

Original article

## 보성강 유역에 위치한 호수에서의 식물플랑크톤의 시공간적 군집 비교 분석

조현진 · 나정은 · 이학영\*

전남대학교 자연과학대학 생물학과

**Comparison of Spatio-temporal Variations of Phytoplankton Communities in Lakes in the Boseong River Basin.** Hyeon Jin Cho (0000-0003-0591-519X), Jeong Eun Na (0000-0002-7571-5612) and Hak Young Lee\* (0000-0001-8561-7568) (Department of Biology, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea)

**Abstract** In this study, we compared the spatio-temporal differences of phytoplankton communities among 4 lakes in the Boseong River basin. Field research was conducted quarterly from 2014 to 2017 for this study. A total of 345 species of phytoplankton were identified including 107 Bacillariophyceae, 175 Chlorophyceae, 27 Cyanophyceae and 36 other phytoplankton taxa. Lake Boseong showed higher species numbers and density of phytoplankton than other lakes (Dunn's test,  $P < 0.01$ ). Bacillariophyceae such as *Asterionella formosa*, *Aulacoseira granulata*, *Fragilaria crotonensis* was dominated in most research periods, whereas *Scenedesmus ecornis* and *Coelastrum cambricum* belonging to Chlorophyceae were dominant species on August. The self-organizing map (SOM) classified 3 clusters with  $10 \times 7$  grid and showed spatio-temporal variation of phytoplankton communities based on significant difference among each clusters. Total 31 species of phytoplankton were chosen as a indicator species using indicator species analysis (ISA) and reflected seasonal phytoplankton succession and diversity and density of phytoplankton according to nutrient concentration. Water temperature, Secchi depth, conductivity and DO were identified as important factors affecting the differences of phytoplankton communities in the studied lakes in Boseong River basin using non-metric multidimensional scaling (NMDS).

**Key words:** phytoplankton, lakes, SOM, indicator species analysis, NMDS

### 서론

하천생태계는 다른 생태계와는 다르게 상류에서 하류로 일방적으로 흐르는 물에 의해 지속적으로 변하는 특성을 보이며 이로 인해 매우 복잡한 구조를 나타낸다(Horne and Goldman, 1994; Allan, 1995). 하천의 연속성 개념

(River continuum concept)은 이러한 하천생태계에 존재하는 물이라는 매개체의 흐름에 따라 나타나는 공간적인 변화와 서식처의 특성에 맞춰서 나타나는 다양한 수생생물의 연속적인 변화에 대한 개념이다(Vannote *et al.*, 1980; Allan, 1995). 하지만 하천 내 댐이나 보와 같은 인공구조물을 포함한 많은 인위적인 간섭은 이러한 하천의 연속성에 영향을 미치고 더 나아가 하천생태계를 교란하는 원인이 되고 있는데, 이는 산업의 발전과 더불어 점차 가속화되고 있다(McNeill and Engelke, 2016).

플랑크톤은 수중생태계에서 부유하여 생활하는 생물군

Manuscript received 5 March 2020, revised 17 March 2020, revision accepted 17 March 2020

\* Corresponding author: Tel: +82-62-530-3401, Fax: +82-62-530-3409  
E-mail: haklee@jnu.ac.kr

© The Korean Society of Limnology. All rights reserved.

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provide the original work is properly cited.

으로, 해양, 담수 그리고 기수역 등 다양한 환경에서 수많은 종들이 서식하고 있다(Thurman, 2004). 이 중 광합성을 통해 스스로 에너지를 합성하는 식물플랑크톤은 수계 내에서 생산자로서 큰 비중을 차지하며 에너지 흐름에 매우 중요한 역할을 하고 있다(Parmer, 1977; Wetzel, 1999). 이러한 식물플랑크톤의 성장에는 수온 등을 포함한 다양한 이화학적 요인들과 포식자와 같은 생물학적 요인들이 영향을 주며 수계의 미세한 환경변화에도 민감하게 반응이 나타난다(Sommer *et al.*, 1986).

하천생태계는 유속에 의해 많은 이화학적 요인들이 결정되며, 식물플랑크톤의 성장은 유속에 큰 영향을 받는다(Kim *et al.*, 2009). 하지만 하천 내 인공구조물은 이러한 흐름을 제한하고 정수역을 형성하여 식물플랑크톤의 체류시간을 급격히 증가시키며(Wetzel, 1999), 이때 주어진 환경에 맞춰 식물플랑크톤은 성장하거나 사멸하게 된다(Reynolds and Descy, 1996). 하나의 하천 내에 존재하는 수많은 정수역에 의해 식물플랑크톤 생물상은 매우 단편적으로 변모하여 일부종의 우점이 매우 높아지거나 기존과는 전혀 다른 생물상으로 바뀌기도 한다(Wetzel, 1999). 또한 하나의 정수역에서 나타나는 식물플랑크톤 생물상의 변화는 물의 흐름에 의해 하류부까지 지속적으로 영향을 끼칠 수 있기 때문에(Vannote *et al.*, 1980), 호수 내 식물플랑크톤 군집의 변화에 영향을 미치는 요인을 확인하는 데 있어 수계 연속성을 기반으로 상류지역에 위치하는 호수들과의 식물플랑크톤 군집의 변화를 확인하는 것은 보다 정확한 정보를 제공할 수 있다(Bolgovics *et al.*, 2017).

현재 보성강에는 보성강댐, 동북댐, 주암다목적댐(본댐 및 조절지댐)이 건설됨으로써 각각 보성호, 동북호, 주암호, 상사호가 생성되었다(KNCOLD, <http://www.kncold.or.kr>). 이들은 광주광역시 및 전라남도 일대의 생활용수와 농업 및 공업용수 공급원으로 중요한 역할을 하고 있으나, 이를 위해 보성강 유량의 약 50%가 인접한 유역으로 취수되고 있어 유량 부족으로 인한 생태계 교란 등의 문제점이 제기되고 있다(MOE, 2013). 이러한 환경 교란에 의해 보성강 유역 내 호수의 식물플랑크톤 군집은 시공간적으로 차이를 나타낼 수 있고, 이를 확인하기 위해 호소별 식물플랑크톤 군집에 관한 일부 연구가 진행되었으나(Choi *et al.*, 1994; Lee and Song, 1995; Lee *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2013) 아직까지 보성강 유역 내 호수들의 식물플랑크톤 군집을 비교한 연구는 없다. 따라서 본 연구는 보성강에 위치한 호수들에서 식물플랑크톤 군집이 시공간적으로 어떠한 차이를 나타내는지 비교하고 이러한 군집을 형성하는 데 관계가 있는 요인들을 확인하고자 하였다.

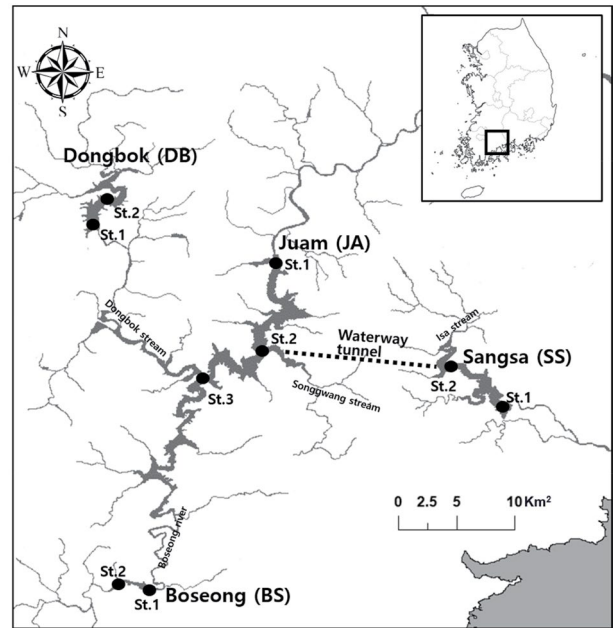


Fig. 1. A map showing the sampled lakes in this study.

