

대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관 관계

이 정 준 · 이 정 호*¹ · 박 종 근

(한국수자원공사 수자원연구원, ¹대구대학교 생물교육과)

Relationships Between the Development of Cyanobacterial Bloom and the Changes of Environmental Factors in Lake Daechung. Lee, Jung Joon, Jung Ho Lee*¹ and Jong Geun Park (Water Resources Research Institute, KOWACO, Taejon 305-730, Korea and ¹Department of Biology Education, Daegu University, Kyungsan 712-714, Korea)

The study was performed to understand the relationships of cyanobacterial bloom and environmental factors in Lake Daechung. The samples were collected weekly from June to October in 2001. The cyanobacterial bloom was divided into the three phases of the early phase, the middle phase and the late phase by phytoplankton standing crops. For the early phase, the correlation coefficients between chl-*a* and TP, and chl-*a* and PO₄-P were 0.986 and 0.894 respectively. Therefore, phosphorus was a main environmental factor in the development of cyanobacterial bloom. Zeu/Zm ratio and chl-*a* showed negative correlation of $r = -0.995$. At the late phase, PO₄-P showed the highest relationship ($r = 0.958$), and TP and temperature showed relatively high relationships ($r = 0.857$ and $r = 0.813$). At the late phase, NH₃-N showed highly positive relationship ($r = 0.921$). It was confirmed that PO₄-P was the most important contribution factor for the bloom through the regression analysis on the environmental factors. As the result, the decrease of Zeu/Zm ratio and the increase of P concentration influenced cyanobacterial bloom developed rapidly in the early phase. Also the cyanobacterial bloom was decreased in proportion to decreasing of NH₃-N concentration in the late phase. It was expected that observation of NH₃-N may be a very useful factor on monitoring of the decreasing situation of the bloom.

Key words : Relationship, cyanobacterial bloom, environmental factors, Lake Daechung

서 론

국내 대부분의 댐저수지들은 수질 영양단계의 상승에 기인한 남조류 대발생을 매년 겪고 있으며, 이에 따라 원수의 수질관리는 물론 정수공정에도 많은 어려움이 초래되고 있다(이와 김, 1996; 이 등, 1998), 따라서 개별적인 각 댐저수지의 조류 대발생의 현황과 이화학적 환경요인들과의 상호관계의 규명을 통한 수화 특성의 이

해가 필요한 실정이다(이, 1997).

본 연구에서는 남조류 수화가 매년 발생하고 있는 대청호를 대상으로 수화 발생의 생태적 특성을 이해하고자 하였다. 이와 같은 대청호의 남조류 수화에 대한 연구는 지난 1996년 이래 다수의 보고들이 있었으나(김 등, 1998; 오, 1998; 오 등, 1998; 신 등, 1999; 이, 1999; 김과 이, 2000; 이 등, 2000), 대부분의 연구가 수화의 발생부터 소멸에 이르는 전체 장기간을 조사 대상으로 하고 있어, 다양하고 복잡한 환경인자들의 수화에 대한 관련

* Corresponding author: Tel: 053) 850-6994, Fax: 053) 850-6999, E-mail: jungho@daegu.ac.kr

성의 이해에는 많은 어려움이 있어 왔다. 특히 특정 환경인자가 수화의 발달 시기별로 그 영향도가 다양하게 변한다는 관점으로 볼 때, 전체 수화기간을 대상으로 한 조사에서는 그 결과의 해석이 지나치게 복잡하며, 때로는 각 요인의 영향도가 구체적으로 파악되지 않거나 잘못된 해석의 가능성이 있는 것으로 우려된다.

그러므로 효과적인 수질관리를 위해서는 각 환경인자의 수화 발달에 대한 기여도의 시기적 특성 파악을 통한 세분화된 결과의 간결한 이해가 필요할 것으로 사료된다. 이를 위하여 본 조사에서는 대청호의 남조류 수화 현상을 성장기에 해당하는 초기와 절정기의 중기, 소멸기간인 후기 등 3단계로 구분하여 환경요인들의 관련성을 비교 분석하여 각 단계별로 수화 발달에 대한 주요 제한 인자를 조사하고, 이들 인자들의 기여도를 파악하고자 하였다.

재료 및 방법

본 조사는 대청호 본류 중 충청북도 청원군 회남면에 위치한 회남대교 아래 지점을 대상으로 실시하였다 (Fig. 1). 본 지점은 대청댐으로부터 약 13 km 상류에 위치하고 있으며, 특히 본류 수역 중 남조류 수화가 가장 심한 지역으로 보고되었다 (이, 1999).

시료의 채집은 수화발생 기간인 2001년 6월에서 10월까지 매주 1회 실시하였으며, 8월은 선박 침수 등의 부득이한 현장 사정으로 인해 2회만 실시하였다.

식물플랑크톤의 현존량 계수 등을 위한 정량시료는 Van Dorn 채수기를 사용하여 수심 10~20 cm 범위에서 채집하였고 Lugol's solution으로 고정하여 사용하였으며, 분류와 동정을 위한 정성시료는 정량시료의 농축액과 NXXX 25 plankton net로 채수한 시료를 함께 사용하였다.

