

환경요인이 춘천호의 식물플랑크톤 천이 및 군집구조에 미치는 영향

백준수 · 윤석제 · 김헌년 · 심연보 · 유순주 · 임종권*

국립환경과학원 한강물환경연구소

Effects of Environmental Factors on Phytoplankton Succession and Community Structure in Lake Chuncheon, South Korea. Jun-Soo Baek (0000-0002-9087-8823), Seok-Jea Youn (0000-0003-1045-4754), Hun-Nyun Kim (0000-0002-3339-4486), Youn-Bo Sim (0000-0003-2317-8146), Soon-Ju Yoo (0000-0002-1860-131X) and Jong-Kwon Im* (0000-0003-3994-5127) (*Han River Environment Research Center, National Institute of Environmental Research, Yangpyeong 12585, Republic of Korea*)

Abstract Effects of environmental factors on phytoplankton succession and community structure were studied in Lake Chuncheon located in Bukhan River, South Korea. The data were sampled at three sites such as CC1 (lower side), CC2 (middle side), and CC3 (upper side of Lake Chuncheon) from 2014 to 2017. The annual average precipitation in Lake Chuncheon was 992 mm during the study period (2014~2017), and the annual precipitation was lower than 800 mm in 2014 and 2015. The annual average water temperature, total phosphorus (TP), and total nitrogen (TN) ranged from 17.0 to 21.1°C, 0.012 to 0.019 mg L⁻¹, and 1.272 to 1.922 mg L⁻¹, respectively. The TN concentration was relatively high in 2015 compared with the other study years, as a drought continued from 2014 to 2015. When comparing the correlation between precipitation and environmental factors, water temperature ($p < 0.01$) and TP ($p < 0.05$) showed positive correlations with rainfall. The average numbers of phytoplankton cells by branch were 2,094, 2,182, and 3,108 cells mL⁻¹ in CC1, CC2, and CC3, respectively. CC3 is considered advantageous for phytoplankton growth, even in small pollution sources due to low water depth. As a result of analyzing the relationship between precipitation and phytoplankton, the correlation between the two was shown to be high for 2016 ($p < 0.01$) and 2017 ($p < 0.05$), which is when precipitation was high. However, the correlation was not clear to 2014 and 2015. The relationship between water temperature and phytoplankton indicated a negative correlation with diatoms ($p < 0.01$), yet positive correlations with green algae ($p < 0.01$) and cyanobacteria ($p < 0.01$). Diatoms increased in spring and autumn, which are characterized by low water temperature, and green algae and cyanobacteria increased in summer, when the water temperature is high. Our findings provide a scientific basis for characteristics of phytoplankton and water quality and management at the Lake Chuncheon.

Key words: dominant species, Lake Chuncheon, phytoplankton, precipitation, environmental factors

서 론

수중 생태계에서 가장 중요한 생물 중 하나는 1차 생산자로서 수생태계의 물질 순환과 에너지 흐름에 중요한 역할을 하는 식물플랑크톤이다(Ali *et al.*, 2011). 식물플랑크톤의 군

Manuscript received 5 March 2019, revised 1 April 2019

revision accepted 4 April 2019

* Corresponding author: Tel: +82-31-770-7271, Fax: +82-31-773-2268,
E-mail: limjkk80@korea.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.

집은 환경변화에 민감하며 수온, 영양염류, 일사량, 강우 및 체류시간 등의 영향을 받는다(Reynolds, 1993). 강우 및 체류시간은 식물플랑크톤 발생에 물리적 영향을 부과함으로써 일반적인 계절적 흐름에 변화를 주거나 그 현상을 지연시키는 효과를 나타낸다(Reynolds, 1993; Sommer, 1995).

우리나라의 강수량은 계절적인 변화가 심하며, 몬순기후의 특징으로 여름에 약 50~60%의 강우가 집중된다(An and Jones, 2000). 따라서 강우 집중시기에 체류시간이 줄어들어 식물플랑크톤 발생의 성장이 둔화될 수 있다. 또한 강우가 적은 계절에서는 체류시간의 증가로 영양염류가 농축되어 식물플랑크톤의 대발생을 일으킬 수 있는 환경을 조성할 수 있다(Byun *et al.*, 2014).

수계 내 영양염류의 유입으로 부영양화 현상이 나타나면 양분 축적이 용이해진 식물플랑크톤이 대발생되어 수중의 용존산소를 고갈시켜 저산소증이 유발되고 수질과 생물다양성에 영향을 미치게 된다. 또한 유독한 2차 부산물을 발생시켜 수생태계의 먹이망과 물 소비자에게 해로운 영향을 끼친다(Paerl, 1998; Li *et al.*, 2007). 중국의 경우 호수의 60% 이상은 2000년대 초반까지 조류의 발생에 의해 부정적인 영향을 받았으며, 그 중 Tai 호는 2007년에 남조류 발생으로 인해 식수 공급에 차질을 빚기도 하였다(Pan *et al.*, 2006; Qin *et al.*, 2010). 최근 국내에서도 2011년과 2012년에 북한강 전역에서 남조류가 대발생하여 수도권 상수원 이용에 불편을 주었으며(You *et al.*, 2013; Lee *et al.*, 2016; Youn *et al.*, 2017), 낙동강 수계에서도 남조류의 출현빈도와 발생량이 증가하고 있는 실정이다(Park *et al.*, 2015). 또한 봄에 규조류 대발생은 정수장의 여과지를 폐쇄시켜 여과지속시간을 단축시키는 등 문제를 야기시키기 때문에 식물플랑크톤 발생에 영향을 미치는 환경요인을 파악하는 것은 매우 중요하다(Lim *et al.*, 2000).

