플랑크톤 성장이 첨가된 인의 농도에 거의 영향을 받지 않았을 것으로 추정되며 세포 내에 저장된 인을 성장에 이용하였을 가능성이 제기된다.

평형상태에서 단일 제한영양염에 대한 반응으로서 식물플랑크톤의 성장은 Monod 모델에 의하여 표현되며, 모델은 영양염 포화상태의 성장 (μ_{max} : nutrient-saturated growth)과 영양염에 대한 반포화상수 (K_u : half saturation constant)로 구성된다. 이때 Monod모델은 식물플랑크톤 세포 내의 인 함량인 cell quota와 영양염 흡수간

에 선형적인 관계를 요구한다 (Morel, 1987). 본 연구에서 나타난 바와 같이 계절적인 변이에도 불구하고 인이 첨가되지 않은 대조구(control)에서 식물플랑크톤 성장은 (Figs. 4, 5) K_u 측정값에 대해 상당한 변이를 유발할 수 있고 이 결과 Monod 모델의 적용에 있어 신뢰성을 저하시킬 수 있는 잠재성이 있다 (Grover, 1989). 이러한 문제점의 원인으로서 실험에 사용된 식물플랑크톤이 종간의 차별적인 성장역학적 특성을 보유하는 복잡한 현상 군집으로 이루어진 것과 (Kilham, 1984) 각 식물플랑크톤 종들의 인에 대한 cell quota의 차이 (Rhee and Gotham, 1981)를 제기할 수 있다. 본 연구에서 7월 이후 여름과 가을동안 나타난 대조구에서의 식물플랑크톤 성장은 cell quota와 관련이 있었을 것으로 판단된다. 일반적으로 식물플랑크톤의 성장은 세포 내 영양염 함유량 (cell quota)에 따라 달라지며 (Droop, 1968), 과잉으로 저장된 높은 cell quota는 장기간에 걸쳐 생장에 이용되기 때문에 (Reynolds, 1984) 팔당호 식물플랑크톤종들도 성장률과 반포화농도가 달랐을 것으로 추정된다. 식물플랑크톤의 cell quota는 인이 제한된 조건에서의 식물플랑크톤 성장에 영향을 주는 요인으로서 작용할 수 있으며, 세포내 저장된 인의 양이 많을수록 인이 제한된 환경에서의 식물플랑크톤성장에 필요한 영양염 흡수에 많은 영향을 미칠 것이다. Monod 모델의 식을 역추정 하여 계산한 결과, 팔당호 식물플랑크톤의 cell quota 값은 5월에 0.13 µg P/µg Chl. a로 가장 낮고, 10월에 3.11 µg P/µg Chl. a로 높은 값을 나타냈다 (Table 2). 봄 보다도 상대적으로 여름과 가을의 높은 cell quota는 이 시기동안 수중의 높은 인농도를 반영한다고 볼 수 있을 것이다 (Fig. 1).