현존량 산정을 위하여 1 L의 정량시료를 48~72시간 침전시켜 상등액을 제거하여 적정량으로 농축한 뒤, 농축한 시료를 잘 혼합하여 Sedgwick-Rafter Chamber를 사용하여 Schoen (1988)의 방법으로 계수하였다.

환경요인 중 수온, pH, DO 및 전기전도도는 현장 수질측정기인 Quanta multiprobe (HYDROLAB)로 현장에서 측정하였으며, T-P, PO₄-P, T-N, NH₃-N, NO₃-N 및 chl-a 등은 수질오염공정시험법안 (환경부, 1996)과 Standard Method (APHA, 1995)에 따랐다. 저수지의 성층에서 유광대와 혼합층간의 비인 Zeu/Zm ratio를 산정하였고, Zeu는 Chorus and Bartman (1999)의 방법으로

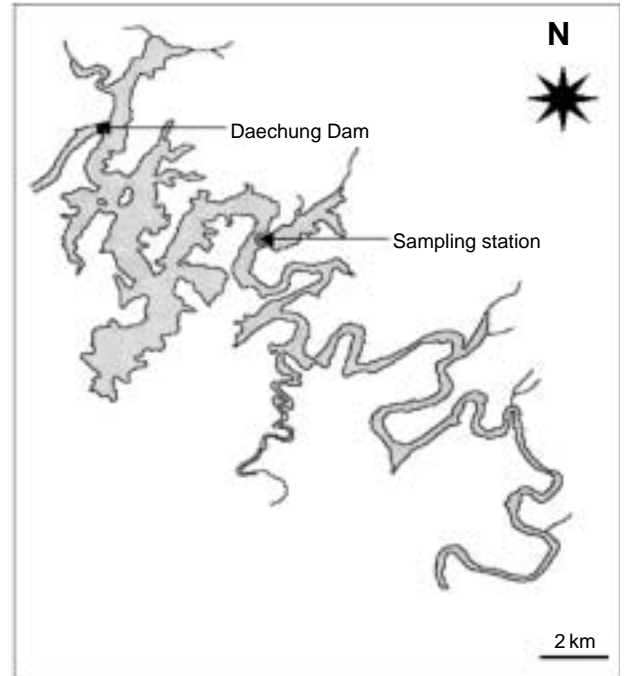


Fig. 1. A map showing sampling station in Lake Daechung.

계산하였다 ($Zs \times 2.5 \equiv Zeu$). 수화 발달에 대한 환경요인들의 영향 정도를 규명하기 위하여 수화의 발생 단계별로 chl-a와 주요 환경요인들과의 상관분석을 실시하였다. 또한 남조류 수화에 대한 주요 영양염의 중회귀모형 개발을 위하여 chl-a 농도를 종속변수로 하고, 5개의 영양염의 농도를 독립변수로 하여, 독립변수와 종속변수간의 함수관계를 분석하였으며, 통계분석은 MINITAB for Windows 12.1 program을 사용하여 실시하였다.

결과 및 고찰

1. 환경요인

조사기간 동안 수온은 19.9°C에서 32.9°C의 범위를 보였다 (Table 1, Fig. 2). *Microcystis*의 최적 생육 수온인 25°C 이상 (Chorus and Bartman, 1999)을 처음 기록한 것은 6월 22일이었는데, 역시 이날 남조류 세포수가 54,145 cells/mL로 대청호에서는 2002년 최초로 Horne and Goldman (1994)의 수화 발생 기준인 세포수 5,000 cells/mL를 초과한 것으로 조사 되었다 (Fig. 3).

T-N 농도는 조사기간 동안 평균 1.904 mg/L로 높게 나타났다 (Table 1, Fig. 2). 이러한 수치는 식물플랑크톤

Table 1. The changes of environmental factors in Lake Daechung during the studying periods.

Growth steps	Sampling date	Temp. (°C)	T-N (mg/L)	NH ₃ -N (mg/L)	NO ₃ -N (mg/L)	T-P (mg/L)	PO ₄ -P (mg/L)	TN/TP ratio	Zeu/Zm ratio
The early phase	6/7	24.8	1.842	0.039	1.740	0.017	0.003	108.35	2.25
	6/22	26.3	1.392	0.016	1.340	0.043	0.003	32.37	1.25
	6/27	23.7	5.088	0.018	1.012	0.104	0.006	48.92	0.38
	7/3	27.5	1.491	0.017	0.971	0.072	0.004	20.71	1.25
The middle phase	7/9	29.9	1.842	0.075	1.061	0.026	0.003	70.15	0.75
	7/16	27.4	2.160	0.036	1.285	0.030	0.006	72.00	0.54
	7/24	29.7	2.880	0.000	1.236	0.060	0.007	48.00	0.25
	8/6	32.9	2.208	0.010	0.700	0.057	0.013	34.74	0.75
	8/23	30.5	2.208	0.030	0.700	0.031	0.004	71.23	1.25
	9/3	28.7	1.488	0.010	0.800	0.016	0.003	93.00	0.13
The late phase	9/10	27.3	1.488	0.040	0.800	0.018	0.003	82.67	0.20
	9/18	26.8	1.968	0.040	0.300	0.024	0.002	82.00	0.19
	9/24	25.4	1.200	N.D.	0.700	0.028	0.003	42.86	0.27
	10/5	23.0	1.104	N.D.	0.700	0.016	0.002	69.00	-
	10/8	22.3	1.056	N.D.	0.700	0.013	0.004	81.23	0.33
	10/18	21.5	1.152	N.D.	0.700	0.020	0.001	57.60	-
	10/24	21.5	1.834	N.D.	0.700	0.018	0.001	101.89	0.29
	10/29	19.9	1.872	N.D.	0.700	0.014	0.003	133.71	3.50

