

## SOM을 이용한 전남 호소의 식물플랑크톤 군집과 수질 관계 분석

조현진<sup>1</sup> · 나정은<sup>1</sup> · 정명화<sup>2</sup> · 이학영<sup>2,\*</sup>

전남대학교 자연과학대학 생물과학·생명기술학과, <sup>1</sup>국립환경과학원 영산강물환경연구소,  
<sup>2</sup>전남대학교 자연과학대학 생물학과

### Relationship between Phytoplankton Community and Water Quality in Lakes in Jeonnam using SOM.

Cho, Hyeon Jin (0000-0003-0591-519X), Jeong Eun Na<sup>1</sup> (0000-0002-7571-5612), Myoung Hwa Jung<sup>2</sup> (0000-0001-9419-2880) and Hak Young Lee<sup>2,\*</sup> (0000-0001-8561-7568) (Department of Biological Sciences and Biotechnology, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea; <sup>1</sup>Yeongsan River Environmental Research Center, Gwangju 61011, Republic of Korea; <sup>2</sup>Department of Biological Sciences, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

**Abstract** In this study, we analyzed the relationship between phytoplankton community and physicochemical factors in 12 lakes located in Jeollanam-do based on the data surveyed from March to November 2014. Totally, 297 species of phytoplankton were identified including 98 Bacillariophyceae, 148 Chlorophyceae, 23 Cyanophyceae and 28 other phytoplankton taxa. The standing crops ranged from 124 to 59,148 cells mL<sup>-1</sup> and showed the highest in August with the increase of Cyanophyceae cells. The self-organizing map (SOM) was optimized into 9 × 6 grid and was classified into 5 clusters based on the similarity of environmental factors and phytoplankton indices. The SOM results showed that phytoplankton communities had positive relationship with water temperature, SS, DO, BOD, TP and Chl-*a*, whereas low relationship with pH, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P and Conductivity. In Pearson's correlation coefficient, relationship between environmental factors and phytoplankton communities showed similar results with SOM.

**Key words:** phytoplankton, lakes, self-organizing map (SOM), Pearson's correlation coefficient

## 서 론

강우가 하계에 집중되는 뚜렷한 기후적 특성과 국토의 대부분이 산지로 구성되어 있는 지형적 특성에 의해 우리나라는 수자원확보가 매우 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해 강의 상류와 중류, 그리고 하구에 약 18,000 여개의 크고 작은 호소를 조성하였다(Hwang *et al.*, 2003). 이

러한 호수나 저수지와 같은 정수계는 폐쇄적인 특징으로 인해 영양염류를 포함한 많은 오염원이 비교적 단기간에 축적되어 부영양화가 손쉽게 이루어지고(Wetzel, 1999), 이에 따른 빈번한 식물플랑크톤 대량 증식을 야기하게 된다(Smith, 2003). 전라남도에 위치하고 있는 호소들은 과거부터 집약적 농업의 영향을 크게 받아왔고 20세기 후반부터 급격하게 진행된 도시화로 인해 수생태계의 환경교란이 심각하게 이루어지면서 해당 수계 내 식물플랑크톤 군집에 큰 변화와 영향을 가져왔는데(Shin *et al.*, 2003), 특히 이들 호소에서 빈번하게 발생하는 식물플랑크톤의 대량 증식은 이취미 발생과 독성 물질에 의한 직접적 피해,

Manuscript received 15 February 2017, revised 17 March 2017, revision accepted 20 March 2017  
\* Corresponding author: Tel: +82-62-530-3401, Fax: +82-62-530-3409, E-mail: haklee@jnu.ac.kr

산소 고갈에 따른 생물상 변화 및 어류 폐사, 정수처리 비용 증가와 같은 많은 문제를 야기하게 된다(Kiviranta *et al.*, 1992; Wetzel, 1999; Smith, 2003).

식물플랑크톤은 수생태계의 에너지 흐름에 중요한 요소이고 수계의 환경변화에 민감하게 반응하므로 이들의 동태 분석을 통해 수계의 상태를 해석할 수 있고 건강한 수생태계를 지향하기 위한 방향을 결정할 수 있다(Parmer, 1977; Wetzel, 1999). 하지만 식물플랑크톤의 증식은 많은 이화학적 인자, 수생생물들과의 상호 관계들을 포함한 복합적 요인에 의해 조절되므로(Reynolds *et al.*, 1983; Sommer *et al.*, 1986) 이러한 다양한 요인들의 동시적이고 복합적인 분석은 수자원의 효율적 이용에 필수적이다(Park *et al.*, 2014).

호소들에서 다양한 환경인자들과 식물플랑크톤의 군집간의 상호관계에 대한 해석이 있었으나(Lee, 1994; Lee and Song, 1995; Na *et al.*, 2011, 2012), 이들 연구는 일부 호소만을 대상으로 수행되었거나 제한적인 요인들을 이용한 단편적인 상관관계 분석만 이루어져 폭넓고 포괄적인 해석이 불가능하였다. 다양한 요인에 지배되는 현상의 종합적인 분석에는 self-organizing map (SOM) 분석이 유력하다. SOM 분석은 비선형 분석기법으로 고차원 자료를 저차원으로 간단하게 나타낼 수 있고 특히 방대한 자료의 군집화와 시각화에 매우 용이하여 생태학에서 널리 이용되고 있는 분석으로(Kohonen, 2001), 남조류 대발생의 특성 분석(Joo and Jeong, 2005; Oh *et al.*, 2007), 규조류 분포 특성과 이들을 이용한 생물학적 지수와 관련된 연구(Gevrey *et al.*, 2004; Park *et al.*, 2006; Tison *et al.*, 2007; Rimet *et al.*, 2009)에서 매우 유용하게 이용되었다.

본 연구에서는 전라남도에 위치한 12개의 호소를 대상으로 다양한 환경요인과 식물플랑크톤 군집간의 관계를 SOM 분석을 통해 유형화하여 식물플랑크톤의 시공간적 분포 특징과 식물플랑크톤의 군집 변화에 영향을 미치는 요인을 알아보려고 하였다.