Monod 모델에 따른 성장역학 실험에서 팔당호 식물

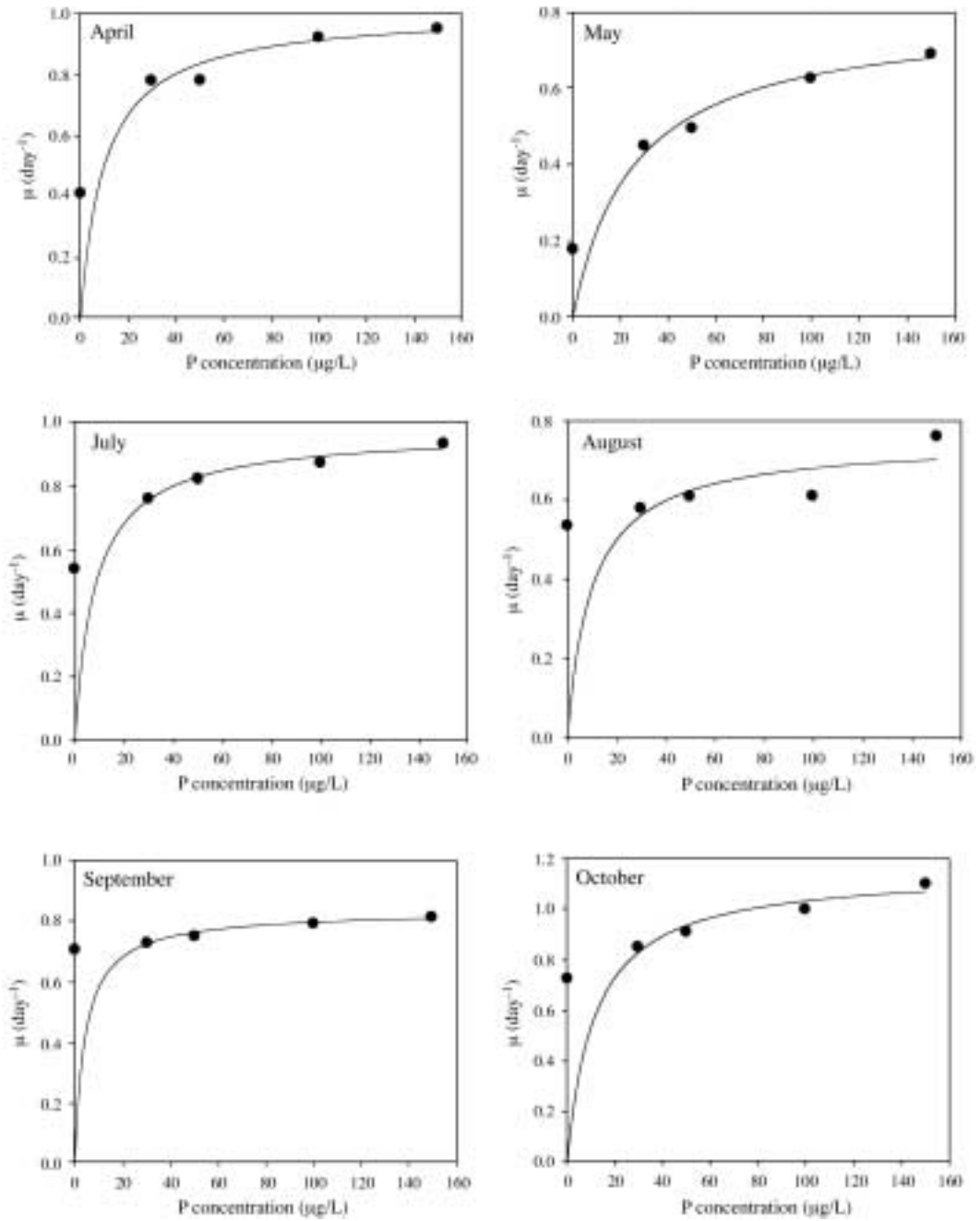


Fig. 5. Algal growth curves fitted to the Monod model in Lake Paldang, 2002.

플랑크톤의 최대 성장률(μ_{max})은 0.8~1.1 day^{-1} 의 범위로 계절에 따른 큰 변이는 없었으나, 최대성장율을 위해 요구되는 인농도의 1/2 농도를 의미하는 반포화 농도(K_u)는 0.1~0.8 μM 로 5월에 가장 높고 9월에 가장 낮은 것으로 조사되었다(Fig. 5, Table 2). 반포화농도는 식물플랑크톤의 영양염에 대한 경쟁력을 평가하는데 이용되며 (Van Donk and Kilham, 1990), 낮은 반포화농도는 낮

은 농도조건에서 식물플랑크톤이 영양염을 빠르게 이용하여 경쟁적으로 우위를 점할 수 있는 능력으로 설명된다(Grover, 1989). 기존에 연구된 결과와 비교할 때, 본 연구에서는 비록 온도와 광도 등의 배양 조건이 상이하고 실험에 사용된 식물플랑크톤 종이 현장에서 채집된 혼합종이라는 차이가 있기는 하지만 팔당호 식물플랑크톤 군집의 최대성장률과 반포화 농도는 비교할 수 있는

Table 3. Reported kinetic values of maximum growth rate (μ_{max}) and half saturation concentration (K_u) in Monod model.

