

도암호에서 식물플랑크톤 군집의 계절적 천이 특성

정승현[†] · 박혜경^{*}

국립환경과학원 한강물환경연구소

^{*}국립환경과학원 물환경연구부

Seasonal Succession Characteristic of Phytoplankton Community in Lake Doam

Seung-Hyun Joung[†] · Hae-Kyung Park^{*}

Han River Environmental Research Center, National Institute of Environment Research

^{*}Water Environment Research Department, National Institute of Environment Research

(Received 13 April 2010, Revised 17 May 2010, Accepted 25 May 2010)

Abstract

Environmental factors and phytoplankton community in Lake Doam were monthly investigated at 3 stations from April 2009 to November 2009. During the study period, the concentrated rainfalls occurred at between July and August and then the TP and turbidity were sharply increased in in-lake. A total of 91 phytoplankton species was classified and these were consisted of 38 Bacillariophyceae, 35 Chlorophyceae, 10 Cyanophyceae, and 8 other species. Bacillariophyceae and Chlorophyceae were dominated during the seasonal succession of phytoplankton community, especially summer season. Bacillariophyceae was dominated from spring season to summer season and Chlorophyceae was dominated at summer season and autumn season. However, the dominance of Cyanophyceae generally developed at summer season in eutrophic water was not observed. From the analysis of correlation coefficient between environmental factors and phytoplankton cell number, we confirmed that there was a negative correlation between turbidity and cyanobacteria cell number ($P < 0.01$). This result indicated that turbid water acts as the inhibitor of the cyanobacteria growth than other phytoplankton community.

keywords : Enviromental factors, Lake Doam, Phytoplankton community, Turbidity

1. 서론

도암호는 1991년에 도암댐 건설에 의해서 형성된 인공호로 수체류시간이 100일 이상 되는 호수형 호수로 도암호 유역에는 목장, 고랭지 밭 및 레저 시설 등의 오염원이 존재하고 있어 남한강 상류수계에 위치해 있음에도 불구하고 부영양화된 호수이다(김범철 등, 1995). 도암호는 황병산으로부터 발원된 송천으로부터의 유입에 의해 형성되었고 현재에는 월류를 통한 방류만이 이루어져 동강으로 유입되고 있다. 도암호는 남한강 최상류 수계에 위치해 지리적으로 중요한 위치에 있고 특히 고농도 탁수로 인한 하류 하천 수질의 영향 등으로 최근 관심의 대상이 되고 있으나 현재까지 도암호에 관한 연구는 도암호의 수질 분석을 통한 부영양 상태에 관한 연구(김범철 등, 1995), 수질 및 어류군집 특성에 관한 연구(이상화 등, 2006), 도암호 유입수인 송천의 수질 및 오염부하량에 관한 연구(허인량 등, 1995) 등이 있을 뿐 많지 않으며 호수 생태계에 중요한 위치를 차지하고 있는 식물플랑크톤에 대한 연구는 전무하여 고농도 탁수가 문제가 되고 있는 도암호에서의 식물플랑크톤

관련 자료는 부족한 실정이다.

국내 대부분 호수는 하천에 댐을 쌓아 만들어진 인공호로 유역의 영향을 받기 쉬우며 긴 체류시간에 의한 부영양화 현상이 빈번히 발생되고 있으며(Kim et al., 1997), 국내 호수에서 발생하는 식물플랑크톤 군집 천이 양상은 전형적인 온대형 호수의 군집구조 변화(Grover and Chrzanowski, 2006)를 보여주고 있어 봄철에는 규조류, 여름철에는 남조류 그리고 가을 및 겨울철에는 다시 규조류가 우점하는 경향을 보여주고 있다(김범철 등, 1999; 김지환 등, 1998; 허우명 등, 2006). 특히 부영양화된 호수에서는 여름철에 남조류에 의한 녹조현상이 빈번히 발생되고 있어 수자원 관리에 많은 문제를 야기시키고 있으며 국내에서도 많은 연구가 진행되고 있다(이경락 등, 2008; 이정준 등, 2003).

식물플랑크톤은 1차생산자로 호수 생태계에서 아주 중요한 부분을 차지하고 있어 식물플랑크톤 군집 구조의 시·공간적 변화에 대한 중요성이 대두되고 있다. 호 내 수층 생태계는 기후 및 영양염류에 따라 민감하게 반응하며 특히 식물플랑크톤은 기후 및 영양염류 변화에 큰 영향을 받는 것으로 알려져 있다(Winder and Schindler, 2004). 국내의 경우 아시아 몬순 기후의 영향으로 인하여 하절기에 연평균 강우량의 50-60%를 차지하여(An and Jones, 2000) 이러한 집중강우는 식물플랑크톤 군집 구조에 영향을 미치는

[†] To whom correspondence should be addressed.

ezpops@korea.kr

수온, 성층현상, 일사량 및 영양염 등의 시·공간적 변화를 발생시켜 식물플랑크톤 군집 구조를 변화시키는 것으로 알려져 있다(Figueredo and Giani, 2001).