의 수화 발생이 가능한 최저 농도인 0.3 mg/L를 6배 이상 상회하는 농도이다 (Klapper, 1991). NH₃-N의 농도는 9월 24일 이후에는 검출 한계 이하로 나타났으며, 최고치는 7월 초순의 0.075 mg/L이었다 (Table 1, Fig. 2). 9월 하순 이후 NH₃-N의 급격한 감소는 이 시점을 전후한 남조류 현존량의 격감에 중요한 인자로 작용한 것으로 추측되며, 따라서 대청호의 남조류 수화의 소멸 과정의 모니터링에 NH₃-N의 관측이 매우 유용하게 활용될 수 있는 것으로 사료된다. 특히 NH₃-N는 대청호의 수화 원인 조류인 *Microcystis*속의 경우 질소의 이용에 있어서 NO₃-N보다는 NH₃-N를 더욱 선호하므로 이에 대한 주의 깊은 모니터링은 수질관리에 있어 가장 기초적인 과정이 될 수 있다 (Fay, 1983; Horne and Goldman, 1994). NO₃-N의 농도는 수화 초기단계에 높은 수치를 보였으나 그 후 점차 감소하는 경향을 나타내었는데, 이는 대발생한 *Microcystis*속의 빠른 소비의 결과로 유추된다.

T-P 농도는 6월 27일 0.105 mg/L의 극히 높은 수치로 최대치를 나타내는 등 평균 0.036 mg/L로 전 조사기간에 걸쳐 매우 높은 수준을 보였다. 이와 같은 평균 T-P 농도는 부영양화 기준인 0.015 mg/L를 2배 이상 초과하는 것으로서 (Klapper, 1991), 대청호의 경우 6월 이후 고수온기에는 상시 남조류 수화 발생이 가능한 수준으로 수질이 악화되어 있음을 시사하는 결과로 간주할 수 있다. T-P는 9월 초순부터 빠르게 낮아지는 경향을 나

타내었다 (Table 1, Fig. 2). 이러한 T-P의 격감은 남조류의 현존량 감소에 큰 영향을 주는 것으로서 대청호의 수화 발생에 대한 중요 제한요인으로 작용하며, 이와 같은 대청호 수화의 제한인자로서의 T-P의 중요도는 이미 수차례 보고된 바 있다 (김 등, 1996; 이 등, 1997). PO₄-P의 농도는 조사기간 중 0.001~0.013 mg/L의 범위로 나타났으며, 특히 7월 하순과 8월 초순의 조사에서 가장 높은 농도였는데, 이후에 남조류의 증가에 비례하여 빠르게 소비되면서 현저히 농도가 줄어드는 것으로 사료된다. 장마기간과 같은 호우기에는 토양 침식과 수체의 교란에 의한 퇴적물의 재부상 등의 경로를 걸쳐 많은 양의 입자상 인들이 수체에 유입되게 되어, 결과적으로 생물에 이용되는 인의 양적인 증가를 가져오게 된다. 그러므로 이런 시기의 T-P의 상당 부분이 이와 같은 입자상 인으로 구성되게 되며, 이후에 호수 수체 내에 체류되면서 용존반응성인 (Soluble Reactive Phosphorus: SRP)의 증가에 결정적 역할을 미치는 것으로 보고되고 있다 (Mur *et al.*, 1999).

TN/TP의 농도비는 7월 3일 20.71로 최저치, 10월 29일에 133.71로 최대치를 나타내었으며, 평균 농도비는 69.47로 상당히 높게 나타났다 (Table 1, Fig. 2). TN/TP의 농도비가 10 이상이면 인을 식물플랑크톤의 생장의 제한요인으로 간주할 수 있으며, 반대로 그 비율이 10보다 낮으면 질소를 제한요인으로 간주할 수 있는데 (Horne and Goldman, 1994), 이 같은 기준을 감안하면

