Journal of Korean Society on Water Quality, Vol. 24, No. 5, pp.550-555 (2008)

얕은 부영양 저수지에서의 식물플랑크톤 성장 역학

김호섭 · 황순진*,† · 공동수

국립환경과학원
*건국대학교 환경과학과

Growth Kinetics of Phytoplankton in Shallow Eutrophic Reservoir

Ho-Sub Kim · Soon-Jin Hwang*,† · Dong-Soo Kong

National Institute of Environmental Research
**Department of Environmental Science, Konkuk University*
(Received 3 June 2008, Accepted 1 August 2008)

Abstract

This study was conducted to assess the growth characteristics of phytoplankton and to understand seasonal dynamics of phytoplankton in response to limiting nutrients in an agricultural reservoir from November 2002 to December 2003. Marked increase of chl.*a* concentration observed in July (99.0 ㎍/L) and November (109.7 ㎍/L) after heavy rainfall. TP concentration ranged 48.0~126.6 ㎍/L, and its the temporal variation was similar to that of chl.*a* concentration. *Microcystis* spp., dominant phytoplankton species were used for the growth kinetics experiment, except for the season when *Aulacoseira* spp. (March, April) and *Aphanocapsa* sp. (May) dominated. In the temperature range between 10~25°C, the rate of growth increase per 10°C was almost two folds. The highest maximum growth rate (μ_{max}=1.09 day^{-1}) of phytoplankton observed September, and μ_{max} was lowest (0.34 day^{-1}) in March when *Aulacoseira* spp. dominated. The μ_{max} (0.78±0.20 day^{-1}) was relatively high in the summer season when water temperature is above 20°C and cyanobacteria dominated compared to the spring when diatoms dominated (0.43±0.08 day^{-1}). The maximum growth rate (0.55±0.12 day^{-1}) and the half saturation concentration (K_s=0.73±0.15 μM) of cyanobacteria during winter season (November, December) was higher than those of diatoms. However, the μ_{max} and K_s of cyanobacteria in December was similar to those of diatom, reflecting that diatom cell quota (Mean 48.4 pgP/cell) was greater than cyanobacteria (34.0 pgP/cell) during this time.

keywords : Growth kinetics, Half saturation concentration, Limiting nutrients, Maximum growth rate, Seasonal dynamics

1. 서 론

국내 대부분의 부영양 호소에서 인은 식물플랑크톤 성장을 억제하는 제한요인으로 평가되고 있다(김호섭 등, 2007a). 부영양 수체에서 영양상태가 높을수록 인과 식물플랑크톤 생물량과의 상관성은 높게 나타나 수체로 공급되는 인의 양은 식물플랑크톤의 생물량을 결정하는 중요한 요인으로 인식되고 있다(Forsberg and Ryding, 1980). 또한 인 농도는 식물플랑크톤 종 간의 천이를 야기하는 것으로 알려져 있어(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994; Smith et al., 1987; Sommer et al., 1986), 인 제한 조건에서 식물플랑크톤의 성장률과 반포화농도로 설명되는 종 특이성은 개체군의 발달과 천이를 예측하는 지표로 활용되기도 한다(Cichra et al., 1995; Reynolds, 1993; Tilman, 1982). 인이 제한된 조건의 식물플랑크톤은 적은 농도에서 빠르게 성장하는 종이 성장에 유리한 반면 외부로부터 인이 충분히 공급되면 인 농도보다는 상대적으로 성장률이 높은 종이 우점할 수 있다(Grover, 1989; Horne and Goldman, 1994).

인에 대한 종간의 특이성이 인이 제한된 조건하에서 경쟁관계를 이해함에 있어 지표로 활용 가능하더라도 현장에서의 식물플랑크톤 성장과 천이는 인에 대한 식물플랑크톤의 생리적 특성과 더불어 여러 가지 환경요인을 종합적으로 검토할 필요가 있다. 이는 식물플랑크톤 성장이 인에 민감하게 반응하는 수체에서도 개체군의 발달과 천이는 수생계의 복잡한 먹이망 구조와 수온, 광도 등 다양한 환경요인의 복합적 작용에 의한 결과로 이해될 필요가 있기 때문이다(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994). Reynolds(1984)는 온대호수에서 여름철에는 인을 포함한 영양염과 같은 화학적 요인에 의해 식물플랑크톤 생물량과 종조성이 결정되는 반면, 봄철에는 주로 수온, 유광층 깊이와 같은 물리적요인의 중요성을 강조한 바 있다. 수온은 인과 더불어 부영양 수체에서 남조류 증식과 지속시간을 결정하는 중요한 요인으로 평가되고 있으며, 특히 남조류 종간의 천이를 유발하는 인자로도 알려져 있다(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994; Van der Westhuizen and Eloff,

† To whom correspondence should be addressed.
sjhwang@konkuk.ac.kr

1985; Watanabae and Oishi, 1985). 유입수 증가에 따른 체류시간 감소는 충분한 인 공급에도 불구하고 식물플랑크톤의 성장을 저해할 수 있다(최광현 등, 2003; Kalff, 2002).