Algal species	μ_{max} (day ⁻¹)	K_u (μ M)	References
<i>Asterionella formosa</i>	0.67	0.61	Holm and Armstrong (1981)
	0.07	0.02	Tilman and Kilham (1976)
<i>Microcystis aeruginosa</i>	1.08	0.1	Shin (1998)
	1.04	0.3	Heo (1990)
	0.25	0.2	Holm and Armstrong (1981)
<i>Aulacoseira</i> sp.	0.8	0.3	Shin (1998)
<i>In situ</i> aglal assemblage in Lake Paldang	0.8~1.1	0.1~0.8	This study

범위에 존재하고 있다 (Table 3).

성장역학 실험을 통해 팔당호에서 계절에 따른 식물플랑크톤 발생은 출현종의 인에 대한 반포화 농도와 세포내 저장된 인의 농도의 차이로 설명될 수 있다. 팔당호 식물플랑크톤의 성장역학은 계절적인 변이를 나타냈으며 반포화농도는 봄보다는 여름과 가을에 더 낮게 나타나 동일한 인 농도 조건이라 하더라도 봄에 비해 여름과 가을철에 발생한 식물플랑크톤의 성장이 경쟁적으로 빠르게 발달할 수 있는 잠재성이 제시되었다. 시기별로 출현하는 식물플랑크톤 종과 영양염 제한요인의 정도에 차이가 있을 수 있지만 영양염에 대한 식물플랑크톤 간의 경쟁력 평가를 위해 사용되는 최대성장률에 대한 반포화 농도의 비 (μ_{max}/K_u) 역시 9월에 가장 높게 나타나 이러한 사실을 뒷받침하고 있다 (Healey and Hendzel, 1980). 이시기의 식물플랑크톤 발달에 관여하는 요인들로서 하계의 몬순이후에 팔당호 수체가 안정되고 수리학적 체류시간이 길어짐에 따른 물리적 영향도 부정할 수는 없으나 영양염의 이용에 따른 식물플랑크톤의 성장이 수체의 물리적 특성과 밀접하게 관련되어 있는 것은 분명하다 (한 등, 1995).

식물플랑크톤의 개체군 성장은 영양염 이외에 온도, 광도, 포식자 등 여러 가지 무생물·생물학적 요인과 함께 식물플랑크톤의 종들 간의 특이한 생리학적 성장특성에 따라 변이가 나타나는 것으로 알려져 있다 (Rhee and Gotham, 1981; Sterner and Grover, 1998; Wetzel, 2001). 식물플랑크톤의 성장역학적 특성과 관련된 parameter들 만으로 현장 식물플랑크톤 군집 전체의 발생기작 및 천이현상을 이해하는데 한계는 인정되지만 식물플랑크톤의 성장역학이 자연생태계에서 식물플랑크톤 군집의 발달과 경쟁에 따른 천이현상을 이해하는데 가장 근원적인 접근법이라는 것은 이론의 여지가 없다

(Grover, 1989; Sommer, 1989). 이러한 사실을 바탕으로 할 때, 본 연구에서는 현장 식물플랑크톤 군집 전체를 이용하여 단일 종들의 특이한 성장특성들이 혼합되었을 가능성이 있고 식물플랑크톤의 초기 접종 밀도가 상당히 높아 종간의 경쟁을 완전히 배재하지 못한 점으로 인하여 단일 우점종에 대한 보다 정밀한 추후연구의 필요성을 제기하고 있다. 그러나 팔당호에서 식물플랑크톤 발생의 원인과 기작을 이해하고자 식물플랑크톤의 성장역학적 측면에서 최초로 시도한 본 연구는 부영양화에 따른 식물플랑크톤 종들의 개체군 동태학을 이해하고 식물플랑크톤의 천이를 예측하는데 중요한 기초자료를 제공할 것으로 기대한다.