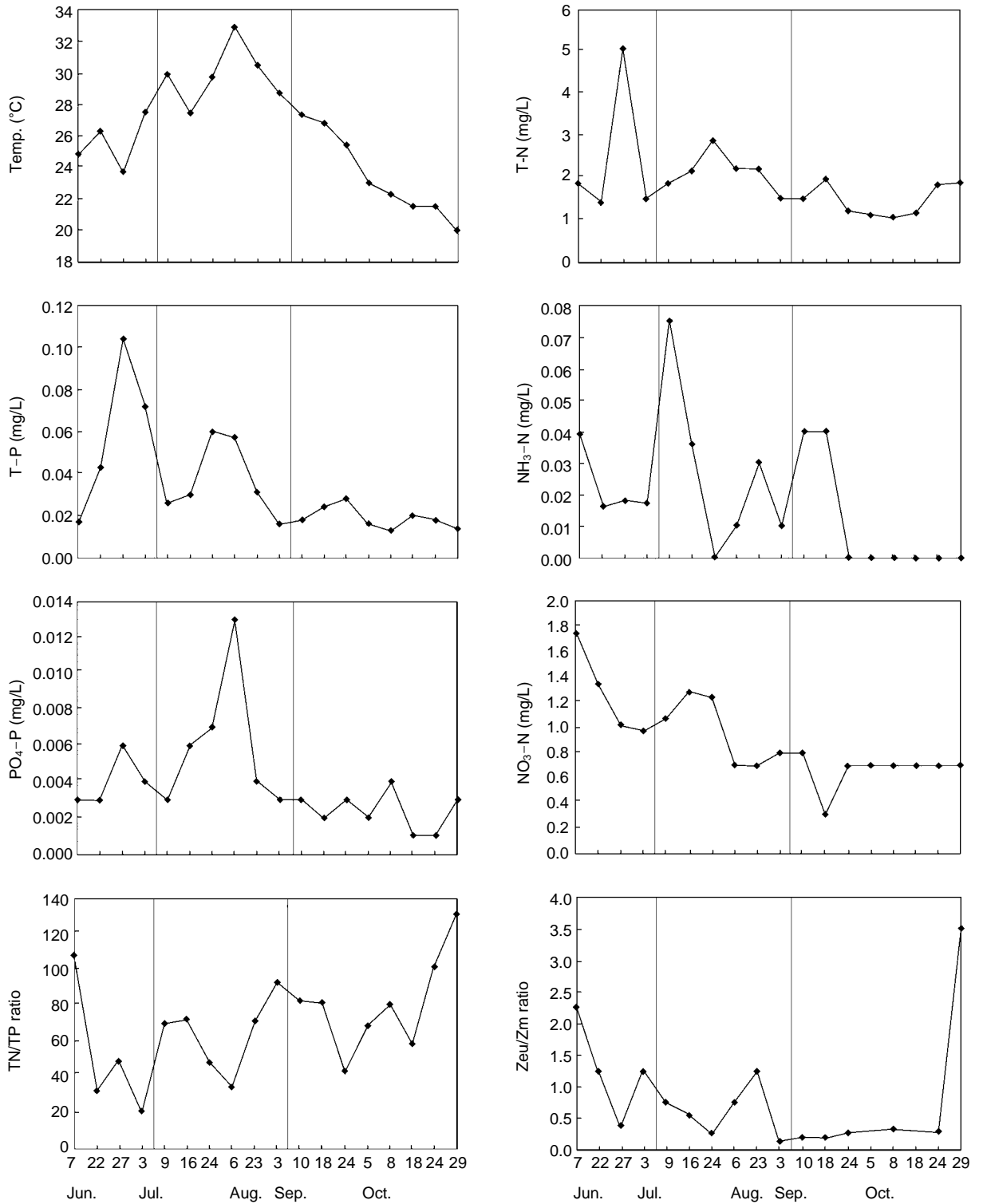


Fig. 2. The changes of environmental factors in Lake Daechung during the studying periods.

대청호의 남조류 수화 발달에 영향을 미치는 제한요인은 인임을 확인할 수 있었다. 본 조사에서의 TN/TP의

농도비는 대단히 높은 것으로써, 이러한 결과는 이미 대청호에서 기존의 연구에서도 확인된 바 있으며(김 등,

1996), 대부분의 국내 댐저수지들의 TN/TP 비가 40에서 160까지의 범위에 있다는 Kim *et al.* (1997)과 김 등 (1997)의 보고와 일치하는 결과이다. 이러한 국내 댐저수지의 TN/TP 값은 다른 나라의 조사치에 비해 상당히 높은 것으로써 (Mimeeva, 1993; Mur *et al.*, 1999), 그 원인은 아직 확실하지 않으나, 댐저수지의 상류 유역에 인구밀도가 높고, 축산폐수를 비롯한 오염원이 많이 분포하고 있는 국내 댐저수지의 환경적 특성에 기인한 결과로 추측된다.

유광대의 깊이는 0.75~11.25 m의 범위로 조사되었으며, 평균 4.02 m를 나타내었다. 혼합층의 깊이는 1~20 m의 범위로 조사되었으며, 평균 깊이는 10.8 m이었다. 유광대와 혼합층의 깊이는 수화가 진행되면서 점차 얕아졌으며, 수화가 소멸되면서 점차 깊어지는 경향을 나타내었다. Zeu/Zm의 비는 9월 3일에 0.13으로 가장 낮았고, 6월 7일에 2.25로 가장 높게 조사되었으며, 평균 0.65로 나타났다 (Table 1, Fig. 2). 일반적으로 Zeu/Zm 비가 1 이하로 나타날 때, 대부분의 식물플랑크톤은 정상적인 생육에 제한을 받게 되어 급격한 현존량의 감소가 일어나게 되며 (Kent *et al.*, 2002), 그와 같은 조건 하에서 부력 조절이 가능한 *Microcystis* 등의 남조류는 급격한 대증식을 하는 것으로 보고되고 있다 (Henderson-Seller and Markland, 1987). 본 조사에서도 역시 남조류 수화의 발생 초기를 제외하고는 7월 9일부터 조사가 종결된 10월 29일까지 Zeu/Zm의 비는 1 이하로 나타났다 (Table 1, Fig. 2).