## 재료 및 방법

### 1. 조사정점 및 조사기간

본 연구는 전라남도 내에 위치하고 있는 호소 12개를 대상으로 2014년 3월부터 2014년 11월까지 연 4회에 걸쳐 분기조사를 시행하였다. 대상 호소는 Fig. 1에 제시하였고, 호소별 조사정점은 호소 내 취수구, 유입하천과 호소의 규모 등을 고려하여 2~3개 지점을 선택하여 총 28개 지점을

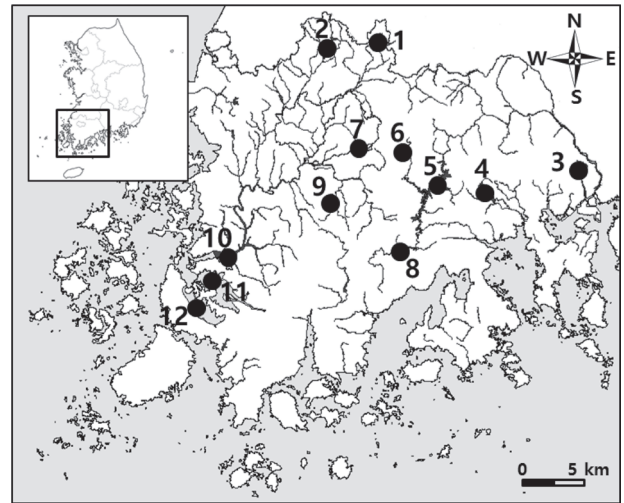


Fig. 1. The study lakes in Jeonnam. 1. Damyang, 2. Jangseong, 3. Sueo, 4. Sangsa, 5. Juam, 6. Dongbok, 7. Gwangju, 8. Boseong, 9. Naju, 10. Yeongsan, 11. Yeongam and 12. Gumho

조사하였다.

### 2. 이화학적 요인 및 식물플랑크톤 조사

이화학적 요인 중 수온, 수소이온농도 (pH), 용존산소 (DO), 전기전도도는 다항목 현장측정기 (Hydrolap DS5, USA)를 이용하여 현장에서 측정하였고, 생물학적산소요구량 (BOD), 총부유물질 (SS), 총질소 (TN), 암모니아성 질소 (NH<sub>3</sub>-N), 질산성 질소 (NO<sub>3</sub>-N), 총인 (TP), 인산염인 (PO<sub>4</sub>-P)과 Chlorophyll-*a*는 현장에서 원수를 채수한 후 실험실로 운반하여 공정시험법 (APHA, 2001)에 따라 분석하였다.

식물플랑크톤 채집은 각 지점별로 표층하 50 cm의 현장수를 채수한 뒤 현장에서 포르말린을 이용하여 고정한 후 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 고정한 시료는 1L 폴리에틸렌병으로 옮긴 후 24시간 이상 암소에 정치하여 침전시킨 뒤 사이폰을 이용하여 상등액을 제거하는 방법으로 농축시료를 제작하였다. 제거된 상등액과 남은 농축시료는 mass cylinder를 이용하여 각각의 양을 측정된 뒤 농축계수를 산정하였고 농축시료를 잘 교반하여 광학현미경하 200~1,000배의 배율로 관찰하여 종 동정 및 종별 세포수를 계수하였다.

### 3. Self-Organizing Map

식물플랑크톤 군집의 분포 특성을 확인하고 유형화하기 위해 비지도학습 신경회로망의 일종인 Self-Organizing Map (SOM)을 통한 패턴분석을 하였다. 최적화된 SOM 모

형을 구하는 공식은 없으나, 다양한 SOM 모형을 구축한 후 quantization error (QE) 및 topographic error (TE)의 두 항목이 최소값을 보이는 모형을 선택하는 것이 주로 이용되고 있다 (Park *et al.*, 2003). 하지만 QE의 경우 일반적으로 모형의 격자가 클수록 그 값이 점차 감소하는 경향을 보여 (Pözlbauer, 2004), 본 연구에서는 경험식 ( $5\sqrt{n}$ )을 통해 최적화된 격자를 구축한 뒤 (Vesanto and Alhoniemi, 2000), 구축된 모형의 해상도와 위상의 적합도를 확인하기 위해 QE와 TE의 값을 이용하였다 (Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003). 이후 Euclidean distance를 이용한 Ward linkage 방법에 따라 유사한 node들 간 적합한 클러스터를 형성하도록 계층적 군집분석을 시행한 후, multi-response permutation procedure (MRPP)를 이용하여 형성된 클러스터 간의 유의성을 확인하였다. 분석에 이용된 식물플랑크톤 군집 자료는 변이를 줄이기 위하여 log 변환을 시행하였고, log 값이 0이 되는 것을 방지하기 위하여 각 변수에 1을 더하여 계산하였다. SOM 분석은 Matlab (Ver. 6.1) 환경에서 SOM toolbox (Helsinki University of Technology, Helsinki)를 이용하였고, MRPP는 PC-ORD (ver. 6)을 이용하여 분석하였다.

4. 통계 분석

SOM 분석을 통해 형성된 클러스터 간의 차이를 비교하기 위하여 비모수 검정인 Kruskal-Wallis (K-W) 검정을 시행하였고, 사후검정으로 Dunn's multiple comparison (Dunn) 검정을 실시하였다. 또한 환경인자와 식물플랑크톤 군집 간의 상관성 정도를 확인하기 위하여 Pearson's correlation coefficient를 산출하였다. K-W 검정 및 Dunn 검정은 Statistica (Ver. 7)을 이용하였고, 상관분석은 SPSS (IBM SPSS Statistics 21)을 이용하여 실시하였다.

결 과

1. 식물플랑크톤 분포 특성

본 연구에서 조사된 식물플랑크톤의 시기별, 지점별 출현종수 및 개체수는 Figs. 2, 3과 같다. 출현한 식물플랑크톤은 총 297종으로 규조류 98종, 녹조류 148종, 남조류 23종, 그 외 와편모조류를 포함한 기타조류 28종이 확인되었다. 시기별 총 출현종은 3월 116종, 6월 163종, 8월 162종, 11월 169종이었고, 시기별 평균 출현종수는 3월에 21종, 6월에 18종, 8월에 26종, 11월에 29종으로 나타났다. 분류군별 출현종수는 규조류의 경우 3월에서 8월로 갈수록 점차 감소하다 11월로 접어들면서 증가하였고, 녹조류, 남조류

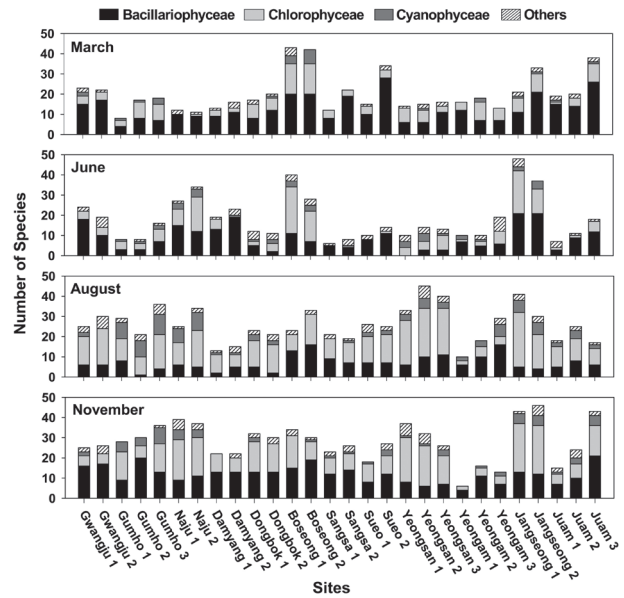


Fig. 2. Spatial and temporal differences in the number of species in each site during study period.

와 기타조류는 3월과 11월에 비해 6월과 8월에 높은 출현종수를 보였다. 지점별로는 장성호와 보성호에서 다른 지점에 비해 종 다양도가 다소 높았고, 동북호, 상사호와 같은 상수원 보호구역에서는 출현종수가 다소 낮았다. 또한 영산호와 금호호의 경우 3월과 6월에 비해 8월과 11월의 출현종수가 급격하게 증가하는 것으로 확인되었다.

출현한 식물플랑크톤의 개체수는 124~59,148 cells mL<sup>-1</sup>의 범위로 조사지점이나 시기별로 차이를 보였으나, 8월과 11월 조사의 일부 지점을 제외하고 대부분 5,000 cells mL<sup>-1</sup> 이하의 개체수를 나타냈다 (Fig. 3). 시기별 평균 개체수는 3월 3,443 cells mL<sup>-1</sup>, 6월 4,055 cells mL<sup>-1</sup>, 8월 11,763 cells mL<sup>-1</sup>, 11월 4,614 cells mL<sup>-1</sup>로 3월에서 8월로 갈수록 점차 증가한 후 11월에 감소하는 패턴을 보였다. 특히 동북호, 장성호와 금호호의 경우 6월에 비해 8월에 개체수가 큰 폭으로 증가한 후 11월에 급감하는 것으로 조사되었고, 종수와 마찬가지로 상수원 보호구역에 위치한 호소에서는 시기별 개체수의 변화가 큰 차이를 보이지 않았다.

개체수로 분석한 분류군별 상대풍부도 역시 계절에 따른 변화양상을 잘 나타내었는데, 대부분의 지점에서 3월에 규조류가 높은 상대밀도를 보이다 6월과 8월로 접어들면서 점차 녹조류와 남조류의 상대밀도가 증가한 후 11월에 다시 규조류가 증가하는 전형적인 온대지역의 식물플랑크톤 천이 양상을 보였다 (Fig. 4). 금호호와 나주호, 영암호, 장성호와 같은 호소에서는 계절이 여름으로 진행되면서 남조류의 상대밀도가 크게 증가하였고, 특히 금호호와

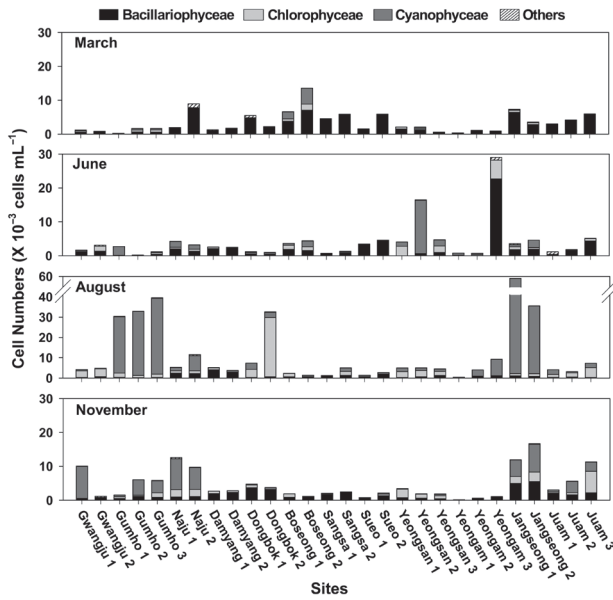


Fig. 3. Spatial and temporal differences in the cell numbers in each site during study period.

장성호에서는 8월 조사에서 남조류의 상대밀도가 90% 이상으로 매우 높은 우점정도를 보였다. 광주호와 동북호, 영산호, 주암호에서는 수온이 증가하는 6월과 8월에 다른 분류군에 비해 녹조류의 상대밀도가 다소 높게 증가하는 경향을 보였고, 와편모조류와 유글레나조류를 포함한 기타조류는 조사기간 동안 대부분의 지점에서 다른 분류군에 다소 낮은 상대밀도를 나타냈다.

2. Self-Organizing Map 및 통계 분석

식물플랑크톤 군집을 이용한 SOM 분석 결과 9×6 격자에서 최적화되었고, 이때 확인된 QE와 TE는 각각 0.962와 0.000으로 확인되었다. SOM 분석 결과를 이용한 계층적 군집분석을 통해 5개의 그룹으로 분류하였고(Fig. 5), MRPP 분석 결과 이들 그룹들 간에는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다(A=0.361, p<0.01).

SOM 분석을 통한 식물플랑크톤 군집의 클러스터 간 차이를 확인한 결과, 모든 분류군에서 종수와 개체수의 그래프 양상은 유사한 것으로 나타났다(Fig. 6), 규조류를 제외한 모든 종수 및 개체수에서 클러스터별 유의한 차이를 보였다(K-W 검정, p<0.05). 규조류는 클러스터별 유의한 차이를 나타내지는 않았지만 3번 클러스터에서 종수나 개체수가 높은 수준을 보였고, 2번 클러스터에서 낮게 나타났으나 클러스터별 차이는 크지 않았다. 녹조류의 군집은 2번 클러스터에서 높고, 1번과 3번 클러스터에서 낮은 값을

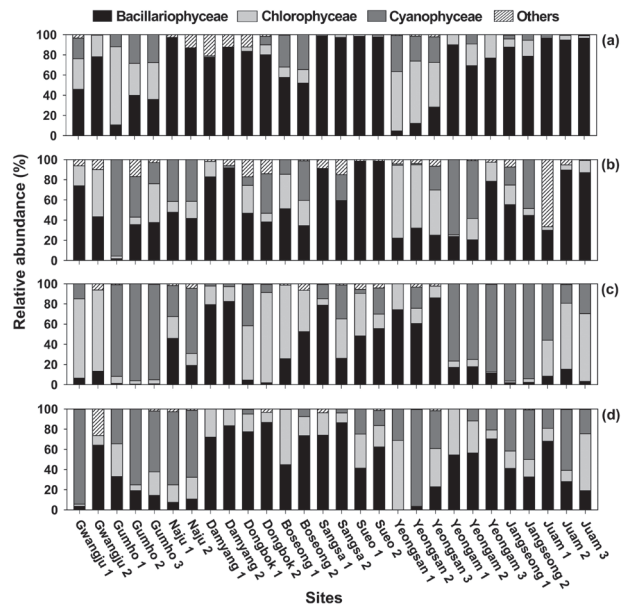


Fig. 4. Variations of the relative abundance in each site during study period. (a) March, (b) June, (c) August, (d) November

나타냈고(Dunn 검정, p<0.01), 남조류의 경우 2번과 5번 클러스터에서 높고, 3번 클러스터에서 낮은 수준을 보였다(Dunn 검정, p<0.01). 와편모조류와 유글레나조류가 포함된 기타조류의 군집은 2번, 3번 그리고 4번 클러스터에서 높고 1번과 5번 클러스터에서 낮게 나타났다(Dunn 검정, p<0.01). 총 개체수와 종수는 2번 클러스터에서 높고, 1번과 3번 클러스터에서 낮은 값을 나타냈고(Dunn 검정, p<0.01), 특히 녹조류의 군집과 매우 유사한 양상을 나타내었다. 전체적으로 식물플랑크톤 군집은 2번 클러스터가 위치한 SOM map의 하부에서 높은 값의 분포를 보였고, 1번과 3번 클러스터가 위치한 map의 상부에서 낮은 값을 보여 map의 상부와 하부로 나뉘는 특성을 나타냈다.

식물플랑크톤 군집을 이용한 SOM 분석을 통해 확인된 클러스터별 특성을 분석하기 위하여 이화학적 요인의 차이를 비교한 결과, 총 18개의 요인 중 수온, DO, BOD, SS, TP 그리고 Chl-a에서 클러스터 간 유의한 차이를 보였는데(K-W 검정, p<0.05)(Table 1), 이들 역시 SOM map의 상부와 하부에 위치한 클러스터로 구분되는 특징을 보여 식물플랑크톤 군집의 SOM 분석 결과와 매우 유사한 형태로 나타났다. 그중 수온, BOD, SS, TP, Chl-a는 SOM map의 하부에 위치한 2번 클러스터에서 높은 수치를 보였고 상부에 위치한 1번과 3번 클러스터에서 낮은 수치를 보인 반면(Dunn 검정, p<0.01), DO의 경우 map의 상부에 위치한 3번 클러스터에서 높았고, 하부에 위치한 2번 클러스터



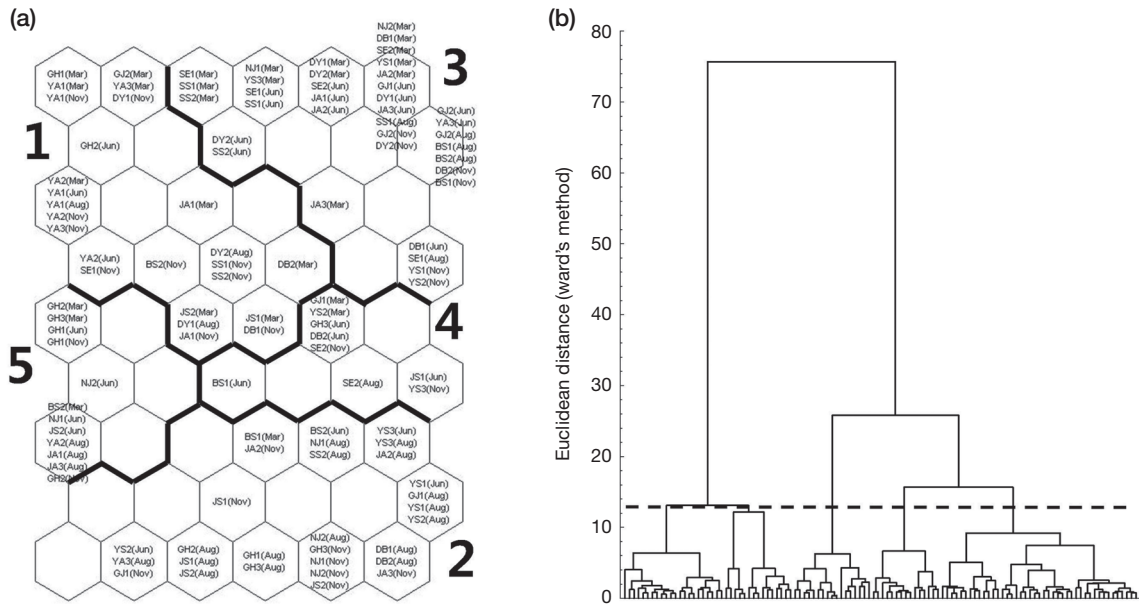


Fig. 5. The results of self-organizing map based on phytoplankton indices (a) and dendrogram of SOM units using the Ward linkage with Euclidean distance (b).

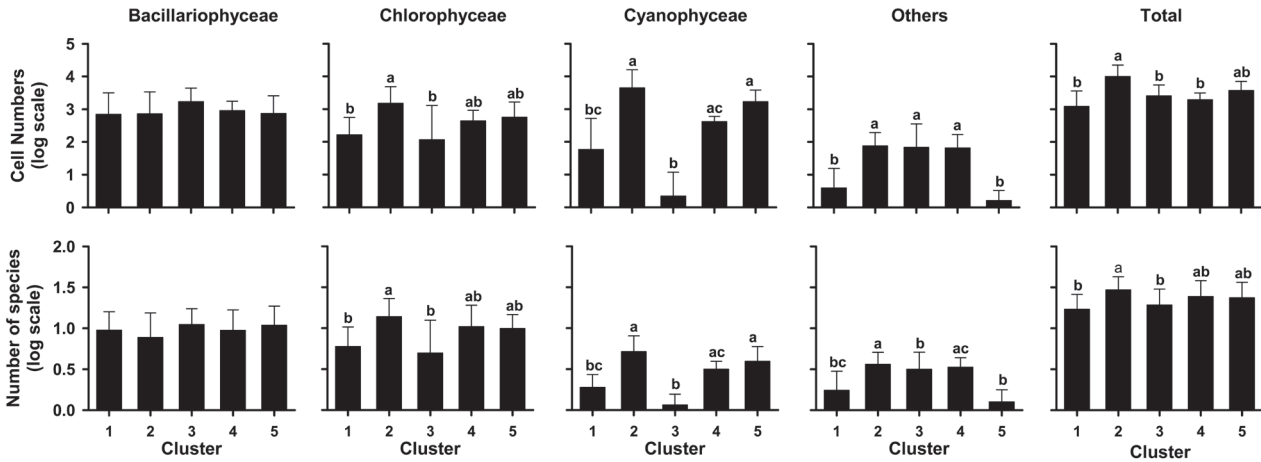


Fig. 6. Differences of phytoplankton indices according to the SOM. Error bars indicate standard deviation and different alphabets indicate significant difference among cluster groups based on Dunn's multiple comparison test ( $p < 0.05$ ).

에서 낮은 값을 보였다(Dunn 검정,  $p < 0.01$ ).

식물플랑크톤 군집과 환경인자 간의 Pearson's correlation coefficient 분석에서 규조류 군집은 이화학적 요인과 주로 음의 상관성을 나타냈고, 녹조류와 남조류 군집은 대부분 양의 상관성으로 서로 반대의 양상을 나타냈다(Table 2). 남조류 군집은 다른 분류군에 비해 환경인자와의 유의성이 높게 나타났고 기타조류 군집은 다른 분류군에 비해 환경인자와 유의성이 낮았다.

SOM 분석과 상관성 분석을 종합한 결과, 식물플랑크톤

의 군집은 수온, SS, DO, Chl-a 등의 요인과 관련성이 높았고, pH, TN, NH<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P 등과는 낮은 관련성을 보였다.

### 고찰

Kim *et al.* (2010)은 2008년부터 2009년까지 국내 남서부 지역 31개 호소의 플랑크톤에 대한 동태 변화를 통해 총 554종의 식물플랑크톤을 확인하였고 그중 규조류와 녹

**Table 1.** Differences of environmental factors according to each cluster defined in SOM (mean  $\pm$  SD). Different alphabets indicate statistically significant difference among clusters based on Dunn's multiple comparison test ( $p < 0.05$ ). W.T.: water temperature, SS: suspended solids, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus, Cond.: conductivity, Chl-*a*: Chlorophyll-*a*

	Cluster				
	1	2	3	4	5
W.T.	13.58 ( $\pm 6.87$ ) <sup>b</sup>	20.23 ( $\pm 5.72$ ) <sup>a</sup>	14.37 ( $\pm 7.03$ ) <sup>b</sup>	17.47 ( $\pm 6.94$ ) <sup>ab</sup>	17.28 ( $\pm 7.11$ ) <sup>ab</sup>
pH	7.73 ( $\pm 0.66$ )	7.86 ( $\pm 0.68$ )	7.72 ( $\pm 0.56$ )	8.00 ( $\pm 0.60$ )	7.99 ( $\pm 0.65$ )
DO	9.67 ( $\pm 2.62$ ) <sup>ab</sup>	8.05 ( $\pm 2.36$ ) <sup>b</sup>	10.25 ( $\pm 2.29$ ) <sup>a</sup>	9.16 ( $\pm 1.82$ ) <sup>ab</sup>	9.20 ( $\pm 2.16$ ) <sup>ab</sup>
BOD	1.00 ( $\pm 0.66$ ) <sup>b</sup>	1.80 ( $\pm 0.99$ ) <sup>a</sup>	1.11 ( $\pm 0.71$ ) <sup>b</sup>	1.86 ( $\pm 0.99$ ) <sup>ab</sup>	1.66 ( $\pm 1.01$ ) <sup>ab</sup>
SS	6.34 ( $\pm 6.55$ ) <sup>ab</sup>	9.46 ( $\pm 10.03$ ) <sup>a</sup>	4.02 ( $\pm 5.58$ ) <sup>b</sup>	10.69 ( $\pm 17.91$ ) <sup>ab</sup>	7.19 ( $\pm 6.12$ ) <sup>ab</sup>
TN	1.355 ( $\pm 0.501$ )	1.410 ( $\pm 0.647$ )	1.355 ( $\pm 0.900$ )	1.831 ( $\pm 0.968$ )	1.237 ( $\pm 0.512$ )
NH <sub>3</sub> -N	0.058 ( $\pm 0.060$ )	0.135 ( $\pm 0.140$ )	0.104 ( $\pm 0.232$ )	0.204 ( $\pm 0.198$ )	0.189 ( $\pm 0.426$ )
NO <sub>3</sub> -N	0.910 ( $\pm 0.355$ )	0.784 ( $\pm 0.600$ )	0.907 ( $\pm 0.652$ )	1.120 ( $\pm 0.757$ )	0.539 ( $\pm 0.343$ )
TP	0.021 ( $\pm 0.012$ ) <sup>b</sup>	0.039 ( $\pm 0.026$ ) <sup>a</sup>	0.022 ( $\pm 0.012$ ) <sup>b</sup>	0.026 ( $\pm 0.017$ ) <sup>ab</sup>	0.049 ( $\pm 0.068$ ) <sup>ab</sup>
PO <sub>4</sub> -P	0.007 ( $\pm 0.008$ )	0.014 ( $\pm 0.021$ )	0.007 ( $\pm 0.007$ )	0.008 ( $\pm 0.010$ )	0.027 ( $\pm 0.069$ )
Cond.	763.72 ( $\pm 1134.64$ )	550.90 ( $\pm 953.98$ )	177.68 ( $\pm 278.15$ )	413.33 ( $\pm 759.27$ )	1246.33 ( $\pm 1328.23$ )
Chl- <i>a</i>	5.06 ( $\pm 4.31$ ) <sup>b</sup>	18.26 ( $\pm 20.19$ ) <sup>a</sup>	5.58 ( $\pm 4.26$ ) <sup>b</sup>	11.62 ( $\pm 11.13$ ) <sup>ab</sup>	10.95 ( $\pm 11.17$ ) <sup>ab</sup>

**Table 2.** Pearson's correlation coefficients between phytoplankton indices and environmental factors. Bacillario.: Bacillariophyceae, Chloro.: Chlorophyceae, Cyano.: Cyanophyceae, W.T.: water temperature, SS: suspended solids, TN: total nitrogen, TP: total phosphorus, Cond.: conductivity, Chl-*a*: Chlorophyll-*a*

	Number of Species					Cell Numbers				
	Bacillario.	Chloro.	Cyano.	Others	Total	Bacillario.	Chloro.	Cyano.	Others	Total
W.T.	-0.331**	0.256**	0.363**	0.304**	0.131	-0.248**	0.321**	0.377**	0.203*	0.236*
pH	-0.119	-0.016	0.115	-0.029	-0.046	-0.165	-0.036	0.074	0.052	-0.035
DO	0.373**	-0.192*	-0.380**	-0.186*	-0.046	0.180	-0.268**	-0.411**	-0.126	-0.288**
BOD	0.007	0.233*	0.416**	0.090	0.241*	-0.076	0.186*	0.362**	0.095	0.151
SS	-0.203*	0.264**	0.397**	-0.043	0.125	-0.286**	0.241*	0.327**	-0.075	0.043
TN	-0.289**	0.066	0.034	-0.007	-0.120	-0.323**	0.075	0.044	-0.131	-0.166
NH <sub>3</sub> -N	-0.039	0.101	0.137	-0.015	0.056	-0.130	0.057	0.098	0.002	-0.056
NO <sub>3</sub> -N	-0.197*	-0.012	-0.191*	0.063	-0.163	-0.178	-0.002	-0.147	-0.083	-0.257**
TP	-0.140	0.212*	0.373**	-0.048	0.144	-0.242*	0.191*	0.281**	-0.056	0.123
PO <sub>4</sub> -P	-0.039	0.170	0.233*	-0.105	0.117	-0.172	0.124	0.141	-0.100	-0.009
Cond.	-0.341**	-0.082	0.213*	-0.341**	-0.278**	-0.513**	-0.032	0.194*	-0.326**	-0.189*
Chl- <i>a</i>	-0.090	0.339**	0.463**	0.236*	0.325**	-0.060	0.316**	0.423**	0.232*	0.323**

\*:  $p < 0.05$ , \*\*:  $p < 0.01$

조류가 74.5%를 차지하고 있음을 발표했다. 마찬가지로 Na *et al.* (2011, 2012)은 2010년과 2011년의 영산강과 섬진강 수계에 분포하는 29개 호소에 대한 연구를 통해 전체 식물플랑크톤 출현종 중 규조류와 녹조류의 출현종이 각각 72.8%, 75.0%로 높은 점유율을 차지하고 있음을 확인하였다. 본 연구에서도 규조류와 녹조류가 전체 출현종의 82.8%를 차지하는 것으로 나타나 이들의 자료와 동일한 양상을 나타내었는데, 이는 전라남도를 포함한 국내 정수계에서 관찰되는 일반적인 식물플랑크톤 종 구성과 차이가 없었다(Choi *et al.*, 1994).

온대지역에 위치하는 호소는 계절적 변화에 따른 이화학적 요인이 다양하게 변화하고 이에 따른 식물플랑크톤

군집의 계절적 천이가 나타나는데 (Horne and Goldman, 1994) 전반적으로 수온이 높은 여름철로 접어들면서 종 다양성이 증가하다가 수온이 감소하면서 점차 낮아진다 (Moss, 1974). 특히 겨울에서 봄이 진행되는 시기에는 높은 Si:P 비율과 낮은 수온으로 인해 규조류의 우점 및 다양성이 높게 나타나고, 늦봄에서 초여름에는 지속적인 규조류의 우점으로 인해 Si가 감소하고 수온 상승과 N:P 비율 증가로 녹조류의 다양성이 증가한다. 이후 N:P 비율의 감소로 질소 고정능이 있는 남조류의 우점 및 다양성이 증가하게 되고 가을에는 Si와 N이 증가하면서 점차 규조류의 다양성이 높아진다(Horne and Goldman, 1994). 본 연구에서도 수온이 낮은 3월에 비해 수온이 높은 6월, 8월에

종 다양성이 높게 나타났고, 분류군별 천이과정 역시 일치한 것으로 확인되었다.

호소에서 식물플랑크톤 개체수의 계절적 변화는 영양분의 유입이 크고 수층의 혼합이 잘 이루어지는 봄과 가을에 피크를 나타내고 영양분의 감소, 동물플랑크톤을 비롯한 포식자의 섭식활동, 성층의 형성 등과 같은 요인에 의해 여름에 상대적으로 개체수가 감소하는 양상을 나타낸다(Horne and Goldman, 1994). 본 연구에서도 동북호, 상사호와 주암호를 포함한 상수원용 호수에서 식물플랑크톤의 개체수는 봄의 최대값과 여름철의 감소를 보여 전형적인 온대지역 식물플랑크톤의 계절적 변화를 나타냈으나, 다른 호수들에서는 봄과 가을철보다 오히려 여름철에 개체수가 더 높게 나타났다. 부영양의 호수에서는 여름철에도 높은 개체수를 보이는 경우가 있는 것으로 알려져 있지만(Horne and Goldman, 1994; Sze, 1998), 조사가 이루어진 호수들에서 식물플랑크톤 군집과 이화학적 인자 간의 상관 정도가 낮게 나타난 것으로 보아 부영양화에 따른 하계의 높은 개체수로 해석되기는 힘들다. 다만 국내의 경우에는 영양분이나 다른 이화학적 요인에 비해 폭우나 집중호우와 같은 여름철 강우에 의해 개체수의 증가가 이루어지는 특징을 보이는 것과 관련하여(An and Jones, 2000; Joung *et al.*, 2005), 강우와 식물플랑크톤 군집 간의 관계를 확인할 필요가 있는 것으로 사료된다.

본 연구에서 확인된 SOM 및 상관성 분석 결과 전라남도의 주요 호수 내 식물플랑크톤 군집은 수온, SS, DO, BOD, Chl-*a*와 관계가 있는 것으로 확인되어 주로 계절적인 특성을 잘 나타내는 요인들과 밀접한 관련이 있는 것으로 나타났다. 수온의 경우 다른 이화학적 요인에 비해 계절에 따른 주기가 매우 뚜렷하게 나타나는 요인으로 잘 알려져 있고, 본 연구에서 계절에 따른 식물플랑크톤의 천이 과정이 명확하게 확인되어 SOM 분석 및 상관관계에서도 밀접한 관계를 보인 것으로 생각된다. DO와 BOD는 주로 수온과 수계 내 생물상에 영향을 크게 받는 것으로 알려져 있다. 하지만 본 연구에서는 DO와 식물플랑크톤의 군집은 서로 상반되고 BOD와는 유사한 경향을 보여 DO가 식물플랑크톤의 광합성에 따른 영향보다는 수온의 영향을 크게 받은 것으로 해석된다. 부유물질은 수체에서 빛의 투과를 저해하여 식물플랑크톤의 성장에 직접적으로 영향을 끼치는 요인이기 때문에, 식물플랑크톤 군집과 부유물질 간의 관계가 다소 밀접하게 나타난 것은 당연한 결과이다. 다만 이러한 부유물질의 농도는 내부물질과 외부물질의 영향에 따라 그 값이 결정되고, 우리나라는 하계의 집중호우와 태풍 등의 영향에 의해 외부물질의 유입이 크게 증가하여 매우 높은 수치를 보이지만 강우가 없으면 외부물질의 유입

보다 내부물질의 영향이 크게 나타나기 때문에 강우와의 연관성을 통한 분석시 보다 정확한 인자를 확인할 수 있을 것으로 생각된다. 수계 내 Chl-*a* 농도는 직접적으로 식물플랑크톤의 생물량을 나타내므로 이들 간의 유사성은 당연한 결과로 나타났다.

이와는 반대로 식물플랑크톤 군집은 pH를 포함한 TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P 등 주로 영양염류와의 관련성이 낮게 나타났다. pH는 식물플랑크톤이 광합성에 이용할 수 있는 용존 이산화탄소의 다양한 형태 구성(H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)에 중요하므로 식물플랑크톤의 탄소원과 매우 밀접한 관련이 있고, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P 등은 수환경 내 식물플랑크톤의 성장에 직접적으로 이용되는 주요 영양소인 질소원과 인산원으로 잘 알려져 있다. 식물플랑크톤의 영양소로 이용되는 다양한 요인들은 수온과 같은 요인에 비해 호소의 형태와 수리수문학적 특성, 그리고 점오염원과 비점오염원 등 다양한 요인에 의해 영향을 크게 받는다(Carmack *et al.*, 1979). 특히 우리나라와 같은 온대지역의 경우 기후나 계절에 따라 그 차이는 매우 크게 나타나기 때문에 본 연구에서도 마찬가지로 이들의 유의한 차이는 확인되지 않았고, 이로 인해 식물플랑크톤의 군집 변화와의 관계성이 다소 낮은 것으로 확인되었다. 다만 전체적인 경향성이 다르고 유의성이 나타나지 않았다 하더라도 특정 분류군과의 유형은 일치하는 정도가 높아 이를 이용하여 호수별 세부적인 식물플랑크톤 군집 변화의 양상을 추론할 수 있을 것으로 예상된다.

종합적으로, 본 연구를 통해 확인된 전라남도 내 호수들의 식물플랑크톤 군집 변화는 성장에 필요한 영양소와 같은 화학적 요인의 영향을 받기 보다는 수온, 부유물질을 포함한 다양한 물리적인 인자에 의한 영향이 큰 것으로 나타났다. 또한 SOM 분석을 통해 호수별 특성에 따라 식물플랑크톤의 군집과 유사한 경향을 나타내는 요인들이 분명하게 확인되어 앞으로의 호수 관리에 반드시 고려되어야 할 기초자료로 충분한 가능성이 있는 것으로 사료된다.

## 적 요

전라남도에 위치한 12개의 호수에서 식물플랑크톤 군집 변화 양상 및 환경요인과 시공간적 특징의 상관관계를 알아보기 위하여 2014년 3월부터 11월까지 총 4차례에 걸쳐 조사를 시행하였다. 전체 조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤은 총 297종으로, 구조류 98종, 녹조류 148종, 남조류 23종, 그 외 와편모조류를 포함한 기타조류 28종으로 확인되었고, 조사시기별 출현종은 3월 116종, 6월 163종, 8

월 162종, 11월 169종으로 1차 조사를 제외한 대부분의 시기에 다소 높은 출현종수를 보였다. 조사기간 동안 확인된 식물플랑크톤의 개체수는 124~59,148 cells mL<sup>-1</sup>의 범위를 나타냈고, 조사시기별 평균 출현개체수는 3월 3,443 cells mL<sup>-1</sup>, 6월 4,055 cells mL<sup>-1</sup>, 8월 11,763 cells mL<sup>-1</sup>, 11월 4,614 cells mL<sup>-1</sup>로 봄철에서 여름철로 계절이 진행되면서 증가한 후 가을철로 접어들면서 다시 감소하는 경향을 보였는데 이는 남조류의 개체수 변화에 따른 결과로 확인되었다. 식물플랑크톤 군집과 이화학적 요인을 이용한 SOM 분석 결과 9×6 격자에서 최적화되었고, 5개의 그룹으로 분류되었다. SOM 분석을 통한 식물플랑크톤의 군집과 연관이 있는 이화학적 요인은 수온, SS, DO, BOD, TP, Chl-*a*로 확인되었고 pH, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P, 전기전도도 등은 관련성이 낮은 것으로 나타났다. 식물플랑크톤 군집과 이화학적 요인 간의 Pearson's correlation coefficient를 산출한 결과 식물플랑크톤의 군집은 대체로 수온, DO, SS, TP, 전기전도도, Chl-*a*와 통계적 유의성을 보였고, pH, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P 등과는 유의성이 낮은 것으로 확인되었다. 결론적으로 전라남도 내 주요 호소에서의 식물플랑크톤 군집의 분포는 주로 수온, SS, DO, BOD, Chl-*a*와 관계가 있는 것으로 확인되었고 pH, TN, NH<sub>3</sub>-N, NO<sub>3</sub>-N, PO<sub>4</sub>-P와의 관련성은 낮은 것으로 확인되었다.

## 사 사

본 연구는 국립환경과학원 영산강물환경연구소에서 시행한 영산강·섬진강 수계 환경 기초조사사업의 연구비로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- An, K.G. and J.R. Jones. 2000. Factors regulating bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **432**: 37-48.
- APHA. 2001. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 21st eds. Wasington, D.C. U.S.A.
- Carmack, E.C., C.B.J. Gray, C.H. Pharo and R.J. Daley. 1979. Importance of lake-river interaction on seasonal patterns in the general circulation of Kamloops Lake, British Columbia. *Limnology and Oceanography* **24**(4): 634-644.
- Choi, M.K., B.H. Kim, Y.T. Chung and I.S. Whi. 1994. Occurrence and dynamics of phytoplankton in lake Chuam. *Korean Journal of Limnology* **27**: 79-91.
- Gevrey, M., F. Rimet, Y.S. Park, J.L. Giraudel, L. Ector and S. Lek. 2004. Water quality assessment using diatom assemblages and advanced modelling techniques. *Freshwater Biology* **49**: 208-220.
- Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. *Limnology*. McGraw-Hill, New York, 465pp.
- Hwang, S.J., S.K. Kwun and C.G. Yoon. 2003. Water quality and limnology of Korean reservoirs. *Paddy and Water Environment* **1**: 43-52.
- Joo, G.J. and K.S. Jeong. 2005. Modelling community changes of cyanobacteria in a flow regulated river (the lower Nakdong River, S. Korea) by means of a Self-Organizing Map (SOM), pp. 273-287. *In: Modelling Community Changes of Cyanobacteria in a Flow Regulated River (the Lower Nakdong River, S. Korea) by Means of a Self-Organizing Map (SOM)* (Lek, S., M. Scardi, P. Verdonshot, J.P. Descy and Y.S. Park, eds.). Springer Verlag, Berlin.
- Joung, S.H., C.Y. Ahn, A.R. Choi, K.Y. Jang and H.M. Oh. 2005. Relation between rainfall and phytoplankton community in Daechung reservoir. *Korean Journal of Environmental Biology* **23**(1): 57-63.
- Kim, H.Y., G.H. La, K.S. Jeong, J.H. Park, Y.J. Huh, S.D. Kim, J.E. Na, M.H. Jung and H.Y. Lee. 2010. Assessing the plankton dynamics in lakes and reservoirs ecosystem in the southwestern parts of Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **28**(2): 86-94.
- Kiviranta, J., M. Namikoshi, K. Sivonen, W.R. Evans, W.W. Carmichael and K.L. Ronehart. 1992. Structure determination and toxicity of a new microcystin from *Microcystis aeruginosa* strain-205. *Toxicon* **30**: 1093-1098.
- Kohonen, T. 2001. *Self-organizing Maps*. Springer, Berlin.
- Lee, O.M. 1994. The annual dynamics of standing crops and distribution of phytoplankton in Juam lake in 1992. *Korean Journal of Limnology* **27**: 327-337.
- Lee, O.M. and H.Y. Song. 1995. The annual dynamics of standing crops and distribution of phytoplankton in Juam lake in 1993. *Korean Journal of Limnology* **28**: 427-436.
- Moss, B. 1974. Diversity in fresh-water phytoplankton. *American Midland Naturalist* **90**: 341-355.
- Na, J.E., M.H. Jeong, J.H. Park, S.D. Kim, B.J. Lim, H.W. Kim and H.Y. Lee. 2011. Relationships between phytoplankton community and sizes of reservoirs in Yeongsan and Seomjin river basins, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **29**(2): 107-112.
- Na, J.E., M.H. Jeong, I.S. Cho, J.H. Park, K.S. Hwang, H.J. Song, B.J. Lim, G.H. La, H.W. Kim and H.Y. Lee. 2012. Phytoplankton community in reservoirs of Yeongsan and Seomjin river basins, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **30**(1): 39-46.
- Oh, H.M., C.Y. Ahn, J.W. Lee, T.S. Chon, K.H. Choi and Y.S. Park. 2007. Community patterning and identification of predominant factors in algal bloom in Daechung Reservoir (Korea) using artificial neural networks. *Ecological*



- Modelling* **203**: 109-118.
- Park, Y.S., R. Céréghino, A. Compin and S. Lek. 2003. Applications of artificial neural networks for patterning and predicting aquatic insect species richness in running water. *Ecological Modelling* **160**: 165-280.
- Park, Y.S., J. Tison, S. Lek, J.L. Giraudel, M. Coste and F. Delmas. 2006. Application of a self-organizing map to select representative species in multivariate analysis: a case study determining diatom distribution patterns across France. *Ecological Informatics* **1**(3): 247-257.
- Park, Y.S., Y.S. Kwon, S.J. Hwang and S. Park. 2014. Characterizing effects of landscape and morphometric factors on water quality of reservoirs using a self-organizing map. *Environmental Modelling & Software* **55**: 214-221.
- Parmer, C.M. 1977. Algae and water pollution. Municipal environmental research laboratory office of research and development U.S. environmental protection agency Cincinnati, Ohio. 124pp.
- Pözlbauer, G. 2004. Survey and comparison of quality measures for self-organizing maps, pp. 67-82. In: Proceedings of the Fifth Workshop on Data Analysis (WDA'04) (Paralić, J., G. Pözlbauer and A. Rauber, eds.). June 24-27, Elfa Academic Press, Sliezsky dom, Vysoké Tatry, Slovakia, 2004.
- Reynolds, C.M., S.W. Wiseman, B.M. Godfrey and C. Butterwick. 1983. Some effects of artificial mixing on the dynamics of the phytoplankton populations in large limnetic enclosures. *Journal of Plankton Research* **5**: 203-234.
- Rimet, F., J. Druart and O. Anneville. 2009. Exploring the dynamics of plankton diatom communities in Lake Geneva using emergent self-organizing maps (1974-2007). *Ecological Informatics* **4**(2): 99-110.
- Shin, J.G., S.J. Hwang, C.G. Kang and H.S. Kim. 2003. Limnological Characteristics of the River-type Paltang Reservoir, Korea: Hydrological and Environmental Factors. *Korean Journal of Limnology* **36**: 242-256.
- Smith, V.H. 2003. Eutrophication of freshwater and coastal marine ecosystems: A global problem. *Environmental Science and Pollution Research* **10**: 1-14.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv fur Hydrobiologie* **106**: 473-485.
- Sze, P. 1998. A biology of the algae 3rd ed. McGraw-Hill, Boston, 278pp.
- Tison, J., Y.S. Park, M. Coste, J.G. Wasson, F. Rimet, L. Ector and F. Delmas. 2007. Predicting diatom reference communities at the French hydrosystem scale: a first step towards the definition of the good ecological status. *Ecological Modelling* **203**: 99-108.
- Vensato, J. and R. Alhoniemi. 2000. Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Network* **11**: 586-600.
- Wetzel, R.G. 1999. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd ed. Academic Press, Sandiego. U.S.A. 1006pp.