적 요

팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 생리학적 성장특성을 평가하기 위하여 2002년 3월부터 10월까지 팔당호의 수질환경 조사와 함께 실내 배양실험을 실시하였다. 총인의 농도와 Chl. a의 상관성 분석결과, 팔당호의 호수생산성은 인의 영향을 많이 받으며 TN/TP ratio와 식물플랑크톤의 성장잠재력 실험을 통해서도 제한영양염은 인으로 평가되었다. 특히, 봄철이 다른 계절에 비해 상대적으로 용존무기인이 낮은 농도로 존재하기 때문에 높은 인 제한을 받는 것으로 나타났다. 그러나 인의 제한정도는 계절적인 변이를 나타내었으며, 시기에 따라 질소와 규소에 의한 제한가능성도 나타났다. 팔당호 식물플랑크톤 군집의 최대성장률 (μ_{max})은 0.8~1.1 day⁻¹의 범위로 나타났으며, 반포화농도 (K_u)는 0.1~0.8 μ M로 5월에 0.8 μ M로 가장 높고 9월에 0.1 μ M로 가장 낮은 것으로 조사되었다. 이는 영양염 흡수에 영향을 미치는 인의 cell quota와 관련이 있는 것으로 나타났으며, 5월에 0.13 μ g P/ μ g Chl. a로 낮은 값을 나타냈다. 식물플랑크톤의 성장특성 분석을 통해 팔당호에서는 봄에 비해 여름과 가을철에 발생한 식물플랑크톤의 성장이 경쟁적으로 빠르게 발달할 수 있는 잠재성이 있는 것으로 판단된다. 결과적으로, 팔당호 식물플랑크톤 성장은 주로 인에 의하여 제한되며 여름 몬순 이후 수체의 안정기 동안 높은 성장을 할 수 있는 생리적 특성을 가지고 있는 것으로 추정된다.

사 사

본 연구는 한강유역관리청의 “한강기초조사(2002)”의

연구비에 의해 지원되었으며, 이에 사의를 표합니다. 연구의 현장조사 및 시료채취에 도움을 준 건국대학교 육수학/생태공학 연구실의 박구성, 박정환에게 감사드립니다. 그리고 원고심사를 통해 논문의 질을 향상시키는데 도움을 준 두 심사자에게 감사드립니다.