## 재료 및 방법

### 1. 조사정점 및 조사기간

본 연구는 전라남도 보성군 일림산에서 발원하여 전라남도 곡성군에서 섬진강으로 합류하는 보성강 유역 내에 위치하고 있는 호소 4곳(동북호, 보성호, 주암호, 상사호)을 대상으로 2014년 3월부터 2017년 11월까지 연 4회에 걸쳐 분기조사를 시행하였다. 상사호의 경우 보성강과 떨어진 이사천 수계에 위치하고 있으나 주암호와 연결된 도수터널에 의해 많은 양의 유지수량을 공급받고 있어 본 조사지에 포함하였다. 호소 내 조사지점은 유역 면적이 큰 주암호는 상류, 중류, 하류로 구분하였고( $n=48$ ), 동북호, 보성호, 상사호는 상류, 하류로 구분하여 조사를 진행하였다( $n=32$ ). 대상 호소 및 호소별 조사정점은 Fig. 1에 제시하였다( $n=144$ ).

### 2. 이화학적 요인 및 식물플랑크톤 조사

이화학적 요인 중 수온, 수소이온농도(pH), 용존산소(DO), 전기전도도, Secchi depth는 다항목 현장측정기(Hydrolab DS5, USA)와 Secchi disk를 이용하여 현장에서 측정하였고, 생물학적산소요구량(BOD), 총 부유물질(SS), 총 질소(TN), 암모니아성 질소( $\text{NH}_3\text{-N}$ ), 질산성 질소( $\text{NO}_3\text{-N}$ ), 총 인(TP), 인산염인( $\text{PO}_4\text{-P}$ )은 수면 아래 50cm의 현장수를 Van Dorn water sampler(alpha water sampler-

horizontal, Wildco<sup>®</sup>, USA)를 이용하여 2L 채수한 후 무균 채수병에 담아 냉장 보관하여 실험실로 운반한 뒤 공정시험법(APHA, 1999)에 따라 분석하였다.

식물플랑크톤 채집은 각 지점별로 수면 아래 50 cm의 현장수를 Van Dorn water sampler (alpha water sampler-horizontal, Wildco<sup>®</sup>, USA)를 이용하여 1L를 단순채수한 뒤 무균채수병에 담아 현장에서 Lugol's solution을 최종농도의 2%가 되게 첨가하여 고정한 후 냉장 보관하여 실험실로 운반하였다. 고정한 시료는 외부의 충격으로 인한 시료의 교반을 예방하고자 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 Sedgewick-Rafter Chamber를 이용하여 검정한 후 mL당 세포수로 환산하였다. 시료검정은 광학현미경(Leica DM2500, Leica microsystems, Germany)을 이용하여 200~1,000배의 배율로 종 수준까지 동정하였다. 출현종의 동정 및 분류는 구조류는 Krammer and Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b), 남조류는 Komárek and Anagnostidis (2005)와 McGregor (2007), 녹조류는 Hirose *et al.* (1977), 그 외 기타조류 등은 Wehr and Sheath (2003) 등의 분류를 참고하였다.

### 3. 통계분석

조사 지점 및 조사 시기에 따른 식물플랑크톤의 분포 특성을 유형화하고 군집화하기 위해 Self-Organizing Map (SOM) 분석 및 군집 분석을 진행하였다. 최적화된 SOM 모형을 구축하기 위해 경험식( $5\sqrt{n}$ )을 바탕으로 격자를 구축한 후 (Vesanto and Alhoniemi, 2000), 그 중 topographic error (TE)와 quantization error (QE)가 최소인 모형을 선택하였다(Kohonen, 2001; Park *et al.*, 2003). 또한 Euclidean distance를 이용한 Ward linkage 방법에 따라 유사한 노드들 간 적합한 클러스터를 형성하도록 계층적 군집분석을 시행하였고, 각 클러스터간의 유의성을 확인하기 위하여 multi-response permutation procedure (MRPP) 및 Kruskal-Wallis test (K-W test)를 진행하였으며 사후분석으로 Dunn's test를 진행하였다.

산출된 각 그룹별 지표종을 확인하기 위하여 Indicator species analysis (ISA)를 실시하였다. ISA는 각 종들의 상대밀도와 빈도수를 이용하여 지표값 (IndVal)을 계산한 후 그룹별 지표종을 산출하는데 (Dufrene and Legendre, 1997), 오차를 최소화하기 위하여 누적우점종 90% 이상을

나타내는 종을 선별한 후 그 중 전체 조사기간 동안 5번 이상 검경된 종만을 선별하여 분석에 이용하였다.

식물플랑크톤 개체수를 이용하여 non-metric multidimensional scaling (NMDS)을 수행하였고 (McCune and Grace, 2002), SOM 및 군집분석을 통해 확인된 각 그룹별 분포 양상을 비교하였다. 또한 산출된 각 종별 NMDS 좌표값과 식물플랑크톤 군집지수 및 환경요인과의 비모수 상관분석인 Spearman correlation analysis를 진행하였다.

모든 분석에 사용된 식물플랑크톤 개체수는 자연로그로 변환하여 이용하였으며, 로그 0의 계산불가를 해결하기 위해 개체수에 1을 더한 후 변환하였다. SOM 분석은 Matlab (Ver. 6.1) 환경에서 SOM toolbox (Helsinki University of Technology, Helsinki)를 이용하였고, 군집분석, MRPP, ISA 및 NMDS는 PC-ORD (ver. 6)를 이용하여 분석하였다 (McCune and Mefford, 1999). Spearman correlation analysis, K-W test와 Dunn's test는 Statistica (ver. 10, StatSoft Inc., USA)을 이용하여 분석하였다.

## 결 과

### 1. 이화학적 요인 및 식물플랑크톤 군집

조사기간 동안 측정된 보성강 유역 내에 위치한 호수들의 이화학적 요인은 Table 1과 같이, 수온, 암모니아성 질소를 제외한 대부분의 요인에서 호수별 차이를 나타냈다 (Dunn's test,  $P < 0.01$ ). 보성호의 경우 이화학적 요인들의 평균값이 다른 호수들에 비해 높게 나타나, 다른 호수들과 이화학적 요인의 차이가 두드러지게 나타났다. 특히 DO, BOD, SS와 전기전도도에서 동북호, 주암호와 상사호는 이들 호수들 간 유의성이 나타나지 않았지만 보성호와는 유의성을 나타내었다 (Dunn's test,  $P < 0.01$ ). Secchi depth의 경우 다른 요인들에 비해 각 호수별 특성이 명확하게 구분되었는데 보성호에서 가장 낮았고 (평균 0.9 m) 주암호에서 가장 높았다 (평균 4.5 m). 총 질소, 총 인을 포함한 질소와 인 성분은 지점별, 시기별 변화의 폭이 다소 높아 다른 요인에 비해 명확한 구분은 되지 않았으나 보성호와 주암호 두 호수 간의 차이는 뚜렷하였고, 동북호와 상사호의 경우  $PO_4\text{-P}$ 에서만 유의한 차이를 나타냈다.