본 연구에서는 남한강 상류 수계인 동강의 수질에 직접적인 영향을 미치는 부영양호인 도암호의 환경요인 및 식물플랑크톤 계절적 천이 특성을 조사하여 집중강우에 의해서 가장 큰 영향을 받은 탁도와 식물플랑크톤과의 관계를 통해 향후 도암호의 수질관리에 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 연구방법

2.1. 조사지점 및 조사기간

본 조사는 강원도 평창군 대관령면 수하리에 위치하고 있는 도암호의 댐 앞 지점(DA-L1)과 다른 하천의 영향이 없는 유입수 지점(DA-In1) 및 방류수 지점(DA-O)을 대상으로 결빙기를 제외한 2009년 4월부터 11월까지 월 1회씩 조사를 실시하였다(Fig. 1). 댐 앞 지점의 평균 수심은 35 m로 수심별 조사를 실시하였으며(0, 2, 5, 10, 20, 30, 40 m), 유입하천과 댐 방류수는 표층수를 조사하였다.

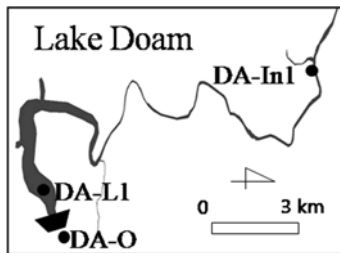


Fig. 1. Sampling sites in Lake Doam.

2.2. 조사 방법

도암호의 강우량, 유입량 및 방류량 자료는 한강수력원자력(주) 한강수력본부(hangang.khnp.co.kr) 홈페이지에서 운전현황의 일자료를 이용하였다.

일반 현장측정 항목인 수온, pH, 용존산소(Dissolved oxygen, DO), 전기전도도, 탁도는 다항목 수질 측정기(YSI 6600, YSI Inc.)을 이용하여 측정하였으며, 현장에서 채취한 시료는 냉암소에서 보관하여 가능한 한 빨리 실험실로 옮긴 후 Chlorophyll *a*, 고형물질(Suspended solid, SS), 총질소(Total nitrogen, TN), 용존총질소(Dissolved total nitrogen, DTN), 총인(Total phosphorus, TP) 및 용존총인(Dissolved total phosphorus, DTP) 항목을 수질공정시험법(환경부, 2004) 및 Standard method for water and wastewater(Greenberg et al., 1992)에 준하여 분석하였다.

식물플랑크톤 조사는 호 내 지점은 수심별로 0, 2, 5, 10 m로 구분하여 조사하였고 하천 구간은 표층만 조사하였다.

각 지점에서 채수한 물 시료를 냉, 암 조건에서 실험실로 옮긴 후 Lugol's solution을 최고고정농도가 2%(v/v)가 되도록 첨가하여 고정하였다. 식물플랑크톤 출현종 및 출현량(cells/mL)을 조사하기 위하여 고정된 시료를 식물플랑크톤의 양에 따라 농축하거나 그대로 사용하였으며 Sedgwick-

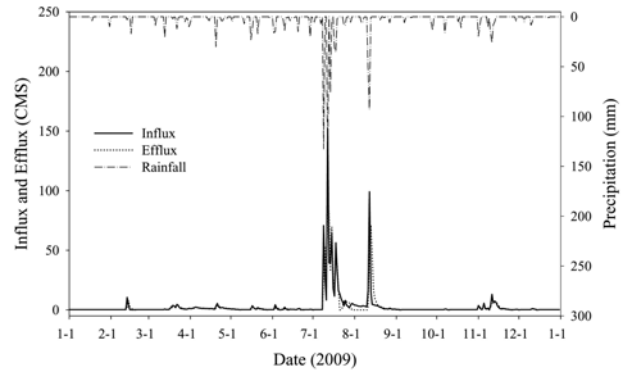


Fig. 2. Annual variation of influx, efflux and rainfall in Lake Doam.

Rafter counting chamber를 사용하여 위상차 현미경하에서 100 ~ 400배까지 관찰하여 동정, 계수하였다. 식물플랑크톤 중의 동정은 한국담수조류도감(정준, 1993), 일본담수조류도감(廣瀬弘幸 등, 1981) 및 담수조류생태도감(渡辺仁治, 2005)의 분류체계에 따라 동정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 수리·수문 특성

도암호의 1월부터 6월까지 강우패턴을 살펴보면 간헐적인 강우는 있었지만 1일 50 mm 이상의 집중강우 현상은 나타나지 않아 매우 적은 강우량을 보여 갈수상태가 유지되었다. 그러나 7월부터 8월 사이에는 강우강도 뿐만 아니라 1일 50 mm 이상의 강우가 5차례 발생하면서 집중강우가 발생하였으며 최대 일강우량은 7월 12일 148 mm였다. 강우량에 직접적인 영향을 받는 수위 및 유입량은 강우량과 유사한 변동을 보였으며 방류량 또한 유입량과 유사한 변동 패턴을 나타내었다(Fig. 2). 도암호 연평균 수위는 695 m로 조사되었고 수위 변동은 강우기전에는 거의 일정한 수위를 기록하였고 강우기에 최대 702 m를 기록하여 강우기와 비강우기의 수위 변동은 크지 않았다. 강우량과 유입량에 직접적인 영향을 받는 수리학적 체류시간은 1월부터 12월까지 평균 114일로 도암호는 수체류시간이 긴 호수형 호수로 확인되었다. 유입량과 방류량의 경우 평균 유입, 방류량은 각각 2.9, 2.8 CMS로 조사되었으며 유입량과 방류량은 거의 유사한 유량을 기록하였다. 이와 같은 결과는 도암호의 방류 방식이 수위 695 m 지점에 항상 열려있는 수문을 통해 월류되는 형식으로 이루어져 있기 때문이며 이러한 수리수문 특징에 의하여 호 내 표층에는 물의 흐름이 존재하며 특히 집중강우기 이후에는 유입량 증가로 인하여 물의 흐름 또한 빨라져 방류되는 것으로 판단되었다.