수체 내 식물플랑크톤 성장과 천이와 관련된 많은 인자들에 대한 선행 연구에서 인은 양적인 면에서 그 중요성이 강조된 바 있으나(김호섭과 황순진, 2004c; 김호섭 등, 2007a; 신재기 등, 2000; 한명수 등, 1993) 식물플랑크톤의 생리적 특성으로부터 해석하고자 한 연구는 적다(최광현 등, 2003). 비록 제한 영양염 조건하에서 제시된 종 특이성으로 여러 환경이 복합적으로 작용하는 현장에서의 개체군의 발달과 천이를 예측하는 것은 한계가 있다하더라도, 계절적인 식물플랑크톤 발달과 천이를 이해하고 해당수체의 수질개선을 위한 정책을 수립함에 있어 유용한 정보를 제공할 수 있을 것이다.

본 연구는 제한영양염에 대한 식물플랑크톤의 반응결과로부터 식물플랑크톤의 발달과 종 천이를 이해하고자 시도하였다. 이를 위해 현장에서 채취한 식물플랑크톤 군집의 인 제한 조건에서의 성장률과 반포화농도 그리고 세포내 인 저장능력을 비교하였다.

2. 연구방법

2.1. 대상저수지 및 조사시기

신구저수지는 충청남도 보령시 주안면에 위치하고 있으며 수표면적이 0.1 km^2이고 최대수심이 7.0 m인 소규모 농업용 저수지이다. 실험은 2002년 11월부터 2003년 11월 까지 총 14회에 걸쳐 수행하였다.

2.2. 수질

수질분석을 위한 시료는 표층수를 채수하였으며, GF/F여과지로 여과한 후 엽록소 *a* 농도 측정에 이용하였다. 엽록소 농도는 메탄올로 24시간 냉암소에서 엽록소 *a*를 추출한 후 흡광도를 측정하여 계산하였다(Maker, 1972; Maker et al., 1980). 총인은 persulfate로 전처리한 후 ascorbic acid 법으로 분석하였다(APHA, 1995).

2.3. 성장역학

성장실험에 이용하는 식물플랑크톤은 현장에서 망목의 크기가 30 ㎛인 네트를 이용하여 표층에서 채집하였고 대형동물플랑크톤을 제거하기 위해 망목의 크기가 200 ㎛인 네트로 여과하였다. 성장역학 실험에 사용된 식물플랑크톤 우점종과 세포수는 Sedgwick-Rafter 계수판에 넣어 광학현미경(x 200)하에서 실시하였다. 실험은 수질 조사당시의 현장수온을 유지하고 광도가 120 μE/m^2/s, 14 : 10의 L/D(Light: Dark)주기로 조사되는 배양기에서 실시하였다. 성장률 실험은 식물플랑크톤 우점종에 따라 Chu No 10(규조류)과 MA 배지(남조류)를 사용하였다(Bold and Wynne, 1978; Ichimura, 1978). 실험은 500 mL 삼각플라스크에 인을 첨가하지 않은 대조구와 K_2HPO_4를 첨가하여 인 농도를 20, 40, 60, 80, 100 ㎍/L으로 조절한 조건으로 각 처리당 3 반복하였으며 회분식 배양으로 이루어졌다. 성장률 측정을 위해 배양 초기와 일정간격으로 25 mL시료를 2반복으로 채취하여 엽록소 *a* 농도를 측정하였다. 서로 다른 인 농도조건에서의 식물플랑크톤 성장률(μ)을 계산하였고(식 (1); APHA, 1995), 최대 성장률(Maximum growth rate, μ_{max})과 반포화농도(Half saturation concentration, K_s)는 Monod가 제시한 식(식 (2))(Monod, 1950)에 따라 Sigma plot(Version 8.02, SPSS Inc)을 이용하여 계산하였다.

$$\mu\ (/day) = Ln(X_2/X_1)/T \quad (1)$$

여기서, X_1과 X_2는 성장률 산정을 위해 선택된 측정기간의 초기와 끝의 엽록소 *a* 농도를 의미하며, T(day)는 선택된 기간의 시간을 의미한다.