조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤의 출현종수는 구조류 107종, 녹조류 175종, 남조류 27종, 와편모조류를 포함한 기타조류 36종으로 총 345종이 분석되었다 (Table 2). 호수별 식물플랑크톤 총 출현종수는 보성호에서 247종으로 가장 높았고 상사호에서 139종으로 가장 낮은 다양성

**Table 1.** Environmental characteristics of 4 lakes. Values represented mean (standard deviation). Different alphabets indicate significant difference among cluster groups based on Dunn's multiple comparison test ( $P < 0.05$ ).

|  | Dongbok                     | Boseong                    | Sangsa                      | Juam                       |
|--|-----------------------------|----------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| W.T. (°C)                                | 15.0 (6.4)                  | 18.5 (8.4)                 | 14.8 (6.0)                  | 14.6 (6.4)                 |
| pH                                       | 7.6 (0.4) <sup>ac</sup>     | 7.9 (0.6) <sup>a</sup>     | 7.3 (0.5) <sup>b</sup>      | 7.0 (0.6) <sup>bc</sup>    |
| Secchi depth (m)                         | 1.9 (0.8) <sup>a</sup>      | 0.9 (0.6) <sup>b</sup>     | 2.8 (1.3) <sup>c</sup>      | 4.5 (0.9) <sup>d</sup>     |
| DO (mg L <sup>-1</sup> )                 | 8.5 (2.7) <sup>b</sup>      | 11.5 (2.1) <sup>a</sup>    | 8.1 (2.6) <sup>b</sup>      | 8.6 (3.0) <sup>b</sup>     |
| BOD (mg L <sup>-1</sup> )                | 1.4 (0.5) <sup>b</sup>      | 2.2 (1.1) <sup>a</sup>     | 1.2 (0.4) <sup>b</sup>      | 1.3 (0.4) <sup>b</sup>     |
| SS (mg L <sup>-1</sup> )                 | 2.0 (0.4) <sup>b</sup>      | 10.2 (13.0) <sup>a</sup>   | 2.0 (0.7) <sup>c</sup>      | 1.5 (1.1) <sup>bc</sup>    |
| TN (mg L <sup>-1</sup> )                 | 0.786 (0.156) <sup>bc</sup> | 1.268 (0.410) <sup>a</sup> | 0.754 (0.159) <sup>b</sup>  | 0.878 (0.207) <sup>c</sup> |
| TP (mg L <sup>-1</sup> )                 | 0.012 (0.005) <sup>b</sup>  | 0.041 (0.025) <sup>a</sup> | 0.017 (0.006) <sup>bc</sup> | 0.015 (0.008) <sup>c</sup> |
| NH <sub>3</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.028 (0.029) <sup>b</sup>  | 0.051 (0.046) <sup>a</sup> | 0.047 (0.018) <sup>bc</sup> | 0.031 (0.047) <sup>c</sup> |
| NO <sub>3</sub> -N (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.554 (0.199) <sup>ab</sup> | 0.670 (0.383) <sup>a</sup> | 0.478 (0.136) <sup>a</sup>  | 0.598 (0.139) <sup>b</sup> |
| PO <sub>4</sub> -P (mg L <sup>-1</sup> ) | 0.004 (0.001) <sup>a</sup>  | 0.009 (0.013) <sup>a</sup> | 0.003 (0.001) <sup>b</sup>  | 0.002 (0.002) <sup>b</sup> |
| Cond. (µmhos cm <sup>-1</sup> )          | 80.7 (4.2) <sup>b</sup>     | 129.2 (33.6) <sup>a</sup>  | 82.7 (6.2) <sup>b</sup>     | 80.0 (9.8) <sup>b</sup>    |

W.T.: water temperature, Cond.: conductivity

**Table 2.** Total number of phytoplankton species at each lake during study period.

|                   | Dongbok | Boseong | Sangsa | Juam | Total |
|-------------------|---------|---------|--------|------|-------|
| Cyanophyceae      | 13      | 21      | 10     | 17   | 27    |
| Chlorophyceae     | 96      | 120     | 56     | 115  | 175   |
| Bacillariophyceae | 37      | 82      | 57     | 73   | 107   |
| Others            | 17      | 24      | 16     | 17   | 36    |
| Total             | 163     | 247     | 139    | 222  | 345   |

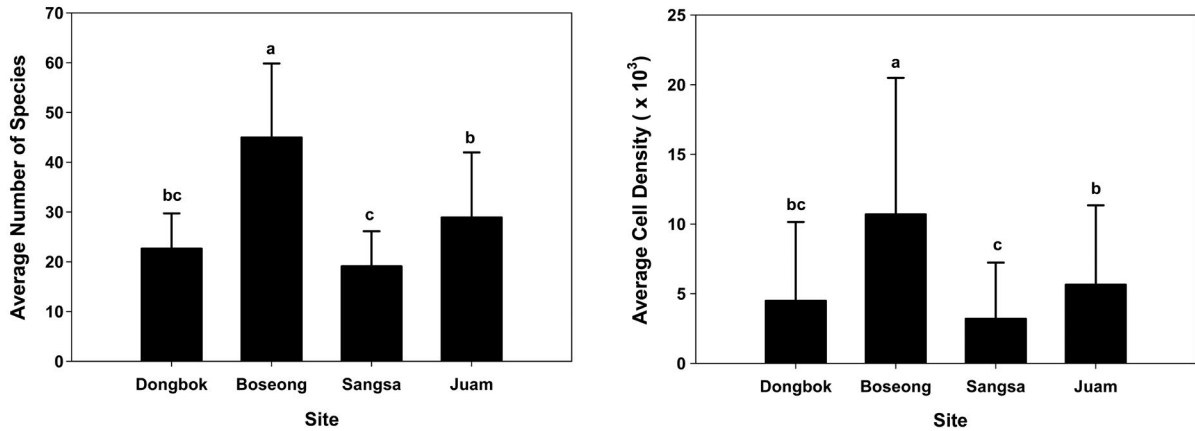
을 보였으며 평균 출현종수 역시 보성강에서 45종으로 가장 많았고, 상사호에서 19종으로 가장 적었다 (Fig. 2). 동북호와 주암호의 평균 출현종수는 각각 23종, 29종으로 비슷하였는데, 동북호의 경우 보성호의 출현종수와 유의한 차이를 보였지만 다른 호수와는 차이를 보이지 않았고 주암호의 경우 동북호를 제외한 두 호수와 유의한 차이가 있는 것으로 확인되었다 (Dunn's test,  $P < 0.01$ ). 호수별 식물플랑크톤의 평균 개체수는 보성호에서 10,691 cells mL<sup>-1</sup>로 가장 높았고, 상사호에서 3,195 cells mL<sup>-1</sup>로 가장 낮았다 (Fig. 2). 보성호의 경우 다른 호수들과 평균 개체수에서 유의한 차이를 보였고, 동북호의 경우 보성호와는 유의한 차이가 있었지만 상사호와 주암호의 평균 개체수와는 유의한 차이를 보이지 않았다 (Dunn's test,  $P < 0.01$ ). 네 호수의 평균 출현종수와 평균 개체수는 매우 유사한 양상을 나타냈고, Dunn's test에 의한 호수별 평균 식물플랑크톤 종수와 개체수의 유의성은 동일하게 분석되었다.

식물플랑크톤의 시기별, 지점별 우점종을 조사한 결과, *Asterionella formosa*, *Aulacoseira granulata*, *Fragilaria*

*crotonensis*와 같은 규조류의 우점이 높은 것으로 확인되었다 (Table 3). 특히 *Asterionella formosa*의 경우 보성호를 제외한 동북호, 상사호와 주암호의 우점종 혹은 아우점종으로 출현하였고, 상사호의 경우 전체 출현개체수의 48.7%로 높은 우점을 보였다. 녹조류의 경우 중 다양성이 가장 높은 분류군임에도 불구하고 동북호의 8월 조사에서 *Volvox* sp.와 *Scenedesmus ecornis*, 주암호의 8월 조사에서 *Coelastrum cambricum*만이 우점종 혹은 아우점종으로 조사되었고, *Oscillatoria*와 *Aphanocapsa*와 같은 남조류의 경우 다양성은 가장 낮음에도 불구하고 6월과 8월 조사시기에 우점종 혹은 아우점종으로 분석되었다.

