

경상북도 청도군, 운문호의 식물플랑크톤 우점종 변동과 수화현상의 수문학적 발생원인

김미경^{1*} · 이순화² · 이철희²

(¹영남대학교 환경문제연구소 해양과학연구소, ²영남대학교 건설환경공학부)

Changes of Dominant Species of Phytoplanktons and Hydrological Causes of Water Bloom in the Lake Unmun, Cheongdo-gun, Gyeongsangbuk-do

Mi-Kyung Kim^{1*}, Soon-Hwa Lee² and Chul-Hwee Lee²

¹Marine Science Research Center, Environmental Research Institute

²Architecture and Environmental Engineering, Yeungnam University, Gyongsan 712-749, Korea

The variations of species compositions, standing crops and seasonal succession of phytoplanktons including Cyanophyceae, Chlorophyceae and Bacillariophyceae were investigated with physico-chemical elements of water to clarify the causes of water bloom according to the water depth in the Lake Unmun. The increased amounts of turbidity, T-N, T-P and SS originated from heavy rain and typhoon in the middle of June provoked to produce phytoplanktons. In July and August, the dominant species was *Peridinium* sp., while the subdominant species was *Microcystis aeruginosa*. In October, *Aulacoseira distans* was dominant and *Asterionella formosa* was subdominant. During the period of water shortage, the concentrated pollutants caused the decrease of precipitation, the long stagnation time of water body and the mixed pollutants by upwelling as decreasing water temperature could accelerate the water bloom. The preventives to decrease microalgal generation should be controlled by the stagnation time of water body by increasing outflow to intercept water bloom such as *Aulacoseira* sp. in October as well as summer.

Key Words: dominant species, Lake Unmun, phytoplankton, seasonal variation, water bloom

서 론

우리나라의 농업용수나 생활용수는 자연호수보다 인공 저수지나 댐 시설(김 등 1998; 김 1998; 오 등 1998; 김 등 1999a, b, c; 김 등 2002; 김 등 2003; 이 등 2003)을 통해 부족한 용수가 공급되고 있다. 인공댐은 하천형과 호소형으로 구분이 되는데, 하천형은 수심이 얇고 유입·유출량이 저수량에 비해 상대적으로 크에따라 체류시간이 짧고, 강우나 하천 주변의 다양한 오염원으로 직접적인 영향을 받으나 성층 발달은 미약한 것이 특징이고, 호소형은 수체의 체류시간이 길고, 수온에 의한 성층현상이 뚜렷한 특징을 보이고 있다(공 1992).

운문댐은 대구, 영천, 경산 및 청도군에 생활용수로 공급

하고자 밀양강 상류인 동창천에 조성된 용수전용댐으로 1993년에 가동되기 시작했다. 하지만 운문댐 하류의 논지역의 냉수 피해발생(정과 오 1997)과 운문댐의 상수원 보호구역이 산업 폐기물 투기와 운문댐 부실공사로 댐 정상부 함몰과 급격한 누수량이 증가하여 댐의 안정성에 문제를 제기하게 되고, 2002년부터 용수전용인 댐이 다목적댐으로 전환되어 홍수조절 기능을 위한 수문을 설치하여 일정량의 물을 방류하는 등, 수질 개선을 위한 여러 가지 방안이 모색되고 있다.

정체수역의 수질을 파악하기 위한 연구로서 수환경과 식물플랑크톤의 종조성 변화에 대한 연구는 많으나(이와 이 2003; 최 등 2003), 식물플랑크톤 군집동태와 인공댐의 수문학적 특성에 따른 수화현상에 발생원인에 대한 운문호의 선행연구는 극히 한정적이다(서 등 2003; 김 2004).

우리나라 댐의 수화현상에 대한 연구는 80여편(이 1995; 장과 전 1996; Kim et al. 1997; 이 등 1998; 박 등 2000; 신 등

*Corresponding author (mkkim@ynu.ac.kr)

2000; 이 등 2000; 신 등 2003; 신 등 2003; 이와 이 2003)에 이르고 있다. 수화 원인종은 거의 남조류가 대발생하고 있다. 호소형 댐의 여름철 조류발생은 강우유입에 의한 인 유입량의 증가(최 등 1996; 최 등 2003), 일조에 따른 수온과 밀도 차이에 의한 성층형성, 탁도와 오염 부하량 증가(한국수자원공사 2000), 체류시간(신 등 2003), 표층과 혼합층의 깊이와 유광층의 깊이와의 상대적 깊이(이 등 2003) 등에 따라 다양한 양상을 띄고 있다. 특히 댐 호에서 수화현상의 원인종이 되는 남조류의 *Anabaena*와 *Microcystis*는 각각 anatoxin이나 microcystin이라는 신경독과 간장독성을 띠고 있어 먹이 연쇄관계에 있는 어류들에게 피해를 입히게 된다. 또한 조류의 수화현상으로 인한 상수원의 이취미 물질을 제거하기 위한 기술도 세계 각국에서 연구 중에 있다(Kenefick et al. 1992; Hargesheimer and Watson 1996; Young et al. 1996).

본 연구는 운문호의 성층현상을 파악하기 위해 수심별로 시료를 채수하여 이화학적인 수환경요인과 식물플랑크톤의 종조성과 현존량을 조사하되 남조류, 녹조류, 규조류를 중심으로 계절적인 천이양상을 나타내는 우점종의 특성을 수화현상 발생원인과 수문학적인 특성을 연계하여 수생태계의 특징을 밝히고자 한다.

재료 및 방법

조사방법 및 조사지 개황

조사시기는 2004년 5월부터 12월까지 월 1회를 기준으로 채수하였고 7월과 8월은 조류 대발생이 예상되는 시기로써 월 2회로 채수하였다. 운문댐은 유역면적이 301.34 km²이고, 저수능력은 1억3천5백만톤이며, 저수위는 122 m, 만수위는 150 m이고, 만수면적은 7.83 km²이다. 최저수심은 40 m이며 호수의 연장은 동창천 기준으로 약 10 km이다. 유역의 대부분은 임야지대(88%)와 농촌지역(9%)으로 둘러 싸여 있다(한국수자원공사 2000). 조사정점은 댐 유입부 2곳을 각각 정점 1과 2로 정하였고, 두 하천이 합류되는 수역을 정점 3, 운문댐 안쪽의 댐측 취수탑에 인접한 수역을 정점 4로 정했다. 특히 정점 3과 4는 수심이 30-40 m로 깊어 봄, 여름에 수온성층을 이루는 요인이 되기 때문에 수심별(표층, 수심 10 m, 20 m, 30 m)로 채수를 실시했다(Fig. 1).

상관분석

수환경인자인 DO, BOD, COD, 전기전도도, SS, T-N, T-P, NH₄-N, NO₃-N와 Chl a와 식물플랑크톤의 현존량으로 나타난 1차 생산력과의 상호 유의성을 파악하기 위해 Spearman rank correlation coefficient를 사용하였다. 이 방법은 환경인자의 시·공간적 변화량을 등위화하여 각 인자

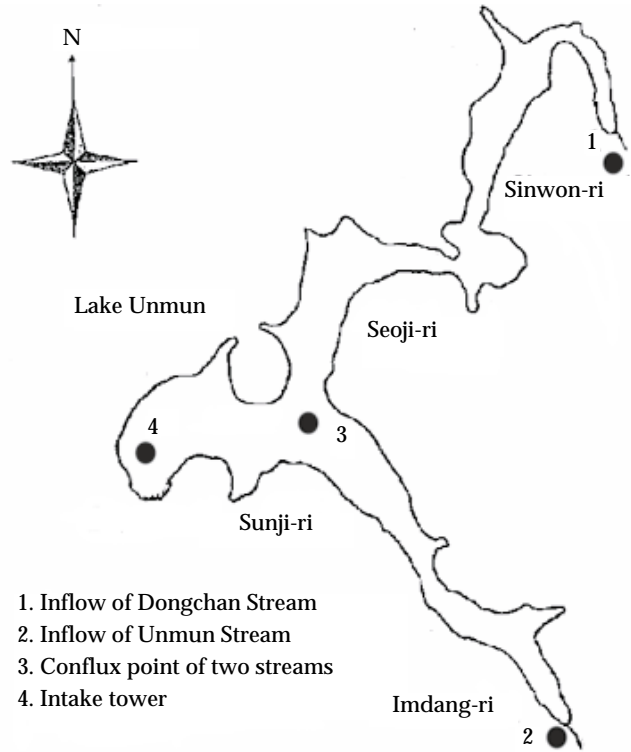


Fig. 1. Sampling sites and area of the Lake Unmun, where located in Cheongdo-gun, Gyeongsangbuk-do (longitude 128°55'00"-128°55'30"; latitude 35°43'00"-35°43'30").

간의 상관계수(r_s)를 구하고 그 유의성을 결정하는 방법으로 통계프로그램 SPSS v. 12.0에 의해 계산되었다.

$$r_s = 1 - \frac{6\sum Di^2}{n(n^2 - 1)}$$

여기서 Di 는 두 인자 등위화된 수치의 차이이며, n 은 등위화된 수치의 갯수이다. 유의성 검정은 $p = 0.05$ 수준에서 판정하였다(김 등 2003).

수환경

채수는 van Dorn 채수기를 이용하여 수심별로 채수하였다. 운문댐의 유입하천인 정점1과 2는 오전 10-12시에 채수하였고, 호수 내 댐 수역의 채수는 오후 2-5시경에 실시하였다. 수온은 현장에서 측정하였고, 탁도는 탁도계(HACH, 2100N)로 전기전도도는 Luxmeter(WTW Cond 315i, Germany)로 측정하였다. Chl a(Jeffrey and Humphrey 1976), DO, BOD, COD, 전기전도도, SS, T-N, T-P, NH₄-N, NO₃-N는 수질오염공정시험법과 Standards Methods (APHA AWWA WEF 1995)법에 의해 실시하였다.

식물플랑크톤의 현존량 측정

식물플랑크톤의 현존량은 1 L 용기에 채집한 시료를

Lugol's 용액으로 고정한 후, 실험실에서 48-72시간 침전시켜 50 mL로 농축하였고, 잘 혼합한 후, Sedgwick-Rafter chamber에 끌고루 분산시켜 단위 부피당 세포수(cells mL⁻¹)를 현존량으로 계산했다. 계수는 최소한 chamber의 100 fields 이상 계수하여 현존량으로 산출하였다.

종 동정 및 군집분석

식물플랑크톤의 정성적인 분석을 위한 시료의 채집은 플랑크톤 네트(plankton net: Rhigosha N_{xxx} 25)를 사용하며 채수하였다. 종의 동정을 위한 시료는 생체로 연구소로 운반하여 분석하여 광학현미경 400-1000배 하에서 Abbe 묘화장치를 이용하여 스케치한 후에 동정하고, 시료는 포르말린과 Lugol's 용액으로 처리하여 영남대학교 해양과학연구센터 한국산업플랑크톤은행(Korea Plankton Culture Collection for Industrialization: KPCCI-http://yu.ac.kr/~msi)에 영구 보관하였고, 참고문헌(Prescott et al. 1977; Komarek and Fott 1983; 정 1993; John et al. 2002)을 중심으로 종 동정 및 분류를 하였다. 우점종은 출현 개체수가 가장 많은 종을 선정하며, 아우점종은 5% 이상 출현율을 나타내는 종을 선정하였다.

결과 및 고찰

운문댐의 수문 및 기상 특성

Fig. 2는 운문댐의 수문학 및 강우량의 특성을 나타낸다(한국수자원공사 2004). 월 평균 강우량은 8월에 306 mm로 가장 높았고, 10월이 10.9 mm로 가장 낮았다. 6월 19일은 집중 폭우로 63 mm의 1일 강우를 나타냈다(Fig. 2). 평균수위는 4월에 가장 낮았으나(141 m), 10월에 149 m로 가장 높았고(Fig. 3), 월평균 유효저수량도 118,997(천 m³)로 최고를 나타냈다(Fig. 4). Fig. 4는 유효저수량을 유입량(혹은 방류량)으로 나눈 값인 정체수역의 체류시간을 월별로 파악할 수 있는데 이는 수괴가 정체되어 있는 시간을 의미한다. 특히 4월부터 9월에는 방출량보다 유입량이 높아 6월과 7월의 폭우로 유입된 영양염을 농축시키는 수환경 조건이 형성된다.

또한 정체수역의 체류시간은 8월이 47시간으로 가장 짧았고, 10월과 11월에 284시간과 364시간으로 가장 장시간을 나타냈다. 10월과 11월의 정체수역의 체류시간이 8월에 비해 긴 요인이 여름에 비해 가을에 기온 하강에 따른 수표면의 수온 하강으로 인해 수표면과 수심 30 m 사이의 성층이 섞임 현상으로 아래 침전되었던 영양염이 수표면으로 상승하여 식물플랑크톤이 증식할 수 있는 수환경을 조성하는 것으로 판단되었다.

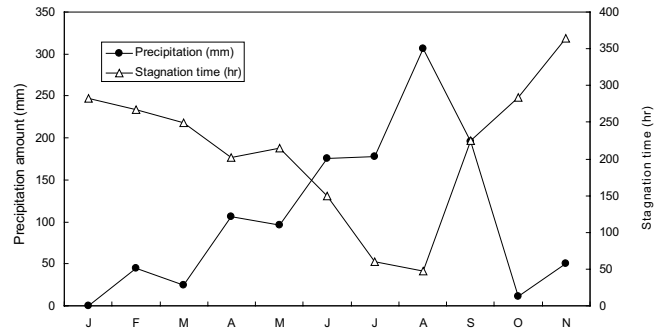


Fig. 2. Annual precipitation and stagnation time of the Lake Unmun, 2004 (Korea Water Resources Corporation 2004).

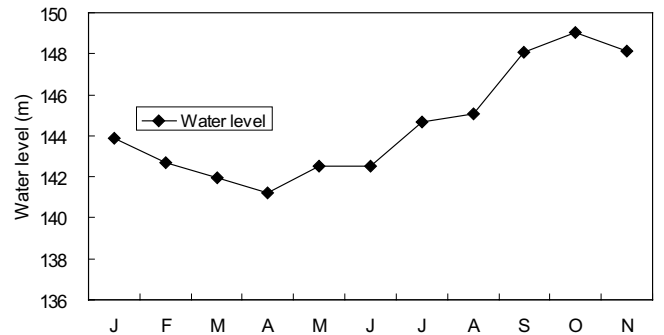


Fig. 3. Changes of water level of the Lake Unmun, 2004 (Korea Water Resources Corporation 2004).

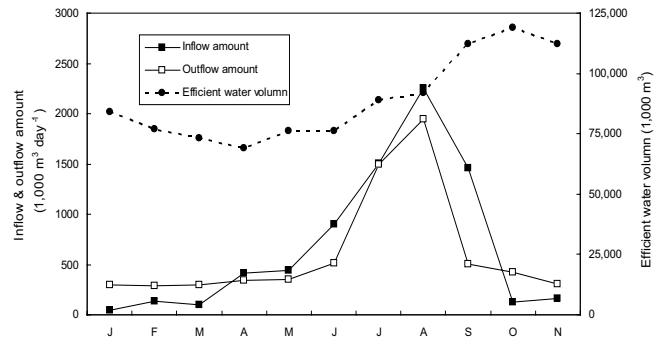


Fig. 4. Annual inflow and outflow amounts and efficient water volume of the Lake Unmun, 2004 (Korea Water Resources Corporation 2004).

수온변화

수온은 물의 밀도, 산소와 영양염 등의 용존 농도를 결정하는 주요 물리적 요인일뿐만 아니라 호소형 댐과 같은 수심이 깊은 정체수역에서는 수심별로 수온이 차별화됨에 따라 성층이 형성되는 주요 인자가 된다. 본 운문호 조사에서는 동창천(정점 1)과 운문천(정점 2)의 유입수가 합류되는 정점 3과 댐취수탑 인근의 정점 4는 수심이 30-40 m로써 깊어 표층수온이 상승하는 봄과 여름에 열성층현상(thermal stratification)이 나타났다. 정점 1과 2의 하천수는 5월에서 7

Table 1. Environmental factors from May to December, 2004 in the Lake Unmun

		St. 1	2	3-0 m	3-10 m	3-20 m	3-30 m	4-0 m	4-10 m	4-20 m	4-30 m
Water Tem. (°C)	M	16.7	16.9	19.4	11.9	8.4	8.6	19.7	9.9	8.1	7.8
	J	20.3	20.4	21.9	14.1	9.0	9.3	22.1	14.2	8.7	8.5
	J	23.4	25.0	29.4	20.6	11.4	10.7	29.4	22.5	12.7	9.7
	A	26.0	25.9	27.2	21.2	13.5	11.0	30.0	20.8	13.1	11.1
	S	22.0	19.0	23.0	21.9	20.3	10.6	23.5	21.4	19.9	12.8
	O	18.8	18.3	20.7	20.5	19.3	13.2	20.8	20.6	19.6	10.6
	N	13.1	11.2	16.0	15.1	15.8	14.7	16.4	15.7	15.4	10.0
	D	10.3	8.1	11.7	10.4	11.0	10.2	9.9	9.6	9.1	8.3
Turbidity (NTU)	M	0.3	0.7	1.0	1.6	1.7	1.8	1.2	1.4	1.9	2.5
	J	1.2	0.2	0.3	0.6	0.6	5.3	0.5	0.7	0.6	0.9
	J	0.8	0.4	3.5	6	0.7	1.7	3.8	7.2	3.1	0.5
	A	0.6	0.4	2.4	3.6	1.1	1.6	2.7	4.6	2.2	0.4
	S	0.3	0.5	3.7	5.5	4.9	5.4	3.6	4.7	3.7	7.6
	O	0.2	0.3	2.4	1.8	6.0	9.7	2.2	2.2	6.3	2.2
	N	0.1	0.2	2.5	2.9	2.2	8.6	1.2	3.1	5.3	3.3
	D	0.1	0.2	2.5	2.9	2.2	8.6	1.2	3.1	5.3	3.3
T-N (mg L ⁻¹)	M	2.25	0.21	0.58	0.61	0.34	0.39	0.47	0.87	0.23	0.19
	J	5.01	2.20	1.09	0.94	0.96	1.59	1.40	1.21	0.48	0.88
	J	1.42	1.98	1.42	1.49	1.53	1.61	1.68	2.01	1.00	0.99
	A	2.32	1.48	2.84	1.77	1.42	1.15	2.08	2.10	1.78	1.39
	S	2.08	1.66	2.52	1.31	1.42	1.08	1.95	1.56	1.05	1.33
	O	1.31	1.03	1.61	1.05	1.00	0.89	1.24	1.06	0.82	0.74
	N	1.01	1.33	1.30	1.01	0.95	1.00	0.90	0.81	0.71	0.60
	D	1.30	1.56	1.47	1.12	0.97	1.05	1.01	0.78	0.56	0.51
T-P (mg L ⁻¹)	M	0.001	0.002	0.002	0.009	0.003	0.006	0.003	0.006	0.010	0.009
	J	0.003	ND	0.005	ND	ND	0.052	ND	0.002	ND	0.001
	J	0.008	0.010	0.032	0.065	0.011	0.019	0.028	0.040	0.019	0.010
	A	0.014	0.007	0.012	0.007	0.026	0.006	0.012	0.006	0.002	0.002
	S	0.004	0.008	0.009	ND	ND	0.007	0.005	0.003	0.002	N.D
	O	0.002	ND	0.005	0.003	0.002	0.005	0.004	0.005	0.003	0.001
	N	0.003	ND	0.001	0.002	ND	0.002	0.004	0.003	ND	ND
	D	0.001	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
Chl a (µg L ⁻¹)	M	1.9	1.0	4.3	3.5	3.9	3.5	4.8	2.9	2.4	2.5
	J	1.0	0.8	3.8	3.8	3.0	2.6	3.9	6.2	2.1	6.6
	J	1.7	1.9	9.9	6.1	2.9	3.1	16.8	4.2	2.3	3.2
	A	1.9	2.2	8.8	8.6	2.8	3.0	7.1	10.0	1.9	2.1
	S	3.2	2.9	10.3	3.0	2.3	2.9	6.5	3.1	2.1	2.6
	O	3.9	3.5	12.7	12.7	2.4	2.6	13.8	12.3	2.8	2.2
	N	1.7	1.1	3.6	3.3	3.6	5.5	2.8	3.7	2.8	2.4
	D	4.6	2.4	3.8	4.2	3.9	4.0	3.7	3.6	3.7	3.6

ND: not detected. Mean values (n = 2) in July and August.

월까지 수온이 19°C에서 25°C까지 상승하는 일반적인 현상을 나타냈다. 정점 3과 4의 수온은 수심이 깊어질수록 낮아져 5월에 수심 20 m와 30 m에서 각각 8.4°C와 7.8°C까지 떨어졌다. 5월에서 7월로 갈수록 수심별 수온이 상승했고, 정점 3의 표층에서 7월에 29.4°C로 최고치를 나타냈다(Table 1). 정점 1과 2는 8월에 26°C로 가장 높았고 최저치는 정점 2에서 12월에 8.1°C를 나타냈다. 반면에 정점 3과 4는 5월에서 8월까지 수심이 깊어질수록 수온이 하강이 빨라졌고, 특

히 수표면에서 수심 10 m까지는 수온변화가 급변하는 변천대(metalimnion)를 이루며 수온약층(thermocline)이 형성되었고, 수심 20 m 이하는 수온의 변화 정도가 약해지는 심층대 특징을 나타내고 있었다. 따라서 봄과 여름에 저수지가 수심에 따라 수직방향으로 성층을 형성하여 표층수와 심층수가 혼합되지 않는 성층 저수지(stratified reservoir)의 특성을 나타냈다.

Table 2. Change of species composition of phytoplanktons in the Lake Unmun (May to December 2004)

Classification & species	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
Class Chlorophyceae				
Order Chaetophorales				
Fam. Chaetophoraceae				
<i>Stigeoclonium lubricum</i>	5	5		
<i>S. subsecundum</i>		8		
<i>S. tenue</i>				5
Order Chlorococcales				
Fam. Dictyosphaeriaceae				
<i>Dictyosphaerium pulchellum</i>	5	6	6	
Fam. Micractiniaceae				
<i>Golenkinia radiata</i>	5		8	
<i>G. paucispina</i>				6
Fam. Oocystaceae				
<i>Chlorella ellipsoidea</i>	6, 7	7	6, 7, 11	5
<i>C. vulgaris</i>			10	10
<i>Selenastrum gracile</i>			6	6
Fam. Scenedesmaceae				
<i>Actinastrum hantzschii</i> var. f. <i>luviatile</i>	6	6	6	5
<i>Scenedesmus acuminatus</i>	5, 10, 12			
<i>Tetrastrum heterocanthum</i>				6
Order Tetrasporales				
Fam. Palmellaceae				
<i>Sphaerocystis schroeteri</i>			8	8
Order Ulotrichales				
Fam. Ulotrichaceae				
<i>Ulothrix zonata</i>			5	5
Order Volvocales				
Fam. Chlamydomonadaceae				
<i>Chlamydomonas angulosa</i>			5, 6	5
Order Zygnematales				
Fam. Desmidiaceae				
Subfamily Cosmarieae				
<i>Cosmarium binum</i>	5	5	6	
<i>C. punctulatum</i>	12			
Fam. Gonatozygaceae				
<i>Gonatozygon monotaenium</i>			5	
Fam. Zygnemataceae				
Subfamily Mougeotioideae				
<i>Mougeotia scalaris</i>			10	
Subfamily Spirogyroideae				
<i>Spirogyra inflata</i>	12			
Class Bacillariophyceae				
Order Centrales				
Suborder Coscinodiscineae				
Fam. Melosiraceae				
<i>Melosira varians</i>	9, 12		12	
<i>M. sp.</i>			8	
Fam. Thalassiosiraceae				
<i>Aulacoseira ambigua</i>		6, 10	7, 8, 9, 10, 11, 12	5, 7, 9, 10, 11, 12
<i>A. distans</i>			10	10
<i>A. sp.</i>			8	8
<i>Cyclotella sp.</i>				6

Table 2. (continued)

Classification & species	St. 1	St. 2	St. 3	St. 4
Order Pennales				
Fam. Diatomaceae				
<i>Asterionella formosa</i>			5, 10	10
<i>Diatoma mesodon</i>			5	
<i>Fragilaria capucina</i>	10	9		
<i>F. construens</i>	5			
<i>F. crotonensis</i>	12		5	
<i>F. vaucheriae</i>		5		
<i>F. sp.</i>	7	10, 11, 12		
<i>Synedra acus</i>		5		
<i>S. fasciculata</i>	11	8		
Suborder Raphidineae				
Fam. Achnantheaceae				
<i>Achnanthes minutissima</i>	5			7
<i>A. subhudsonia</i>	5	5	5	
<i>Bacillaria paradoxa</i>	5			
<i>Cocconeis placentula</i>	8			
Fam. Naviculaceae				
<i>Cymbella tumida</i>	11, 12			
<i>C. turgidula</i>	5, 6			
<i>Gomphonema sp.</i>				
<i>G. parvulum</i>		8		
<i>Navicula contenta</i>	7, 10	10	7	
<i>N. pupula</i>	11, 12	7		
<i>Pleurosigma sp.</i>	6			
<i>Rhoicosphenia abbreviata</i>		10		
Fam. Nitzschiaceae				
<i>Surirella angusta</i>			8	
Class Dinophyceae				
Order Peridiniales				
Fam. Ceratiaceae				
<i>Ceratium hirsutinella</i>			7, 8	7, 8
Fam. Glenodiniaceae				
<i>Glenodinium oculatum</i>	7	5	7	
Fam. Peridiniaceae				
<i>Peridinium marchicum</i>	5, 6, 7, 8	5, 6, 7, 8	5, 6, 7, 8	5, 6, 7, 8
Class Euglenophyceae				
Order Euglenales				
Suborder Eugleninae				
Fam. Euglenaceae				
<i>Euglena gracilis</i>				6
<i>Phacus acuminatus</i>		7		6
<i>Trachelomonas lacustis</i>			8	
<i>T. similis</i>	6	6		
<i>T. sp.</i>			8	
Class Cyanophyceae				
Order Chroococcales				
Fam. Chroococaceae				
<i>Merismopedia punctata</i>			7	
<i>Microcystis aeruginosa</i>	9	8	7, 8, 9	8, 9
Order Nostocales				
Suborder Oscillatoriiineae				
Fam. Oscillatoriaceae				
<i>Oscillatoria tenuis</i>	11, 12			12
<i>Phormidium uncinatum</i>	5			
<i>Spirulina laxa</i>			10	

Table 3. Correlation among the elements of water environment in the Unmun Lake

	Water Tem.	DO	pH	Chl a	BOD	COD	Turbidity	SS	Conductivity	T-N	T-P	NH ₄ -N	NO ₃ -N
Water Tem.	1	-0.498	0.241	0.239	-0.497	0.804	0.350	0.166	0.779	0.522	-0.338	-0.375	0.325
DO	NS	1	0.385	0.213	0.298	-0.097	0.036	0.553	-0.383	0.267	0.287	0.073	0.073
pH	NS	NS	1	0.713	1.000	0.530	0.524	0.659	0.415	0.604	-0.067	0.037	0.085
Chl a	NS	NS	*	1.000	-0.055	0.624	0.394	0.442	0.503	0.733	0.030	0.103	0.418
BOD	NS	NS	NS	NS	1.000	-0.406	-0.285	-0.200	-0.103	-0.164	0.365	0.280	-0.200
COD	**	NS	NS	NS	NS	1.000	0.527	0.491	0.673	0.806	-0.097	-0.219	0.382
Turbidity	NS	NS	NS	NS	NS	NS	1.000	0.697	0.115	0.309	-0.590	-0.638	-0.382
SS	NS	NS	*	NS	NS	NS	NS	1.000	0.103	0.564	-0.413	-0.353	-0.115
Conductivity	**	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	1.000	0.697	-0.219	-0.073	0.552
T-N	NS	NS	NS	*	NS	**	NS	NS	*	1.000	0.000	-0.109	0.661
T-P	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	1.000	0.707	0.395
NH ₄ -N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	NS	*	1.000	0.274
NO ₃ -N	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	*	NS	NS	1

** : p < 0.01; * : p < 0.05; N = 10, NS: non significiance

엽록소(Chlorophyll) a 농도 변화

엽록소 a는 미세조류를 비롯한 광합성 세균과 초미세플랑크톤(picoplankton)이 광합성 작용을 통해 빛에너지에서 생체에너지로 변환하는 매개체이고, 수계 소비자인 동물플랑크톤과 어류의 먹이가 되는 1차 생산자의 생산력을 평가할 수 있는 지표가 된다(김과 김 1999). Table 1에서 나타난 운문호의 엽록소 a는 화옹호(정 등 2004)의 최고치 90 μm L⁻¹와 낙동강 저수지(김 등 2003)의 최고치 144 μm L⁻¹에 비해 전반적으로 낮은 농도이긴 하나 수심별 뚜렷한 농도차를 확인할 수 있었다. 본 조사정점 1과 2는 유수역을 대표하고, 정점 3과 4는 정체수역으로 구분되는데 정점 1과 2는 정점 3과 4에 비해 엽록소 a의 농도는 낮았으나 정점 3(9.9 μm L⁻¹)과 정점 4(16.8 μm L⁻¹)는 7월에 표층에서 엽록소 a의 농도가 현저히 높게 나타났다. 7월과 8월에는 월 2회를 채수하였는데 Table 1의 7월과 8월의 엽록소 a의 농도는 각 2회의 평균치를 제시하였다. 7월의 둘째 주에 엽록소 a의 농도는 28 μm L⁻¹로 최고치를 나타냈다. 이는 일시적이긴 하나 부영양화 현상으로 인한 국부적인 수화현상이 7월 첫 주에 나타났는 것으로 사료되는데 이는 6월 중순에 폭우의 유입으로 총질소와 총인 등의 오염원이 증가한 원인인 것으로 사료된다. 특히, 10월에 정점 3과 4에서 표층과 수심 10m에서 각각 12 - 14 μm L⁻¹ 농도로 높았다. 8월의 넷째 주는 수심 10m에서 16.3 μm L⁻¹로 엽록소 a의 농도가 최고치로 나타났다. 이는 정점 3과 4에서 7월 첫 주의 표층수에서 수화현상 원인으로 수표면에는 *Microcystis aeruginosa*가 우점하였으나 수심 10m에서는 *Aulacoseira* sp.가 군락을 형성하였다(Table 4). 이는 조류생장의 제한인자인 총인의 양이 정점 3과 4에서 수심 10m에 최고치를 나타낸 사실과 더 유의성이 큰 것으로 판단된다. 수심 10m에서 6월의 폭우 이후에 총인을 부하한 중층밀도류가 수심 10m 부근에서 형성되었기 때문에 이를

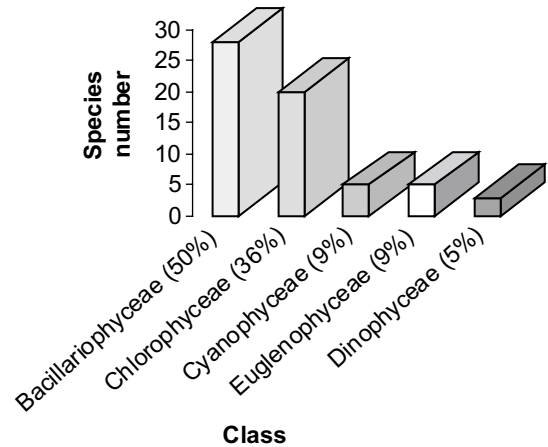


Fig. 5. Percentage of phytoplanktons investigated in the Lake Unmun.

섭취한 식물플랑크톤의 증식으로 엽록소 a의 농도가 최고로 증가한 것으로 판단된다. 또한 10월에 정점 3과 4에서 표층과 수심 10m에서 엽록소 a의 농도가 높게 나타난 이유는 운문호의 수문학적 특징(정체수역의 체류시간 증가, 유효저수량 증가 등)과 강우량이 극히 감소(10.9 mm/월평균)에서 기인된다고 사료된다.

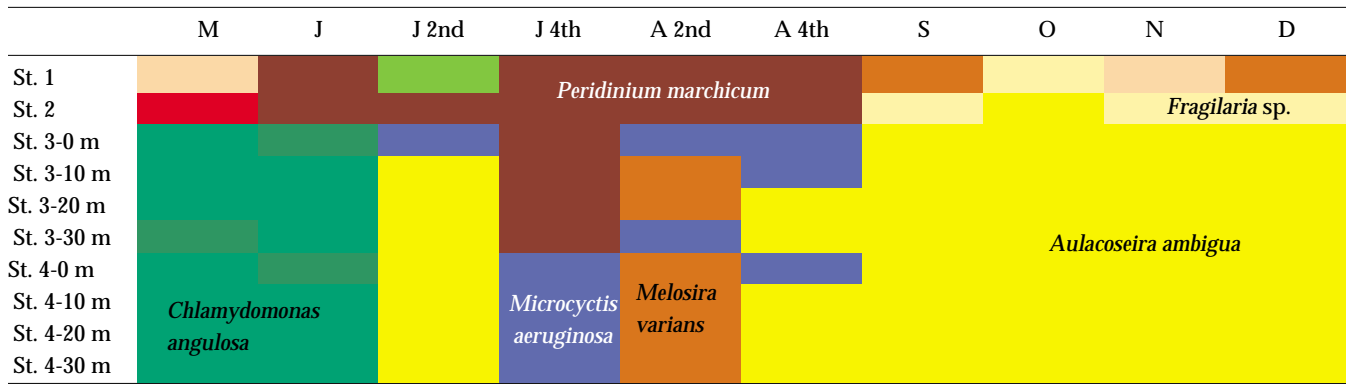
수환경과 1차 생산력과의 유의도 분석

운문호의 사계절 수환경 요인과 1차 생산력과의 상호 유의도를 Spearman rank correlation coefficient를 사용하여 분석하였다(Table 3). 각각 "양"의 상관관계를 나타낸 수환경 요인들은 수소이온 농도와 엽록소 a, COD와 수온, SS와 수소이온 농도, 수온, 총질소와 엽록소 a, 총질소와 COD, SS와 탁도, 총질소와 전기전도도, 암모늄성 질소와 총인, 질산성 질소와 총질소 인자로서 상관관계의 유의도가 높다고 분석이 되었다. 특히 수환경 요인들과 광합성 색소의 유의성은

Table 4-1. Distribution of dominant species of phytoplanktons in the Lake Unmun

	Dominant species (Cells mL ⁻¹)								
	St. 1	St. 2	St. 3			St. 4			
	0 m	10 m	20 m	30 m	0 m	10 m	20 m	30 m	
M	Cymbella turgidula (7.5)	Achnanthes sp. (4.6)	Chlamydomonas angulosa (202)	Chlamydomonas angulosa (40)	Dictyosphaerium pulchellum (15.1)	Chlamydomonas angulosa (180)	Chlamydomonas angulosa (314.5)	Chlamydomonas angulosa (346.7)	Chlamydomonas angulosa (413.4)
J	Peridinium marchicum (4.8)	Peridinium marchicum (3.4)	Dictyosphaerium pulchellum (52.8)	Chlamydomonas angulosa (240)	Chlamydomonas angulosa (160)	Dictyosphaerium pulchellum (41.6)	Chlamydomonas angulosa (332)	Chlamydomonas angulosa (120)	Chlamydomonas angulosa (130)
J2	Chlorella ellipsoidea (0.5)	Peridinium marchicum (1.6)	Microcystis aeruginosa (150.3)	Aulacoseira ambigua (2.4)	Aulacoseira ambigua (3.2)	Aulacoseira ambigua (11.2)	Aulacoseira ambigua (4)	Aulacoseira ambigua (4.8)	Aulacoseira ambigua (2.4)
J4	Peridinium marchicum (5.4)	Peridinium marchicum (2.2)	Peridinium marchicum (4.8)	Peridinium marchicum (0.8)	Peridinium marchicum (5.3)	Microcystis aeruginosa (23.4)	Microcystis aeruginosa (463.2)	Microcystis aeruginosa (194.8)	Microcystis aeruginosa (182.4)
A2	Peridinium marchicum (3.2)	Peridinium marchicum (1.9)	Microcystis aeruginosa (103.4)	Melosira varians (18.5)	Microcystis aeruginosa (128.8)	Microcystis aeruginosa (521)	Melosira varians (620.6)	Melosira varians (4.9)	Melosira varians (2.6)
A4	Peridinium marchicum (1.8)	Peridinium marchicum (73.4)	Microcystis aeruginosa (216.8)	Aulacoseira ambigua (2.1)	Aulacoseira ambigua (11.7)	Microcystis aeruginosa (160.8)	Aulacoseira ambigua (2.2)	Aulacoseira ambigua (2.5)	Aulacoseira ambigua (3.7)
S	Melosira varians (1.2)	Fragilaria capucina (4.1)	Aulacoseira ambigua (13.4)	Aulacoseira ambigua (12)	Aulacoseira ambigua (5.6)	Aulacoseira ambigua (40.4)	Aulacoseira ambigua (31.2)	Aulacoseira ambigua (13.6)	Aulacoseira ambigua (6.8)
O	Fragilaria capucina (2.4)	Aulacoseira ambigua (1.6)	Aulacoseira ambigua (326)	Aulacoseira ambigua (61.3)	Aulacoseira ambigua (6.4)	Aulacoseira ambigua (504.2)	Aulacoseira ambigua (489.7)	Aulacoseira ambigua (41.6)	Aulacoseira ambigua (30.4)
N	Cymbella tumida (0.8)	Fragilaria sp. (0.7)	Aulacoseira ambigua (38)	Aulacoseira ambigua (60.8)	Aulacoseira ambigua (140.8)	Aulacoseira ambigua (61.6)	Aulacoseira ambigua (48.8)	Aulacoseira ambigua (54.4)	Aulacoseira ambigua (55.2)
D	Melosira varians (7.2)	Fragilaria sp. (3.2)	Aulacoseira ambigua (42.6)	Aulacoseira ambigua (39.2)	Aulacoseira ambigua (33.6)	Aulacoseira ambigua (24)	Aulacoseira ambigua (15.2)	Aulacoseira ambigua (24.8)	Aulacoseira ambigua (6.4)

Table 4-2. Vertical distribution of dominant species of phytoplanktons in the Lake Unmun



Jn and An: sampling weeks of July and August



운문호의 수생태계와 조류발생 원인 예측에 중요한 기초자료가 된다.

2004년도 5월에서 12월까지 실시된 본 연구의 운문호의 영양상태는 임화호와 진양호 등에 비해 인 제한인자로 작용하여 수화현상이 미미한 상태이나 엽록소 a에 의한 Carlson (1977)의 TSI(부영양화지수)는 9월과 10월에 정점 3과 4에서 표층과 수심 10 m에서 규조인 *Aulacoseira sp.*의 대량발생으로 TSI 지수(40-49)가 40을 넘어 중영양상태를 나타냈다. 또한 6월의 폭우나 태풍으로 유입되는 외부 유입수에 직접적으로 영향을 받고 있는 7월과 8월은 수심 10 m에 인의 부하량이 증가하여 *Aulacoseira sp.*의 일시적인 조류발생의 원인이 된다고 판단된다.

본 연구의 최종 결과에 의하면 운문댐 조류발생 기작을 다음과 같이 명확하게 규명할 수 있었다. 특히 여름은 6월 중순의 폭우와 태풍 영향으로 총인의 농도 증가로 조류발생의 주된 원인이 되었고, 수온성층이 봄과 여름에 형성되었다. 하천수로부터 폭우 유입은 탁도와 SS를 증가시켰고 N, P가 부하된 유입수는 중간 밀도류를 형성하였다. 운문천과 동창천은 T-N과 NO₃-N의 농도가 높고, T-N:T-P의 비율이 1,500-2,300의 범위를 나타내지만 정체수역 정점 3과 4의 영양염 농도가 전반적으로 비교적 낮은 여유는 하천 하상의 암석과 자갈 위에 부착규조류가 대발생하여 이들의 증식이 오염원이 되는 영양염을 섭취하여 유입수를 자연정화하는 여과장치 역할을 하는 것으로 사료된다. 운문호는 10월에 수화현상으로 인한 조류 대발생 현상이 나타난다. 이는 9월에 수체의 유입양이 방류량보다 높아 10월에 정체수괴의 체류시간이 길어지고 수표층에서 수심 20 m 사이에서 여름에 비해

수온저하에 의한 용승현상으로 영양염의 섞임현상이 나타나 식물플랑크톤이 발생하여 엽록소 a의 증가하였고 용존산소가 낮아짐에 따라 COD 농도는 증가하였고 TSI(Carlson 1977)가 10월 정점 3의 표층과 수심 10 m에서 최고로 높게 나타났다. 운문댐의 조류발생을 저감시키기 위한 예방대책은 여름뿐만 아니라 가을인 10월에도 *Aulacoseira sp.*의 발생을 차단하기 위해 방류량을 증가하여 수괴의 정체시간을 줄여 수층의 섞임현상에서 발생한 영양염의 농도를 희석시켜 식물플랑크톤의 발생빈도를 줄일 필요가 있다.

식물플랑크톤의 현존량

우리나라 대부분의 댐저수지들이 조류의 수화기준(5,000 세포수 mL⁻¹)(Horne and Goldman 1994) 이상의 현존량이 나타나고 있으나, 본 연구에서 운문호의 식물플랑크톤의 현존량은 6월에 수심 10 m에서 663 세포수 mL⁻¹를 나타냈고, 특히 정점 1과 2에서 식물플랑크톤의 현존량이 33 세포수 mL⁻¹로 가장 낮게 나타났다(Table 3). 하지만 정점 1과 2의 하천수는 하상의 자갈의 표면적에 다량의 부착미세조류들이 조사기간에 밀집되어 있는 것이 관찰되었다. 이들의 부착미세조류의 군락은 하천수가 호수로 유입되기 전에 오염원을 사전에 흡수해 버리는 여과장치 역할을 하는 것으로 사료된다. 하지만 10월에 정점 4의 표층과 수심 10 m에서는 식물플랑크톤의 현존량이 각각 13,410 세포수 mL⁻¹, 10,470 세포수 mL⁻¹로 증식하여 비교적 높은 1차 생산량을 나타냈는데 이는 운문댐의 선행 연구결과와 유사하였다(이 2000). 10월에 수화가 발생하는 요인은 정체수괴의 체류시간의 증가, 수표면의 수온 감소로 인한 용승현상에 의한 오염원의 섞임 현

상, 갈수기의 강우량 감소 등의 요인이 복합적으로 작용하였기 때문으로 판단된다.

식물플랑크톤의 종조성과 우점종의 특징

식물플랑크톤의 현존량은 기존의 타 수생태계에서 연구된 선행연구(장과 전 1996; 김 1998; 김 등 1998; 서 1998; 이 1998; 이 등 1998; 김 등 1999a, b, c; 박 등 2000; 신 등 2000a; 신 등 2000b; 이 등 2000; 김 등 2003a; 신 등 2003b; 이 2003)에 비해 높지 않은 편이었고, 종조성도 다양하지 않았다(Table 2). 5월부터 12월까지 5강 12목 4아목 23과 3아과 61종이 관찰되었다. 식물플랑크톤의 분류군은 규조강이 50%인 28종으로 가장 다양했고, 그 다음으로 녹조강(20종), 남조강(5종), 유글레나강(5종)과 와편모강(3종) 순으로 분류군의 종수는 줄어 들었다(Fig. 5). *Peridinium* sp.은 5월부터 8월까지 전 정점에 걸쳐 고루 분포하고 있었다(Table 4-1, 2). 5월에 주로 *Cymbella turgidata*가 우점하였고, 부유성인 *Achnanthes*속, *Diatoma*속, *Fragilaria*속, *Synedra*속이 대부분이었다. 남조류는 *Phormidium*속이 분포하였고, 그 외 녹조류는 *Stigeoclonium*속, *Dictyosphaerium*속, *Chlorella*속, *Ulothrix*속과 *Chlamydomonas*속이 현존하였다. 6월은 1-3 정점에 녹조류인 *Chlamydomonas globosa*가 우점하였다. 특히 7월에서 10월까지 표층에 수화현상의 원인종인 *Microcystis aeruginosa*가 출현하였다. 특히 *Aulacoseira* sp.도 5월 정점 4에서 출현하기 시작하여 10월에 대량 우점하여 12월까지 지속되었다. 따라서 우점종은 7월과 8월에 *Peridinium* sp.이고, 아우점종은 *Microcystis aeruginosa*이고, 10월의 우점종은 *Aulacoseira distans*이고, 아우점종은 *Asteionella formosa*였다. 또한 차후 연구에서는 운문호의 유입하천들의 수환경과 부착조류의 군집변동과의 유의성을 집중적으로 조사할 필요성이 제시된다.

사 사

본 연구는 2004년도 환경부 경북지역환경기술개발센터의 연구비 지원으로 수행되었습니다. 훌륭한 조언을 아끼지 않은 심사위원님들과 이 연구가 완성되기까지 많은 조언을 주신 한국수자원공사의 신재기박사님께 감사의 말씀을 전합니다.

참고문헌

공동수. 1992. 팔당호의 육수생태학적 연구. 고려대학교 박사 학위 논문.
 김미경. 2004. 운문댐의 조류발생원인 및 예방대책. 경북지역환경기술개발센터 보고서.
 김미경, 김영환. 1999. 일반조류학. 아카데미서적.

김미경, 박정원, 이영욱. 2003. 남매지의 수환경요인과 식물플랑크톤의 계절적인 변동. 한국육수학회지 36: 48-56.
 김법철, 김재욱, 전만식, 황순진. 1999a. 소양호 동·식물플랑크톤의 계절 변동. 한국육수학회지 32: 127-134.
 김법철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 채기숙. 1999b. 국내 주요 호수의 육수학적 조사 (3): 진양호. 한국육수학회지 32: 111-126.
 김법철, 박주현, 허우명, 임병진, 황길순, 최광순, 최중수. 1999c. 국내 주요 호수의 육수학적 조사 (4): 주암호. 한국육수학회지 34: 30-44.
 김법철, 최광순, 김철구, 이유희, 김동섭, 박제철. 1998. 소양호의 DOC와 POC의 분포. 한국육수학회지 31: 17-24.
 김용재. 1998. 팔당댐호의 식물플랑크톤 군집의 생태적 특성. 한국육수학회지 13: 225-234.
 김종민, 허성남, 노혜란, 양희정, 한명수. 2003. 호소형 및 하천형 댐 호의 육수학적 특성과 조류발생과의 상관관계. 한국육수학회지 36: 124-138.
 김지환, 김영환, 이인규. 1998. 충주호 식물플랑크톤 군집의 동태. Algae 13: 339-354.
 김호섭, 황순진, 고재만. 2002. 도심의 얇은 인공호의 일감호의 수질변화특성과 퇴적환경의 평가. 한국육수학회지 36: 161-171.
 박혜경, 정원화, 권오상, 류재근. 2000. 팔당호에서 남조류 및 남조류생산 독성물질의 계절변동. Algae 15: 29-35.
 서동일. 1998. 대청호의 성층현상에 의한 부영양화 특성과 수질관리 방안에 관한 연구. 대한환경공학회지 20: 1219-1234.
 서정관, 유재정, 이재정, 양상용, 정익교. 2003. 운문호의 식물플랑크톤 군집동태와 영양단계 평가. Algae 18: 135-143.
 신재기, 조주래, 황순진, 조경제. 2000. 경안천~팔당호의 부영양화와 수질오염 특성. 한국육수학회지 33: 387-394.
 신재기, 황순진, 강창근, 김호섭. 2003. 하천형 저수지 팔당호의 육수학적 특성: 수문과 수환경 요인. 한국육수학회지 36: 242-256.
 오희목, 이석준, 김성빈, 박미경, 윤병대, 김도한. 1998. Algal bioassay에 의한 조류성장 제한영양염류 결정. 한국육수학회지 31: 150-157.
 이경락, 최재신, 김한순. 2003. 박실지와 정양지의 식물플랑크톤 군집의 계절 변동. Algae 18: 273-280.
 이용운, 이학영. 2003. 주암호에서 수질과 식물플랑크톤 군집에 미치는 광 차단효과. 한국육수학회지 36: 150-160.
 이은주, 김법철, 조규송. 1998. 소양호 지류에서의(상갈리) 식물플랑크톤 군집구조. 한국육수학회지 31: 119-128.
 이정준, 이정호, 박종근. 2003. 대청호의 남조류 수화 발달과 환경요인 변화와의 상관 관계. 한국육수학회지 36: 267-276.
 이정호. 1995. 낙동강 수계의 6개 다목적 댐호의 구조군집 및 LTSI(Lake Trophic State Index)에 의한 영양단계의 평가. 인제대학교 환경연구소 발표논문집.
 이정호. 1998. 댐저수지의 조류 수화 발생의 동태와 제어 대책. 한국수자원공사 보고서.
 이정호. 2000. 식물플랑크톤 분포도에 따른 운문호의 선택취수 수심 결정. 한국육수학회지 33: 311-318.
 이진환, 오희목, 맹주선. 2000. 대청호의 수질과 식물플랑크톤 현존량. 한국환경생물학회지 18: 355-365.
 장윤경, 전예숙. 1996. 팔당댐 심수수역의 식물 플랑크톤에 관한 연구. II. 식물 플랑크톤 종 조성의 변화. Algae 11: 217-229.
 정미희, 김호섭, 최철일, 황순진. 2004. 화옹호의 식물플랑크톤과 환경요인. 한국육수학회지 37: 193-204.

- 정상옥, 오창준. 1997. 운문댐 하류 논지역에서의 냉수피해 조사연구. 慶北大農誌. **15**: 39-46.
- 정 준 1993. 한국담수조류도감. 아카데미서적, 서울.
- 최광현, 황순진, 김호섭, 한명수. 2003. 팔당호 식물플랑크톤의 제한영양염과 성장률의 경시적 변화. 한국육수학회지 **36**: 139-149.
- 최상호, 하경, 주윤희, 김현우, 주기재. 1998. 우포 습지의 이화학적 특성. 한국육수학회지 **31**: 273-281.
- 최영길, 한명수, 안태영, 광노태. 1995. 담수의 부영양화. 신광문화사.
- 한국수자원공사. 2000. 운문댐의 성층특성과 홍수기 밀도류가 수질에 미치는 영향. 운문댐관리단.
- APHA AWWA WEF. 1995. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 18th ed. American Public Health Association, Washington, DC. USA.
- Carlson R.E. 1977. A trophic state index for lakes. *Limnol. Oceanogr.* **22**: 361-379.
- Hargesheimer E.E. and Watson S.B. 1996. Drinking water treatment options for taste and odor control. *Wat. Res.* **30**: 1423-1430.
- Horne S.E. and Goldman C.R. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill Inc., New York.
- Jeffrey S.W. and Humphrey G.F. 1976. New spectrophotometric equation for determining chlorophylls *a*, *b*, $c_1 + c_2$ in higher plant algae and natural phytoplankton. *Biochim. Physiol.* **167**: 191-194.
- John D.M., Whitton B.A. and Brook A.J. 2002. *The freshwater algal flora of the British Isles (An identification guide to freshwater and terrestrial algae)*. Cambridge Univ. Press, Cambridge.
- Kenefick S.L., Hruday S.E., Prepas E.E., Motkosky N. and Peterson G. 1992. Ororous substance and cyanobacterial toxins in prairie drinking water sources. *Wat. Sci. Tech.* **25**: 147-154.
- Kim Y.J., Choi J.S. and Kim H.S. 1997. Structure of phytoplankton community in Lake Imha. *Korean Journal of Limnology* **30**: 307-324.
- Komarek J. and Fott B. 1983. *Das Phytoplankton des Sbwasser systematik und Biologie. Teil. 7. Chlorophyceae (Grunalgen Ordnung: Chlorococcales)*. E. Schweiz. Verl. Stuttgart.
- McNaughton S.J. 1967. Relationship among functional properties of California Glassland. *Nature* **216**: 144-168.
- Prescott G.W., Croasdale H.T., Vinyard W.C. and Bicudo de M. 1977. *A Synopsis of North American Desmids. Part II. Desmidiaceae: Placodermae*, Section 3. Lincoln, Univ. of Nebraska press.
- Young W.E., Horth H., Crane R., Ogden T. and Arnott M. 1996. Taste and odour threshold concentrations of potential potable water contaminants. *Wat. Res.* **30**: 331-340.

Received 10 November 2007

Accepted 5 December 2007