2. 남조류 수화 발달의 단계적 구분

본 조사에서는 대청호 수화를 chl-a 농도와 유사한 양상을 보인 남조류의 현존량의 증감 변화에 따라 초기와 중기, 후기의 세가지 기간으로 구분하였다 (Fig. 3).

초기는 수화의 성장기에 해당하는 기간으로 조사가 처음 시작된 2001년 6월 7일부터 7월 3일까지이다. 이 기간은 남조류의 현존량이 급격히 증가하는 특성을 보이는데, 남조류 세포가 전혀 나타나지 않았던 6월 7일부터 초기의 최대 현존량을 보인 6월 22일 (5.4×10^4 cells/mL)까지 현존량의 빠른 증가가 있었으며, 평균 남조류 세포수는 1.8×10^4 cells/mL로 조사되었다. 또한 전체 식물플랑크톤 군집 내 남조류의 평균 현존량 구성비는 70.65%였다.

중기는 수화의 절정기에 해당하고, 남조류 현존량이 1.0×10^5 cells/mL 이상이며, 최대 현존량의 피크를 이룬 7월 24일을 전후하여 현존량의 증감이 교차되는 시기로

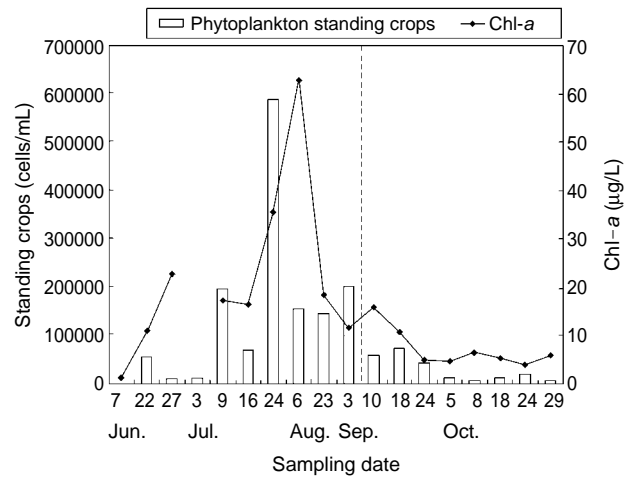


Fig. 3. The changes of phytoplankton standing crops and chl-a concentration in Lake Daechung during the studying periods.

7월 9일부터 9월 3일까지의 기간이다. 이 기간 중 실제로 7월 16일의 8.7×10^4 cells/mL를 제외하고는 모든 조사시기에서 남조류 현존량은 모두 1.0×10^5 cells/mL를 훨씬 상회하였으며, 특히 7월 24일 조사에서는 남조류 세포수가 5.9×10^5 cells/mL로 전 조사기간을 통틀어 최대 현존량을 나타냈다. 중기 동안 평균 남조류 현존량은 2.2×10^5 cells/mL로 나타나 수화 초기에 비해 남조류의 평균 세포수는 2.1×10^5 cells/mL가 많았으며, 전체 식물플랑크톤 군집 내 평균 구성비는 99.5%에 달하였다. 중기의 첫 조사시기인 7월 9일에 남조류 현존량은 1.9×10^5 cells/mL로 초기의 마지막 조사시기인 7월 3일의 1.1×10^4 cells/mL보다 약 19배 많이 나타났으며, 중기의 마지막 조사시기인 9월 3일은 남조류 세포수가 2.0×10^4 cells/mL로, 후기의 첫 조사시기인 9월 10일의 5.8×10^4 cells/mL보다 남조류 세포수가 약 3.5배 많게 나타났다.

후기는 수화의 소멸기에 해당하는데, 9월 10일부터 조사가 종결된 10월 29일까지이다. 이 기간 동안 남조류의 평균 현존량은 2.7×10^4 cells/mL로 수화 중기에 비해 약 1/10에 불과 하였으며, 전체 식물플랑크톤 군집 내 남조류의 현존량 구성비는 89.4%였다.

3. 수화 발달 단계별 환경요인의 영향

1) 초기

초기 동안 chl-a 농도와의 T-P와 PO₄-P의 상관계수 r값이 각각 0.986과 0.894로 매우 높은 양의 상관도를

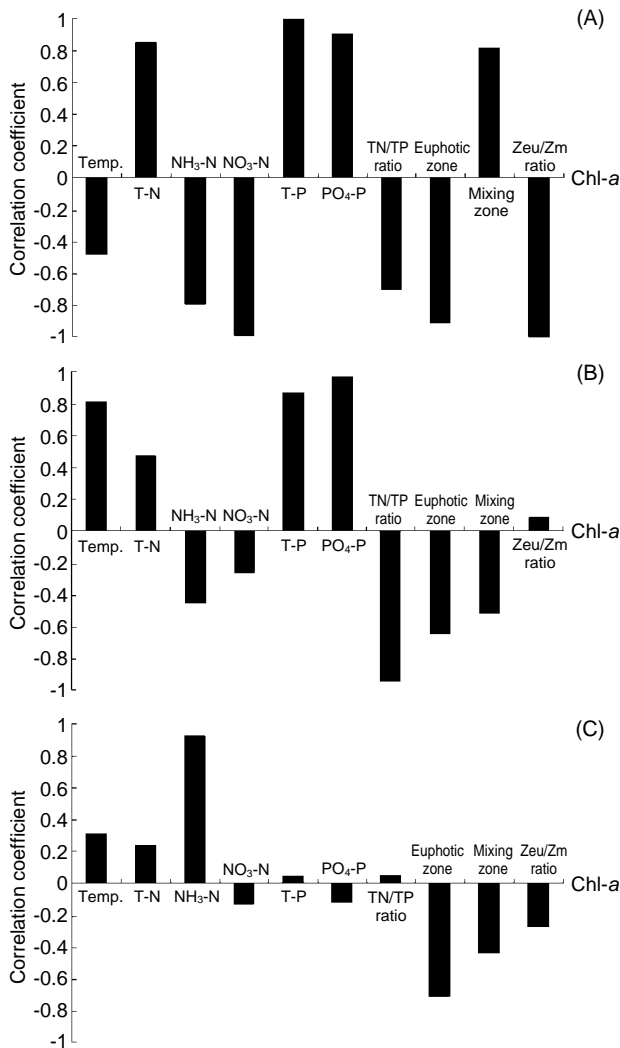


Fig. 4. Correlation coefficients between chl-*a* and environmental factors in Lake Daechung during the studying periods (A: the early phase, B: the middle phase, C: the late phase).

나타냈다. 또한 chl-*a*와 TN/TP 비는 $r = -0.702$ 의 높은 음의 상관도를 가져 (Fig. 4A), 수화의 초기 발달기간에 인이 주요 제한 요인으로 작용하는 것으로 확인되었다.

혼합층과 유광대의 비, 즉 Zeu/Zm의 비와 chl-*a*와의 상관도는 $r = -0.995$ 의 매우 높은 음의 상관성을 나타내었다 (Fig. 4A). 이는 수화의 발달에 따라 표층에 남조류가 집적되면서 유광대의 깊이가 얕아져 나타난 결과로 사료된다.

또한 T-N과 NH₃-N과 NO₃-N 역시 각각 $r = 0.839$ 와, $r = -0.789$, $r = -0.993$ 의 높은 상관도를 보였다 (Fig. 4A). 그러나 일반적으로 질소 농도와 남조류 대발생 간에

는 유의한 상관관계가 있는 것으로 보고되고 있으나 (Utkilen *et al.*, 1996; Bowling, 1994), 본 연구에서는 초기 성장기에 T-N 농도가 평균 2.411 mg/L로 극히 높아 수화 발생이 가능한 기준 농도 0.3 mg/L를 8배 이상 훨씬 초과하는 것으로 나타나 (OECD, 1982), 초기의 남조류 성장기에 영향을 미치는 것으로 추정하는 것은 적절하지 않은 것으로 판단되었다.

2) 중기

수화의 절정기에 해당하는 중기에는 chl-*a*와 수온의 상관도가 $r = 0.813$ 으로 높은 상관성을 보여 (Fig. 4B), 수온이 상승할수록 식물플랑크톤의 99% 이상을 차지하는 남조류의 생물량 (chl-*a* 농도)이 증가하는 경향을 나타내었다 (Heinle, 1969; 이, 1999).

PO₄-P는 $r = 0.958$ 의 상관계수를 나타내어, 절정기에 가장 큰 영향을 미치는 환경요인으로 조사되었다. T-P 또한 $r = 0.857$ 의 높은 상관도를 보였으며, TN/TP 비 역시 $r = -0.927$ 의 상관계수를 나타내어 매우 높은 상관도가 입증되었다 (Fig. 4B). 그러므로 대청호에서 남조류 수화의 절정기인 중기에 가장 큰 영향을 미치는 환경요인은 인과 TN/TP 비이며, 그 밖에 수온이 높은 상관도를 가지는 것으로 조사되었다.

중기에서는 초기와는 달리 혼합층과 유광대의 비 (Zeu/Zm ratio)와 chl-*a*의 상관관계는 $r = 0.081$ 로 극히 낮게 나타났다 (Fig. 4B).

3) 후기

남조류의 현존량이 급격히 낮아지는 후기에는 NH₃-N을 제외한 모든 환경요인이 chl-*a*와 뚜렷한 상관도를 보이지 않았는데, NH₃-N은 $r = 0.921$ 의 대단히 높은 상관도를 나타냈다 (Fig. 4C). NH₃-N은 후기의 초반부인 9월 10일과 9월 18일에 0.040 mg/L의 농도를 나타낸 이후, 조사가 종결된 10월 29일까지는 검출한계 이하로 나타났다. 대청호에서 수화 소멸기에 NH₃-N의 농도의 먼밀한 관찰은 수화 소멸의 모니터링과 예측에 있어 매우 유용한 인자로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

Zeu/Zm의 비와 chl-*a*의 상관도는 $r = -0.258$ 로 매우 낮았으며, T-P와 PO₄-P 역시 각각 $r = 0.052$ 와 $r = -0.110$ 로 나타나 상관성이 거의 없는 것으로 조사되었다 (Fig. 4C).