3.2. 환경요인 변화

월별 지점별 평균 수온은 7월까지 점차적으로 증가하는 것으로 조사되었고 특히 DA-O에서 월평균 수온이 가장 높은 것으로 조사되었다(Table 1). 방류수 수온 변화는 호 내의 표층 수온과 유사한 변동을 기록하였으며 또한 Chl. *a*도

Table 1. Month average of environmental factors in Lake Doam

Month	Site	Environmental factors								
		Water temperature (°C)	pH	DO (mg/L)	Conductivity (uS/cm)	Turbidity (NTU)	SS (mg/L)	TN (mg/L)	TP (mg/L)	Chl. <i>a</i> (mg/m ³)
Apr.	DA-L1	6.3	8.4	13.1	166	2.1	3.5	3.495	0.035	3.6
	DA-In1	6.2	9.3	13.0	121	1.9	3.0	2.908	0.049	2.4
	DA-O	9.3	8.6	12.0	151	2.0	4.0	3.677	0.029	8.8
May	DA-L1	8.3	8.9	10.7	162	1.9	3.5	3.492	0.026	4.9
	DA-In1	14.3	8.5	10.8	159	21.2	21.6	3.738	0.091	4.4
	DA-O	13.9	9.1	10.6	149	2.9	6.9	2.928	0.026	17.3
Jun.	DA-L1	7.4	7.7	7.6	170	2.4	3.3	3.514	0.023	2.4
	DA-In1	18.4	7.9	10.4	164	17.0	17.9	3.746	0.092	1.7
	DA-O	19.3	8.4	8.2	152	4.9	6.3	3.118	0.049	6.2
Jul.	DA-L1	11.6	8.0	6.9	114	118.9	91.4	3.370	0.227	5.1
	DA-In1	18.3	7.9	10.0	118	8.3	24.0	3.495	0.074	1.5
	DA-O	20.8	7.9	8.4	94	8.2	35.5	2.877	0.123	2.3
Aug.	DA-L1	10.8	6.8	6.2	122	136.6	87.5	3.302	0.193	4.9
	DA-In1	15.7	7.8	9.8	137	13.2	13.2	4.384	0.068	0.9
	DA-O	18.5	8.1	9.2	88	37.8	27.7	3.067	0.095	21.1
Sep.	DA-L1	11.8	8.4	6.8	137	74.5	46.8	3.154	0.131	3.1
	DA-In1	15.9	8.7	13.7	233	2.7	3.1	5.681	0.062	2.7
	DA-O	18.5	9.1	9.8	142	3.4	4.5	3.655	0.035	9.4
Oct.	DA-L1	10.1	7.3	7.5	132	43.1	26.4	3.280	0.118	9.1
	DA-In1	9.6	8.0	12.1	216	26.4	24.3	4.954	0.168	5.7
	DA-O	11.6	8.5	10.5	129	27.1	20.0	2.919	0.095	16.3
Nov.	DA-L1	6.0	7.4	10.2	138	17.7	10.4	3.129	0.082	1.9
	DA-In1	0.2	7.3	15.5	156	4.1	1.5	4.779	0.047	1.2
	DA-O	6.0	7.5	13.7	138	15.1	6.3	3.411	0.069	2.2
Average	DA-L1	9.0	7.9	8.6	143	49.7	34.1	3.342	0.104	4.4
	DA-In1	12.3	8.2	11.9	163	11.9	13.6	4.211	0.081	2.6
	DA-O	14.7	8.4	10.3	130	12.7	13.9	3.207	0.065	10.5

호 내 표층과 유사한 변동을 나타내어 도암호의 수리수문 특성과 같이 방류가 월류 방식으로 이루어지고 있다는 것을 확인할 수 있었다. 환경요인 중 DA-L1에서 시기적으로 큰 변동 폭을 나타낸 요인은 탁도 및 총인으로서 각각 1.9 ~ 136.6 NTU, 0.023 ~ 0.227 mg/L를 기록하였으며 특히 집중강우가 발생한 7월 이후에 급격히 증가하여 11월까지 높은 농도를 유지하여 호 내에 장기간 체류하는 것으로 판단되었다. DA-L1이 다른 조사지점에 비하여 높은 탁도 및 TP를 나타낸 것은 집중강우에 의해 하천유역으로부터 입자성 물질과 인이 같이 유입된 결과이며 김범철과 김윤희(2004)가 보고한 호 내 인 농도는 연간 1-3회의 큰 강우에 의해서 영향을 받는다는 보고와 유사한 결과를 나타내었다. DA-L1에서 TP는 집중강우기 전에는 중영양단계를 보이지만 집중강우가 발생한 7월과 8월에 각각 0.227, 0.193 mg/L의 농도로 부영양단계를 훨씬 초과하는 것으로 조사되었고(OECD, 1982), 조사 기간인 11월(0.082 mg/L)까지 높은 농도를 나타내어 수체의 부영양화가 심화되는 것으로 판단되었다. 반면에 TN는 DA-In1에서 집중강우 이후에 농도가 증가되는 경향을 나타냈음에도 불구하고 DA-L1과 DA-O는 시기별로 큰 차이를 보이지는 않아 질소의 경우

