

소규모 농업용 전대저수지의 수환경 변화와 조류발생 특성

남귀숙* · 이의행 · 김미리내 · 배요섭 · 엄한용

한국농어촌공사 농어촌연구원

Characteristics of Aquatic Environment and Algal Bloom in a Small-scaled Agricultural Reservoir (Jundae Reservoir)

Gui-Sook Nam*, Eui-Haeng Lee, Mirinae Kim, Yo-Sup Pae and Han-Young Eum

Rural Research Institute, Korea Rural Community Corporation, Ansan 462-908, Korea

Abstract - This study was conducted to identify the relationship between environmental factors and algal bloom, and provide information for efficient management based on the results of monitoring the environmental parameters and algal diversity in the Jundae reservoir from March 2011 to October 2013. Little change in the weather conditions was observed during the study period except for a slight decrease in rainfall. Concentration of TN and TP in the reservoir exceeded water quality standards for agriculture and significant correlation between algal growth and environmental factors was observed. Phytoplankton in Jundae reservoir included 6 classes, 40 genus, 62 species, and the phytoplankton abundance was in the range of $1.3 \times 10^4 \sim 2.8 \times 10^6$ cells mL^{-1} . The annual average of phytoplankton abundance and Chl-*a* gradually decreased as TN and TP concentrations decreased. Overall *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., and *Microcystis* sp. were the dominant species in Jundae reservoir. As the water temperature increased, the dominant species were *Anabaena* sp., *Microcystis* sp. and *Oscillatoria* sp., in that order. *Anabaena* sp. was dominant from spring to early summer with increase in water temperature and pollutant concentrations, and high correlation with environmental factors was observed. *Microcystis* sp. was dominant depending on changes in the nutrient levels. In the case of *Oscillatoria* sp., there was no significant correlation between phytoplankton biomass and Chl-*a*. However, efficient management of water environment and practical control of algal bloom in small scale reservoir polluted by livestock and farm irrigation should be achieved by identification of the relationship between algal growth and environmental factors.

Key words : water environment, algal bloom, Jundae Reservoir, eutrophic, agricultural reservoir

서 론

우리나라는 전국에 걸쳐 18,000여개의 크고 작은 호소가 산재하고, 대하천에 조성된 인공댐호를 제외하면 수심이 얇고 규모가 작은 인공저수지가 대부분을 차지

하고 있으며 (Kim *et al.* 2010), 이중에서도 대부분은 건설된지 오래되어 저층 유기물 퇴적정도가 높다 (Kim *et al.* 2007). 이들 중소형 저수지들은 집수역으로부터 유입된 인과 질소로 인해 부영양화 상태를 보이고 있고, 식물플랑크톤의 생산력증가와 대변성 현상 등에 의해 생태계 교란이 발생하고 있다 (Kim *et al.* 2010). 특히, 저수지 인근에 위치한 축사 등 특정지역에서 유래하는 점오염원과 농경지 n 등 비점오염원으로부터 유입된 유기물과 영

* Corresponding author: Gui-Sook Nam, Tel. 031-400-1829, Fax. 042-400-1889, E-mail. nguisook@hanmail.net

양염류가 다량으로 축적되어 남조류에 의한 조류대발생을 유발하고 있다(Takamura and Watanabe 1987; Kwon *et al.* 2011). 수심이 낮은 중소형 저수지들은 토사나 오염물질 증가에 취약하며, 부영양화는 물론 조류대발생으로 인해 산소고갈과 생물상의 단순화에 의한 생태계 파괴, 악취발생 등의 피해가 나타난다. 저수지의 수환경은 지역적인 기후, 유역내 토지이용현황과 오염원 특징, 지형, 그리고 호수 규모 등 물리구조적 특징과 유입수량, 수체 흐름, 물 순환 등 수리수문학적 체계에 영향을 받을 수 있다(Kim and Hwang 2004; Youn *et al.* 2007). 또한, 높은 영양염농도는 조류의 생산성을 증가시키며(Raynolds *et al.* 1983; Kim *et al.* 2004; Youn *et al.* 2010), 조류성장에 의한 내부 COD 증가에 영향을 미치는 등 화학물질간에서 복잡한 상호반응을 보이고 있다(Jeon *et al.* 2002).

그동안 국내의 경우 정수생태계에서 수환경 특성과 더불어 플랑크톤 군집동태, 분포 등에 대한 연구는 대부분 대형호수를 중심으로 이루어졌으며(Lee *et al.* 2005; Uhm and Hwang 2006), 중소형의 농업용저수지를 대상으로 한 연구는 미흡한 실정이다(Kim *et al.* 2010). 특히, 축산에 의한 오염이 심한 전형적인 소규모 농업용 저수지에서 수환경변화에 따른 조류발생 특성에 대한 연구는 거의 없다고 볼 수 있다.

따라서 본 연구에서는 축산에 의한 오염이 심각한 소규모 농업용 전대저수지에서 3년간의 모니터링 결과를 바탕으로 수환경 변화와 조류발생 특성을 분석하여 부영양화된 소형저수지에서의 수환경과 조류대발생(Algal bloom)과의 관계를 규명하고 효율적 관리를 위한 기초 자료를 제공하고자 하였다.

재료 및 방법

1. 연구대상지 및 조사지점

농업용저수지인 전대저수지는 충청남도 당진시 송악읍 전대리에 위치하고(Fig. 1), 금곡리에서 유입되는 2개의 소하천이 주 유입하천이며, 유역면적 234 ha, 만수면적 15.58 ha, 수혜면적 105 ha, 제당높이 7.8 m (15.6 EL.m), 평균수심 3.77 m, 총저수량 $619 \times 10^3 \text{ m}^3$ (유효저수량: $587 \times 10^3 \text{ m}^3$)의 소규모 농업용저수지이다. 주요오염원은 축산계로서, 유역 내 축산농가가 산재해 있으며, 농경지 및 소규모 마을이 분포하고 있다. 또한 저수지 내 유료낚시터가 존재하여 떡밥사용에 따른 추가오염과 낚시로 인한 생태계 교란 등이 이루어지고 있다(Korea Rural Community Corporation, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2012a).

전대저수지의 장기간에 걸친 조류발생 특성을 살펴보기 위한 조사지점은 저수지 제방기준 100 m 상류지점이다(Fig. 1). 연구기간동안 정점의 수심은 저수율에 따라 변화하였으며, 3.5~4.2 m(평균 3.7 m)의 범위를 보여주었다(Korea Rural Community Corporation, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs 2012b).