## 2. 식물플랑크톤 군집의 시공간적 분포 특성

식물플랑크톤 군집을 이용한 SOM 분석 결과 10×7 격자에서 최적화되었고 (QE: 6.158, TE: 0.000), 계층적 군집 분석을 통해 3개의 그룹으로 구분하였다 (Fig. 3), MRPP 분석 결과 이들 그룹들 간에는 유의한 차이가 있는 것으로



**Fig. 2.** Differences of phytoplankton indices among study lakes. Bar graphs mean average value and error bars indicate standard deviation. Different alphabets indicate significant difference among cluster groups based on Dunn’s multiple comparison test ( $P < 0.05$ ).

**Table 3.** Dominant species at each lake during study period.

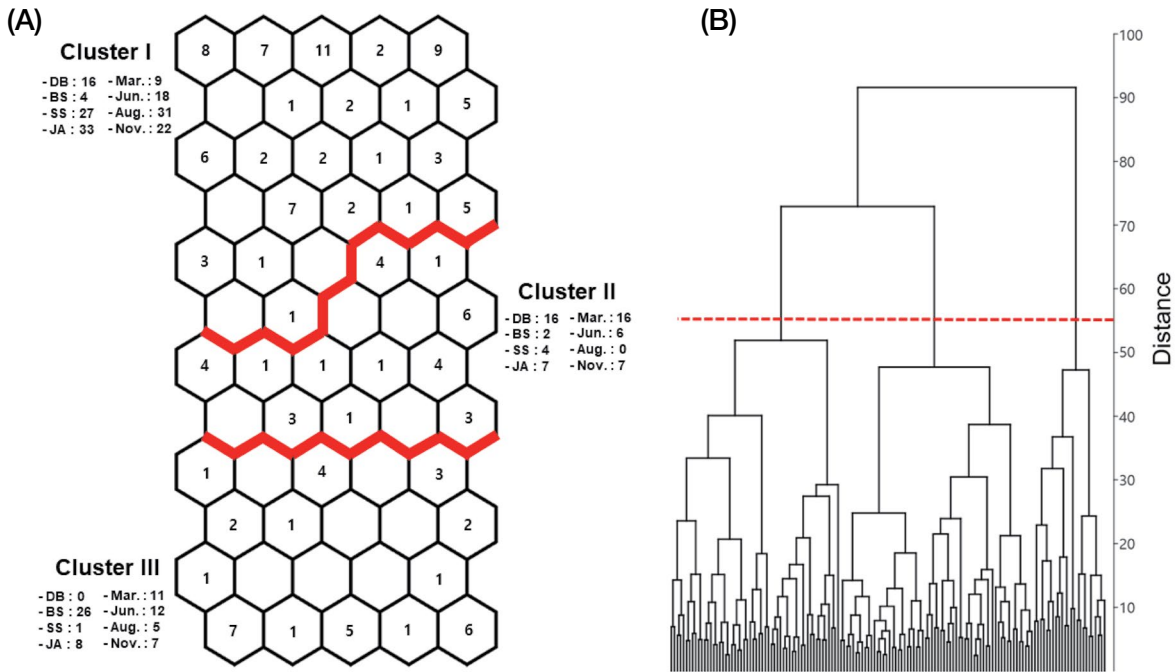
|         |       | Dominant species (%)                 |  | Subdominant species (%)                                      |  |
|---------|-------|--------------------------------------|--|--|--|
|         |       |                                      |  |  |  |
| Dongbok | Mar.  | <i>Asterionella formosa</i> (59.6)   |  | <i>Oscillatoria</i> sp. (7.3)                                |  |
|         | Jun.  | <i>Synedra acus</i> (29.4)           |  | <i>Oscillatoria</i> sp. (15.9)                               |  |
|         | Aug.  | <i>Volvox</i> sp. (42.8)             |  | <i>Scenedesmus ecornis</i> (11.7)                            |  |
|         | Nov.  | <i>Aulacoseira granulata</i> (27.0)  |  | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> (15.9) |  |
|         | Total | <i>Volvox</i> sp. (18.0)             |  | <i>Asterionella formosa</i> (12.9)                           |  |
| Boseong | Mar.  | <i>Stephanodiscus</i> sp. (23.4)     |  | <i>Cyclotella</i> sp. (12.3)                                 |  |
|         | Jun.  | <i>Aphanocapsa</i> sp. (12.6)        |  | <i>Nitzschia palea</i> (6.5)                                 |  |
|         | Aug.  | <i>Merismopedia minima</i> (31.4)    |  | <i>Phormidium</i> sp. (16.5)                                 |  |
|         | Nov.  | <i>Cyclotella</i> sp. (21.4)         |  | <i>Aulacoseira ambigua</i> (12.1)                            |  |
|         | Total | <i>Stephanodiscus</i> sp. (9.2)      |  | <i>Cyclotella</i> sp. (8.9)                                  |  |
| Sangsa  | Mar.  | <i>Asterionella formosa</i> (85.4)   |  | <i>Fragilaria crotonensis</i> (4.9)                          |  |
|         | Jun.  | <i>Fragilaria crotonensis</i> (45.5) |  | <i>Aulacoseira ambigua</i> (9.9)                             |  |
|         | Aug.  | <i>Cyclotella</i> sp. (25.9)         |  | <i>Aphanocapsa</i> sp. (23.1)                                |  |
|         | Nov.  | <i>Fragilaria crotonensis</i> (18.4) |  | <i>Aulacoseira granulata</i> (16.4)                          |  |
|         | Total | <i>Asterionella formosa</i> (48.7)   |  | <i>Fragilaria crotonensis</i> (11.3)                         |  |
| Juam    | Mar.  | <i>Asterionella formosa</i> (67.5)   |  | <i>Fragilaria crotonensis</i> (4.3)                          |  |
|         | Jun.  | <i>Aphanocapsa</i> sp. (26.2)        |  | <i>Fragilaria crotonensis</i> (11.4)                         |  |
|         | Aug.  | <i>Oscillatoria</i> sp. (27.8)       |  | <i>Coelastrum cambricum</i> (20.4)                           |  |
|         | Nov.  | <i>Aphanocapsa</i> sp. (18.6)        |  | <i>Aulacoseira granulata</i> (14.7)                          |  |
|         | Total | <i>Asterionella formosa</i> (26.3)   |  | <i>Aphanocapsa</i> sp. (12.9)                                |  |

나타냈다 ( $A = 0.062$ ,  $P < 0.01$ ).

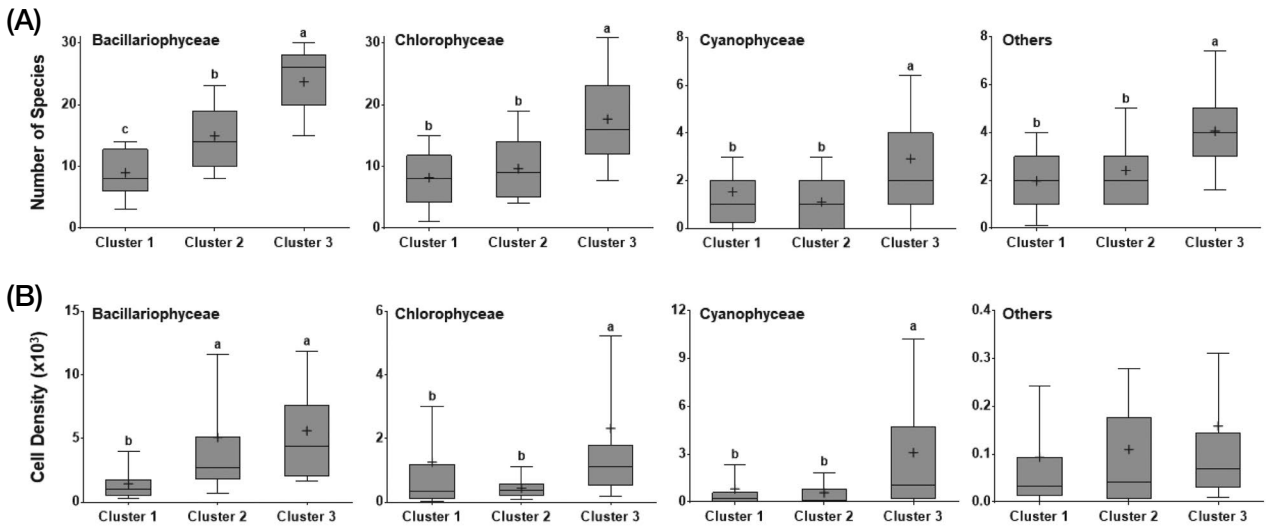
식물플랑크톤 군집은 SOM 지도에서 상하로 구분지어 나누어졌으며, 시공간적 특성을 잘 반영하여 구분되었다

(Fig. 3(A)). 우선적으로 보성호의 지점들과 나머지 호수들의 지점들이 지도 상하단부로 나누었고, 3번 클러스터가 위치한 지도 하단부에는 주로 보성호의 지점들이 위치하





**Fig. 3.** The results of self-organizing map. (A) clusters in SOM, and (B) dendrogram of SOM units using the Ward linkage with Euclidean distance. Small numbers in SOM map mean number of sites. DB: Dongbok, BS: Boseong, SS: Sangsa, JA: Juam.