인 용 문 헌

- 김동섭, 김범철. 1990. 팔당호의 일차생산, 한국육수학회지 **23**: 167-179.
- 김동섭, 김범철, 황순진, 박주현. 1995. 팔당호의 부영양화 경향, 한국수질보전학회지 **11**: 295-302.
- 김범철, 김동섭, 권오길. 1989. 팔당호의 부영양화 실태, 한국수질보전학회지 **5**: 39-46.
- 김용재. 1998. 팔당호의 식물플랑크톤 군집의 생태적 특성, 한국육수학회지 **31**: 225-234.
- 신재기. 1998. 낙동강 부영양화에 따른 담수조류의 생태학적 연구, 인제대학교 대학원 박사학위 논문, 202pp.
- 신재기, 조부래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성, 한국육수학회지 **33**: 387-394.
- 한명수, 유재근, 유광일, 공동수. 1993. 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화: 과거와 현재, 한국육수학회지 **26**: 141-149.
- 한명수, 어윤열, 유재근, 유광일, 최영길. 1995. 팔당호의 생태학적 연구 2. 식물플랑크톤의 군집 구조의 변화, 한국육수학회지 **28**: 335-344.
- 한명수, 이동석, 유재근, 박용철, 유광일. 1999. 팔당호의 생태학적 연구, 한국육수학회지 **32**: 8-15.
- 홍성수. 2000. 수도권 상수원 수질과 부영양화에 관한 환경생태적 연구, 한양대학교 대학원 석사학위 논문, 62pp.
- 허순철. 1990. 녹식물플랑크톤 *Scenedesmus* sp. 및 남조류 *Microcystis aeruginosa*의 증식 특성에 관한 실험적 연구, 홍익대학교 대학원 석사학위 논문, 56pp.
- 황순진, 안광국, 류재근. 2002. 호소생태학-저수지, 인공댐호의 육수학, 신광출판사, 373pp.
- APHA-AWWA-WEF. 1995. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (19th ed.), APHA-AWWA-WEF, Washington D.C. USA.
- Ahlgren, I. 1988. Phosphorus as a growth-regulating factor relative to other environmental factors in cultured algae. *Hydrobiologia* **170**: 191-210.
- Borchardt, M.A. 1996. Nutrients. In: R.J. Stevenson, M.L. Bothwell, R.L. Lowe (Eds.), *Algal Ecology*, Academic Press, New York, pp. 184-227.
- Droop, M.R. 1968. Vitamin B12 and marine ecology: IV. The kinetics of uptake, growth and inhibition in *Monochrysis lutheri*. *J. Mar. Biol. Asso. U.K.* **48**: 689-733.
- Grover, J.P. 1989. Phosphorus-dependent growth kinetics of 11 species of freshwater algae. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 341-348.
- Healey, F.P. and L.L. Hendzel. 1980. Physiology indicators of nitrogen deficiency in lake phytoplankton. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **37**: 442-453.
- Hecky, R.E. and P. Kilham. 1988. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: A review of recent evidence on the effects of enrichment. *Limnol. Oceanogr.* **33**: 796-822.
- Holm, N.P. and D.E. Armstrong. 1981. Role of nutrient limitation and competition in controlling the population of *Asterionella formosa* and *Microcystis aeruginosa* in semicontinuous culture. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 622-634.
- Kilham, S.S. 1978. Nutrient kinetics of freshwater planktonic algae using batch and semicontinuous methods. *Mitt. Internat. Verein. Limnol.* **21**: 147-157.
- Kilham, S.S. 1984. Silicon and phosphorus growth kinetics and competitive interactions between *Stephanodiscus minutus* and *Synedra* sp. *Verh. Int. Ver. Theor. Angew. Limnol.* **33**: 776-795.
- Marker, A.F.H. 1972. The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwater. Biol.* **2**: 361-385.
- Marker, A.F.H., E.A. Nusch, I. Rai, and B. Riemann. 1980. The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: Conclusions and recommendations. *Arch. Hydrobiol. Beih.* **14**: 91-106.
- Morel, F.M.M. 1987. Kinetics of nutrient uptake and growth in phytoplankton. *J. Phycol.* **23**: 137-150.
- Redfield, A.C. 1958. The biological control of chemical factors in the environment. *Amer. Sci.* **46**: 205-255.
- Reynolds, C.S. 1984. *The Ecology of Freshwater Phytoplankton*. Cambridge Univ. Press, London. pp. 36-39.
- Rhee, G-Y. and I.J. Gotham. 1981. The effect of environmental factors on phytoplankton growth: Temperature and interactions of temperature with nutrient limitation. *Limnol. Oceanogr.* **26**: 635-648.
- Sommer, U. 1989. Nutrients status and nutrient competition of phytoplankton in a shallow, hypertrophic lake. *Limnol. Oceanogr.* **34**: 1161-1173.
- Sterner, R.W. and J.P. Grover. 1998. Algal growth in warm temperate reservoirs: Kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients. *Wat. Res.* **32**: 3539-3548.
- Tilman, D. 1982. *Resource competition and community structure*. Princeton, NJ, USA.

- Tilman, D. and S.S. Kilham. 1976. Phosphate and silicate growth and uptake kinetics of the diatoms *Asterionella fomsa* and *Cyclotella meneghiniana* in batch and semi-continuous culture. *J. Phycol.* **12**: 375-383.
- Van Donk, E. and S.S. Kilham. 1990. Temperature effects on silicon- and phosphorus-limited growth and competitive interactions among three diatoms. *J. Phycol.* **26**: 40-50.
- Wetzel, R.G. 2001. *Limnology: Lake and River Ecosystems*. (3rd ed.). Academic Press, California, USA, 1006pp.

(Received 30 Apr. 2003, Manuscript accepted 30 May 2003)