2. 조사시기 및 분석방법

시기별 조류발생특성 분석을 위해 2011년 3월~2013년 10월 동안 모니터링을 실시하였으며, 녹조발생이 상대적으로 빈약한 동절기는 제외하였다. 기상변화는 기상

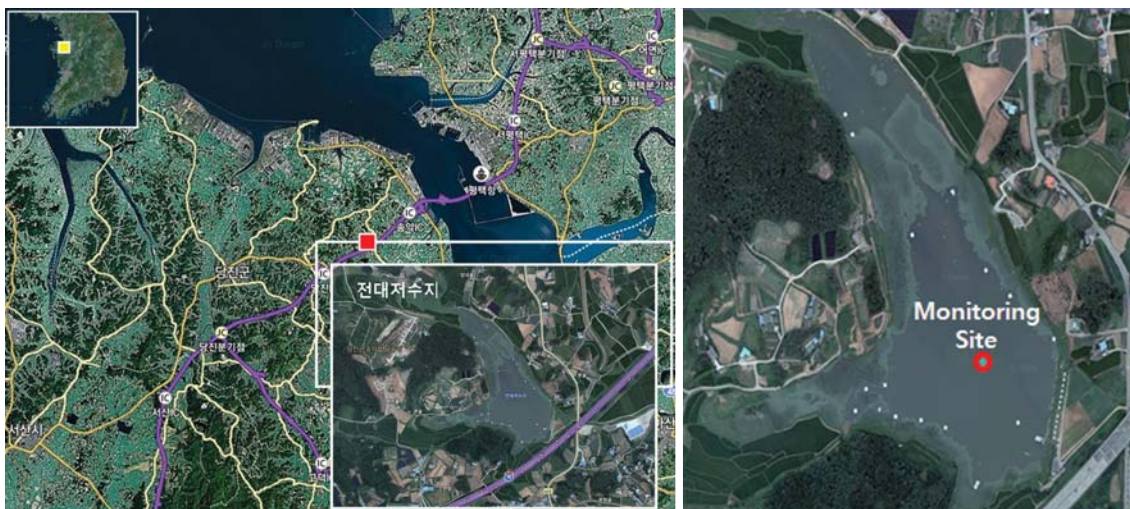


Fig. 1. Location and monitoring site of Jundai Reservoir.

청 (<http://www.kma.go.kr/>) 자료 중 서산기상대의 자료 (2013년 3월 1일~2013년 10월 31일)를 이용하였다.

시기별 수환경 특성과 조류발생 특성을 분석하기 위해 수온 (W. temp., °C), 용존산소량 (DO, mg L⁻¹), 수소이온농도 (pH), 전기전도도 (EC, μS cm⁻¹), 화학적 산소요구량 (COD, mg L⁻¹), 총질소 (TN, mg L⁻¹), 총인 (TP, mg L⁻¹), 엽록소-*a* (Chl-*a*, mg m⁻³) 농도 및 식물플랑크톤현존량을 분석하였으며, 시료의 채취는 수심 1 m 지점에서 실시하였다. 현장에서 종합수질측정장치 (YSI ProPlus)를 이용하여, 수온, DO, pH, EC를 측정하였으며, 현장에서

채수한 시료는 냉암조건으로 운반하여 실내에서 COD, TN, TP, Chl-*a* 항목에 대해 분석을 실시하였다. 분석방법은 수질오염공정시험방법 (Ministry of Environment 2012) 및 Standard method (APHA 2005)에 준하였다.

식물플랑크톤 (Phytoplankton, cells mL⁻¹)은 현장수를 500 mL 채수통에 직접 담아 lugol's solution으로 2%가 되게 고정하였으며, 현존량과 출현종을 분석하였다. 고정된 시료는 균일하게 혼합시킨 후 Sedgwick-Rafter Chamber를 이용하여 광학현미경 (Zeiss Axiophot) 아래에서 200배로 계수하고 400배로 동정하였으며, 한국담수조류도감

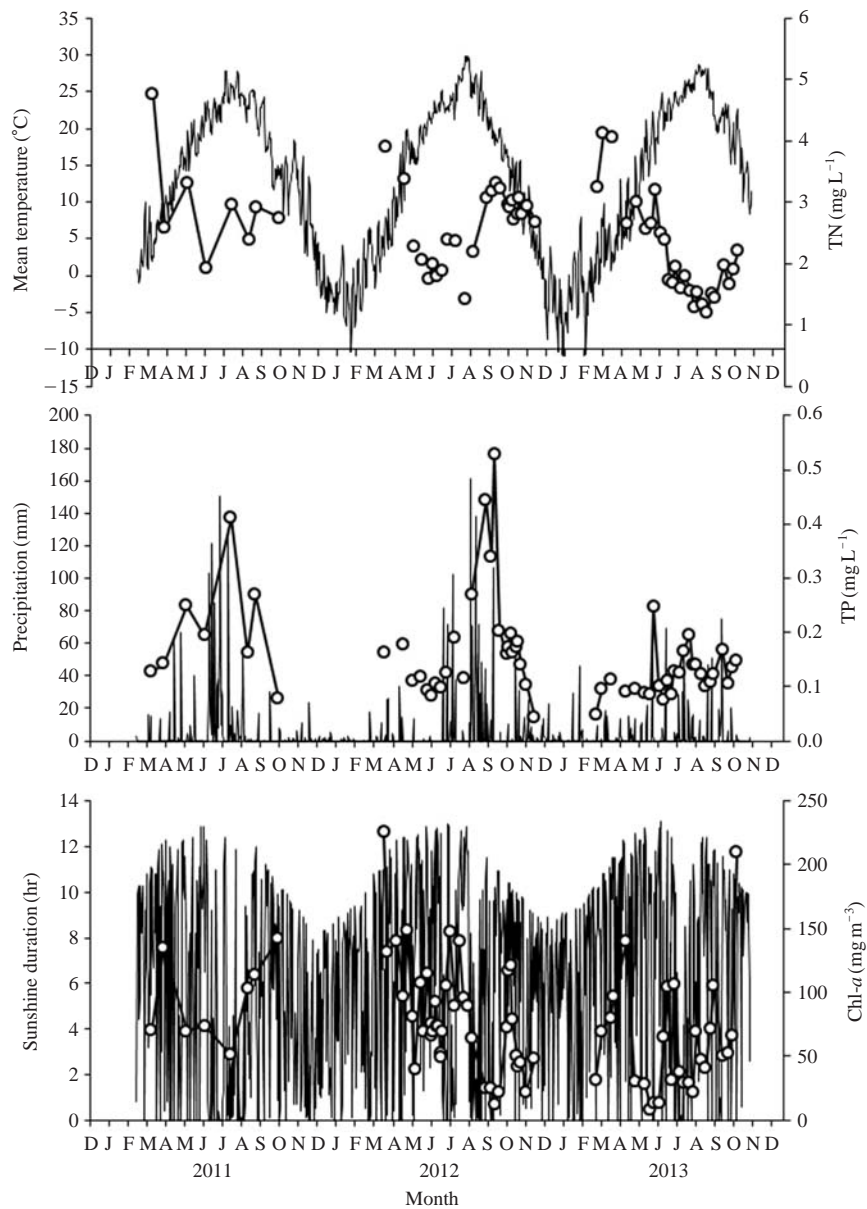


Fig. 2. Changes of mean temperature, precipitation, sunshine duration, TN, TP, and Chl-*a* in Jundae reservoir (2011~2013).

(Jung 1993), 관련 문헌 (Lee and Chang 1997; Korea Water Resources corporation 2000) 등을 참고하였다.

또한, TN, TP 분석결과를 활용하여 TN/TP ratio (N/P ratio)를 단순 계산 하였으며, 항목간 상관계수의 분석은 microsoft excel 2010의 통계분석 함수 ($p < 0.05$)를 이용하여 단순선형회귀분석 (single linear regression analysis)하였다. 상관계수 r 에 대한 상관성은 $r \geq 0.75$ 를 강상관, $0.75 > r \geq 0.25$ 를 중상관, $r < 0.25$ 를 약상관으로 판정하였다 (Berthouex and Brown 1994).