**Fig. 4.** Differences of number of phytoplankton species (A) and cell density (B) according to the SOM. The mean ('+'), median (horizontal solid line), range from the 10th to the 90th percentile (error bar) are shown in each box. Letters on the bars indicate significant difference among cluster groups based on Dunn's multiple comparison test ( $P < 0.05$ ).

였다. 보성호를 제외한 나머지 호수의 경우 1번 클러스터와 2번 클러스터가 위치한 지도 상단부와 중단부에 주로 위치하고 있었고, 지도 상단부인 1번 클러스터에는 주로 상사호와 주암호의 지점들이 위치하였으며, 지도 중단부인 2번 클러스터에는 동북호의 지점들이 가장 많았으나 동북

호는 1번 클러스터와 2번 클러스터에 동일하게 분포하는 것으로 확인되었다. 또한 조사 시기적으로 1번 클러스터의 경우 6월, 8월과 11월 조사가 주로 분포한 반면, 2번과 3번 클러스터의 경우 3월 조사가 다른 시기에 비해 많이 분포하고 있었다. 그룹화된 각각의 클러스터 내 식물플랑크톤

**Table 4.** Result of indicator species analysis in each group ( $P < 0.05$ ).

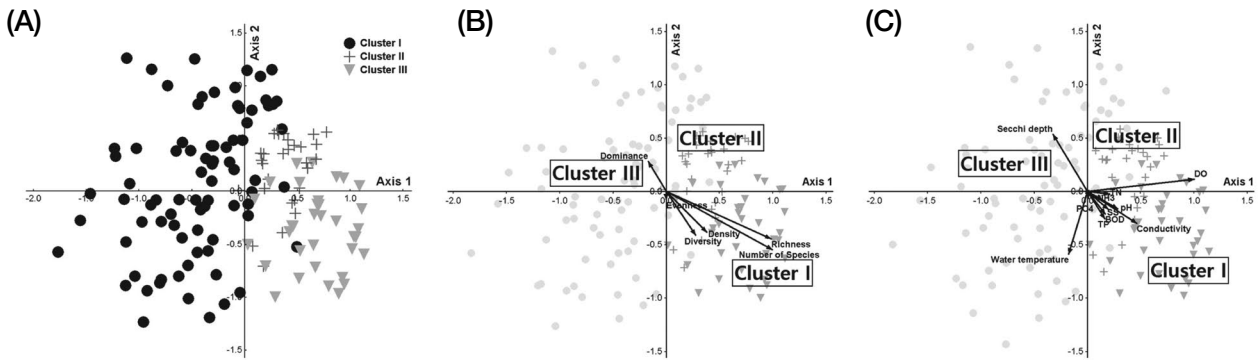
| Cluster | Species   | IndVal (%) | P value | Cell Density ( $\times$ cells mL <sup>-1</sup> )* |            |             |
|---------|---|------------|---------|---|------------|-------------|
|         |   |            |         | Cluster I   | Cluster II | Cluster III |
| I       | <i>Coelastrum cambricum</i>                           | 28.1       | 0.0016  | 314 (952)   | 7 (25)     | 58 (326)    |
|         | <i>Scenedesmus ecornis</i>                            | 20.0       | 0.0064  | 104 (557)   | 1 (3)      | 4 (18)      |
|         | <i>Tetraedron minimum</i>                             | 28.8       | 0.0130  | 25 (54)   | 11 (38)    | 8 (18)      |
| II      | <i>Kephyrion rubri-claustri</i>                       | 36.0       | 0.0002  | 2 (6)   | 69 (95)    | 25 (48)     |
|         | <i>Oscillatoria quasiperforata</i> var. <i>crassa</i> | 18.8       | 0.0176  | – (–)   | 202 (815)  | 31 (148)    |
| III     | <i>Nitzschia</i> sp.                                  | 57.3       | 0.0002  | 14 (32)   | 26 (37)    | 271 (382)   |
|         | <i>Navicula cryptocephala</i>                         | 55.4       | 0.0002  | 4 (10)  | 6 (14)     | 67 (75)     |
|         | <i>Monoraphidium contortum</i>                        | 50.3       | 0.0002  | 6 (16)  | 46 (50)    | 160 (314)   |
|         | <i>Trachelomonas</i> sp.                              | 47.5       | 0.0002  | 5 (12)  | 4 (11)     | 47 (132)    |
|         | <i>Scenedesmus abundans</i>                           | 47.4       | 0.0002  | 7 (29)  | 6 (14)     | 107 (208)   |
|         | <i>Stephanodiscus</i> sp.                             | 46.1       | 0.0002  | 10 (38)   | 79 (253)   | 919 (1,644) |
|         | <i>Nitzschia acicularis</i>                           | 42.2       | 0.0002  | 2 (8)   | 5 (11)     | 281 (662)   |
|         | <i>Monoraphidium arcuatum</i>                         | 41.3       | 0.0002  | 5 (15)  | 27 (31)    | 113 (282)   |
|         | <i>Nitzschia palea</i>                                | 39.2       | 0.0002  | 3 (10)  | 15 (28)    | 265 (883)   |
|         | <i>Achnanthes</i> sp.                                 | 38.9       | 0.0008  | 23 (62)   | 87 (251)   | 72 (73)     |
|         | <i>Navicula</i> sp.                                   | 37.9       | 0.0006  | 9 (29)  | 17 (38)    | 34 (33)     |
|         | <i>Aulacoseira distans</i>                            | 37.0       | 0.0018  | 23 (48)   | 63 (104)   | 75 (92)     |
|         | <i>Scenedesmus acuminatus</i>                         | 35.1       | 0.0002  | 3 (13)  | 2 (4)      | 91 (242)    |
|         | <i>Fragilaria capucina</i>                            | 34.9       | 0.0002  | 2 (6)   | 20 (33)    | 53 (92)     |
|         | <i>Dictyosphaerium pulchellum</i>                     | 34.1       | 0.0002  | 5 (24)  | 3 (15)     | 188 (565)   |
|         | <i>Pandorina morum</i>                                | 33.7       | 0.0002  | 2 (6)   | 2 (7)      | 62 (137)    |
|         | <i>Micractinium pusillum</i>                          | 32.4       | 0.0002  | 14 (84)   | 7 (23)     | 91 (158)    |
|         | <i>Phormidium</i> sp.                                 | 29.5       | 0.0016  | 55 (233)  | 73 (180)   | 543 (1,493) |
|         | <i>Aulacoseira granulata</i> var. <i>angustissima</i> | 28.6       | 0.0062  | 22 (91)   | 154 (312)  | 150 (229)   |
|         | <i>Dictyosphaerium tetrachotomum</i>                  | 28.5       | 0.0002  | 1 (3)   | 1 (5)      | 63 (184)    |
|         | <i>Stephanodiscus hantzschii</i>                      | 26.6       | 0.0002  | – (–)   | 3 (10)     | 308 (716)   |
|         | <i>Anabaena</i> sp.                                   | 26.6       | 0.0002  | 4 (18)  | 2 (6)      | 91 (221)    |
|         | <i>Scenedesmus quadricauda</i>                        | 24.4       | 0.0012  | 12 (43)   | 1 (3)      | 43 (118)    |
|         | <i>Scenedesmus denticulatus</i>                       | 24.0       | 0.0054  | 13 (58)   | 7 (19)     | 27 (48)     |
|         | <i>Merismopedia minima</i>                            | 21.3       | 0.0006  | 6 (48)  | – (–)      | 730 (2,284) |
|         | <i>Crucigenia crucifera</i>                           | 15.2       | 0.0296  | 17 (75)   | 3 (10)     | 152 (654)   |

\*Values indicated mean (standard deviation).