$$\mu = \frac{\mu_{\max} \times S}{K_s + S} \quad (2)$$

여기서, μ_{max}는 최대성장율(day^{-1}), S는 영양염농도(μM) 그리고 K_s는 반포화농도이다. 세포 당 인 함량(cell quota)은 인이 첨가되지 않은 조건에서의 성장률을 Monod식에 적용하여 추정된 영양염 농도(S, pgP/cell)로 간주하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수질

수체 내 엽록소 *a* 농도와 TP 농도는 집중강우 이후에 증가하는 경향을 보였다(Fig. 1). 조사기간 동안 총 강우량 1,359.3 mm 중 6월 153 mm, 7월 309.5 mm, 8월 310 mm로 연중 총강우량의 45.6%가 7월과 8월에 집중되었다. 엽록소 *a* 농도는 규조류가 우점한 3월 28.8 ㎍/L로 가장 낮았으며, 6월 강우 이후 7월부터 증가하여 11월까지 엽록소 *a* 농도는 63.0~109.7 ㎍/L 범위를 보였으며 남조류가 우점하였다. 조사 기간 중 최대 엽록소 *a* 농도는 2003년 11월(109.7 ㎍/L)에 조사되었고, 7월에도 비교적 높은 농도(99.0 ㎍/L)를 유지하였다.

수체 내 TP 농도는 48.0~126.6 ㎍/L 범위로 엽록소 *a* 농도와 유사하게(r^2=0.42, *p*=0.012, n=14) 6월부터 증가하여 11월까지 높은 수준을 유지하였다. 본 연구저수지에서 인은 식물플랑크톤의 성장에 있어 제한요인이며(김호섭과 황순진, 2004a) 유역으로부터 유입되는 인의 양에 대한 평가에서 수표면적당 인 유입부하량은 1.6 g/m^2/yr로 과잉임계부하량을 초과하는 것으로 제시된 바 있다(김호섭과 황순진, 2004b). 또한 유입되는 총인 중 86.8%가 용존형태로 유입되며 77.7%가 식물플랑크톤 성장에 이용이 용이한 용존무기인 형태로 유입되는 것으로 조사된 바 있다(김호섭과 황순진, 2004b). 따라서 7월 엽록소 *a* 농도 증가는 수온증가와 함께 6월 강우시 유역으로부터 유입된 많은 양의 인에 기인된 것으로 판단된다(김호섭과 황순진, 2004b; Lathrop and Carpenter, 1990).

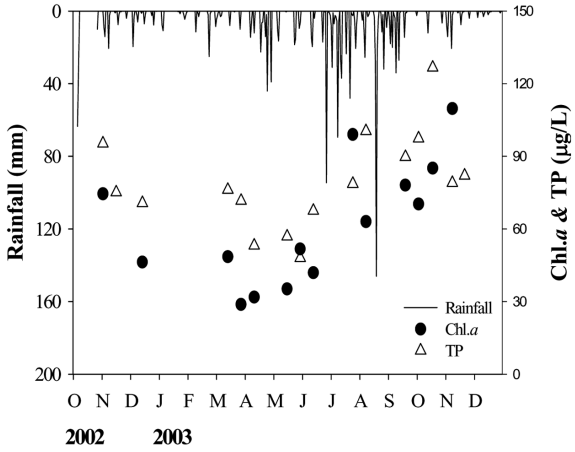

Fig. 1. Temporal variations of rainfall, TP and chl. *a* concentration from November 2002 to November 2003.

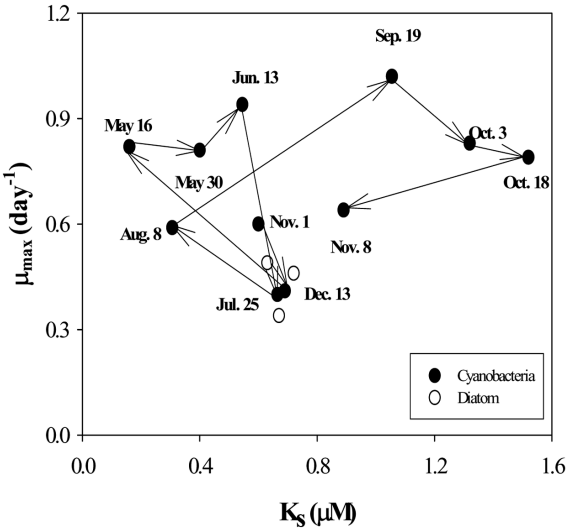

Fig. 2. Temporal variations of μmax and Ks for phytoplankton assemblages from November 2002 to November 2003. Open circles indicate the spring season when diatom dominated.