댐의 건설은 경제성장과 생활수준을 향상시키고, 생활용수 및 농·공업용수 확보, 전력 생산 등 많은 경제적 가치를 가져오지만 하천의 상·하류를 댐으로 단절시켜 생태계의 변화를 일으킨다(Kim, 2012). 또한 댐 주변의 농경지나 숙박업소 등에서 오염원이 유입되어 부영양화 같은 현상이 나타날 수 있다. 춘천호는 수력발전을 위해 축조된 인공호수로, 상류에 매년 산천어 축제를 위해 하상 굴착과 임시 모래보를 설치 및 운영하고 있으며 레저 시설과 낚시터로 인해 오염원 유입 및 탁수의 발생 등에 의해 수질이 저하되고 있는 실정이다(HRERC, 2016). 2012년 청평호의 남조류 대발생은 상류 수계인 의암호의 유입이 원인이 되어 영향을 미친 것으로 보고되었으며(Byun *et al.*, 2014), 춘천호 또한 하류에 위치한 의암호 및 청평호 수질에 직접적인 영향을 줄 수 있다. 춘천호에 대한 연구는 단기간의 수질환경(Jeon *et*

al., 2012)과 가을철 식물플랑크톤의 연구(Kim *et al.*, 2012)만 수행되어 있을 뿐 대상 및 시간적 범위가 제한적이며, 환경요인과 식물플랑크톤 발생에 대한 관계를 정확히 분석하기 위해서는 단기간이 아닌 수년간에 걸쳐 일정하게 조사한 자료들이 필요하다.

본 연구는 4년간(2014~2017) 춘천호의 수질환경 및 강수량에 따른 식물플랑크톤 군집 및 우점종의 시·공간적 발생양상을 통계적으로 분석하여 춘천호의 장기적인 수생태 변화를 파악하는 것이다.

재료 및 방법

1. 조사지점 및 조사기간

강원도 춘천시 신북읍 용산리에 위치한 춘천댐은 1965년에 완공되었으며, 면적이 17km², 총 저수량이 약 1.5억톤이다. 상류에는 파로호, 하류에는 의암호가 위치해 있으며, 춘천호에 유입되는 주요 하천은 파로호 방류수와 화천천, 지촌천 등이 있다. 춘천호는 유입천을 중심으로 수생식물이 분포하며, 저서성 대형무척추동물 및 어류가 서식할 수 있는 다양한 서식 환경이 조성되어 한국고유생물종의 비율이 높은 것으로 알려져 있다(HRERC, 2016). 하지만, 유원지가 만들어지고, 캠핑장 및 낚시터 등 편의시설이 갖춰지면서 오염원에 노출되고 있는 실정이다(Chuncheon city, 2007).

춘천호의 수질과 식물플랑크톤을 조사하기 위해 2014년 3월부터 2017년 12월까지 매월 1회 조사를 수행하였다. 2014년은 3월, 5~8월, 10월 조사하였으며 결빙기는 조사기간에서 제외하였다. 조사지점은 춘천호 댐 앞 지점(CC1: 37°97'19.5"N, 127°67'48.8"E), 중류에 위치한 원평리 지점(CC2: 37°98'19.7"N, 127°66'18.3"E), 상류에 위치한 신포리 지점(CC3: 38°02'66.0"N, 127°64'82.6"E)을 대상으로 하였다(Fig. 1).

2. 채집 및 분석방법

1) 이화학적 요인

강수량은 기상청(<http://www.kma.go.kr>)에서 제공하는 자료를 이용하였으며, 수온, pH, 용존산소(Dissolved Oxygen: DO)는 다항목 수질측정기(YSI-6600D, YSI Inc., Yellow Springs, OH, USA)를 사용하여 현장에서 측정하였다. 수질 분석을 위한 시료는 채수기(8L Van dorn, Wildco., FL, USA)를 이용하여 표층 0.5m 깊이의 표층수를 채수한 후 수질분석을 위해 냉장 보관(4°C) 하였다. 엽록소 *a* (Chlorophyll *a*: Chl. *a*), 화학적 산소 요구량(Chemical Oxygen Demand: COD), 총

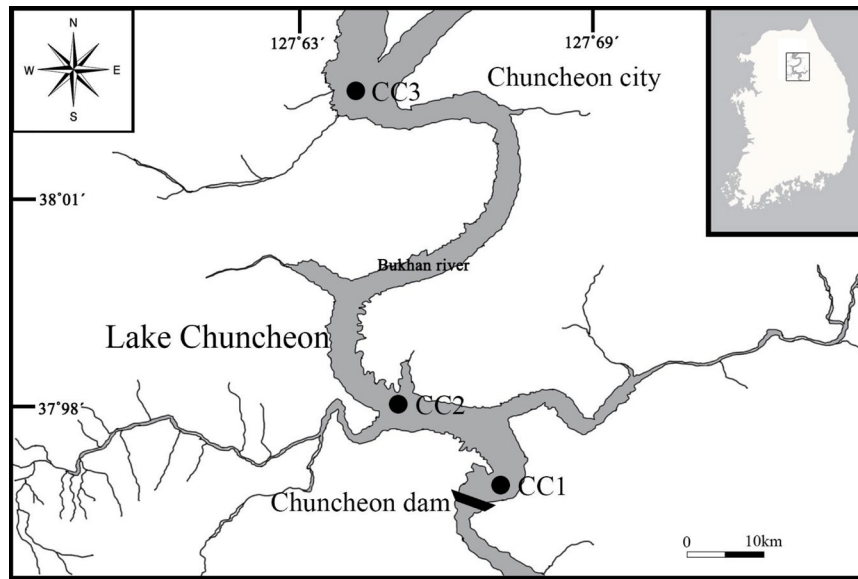


Fig. 1. Map showing the sampling sites in Lake Chuncheon, South Korea.

질소 (Total Nitrogen: TN), 용존성 총질소 (Dissolved Total Nitrogen: DTN), 총인 (Total Phosphorus: TP) 및 용존성 총인 (Dissolved Total Phosphorus: DTP) 등은 수질공정시험기준 (ME, 2014)에 준하여 분석하였다.

2) 생물학적 요인

식물플랑크톤의 군집 및 우점종을 조사하기 위해 채수한 시료 일정량을 Lugol's 용액으로 고정한 후 Sedgwick-Rafter counting chamber에 1 mL 넣고 광학현미경 (ECLIPSE Ni, Nikon, Japan)을 이용하여 100~400배로 검경하였다. 출현한 식물플랑크톤 분류군의 동정 및 분류는 Chung (1993), Krammer and Langebertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b), John *et al.* (2002) 및 Hirose *et al.* (1997)을 참고하였다.