결과 및 고찰

1. 기상 및 수환경 변화

2011년 3월부터 2013년 10월까지 저수용량 62만톤 규모의 소형 농업용저수지인 전대저수지를 대상으로 기상 및 수환경 변화, 상관관계를 분석하였다 (Fig. 2, Tables 1-2). 조사기간동안 일평균 기온은 $-10.8 \sim 29.0^\circ\text{C}$ (평균 13.1°C)로 2011년 $-5 \sim 27.9^\circ\text{C}$, 2012년 $-10.4 \sim 29.9^\circ\text{C}$,

2013년 $-10.8 \sim 28.8^\circ\text{C}$ 로 비교적 유사한 변화를 보였다. 강수량은 2011년 1,639.8 mm (일최대 강우 150.5 mm), 2012년 1,642.6 mm (161.3 mm), 2013년 10월까지 921.9 mm (75.2 mm)로 2011년과 2012년에 비해 2013년은 강우가 상당히 적게 나타났다. 일조시간은 2011년 일평균 5.4시간, 2012년 6.3시간, 2013년 6.2시간으로 2012년에 비교적 높게 나타났다. 우리나라 하절기 몬순강우는 호소의 수질변이에 지대한 영향을 끼치는 것으로 알려져 있으며 (Faithful and Griffith 2000; An *et al.* 2001; An and Shin 2005), 몬순강우가 저수지 수위 및 유량변동, 유기물과 영양염류 유입 등 전반적인 물리적 화학적 상태변화에 영향을 미치는 것으로 보고되고 있다 (An *et al.* 2001; Lee *et al.* 2007). 또한, 조류의 1차 생산성을 나타내는 Chl-*a*는 기온변화와 강우, 일조시간 등의 기상조건에 영향을 받고 있으므로 기상변화와 함께 나타내었다 (Fig. 2). TN은 $1.193 \sim 4.771 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 농업용수 기준으로 준용하고 있는 환경기준 IV등급 ($\leq 1.0 \text{ mg L}^{-1}$)을 초과하고 있으며, 2011년 평균 2.954 mg L^{-1} , 2012년 2.571 mg L^{-1} , 2013년 2.149 mg L^{-1} 으로 점차 감소 추세를 보여

Table 1. The Correlation between water quality parameters

	W. temp.	DO	pH	EC	COD	TN	TP	N/P	Chl- <i>a</i>	Phytoplankton
W. Temp.	1.000									
DO	-0.539	1.000								
pH	0.041	0.623	1.000							
EC	0.295	-0.109	0.064	1.000						
COD	0.370	0.137	0.523	0.476	1.000					
TN	-0.786	0.436	-0.199	-0.299	-0.457	1.000				
TP	0.157	-0.291	-0.416	-0.441	-0.333	0.274	1.000			
N/P	-0.718	0.548	0.172	0.096	-0.236	0.428	-0.550	1.000		
Chl- <i>a</i>	-0.138	0.582	0.554	0.115	0.686	0.057	-0.175	-0.010	1.000	
Phytoplankton	0.215	0.108	0.199	0.343	0.359	-0.163	0.168	-0.169	0.309	1.000

Table 2. Summary of water quality parameters

Parameter	W. temp. ($^\circ\text{C}$)	pH	EC ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	DO	COD	TN	TP	N/P	Chl- <i>a</i> (mg m^{-3})	
										(mg L $^{-1}$)
2011	Min	7.5	7.7	155.6	7.1	7.8	1.922	0.079	7.2	51.1
	Max	27.6	9.7	325.0	15.5	18.0	4.771	0.411	37.3	142.7
	Average	20.6	9.0	236.8	11.0	15.0	2.954	0.205	18.3	95.1
	Standard deviation	7.1	0.6	60.8	2.6	3.0	0.790	0.098	10.7	31.5
2012	Min	7.8	7.5	169.1	2.8	8.0	1.428	0.044	6.9	22.3
	Max	32.3	9.7	440.7	14.9	21.7	3.914	0.444	60.7	225.9
	Average	20.7	8.7	272.8	8.7	14.1	2.571	0.169	19.1	80.1
	Standard deviation	6.0	0.6	12.5	3.7	1.0	0.182	0.128	16.9	18.3
2013	Min	5.4	7.7	233.7	1.8	8.2	1.193	0.048	8.0	8.1
	Max	33.1	9.8	288.0	15.5	27.3	4.118	0.195	67.7	210.2
	Average	22.8	8.7	254.6	7.1	15.2	2.149	0.119	20.8	62.8
	Standard deviation	7.7	0.7	19.9	4.0	4.5	0.813	0.031	13.8	45.6

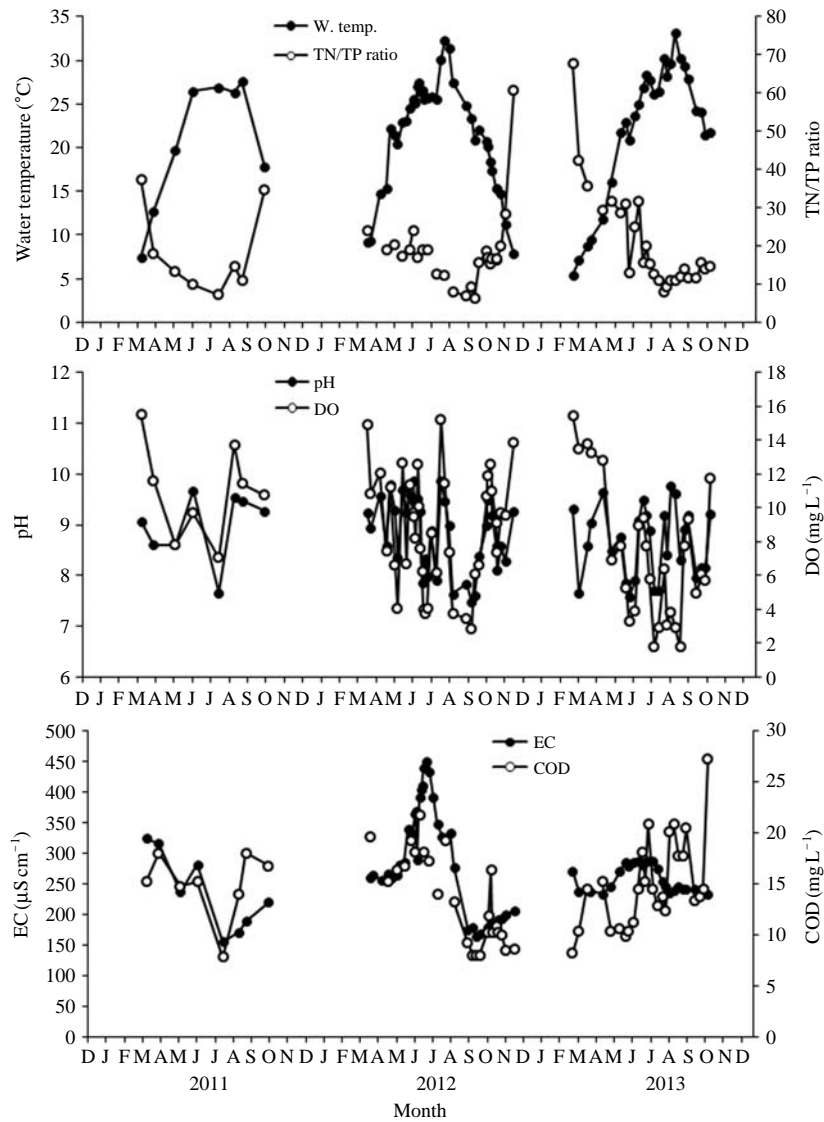


Fig. 3. Seasonal variations on water temperature, DO, pH, EC, COD and TN/TP ratio in Jundae reservoir (2011 ~ 2013).