분류군별 종수와 개체수를 비교한 결과, 외편모조류를 포함한 기타조류의 개체수를 제외한 나머지 요인에서 모두 유의한 차이를 나타냈다(Dunn's test,  $P < 0.01$ ; Fig. 4). 3번 클러스터의 경우 거의 모든 분류군에서 종수 및 개체수가 다른 클러스터에 비해 높은 수준을 나타냈고, 1번과 2번 클러스터의 경우 분류군별로 상이한 결과를 보이긴 하였으나 차이는 크지 않은 것으로 확인되었다.

ISA를 통한 각 그룹별 지표종을 분석한 결과 총 31종이 선정되었다( $P < 0.05$ ; Table 4). 1번 클러스터의 경우 3종,

2번 클러스터의 경우 2종으로 분석되었고, 3번 클러스터의 경우 26종으로 지표종의 수가 가장 많았다. 1번 클러스터의 경우 지표종 모두가 녹조류로 확인되었으나, 2번 클러스터의 경우 지표종은 기타조류(황색조류)인 *Kephyrion rubri-claustri*, 남조류인 *Oscillatoria quasiperforata* var. *crassa*로 두 클러스터 간 차이가 있었다. 3번 클러스터의 경우 남조류와 기타조류는 각각 3종, 1종으로 적었지만 규조류, 녹조류는 각각 11종으로 지표종의 수가 많았다.



**Fig. 5.** The results of non-metric multidimensional scaling (NMDS) ordination based on phytoplankton communities of 4 study lakes. (A) NMDS scatter plot, (B) NMDS plot with phytoplankton indices, (C) and with environmental variables. Only significant variables ( $P < 0.05$ ) were represented on NMDS plot.  $PO_4$ :  $PO_4$ -P,  $NH_3$ :  $NH_3$ -N.

### 3. 식물플랑크톤 군집과 환경요인과의 관계

조사기간 동안 출현한 식물플랑크톤의 개체수를 이용하여 NMDS를 분석한 결과, 3개의 클러스터가 명확하게 구분되었다(Stress value: 0.2; Fig. 5(A)). 2번 축을 기준으로 1번 클러스터는 왼쪽, 2번과 3번 클러스터는 오른쪽에 위치하였고, 2번 클러스터와 3번 클러스터는 1번 축을 기준으로 위, 아래로 서로 구분되었다.

식물플랑크톤 군집지수와 NMDS 각 축과의 상관분석 결과, 종수, 개체수, 우점도 지수, 다양도 지수와 풍부도 지수에서 1번 축과 2번 축에서 모두 유의성을 나타냈다(Fig. 5(B)). 특히 군집지수의 경우 1번 축과의 상관성이 큰 것으로 확인되었는데, 종수( $R = 0.700$ ,  $P < 0.01$ ), 종풍부도( $R = 0.682$ ,  $P < 0.01$ )와 높은 양의 상관성을 나타낸 반면, 우점도( $R = -0.281$ ,  $P < 0.01$ )와는 음의 상관성을 보였다. 환경요인의 경우 수온, pH, SS, Secchi depth, DO, BOD, SS, TP와 전기전도도는 NMDS의 1번 축과 2번 축 모두 유의한 상관성을 보인 반면, TN( $R = 0.247$ ,  $P < 0.01$ )의 경우 1번 축과 유의한 양의 상관성을 보였고,  $NH_3$ -N( $R = -0.205$ ,  $P < 0.05$ )과  $PO_4$ -P( $R = -0.352$ ,  $P < 0.05$ )의 경우 2번 축과 유의한 음의 상관성을 보였다(Fig. 5(C)). 특히 DO( $R = 0.748$ ,  $P < 0.01$ )와 1번 축과의 상관성이 높게 나타났고, 수온, 전기전도도와 Secchi depth 역시 각 축과의 관계성이 다른 요인에 비해 높은 것으로 분석되었다.

## 고찰

본 연구를 통해 확인된 보성강 유역에 위치한 호수들의 식물플랑크톤의 다양성 및 밀도는 시공간적으로 구분

되었다. 특히 보성호는 공간적으로 다른 세 호수로 구분되었는데 이는 영양염류의 차이에 의한 영향이 반영된 것으로 보인다. Kwon *et al.* (2014)은 국내 주요 호수들의 지형 지리학적 특성과 수질자료를 이용하여 경향성을 분석하였고 이를 통해 호수들의 사용목적에 따른 수질의 차이가 있음을 보고하였다. 보성호의 경우 발전용수, 생활용수 및 농업용수로 주로 이용되고 있으며 동북호, 주암호와 상사호는 상수원 보호구역으로 지정되어 상수원관리규칙에 따라 지속적으로 관리되고 있다(MOE, 2013). 이로 인해 영양염은 다른 호수에 비해 보성호에서 다소 높은 수준을 보였고 이는 식물플랑크톤 군집에 큰 차이를 가져온 것으로 보인다. 1번과 2번 클러스터는 3월과 나머지 조사시기(6월, 8월, 11월)로 구분되었는데, 이를 통해 주로 1번과 2번 클러스터에 속하는 동북호, 상사호와 주암호의 식물플랑크톤 군집이 시기적으로 구분됨을 알 수 있다. 세 호수에서 3월의 식물플랑크톤 우점종은 *Asterionella formosa*로 우점을 50% 이상을 차지하고 있고, 상대적으로 규조류의 종 다양성 및 밀도가 높으며 1번과 2번 클러스터의 규조류 종수와 개체수에서 유의성이 확인된 것으로 보아(Dunn's test,  $P < 0.01$ ) 봄철인 3월의 식물플랑크톤 군집이 다른 시기의 식물플랑크톤 군집과 구분되는 것으로 사료된다.

식물플랑크톤 군집의 차이는 ISA를 통해서도 확인이 가능하였다. ISA의 경우 각 종의 밀도와 출현한 빈도수가 복합적으로 작용하여 산출되며, 즉 지표종의 수가 낮을수록 군집 간의 유사도는 높은 것으로 해석이 가능하다(Nam *et al.*, 2018). 따라서 보성호의 지점이 대부분 포함된 3번 클러스터의 지표종의 수가 다른 클러스터에 비해 월등히 높은 26종으로 확인된 것으로 보아 다른 호수와의 식물플랑크톤 군집 구성 차이가 있음을 나타낸다. 또한 1번 클러스터의 지표종과 2번 클러스터의 지표종은 분



류군이 서로 다르게 확인되었는데 이로 인해 1번과 2번 클러스터가 시기적으로 구분되고 있음을 알 수 있다. 녹조류의 경우 수온이 증가하는 시기의 주요 출현종으로 잘 알려져 있고 (Horne and Goldman, 1994), 특히 *Coelastrum*, *Scenedesmus*를 포함한 많은 무편모성 녹조류의 경우 수온이 높고 영양염류가 풍부한 곳을 선호한다고 알려져 있는데 (Reynolds *et al.*, 2002), 1번 클러스터의 지표종이 이들종으로 산출된 결과를 뒷받침해준다. 또한 황색조류는 수온이 낮은 시기에 빈영양호수에서 주로 발견되는 특성을 보이는데 (Hutchinson, 1967), 이는 3월 조사가 주로 포함된 2번 클러스터의 지표종이 *Kephyrion rubri-claustri*로 선정된 이유로 해석된다. 특이하게도 *Oscillatoria*와 같은 남조류의 경우 수온이 낮은 시기보다 수온이 높은 시기를 선호하는데 반해, 3월 조사의 지표종으로 확인되었는데 이는 2014년 겨울철에 동북호에서 비특이적으로 출현한 결과를 반영한 것으로 생각된다.

Cho *et al.* (2017)은 전라남도 호소의 식물플랑크톤 군집은 상대적으로 영양염류와의 관련성이 낮고 수온, 부유물질 및 DO 등과 관련성이 높다고 분석하면서 이러한 영양염의 경우 외부의 수리수문학적 특성 및 오염원 유입 등에 의해 영향이 크게 나타나 (Carmack *et al.*, 1979) 주기성을 갖는 수온과 수온의 영향을 크게 받는 다른 인자들이 식물플랑크톤 군집과의 관계성이 높게 나온 것으로 설명하였다. 본 연구에서도 NMDS 분석을 통해 식물플랑크톤 군집의 시공간적 변화와 환경요인은 서로 관련성이 있으며 특히 영양염에 비해 수온, DO, 전기전도도, Secchi depth의 영향이 큰 것으로 확인되어 이와 유사한 결과를 나타냈다. 추가적으로 앞서 설명한 바와 같이 본 대상 호수 중 보성호를 제외한 나머지 호수의 인위적 관리로 인한 낮은 영양염으로 인해 NMDS의 각 축과 영양염들 간의 관계적 유의성이 낮게 나온 것으로 보인다.

주암호와 상사호의 식물플랑크톤 군집은 하나의 동일한 그룹에 속하였는데 이것으로 보아 두 호수 간 연결된 도수터널에 의해 상사호의 식물플랑크톤 군집이 주암호의 식물플랑크톤 군집에 영향을 받았을 가능성이 높다. 특히 상사호의 경우 평균 종수 및 개체수가 주암호보다 낮게 나타나 주암호의 식물플랑크톤 군집이 상사호의 식물플랑크톤 군집을 포함하고 있을 것으로 생각된다. 또한 주암호의 경우 우점종을 통해 계절에 따른 식물플랑크톤의 천이가 이루어짐을 확인할 수 있는 반면, 상사호의 경우 계절의 진행과는 관계없이 규조류의 우점이 높게 나타남을 볼 수 있다. 온대지방에서 규조류는 수온이 낮은 시기에 우점종으로 잘 알려져 있는데 이는 다른 분류군에 비해 온도 변화에 대한 내성이 강해 경쟁에서 우위를 차지하기 쉽고, 상

대적으로 무거운 피각을 갖기 때문에 밀도가 무거운 낮은 수온에서 가라앉는 정도가 낮기 때문이다 (Werner, 1977). 주암호 도수터널의 유입부는 고정형으로 주암호의 저수위가 EL. 85.0m임을 감안하여 바닥표고 EL. 80.0m에 위치하고 있다 (NIER/YRERC, 2010). 이로 인해 상사호로 유입되는 호소수는 표층수와 최소 5m 이상의 수심차이가 나는 곳에서 상대적으로 저층수가 이동하며, 특히 수위변동이 심하고, 표층과 저층의 수온차이가 높게 나타나는 여름철의 경우 상대적으로 낮은 온도의 호소수가 상사호로 유입되고 이로 인해 여름철의 상사호는 규조류의 우점이 높게 나타나는 것으로 볼 수 있다. 다만 두 호수 간 식물플랑크톤 군집의 유사성이 주암호 식물플랑크톤 군집의 직접적 유입으로 인해 이루어진 것인지 주암호에서 유입되는 수질에 의해 상사호의 식물플랑크톤 군집이 변화된 것인지는 더 많은 연구가 필요할 것으로 보인다.

현재까지 보성강 유역에 위치하는 호수들의 식물플랑크톤 군집에 대한 연구는 많이 진행되었으나 대부분 상수원인 동북호나 주암호에 국한되어 진행되었고, 각 식물플랑크톤 군집과 수질 및 지형지질학적 특성과의 관계 분석이 주를 이루고 있다 (Choi *et al.*, 1994; Lee and Song, 1995; Lee *et al.*, 2005; Jung *et al.*, 2008; Song *et al.*, 2013). 하지만 대도시나 산업시설이 거의 없고 토지피복이 주로 산지 (72.3%)로 구성되어 있는 보성강 유역의 특성상 (WAMIS, <http://www.wamis.go.kr>), 호수 내 식물플랑크톤 군집의 변화는 오염원의 유입에 따른 내부적인 변화보다 외부에서 유입되는 식물플랑크톤의 군집의 영향이 클 수 있다. 본 연구는 보성강 유역에 위치한 호수들에서 확인된 식물플랑크톤 군집을 처음으로 비교 분석한 연구로써 그 의의가 크다. 특히 본 연구 결과, 보성강 유역 내 호수들에서 식물플랑크톤 군집의 시공간적 분포는 호수들의 특징들에 의해 군집의 유사성을 나타내었으며, 이를 통해 앞으로의 식물플랑크톤 군집 변화를 분석하는 데 있어서 다양한 환경요인과의 관계성과 함께 수계 연결성에 따른 식물플랑크톤 분포 양상을 포괄적으로 분석할 경우 더욱 효과적일 것으로 사료된다. 또한 아직까지 도수터널에 의해 연결된 호수들 간의 생물상 변화에 관한 연구는 미비한 실정이나, 본 연구를 통해 식물플랑크톤 군집 변화에 있어 도수터널의 구조가 중요한 요인으로 작용하고 있음을 확인하였다. 이러한 결과는 호수 내 식물플랑크톤 관리 등을 위한 기초 자료로써 활용할 수 있을 것으로 예상되며 차후 방사성 동위원소 혹은 유전자 분석 등으로 더욱 정밀한 연구가 진행될 경우 이러한 생물 군집의 연속성이 보다 더 명확히 확인될 것으로 기대된다.

## 적 요

본 연구는 보성강 유역에 위치한 호수들에서 식물플랑크톤 군집의 시공간적 차이를 비교하고 이러한 군집 구조의 차이에 영향을 미치는 요인들을 확인하고자 2014년 3월부터 2017년 11월까지 분기별 조사를 시행하였다. 조사 결과, 보성호는 다른 호수들에 비해 식물플랑크톤의 다양성이 풍부하고 밀도 역시 높은 수준으로 확인되어 시공간적으로 큰 차이를 보였다. 또한 3월 조사에서 확인된 식물플랑크톤 군집은 다른 조사시기와 우점종을 포함한 규조류와 녹조류의 군집에서 구분되는 특성을 나타냈다. Indicator species analysis를 통해 확인된 각 그룹 간 지표종을 확인한 결과, 계절에 따른 식물플랑크톤 천이와 영양농도에 따른 다양성 및 밀도 변화를 반영한 것으로 산출되어 호수들의 식물플랑크톤 군집이 시공간적으로 구분되었음을 나타냈다. Non-metric multidimensional scaling을 통해 보성강 유역 내 호수들의 식물플랑크톤 군집 구조에 있어 Secchi depth, 수온, 전기전도도, DO 등이 중요한 요인임을 확인하였고, 영양염을 포함한 다양한 환경요인과 함께 식물플랑크톤 군집 차이에 영향을 끼친 것으로 분석되었다.

**저자정보** 조현진(전남대학교 생물학과 연구원), 나정은(전남대학교 생물학과 연구원), 이학영(전남대학교 생물학과 교수)

**저자기여도** 개념설정: 조현진, 자료수집: 조현진, 나정은, 자료분석: 조현진, 원고 초안작성: 조현진, 원고 검토 및 교정: 조현진, 나정은, 이학영

**이해관계** 본 연구는 이해관계의 충돌 여지가 없습니다.

**연구비** 본 연구는 영산강 수계관리위원회 국립환경과학원 영산강물환경연구소에서 시행한 영산강섬진강 수계 환경기초조사사업의 연구비로 수행되었습니다.

## REFERENCES

Allan, J.D. 1995. Stream ecology - Structure and function of running waters. Chapman and Hall, London. 388pp.  
 APHA. 1999. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association. 21st eds. Wasington, D.C.  
 Bolgovics, Á., G. Várбірó, É. Ács, Z. Trábert, K.T. Kiss, V. Pozderka, J. Görgényi, P. Boda, B.A. Lukács, Z. Nagy-László, A. Abonyi and G. Borics. 2017. Phytoplankton

of rhithral rivers: Its origin, diversity and possible use for quality-assessment. *Ecological Indicators* **81**: 587-596.  
 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.  
 Cho, H.J., M.H. Jeong, J.E. Na and H.Y. Lee. 2017. Relationship between Phytoplankton community and water quality in lakes in Jeonnam using SOM. *Korean Journal of Ecology and Environment* **50**(1): 148-156.  
 Choi, M.K., B.H. Kim, Y.T. Chung and I.S. Wui. 1994. Occurrence and dynamics of phytoplankton in Lake Chuam. *Korean Journal of Limnology* **27**(1): 79-91.  
 Dufřene, M. and P. Legendre. 1997. Species assemblages and indicator species: the need for a flexible asymmetrical approach. *Ecological Monographs* **67**(3): 345-366.  
 Hirose, H.M., T. Akiyama, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumana, H. Kobayasi, E. Takahashi, T. Tsumura, M. Hirano and T. Yamagishi. 1977. Illustration of the Japanese freshwater algae. Uchidarokakuho Publishing Co. Ltd., Tokyo. 932pp.  
 Horne, A.J. and C.R. Goldman. 1994. Limnology. McGraw-Hill, Inc. New York. 576pp.  
 Hutchinson G.E. 1967. A Treaties on Limnology. Vol. 2. John Willey & Sons, Inc. New York. 1115pp.  
 Jung, M.H., J.H. Park, S.D. Kim, D.H. Kim, N.I. Chang and H.Y. Lee. 2008. Seasonality of phytoplankton in Dongbok Lake, Korea. *Korean Journal of Environmental Biology* **26**(4): 367-376.  
 Kim, Y.J., B.H. Kim, H.S. Kim, H.Y. Lee and S.J. Hwang. 2009. Biology of freshwater. Junghaengsa, Seoul. 260pp.  
 Kohonen, T. 2001. Self-organizing Maps. Springer, Berlin.  
 Komárek, J. and K. Anagnostidis. 2005. Cyanoprokaryota. 2. Teil: Oscillatoriales: Süßwasserflora on Mitteleuropa, Bd 19/2. p. 1-759. (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart.  
 Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1986. Bacillariophyceae 1. Teil: Naviculaceae. In: Süßwasserflora on Mitteleuropa 2(1) (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart and New York. 876pp.  
 Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1988. Bacillariophyceae 2. Teil: Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae. In: Süßwasserflora on Mitteleuropa 2(2) (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart and New York. 596pp.  
 Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991a. Bacillariophyceae 3. Teil: Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. In: Süßwasserflora on Mitteleuropa 2(3) (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart and New York. 576pp.  
 Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991b. Bacillariophyceae 4. Teil: Achnanthaceae Kritische Ergänzungen zu Navic-

- ula ((Lineolutae) und Gomphonema. In: Süßwasserflora on Mitteleuropa 2(4) (Ettl, H., J. Gerloff, H. Heying and D. Mollenhauer, eds.). Gustav Fischer Verlag, Stuttgart and New York. 437pp.
- Kwon, Y.S., M.J. Bae, J.S. Kim, Y.J. Kim, B.H. Kim and Y.S. Park. 2014. Characterizing changes of water quality and relationships with environmental factors in the selected Korean reservoirs. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(3): 146-159.
- Lee, K.H., S.K. Baik and B.H. Kim. 2005. Dynamics of phytoplankton community in Lake Juam, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **38**(2): 249-260.
- Lee, O.M. and H.Y. Song. 1995. The annual dynamics of standing crops and distribution of phytoplankton of Juam lake in 1993. *Korean Journal of Limnology* **28**(4): 427-436.
- McCune, B. and M.J. Mefford. 1999. Multivariate Analysis of Ecological Data. Version 4.25. MjM Software. Gleneden Beach.
- McCune, B., J.B. Grace and D.L. Urban. 2002. Analysis of ecological communities (Vol. 28). MjM software design, Gleneden Beach.
- McGregor, G.G. 2007. Freshwater cyanoprokaryota of North-Eastern Australia I: Oscillatoriales. Flora of Australia Supplementary series no. 24. ABRS. Canberra.
- McNeil, J.R. and P. Engelke. 2016. The great acceleration: An environmental history of the Anthropocene since 1945. The Belknap Press. Massachusetts. 275pp.
- Ministry of Environment (MOE). 2013. Research for the improvement of investigation for guideline of lake environment. 299pp.
- Ministry of Environment (MOE). 2013. Final Report: Research on the improvement of algae management system through the operation of algae expert forum. 152pp.
- Nam, H.K., Y.J. Song, S.I. Kwon, J.W. Eo, S.S. Yoon, B.K. Kwon and M.H. Kim. 2018. Characteristics of Ground-dwelling Invertebrate Communities at Nari Basin and Tonggumi Area in Ulleungdo Island. *Korean Journal of Environmental Biology* **36**(1): 21-32.
- National Institute of Environmental Research/Yeongsan River Environmental Research Center (NIER/YRERC). 2010. Yeongsanriver Newsletter Vol. 6. 20pp.
- 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.
- 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.
- Reynolds, C.S. and J.P. Descy. 1996. The production, biomass and structure of phytoplankton in large rivers. *Archiv für Hydrobiologie* **10**: 161-187.
- Reynolds C.S., V. Huszar, C. Kruk, L. Naselli-Flores and S. Melo. 2002. Towards a functional classification of the freshwater phytoplankton. *Journal of Plankton Research* **24**: 417-428.
- Sommer, U., Z.M. Gliwicz, W. Lampert and A. Duncan. 1986. The PEG-model of seasonal succession of planktonic events in fresh waters. *Archiv für Hydrobiologie* **106**: 473-485.
- Song, H.J., K.S. Hwang, J.H. Park, H.Y. Lee, H.W. Kim, J.S. Kim, S.H. Lee, D.O. Lim and B.J. Lim. 2013. Water quality variation and biotic community characteristics in Juam Lake (2011). *Korean Journal of Environmental Biology* **31**(1): 37-44.
- Thurman, H.V. 2004. Introductory oceanography, 10th ed. Prentice Hall, Inc, New Jersey. 624pp.
- Vannote, R.L., G.W. Minshall, K.W. Cummins, J.R. Sedell and C.E. Cushing. 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* **37**: 130-137.
- Vensato, J. and R. Alhoniemi. 2000. Clustering of the self-organizing map. *IEEE Transactions on Neural Network* **11**: 586-600.
- Wehr, J.D. and R.G. Sheath. 2003. Freshwater algae of North America: Ecology and Classification. Academic Press, Amsterdam.
- Werner, D. 1977. The Biology of Diatoms. University of California Press, Berkeley. 498pp.
- Wetzel, R.G. 1999. Limnology: Lake and River Ecosystems. 3rd ed. Academic Press, Sandiego. U.S.A. 1006pp.