4. 남조류 수화 발달 추정을 위한 중회귀모형 개발

대청호의 남조류 수화 발달을 추정하기 위해 중회귀모형을 제시하였다. 식물플랑크톤 생물량을 대변할 수

있는 chl-a의 농도를 이용하여 T-P, PO₄-P, T-N, NH₃-N 및 NO₃-N 등 5개의 주요 영양염과의 중회귀분석을 실시하였다. Chl-a 농도를 종속변수로 하고 5개의 주요 영양염 농도를 독립변수로 설정하여, 종속변수를 예측하기 위해 독립변수와 종속변수의 함수관계를 분석하였다 (김 등, 1995; 김과 박, 1999). 또한 회귀분석 결과 추정된 회귀방정식의 적합도 판단을 위하여 결정계수 (R²)를 산정하였고, 유의확률값 (p-value)으로써 유의성을 파악하였다. 중회귀분석 결과 나타난 회귀방정식은 아래와 같다.

$$\text{Chl-a} = 0.9 - 3.36(\text{T-N}) + 161(\text{NH}_3\text{-N}) - 7.25(\text{NO}_3\text{-N}) + 353(\text{T-P}) + 2847(\text{PO}_4\text{-P})$$

본 회귀방정식을 통해 5개의 주요 영양염이 chl-a 농도에 미치는 영향을 파악할 수 있었다. 대청호의 남조류 수화 발생에 가장 큰 영향을 미치는 영양염은 PO₄-P로 나타났으며, 다음으로는 T-P와 NH₃-N의 순이었고, T-N과 NO₃-N는 상대적으로 낮은 상관도를 보였다.

본 연구에서 제시된 중회귀방정식은 결정계수 (R²)가 0.69, 유의확률값 (p-value)이 0.014로 유의수준 5% 내에서 69%의 설명력이 있는 것으로 나타났다.

이상과 같은 영양염의 중회귀분석 및 수화의 각 단계별 환경인자들의 상관도 조사 등으로부터 대청호의 남조류 수화에 대한 환경요인의 영향에 대해서 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

① 전 조사기간에 대한 종합적 관점에서 대청호의 남조류 수화 발달에 가장 큰 영향을 미치는 환경요인은 인이며, 특히 PO₄-P의 상관도가 가장 높았다.

② 수화 발달의 초기에는 T-P, PO₄-P 및 Zeu/Zm의 비 등이 주요 환경요인이며, 절정기인 중기에는 PO₄-P, T-P 및 수온 그리고 소멸기인 후기에는 NH₃-N가 가장 큰 영향을 미쳤다.

③ 결과적으로, 대청호의 남조류 수화 발생은 혼합층에 대한 유광대의 깊이가 알아지고 인 농도가 증가하면 수화가 급속히 발달되며, NH₃-N 농도의 감소와 비례하여 수화의 소멸 과정이 진행되는 양상을 보였다.

적 요

대청호의 남조류 수화를 초기와 중기, 후기로 구분하여 각 단계별로 수화 발달에 대한 주요 제한 인자의 상관관계를 조사하였고, 주요 영양염의 중회귀모형을 개발하였다. 조사지점은 댐으로부터 약 13 km 상류에 위치하

고 본류 중 수화가 가장 심한 회남대교 지점을 대상으로 하였으며, 시료의 채집은 수화발생 기간인 2001년 6월에서 10월까지 매주 1회 실시하였다.

수화 발달의 초기 동안 chl-a 농도와 T-P와 PO₄-P의 상관계수 r값이 각각 0.986과 0.894로 매우 높은 양의 상관도를 나타내어 인이 수화발달에 가장 중요한 환경요인으로 확인되었으며, Zeu/Zm의 비와 chl-a와의 상관도도 r = -0.995의 매우 높은 음의 상관도를 보였다. 수화의 절정기에 해당하는 중기에는 chl-a와 PO₄-P가 r = 0.958로 가장 높은 상관도를 가졌으며, T-P와 수온도 각각 r = 0.857과 r = 0.813으로 높은 상관도를 보였다. 후기에는 NH₃-N만이 높은 상관도를 가지는 것으로 조사되었다. 중회귀모형 개발을 위한 회귀분석 결과 대청호의 남조류 수화 발생에 가장 큰 영향을 미치는 영양염은 PO₄-P로 나타났다.

결론적으로 대청호의 남조류 수화는 Zeu/Zm의 비가 감소하고 인 농도가 증가함에 따라 급속히 발달되며, NH₃-N 농도의 감소와 비례하여 소멸 과정이 진행되는 양상을 보였다. 수화 소멸기에 NH₃-N 농도의 면밀한 관찰은 수화 소멸의 모니터링과 예측에 있어 매우 유용한 인자로 활용할 수 있을 것으로 기대되었다.

사 사

본 연구는 2001년도 대구대학교 학술연구비 지원과 한국수자원공사 수자원연구소의 연구비 지원 (WRRI-WR-02-07)에 의해 수행되었음. 논문 교정에 수고를 아끼지 않으신 익명의 심사위원들께 깊은 감사를 드립니다.