주었다. TN과 각 수환경 항목과의 상관관계 (r)를 보면, 수온과 -0.786 으로 강한 부의 상관을 나타내었다. 또한, DO와 0.436 으로 정의 중상관, COD와 -0.457 로 부의 중상관관계를 보여주었다. TP는 $0.044 \sim 0.444 \text{ mg L}^{-1}$ 의 범위로 많은 시기에 환경기준 IV등급 ($\leq 1.0 \text{ mg L}^{-1}$)을 초과하고 있으며, 2011년 평균 0.205 mg L^{-1} , 2012년 0.169 mg L^{-1} , 2013년 0.119 mg L^{-1} 으로 TN과 마찬가지로 점차 감소 추세를 보여주었다. TP는 Fig. 2에서와 같이 강수량의 증감에 영향을 받는 것으로 보이는 반면, 다른 수환경 항목과의 상관계수 분석결과 강상관을 보이는 항목은 없었다. 단지 pH와 -0.416 , EC와 -0.441 , COD와 -0.333 , DO -0.291 , TN 0.274 등의 약상관 관계

를 보였다. 특히, 삽교호 등의 기존연구에서 Chl-a가 다른 수질인자(pH, TP 등)과 비교적 높은 상관관계를 보이고 있는 것과 달리 TP와 Chl-a, 그리고 식물플랑크톤 현존량과의 상관계수는 각각 -0.175 , 0.168 로 낮게 나타나고 있었는데, 이미 충분한 농도의 TP가 존재하는 부영양 저수지에서 P는 조류생산성의 제한인자가 아닌 것으로 판단되었다(Kim and Hwang 2004; Kim *et al.* 2012; Korea Rural Community Corporation, Ministry for Food, Agriculture, Forestry and Fisheries 2012). Chl-a는 조류의 1차 생산성을 보여주는 간접지표로서 기온(수온)이 높을수록, 강수량이 적을수록(체류시간이 길수록), 일조시간이 길수록 증가할 것으로 알려져 있다. 조사기간 중 Chl-a는

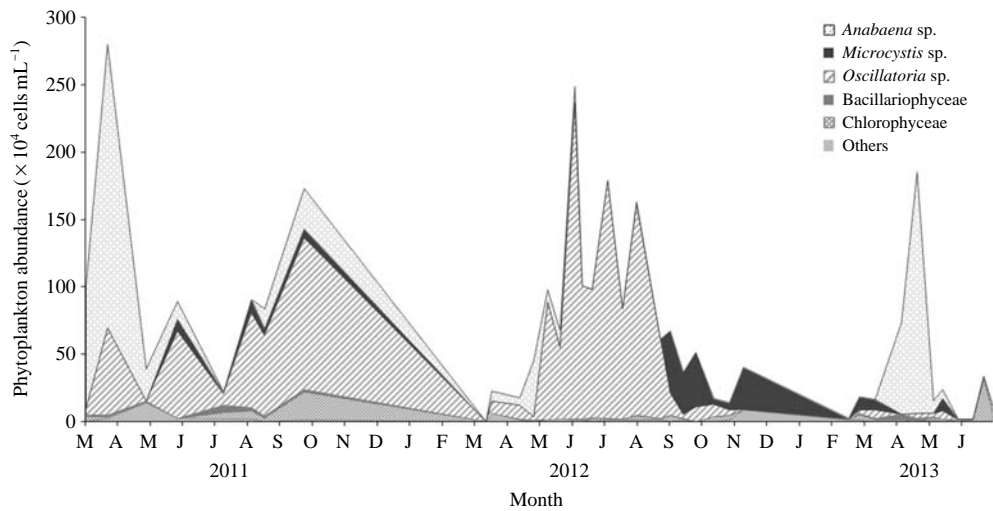


Fig. 4. Seasonal distribution of phytoplankton in Jundai reservoir (2011 ~ 2013).

8.1~225.9 mg m⁻³으로 2011년 평균 95.1 mg m⁻³, 2012년 80.1 mg m⁻³, 2013년 62.8 mg m⁻³로 TN, TP의 감소와 함께 연차별로 감소하였으며, 일조시간이 높은 구간에서 Chl-*a*가 높게 나타나 일조시간 증가가 Chl-*a* 증가에 영향을 주는 것으로 사료되었다.

Fig. 3에서는 수온, pH, EC, DO, COD, N/P ratio 등 서로 상관성을 가지는 항목에 대해 3년간 월 변화를 비교하였다. 수온은 조사기간 동안 5.4~33.1°C의 범위내에서 변화하였으며, 앞서 언급한 바와 같이 TN과 강한 상관성을 보일 뿐만 아니라 N/P ratio와도 강한 부의 상관관계를 나타내었다. N/P ratio는 TN 농도의 영향을 받고 있으며, TN은 수온이 높은 문순기의 영향보다는 수온이 낮은 겨울철, 초봄에 주로 유입되어 증가함을 보여주었다. 이는 TN 농도가 강우량의 변화양상과 연관성이 관찰되지 않은 Kim *et al.* (2003)의 결과와도 일치한다. N/P ratio는 6.9~67.7의 범위를 보였으며, 2011년 평균 18.3, 2012년 19.1, 2013년 20.8로 TN의 감소로 인해 점차 증가하는 양상을 보였다. N/P ratio는 TP와 -0.550의 중상관관계를 보이고, 그다음 DO (0.548), TN (0.428) 순을 나타내어 상관성이 있음을 보여주었으나, Chl-*a*와 식물플랑크톤 현존량과는 상관성이 나타나지 않아 N/P ratio가 조류성장량에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

pH는 7.5~9.8의 범위를 보였으며, DO와 가장 높은 상관관계 (0.623)를, Chl-*a* (0.554), COD (0.523)와 중상관관계를 나타내었다. DO는 1.8~15.5 mg L⁻¹로 상당히 넓은 변이를 보여주었으나 일부시기에 수질환경기준에 미달하는 낮은 농도를 보였고, pH 외에 수온 (-0.539), Chl-*a* (0.582), N/P (0.548)의 중상관관계를 나타내었다. EC는

155.6~440.7 μS cm⁻¹의 범위로 관개기인 5~6월과 강우기인 7~9월에 증가하여 유역으로부터의 오염정도를 반영하고 있었으며, COD와 0.476의 가장 강한 상관성을, TP와 -0.441, 식물플랑크톤 현존량과 0.343 등의 상관성을 나타내었다. 호소의 주요 유기물 지표인 COD는 Chl-*a*와 가장 높은 0.686의 상관관계를 보여주어 조류의 생산성이 호소내 유기물량에 기여함을 알 수 있었으며, pH (0.523), DO (0.476), TN (-0.457), 수온 (0.370), 식물플랑크톤 (0.359), TP (-0.333) 등 많은 수질항목과 중상관($r \geq 0.25$) 이상의 관계를 보여주어 부영양 호소에서 COD 발생이 매우 복합적으로 이루어짐을 짐작케 했다.