식물플랑크톤의 군집구조를 파악하기 위해 출현한 종수와 현존량을 근거로 다양성 지수 (Shannon and Wiener, 1949), 우점도 지수 (Mcnaughton, 1967), 균등도 지수 (Pielou, 1966) 및 풍부도 지수 (Margalef, 1958)를 산출하였고 식물플랑크톤과 환경요인과의 상관관계 (Pearson's correlation analysis)는 통계프로그램 SPSS 18.0 (IBM Corp., Armonk, NY, USA)을 사용하여 분석하였다.

결과 및 고찰

1. 이화학적 환경요인

2014년부터 2017년까지 춘천호의 평균 강수량은 992 mm

로 주로 여름인 7, 8월에 집중되었으며 전체 강수량의 53%를 차지하였다. 2014년과 2015년 연평균 강수량은 800 mm 이하로 과거 10년간 (2008~2017년) 평균 강수량 (1,353 mm)에 비해 현저히 적어 갈수 현상이 발생하였으나, 2016년과 2017년에는 각각 1,334 mm과 1,201 mm로 과거 10년간 (2008~2017년) 평균 강수량과 유사하였다 (Fig. 2). 강우가 적었던 2014년과 2015년은 연평균 체류시간이 각각 73일과 58일인 반면에 2016년과 2017년은 각각 41일과 30일로 갈수 현상이 있던 2014년과 2015년보다 상대적으로 짧았다 (Fig. 2).

춘천호 세 지점의 연평균 DO는 9.4 (±1.2)~10.5 (±2.1) mg L⁻¹의 범위로 나타났으며, 연평균 수온과 pH는 각각 18.2 (±7.4)~21.1 (±7.2)°C와 7.9 (±0.5)~8.9 (±0.5)의 범위로 연도별 큰 차이가 없었다 (Table 1). COD는 호수의 오염도를 측정하기 위한 방법으로 BOD보다 많이 이용되며, 호수에 유기물이 많이 존재하면 높은 값을 지니게 된다 (Kim *et al.*, 2000). 춘천호에서 COD의 연평균 농도는 2.7 (±0.7)~4.2 (±1.5) mg L⁻¹의 범위를 보였으며, 2015년에 가장 높았다. COD 농도는 강우에 의한 유량증가로 희석되어 낮아지는 경향을 보일 수 있으나 (Kim *et al.*, 2014), 2015년에는 적은 강수량으로 체류시간이 길어짐에 따라 유기물의 희석효과가 제한되어 다른 해에 비해 상대적으로 높은 농도가 관찰된 것으로 판단된다.

TP의 연평균 농도는 0.012 (±0.003)~0.019 (±0.009) mg L⁻¹의 범위로 시기별 차이를 보이지 않았으며, TN의 연평균 농도변화는 1.163 (±0.216)~1.922 (±1.091) mg L⁻¹이며,

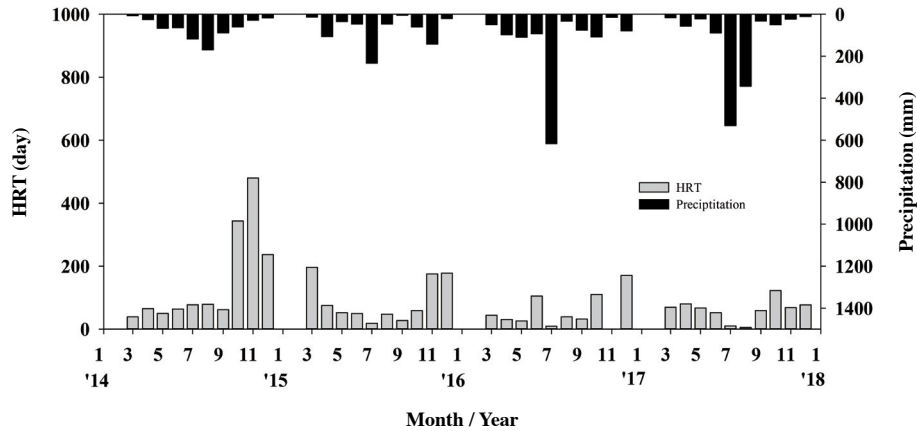


Fig. 2. Monthly variation of precipitation, hydraulic retention time (HRT) in Lake Chuncheon from 2012 to 2017 (except the frozen period).

Table 1. Annual changes of environmental factors in Lake Chuncheon (\pm standard deviation).

Year	Site	W.T(°C)	pH	DO(mg L ⁻¹)	COD(mg L ⁻¹)	TP(mg L ⁻¹)	TN(mg L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (mg m ⁻³)
2014	CC1	20.3 (\pm 8.0)	8.1 (\pm 0.5)	9.6 (\pm 2.1)	2.8 (\pm 0.5)	0.014 (\pm 0.008)	1.371 (\pm 0.474)	3.9 (\pm 2.6)
	CC2	20.0 (\pm 8.1)	7.9 (\pm 0.5)	9.9 (\pm 2.1)	3.1 (\pm 1.2)	0.016 (\pm 0.011)	1.272 (\pm 0.194)	2.9 (\pm 1.3)
	CC3	20.2 (\pm 7.8)	8.1 (\pm 0.5)	10.3 (\pm 1.7)	2.8 (\pm 0.5)	0.012 (\pm 0.003)	1.163 (\pm 0.216)	3.3 (\pm 1.8)
2015	CC1	18.2 (\pm 7.4)	8.2 (\pm 0.7)	10.1 (\pm 1.7)	4.2 (\pm 1.5)	0.017 (\pm 0.019)	1.773 (\pm 0.188)	5.7 (\pm 4.3)
	CC2	18.3 (\pm 7.3)	8.2 (\pm 0.6)	9.9 (\pm 2.0)	3.6 (\pm 1.5)	0.014 (\pm 0.007)	1.767 (\pm 0.226)	5.1 (\pm 3.7)
	CC3	18.8 (\pm 7.6)	8.5 (\pm 0.6)	10.5 (\pm 2.1)	3.7 (\pm 0.9)	0.011 (\pm 0.005)	1.794 (\pm 0.336)	8.5 (\pm 4.8)
2016	CC1	20.5 (\pm 7.0)	8.5 (\pm 0.3)	9.6 (\pm 1.2)	2.9 (\pm 0.6)	0.015 (\pm 0.008)	1.555 (\pm 0.467)	4.3 (\pm 3.1)
	CC2	20.8 (\pm 6.7)	8.7 (\pm 0.4)	9.4 (\pm 1.2)	2.7 (\pm 0.7)	0.015 (\pm 0.007)	1.696 (\pm 0.622)	4.0 (\pm 2.3)
	CC3	21.1 (\pm 7.2)	8.9 (\pm 0.5)	9.8 (\pm 1.2)	2.9 (\pm 0.5)	0.019 (\pm 0.009)	1.922 (\pm 1.091)	7.2 (\pm 4.4)
2017	CC1	18.7 (\pm 5.8)	8.2 (\pm 0.3)	10.1 (\pm 1.5)	3.5 (\pm 0.8)	0.014 (\pm 0.005)	1.431 (\pm 0.520)	6.7 (\pm 5.8)
	CC2	18.7 (\pm 6.3)	8.1 (\pm 0.2)	10.1 (\pm 1.3)	3.9 (\pm 1.1)	0.014 (\pm 0.006)	1.476 (\pm 0.405)	5.9 (\pm 4.2)
	CC3	18.8 (\pm 6.5)	8.0 (\pm 0.3)	10.2 (\pm 1.3)	3.6 (\pm 0.7)	0.014 (\pm 0.004)	1.499 (\pm 0.453)	7.2 (\pm 3.0)

CC3이 평균 1.638 mg L⁻¹로 다른 지점에 비해 다소 높게 나타났다(Table 1). 2015년의 평균 TN 농도가 1.778 mg L⁻¹로 다른 년도에 비해 상대적으로 높았으며, 이는 적은 강우로 인해 유량이 감소하고 영양염류의 농축효과가 발생한 것으로 판단된다. Chl. *a*의 연평균 농도는 2.9 (\pm 1.3)~8.5 (\pm 4.8) mg m⁻³의 범위로 조사되었으며, CC3이 평균 6.9 mg m⁻³으로 다른 지점에 비해 다소 높았다(Table 1). 시기별 농도는 식물플랑크톤 생물량이 증가한 2015년이 다른 해에 비해 비교적 높은 농도로 나타났다.

춘천호의 강수량과 환경요인과의 상관관계를 비교한 결과, 수온과 강수량은 유의한 상관관계를 보였는데($r=0.359$, $p<0.01$)(Table 2), 이는 수온이 높은 여름에 강수량이 많아졌을 뿐 직접적인 영향은 없는 것으로 사료된다. 영양염류 중 TP($r=0.215$, $p<0.05$)와 DTP($r=0.373$, $p<0.01$)는 강수량과 양의 상관성을 보였으며, 강우의 강도에 따라 외부에

서 오염물질이 호수 내로 유입되어 인 농도에 영향을 준 것으로 판단된다(An, 2000; Youn *et al.*, 2017). Chl. *a*는 강수량과 음의 상관관계($r=-0.358$ $p<0.01$)를 보였는데, 이는 강우가 증가함에 따라 희석효과가 발생하고 탁도 증가로 인한 광투과 방해가 발생함으로써 조류의 성장 억제와 Chl. *a*가 감소한 것으로 사료된다(Bae *et al.*, 2007).

2. 식물플랑크톤의 군집 변동 및 천이

춘천호의 지점별 식물플랑크톤 세포수는 초봄과 여름에 높고 가을과 겨울에 낮은 경향이 유사하게 나타났다(Fig. 3). CC1과 CC2의 식물플랑크톤 세포수는 각각 평균 2,094 cells mL⁻¹과 2,182 cells mL⁻¹로 유사하였으나, CC3는 평균 3,108 cells mL⁻¹로 두 지점에 비해 상대적으로 많았다(Fig. 4a). 특히 CC3은 2015년 연평균 세포수가 4,800 cells mL⁻¹ 이상으

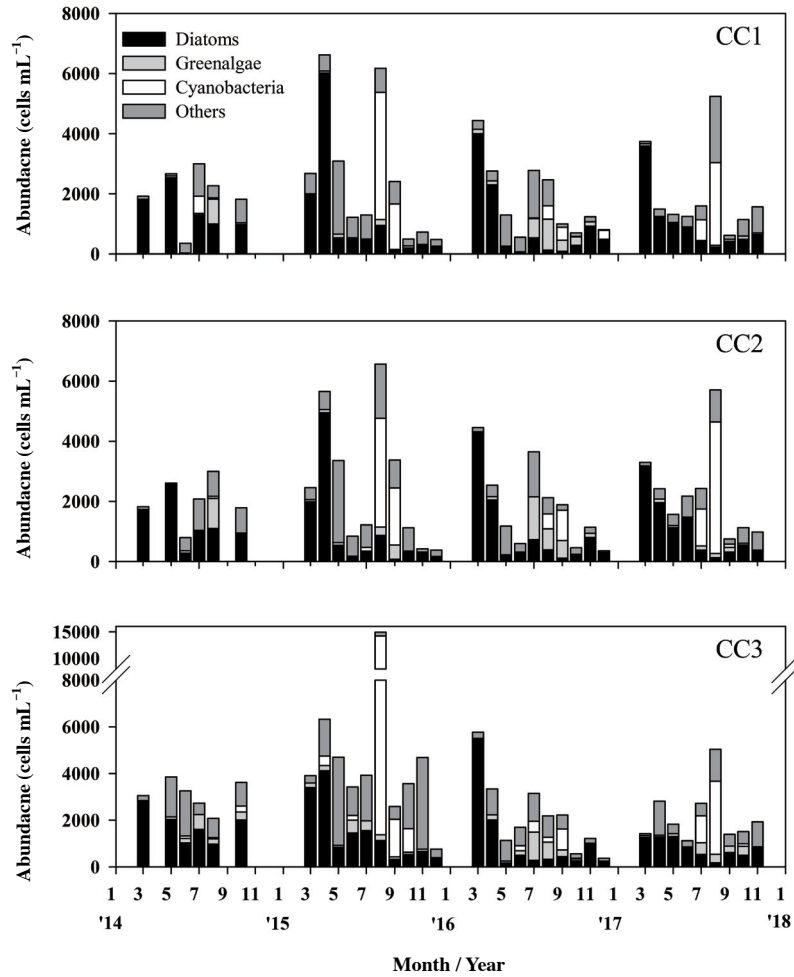


Fig. 3. Monthly variation of phytoplankton communities in Lake Chuncheon from 2014 to 2017 (except the frozen period).

Table 2. Pearson's correlation matrix between precipitation and environmental factors in Lake Chuncheon.

Parameters	W.T (°C)	pH	DO (mg L ⁻¹)	COD (mg L ⁻¹)	TP (mg L ⁻¹)	DTP (mg L ⁻¹)	TN (mg L ⁻¹)	DTN (mg L ⁻¹)	Chl. <i>a</i> (mg m ⁻³)
Precipitation	0.359**	0.120	-0.164	0.033	0.215*	0.373**	-0.076	-0.037	-0.358**

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, $n = 102$

로 출현하였으며, 8월 남조류의 발생량이 최대 14,000 cells mL⁻¹ 이상으로 다른 지점에 비해 3배 이상 많았다(Fig. 3). CC3은 낙시터가 인접해 있고 수심이 2~4 m로 낮아 적은 영양염류 유입에도 쉽게 영향을 받아 식물플랑크톤의 성장이 유리한 것으로 판단된다(Lee *et al.*, 2000).

춘천호의 연도별 식물플랑크톤 세포수는 강수량이 적었던 2014년과 2015년에 각각 평균 2,412 cells mL⁻¹와 2,852 cells mL⁻¹이었고, 강수량이 많았던 2016년과 2017년의 세포수는 각각 평균 1,699 cells mL⁻¹와 2,156 cells mL⁻¹로 2014

년과 2015년에 비해 상대적으로 적었다(Fig. 4b). 특히 강수량이 적었던 2015년 여름에 *Anabaena* 및 *Microcystis* 등의 남조류와 *Rhodomonas* 등의 기타 조류가 높은 출현율을 보이며 식물플랑크톤 세포수 증가에 영향을 미친 것으로 사료된다. Kim *et al.* (1995)은 남조류가 증식하는데 수체의 안정성을 가장 큰 요인으로 보고하였다. 이러한 주장은 강수량이 적었던 2015년에 체류시간이 증가하고 수체가 안정화되었을 뿐만 아니라 여름에 수온이 상승하여 남조류 성장조건이 만족됨으로써 상대적으로 세포수가 증가한 것을 뒷받침해

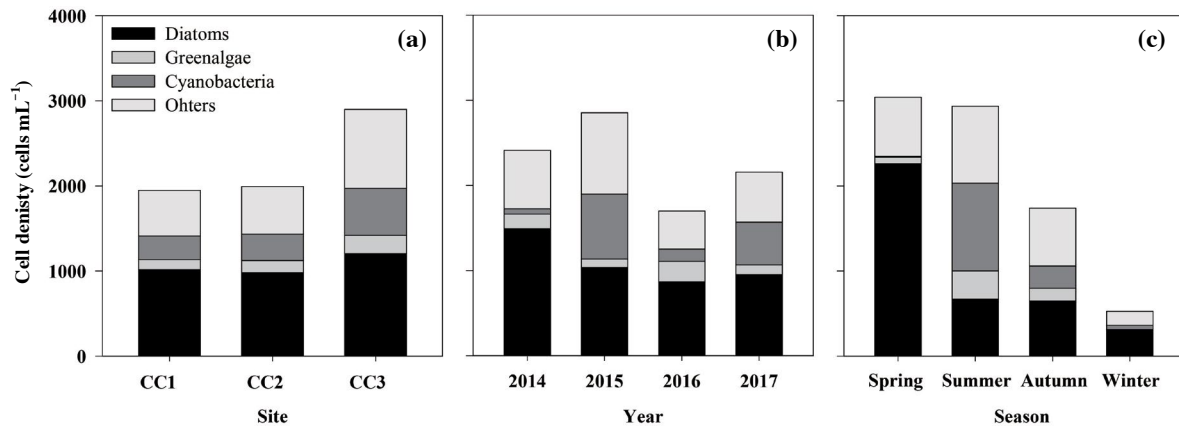


Fig. 4. Spatial distribution (a), annual (b) and seasonal variations (c) of the mean phytoplankton abundance in Lake Chuncheon.

준다(Figs. 3, 4b). 또한 체류시간이 증가하게 되면 영양염류의 농도 증가 및 식물플랑크톤의 영양염류 가용기간이 길어져 생물량이 증가하는 것으로 알려져 있으며(Park *et al.*, 2004), 본 연구지점인 춘천호에서도 2015년에 체류시간의 증가로 인한 영양염류의 농도 및 가용기간의 증가로 생물량이 높아진 것으로 추정된다.

춘천호에서 출현한 식물플랑크톤의 계절별 분포를 살펴보면 식물플랑크톤 발생은 봄과 여름에 높았으며 가을과 겨울에는 낮았다. 규조류는 봄에 평균 2,000 cells mL⁻¹ 이상으로 많은 세포수를 보였으며, 우점율이 70% 이상으로 높았다(Fig. 4c). 조사기간 중 출현한 규조류의 대표적인 우점종은 *Asterionella formosa*와 *Synedra acus*로 확인되었다(Table 3). *Asterionella formosa*는 하류에 위치한 청평호에서 봄에 주요 우점종으로 출현하였으며 춘천호에서도 봄에 최대 68.8%의 높은 우점율을 보였다. *Asterionella formosa*와 *Synedra acus*는 온대호수에서 자주 출현하는 종으로 봄에 생물량이 많으며(Krivtsov *et al.*, 2000; Reynolds *et al.*, 2002) 다른 조류에 비해 상대적으로 낮은 수온에서 성장이 활발한 것으로 알려져 있다(Vaconelos, 1991). 남조류는 수온이 높은 여름에 평균 1,033 cells mL⁻¹로 우점하였으며(Fig. 4c), 주요 출현종은 *Anabaena sp.*와 *Microcystis sp.* 등이었다. 녹조류는 늦봄에서 여름 사이에 증가하는 경향을 보이며, 주요 출현종은 *Scenedesmus quadricauda*, *Kirchneriella obesa*로 나타났다(Table 3). 기타 조류는 봄과 여름에 많은 세포수를 보였으며, 모든 계절에서 22~39% 사이의 우점률이 나타났고 우점종은 대부분 편모조류인 *Rhodomonas sp.*와 *Dinobryon divergens*가 출현하였다(Table 3). 특히, *Rhodomonas*는 북한강 수계인 청평호(Youn *et al.*, 2017)와 춘천호에서 전 시기에 걸쳐 출현하였으며, 적은 대수량으로도 생존이 가능한 것으로 알려져 있기 때문에 환경조건에 상

Table 3. Dominant species of phytoplankton taxa in Lake Chuncheon.

Taxa	Species	Percentage (%)
Diatoms	<i>Synedra acus</i>	13.6
	<i>Asterionella formosa</i>	13.1
Greenalgae	<i>Scenedesmus quadricauda</i>	0.8
	<i>Kirchneriella obesa</i>	0.7
Cyanobacteria	<i>Anabaena sp.</i>	9.4
	<i>Microcystis sp.</i>	4.3
Others	<i>Rhodomonas sp.</i>	15.4
	<i>Dinobryon divergens</i>	4.4

관없이 광범위하게 출현하는 것으로 사료된다(Hammer *et al.*, 2002).

3. 식물플랑크톤의 군집 지수

식물플랑크톤의 군집 지수는 식물플랑크톤의 군집 변화로 인해 환경변화를 대표하며 생태지수로 이용되는 것으로 알려져 있다(Karydis and Tsirtsis, 1996; Stirling and Wilsey, 2001). 춘천호의 식물플랑크톤 군집 지수는 조사시기와 강우에 따라 변화하며 다양성 지수는 1.04~2.51, 우점도 지수는 0.35~0.87, 균등도 지수는 0.39~0.87 및 풍부도 지수는 0.84~2.98의 범위로 다양하게 나타났다(Table 4).

식물플랑크톤 군집 지수 중 우점도 지수는 2016년과 2017년 여름에 낮고 봄과 겨울에 높은 경향을 보였으나, 2014년과 2015년에는 월별 변화가 적었으며 0.50 이상의 값이 나타났다. 풍부도 지수는 2014년과 2015년에는 대부분 기간에 2.00 이하였으며, 2016년과 2017년은 강우 이후 여름과 가을에 2.00 이상의 값을 가지는 시기가 나타났다. 다양성 지수는 강우가 적은 2014년과 2015년에 1.04~1.95의 범위로 2.00

Table 4. Temporal variation of phytoplankton community index in Lake Chuncheon.

Index	Diversity				Dominance				Evenness				Richness			
	Year	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016	2017	2014	2015	2016
Mar.	1.15	1.79	1.32	1.45	0.82	0.63	0.83	0.76	0.53	0.69	0.51	0.61	1.04	1.66	1.49	1.23
Apr.	-	1.15	2.00	1.53	-	0.82	0.54	0.73	-	0.39	0.69	0.60	-	2.02	2.09	1.51
May	1.57	1.04	1.45	1.81	0.66	0.85	0.73	0.60	0.66	0.42	0.61	0.70	1.32	1.35	1.36	1.67
Jun.	1.81	1.69	1.62	1.04	0.59	0.63	0.70	0.87	0.67	0.71	0.68	0.56	2.09	1.41	1.62	0.84
Jul.	1.58	1.85	2.35	1.85	0.70	0.59	0.44	0.58	0.64	0.77	0.78	0.72	1.48	1.36	2.44	1.60
Aug.	1.62	1.91	2.51	1.72	0.65	0.55	0.38	0.59	0.73	0.71	0.79	0.69	1.07	1.55	2.98	1.32
Sep.	-	1.54	1.88	2.43	-	0.69	0.57	0.35	-	0.68	0.73	0.86	-	1.09	1.66	2.36
Oct.	1.95	1.53	2.39	2.19	0.61	0.67	0.39	0.49	0.70	0.76	0.87	0.80	1.97	1.02	2.31	2.05
Nov.	-	1.91	1.57	1.79	-	0.53	0.66	0.61	-	0.76	0.66	0.72	-	1.69	1.36	1.51
Dec.	-	1.93	1.43	-	-	0.54	0.72	-	-	0.79	0.68	-	-	1.66	1.15	-

Table 5. Pearson's correlation matrix between precipitation and dominant species in lake Chuncheon.

Parameter	Date	Total	Diatoms	Greenalgae	Cyanobacteria	Others
Precipitation	2014	0.105	-0.371	0.695**	0.215	0.251
	2015	-0.049	0.105	-0.032	-0.164	0.108
	2016	0.544**	-0.032	0.636**	-0.046	0.688**
	2017	0.475*	-0.405*	0.402*	0.665*	0.381*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$, $n = 30$

이하였으며, 1.90 이상인 시기는 2014년 10월, 2015년 8월, 11월 및 12월로 나타났다. 강우가 전년도에 비해 상대적으로 많았던 2016년과 2017년에는 다양성 지수가 0.87~2.39의 범위로 나타났으며, 다양성 지수가 2.00 이상의 값을 가지는 시기는 2016년 7월, 8월 및 10월과 2017년 9월과 10월이었다. 2016년과 2017년에는 강우로 인한 체류시간의 감소로 종이 다양하게 출현하였으나 2014년과 2015년은 적은 강우와 체류시간이 증가하여 종 다양성과 풍부도가 낮아져 지수 값이 2.00 이하로 나타나는 것으로 판단된다(Margalef, 1964).

4. 환경요인과 식물플랑크톤 군집 관계

강수량과 식물플랑크톤의 상관관계를 비교한 결과, 2014년과 2015년에는 강우의 발생이 적어 강수량과 식물플랑크톤의 상관성이 나타나지 않았다(Table 5). 강우가 상대적으로 많았던 2016년($r = 0.544$, $p < 0.01$)과 2017년($r = 0.475$, $p < 0.01$)의 전체 식물플랑크톤 세포수는 강수량과 양의 상관관계를 나타냈으며 특히, 2017년에는 모든 분류군에서 강수량과 높은 상관성을 보였다. 2017년 규조류는 갈수기인 봄과 가을에 많이 출현하였고, 강우가 발생한 여름에 감소하는 경향을 보여 강수량과 음의 상관관계를 나타냈으며 ($r = -0.405$, $p < 0.05$), 녹조류는 강수량과 양의 상관관계 ($r = 0.402$, $p < 0.05$)를 보였다. 남조류는 2014년과 2015년 여름에 높은 발생을 보였으나 강우의 발생이 적어 유의한

상관관계는 보이지 않았으며, 2017년에는 강우량이 집중되는 시기인 여름에 남조류가 증가하여 강수량과 양의 상관관계가 나타난 것으로 판단된다($r = 0.665$, $p < 0.01$). 일부 연구에서 강수량의 증가는 체류시간을 감소시켜 남조류 등 식물플랑크톤을 하류로 유실시켜 생물량 감소를 유발한다고 알려져 있다(Park *et al.*, 2000). 그러나 본 연구에서는 강수량의 증가가 직접적인 영향을 미치지 않는 것으로 수온의 상승과 강우의 증가로 인한 일시적인 영양염류의 유입으로 세포수가 증가하여 강수량과 상관관계를 보인 것으로 사료된다(Joung *et al.*, 2005).

춘천호에서 규조류가 출현할 시기의 수온 범위는 4.3~31.2°C이며 12.8°C에서 세포수가 6,020 cells mL⁻¹로 가장 높게 출현하였다(Fig. 5). 춘천호에서 규조류의 세포수가 2,000 cells mL⁻¹ 이상으로 출현한 수온은 5.2~20.5°C의 범위로 나타났다. 또한, 규조류는 10°C 이하의 수온에서 다른 분류군에 비해 많은 세포수를 보이며 수온과 음의 상관관계 ($r = -0.418$, $p < 0.01$)를 보였다. 규조류 중 *Asterionella*는 수온이 2.6~19°C에서 많이 출현하며(Kim *et al.*, 2001; Kim, 2012), *Synedra*는 수온이 12~14°C의 범위에서 많이 출현하는 것으로 알려져 있다(Bondarenko and Geuselnikova, 2002). 춘천호에서 출현한 *Asterionella*와 *Synedra*는 낮은 온도 범위에서 많은 세포수로 출현 및 우점하였다. 녹조류는 수온 증가에 따라 출현빈도와 세포수가 증가하였

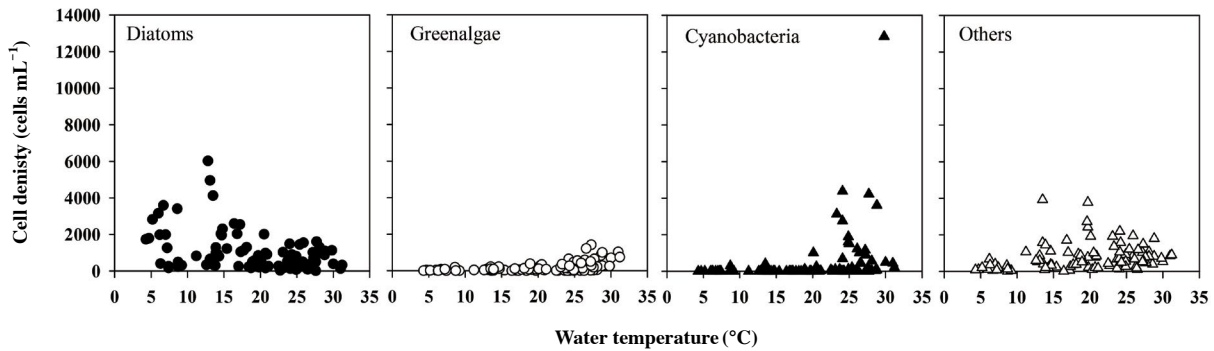


Fig. 5. Relationship between water temperature (°C) and phytoplankton abundance in Lake Chuncheon.

으며 ($r=0.494$, $p<0.01$), 27.3°C에서 세포수가 1,420 cells mL^{-1} 로 가장 많이 조사되었다. 남조류 중 대발생을 일으키는 종은 수온이 15°C 이하에서 성장률이 매우 낮으며, 수온이 15°C 이상의 온도에서는 성장이 증가한다고 알려져 있다(Chang *et al.*, 2012). 춘천호에서도 남조류 발생이 수온 15°C 이하에서 출현빈도가 적었으나, 주로 19°C 이상에서 많은 출현을 보이며 수온과 양의 상관관계를 나타냈다 ($r=0.307$, $p<0.01$). 또한 수온이 29.8°C였을 때 남조류 세포수가 12,000 cells mL^{-1} 이상으로 가장 많이 출현하였다. 기타 조류는 수온의 증가와 상관없이 연중 고르게 분포되어 출현하였다. 본 연구에서 춘천호의 식물플랑크톤 출현양상을 보면 수온이 낮은 봄과 가을에는 규조류가 증가하고, 수온이 높은 여름에는 남조류가 증가하는 등 온대호수의 천이 형태를 보이고 있으나(Reynolds *et al.*, 2002), 강수량과 환경요인으로 인한 수체의 안정 및 희석효과, 영양염류의 유입 정도 등이 식물플랑크톤 군집 변화에 중요한 영향을 끼치는 것으로 사료된다.

적 요

춘천호의 2014~2015년 평균 강수량은 800 mm 이하였으나, 2016~2017년에는 1,200 mm 이상으로 나타났다. 수온의 범위는 17.0~21.1°C, COD는 연평균 농도가 2.7~4.2 mg L^{-1} 였고, 2015년에 가장 높았으며 적은 강수량으로 체류시간이 증가하여 다른 해에 비해 높은 농도가 나타난 것으로 판단된다. TP와 TN의 연평균 농도는 각각 0.012~0.019 mg L^{-1} 와 1.272~1.922 mg L^{-1} 로 나타났으며 TN은 2014년부터 지속된 갈수현상으로 2015년이 다른 년도에 비해 높았다. 식물플랑크톤의 종 다양성 지수는 2014~2015년에 2.0 이하로 다른 년도에 비해 낮았으며, 강수량과 환경요인과의 상관분석 결과 수온, TP 및 Chl. *a*가 높게 나타났다. 식물플랑크

톤의 세포수는 CC3(상류) 지점이 CC1(하류)과 CC2(중류) 지점보다 상대적으로 많았으며 그 이유는 갈수현상으로 수체의 안정 및 유기물이 농축되어 남조류를 포함한 식물플랑크톤이 성장하기 유리한 조건이 되었을 것으로 판단된다. 수온에 따른 식물플랑크톤의 분류군별 상관관계 결과 규조류는 음의 상관관계, 녹조류와 남조류는 양의 상관관계를 보였다. 춘천호의 식물플랑크톤은 온대호수의 천이 형태를 보이고 있으나 강수에 따라 식물플랑크톤의 종 다양성 및 발생량과 수질환경요인이 다르게 나타났을 것으로 판단된다. 본 연구는 춘천호의 수질 및 식물플랑크톤의 장기변화를 조사한 최초의 결과이며 향후 추가 연구를 위한 선행자료로 제공하고자 한다.

저자 기여도 개념설정: 백준수, 윤석제, 방법론 및 분석: 백준수, 윤석제, 김현년, 심연보, 자료제공 및 관리: 백준수, 윤석제, 김현년, 심연보, 원고 초안작성: 백준수, 원고 교정: 임종권, 유순주, 원고 편집: 백준수, 윤석제, 임종권, 과제관리: 임종권, 연구지 수주: 유순주

이해관계 The authors declare no conflict of interest and the sponsors had no role in the design, execution, interpretation, or writing of the study.

연구비 본 연구는 환경부 한강수계관리위원회의 환경기초조사사업(과제명: 한강수계 호소환경 및 생태조사)의 지원에 의해 수행되었음.

REFERENCES

- Ali, M.A., M. Fereidun and A. Alireza. 2011. Seasonal change in phytoplankton community structure in relation to physico-chemical factors in Bukan dam reservoir. *Turkish Journal of Botany* 35: 77-84.

- An, K.G. 2000. Monsoon inflow as a major source of in-lake phosphorus. *Korean Journal of Ecology and Environment* **33**(3): 222-229.
- An, K.G. and J.R. Jones. 2000. Factors regulation bluegreen dominance in a reservoir directly influenced by the Asian monsoon. *Hydrobiologia* **432**: 37-48.
- Bae, D.Y., E.C. Yang, S.H. Jung, J.H. Lee and K.K. An. 2007. Nutrients and chlorophyll dynamics along the longitudinal gradients of Daechung reservoir. *Korean Journal of Limnology* **40**(2): 285-293.
- Bondarenko, N.A. and N.Y. Geuselnikova. 2002. Studies on *Synedra acus* Kutz. var. *radians* (Kutz.) Hust. (*Bacillariophyta*) in Culture. *International Journal on Algae* **4**: 85-95.
- Byun, J.H., I.H. Cho, S.J. Hwang, M.H. Park, M.S. Byeon and B.H. Kim. 2014. Relationship between a dense bloom of cyanobacterium *Anabaena* spp. and rainfalls in the North Han River system of South Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **47**(2): 116-126.
- Chang, T., P. Haiyan, H. Wenrong and X. Jun. 2012. Variation of cyanobacteria with different environmental conditions in Nansi Lake, China. *Journal of Environmental Sciences* **24**(8): 1394-1402.
- Chuncheon city. 2007. Chuncheon city basic plan.
- Chung, J. 1993. Illustration of the Freshwater Algae of Korea, Academy Publishing Company, Seoul. 496 pp.
- Hammer, A., R. Schumann and H. Schubert. 2002. Light and temperature acclimation of *Rhodomonas salina* (Cryptophyceae): Photosynthetic performance. *Aquatic Microbial Ecology* **29**(3): 287-296.
- Han River environment research center (HRERC). 2016. Survey on the Environment and Ecosystem of Lakes in the Han River System.
- Hirose, H.M., T. Akiyama, K. Imahori, H. Kasaki, S. Kumano, H. Kobayashi, E. Tajahashi, T. Tsumura, M. Hirano and T. Yamagishi. 1977. Illustrations of the Japanese freshwater algae, Uchidarokakuho Publishing Co., Ltd., Tokyo, Japan. 932 pp.
- John, D.M., B.A. Whitton and A.J. Brook. 2002. The freshwater algal flora of the British Isles, Cambridge University Press, Cambridge, UK. 702 pp.
- Jeon, H.W., J.W. Choi and K.G. An. 2012. Spatio-temporal water quality variations at various streams of Han-River watershed and empirical models of serial impoundment reservoir. *Korean Journal of Limnology* **45**(4): 378-391.
- Joung, S.H., C.Y. Ahn, A. Choi, K.Y. Jang and H.M. Oh. 2005. Relation between rainfall and phytoplankton community in Daechung Reservoir. *Korean Journal of Environment and Biology* **23**(1): 57-63.
- Karydis, M. and G. Tsirtsis. 1996. Ecological indices: a biometric approach for assessing eutrophication levels in the marine environment. *Science of the Total Environment* **186**: 209-219.
- Kim, B.C., J.H. Park, W.M. Hae, B.J. Lim, G.S. Hwang, K.S. Choi and J.S. Choi. 2001. The limnological survey of major lakes in Korea (4): Lake Juam, *Korean Journal of Ecology and Environment* **30**(1): 30-44.
- Kim, H.S. 2012. The dynamic of phytoplankton community in Unmun dam. *Korean Journal of Ecology and Environment* **45**(2): 232-241.
- Kim, J.I., J.W. Choi and K.G. An. 2014. Spatial and temporal variations of water quality in an urban Miho stream and some influences of the tributaries on the water quality. *Journal of Environmental Science International* **23**(3): 433-445.
- Kim, M.W., M.H. Kim, J.C. Cho and S.J. Kim. 1995. Change of biological community by cyanobacterial bloom in Daechung reservoir. *Korean Journal of Limnology* **28**(1): 1-9.
- Kim, Y.G., H.S. Won, J.B. Kyong, D.K. Kim and T.K. Hong. 2000. Water quality of lake around Hanyang University. *Bulletin of Environmental Science* **21**: 5-12.
- Kim, Y.J., M.K. Kim and S.D. Lee. 2012. Identification of autumn phytoplankton in the lakes of Han River system. *Journal of Wetlands Research* **20**(2): 173-180.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1986. