

## 용담호 조류군집의 시공간적 분포와 조류발생 요인분석

김현수\* · 정일환

전북대학교 지구환경과학과

### Characterization of Algal Community of Yongdam Reservoir and Identification of Ecological Factors Inducing the Changes in Community Composition

Hyun-su Kim\* · Il-hwan Jeong

Department of Earth and Environmental Sciences, Chonbuk National University, Jeonju 561-756 Korea

#### ABSTRACT

Spatial and temporal changes in algal population in Yongdam reservoir and ecological factors that induced the changes in the size and composition of algal population were investigated by monthly sampling at ten locations in the reservoir. Nutritional state of the reservoir was identified to be phosphorus-limited with nitrogen to phosphorus (N : P) ratio much greater than 17 in most samples. Algal population was dominated by three taxonomic groups, diatoms, chlorophytes and cyanobacteria. Although explosive algal growth was not observed in the summer, algal population showed transition with time of the dominant algal type from diatoms in the winter to cyanobacteria in the summer. Chlorophyta was not the dominant group in the reservoir although they maintained relatively stable number of cells in the reservoir and showed increase in population from March to May. The application of statistical methods revealed that the factors inducing changes in cell number of each group were water temperature for diatoms and cyanobacteria and phosphorus concentration for chlorophyte. Fluctuation of cyanobacterial population was mainly observed near the inlet of tributaries while diatoms showed higher variation inside the reservoir.

**Key words :** Algae, Diatoms, Chlorophyta, Cyanobacteria, Artificial reservoir

#### 1. 서 론

우리나라에서는 지속적으로 증가하는 물 수요와 강우현상이 여름에 집중되는 기후적 특성으로 인해 수자원을 효율적으로 유지, 관리하는 것이 안정된 물 공급을 위한 중요한 요소이다. 이 때문에 하천에 댐을 축조하여 인공호를 건설하는 경우가 많으며, 국내에 존재하는 18,000여개의 호수 중 대부분이 이와 같은 방법을 통해 조성된 인공호이다(Heo et al., 2005). 인공호 건설을 통해 계류성 수계가 정체성 수역으로 변화되면 수리학적 체류시간이 길어져 유역으로부터의 오염물질 유입과 부영양화에 취약한 환경이 조성되는데, 국내 대부분의 인공호에서도 부영양화로 인한 조류의 과다증식 현상이 자주 나타나고 있다(Kwon et al., 2002; Park et al., 2005; Cho et al.,

2012). 조류개체수의 폭발적인 증가는 수체 내 용존산소의 고갈을 초래하여 어류를 포함한 수중생물의 폐사를 일으키거나, 일부 남조류에 의해 생산된 독성물질을 함유한 물을 섭취한 가축이나 야생동물의 피해를 유발하는 등 여러 환경적 악영향을 초래할 수 있다.

국내 대표적인 대형 인공호인 용담호도 담수 초기인 2000년대 초반에 정리되지 않은 주변 오염원과 수몰지역으로부터 유입되는 오염물질로 인해서 조류의 이상증식이 발견되는 경우가 많았다(Yu et al., 2005; Kim et al., 2006). 이에 조류발생에 신속하게 대응하고 안전한 용수 공급을 위해 2003년 조류예보제가 실시 되었으나, 이 후에도 2005년과 2006년, 2010년 3회에 걸쳐서 조류주의보가 발령된 바 있다. 호수 내 조류 군집의 변화양상은 여러 기상환경 및 수질조건, 그리고 영양물질의 가용성 등

\*Corresponding author : hyunkim@jbnu.ac.kr

Received : 2015. 11. 6 Reviewed : 2015. 11. 24 Accepted : 2015. 12. 1

Discussion until : 2016. 2. 29

에 의해 복합적인 영향을 받기 때문에, 조류의 이상증식을 예측하고 이로 인한 여러 악영향을 방지하기 위해서는 제반 환경요소와 조류군집의 특성을 종합적으로 조사하고 이들간의 상호관련성을 파악하여 수자원관리에 적용하는 것이 매우 중요하다.

용담호의 조류 및 영양상태에 대한 연구는 여러 학자에 의해서 수행 되었으나, 대부분의 연구는 현 상태의 호수 내 조류군집 변화의 예측과 방제에 사용되기에는 다음과 같은 어려움이 있다. (1) 조류 연구가 담수 초기에 집중되어 2003년 이후 조류 시료의 분석을 통한 연구가 수행된 바 없어 현재 조류군집의 상태에 대한 파악이 불가하거나, (2) 조류군집에 대한 조사가 호수 내 극히 제한적인 지점에서 수행되어 수리학적 조건 변화에 따른 조류 군집의 변동을 적절히 파악할 수 없으며, (3) 수질조사가 수행된 경우 조류 군집에 대한 조사가 엽록소-a(Chlorophyll-a, Chl-a) 농도 파악에 국한되어 조류 군집의 동력학적 변화에 대한 연구가 어려운 측면이 있으며, (4) 조류에 대한 모델링이나 실험연구는 대부분 하나의 종을 가정하여 수행되어(Park et al., 2006) 다양한 종으로 구성된 군집의

변화를 파악하기 어려운 측면이 있다.

본 연구는 용담호의 다양한 물리적 및 화학적 환경조건이 호수에 존재하는 조류에 미치는 영향과 이에 따른 변화를 종합적으로 파악하기 위해서 수행되었다. 이를 위해 호수 내 여러 조사지점을 설정하고 수질환경인자와 조류 군집에 대한 조사를 동시에 수행하고, 조사결과에 대한 통계적 분석방법을 적용하여 군집의 동력학적 변화와 환경인자 사이의 연결고리를 파악하고자 하였다.

## 2. 연구 지역

본 연구지역인 용담호는 광역 전주권의 안정적인 생활용수 공급과 홍수 조절 및 전력자원 개발을 목적으로 전북 진안군 진안면 월계리에 건설된 용담댐에 의해 조성되었다(Fig. 1). 높이 70 m, 길이 498 m 규모의 용담댐은 2001년 10월 완공 되었으며, 이로 인해 형성된 용담호의 저수면적은 36.24 km<sup>2</sup>, 저수용량이 8.15 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>이고, 유효저수량은 8.15 × 10<sup>8</sup> m<sup>3</sup>으로 저수용량 면에서 소양호, 대청호, 충주호 및 안동호에 이어 5번째 규모의 대형호수이

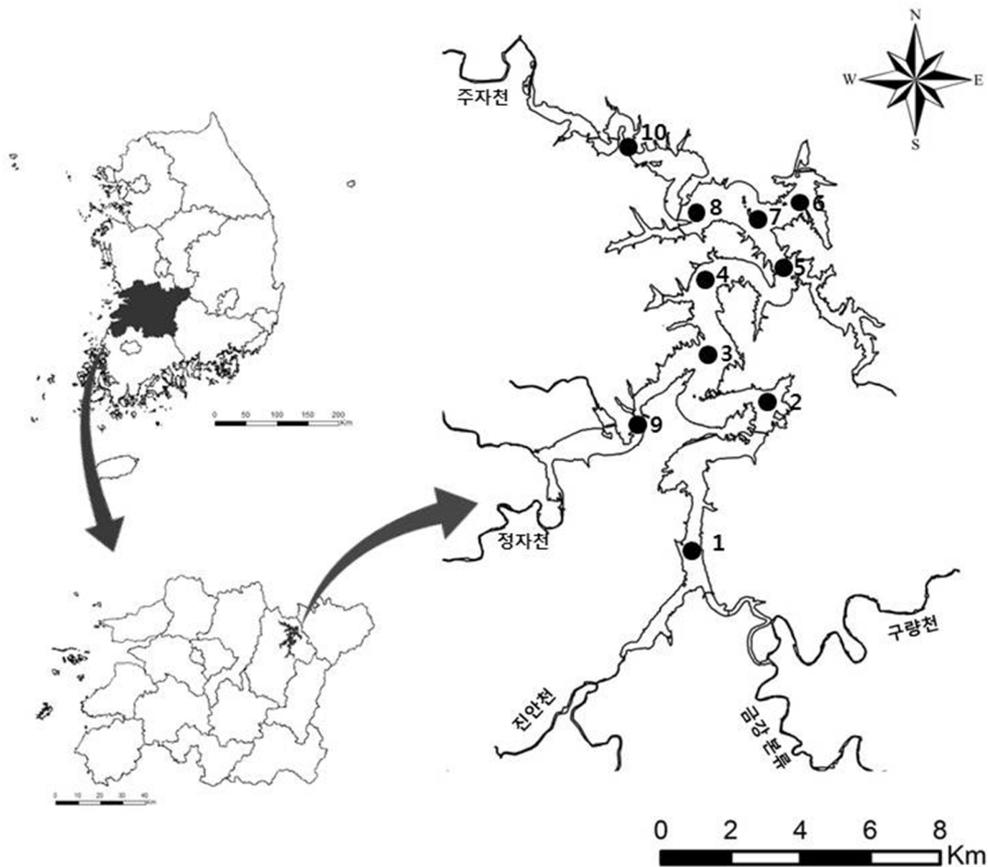


Fig. 1. Areal map of Yongdam reservoir and locations of sampling sites.

다(K-water, 2000). 금강유역의 최상류에 위치하는 용담호의 유역면적은 930 km<sup>2</sup>로 전체 금강유역 면적의 9.45%를 점유하고 있으며 대부분 산지와 농업지역으로 구성되어 있다. 금강본류, 구량천, 진안천, 장계천, 정자천의 5개 지류가 독립적으로 또는 합류하여 유입되며, 전라북도 장수군, 진안군, 무주군의 3개 군, 2개 읍, 12개 면이 용담호 유역에 위치하고 있다.

### 3. 연구 방법

#### 3.1. 현장조사 및 분석

용담호 내에서 호수의 흐름과 수심에 따른 수질인자와 조류군집의 변화를 파악하기 위해 10개 수질조사 지점을 설정하고, 이에 대한 현장조사를 2014년 8월부터 2015년 7월까지 12개월에 걸쳐서 2014년 11월과 2015년 2월을 제외하고 월 1회 수행하였다(Fig. 1). 하천 유입부에 대한 조사는 구량천과 합류하여 유입되는 금강본류와 진안천이 호수로 유입되는 지역(지점 1)과, 정자천(지점 9) 및 주자천(지점 10) 유입지점에 대해서 수행 되었으며, 이 외에 호수 내부의 수체의 흐름에 따른 변화를 반영할 수 있도록 7개 지점(지점 2~8)을 설정하고 이에 대한 조사를 수행하였다. 용담댐 및 취수탑 인근 3개 지점(지점 6, 7, 8)에 대해서는 수심별 수질인자 및 조류 군집의 변화를 파악하기 위하여 표층(수심 1 m), 중층(수심 15 m), 심층(수심 30 m)으로 구분하여 조사를 수행하였다. 중층 수심은 세치원판(Secchi disc)을 사용하여 측정된 평균 투명도의 약 2배가 되는 깊이로 설정하여 수광대의 하부지역의 변화를 파악하기 위하여 설정되었고, 심층 수심은 용담호의 연중 최저수심에 해당하는 깊이로 설정하였다.

수질 조사 항목은 수온, 용존산소(DO), 전기전도도(EC), pH, Eh, 투명도, 생화학적산소 요구량(BOD), 화학적 산소 요구량(COD), 총인(T-P), 총질소(T-N), Chl-a, 질산성 질소(NO<sub>3</sub>-N), 아질산성 질소(NO<sub>2</sub>-N), 암모니아 질소(NH<sub>3</sub>-N), 염소이온(Cl<sup>-</sup>), 황산염 이온(SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>), 불소이온(F<sup>-</sup>)이었으며, 이 외에 조류군집에 대한 정성 및 정량적 분석을 수행하였다. 호수 수온은 HOBO Water Temperature Pro v2(Onset Computer Corp., U.S.A.)를 사용하여 수심에 따른 변화를 측정 하였으며, 호수의 투명도는 세치원판(Secchi disc)을 사용하여 현장에서 측정 되었다. 이 외 현장측정 및 실험실 분석 항목을 위한 물 시료 채취는 2.2리터 반돈 채수기(Van Dorn sampler, Wildlife Supply Co., U.S.A.)를 사용하여 수행되었다. DO, EC, pH, Eh는 시료채취 즉시 현장에서 Hach Multi meter(HQ40D,

Hach Co., USA)를 사용하여 측정 하였다. 수질 분석 항목은 수질오염공정시험방법에 따라 BOD incubator(KA44-11)를 사용하여 BOD를 측정하였으며, COD는 과망간산칼륨 적정법으로 측정하였다. T-P, T-N, Chlorophyll-a, NH<sub>4</sub>-N에 대한 분석은 UV/Vis Spectrophotometer(Optizen 2120UV plus)를 사용하여 흡광광도법으로 분석하였으며, Ion Chromatography (Dionex ICS-90)를 사용하여 음이온에 대한 분석을 수행하였다. 조류에 대한 분석은 채취된 시료를 Lugol solution(최종농도 2%)으로 고정하고 침강 농축시킨 후 Sedgwick-Rafter chamber를 이용하여 광학 현미경(Nikon TS-100)하에서 동정 및 계수하였다.

용담호에 대한 수문 정보는 수자원공사의 용담호 실시간 수문자료를 이용하였으며, 기상자료는 기상청 기후자료를 사용 하였으나 용담호 유역에는 기상 관측소가 존재하지 않아 금산기상관측소와 장수기상관측소의 관측값들의 평균값을 구하여 사용하였다.

#### 3.2. 다변량 통계 분석

##### 3.2.1. 주성분 분석(Principal component analysis)

용담호 현장조사에서 채취한 시료의 분석을 통해 얻은 수질항목 및 조류군집 자료를 이용하여 주성분분석(Principal component analysis)을 실행하였다. 주성분 분석에는 총 16개의 수리환경 변수(수온, pH, DO, 투명도, BOD, COD, T-P, T-N, NO<sub>3</sub>-N, F<sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Eh, EC, 일조량, 강우량)와 4개의 조류군집 변수(총조류, 녹조류, 남조류, 규조류)가 사용되었으며, 분석 농도가 검출한계 이하로 나타난 NH<sub>3</sub>-N과 NO<sub>2</sub>-N은 분석에서 제외되었다. 측정된 각 항목의 농도 값은 각 항목에 일정한 가중치를 부여하고, 절대값이 큰 항목에 의한 영향 없이 직접적인 비교를 가능하게 하기 위하여 평균이 0, 표준편차가 1인 z-score 값으로 표준화하였고(Thyne et al., 2004), 고유값(eigenvalue)이 1 이상인 요인을 채택하여 varimax법(직교 회전법)으로 반복적으로 회전하여 분석을 실시하였다.

##### 3.2.2. 군집 분석(Hierarchical cluster analysis)

군집분석은 관찰대상인 개체들을 유사성에 근거하여 보다 유사한 동류집단으로 분류하는 다변량 분석 기법으로, 군집분석을 통하여 동일집단으로 분류된 개체들은 공유하는 특성이 유사한 것들로 해석되며 통계학적 방법은 집단 내 개체들 간의 유사성을 개체 내 변수들 간의 상관계수, 개체간의 거리, 확률적 유사성 측정치 등을 활용하여 측정하고, 이에 기초하여 개체들을 유사한 동류집단으로 분류한다. 군집분석은 군집화 과정에서 자료 오차와 다중공

선성(multilinearity) 등으로 인해 초래되는 문제 오차를 줄이기 위해 요인분석으로 얻어진 요인 점수를 이용하여 수행되었다(Suk and Lee., 1999). Linkage rule로는 워드 법(Ward's method)이 사용되었고, 제곱 유클리디안 거리(Squared Euclidean distance)를 이용하여 두 변수간의 유사성을 측정하였으며, 분석 결과는 덴드로그램(Dendrogram)으로 도시화 하였다. 통계분석은 SPSS Statistics Version 21(SPSS Inc., U.S.A.)을 사용하여 수행하였다.

#### 4. 결과 및 토의

##### 4.1. 기상 및 수질조건

조사기간 중 연구지역의 평균 기온은 14.5°C였으며 기온분포는 8월에 가장 높았고, 12월에 가장 낮은 전형적인 우리나라의 기후 형태를 보였다. 용담호의 표층 수온의 변화는 기온 변화양상과 유사한 패턴을 보였다(Fig. 2). 최고 및 최저 수온은 각각 8월(27.4 ± 0.4°C)과 3월(4.8 ± 0.3°C)에 관측되었으며, 측정지점간 수온의 차이와 표층수온과 일조시간과의 연관성은 매우 작은 것으로 나타났다. 표층과 심층 사이의 수온 차이로 인한 수체의 성층현상은 3~4월 사이에 형성되기 시작하여 10월까지 뚜렷하게 지속되다가 12월부터 약해진 후 3월까지 전체 심도에 겨울 내내 유사한 수온분포를 보인다. 수심에 따른 수온분포는 측정 시점에 따라 큰 차이를 보이는데, 중층(심도 15 m)의 경우는 10월부터 3월까지 표층과 유사한 온도분포를 나타내지만, 성층화가 형성되기 시작하는 4월부터 7월까지 표층과 차이가 벌어지며 심층과 유사한 형태를 나타낸다. 심층(수심 30 m)의 경우에는 연중 유사한 수온 분포를 관찰할 수 있었다. 연구기간 중 용담호 지역의 강수량은 1,183 mm로 보고 되었으며 8월에 최고치(351.7 mm)를, 2월에 가장 낮은 강수량(18.6 mm)을 기록하였다. 용담호수의 댐 수위는 장마가 끝난 후인 9월에 최고조에 이르렀다가 점차 감소하는 양상을 보이며, 이듬해 6월 이후에 감소가 멈추는 형태를 보인다.

본 연구에서 측정된 수질인자의 평균값을 Table 1에 도시하였다. DO를 바탕으로 수질을 평가 했을 때 용담호의 수질은 매우 양호한 것으로 나타났으며(DO > 8.03 mg/L) 전체적으로 수심에 반비례하는 양상을 보인다(Fig. 3). 심도에 따른 용존산소 농도의 분포는 계절의 변화와 수체의 성층화 정도에 따라 뚜렷한 차이를 나타내는데, 수온 성층화가 이루어져 있고 높은 온도로 인한 생물학적 작용이 왕성할 것으로 예상되는 7~10월에는 표층의 DO 농도가 중층이나 심층에 비해 높게 나타나는 반면, 낮은 수온과

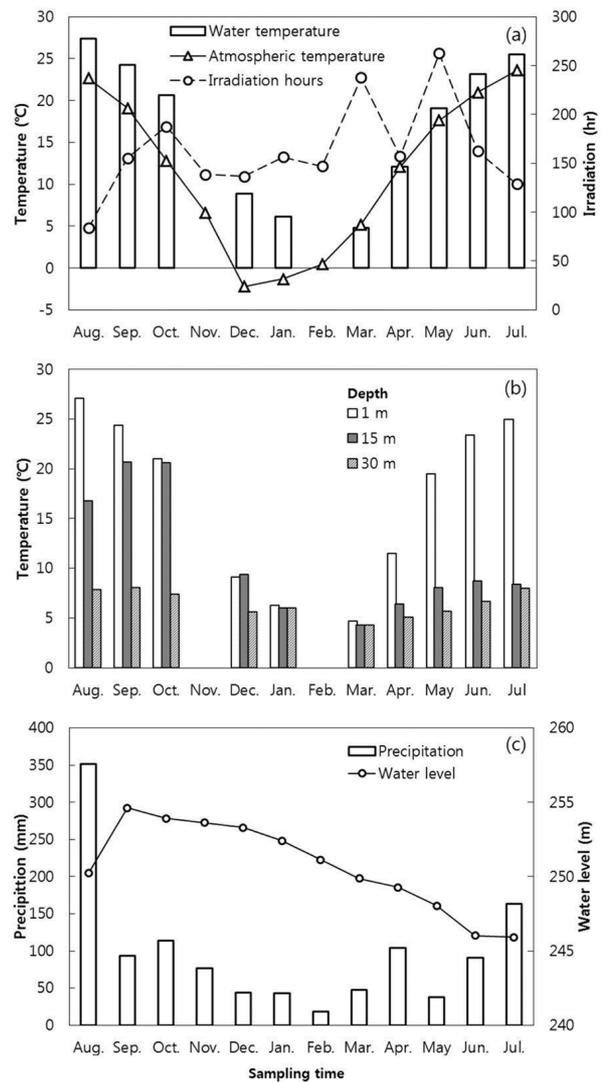


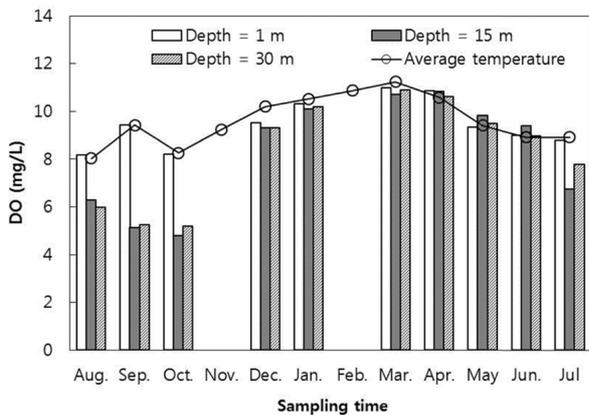
Fig. 2. Temporal distribution of physical properties of Yongdam reservoir. (a) temperature and irradiation hours, (b) water temperature distribution with depth, (c) amount of precipitation and water level.

수체의 역전(overtum) 현상이 관찰되는 12~3월 사이의 기간에는 표층과 심층 사이의 농도 차이가 거의 관찰되지 않으며, 이러한 양상은 6월까지 지속된다. 수온 성층현상이 4월부터 시작됨에도 4~6월 사이의 기간에 용존산소 농도가 심도에 따른 변화를 보이지 않는 것은 상대적으로 낮은 수온과 이후에 기술할 바와 같이 조류군집의 농도가 낮기 때문에 유기물의 형성과 이를 분해하는 미생물의 호흡작용을 통한 산소의 소비량이 크지 않기 때문인 것으로 보인다. 실제로 과거 용담호에서 본격적인 조류개체수의 증가는 8월에서 10월 사이에 일어나는 것으로 보고된 바 있다(Lee et al., 2005).

**Table 1.** Summary of average values of water quality parameters measured from this study

	Aug.	Sep.	Oct.	Dec.	Jan.	Mar.	Apr.	May	Jun.	Jul.
T (°C)	27.39	24.26	20.6	8.86	6.11	4.79	12.06	19.03	23.15	25.47
pH	7.52	7.62	6.77	7.21	7.14	7.03	6.99	7.04	7.73	7.76
EC (μS/cm)	125.8	140.8	115.4	115.9	117.4	119.0	114.2	123.3	129.1	129.7
SD (m)	4.42	3.56	3.57	3.98	4.28	4.91	4.68	5.34	4.41	3.64
DO (mg/L)	8.03	9.42	8.26	10.2	10.5	11.23	10.58	9.41	8.92	8.91
BOD (mg/L)	0.68	0.95	0.76	0.56	0.51	0.41	0.73	0.67	0.85	0.83
COD (mg/L)	2.42	2.9	2.67	2.66	2.15	1.84	1.36	1.68	2.13	2.44
TP (mg/L)	0.036	0.029	0.005	0.011	0.037	0.098	0.076	0.032	0.017	0.011
TN (mg/L)	1.697	1.521	1.509	1.468	1.724	2.106	2.125	2.030	2.68	1.68
NO <sub>3</sub> -N (mg/L)	1.379	1.104	1.078	1.077	1.287	1.708	1.817	1.721	1.767	1.484
Chl-a (mg/m <sup>3</sup> )	15.27	13.51	8.78	9.69	5.91	4.29	7.25	7.45	7.99	4.02
Cl (mg/L)	13.554	9.111	8.497	9.152	10.366	12.793	12.597	12.781	14.819	14.855
SO <sub>4</sub> (mg/L)	8.741	7.404	7.328	7.224	7.385	7.707	7.401	7.576	8.633	8.263

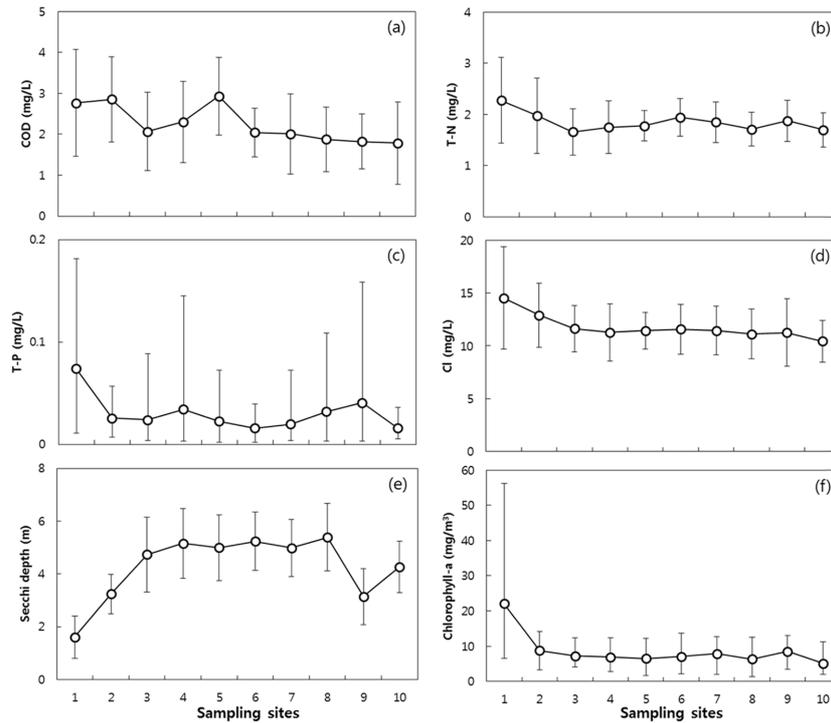
Note) WT, water temperature; SD, Secchi depth



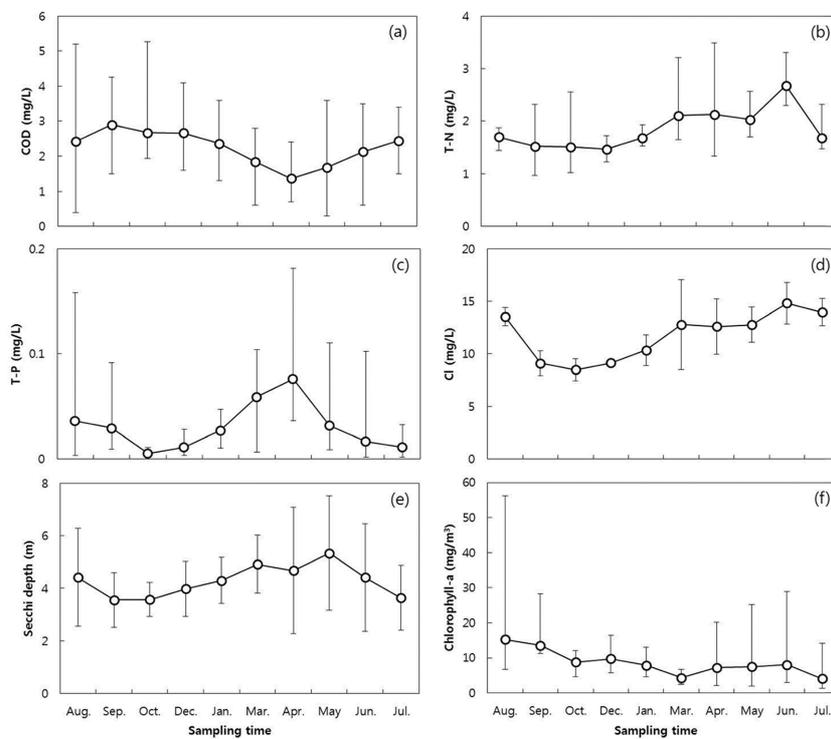
**Fig. 3.** Temporal distribution of dissolved oxygen (DO) concentrations with depth at sampling location 7. The average temperatures in the figure are arithmetic means of surface temperatures from 10 sampling locations.

용담호에서 채집한 물시료에 대한 지점별 및 조사지점별 분석결과를 Fig. 4와 Fig. 5에 도시하였다. COD의 농도는 연구기간 중 월별 평균 측정농도값이 3 mg/L 이하로 1등급 수질을 유지하고 있는 것으로 나타났으나 DO와 달리 동일 시료채취 시점에서 농도의 공간적 차이가 크게 나타난다. 특히, 금강분류와 진안천이 합류되어 유입되는 지점 1의 경우에서 자료의 변동치가 크게 나타나는데, 이 지점에서 측정된 최고농도와 최저농도는 각각 5.26 mg/L(10월)와 0.8 mg/L(3월) 이었다. BOD의 경우 평균 농도값이 항상 1.0 mg/L 이하로 측정 되었으며, 평균농도의 계절적 증감 패턴은 전반적으로 COD와 유사하게 나타난다. COD와 BOD의 시간적 변화양상은 유사하지만, 지점별 변화 특히 호수 내에서 물의 이동 방향에 따른

농도의 변화는 차이를 보인다. 용담호 내 10개 측정지점 중 상류에서 하류로 이동하면서 나타나는 농도의 변화를 비교해보면 BOD의 경우에는 계절에 관계없이 하류로 이동하면서 농도가 감소하는 패턴을 보이거나 COD의 경우 측정시점에 따라 농도 변화가 반대로 나타나는 현상도 관찰되었다. 용담호의 수체가 성층화 된 시점에는 상류에서 하류로 가면서 농도가 감소하는 반면 성층현상이 붕괴되어 수체의 혼합이 일어나는 시기에는 역으로 상류에서 하류로 가면서 COD의 농도가 점차 증가하는 패턴을 보인다(Fig. 6). 수심에 따른 농도 변화도 수체의 성층화와 밀접한 관계를 보이는데 성층화가 잘 발달된 시점에는 표층과 심층의 농도차가 크게 나타나지만 겨울에는 그 차이가 미미한 것으로 측정되었다. 이러한 변화양상은 수체의 역전을 통해서 기저의 호수 퇴적물 또는 심층수에 포함되어 있던 물질이 겨울에 수체 상부로 유입되는 내부기원을 나타내는 것으로 생각되며, 영양상태 변화와 이로 인한 조류의 이상증식을 예측하고 방지하기 위해서는 지하수 또는 하부의 퇴적물로부터 유입되는 오염물에 대한 연구가 필요한 것으로 보인다. 이 외에 Lee et al.(2012)은 지류로부터 물 유입량이 감소하는 기간에 표층에서 수체의 흐름이 하류에서 상류로 역전되는 현상을 보고한 바 있으며, 이와 같은 현상이 관찰된 COD 농도변화를 일으켰을 가능성 또한 배제할 수 없다. 성층현상이 잘 관찰되는 9월에 중층(심도 15m)에서 COD의 농도가 증가하는 것은 8월의 집중호우에 의해 하천으로부터 유입된 밀도류의 영향인 것으로 생각된다. 성층현상이 나타나지 않는 기간에도 BOD의 농도가 호수내부로 가면서 감소하는 현상은 비교적 생물학적 분해가 용이한 물질을 측정하는 BOD의



**Fig. 4.** Spatial distributions of average water quality parameters from 10 sampling locations. The error bars are maximum and minimum values measured over the study period in each sampling location. (a) chemical oxygen deman (COD), (b) total nitrogen (T-N), (c) total phosphorus (T-P), (d) chloride (Cl), (e) Secchi depth, and (f) chlorophyll-a concentration.



**Fig. 5.** Temporal distributions of average water quality parameters in each month. The error bars are maximum and minimum values observed from 10 sampling locations in each sampling campaign. (a) chemical oxygen deman (COD), (b) total nitrogen (T-N), (c) total phosphorus (T-P), (d) chloride (Cl), (e) Secchi depth, and (f) chlorophyll-a concentration.

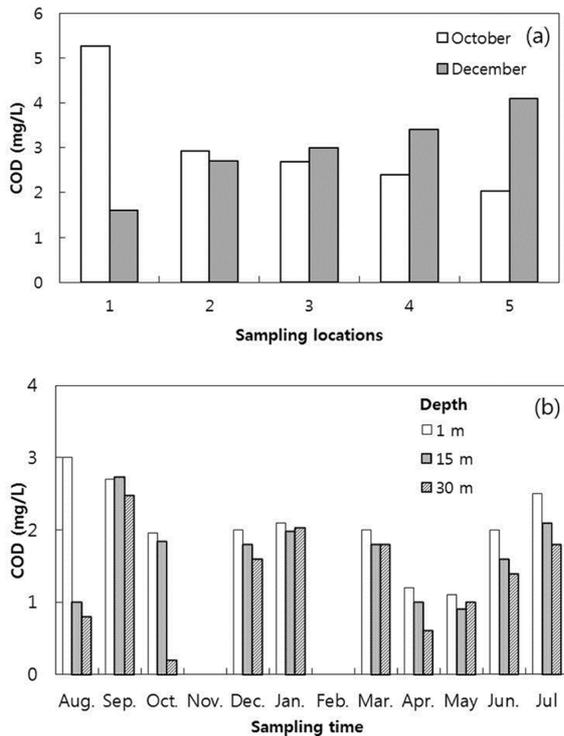


Fig. 6. Chemical oxygen demand (COD) from the reservoir. (a) change in COD concentrations with the flow direction of lake water, (b) temporal distribution of COD concentrations with depth at sampling location 7.

특성에 기인한 것으로 보인다.

Chl-a의 농도는 상대적으로 조류의 활동이 왕성한 8, 9월에 높게 나타나며, 수온이 가장 낮은 3월에 최저값을 보인다. 지점별 농도변화는 1번 지점이 항상 높고 점차 감소하는 양상을 보인다. 하지만 다른 두 하천 유입 지점에서는 농도가 낮게 나타나는데, Heo et al.(2005)는 소유역별 부하량에 대한 연구에서 조류성장의 원인 물질이 될 수 있는 인과 부유물질의 부하량이 금강분류와 정자천, 그리고 진안천에서 정자천과 주자천에 비해 10배 이상으로 나타나는 것을 보고한 바 있다.

총질소와 총인의 농도는 계절별로 뚜렷한 양상을 보이지는 않으나 질소의 경우 하천 유입부의 농도가 상대적으로 높은 특징을 보이며 인의 경우에는 지점에 따른 특별한 농도변화 패턴을 보이지 않는다. 또한, 질소의 경우에는 지점별 측정값의 표준편차가 평균값의 20%를 넘지 않으나 인의 경우에는 50% 이상으로 매우 크게 나타난다. 광합성을 수행하는 조류의 성장은 일반적으로 질소 또는 인의 농도에 의해 제한을 받는다. 해양 조류에 대한 연구를 바탕으로 제안된 레드필드비(Redfield ratio)는 조류를 구성하는 질소와 인의 화학적 비율이 16 : 1이라는 사실을

비탕으로 조류의 성장이 특정 영양성분에 제한받지 않기 위해 필요한 질소와 인의 비율로 제시된 값이다(Redfield, 1958). 담수환경인 호수의 경우에는 T-N/T-P 비율이 17이상이면 인이 조류성장의 제한요소로 작용하고, 10 이하인 경우 질소가 조류성장을 제한하는 것으로 알려져 있다(Forsberg and Ryding, 1980; Hellström, 1996). 본 연구에서 분석된 100개의 시료 중 질소와 인의 비율이 17 이하로 나타난 시료는 5개이며, 단 1개의 시료만이 10이하의 값을 보여 용담호에서 조류성장의 전반적인 제한 영양요소는 인인 것으로 파악되었다.

#### 4.2. 조류의 개체군 변화

조사 기간 중 용담호 식물성 플랑크톤의 분류군별 평균 현존량은 규조류(Diatoms) 53.1%, 남조류(Cyanobacteria) 16.9%, 녹조류(Chlorophyta) 21.8% 등으로, 이 3가지 조류군이 약 92%를 차지하며 조사기간 전체에 걸쳐서 우점하는 것으로 나타났으며, 이 중에서 호수 전체적으로는 규조류의 현존량이 가장 큰 것으로 관찰되었다. 우점 군집 별로 가장 많이 출현하는 종은 규조류는 *Fragilaria crotonensis*, *Cyclotella comensis*, *Asterionella formosa*, *Sydenra ulna* 였으며, 남조류는 *Microcystis aeruginosa*, *Chroococcus minutus*, *Gomphosphaeria lacustris*, *Anacystis incerta*, 녹조류는 *Schroederia serigera*, *Sphaerocystis schroeteri*, *Microspora abbreviata*가 우점종으로 관찰되었다. 본 연구에서 조사한 결과는 Lee et al.(2005)이 보고한 조류분포와 비교할 때 분류군별 분포는 유사하나 각 분류군을 구성하는 우점종에서 차이를 보인다.

호수 전체적인 월별 조류군집 분석 결과, 담수 초기에 발생했던 늦여름에서 초가을(8~10월)에 주로 보고되었던 조류의 이상증식 현상은 발생하지 않았으며, 연구기간 동안 전체 조류 개체수 농도의 변화도 크지 않았다(Fig. 7). 규조류의 경우 상대적으로 온도가 낮은 10월부터 3월 사이의 기간에 현존량이 크게 증가 하였으며, 반대로 남조류의 경우는 수온이 상승하는 여름에 현존량과 전체 조류 개체수에서 차지하는 비율이 증가하였다. 녹조류의 경우는 계절 변화에 따른 개체수의 증감이 규조류와 남조류의 경우처럼 크지는 않았으나 3월에서 5월 사이의 기간에 절대량과 조류 전체 현존량에서 차지하는 비율이 가장 크게 나타났다. 본 연구에서 관찰된 수온변화에 따른 우점 조류군의 변화 양상은 낮은 수온을 선호하는 규조류와 각각 중간 수온과 고온을 선호하는 녹조류와 남조류의 특성을 잘 반영하고 있다(Richardson et al., 2000; Rittmann and McCarty, 2000). 전체 조류 현존량의 월별 분포는 6월에

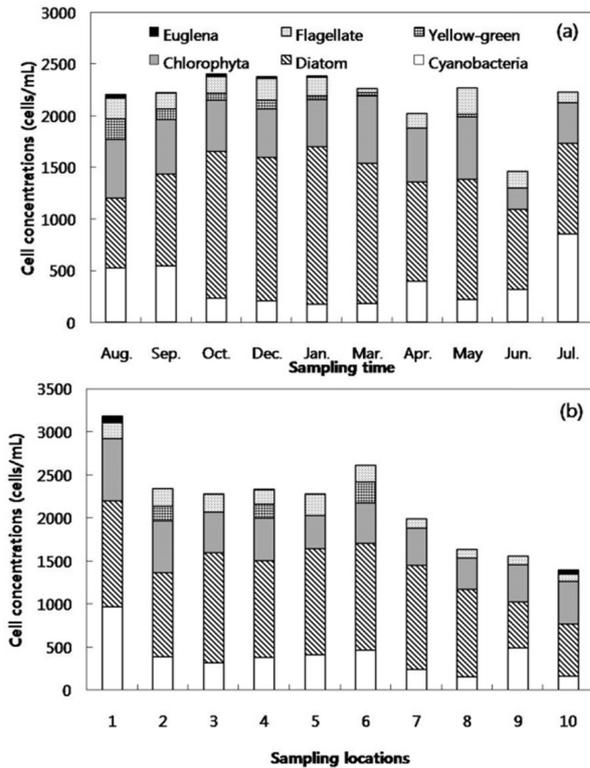


Fig. 7. Distribution of algal taxonomic groups in Yongdam reservoir. (a) temporal and (b) spatial distribution. Temporal and spatial distribution values depicted are average values of data collected in 10 sampling locations and 10 sampling times, respectively.

조류개체수가 급격히 감소하는 특징을 보여주었다. 이와 같은 현상은 봄이 되어 수온이 상승할 때 조류의 개체수 증가가 일어나면 이들을 포식하는 동물성 플랑크톤의 개체수 증가가 수반되어 낮은 봄 또는 이른 여름에 조류농도가 현저히 감소하고 투명도가 증가하는 청수(clear water phase) 현상에 의한 것으로 보인다(Tirok and Gaedke, 2006). 본 연구결과에서는 조류 감소가 주로 녹조류와 규조류 개체수의 급감을 통해서 이루어지는 반면 남조류 개체수는 6월에 증가하는 양상을 지시해주고 있는데, 호수 환경에서 남조류는 다른 조류군에 비해 동물성 플랑크톤에 의한 포식에 대한 저항성이 큰 것으로 알려져 있다(Deneke and Nixdorf, 1999).

연구기간에 수집된 시료의 평균값을 통해 파악한 측정 지점별 조류 군집의 특성을 살펴보면 금강분류와 진안천이 합류되어 들어오는 지점 1에서는 거의 모든 현장조사 시점에서 측정지점 중 가장 높은 조류 개체수 농도를 보였으며, 특징적으로 남조류의 현존량이 가장 높게 나타났다. 남조류의 현존량은 정자천 유입부인 9번 지점에서도

높게 나타났으며 주자천 유입부인 10번 지점에서는 매우 낮은 농도를 보였다. 규조류의 경우는 1번 지점에서 농도가 높게 나타나는 하나, 전반적으로 하천 유입부에서 떨어진 호수 내부지점에서 농도와 비율이 높게 나타났으며, 특히 댐 및 취수탑 인근의 수심이 가장 깊은 지점에서 농도와 비율이 가장 높았다. 이 지역에서는 남조류의 농도 및 비율이 가장 낮게 나타났다. 녹조류의 경우는 지점에 따른 뚜렷한 양상을 보여주지 않고 전반적으로 불규칙한 변화양상을 나타내었다.

조류 분포의 시간적 변화 특성은 조사지점 별로 다르게 나타나는데, 지점 1의 경우는 전체적인 조류의 현존량이 가장 클뿐 아니라 시간에 따른 조류군의 변화도 가장 심하게 나타났다. 1번 지점에서 조사기간 대부분에 걸쳐 규조류가 우점하였으나, 온도가 상승하는 6월부터는 남조류의 개체수가 급증하기 시작하여 7월과 8월에는 전체 조류 개체수의 약 50% 정도를 차지했으며 이는 9월로 접어들면서 다시 급감하는 형태를 보여주었다. 남조류의 비율은 수온이 낮은 3월에는 최저 10% 정도로 감소하였다. 규조류 군집의 변화는 남조류와 반대되는 양상을 보였으며, 10월부터 3월 사이에는 관찰된 조류의 대부분을 차지하였다. 녹조류는 상대적으로 안정적인 분포를 나타내었으나 규조류와 남조류가 정체를 보이는 봄(3~5월)에 높은 현존량을 보였다. 지점 1은 용담호 지류유입부 중 오염 유달량이 가장 크기 때문에 오염물질의 농도가 상대적으로 높고, 수심이 얕아 수온의 변화가 쉽게 일어나는 특징으로 인해 각 조류군의 개체수 변동이 심한 것으로 보인다. 다른 지류인 정자천이 유입되는 지점 9의 경우에는 전체 조류의 현존량은 크지 않지만 남조류의 농도가 지점 1에 이어 두번째로 높게 나타나며 여름에 급격하게 증가하는 양상을 보여준다. 주자천 유입부인 지점 10의 경우에는 전체 조류 및 남조류 현존량이 10개 측정지점 중 가장 낮게 나타나는데, 이는 주자천 유입 지점의 수심이 깊고 주자천 상류에 오염원이 적게 존재하기 때문으로 생각된다. 1번 지점으로부터 호수 내부로 이동하며 전체 조류 현존량과 하절기 급격한 남조류의 증가세가 감소하는 패턴을 보이며 댐과 취수탑 근처의 6, 7, 8번 지점에서는 남조류 농도의 변화는 상대적으로 작으면서 규조류의 농도변화가 월별로 크게 나타나고, 3~5월 사이에 녹조류의 증가가 두드러지게 나타났다.

### 4.3. 통계분석 결과

#### 4.3.1. 상관분석

수질 인자와 조류분포 사이의 상관관계를 파악하기 위하여 Pearson의 상관 분석을 수행하였다(Table 2). 수질인

**Table 2.** Spearman's rank correlation coefficients between environmental parameters and algal populations

	WT	pH	EC	DO	Eh	SD	BOD	COD	TP	TN	NO <sub>3</sub> N	Chla	F	Cl	SO <sub>4</sub>	ST	RF	PHY	CY	BA	CHL	
WT	1.000																					
pH	.528**	1.000																				
EC	.424**	.390**	1.000																			
DO	<b>-0.762**</b>	-.106	-.153	1.000																		
Eh	-.015	-.239*	-.244*	-.198	1.000																	
SD	-.145	-.039	-.259*	.043	-.014	1.000																
BOD	.167	.099	.291**	-.077	-.130	<i>-.611**</i>	1.000															
COD	.208*	.160	.290**	-.198	-.009	<i>-.354**</i>	.236*	1.000														
TP	<i>-.356**</i>	-.034	.096	<i>.562**</i>	.034	-.124	.120	-.168	1.000													
TN	-.142	.004	.065	.150	<i>-.334**</i>	.102	.071	-.193	.255*	1.000												
NO <sub>3</sub> N	-.158	.026	.007	.220*	<i>-.390**</i>	.187	.034	<i>-.414**</i>	<i>.354**</i>	<b>.795**</b>	1.000											
Chla	.201	.042	<i>.301**</i>	-.191	<i>.310**</i>	<i>-.475**</i>	.249*	<i>.387**</i>	.032	-.175	<i>-.336**</i>	1.000										
F	.104	-.086	-.012	-.036	-.056	-.063	.130	-.005	.291**	.121	.118	-.007	1.000									
Cl	<i>.310**</i>	<i>.424**</i>	<i>.441**</i>	-.080	<i>-.384**</i>	.056	.182	-.115	.202	<i>.559**</i>	<i>.653**</i>	-.138	.120	1.000								
SO <sub>4</sub>	<i>.499**</i>	<i>.414**</i>	<i>.325**</i>	<i>-.350**</i>	-.104	-.078	.186	.050	.062	.290**	<i>.347**</i>	.063	.170	<b>.734**</b>	1.000							
ST	<i>-.490**</i>	<i>-.413**</i>	-.130	<i>.277**</i>	-.156	.191	-.071	-.241*	.215*	<i>.398**</i>	<i>.430**</i>	<i>-.328**</i>	.098	-.001	-.216*	1.000						
RF	<b>.771**</b>	.280**	.210*	<b>-.709**</b>	.099	-.117	.193	.062	<i>-.275**</i>	-.040	-.030	.019	.209*	<i>.356**</i>	<i>.544**</i>	<i>-.367**</i>	1.000					
PHY	<i>.387**</i>	.224*	.195	<i>-.279**</i>	-.039	-.125	.091	.130	.015	-.145	-.135	.171	.124	.097	.230*	-.138	.223*	1.000				
CY	<i>.329**</i>	.212*	<i>.364**</i>	-.085	<i>-.288**</i>	<i>-.303**</i>	.283**	.178	.152	.079	-.003	.140	.257*	.233*	.179	-.246*	.267*	.118	1.000			
BA	<i>-.375**</i>	<i>-.320**</i>	.102	.210*	.054	.054	-.177	-.005	.007	-.163	-.186	.079	-.183	-.175	-.230*	.200	<i>-.290**</i>	.003	-.199	1.000		
CHL	<i>-.233*</i>	-.172	.118	<i>.232*</i>	<i>.280**</i>	-.033	.112	-.164	<i>.483**</i>	.026	.072	.187	.140	.027	-.139	.038	-.139	-.027	.015	.129	1.000	

Note) Coefficients higher than 0.7 were shown as bold fonts, and those higher than 0.3 were italicized. ST, irradiation hours; RF, precipitation; PHY, total algal concentration; CY, cyanobacteria; BA, diatoms; CHL, chlorophyte

자들의 상관관계를 살펴보면 질소(총질소, 질산성 질소) 성분은 Cl<sup>-</sup> 및 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>와 유의한 양의 상관성을 가지는 것으로 나타났으며, BOD, COD 및 투명도와는 상관성을 보이지 않거나 유의한 음의 상관관계를 나타낸다. 호수에서 Cl<sup>-</sup>의 유입원은 바다로부터 유입되는 에어로졸, 도로의 제설제 성분 유입, 오폐수 성분 유입 등이 있고, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>도 이와 유사한 기원을 가진다(Thunqvist, 2003). 수체 내에서 염소 이온의 안정성이 높고, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>와 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 또한 용존산소의 농도가 높은 경우 매우 안정하여 생지구화학적 기작에 의한 농도 변화의 가능성이 낮다. 이와 더불어, 세 화합물의 용해도가 매우 높다는 사실에 근거해 볼 때 용담호 내에 존재하는 질소성분은 유역에 존재하는 비점오염원으로부터 용해된 상태로 유출되어 유입되는 것으로 보인다. 인의 경우에는 용존산소와 양의 상관성을, 수온 및 강우량과는 음의 상관관계를 나타낸다. 호수 환경에서 인의 기원은 강우량이 큰 계절에 토양 등에 흡착되어 있는 인이 지표유출을 통해 유입되는 것과 호수 기저 퇴적물에 화학적으로 결합되어 존재하는 인이 수체의 생체화로 인해 호수 심부에서 용존산소의 농도가 낮은 환경이 조성되면 용출된 상태로 수체로 유입되어 심층에 존재하다가 수체의 역전현상이 일어나면 표면근처로 상승하는 것을 생각할 수 있다(Caraco et al., 1993; Nurnberg,

1987). 이미 기술한 바와 같이 인과 양의 상관관계를 가지는 DO의 농도는 수온과 반비례하고, 강우현상 역시 기온이 높은 여름에 집중되기 때문에 표층수에서 인 농도의 증가는 수온이 낮은 시점, 즉 호수 수체의 혼합이 일어나는 시기에 이루어진다고 생각할 수 있다. 그러므로, 수온에 의한 생체화가 잘 이루어져있는 여름에 용존산소 농도가 낮은 심층으로 용출된 인이 수온 하강과 함께 일어나는 수체의 혼합 과정에서 표층으로 유입되는 기작이 용담호의 인 농도에 기여하는 정도가 클 것으로 예상할 수 있으며, 호수 수질관리를 위해서 지하수 또는 기저 퇴적물로부터 유입되는 용출량 파악에 대한 연구가 추가적으로 필요한 것으로 판단된다. BOD와 COD는 투명도와의 음의 상관성을 보이고, COD의 경우는 질산성 질소와 음의 상관성을 보인다. 이는 부유상태, 특히 강우현상이 집중되는 계절에 밀도류의 형태로 유입되는 것이 이들의 농도 변화에 영향을 미치는 것으로 보이나, DO, 강우량, 수온 등과 상관성이 낮은 것은 이전에 기술한 내부기원 물질의 기여 때문일 가능성도 무시할 수 없다. BOD와 COD의 상관성이 낮은 것은 생물학적 분해작용에 대한 저항성의 차이로 호수 내부에 유입 후 나타나는 농도의 차이에 의한 것으로 판단된다.

전체 조류 및 각 조류군의 개체수 농도는 매우 제한적

인 수질인자와 유의한 상관관계를 나타내었다. 전체 조류의 개체수 농도는 수온을 제외한 다른 수질인자와 유의한 상관관계를 보여주지 않으며, 개별 조류군의 경우에는 남조류가 수온과 양의 상관성을, 규조류가 음의 상관성을 유의한 수준에서 보인다. 남조류는 EC와 양의 상관관계를 투명도와 음의 상관관계를 보이지만, 이외의 영양성분과는 유의하지 않은 양의 상관관계를 보이지 않는 것으로 보아 남조류 군집의 변화에 가장 중요한 영향을 미치는 요소는 수온으로 판단된다. 규조류 역시 수온과 유의한 음의 상관관계를 강수량과 유의수준에 근접한 음의 상관관계를 보이는 것으로 판단할 때 역시 수온이 가장 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 녹조류의 경우에는 인 농도와 양의 상관성을 보이는 것을 제외하고는 다른 환경요소와 유의수준의 상관관계를 보이지 않는다. 일반적으로 녹조류와 남조류는 인이 조류성장의 제한요소가 되는 수환경, 즉 인의 농도가 낮을수록 규조류에 비해 경쟁력이 떨어지는 것으로 알려져 있다(Tilman et al., 1986). 그러나, 남조류의 경우에는 규조류와 선호하는 수온 범위의 차이가 크기 때문에 다른 수질환경 요소로 인한 경쟁 압력을 상대적으로 적게 받게 되지만, 녹조류는 같은 온도 조

건에서 규조류와 경쟁할 수 있으므로 제한 영양인자에 대한 압력을 크게 느끼게 된다. 그러므로, 전체적으로 인이 제한요소로 작용하는 용담호에서 녹조류는 상대적으로 인의 농도가 높은 경우에 규조류와 경쟁하며 군집의 성장을 이어갈 수 있는 것으로 보인다.

#### 4.3.2. 주성분 분석

본 연구의 측정자료에 대한 상관분석 결과, 조류군과 대부분의 수질 및 환경인자와의 상관성이 낮게 나타났으며, 이는 전체 조류 개체수 및 각 분류군의 변화를 일으킬 수 있는 인자들이 복합적으로 작용하기 때문인 것으로 보인다. 그러므로, 조류 변화를 호수환경 변화를 초래하는 수질 및 기상 기작을 바탕으로 파악하는 것이 중요한 것으로 판단되어 주성분 분석을 수행하였고, 이를 통해 6개의 주요인이 추출되었다. 전체자료 분산에 대한 기여율은 요인1이 21.2%, 요인2 17.0%, 요인3 11.3%, 요인4 8.4%, 요인5 6.1%, 요인6이 5.8%로 총 70.0%의 설명력을 가지는 것으로 나타났다(Table 3).

요인 1은  $\text{NO}_3\text{-N}$ , T-N, Cl<sup>-</sup>,  $\text{SO}_4^{2-}$ 과 강한 상관성을 보이고 COD와 유의한 음의 상관성을 나타내는 것으로

**Table 3.** Loadings of principal components rotated by varimax method

	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
$\text{NO}_3\text{N}$	<b>.884</b>	-.120	-.181	.164	-.012	-.112
Cl	<b>.864</b>	.117	.047	.119	.232	.192
TN	<b>.840</b>	-.127	.126	-.010	.021	-.246
$\text{SO}_4$	<b>.609</b>	.385	.326	-.057	.063	.285
RF	.101	<b>.857</b>	.078	-.133	.020	.244
ST	.107	<b>-.843</b>	-.108	.046	-.158	-.030
DO	.026	<b>-.629</b>	-.110	.552	.221	-.322
BA	.018	<b>-.603</b>	.027	-.108	-.252	.259
WT	.022	<b>.505</b>	.120	-.487	.143	.481
SD	-.128	-.021	<b>-.880</b>	-.061	-.046	-.064
Chla	-.160	.222	<b>.723</b>	.188	-.184	.098
BOD	.141	.044	<b>.702</b>	.027	.064	.073
COD	-.358	.007	<b>.564</b>	-.290	.208	-.177
EC	.138	-.033	<b>.545</b>	.133	.361	.474
TP	.245	-.212	.107	<b>.811</b>	.043	-.067
CHL	.003	.030	.091	<b>.751</b>	-.141	.109
pH	.039	.265	.019	-.058	<b>.833</b>	.111
Eh	-.392	.355	-.113	.346	<b>-.598</b>	-.156
CY	.126	.203	.404	.032	<b>.442</b>	-.017
PHY	-.067	.153	.058	.013	.083	<b>.796</b>
Eigenvalue	4.455	3.580	2.371	1.769	1.276	1.181
Percentage variance explained	21.216	17.046	11.289	8.425	6.076	5.824
Cumulative percentage variance explained	21.216	38.263	49.552	57.977	64.054	69.977

Note) The highest loading values among 6 parameters were shown as bold. Loadings higher than 0.3 were italicized.

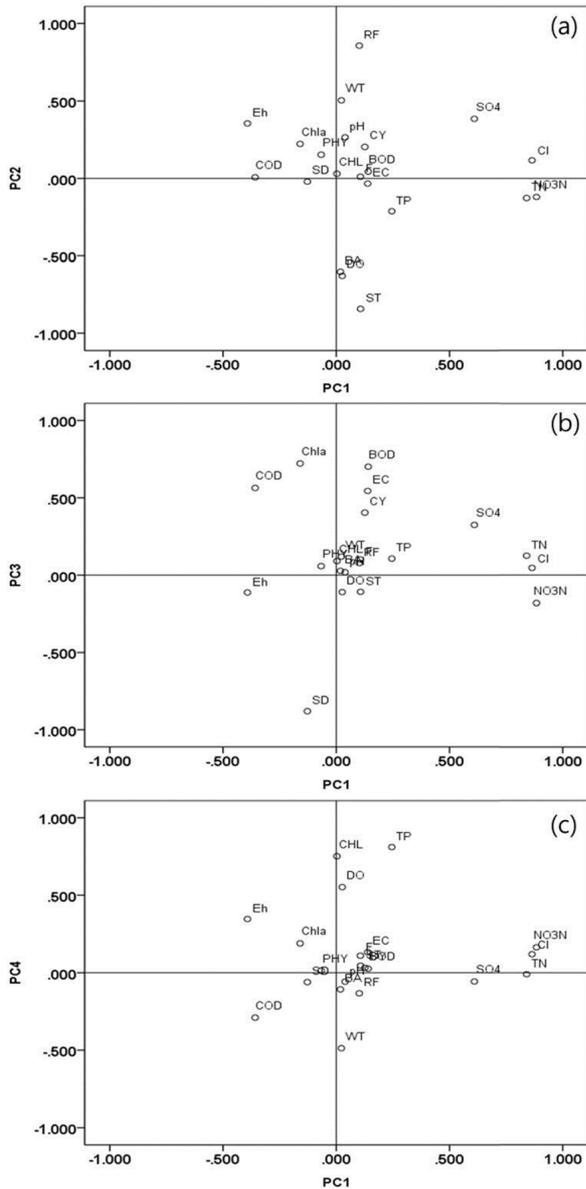


Fig. 8. Principal component (PC) loading plots (a) PC2 versus PC1, (b) PC3 versus PC1 and (c) PC4 versus PC1.

판단해 볼 때 유역 비점오염원으로부터 용존상태로 유출되어 호수로 유입되는 오염물질이 전체적인 호수의 물리화학적 성질을 변화시키는 기작으로 판단된다(Fig. 8). 요인 1과 조류 군집의 상관성을 보면 녹조류와 남조류, 규조류 및 전체조류 농도 모두 요인 1과의 상관관계가 미미한 것으로 나타났으며, 이는 호수환경이 전반적으로 질소에 대해 제한되지 않아서 호수 내 질소의 함량을 높이는 과정이 조류 성장에 미치는 영향이 약하기 때문인 것으로 보인다.

요인 2는 강수량과 수온과 강한 양의 상관관계를 보이

고, 일조시간과 용존산소, 그리고 규조류 농도와는 음의 상관성을 보인다. 용담호 유역에서 강수량은 수온이 높은 여름에 집중되기 때문에 두 인자가 양의 상관성을 보이는 것으로 판단되며, 일조시간은 강우현상이 집중되는 장마철에 짧게 나타나기 때문에 음의 상관성을 보이는 것으로 보인다. 이는 요인 2가 기상 변화에 따른 호수의 물리적 특성의 변화를 나타내는 것으로 보이며, 규조류가 상당한 음의 상관관계를 가지는 것은 온도의 증가하면서 규조류보다는 다른 조류군집의 성장에 적절한 환경이 조성되기 때문인 것으로 판단된다. 반면, 남조류는 유의하지 않은 양의 상관관계를 갖는데, 이는 연구기간 중 남조류 군집의 성장이 수심이 얇은 지류 유입부에 집중되었고, 수심이 깊은 호수 내부, 특히 댐 주변의 수체에서는 변화양상이 크지 않았기 때문인 것으로 판단되는데, 호수 내부에서는 수심의 증가와 함께 수체 체적의 증가가 이루어져 기상변화에 따른 전체적인 수체의 물리적 상태변화가 완화된다고 생각된다.

요인 3은 투명도와 음의 상관관계를 가지고 BOD, COD와는 양의 상관관계를 보인다. 이 외에도 EC와 양의 상관관계를 가지는데, 호수에서 EC 값을 증가시키는 인자로는 주변암(특히 석회암이 있는 경우)과 호수면적에 비해 유역면적이 큰 조건이 있으며, 하수와 같은 지표기원 오염물질 유입 등도 중요한 요소가 된다(Michaud, 1991). 이를 통해서 판단해 보았을 때 요인 3은 부유상태의 오염물질 유입과 관련이 있는 것으로 보인다. 요인 4는 총인과 녹조류와 강한 양의 상관관계를 보이고 DO와 수온과 각각 유의한 수준에서 양과 음의 상관성을 보이는 것으로 보아, 이전에 기술한 수체의 혼합으로 인해 침층수에 포함된 인이 상승하여 녹조류의 성장을 촉진시키는 과정으로 판단된다. 요인 5와 요인 6은 수질인자와 조류군의 상관성 파악을 위해 모든 환경인자와 조류지표를 분석에 투입한 결과 형성된 것으로 보이며 조류군집에 영향을 미치는 기작이기 보다 조류성장에 의해 초래되는 수체환경의 변화를 나타내는 것으로 판단된다.

#### 4.3.3. 군집분석

수질항목을 바탕으로 수행한 군집분석 결과는 호수 수질이 지류의 유입에 의해 영향을 받는 부분과 호수 내부의 수심이 깊은 부분으로 나누어지는 것을 지시한다(Fig. 9). 금강분류와 진안천이 유입되는 지점 1은 인접 하류에 위치한 지점 2와 유사성을 보이나, 지점 2의 하류에 존재하는 지점 3은 정자천 유입부인 지점 9와 유사성을 보인다. 이들 4개 지점은 호수의 다른 부분에 대해서 상대적

으로 유사한 특성을 보이는데, 이는 얇은 수심과 더불어 유입지류가 수질에 중요한 영향을 미치는 지역으로 판단된다. 반면 호수 내부의 수심이 깊은 지역인 지점 4, 5, 6, 7은 지류의 영향에서 벗어나 호수 본류의 특성을 나타내는 것으로 판단된다. 단, 지점 8은 수심이 깊은 호수 하류에 존재하지만 주사천 유입부에 인접하여 지류의 영

향을 일정부분 받는 것으로 판단된다. 용담호 호수 수질이 지류의 영향을 받는 지점과 호수 내부 지점으로 분류되는 것은 2005년과 2006년에 실시된 연구결과(Lee and Kwon, 2009)와 유사하나, 각 지점의 상대적인 유사성은 차이를 보이는데 이는 기상조건의 변화에 따른 물 유입량의 변화 등으로 초래되는 것으로 판단되며 2005년과 2006년 사이에도 차이를 보이는 것이 보고된 바 있다.

조류자료를 바탕으로 수행한 군집분석 결과는 수질자료를 사용한 결과와 매우 유사하게 나타났다. 수질 및 조류 자료에 근거한 측정지점의 유사성에 따라 10개 측정지점을 4개의 그룹으로 나누어 수체 특성의 변화에 따른 조류 군집의 반응을 파악해보면, 상류 지역인 지점 1, 2와 지점 3, 9의 경우 환경조건 변화에 따른 조류의 변화가 민감하게 나타나는 반면, 호수 내부인 지점 4-7에서는 조류 군집이 환경조건 변화에 둔감하게 반응하는 것으로 나타난다(Fig. 10). 이와 같은 민감도의 차이를 초래하는 요소에 대한 추가적인 연구가 필요하나, 현 시점에서 수질상태 파악을 위해 조류 시료채취지점 선정에 참고할 필요가 있는 것으로 판단된다.

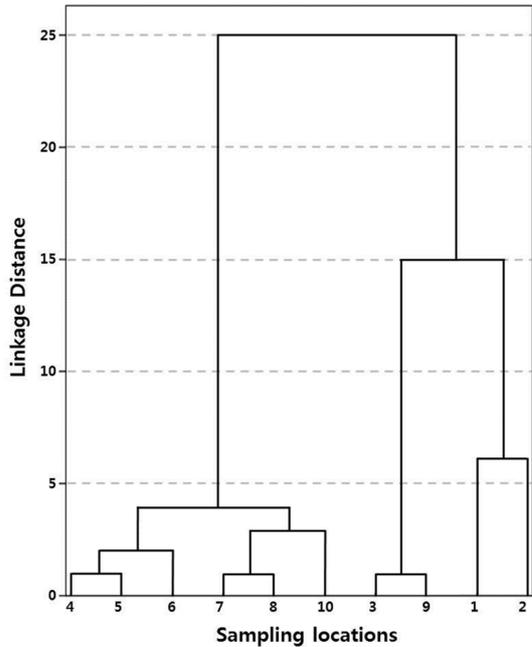


Fig. 9. Dendrogram from hierarchical cluster analysis.

### 5. 결 론

용담호의 수질 및 환경인자에 대한 분석결과 용담호 수체의 물리 화학적 특성은 기후요소의 변화로 인한 수체의 성층화에 영향을 크게 받는 것으로 나타났으며, 전반적으

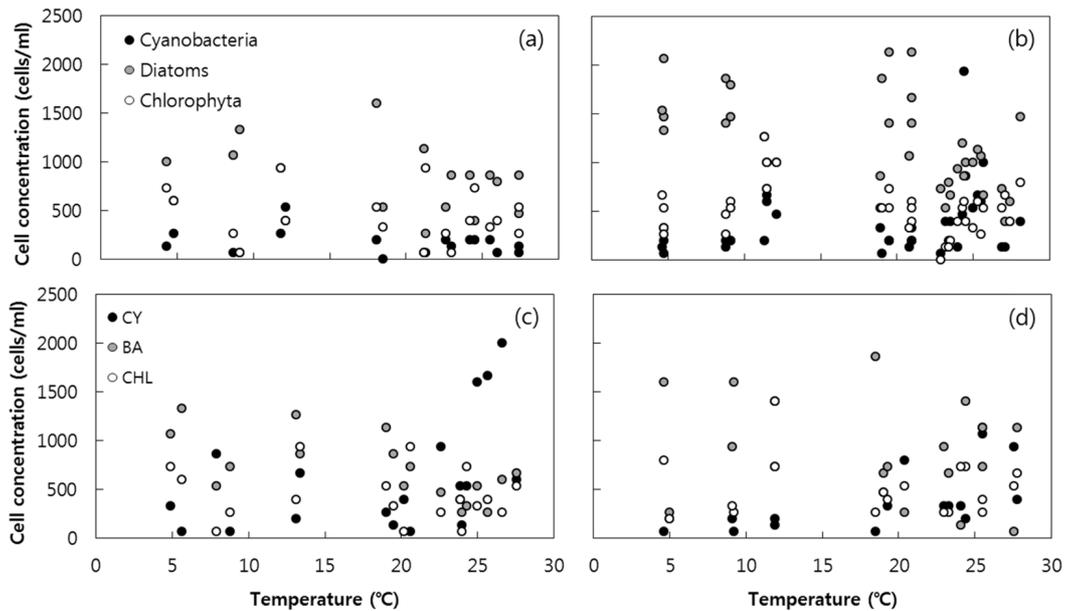


Fig. 10. Change in algal cell concentrations with water temperature in each group identified from hierarchical cluster analysis. (a) sampling locations 8, 10, (b) sampling locations 4, 5, 6, 7, (c) sampling locations 1, 2, and (d) sampling location 3, 9.

로 인이 제한요소로 작용하는 상태인 것으로 드러났다.

용담호 내에 존재하는 조류는 연구기간 전체에 걸쳐서 규조류, 녹조류, 남조류의 3개 분류군이 전체 조류 개체수의 약 92%를 차지하며 우점하는 것으로 파악 되었으며, 남조류는 여름에 규조류는 겨울에 우점하는 것으로 나타났고 녹조류의 경우는 상대적으로 안정적인 농도를 보였으나 우점하지는 못하고 3~5월 사이에 증가세를 나타내었다. 남조류 군집의 변화는 호수 지류 유입부에서 크게 나타났으며 이는 호수 내부로 갈수록 완화되는 추세를 보였다.

조류군집의 변화를 일으키는 수질 및 환경 요소로는 남조류와 규조류의 경우는 수온이 개체수 증감을 일으키는 가장 중요한 요소로 확인 되었으며, 녹조류의 경우에는 인 농도변화가 가장 중요한 요소로 파악되었다. 이는 호수 수체에서 인이 조류성장의 제한요소로 작용하기 때문인 것으로 보이며, 남조류와 규조류는 선호하는 수온의 범위가 다르기 때문에 영양요소로 인한 경쟁압력을 적게 받는 것으로 파악된다. 호수 내부의 인 농도는 수체의 혼합과정에서 지하수, 또는 기저 퇴적물로부터의 유입에 의해 영향을 받을 가능성이 높은 것으로 파악되어, 이를 정량화하여 수질관리에 사용할 수 있는 연구의 수행이 필요한 것으로 판단된다.

## 사 사

본 연구과제는 2015년도 환경부지정 전북녹색환경지원센터의 연구비지원에 의해 수행한 연구과제입니다.

## References

- Caraco, N.F., Cole, J.J., and Likens, G.E., 1993, Sulfate control of phosphorus availability in lakes, *Hydrobiologia*, **253**, 275-280.
- Cho, W., Yum, K., Kim, J., Jin, B., and Chung, S., 2012, Study on algae occurrence in Daecheong reservoir, *Environmental Impact Assessment*, **21**, 367-380.
- Deneke, R. and Nixdorf, B., 1999, On the occurrence of clear-water phases in relation to shallowness and trophic state: a comparative study, *Hydrobiologia*, **408/409**, 251-262.
- Forsberg, C. and Ryding, S.O., 1980, Eutrophication parameters and trophic state indices in 30 Swedish waste-receiving lakes, *Arch. Hydrobiol.*, **89**, 189-207.
- Hellström, T., 1996, An empirical study of nitrogen dynamics in lakes, *Water Environ. Res.*, **68**, 55-65.
- Heo, W., Kwon, S., Kim, Y., Yih, W., and Kim, B., Phosphorus and suspended solid loading in lake Yongdam, *Korean J. Limnol.*, **38**, 322-333.
- Lee, K., Kim, B., Park, K., Chae, S., Yu, D., Kang, K., Kang, I., Yu, J., and Baek, W., 2005, A study on algae properties of the Lake Yongdam, Jeollabukdo Institute of Health and Environment Research Report, 121 p.
- Lee, Y. and Kwon, S., 2009, A study on measuring the similarity among sampling sites in lake Yongdam with water quality data using multivariate techniques, *Environmental Impact Assessment*, **18**, 401-409.
- Lee, Y., Koh, D., Chae, H., and Han, H., 2012, Observation of reservoir current using drifter (The case study of Yongdam reservoir), *Korean J. Limnol.*, **45**, 200-209.
- Kim, T., 2006, Variational characteristics of nutrient loading in inflow streams of the Yongdam reservoir using flow-loading equation, *Environmental Impact Assessment*, **15**, 129-138.
- Kwon, Y., Han, S., and Lee, J., 2002, Bhatnagar, M. and Ajmer, A.B., 2000, Algal and cyanobacterial response to fluoride, *Fuoride*, **33**, 55-65.
- K-water, 2000, Report on water quality management for Yongdam multipurpose dam construction project, 17 p.
- Michaud, J.P., 1991, A citizen's guide to understanding and monitoring lakes and streams. Publ. #94-149. Washington State Dept. of Ecology, Publications Office, Olympia, WA.
- Nurnberg, G.K., 1987, A comparison of internal phosphorus loads in lakes with anoxic hypolimnia: Laboratory incubation hypolimnetic phosphorus accumulation, *Limnol. Oceanogr.*, **32**, 1160-1164.
- Park, J., Kim, Y., Heo, W., Kim, B., and Yih, W., 2006, Bloom-forming cyanobacteria in Yongdam lake (1) Nutrient limitation in a laboratory strain of a nitrogen-fixing cyanobacterium, *Anabaena spiroides* v. *crassa*, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, **11**, 158-164.
- Park, J., Park, J., Kim, J., and Shin, J., 2005, Spatial and temporal variations of environmental factors and phytoplankton community in Andong reservoir, *Korea, Algae*, **20**, 333-343.
- Redfield, A.C., 1958, The biological control of chemical factors in the environment, *Am. Sci.*, **46**, 205-221.
- Richardson, T.L., Gibson, C.E., and Heaney, S.I., 2000, Temperature, growth and seasonal succession of phytoplankton in Lake Baikal, Siberia, *Freshwater Biology*, **44**, 431-440.
- Rittmann, B.E. and McCarty, P.L., 2000, Environmental Biotechnology, McGraw-Hill. P.754.
- Suk, H. and Lee, K., 1999, Characterization of a ground water hydrochemical system through multivariate analysis: clustering into ground water zones, *Ground Water*, **37**, 358-366.

- Thunqvist, E.L., 2003, Increased chloride concentration in lake due to deicing salt application, *Water Sci. Technol.*, **48**, 51-59.
- Thyne, G., Güler, C., and Poeter, E., 2004, Sequential analysis of hydrochemical data for watershed characterization, *Ground Water*, **42**, 711-723.
- Tilman, D., Kiesling, R., Sterner, R., Kilham S.S., and Johnson, F.A., 1986, Green, bluegreen and diatom algae: Taxonomic differences in competitive ability for phosphorus, silicon and nitrogen, *Arch. Hydrobiol.*, **106**, 473-485.
- Tirok, K. and Gaedke, U., 2006, Spring weather determines the relative importance of ciliates, rotifers and crustaceans for the initiation of the clear-water phase in a large deep lake, *J. Plankton Res.*, **28**, 361-373.
- Yu, S., Chae, M., Hwang, J., Lee, J., Park, J., and Choi, T., 2005, Analysis of trophic state variation in lake Yongdam in dam construction, *J. Korean. Soc. Water Qual.*, **21**, 360-367.