2. 식물플랑크톤의 군집변화

전대저수지에서 출현한 식물플랑크톤은 총 6과 40속 62종이었으며, 개체군별로는 규조류가 *Stephanodiscus*속 등 16종 (25.8%), 녹조류 *Scenedesmus*속 등 30종 (48.4%), 갈색편모조류 *Cryptomonas*속 등 3종 (4.8%), 남조류 *Microcystis*속 등 6종 (9.7%), 유글레나조류 *Euglena*속 등 4종 (6.5%), 와편모조류 *Peridinium*속 등 3종 (4.8%)으로 구성되어 있었다.

식물플랑크톤 현존량은 1.3 × 10⁴ cells mL⁻¹ ~ 2.8 × 10⁶ cells mL⁻¹로 조류경보제의 조류경보 (>0.5 × 10⁴ cells mL⁻¹) 이상은 물론 조류대발생 (>1.0 × 10⁶ cells mL⁻¹)을 능가하는 수준으로 나타났다. 연차별로는 2011년 평균 1.1 × 10⁶ cells mL⁻¹, 2012년 0.8 × 10⁶ cells mL⁻¹, 2013년 0.4 × 10⁶ cells mL⁻¹로 TN, TP의 농도 감소와 함께 식물플랑크톤의 현존량도 점차 감소하는 것으로 나타났다.

Table 3. Dominant species and percentage of phytoplankton

Month	Dominant species					
	2011		2012		2013	
	Species	%	Species	%	Species	%
Feb.					<i>Microcystis</i> sp.	53.1
Mar.	<i>Anabaena</i> sp.	89.9	<i>Oscillatoria</i> sp.	40.1	<i>Anabaena</i> sp.	92.7
Apr.	<i>Anabaena</i> sp.	75.2	<i>Anabaena</i> sp.	92.7	<i>Anabaena</i> sp.	79.2
May	<i>Anabaena</i> sp.	61.2	<i>Oscillatoria</i> sp.	84.3	<i>Microcystis</i> sp.	45.8
Jun.	<i>Oscillatoria</i> sp.	72.7	<i>Oscillatoria</i> sp.	96.7	<i>Oscillatoria</i> sp.	25.0
Jul.	<i>Oscillatoria</i> sp.	39.6	<i>Oscillatoria</i> sp.	98.3	<i>Microcystis</i> sp.	98.5
Aug.	<i>Oscillatoria</i> sp.	78.0	<i>Oscillatoria</i> sp.	96.3		
Sep.	<i>Oscillatoria</i> sp.	71.2	<i>Microcystis</i> sp.	77.8		
Oct.	<i>Oscillatoria</i> sp.	65.1	<i>Oscillatoria</i> sp.	55.1		
Nov.			<i>Cryptomonas</i> sp.	68.4		

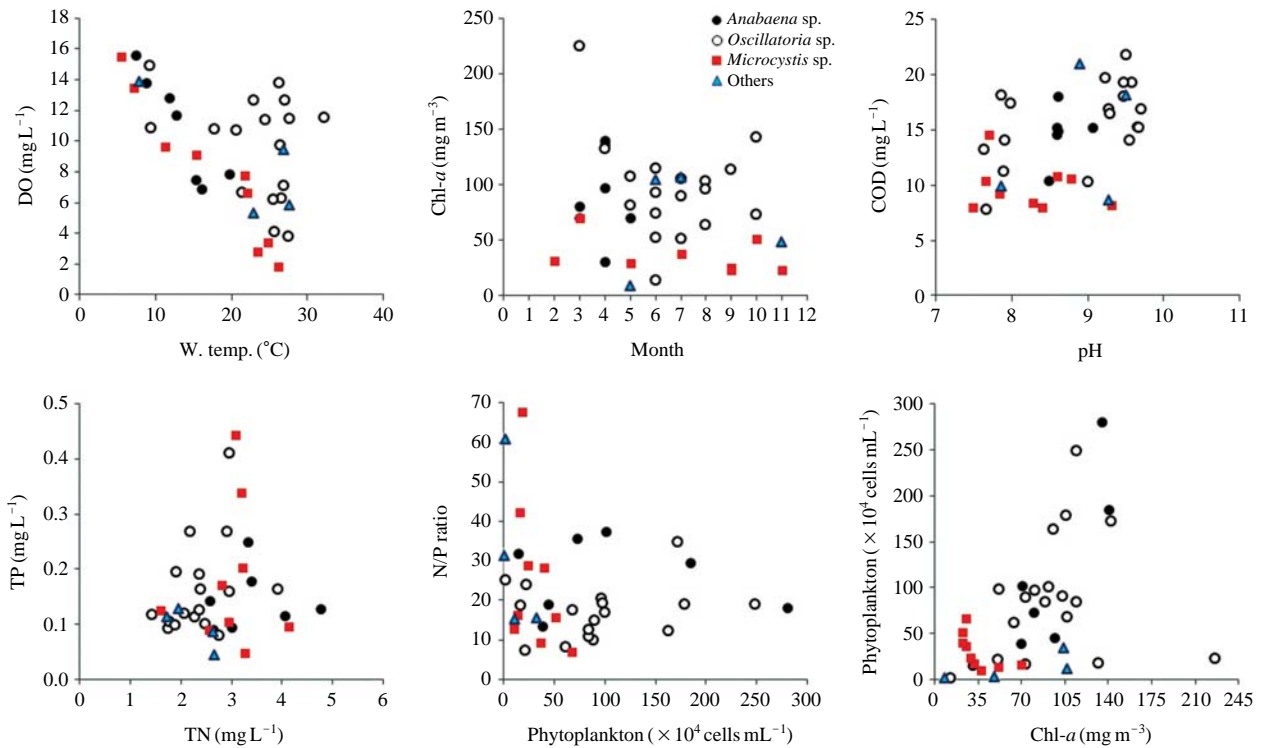


Fig. 5. Distributions of water environment factors and dominant species of phytoplankton.

특히, 2011년 3월에 최고치를 보였으며, 2012년 6월, 2013년 4월에 높은 수준의 현존량을 나타내었다. 이와 같은 봄철 대발생의 원인은 겨울철 결빙된 수면이 봄에 해빙되면서 영양염류 유입과 함께 수온, 광투과도가 증가하여 식물플랑크톤의 성장을 촉진시킨 것으로 알려진 바 있다 (Youn *et al.* 2010).

일반적으로 온대지역에서 봄에는 규조류의 대발생, 늦여름부터 가을까지 남조류의 대발생이 나타나지만 (Home and Goldman 1994), 호수의 영양상태가 증가함에 따라

남조류의 출현시기가 매년 빨라지며 우점기간이 길어진다고 한다 (Reynolds 1984; Heo *et al.* 2006). 본 조사기간 동안 각 시기별 우점종 분포를 보면 (Table 3), 2012년 11월을 제외한 모든 시기에 남조류인 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. 등이 우점하여 전대저수지의 경우 영양상태가 높은 특성을 보여주었다. 또한, 남조류 중에서도 *Oscillatoria* sp.의 우점 빈도가 가장 높았는데, 이는 한국에서 출현하는 조류대발생의 원인종 *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp., *Anabaena* sp., *Aphanizomenon* sp.

중 *Microcystis* sp.가 대표적이라는 기존 연구결과와 상이하였다(Kwon *et al.* 2011). 각 시기별 우점율은 25.0% ~ 98.5%로 다양하게 나타났으나 남조류의 우점율을 보면 대부분의 시기에 90%를 초과하고 있어 부영양의 오염된 저수지에서 남조류의 극우점이 조류발생의 주요 요인임을 알 수 있었다.

3. 수환경 변화에 따른 조류 우점종 변화

전대저수지에서 출현하는 주요 우점종인 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp.를 대상으로 각 우점종 출현시 수환경특성을 Fig. 5에 나타내었다. 수온에 따른 우점종의 출현 특성을 보면, *Anabaena* sp.가 가장 낮은 평균 13.1°C의 조건에서, *Microcystis* sp. 17.5°C, *Oscillatoria* sp.는 23.4°C에서 우점하여 각 우점종의 출현 온도가 차이가 남을 알 수 있다. DO는 *Anabaena* sp.가 우점할 때 가장 높고, *Microcystis* sp. 우점시 가장 낮았으며, pH 역시 *Microcystis* sp. 우점시 가장 낮았다. EC와 COD가 높은 경우 *Oscillatoria* sp.가 우점하였고, 낮은 경우 *Anabaena*

sp.가 우점하는 특성을 보였다. TN이 높은 경우 *Anabaena* sp., TP가 높은 경우 *Microcystis* sp.가 우점하였으며, TN과 TP가 낮은 경우 *Oscillatoria* sp.가 우점하였다. N/P ratio는 *Anabaena* sp. 우점시 가장 높았고, *Oscillatoria* sp. 우점시 가장 낮았다. 수체내 N/P ratio는 조류의 생물량과 조류 종의 천이를 예측하거나 조류성장에 대한 영양염 제한을 나타내는 간접지표로 활용되고 있다(Smith 1983; Fugimoto and Sudo 1997). 특히, *Microcystis* sp.는 인의 농도가 높고, N/P ratio가 30 이하로 낮은 조건에서 번성하여 우점한다는 Smith(1983), Smith *et al.* (1987), Xie *et al.* (2003) 등의 보고와 같이 평균 N/P ratio 25.4, TP 농도는 다른 종에 비해 가장 높은 0.180 mg L⁻¹에서 우점하였다. 또한, 질소와 인이 조류성장을 위해 요구되는 양 이상으로 유입되는 부영양 수체에서는 제한영양염에 따른 조류의 성장반응이 N/P rule과 다르게 나타날 수 있는 가능성도 제기되고 있는데(Paerl *et al.* 2001; Kim and Hwang 2004) 본 연구대상지인 전대저수지가 이에 해당되는 것으로 판단된다. Chl-*a* 농도는 *Oscillatoria* sp. 우점시 가장 높게 나타났으며, *Microcystis* sp. 우점시 가장 낮

Table 4. The Correlation between water environment parameters in each dominant species of phytoplankton

Parameter	Month	W. temp.	COD	TN	TP	N/P	Chl- <i>a</i>	Phytoplankton
Total	0.370	0.329	0.492	0.555	0.598	0.655	0.705	0.744
<i>Anabaena</i> sp.								
Month	1.000							
W. Temp.	0.937	1.000						
COD	-0.014	-0.262	1.000					
TN	-0.648	-0.545	-0.089	1.000				
TP	0.649	0.639	0.267	0.039	1.000			
N/P	-0.850	-0.779	-0.392	0.551	-0.788	1.000		
Chl- <i>a</i>	0.053	-0.225	0.821	-0.458	-0.087	-0.289	1.000	
Phytoplankton	-0.077	-0.349	0.766	-0.420	-0.254	-0.133	0.840	1.000
<i>Microcystis</i> sp.								
Month	1.000							
W. Temp.	0.482	1.000						
COD	-0.129	0.308	1.000					
TN	-0.273	-0.600	-0.670	1.000				
TP	0.520	0.612	-0.253	0.068	1.000			
N/P	-0.784	-0.857	-0.215	0.397	-0.708	1.000		
Chl- <i>a</i>	-0.428	-0.459	0.425	0.341	-0.342	0.267	1.000	
Phytoplankton	0.498	0.383	-0.579	0.221	0.742	-0.441	-0.623	1.000
<i>Oscillatoria</i> sp.								
Month	1.000							
W. Temp.	0.470	1.000						
COD	-0.325	-0.069	1.000					
TN	-0.025	-0.739	-0.303	1.000				
TP	0.169	0.216	-0.572	0.366	1.000			
N/P	-0.051	-0.665	0.254	0.256	-0.704	1.000		
Chl- <i>a</i>	-0.276	-0.634	0.559	0.469	-0.168	0.348	1.000	
Phytoplankton	0.228	0.351	0.580	-0.535	-0.448	0.182	0.167	1.000

은 농도를 보인 반면, 식물플랑크톤 현존량은 *Anabaena* sp. 우점시 가장 높고, Chl-*a*와 같이 *Microcystis* sp. 우점시 가장 낮은 것으로 나타났다. 즉, *Anabaena* sp.와 *Oscillatoria* sp. 우점시 조류 값 (Chl-*a*, 식물플랑크톤 현존량)이 높은 수준을 유지하는 반면, *Microcystis* sp.의 경우 비교적 낮은 값을 보여주어 오염이 심각한 소형저수지에서는 *Microcystis* sp.의 대발생 보다 *Anabaena* sp.와 *Oscillatoria* sp.에 의한 대발생이 주로 문제가 됨을 알 수 있었다.

전대저수지에서 우점하는 남조류 3종의 출현시 수환경 조건과의 상관관계를 상관계수를 이용하여 분석한 결과는 Table 4와 같다. 각 시기별 우점종 조성과 수환경 인자들과의 상관성 (*r*)은 0.296~0.744로 식물플랑크톤 현존량과 가장 높은 정의 중상관 관계 (0.744)를 보였으며, Chl-*a* 농도와 0.705, N/P ratio와 0.655, TN과 TP 각각 0.555, 0.598의 중상관 관계를 보였다. 그 외 COD 0.492 등 대부분의 항목과 약상관 이상의 유의한 상관성을 보여 주어 남조류 각 종이 우점할 때 수환경이 서로 연관됨을 추정케 해주었다. *Anabaena* sp.가 우점할 때 시기(월)와 수온과의 상관성이 0.937의 매우 강한 관계를 보여 주어 *Microcystis* sp. (0.482)나 *Oscillatoria* sp. (0.470)에 비해 계절변화와 가장 밀접한 관계를 나타내었으며, 또한, COD와 Chl-*a*, 식물플랑크톤 현존량과의 상관계수가 각각 0.822, 0.766으로 *Microcystis* sp. 우점시 0.425, 0.579 또는 *Oscillatoria* sp. 우점시 0.559, 0.580 보다 높은 강상관관계를 보여주었다. 뿐만 아니라 Chl-*a*와 식물플랑크톤 간의 상관성도 *Anabaena* sp. 우점시 0.840으로 *Microcystis* sp. (-0.623), *Oscillatoria* sp. (0.167)보다 매우 밀접한 정의 강상관관계를 보여주었다. *Anabaena* sp. 우점시기에 수환경 요인간의 상관계수가 전반적으로 높게 나타나 요인간의 관계가 다른 남조류에 비해 밀접하게 보이므로 향후 *Anabaena* sp. 발생 예측과 관리에 활용할 수 있을 것으로 판단되었다. *Microcystis* sp.가 우점할 경우 수환경 요인간 상관성이 *Anabaena* sp.만큼 크지 않지만 *Oscillatoria* sp. 우점 환경보다는 다소 강한 상관관계를 보이고 있는데, 특히, 수온과 TN, TP간의 상관성 (-0.600, 0.612)과 N/P ratio와의 상관성이 -0.857로 강상관관계를 보였으며, TP와 식물플랑크톤과의 상관계수가 0.742로 *Anabaena* sp.와 *Oscillatoria* sp.보다 높은 상관성을 보여 *Microcystis* sp.는 영양염류의 변화에 의존하는 것으로 나타났다. 반면에 *Microcystis* sp. 우점시 Chl-*a*와 식물플랑크톤 현존량의 상관성은 -0.623으로 *Anabaena* sp. 보다는 약한 부의 중상관관계를 보여 *Microcystis* sp. 우점시 조류발생량 측정은 Chl-*a*와 식물플랑크톤 현존량

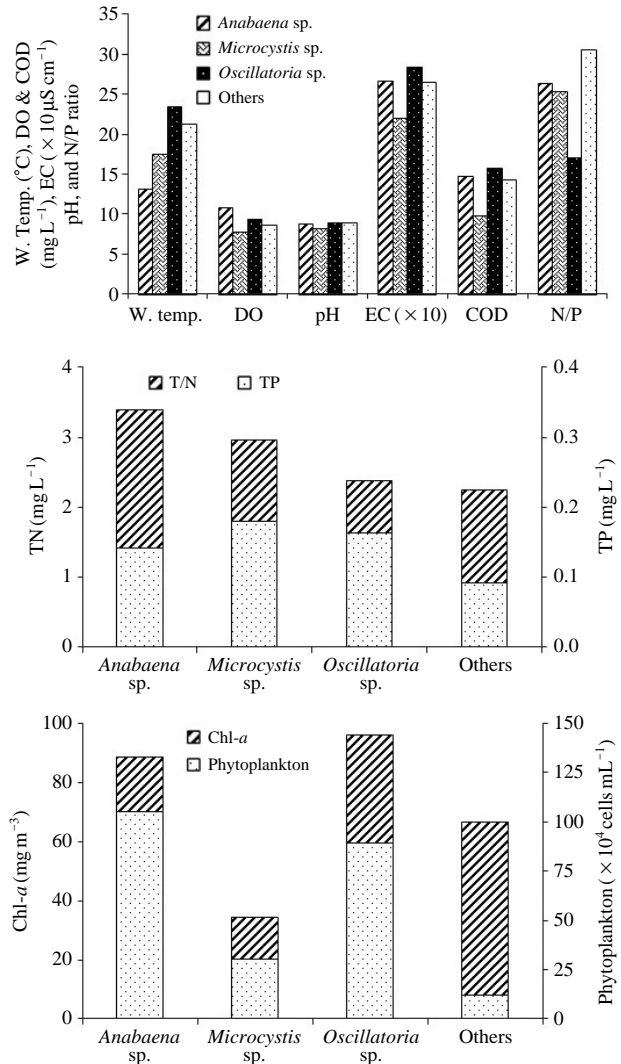


Fig. 6. Average concentration of water parameters each dominant species of phytoplankton in Jundae reservoir.

중 신중히 선택하는 것이 필요하다. *Oscillatoria* sp. 우점시 수환경 요인간 상관성은 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp. 우점시와 비교하여 상당히 낮게 나타났는데, 수온과 TP와의 상관계수가 -0.739, Chl-*a*와 수온, Chl-*a*와 N/P ratio와의 상관계수 -0.535, 0.346로 이들 항목에서만 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp.보다 높은 상관성을 보였다. 특히, Chl-*a*와 식물플랑크톤과의 상관계수는 0.167로 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp.과 달리 유의한 상관성이 나타나지 않아 *Oscillatoria* sp. 우점시에 Chl-*a* 적용은 의미가 없는 것으로 보였다.

결론적으로 축산이 주요 오염원인인 소규모 농업용저수지, 전대저수지에서는 수온이 증가하고 오염물질 농도가 증가하는 이른봄~초여름 시기에 *Anabaena* sp.가 대

부분의 수환경 요인과 밀접한 상관성을 보이며 우점하고 있었으며, *Microcystis* sp.는 영양염류의 변화에 의존하여 일부 시기에만 우점하였고, *Oscillatoria* sp.는 수온, N/P ratio와 상관성을 가진 반면, Chl-*a*와 식물플랑크톤과는 상관성은 나타나지 않았지만 대부분의 시기에 우점하여 전대저수지의 주요 우점종 역할을 하고 있었다.

적 요

축산과 농경배수가 주요 오염원인 소규모 농업용 저수지, 전대저수지에서 2011년 3월부터 2013년 10월까지의 모니터링 결과를 바탕으로 수환경 변화와 조류발생 특성을 분석함으로써, 부영양화된 소형저수지에서의 수환경과 조류발생 (Algal bloom)과의 관계를 규명하고자 하였다. 2013년의 경우 전년에 비해 강우가 적은 사실을 제외하면 기상의 큰 변화는 없었다. 전대저수지의 TN, TP 등 영양염류농도는 농업용수 수질기준을 초과하고 있으며 발생원인이 상이하였다. 조류발생과 수환경요인간의 상관관계가 많은 항목에서 중상관($r \geq 0.25$)의 관계를 보여주어 부영양 호소에서 COD 발생과 조류발생이 매우 복합적으로 이루어짐을 짐작케 했다. 전대저수지에서 출현한 식물플랑크톤은 총 6과 40속 62종이었으며, 현존량은 $1.3 \times 10^4 \sim 2.8 \times 10^6$ cells mL⁻¹로 TN, TP의 농도 감소와 함께 식물플랑크톤의 현존량도 연차별로 점차 감소하였다. 주요 우점종은 남조류인 *Anabaena* sp., *Oscillatoria* sp., *Microcystis* sp. 등이었으며, *Oscillatoria* sp.의 우점빈도가 가장 높았다. 수온이 증가하면서 *Anabaena* sp., *Microcystis* sp., *Oscillatoria* sp. 순으로 우점종이 변화하였으며, TN이 높은 경우 *Anabaena* sp., TP가 높은 경우 *Microcystis* sp.가, TN과 TP가 낮은 경우 *Oscillatoria* sp.가 우점하였다. N/P ratio는 *Anabaena* sp. 우점시 가장 높았고, *Oscillatoria* sp. 우점시 가장 낮았다. Chl-*a* 농도는 *Oscillatoria* sp. 우점시 높게 나타나고, 식물플랑크톤 현존량은 *Anabaena* sp. 우점시 높게 나타났으며, *Microcystis* sp. 우점시에는 Chl-*a*와 현존량 모두 낮았다. 이를 통해, 오염이 심각한 소형저수지에서는 *Microcystis* sp.보다 *Anabaena* sp.와 *Oscillatoria* sp.에 의한 대발생이 주로 문제가 됨을 알 수 있었다. *Anabaena* sp.가 우점할 때는 수환경 요인간의 상관계수가 높아 예측과 관리에 활용이 가능한 반면 *Oscillatoria* sp. 우점시에는 Chl-*a* 상관성이 낮게 나타나는 등, 조류대발생을 신속하게 예측하고, 예방, 관리하기 위해서는 조류발생 환경과 원인종의 관계를 규명하고 이를 활용하는 방안이 필요할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 농림축산식품부로부터 지원받은 농촌개발 시험연구 과제에 의해 수행되었으며 이에 감사를 드립니다.

REFERENCES

- An KG and IC Shin. 2005. Influence of the asian monsoon on seasonal fluctuations of water quality in a mountainous stream. Korean J. Limnol. 38:54-62.
- An KG, JW Seo and SS Park. 2001. Influences of seasonal rainfall on physical, chemical and biological conditions near the intake tower of Taechung Reservoir. Korean J. Limnol. 34:327-336.
- APHA. 1995. Standard methods for the examination of water and wastewater. 19th eds., APHA-AWWA-WACF. New York.
- Berthouex, P. M., L. C. Brown. 1994. Statistics for Environmental Engineers, Lewis Publishers. pp.273-284.
- Faithful JW and DJ Griggiths. 2000. Turbid flow through a tropical reservoir (Lake Dalymple, Queensland, Australia): Responses to summer storm event. Lake Reserv. Manage. 5:231-247.
- Fugimoto N and R Sudo. 1997. Nutrient-limited growth of *Microcystis aeruginosa* and *Phormidium tenue* and competition under variation N:P supply ratios and temperatures. Limnol. Oceanogr. 42:250-256.
- Heo WM, SY Kwon, YG Kim, WH Yih, BJ Lim and BC Kim. 2006. Spatial and temporal variations of environmental factors and phytoplankton community in lake Yongdam, Korea. Korean J. Limnol. 39:366-377.
- Horne AJ and CR Goldman. 1994. Limnology. McGrawhill Inc., New York.
- Kim BH, JY Chloi, SJ Hwang and MS Han. 2004. Influences of nutrient deficiency on the phytoplankton community in Pal'tang reservoir, Korea. Korean J. Limnol. 37:47-56.
- Kim ES, KB Sim, TS Kim, DH Jeong, JH Yoon, DK Kang and SD Kim. 2012. Comparative analysis on seasonal water quality factors in multipurpose dams and agricultural reservoirs. J. Korean Soc. Water Environ. 28:102-108.
- Kim HS and SJ Hwang. 2004. Analysis of eutrophication based on chlorophyll-*a*, depth and limnological characteristics in korean reservoirs. Korean J. Limnol. 37:213-226.
- Kim HS and SJ Hwang. 2004. Effects of nutrients and N/P ratio Stoichiometry on phytoplankton growth in an eutrophic

- reservoir. Korean J. Limnol. 37:36-46.
- Kim HS, SJ Hwang and DS Kong. 2007. Cyanobacterial development and succession and affecting factors in a eutrophic reservoir. Korean J. Limnol. 40:121-129.
- Kim HW, GH La, KS Jeong, JH Park, YJ Huh, SD Kim, JE Na, MH Jung and HY Lee. 2010. Assessing the plankton dynamics in lakes and reservoirs ecosystem in the southwestern parts of Korea. Korean J. Environ. Biol. 28:86-94.
- Kim JM, SN Heo, HR Noh, HJ Yang and MS Han. 2003. Relationship between limnological characteristics and algal bloom in lake-type and river-type reservoirs, Korea. Korean J. Limnol. 36:124-138.
- Kim MK, SH Lee and CH Lee. 2007. Changes of dominant species of phytoplanktons and hydrological causes of water bloom in the lake Unmun, Cheongdo-gun, Gyeongsangbuk-do. Algae 22:261-271.
- Korea Rural Community Corporation, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2012a. Investigation report of water quality measurement network of agricultural water.
- Korea Rural Community Corporation, Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. 2012b. Technical development for control of algal bloom using predators in the agricultural reservoir.
- Korea Water Resources corporation. 2000. Algae photo gallery of the dam reservoir. Academy Book.
- Kwon OK, JW Park, GY Chung, JE Lee and EW Seo. 2011. Effect of environmental factors on the growth of *Microcystis aeruginosa* (cyanobacteria) in agricultural reservoirs. J. Life Sci. 21:1183-1189.
- Lee JH and M Chang. 1997. Environmental studies of the lower of Han river II. phytoplankton dynamics. Korean J. limnol. 30:193-202.
- Lee JM, JJ Lee, JG Park, JH Lee, CY Chang and SM Yoon. 2005. Zooplankton fauna and the interrelationship among cladoceran populations and *Microcystis aeruginosa* (cyanophyceae) during the cyanobacterial blooming season at Daecheong lake, south Korea. Korean J. Limnol. 38:146-159.
- Lee JY, JH Lee, KH Shin, SJ Hwang and KG An. 2007. Trophic state and water quality characteristics of Korean agricultural reservoirs. Korean J. Limnol. 40:223-233.
- Ministry of Environment. 2012. Standard method, quality test of water.
- Paerl HW, RS Fulton, PH Moisaner and J Dyble. 2001. Harmful freshwater algal blooms, with an emphasis on cyanobacteria. Scientific World J. 1:76-113.
- Reynolds CS. 1984. The ecology of freshwater phytoplankton. Cambridge, Cambridge University Press.
- Reynolds CS, SW Wiserman, BM Godfrey and C Butterwick. 1983. Some effects of artificial mixing on the dynamics of phytoplankton populations in large limnetic enclosures. J. Plankton Res. 5:203-234.
- Smith VH. 1983. Low nitrogen to phosphorus ratios favor dominance by blue-green algae in lake phytoplankton. Science 221:669-671.
- Smith VH, E Willen and B Karlsson. 1987. Predicting the summer peak biomass of four species of blue-green algae (cyanophyta/cyanobacteria) in swedish lakes. Water Resour. Bull. 23:397-402.
- Takamura N and MM Watanabe. 1987. Seasonal changes in the biomass of four species of *Microcystis* in lake Kasumigaura. Jpn. J. Limnol. 48:139-144.
- Uhm SH and SJ Hwang. 2006. Grazing relationship between phytoplankton and zooplankton in lake Paldang ecosystem. Korean J. Limnol. 39:390-401.
- Xie L, P Xie, S Li, H Tang and H Liu. 2003. The low TN:TP ratio, a cause or a result of microcystis bloom?. Water Res. 37:2073-2080.
- Yoon CG, SB Lee, KW Jung and JY Han. 2007. Analysis of relationship between water quality parameter in agricultural irrigation reservoir and land uses of associated watersheds. Korean J. Limnol. 40:31-39.
- Youn SJ, HK Park and KA Shin. 2010. Dynamics of phytoplankton communities of major dam reservoir in Han river system. J. Korean Soc. Water Environ. 26:317-325.

Received: 6 November 2013

Revised: 21 November 2013

Revision accepted: 22 November 2013