집중강우에 의해서 유입량은 증가되지만 인처럼 호 내에 장기간 체류하지는 않은 것으로 확인되었다. 그럼에도 불구하고 호 내 지점의 경우 연평균 3.342 mg/L로 연중 높은 농도를 기록하였다. 식물플랑크톤 생물량 지표로 이용되는 Chl. *a* 연평균 농도는 DA-L1, DA-In1 및 DA-O에서 각각 4.4, 2.5, 10.6 mg/m³으로 방류수 지점이 가장 높은 농도로 조사되었다. 위와 같은 결과는 앞에서 언급한 바와 같이 월류로 인한 호 내 표층수 방류에 의한 결과로 방류량 증가로 수체가 불안정한 7월을 제외하고 DA-L1 지점의 표층과 거의 유사한 농도를 기록하였으며, Chl. *a*의 수심별 분포를 통하여 확인 할 수 있었다(Fig. 3). DA-L1에서 Chl. *a* 수심별 분포를 살펴보면 0~5 m 사이 농도가 전체적으로 높게 조사되었고 특히 7월부터 9월까지의 수심별 농도 차이가 큰 것으로 조사되었다. 따라서, 유광층이 위 수심 사이에서 형성되는 것으로 판단되었고 연평균 투명도는 1.0 m로 조사되었다. 8월 표층에서 44.3 mg/m³의 농도로 연중 가장 높은 Chl. *a*를 나타내었지만 5 m 이하의 수심에서는 1.9 mg/m³의 농도로 조사되었으며 이 시기의 표층에서는 대형규조류이면서 부유성 규조류인 *Synedra acus*가 우점종으로 출현하였다.

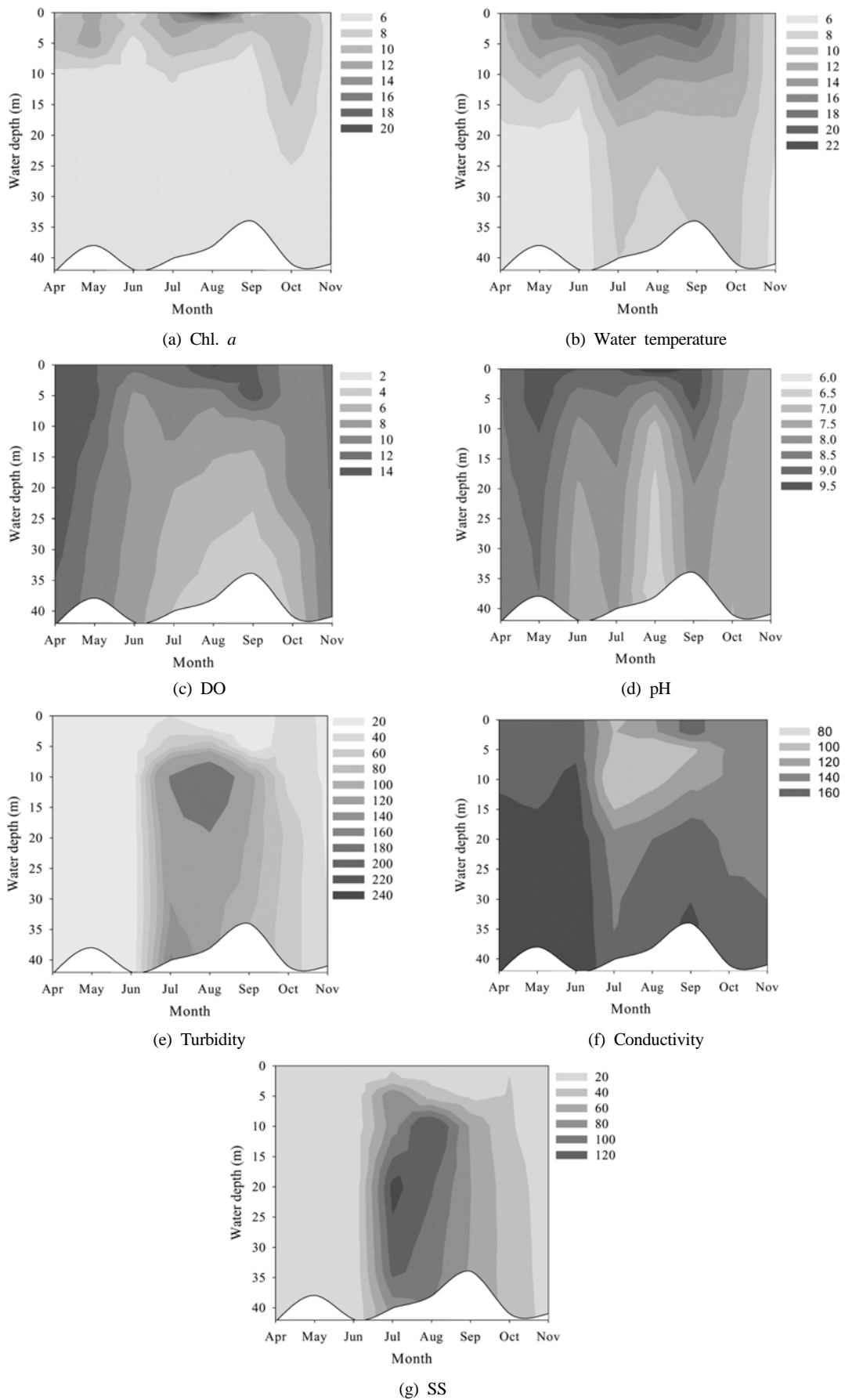


Fig. 3. Temporal and spatial variation of environmental factors in Lake Doam.

조사기간 동안 DA-L1에서 수심평균 수온 변화는 6.0 ~ 11.8°C로 조사되었고 여름철인 7월에 가장 높은 수온을 기록하였으며 표층 수온은 8월에 23.0°C로 가장 높게 조사되었다(Fig. 3). 수심별 수온 변화에 의해 성층현상이 5월부터 9월까지 발생하였고 수온약층은 수심 2 ~ 20 m 사이에서 형성되었다. pH는 조사기간 평균 7.9로 조사되었고 수심별 분포의 경우 여름철을 제외한 시기에는 수심별 차이를 보이지 않았지만 8월 Chl. *a* 농도가 가장 높았던 표층에서 10.0으로 가장 높은 pH를 나타내었고 이러한 결과는 식물플랑크톤 증식에 의한 결과로 판단되었다(Lampert and Sommer, 1997). DO의 경우도 pH와 유사한 시기별, 수심별 변동 패턴을 나타내었고 여름철인 8월에 표층에서 14.2 mg/L로 가장 높은 농도를 나타내었고 이 시기에 44.3 mg/m³로 식물플랑크톤 생물량 또한 가장 높은 농도로 조사되어 식물플랑크톤에 의한 영향으로 판단되었으며 8월과 9월에는 저층에서 2.0 mg/L 이하의 빈산소 상태를 나타내기도 하였다. 연평균 전기전도도는 142.7 uS/cm로 조사되었고 수심별 분포에서는 집중강우 발생 전과 후에 차이를 나타내었는데 이러한 현상은 탁수를 형성하는 입자성물질 표면에 전해질 물질이 흡착된 결과로 판단되었다(김용재, 1999).

탁도 및 SS의 경우 조사기간 동안 DA-L1의 수심평균 농도 범위는 각각 1.9 ~ 136.6 NTU와 91.4 ~ 3.3 mg/L로 조사되었고 특히 집중강우가 발생한 시기인 7월과 8월에 농도가 높아지는 것으로 확인되었다. 7월 전까지 수심별 탁도 및 SS 분포는 수심별 큰 차이를 보이지 않았으나 7월과 8월에는 집중강우에 의해서 유입하천으로부터 유입된 입자성물질에 의한 고농도 탁수의 유입으로 탁수층이 수심 2 m 이하부터 저층까지 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 탁수층은 여름철에 집중되는 몬순기후의 영향으로 인한 하천유역의 토사유입과 오염물질 유입에 의한 결과이며(An and Jones, 2000), 이러한 고농도의 탁수 유입은 수계내 빛 투과량 감소, 수생태계 교란 등의 호수 내 생물군집의 변화를 야기시키는 것으로 보고되었다(김자현 등, 2007).

3.3. 식물플랑크톤 군집 변화

DA-L1 및 DA-In1에서 조사기간 출현한 식물플랑크톤은 총 91종으로 규조강(Bacillariophyceae)이 38종, 녹조강(Chlorophyceae)이 35종, 남조강(Cyanophyceae)이 10종 그리고 나머지 기타조류가 8종 출현한 것으로 조사되었다.

DA-L1에서 봄철에 *Cyclotella meneghiniana*, *Synedra acus*

와 같은 규조류, 초여름 및 여름철에는 *Scenedesmus quadricauda*, *Chlamydomonas umbonata* 와 같은 녹조류와 *Synedra acus* 와 같은 규조류가 우점하였으며 가을 및 겨울철에는 다시 *Coelastrum spp.*와 같은 녹조류가 우점하는 것으로 조사되었다(Table 2). 조사기간 동안 출현한 전체 현존량에서 분류군별로 차지하는 비율은 규조류 42%, 녹조류 42%, 남조류 8%, 기타조류 8%로 규조류 및 녹조류 현존량이 높은 것으로 조사되었다. DA-In1에서도 DA-L1과 마찬가지로 규조류(35%) 및 녹조류(36%)가 높은 상대우점도를 나타내었고, 집중강우가 발생한 7월과 8월에는 wash out 현상으로 인하여 식물플랑크톤 현존량이 낮게 조사되었지만 9월부터 녹조류의 현존량(1,982 cells/mL) 및 상대우점도(74%)가 증가되는 것으로 조사되었다.

DA-L1에서 식물플랑크톤 분류군별 시·공간적 현존량 변동을 보면 4월과 5월에는 모든 수심에서 규조류의 현존량이 다른 분류군에 비하여 높은 현존량을 가졌지만 6월에는 녹조류가 수심 10 m를 제외하고 가장 높은 현존량(4,100 cells/mL)을 기록하였다(Fig. 4). 7월에는 규조류와 녹조류가 비슷한 현존량을 보여주었고 8월에는 규조류 현존량이 증가되었지만 9월에는 다시 녹조류의 현존량이 증가되는 현상을 보여주었다. 그리고 여름철 녹조현상을 일으키는 남조류(*Anabaena macrospora*)의 현존량이 수심 2 m에서 최대 1,850 cells/mL를 기록하였지만 다른 수심에서는 낮은 현존량을 나타내어 이 시기의 우점종은 녹조류인 *Coelastrum cambricum*으로 조사되었다. 10월과 11월도 규조류 및 녹조류가 다른 분류군과 비교하여 높은 현존량을 보였고 수심별로 고르게 분포하는 것으로 조사되었다. 남조류는 수체의 흐름과 탁도에 의한 광저해 등이 남조류 생장의 저해 요인으로 알려져 있어(Renolds, 2006) 높은 탁도를 기록한 DA-L1에서 남조류 생장이 저해되어 여름철 남조류 우점 현상이 관찰되지 않은 것으로 판단되며 윤석제 등(2010)이 보고한 결과와 유사한 결과를 나타내었다.

DA-L1에서 가장 높은 현존량을 기록한 시기는 8월로 표층에서 11,288 cells/mL로 그 중에서 규조류가 66%인 7,500 cells/mL를 기록하였고 녹조류가 34%인 3,784 cells/mL를 차지하였다. 반대로 가장 낮은 세포수를 기록한 시기는 탁수의 영향을 받은 7월의 10 m 수심으로 102 cells/mL로 조사되었으며 규조류가 49%인 50 cells/mL를 기록하였고 녹조류가 49%인 50 cells/mL를 차지하였다.

결론적으로 DA-L1에서 조사 기간 우점종 및 상대우점도

Table 2. Dominant species and relative dominance value in study sites

Month	DA-L1	DA-In1
Apr.	<i>Cyclotella meneghiniana</i> (39.3%)	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (28.6%)
May	<i>Synedra acus</i> (22.9%)	<i>Chlamydomonas sp.</i> (35.5%)
Jun.	<i>Scenedesmus quadricauda</i> (54.8%)	<i>Chlamydomonas sp.</i> (39.1%)
Jul.	<i>Chlamydomonas umbonata</i> (37.9%)	<i>Rhodomonas sp.</i> (42.4%)
Aug.	<i>Synedra acus</i> (22.8%)	<i>Rhodomonas sp.</i> (45.6%)
Sep.	<i>Coelastrum cambricum</i> (22.8%)	<i>Scenedesmus ellipticus</i> (52.4%)
Oct.	<i>Coelastrum sphaericum</i> (27.1%)	<i>Chroococcus sp.</i> (27.2%)
Nov.	<i>Rhodomonas sp.</i> (17.8%)	<i>Rhodomonas sp.</i> (24.0%)

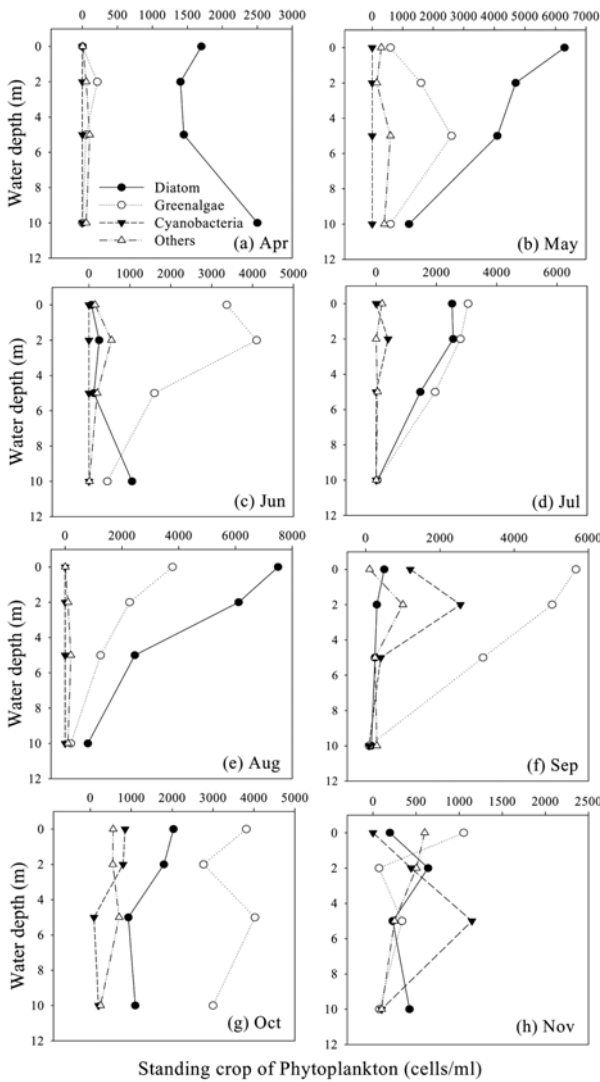


Fig. 4. Monthly variation of phytoplankton cell number as the phytoplankton community in Lake Doam.

는 전체적으로 규조류 및 녹조류가 우점하는 결과를 나타내었고 특히 부영양화된 호수에서 여름철에 빈번히 발생하는 남조류 우점 현상은 관찰 되지 않았고 대신에 여름철에

도 녹조류 및 규조류가 우점하는 것으로 조사되어 박정원 등(2005)이 탁수가 형성된 입하호를 대상으로 연구한 식물플랑크톤 군집 변화와 상응한 결과를 보여주었다.

3.4. 식물플랑크톤 분류군별 현존량과 환경요인과의 관계

식물플랑크톤 조사 수심별 분류군별 현존량에 영향을 미치는 환경요인을 확인하기 위하여 고농도의 탁수가 유입된 7월부터 11월까지 환경요인과의 상관분석을 실시하였다 (Table 3). 그 결과 식물플랑크톤 생물량 지표로 이용되는 Chl. *a*는 수온과 규조류 및 녹조류 현존량과 높은 양의 상관관계를 나타내어($P < 0.001$) 규조류 및 녹조류가 Chl. *a*에 큰 비중을 차지하는 것으로 확인되었다. 또한 수온은 녹조류와 높은 양의 상관관계를 나타내어($P < 0.01$) 다른 분류군 보다는 수온에 영향을 받은 것으로 조사되어 수온이 상승한 여름철에 우점 현상을 보인 것으로 판단되었다. 그리고 영양염류 중에서 TP가 탁도 및 SS와 높은 양의 상관관계를 나타낸 것은 TP가 집중강우에 의해 형성된 탁수에 TP가 포함된 결과이다($P < 0.001$). 일반적인 부영양호에서 여름철에 발생빈도가 높아 우점 분류군으로 알려진 남조류의 경우 도암호에서는 남조류가 탁도와 높은 음의 상관관계를 나타내어 남조류 생장에 탁도가 가장 큰 저해 요인으로 작용한 것으로 판단되었다($P < 0.01$; 오희목과 김도한, 1995).

결론적으로 부영양호인 도암호에서의 식물플랑크톤 군집의 계절별 천이 양상은 여름철에 집중된 강우에 의해서 유입된 고농도 탁수가 일반적으로 부영양 호수에서 여름철에 빈번히 발생하는 남조류 생장의 저해 요인으로 작용하여 높은 탁도에도 높은 성장 능력을 가지는 식물플랑크톤 군집인 규조류가 여름철에도 우점하는 결과를 나타내었고 (Lionard et al., 2008), 그리고 녹조류는 탁도에 의한 성장 저해 영향 보다는 수온 상승($P < 0.01$)이 생장에 더 큰 영향을 미친 결과로 사료되었다. 또한 남조류의 낮은 현존량은 탁수 뿐만이 아니라 호 내 표층에 물의 흐름이 존재하는 도암호의 수리수문 특징에 의해서 정체수역에서 높은 발생빈도를 나타내는 남조류 생장에 영향을 미친 것으로도 사료되었다(오광철 등, 1995).

Table 3. Correlation coefficient between environmental factors and phytoplankton cell number after concentrated rainfall from July to November in DA-L1 (n=20)

	Chl. <i>a</i>	Water temperature	Turbidity	SS	TP	TN	Phytoplankton	Diatom	Greenalgae	Cyanobacteria
Water temperature	***0.777									
Turbidity	-0.227	-0.136								
SS	-0.051	0.141	***0.919							
TP	-0.315	-0.214	***0.970	***0.894						
TN	-0.036	-0.098	0.112	0.065	0.213					
Phytoplankton	**0.671	*0.459	**0.604	*0.465	***0.689	-0.050				
Diatom	***0.698	*0.431	-0.116	-0.051	-0.249	-0.078	***0.734			
Greenalgae	***0.750	**0.597	**0.525	-0.333	**0.589	-0.033	***0.903	*0.560		
Cyanobacteria	0.212	0.279	**0.667	**0.629	***0.685	0.038	**0.597	0.060	*0.439	
Others	-0.279	-0.390	-0.211	-0.286	-0.211	0.091	0.247	-0.117	0.145	0.116

* : $P < 0.05$, ** : $P < 0.01$, *** : $P < 0.001$

4. 결론

2009년 4월부터 11월까지 도암호의 수리수문 및 환경요인과 식물플랑크톤 계절별 천이 양상을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 도암호에서는 7월과 8월 사이에 발생한 집중강우에 의해서 유입량과 방류량이 증가하는 경향을 나타내었고 강우량에 직접적인 영향을 받는 수위 및 유입량은 강우량과 유사한 변동을 보였으며 방류량 또한 유입량과 유사한 변동 패턴을 나타내었다. 평균 유입량과 방류량은 각각 2.9와 2.8 CMS로 유사한 값을 가진 것은 월류로 방류되는 방식이기 때문이며 이러한 수리수문 특성은 식물플랑크톤 군집구조에 영향을 미친 것으로 추측되었다.
- 2) 식물플랑크톤 성장에 큰 영향을 미치는 수온은 녹조류와 높은 양의 상관관계를 나타내었으며($P < 0.01$), 영양염류 중에서 TP는 집중강우에 의해 많은 양이 호 내로 유입되어 수체의 부영양화를 야기시키는 것으로 조사되었고 TN은 연평균 3.342 mg/L로 조사되었으며 TP 및 TN은 식물플랑크톤과의 유의한 상관을 보이지는 않아 식물플랑크톤 성장에 제한 요인으로 작용하지는 않는 것으로 판단되었다. 집중강우에 의해서 가장 큰 영향을 받은 환경요인은 탁도였으며, 집중강우 이후 호 내에 탁수층이 수심 2 m 이하부터 저층까지 분포하고 있는 것으로 조사되었다. 이러한 탁수층에 의해서 식물플랑크톤 군집 중에서 남조류가 가장 큰 영향을 받은 것으로 조사되었다($P < 0.01$).
- 3) 도암호 내 및 유입수 지점에서 조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤은 총 91종으로 규조강(Bacillariophyceae)이 38종, 녹조강(Chlorophyceae)이 35종, 남조강(Cyanophyceae)이 10종 그리고 나머지 기타조류가 8종 출현한 것으로 조사되었으며, 전체 현존량에서 분류군별로 차지하는 비율은 규조류 42%, 녹조류 42%, 남조류 8%, 기타조류 8%로 규조류 및 녹조류 현존량이 높은 것으로 조사되었다. 식물플랑크톤 계절별 천이 양상은 봄철에 *Cyclotella meneghiniana*, *Synedra acus*와 같은 규조류, 초여름 및 여름철에는 *Scenedesmus quadricauda*, *Chlamydomonas umbonate*와 같은 녹조류와 *Synedra acus*와 같은 규조류가 우점하였으며 가을 및 겨울철에는 다시 *Coelastrum* spp.와 같은 녹조류가 우점하는 것으로 조사되어 여름철에 부영양 호수에서 빈번히 발생하는 남조류에 의한 우점현상이 부영양호인 도암호에서 관찰되지 않은 이유는 수리수문 특징 및 고농도 탁수 유입에 의한 영향으로 판단되었다.

사 사

본 연구는 2009년도 한강수계 환경기초조사사업 「수계별 호소환경 및 생태조사 II」의 일환으로 수행되었습니다.

참고문헌

김범철, 김윤희(2004). 아시아 몬순지역의 대형담(소양호)에서의 인순환과 2차모델의 적용. *한국하천호수학회지*, **37**, pp. 205-212.

김범철, 김재욱, 전만식, 황순진(1999). 소양호 동·식물플랑크톤의 계절 변동. *한국하천호수학회지*, **32**(2), pp. 127-134.

김범철, 허우명, 황길순(1995). 도암호의 부영양화 실태. *한국육수학회지*, **28**(2), pp. 233-240.

김용재(1999). 덕동호의 식물플랑크톤 군집과 LTSI에 의한 호소의 영양상태평가. *한국조류학회지*, **14**, pp. 161-167.

김자현, 서진원, 나영언, 안광국(2007). 용담댐 건설후 하류부 하천 생태계의 탁수영향 평가. *한국하천호수학회지*, **40**(1), pp. 130-142.

김지환, 김영환, 이인규(1998). 충주호 식물플랑크톤 군집의 동태. *조류학회지*, **13**(3), pp. 339-354.

박정원, 이경락, 최재신, 김한순(2005). 임하댐의 탁수 형성 후 식물플랑크톤 군집 동태. *한국하천호수학회지*, **38**(3), pp. 429-434.

오광철, 오희목, 이진환, 맹주선(1995). 대청호 식물플랑크톤의 일주성 수직이동. *한국하천호수학회지*, **28**(4), pp. 437-446.

오희목, 김도한(1995). 대청호의 남조류 수화발생에 대한 단기적 예측. *한국하천호수학회지*, **28**, pp. 127-135.

이경락, 정원화, 김종민, 김영생, 최희진, 김한순(2008). 영천호에서 남조류 독소(microcystins)의 계절적 변동. *한국하천호수학회지*, **41**(2), pp. 264-274.

이상화, 최재석, 이광열, 장영수, 임인수, 허우명, 김재구, 김범철(2006). 도암호의 수질과 어류군집 특성 연구. *한국하천호수학회지*, **39**(2), pp. 167-177.

이정준, 이정호, 박종근(2003). 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관 관계. *한국하천호수학회지*, **36**(3), pp. 269-276.

윤석재, 박해경, 신경애(2010). 한강 수계 주요 인공담호의 식물플랑크톤 군집 동태. *수질보전 한국물환경학회지*, **26**(2), pp. 917-925.

정준(1993). *한국담수조류도감*, 아카데미서적.

허우명, 권상용, 김영길, 이원호, 임병진, 김범철(2006). 용담호에서 환경요인과 식물플랑크톤의 시공간적 변동. *한국하천호수학회지*, **36**(3), pp. 366-377.

허인량, 박상균, 최규열, 정의호(1995). 송천상류수계의 수질 및 오염부하량분포에 관한 연구. *한국수질보전학회지*, **11**(3), pp. 175-181.

환경부(2004). *수질오염공정시험방법*.

廣瀬弘幸, 山岸高旺 編(1981). *日本淡水藻類圖鑑*, 内田老鶴圃.

渡辺仁治(2005). *담수규조생태도감*, 内田老鶴圃.

An, K. G. and Jones, J. R. (2000). Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia*, **432**, pp. 37-48.

Figueredo, C. C. and Giani, A. (2001). Seasonal variation in the diversity and species richness of phytoplankton in a tropical eutrophic reservoir. *Hydrobiologia*, **445**, pp. 165-174.

Greenberg, A. E., Clesceri, L. S., and Eaton, A. N. (1992). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 18th ed. APHA AWWA WEF, Washington.

Grover, J. P. and Chrzanowski, T. H. (2006). Seasonal dynamics of phytoplankton in two warm temperate reservoirs: association of taxonomic composition with temperature. *J.*

- Plankton Res.*, **28**, pp. 1-17.
- Kim, B., Park, J. H., Hwang, G., and Choi, K. (1997). Eutrophication of large freshwater ecosystem in Korea. *Korean J. Limnol.*, **30**, pp. 512-517.
- Lampert, W. and Sommer, U. (1997). *Limnology: The Ecology of Lakes and Streams*. Oxford University Press.
- Lionard, M., Muylaert, K., Hanoutti, A., Maris, T., Tackx, M., and Vyverman, W. (2008). Inter-annual variability in phytoplankton summer blooms in the freshwater tidal reaches of the Schelde estuary (Belgium). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **79**, pp. 694-700.
- OECD(1982). *Eutrophication of Water Monitoring: Assessment and Control.*, OECD, Paris.
- Reynolds, C. S. (2006). *The ecology phytoplankton*. Cambridge Unvi. Press, London.
- Winder, M. and Schindler, D. E. (2004). Climatic effects on the phenology of lake processes. *Global Change Biology*, **10**, pp. 1844-1856.