인 용 문 헌

김달호, 박진표, 이우동, 이재만, 장덕준, 조교영, 조길호, 차영준. 1995. 미니탭을 이용한 통계학 개론. 자유아카데미, 서울.

김도한, 이정호, 조주래, 황수옥, 박종근, 김영길, 김법철, 서지은, 박정희, 오희목. 1996. 댐저수지 수중생태계 변화에 관한 연구 (2차년도)-하등생물의 환경지표성을 중심으로. 한국수자원공사보고서 (WRRI-GT-96-1).

김용재, 최재신, 김한순. 1997. 임하호의 식물플랑크톤 군집구조. 한국육수학회지 30: 307-324.

김철웅, 박상언. 1999. 미니탭. 자유아카데미, 서울.

김철호, 이정호. 2000. 대청호 하류에서 환경요인과 *Anabaena cylindrica* 성장억제세균의 계절적 분포 변화. 한국육수학회지 33: 128-135.

- 김철호, 이정호, 김도한, 최영길. 1998. 대청호에서 Cyanobacteria 수화과 *Anabaena cylindrica* 성장억제 미생물 분포도의 상관관계. 한국육수학회지 **31**: 173-180.
- 신재기, 조정제, 오인혜. 1999. 대청호에서 수환경 요인과 식물플랑크톤의 변동. 한국환경생물학회지 **17**: 529-541.
- 오인혜. 1998. 대청호의 생태학적 연구 (-'97). 한국육수학회지 **31**: 79-87.
- 오희목, 이석준, 박정호, 맹주선. 1998. 대청호 성층과피시 cyanobacteria의 수직분포 및 세포내 인의 조성. 한국육수학회지 **31**: 54-61.
- 이성우. 1997. 대청호의 수질 특성과 개선방안. 대한환경공학회.
- 이정호. 1999. 대청호의 년중 식물플랑크톤 군집 동태. 한국육수학회지 **32**: 358-366.
- 이정호, 김도한, 박종근. 1998. 취수원 조류군집 특성에 관한 연구 (1차년도). 한국수자원공사 보고서 (WRRI-ES-98-2).
- 이정호, 김용재. 1996. 낙동강 수계 댐호의 부착규조 및 영양 단계 평가. 한국환경생물학회지 **14**: 18-28.
- 이정호, 황수옥, 박종근, 김영길, 김범철, 서지은, 박정희, 오희목. 1997. 댐저수지 수중 생태계 변화에 관한 연구 (3차년도). 한국수자원공사 보고서 (WRRI-ES-97-1).
- 이진환, 오희목, 맹주선. 2000. 대청호의 수질과 식물플랑크톤 현존량. 한국환경생물학회지 **18**: 355-365.
- 환경부. 1996. 수질오염공정시험법. 동화기술, 서울.
- 황순진, 안광국, 류재근. 2002. 호소생태학-인공댐호·저수지의 육수학. 신광출판사, 서울.
- APHA and AWWA. 1995. Standard method for the examination of water and wastewater. APHA, Washington.
- Bowling, L. 1994. Occurrence and possible causes of a severe cyanobacterial bloom in Lake Cargelligo, New South Wales. *Aust. J. Mar. Freshwater Res.* **45**: 737-745.
- Chorus, I. and J. Bartman. 1999. Toxic cyanobacteria in water. E & FN Spon, London and New York.
- Fay, P. 1983. The blue-green (Cyanophyta-Cyanobacteria). The Camlot Press Ltd, Southampton.
- Heinle, D.R. 1969. Effects of elevated temperature on zooplankton. *Chesapeake Sci.* **10**: 186-209.
- Henderson-Sellers, B. and H.R. Markland. 1987. Decaying Lakes-The Origins and Control of Cultural Eutrophication. John Wiley & Sons, Chichester.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill Inc., New York.
- Kim, B., J.H. Park, G. Hwang and K. Choi. 1997. Eutrophication of large freshwater ecosystem in Korea. *Korea J. Limnol.* **30**: 512-517.
- Klapper, H. 1991. Control of eutrophication inland waters. Ellis Horwood, New York.
- Mimeeva, N.M. 1993. Evaluation of nutrient chlorophyll relationships in the Rybinsk reservoir. *Wat. Sci. Tech.* **28**: 25-28.
- Mur, L.R., O.M. Skulberg and H. Utkilen. 1999. Cyanobacteria in the environment. In: Toxic cyanobacteria in the water (I. Chorus and J. Bartram). E & FN Spon, London and New York.
- OECD. 1982. Eutrophication of Water Monitoring; Assessment and Control. OECD, Paris.
- Schoen, S. 1988. Cell counting. In: Experimental Phycology A Laboratory Manual (S.L. Christopher, David, J.C. and Bruno, P.K. eds.). Cambridge University Press, London.
- Utkilen, H., O.M. Skulberg, B. Underdal, N. Gjølme, R. Skulberg and J. Kotai. 1996. The rise and fall of a toxic population of *Microcystis aeruginosa* (Cyanophyceae/Cyanobacteria)-a decade of observations in Lake Akersvatnet, Norway. *Phycologia* **35**(Suppl.): 189-197.

(Manuscript received 18 July 2003,
Revision accepted 23 August 2003)