3.2. 식물플랑크톤 성장율

단일 영양염 제한상태에서 진행된 실험에서 성장률은 수온에 따라 증가하였으며, 동일종이라 하더라도 계절에 따른 최대성장률의 차이가 있었다(Table 1, Fig. 2). 실험에 사용된 식물플랑크톤 군집 내 우점종은 3월과 4월에 *Aulacoseira* spp., 5월 *Aphanocapsa* sp.를 제외하고는 *Microcystis* spp.였다. 실험기간 동안 최대성장률은 0.34~1.02 day^{-1}범위로, 9월에 가장 높았고 3월에 가장 낮았다. 7월과 8월의 낮은 최대 성장율은 본 연구에서 제한 영양염으로 고려한 인 외 질소의 제한가능성도 있다. 년간 총 유입부하량의 40.5%가 7월에 공급되었으며 이 시기에 수행된 인과 질소에 대한 NEB실험결과에서도 인과 질소를 각각 첨가한 경우와 영양염이 첨가되지 않은 대조구의 성장률 차이가 거의 없는 반면, 인과 질소를 모두 첨가한 실험구에서 성장률이 증가하는 것으로 보고된 바 있다(김호섭과 황순진, 2004a). 그러나 방법론적인 측면에서 7월의 낮은 성장률은 실험 초기 접종된 세포밀도가 (엽록소 *a* 농도, 61.1 μg/L) 너무 높아 과소평가되었을 가능성도 있을 수 있다.

본 연구대상 저수지에서의 식물플랑크톤의 대량증식은 강우 시 영양염 공급 후 1~2개월 내에 발생하였으며, 대량증식 전 식물플랑크톤은 제한영양염에 민감하게 반응하였다(Table 1). 5월과 6월의 식물플랑크톤의 높은 성장률(Mean 0.86 day^{-1})과 6월의 94.5 mm의 선행강우 후 7월 엽록소 *a* 농도가 99.0 μg/L까지 증가하였다. 11월 엽록소 *a* 농도 증가(109.7 μg/L)에 앞선 9월과 10월에도 높은 성장률(Mean 0.88 day^{-1})을 나타냈으며, 9월 조사에 앞서 년중 일 최대 강우량(146 mm)이 있었다. 7월과 11월 남조류 대량증식이전 성장률은 큰 차이가 없었으나 반포화농도는 7월과 11월 이전 조사 시 각각 평균 0.37 μM과 1.05 μM로 11월에 상대적으로 높은 농도의 인을 요구하였다. 상대적으로 낮은 반포화 농도는 동일한 영양상태 조건이라면 경쟁적으로 우위를 점할 수 있는 능력으로 설명이 가능하며(Grover, 1989), 이는 영양염이 제한된 조건이라면 11월보다는 7월이 성장에 더 유리한 생리적 상태임을 의미한다. 현장에서의 엽록소 *a* 농도는 11월과 비교해 7월의 높은 성장잠재력에도 불구하고 11월에 더 높게 나타났다. 이는 7월과 11월에 앞서 집중강우로 인에 대한 민감도가 상대적으로 감소하였을 가능성 있으므로 생리적인 특성보다는 수리적·생물학적 특성 등 다른 환경여건과 더 밀접하게 관련되어 있을 수 있다. 7월은 선행강우로 표층방류가 있었으며 방류수내 엽록소 *a* 농도가 132.0 μg/L로 비교적 많은 식물플랑크톤이 방류되었던 것과 달리 11월에는 유출수가 없었다(김호섭과 황순진, 2004b). 또한 식물플랑크톤 섭식자인 동물플랑크톤 생물량도 남조류 발생초기에 상대적으로 많아 7월 엽록소 *a* 농도 증가를 억제하는 요인으로 작용했을 가능성도 있다(김호섭 등, 2005).

성장에 필요한 영양염 측면에서는 규조류가 다른 조류에 비해 최대성장율과 반포화농도가 상대적으로 높아 인 농도가 높은 시기에 우점하는 것으로 알려져 있다(Horne and Goldman, 1994). 그러나 본 연구에서는 우점종과 수온 변화에 따른 성장률 비교에서 20°C이상 조건에서 남조류가 우점한 식물플랑크톤 군집 성장률이 0.78±0.20 day^{-1}로 가장 높았고, 규조류인 경우 0.43±0.08 day^{-1}으로 상대적으로 낮은 성장률을 보였다(Fig. 3). 또한 제한 영양염은 동일하나 2003년 7월과 8월의 낮은 최대 성장율(μ_{max})을 제외하고는 10~25°C의 수온 범위에서는 수온과 양의 상관성 ($r=0.95$, $p<0.001$)을 나타냈고 수온 10°C 증가 시 2배 증가하였다($Q_{10} \fallingdotseq 2$)(Fig. 4). 이러한 결과는 비록 종간에 나타난 성장률의 차이가 제한 영양염에 대한 식물플랑크톤 종간의 생리적 특성의 차이가 있다하더라도, 성장률이 수온에 민감하게 반응함을 제시한다. 수생태계에서도 식물플랑크톤의 천이는 영양염외에도 수온과 광도 등에 야기될 수 있으며 (Carpenter and Kitchell, 1993; Lathrop and Carpenter, 1990; Sterner and Grover, 1998), 일반적으로 부영양 정체수역에서 일조시간이 짧고 수온이 낮은 봄과 가을에는 규조류가 수온이 높은 시기에는 남조류가 우점하는 식물플랑

Table 1. Growth kinetics parameters for phytoplankton assemblages from November 2002 to November 2003

Date (Mo/Day/Yr)	Dominant species	In *Situ*		Initial condition		μ_{max} (day^{-1})	K_s (μM)	μ in control (day^{-1})
		Temp. (°C)	Chl.*a* (μg/L)	Temp. (°C)	Chl.*a* (μg/L)			
11/1/02	*Microcystis* spp.	11.8	74.5	17.0	5.2	0.60	0.60	0.05
12/13/02	*Microcystis* spp.	4.0	46.3	4.0	1.4	0.41	0.69	0.14
3/14/03	*Aulacoseira* spp.	7.0	48.5	7.0	4.4	0.46	0.72	0.06
3/28/03	*Aulacoseira* spp.	10.1	28.8	10.0	2.8	0.34	0.67	0.10
4/11/03	*Aulacoseira* spp.	12.6	31.8	13.0	7.8	0.49	0.63	0.25
5/16/03	*Microcystis* spp.	20.8	35.2	21.0	7.8	0.82	0.16	0.49
5/30/03	*Aphanocapsa* sp.	21.6	51.7	22.0	4.5	0.81	0.40	0.03
6/13/03	*Microcystis* spp.	22.6	41.9	23.0	18.4	0.94	0.55	0.37
7/25/03	*Microcystis* spp.	24.6	99.0	25.0	61.1	0.40	0.66	0.15
8/8/03	*Microcystis* spp.	26.4	63.0	27.0	12.6	0.59	0.31	0.28
9/19/03	*Microcystis* spp.	23.6	78.1	24.0	7.1	1.02	1.05	0.09
10/3/03	*Microcystis* spp.	21.1	70.3	21.0	11.3	0.83	1.32	0.01
10/18/03	*Microcystis* spp.	17.9	85.1	18.0	8.1	0.79	1.52	0.10
11/8/03	*Microcystis* spp.	14.0	109.7	14.0	11.0	0.64	0.89	0.00

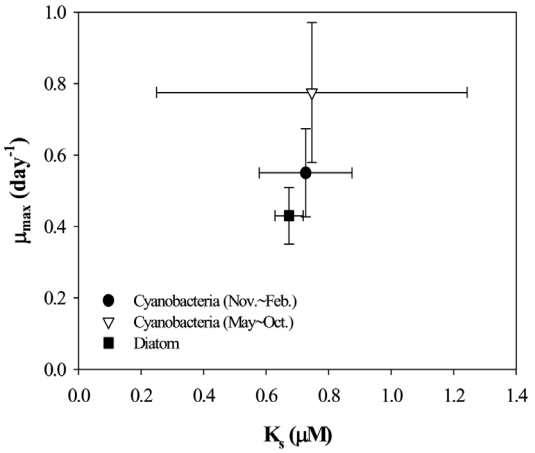

Fig. 3. Comparison of μ_{max} and K_S in classified phytoplankton community by dominance species and season.

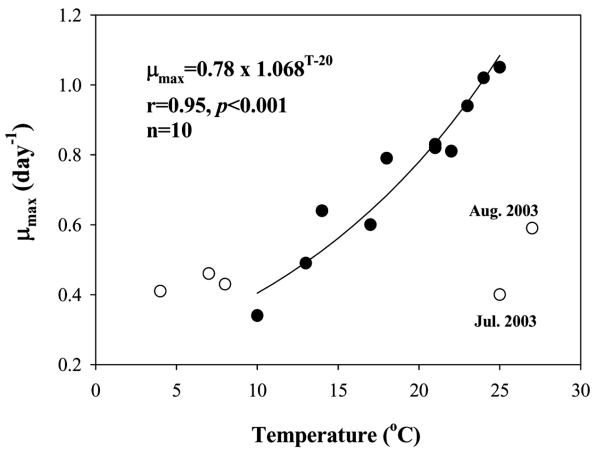

Fig. 4. Relationships between temperature and maximum growth rate (μ_{max}) for phytoplankton assemblages from November 2002 to November 2003. Open circles are excluded data from linear regression.

크톤 군집간의 천이가 일반적인 현상으로 알려져 있다(Sommer et al., 1986). 따라서 남조류의 우점기간은 영양상태와 수온에 의존하여 결정될 수 있으며, 동절기의 낮은 수온은 남조류 소멸의 중요한 원인으로 지적되고 있다(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994; Sommer et al., 1986). 본 연구에서 동절기(11월, 12월) 남조류의 성장률은 0.55±0.12 day^{-1}로 규조류(0.43±0.08)보다 높았으며, 반포화 농도도 0.73±0.15 μM로 규조류(0.67±0.05 μM)보다 높은 농도를 요구하였다. 이는 11월 조사 시 배양온도가 비교적 높은 조건에서 이루어졌기 때문에 과대평가되었을 가능성이 있다. 실제 4°C에서 조사된 성장률(0.41 day^{-1})과 반포화 농도(0.69 μM)는 규조류와 유사한 수준이였으며, 규조류의 세포내 인 저장량은(Mean 48.4 pgP/cell) 12월 수온 4°C 조건에서 조사된 남조류 세포내 저장된 인의 양(34.0 pgP/cell)보다 많았다. 이러한 결과를 토대로 할 때, 수온이 4°C 이하로 유지되는 결빙기간 중 인이 부족한 상태에서는 남조류보다는 규조류의 경쟁적 우위를 예측할 수 있다(Sommer, 1989; Sommer et al., 1986).

수온과 종간의 생리적 특성을 통해 동절기의 종 천이에 대한 예측 결과와 달리, 김호섭 등(2005, 2007b)은 본 연구 대상저수지에서 겨울철 결빙동안에 *Microcystis* spp.에서 낮은 수온에 내성이 강한 것으로 알려진 *Oscillatoria* sp.와 *Aphanizomenon* sp.와 같은 사상성 남조류로의 천이가 야기되며 수온, 광도 및 영양염을 조절한 조건에서 2~4°C의 수온과 낮은 광도 조건에서도 인이 충분한 조건에서는 남조류가 성장할 수 있음을 제시한 바 있다. 본 연구대상저수지와 같이 수심이 얕은 수체에서 겨울철 결빙은 광을 억제할 뿐만 아니라 역성층을 형성하여 부유능력이 없는 종들은 침강되어 생물량의 감소가 야기될 수 있다(Sommer et al., 1986). 반면, 부유능력을 가진 남조류는 낮은 수온 조건에 내성을 가질 수 있는 충분한 인이 공급되는 경우 결빙으로 안정된 수환경은 유리한 환경조건이 될 수 있다

(Reynolds, 1984; Romo and Miracle, 1994). 본 연구대상저수지는 관개용수로의 배수 및 집중강우로 월류되는 시기를 제외하고는 호외배출이 없고 식물플랑크톤 생물량이 11월까지 높은 수준으로 유지되며, 퇴적물의 C/N비도 유기물분해의 초기단계로 평가되는 10이하로 나타나 수층에서 침강된 식물플랑크톤이 퇴적물에 포함된 유기물의 상당부분 기여했을 것으로 추정된 바 있다(김호섭 등, 2007b). 이러한 결과를 토대로 할 때 본 연구대상저수지가 겨울철 외부로부터의 인 공급이 없지만 동절기 낮은 수온에 남조류가 생존할 수 있을 정도로 퇴적물로부터 인이 수체로 공급되고 있는 것으로 사료된다(Sheffer et al., 1997; Trimbee and Prepas, 1987).

결론적으로 남조류의 대량 증식은 수온상승과 더불어 제한영양염의 공급이후에 나타났으며 이는 남조류의 발생시기와 지속시간을 결정하는 중요한 요인으로 제시되었다. 많은 양의 제한영양염(인) 공급이 집중 강우 시 수체로 유입되었으며, 유입수 배제는 성장에 유리한 생리적 특성에도 불구하고 상대적으로 선행강우가 적고 유입수 배제가 없는 시기와 비교해 엽록소 *a* 농도는 낮게 유지되는 원인 중의 하나로 판단되었다. 따라서 강우 시 유입수 배제가 이미 발생된 식물플랑크톤을 제거할 뿐만 아니라 유입수내 많은 양의 인을 배제함으로써 강우이후의 식물플랑크톤(특히 남조류)의 대량 증식을 억제할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 퇴적물 내 유기물의 상당부분이 내부생성유기물의 침강에 기인한다는 점에서, 수체로 유입되는 인을 차단하여 수체 내 식물플랑크톤 증식을 억제하는 경우 퇴적물로부터 수체로 용출되는 인의 상당부분이 감소할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구는 2002년 11월부터 2003년 12월까지 제한 영양염에 대한 식물플랑크톤의 생리적 특성을 평가하기 위해 수행되었다. 수체 내 엽록소 *a* 농도는 집중강우 이후에 증가하였으며 7월과 11월에 각각 99.0 ㎍/L와 109.7 ㎍/L에 높았다. TP 농도는 48.0~126.6 ㎍/L 범위였고 엽록소 *a* 농도와 유사하게 집중강우 이후에 증가하는 경향을 보였다. 실험에 사용된 식물플랑크톤 군집 내 우점종은 3월과 4월에 *Aulacoseira* spp., 5월 *Aphanocapsa* sp.를 제외하고는 *Microcystis* spp.였다. 최대성장율은 9월에 1.09 day^{-1}로 가장 높았고, *Aulacoseira* spp.가 우점한 3월에 0.34 day^{-1}로 가장 낮았다. 단일 영양염 제한상태에서 진행된 실험에서 성장률은 10~25℃의 수온 범위에서는 수온 10℃ 증가 시 성장률은 2배 증가하였다. 20℃이상 조건에서 남조류가 우점한 식물플랑크톤 군집 성장률이 0.78±0.20 day^{-1}로 가장 높았고, 규조류인 경우 0.43±0.08 day^{-1}으로 상대적으로 낮은 성장률을 보였다. 동절기(11월, 12월) 남조류의 성장률은 0.55±0.12 day^{-1}로 규조류(0.43±0.08 day^{-1})보다 높았으며, 반포화농도도 0.73±0.15 μM로 규조류(0.67±0.05 μM)보다 높은 농도를 요구하였다. 그러나 12월 수온 4℃ 조건에서 조사된 남조류 성장률(0.41 day^{-1})과 반포화 농도(0.69 μM)는 규조류와 유사한 수준이였으며, 남조류 세포된 저장된 인의 양(34.0 pgP/cell)은 규조류(Avg. 48.4 pgP/cell) 보다 적었다. 본 연구 결과들은 현장에서의 식물플랑크톤 생물량과 종 천이가 식물플랑크톤의 제한된 영양염에 생리적 특성 뿐만 아니라 화학적, 수리·수문학적 요인이 복합적으로 작용한 결과로 이해될 필요가 있음을 제시한다.

사 사

본 연구는 농림부 기획연구과제(과제 302003-03-2-SB010)인 '농업용저수지의 녹조 제어기법개발 연구'의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김호섭, 공동수, 황순진(2005). 얕은 부영양저수지의 동·식물플랑크톤 군집변화 특성. *한국육수학회지*, **38**(1), pp. 18-29.

김호섭, 최은미, 김동우, 공동수, 김경만, 김범철(2007a). 농업용저수지 유역환경특성에 따른 수질경향 분석. *한국육수학회지*, **40**(2), pp. 214-222.

김호섭, 황순진(2004a). 부영양 저수지에서 식물플랑크톤 성장에 대한 제한영양염과 질소/인 비의 영향. *한국육수학회지*, **37**(1), pp. 36-46.

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

김호섭, 황순진(2004c). 육수학적 특성에 따른 국내 저수지의 부영양화 유형분석: 엽록소 *a*와 수심을 중심으로. *한국육수학회지*, **37**(2), pp. 213-226.

김호섭, 황순진, 공동수(2007b). 부영양저수지에서 남조류의 발달과 천이 및 영향요인. *한국육수학회지*, **40**(1), pp. 121-129.

신재기, 조주래, 황순진, 조경재(2000). 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염특성. *한국육수학회지*, **33**(4), pp. 387-394.

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

한명수, 유재근, 유광일, 공동수(1993). 팔당호의 생태학적 연구 1. 수질의 연변화:과거와 현재. *한국육수학회지*, **33**, pp. 141-149.

APHA (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 19th ed., APHA-AWWA-WEF, Washington, D. C., USA.

Bold, H. C. and Wynne, M. J. (1978). Introduction to the algae, Prentice-Hall Inc., Englewood cliffs, New Jersey.

Carpenter, S. R. and Kitchell, J. R. (1993). Cascading trophic interactions and lake productivity. *Bioscience*, **35**, pp. 634-639.

Cichra, M. F., Badylak, S., Henderson, N., Rueter, B. H., and Philips, E. J. (1995). Phytoplankton community structure in the open water zone of a shallow subtropical lake (Lake Okeechobee, Florida, U.S.A.). *Arch. fur Hydrobiologie, Advances in Limnology*, **45**, pp. 157-175.

Forsberg, O. and Ryding, S. O. (1980). Eutrophication parame-

ters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes. *Arch. Hydrobiol.*, **89**, pp. 189-207.

Grover, J. P. (1989). Phosphorus-dependent growth kinetics of 11species of freshwater algae. *Limnol. Oceanogr.*, **34**, pp. 341-348.

Horne, A. J. and Goldman, C. H. (1994). *Limnology 2nd edition*, Mcgraw-hill Inc., Singapore.

Ichimura, T. (1978). Media for blue-green algae. *Methods in Algalogical studies*, K. Nishizawa and M. Chihara (eds.), Kyoritsu, Tokyo, p. 294.

Kalff, J. (2002). *Limnology : Inland water Ecosystem*, Prentice hall, New Jersey.

Lathrop, R. C. and Carpenter, S. R. (1990). Zooplankton and their relationship to phytoplankton. *Food Web management*, J. F. Kitchell (ed.), Springer-Verlag, New York, pp. 127-150.

Marker, A. F. H. (1972). The use of acetone and methanol in the estimation of chlorophyll in the presence of phaeophytin. *Freshwater Biol.*, **2**, pp. 361-385.

Marker, A. F. H., Nusch, E. A., Rai, I., and Riemann, B. (1980). The measurement of photosynthetic pigments in freshwaters and standardization of methods: Conclusions and recommendations. Arch. *Hydrobiol. Beih.*, **14**, pp. 91-106.

Monod, J. (1950). La technique de culture continue: theorie at applications. *Annales de l'Institut Pasteur de Lille*, **79**, pp. 390-410.

Reynolds, C. S. (1993). The Ecology of freshwater Phytoplankton. Cambridge University Press, Cambridge, U.K.

Reynolds, C. S. (1984). Phytoplankton periodicity: the interactions of form, function and environmental variability. *Freshwater Biol.*, **14**, pp. 111-142.

Romo, R. and Miracle, R. (1994). Long-term phytoplankton changes in a shallow hypertrophic lake, Albufera of Valencia Spain). *Hydrobiol.*, **275/276**, pp. 153-164.

Sheffer, M., Rinaldi, S., Grangnani, A., Mur, L. R., and Nes, E. H. (1997). On the dominance of filamentous cyanobacteria in shallow, turbid lakes. *Ecol.*, **78**, pp. 272-282.

Smith, V. H., Willen, E., and Karlsson, B. (1987). Predicting the summer peak biomass of four species of blue-green algae (cyanphyta/cyanobacteria) in Swedish lakes. *Wat. Res. Bull.*, **23**, pp. 397-402.

Sommer, U. (1989). Nutrients status and nutrient competition of phytoplankton in a shallow, hypertrophic lake. *Limnol. Oceanogr.*, **34**, pp. 1161-1173.

Sommer, U., Gliwicz, Z. M., Lampert, W., and Duncan, A. (1986). The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Arch. Hydrobiol.*, **106**, pp. 433-471.

Sterner, R. W. and Grover, J. P. (1998). Algal growth in warm temperate reservoirs: Kinetic examination of nitrogen, temperature, light, and other nutrients. *Wat. Res.*, **32**, pp. 3539-3548.

Tilman, D. (1982). *Resource competition and community structure*. Princeton, NJ, USA.

Trimbee, A. M. and Prepas, E. E. (1987). Evaluation of total phosphorus as a predictor of the relative biomass of blue-reen algae with emphasis on Alberta lakes. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.*, **44**, pp. 1337-1342.

Van der Westhuizen, A. J. and Eloff, J. N. (1985). Effect of temperature and light on the toxicity and growth of the blue-green alga *Microcystis aeruginosa* (UV-006). *Planta*, **163**, pp. 55-59.

Watanabae, M. F. and Oishi, S. (1985). Effects of environmental factors on toxicity of a cyanobacterium (*Microcystis aeruginosa*) under culture conditions. *Applied and Environmental Microbiology*, **49**, pp. 1342-1344.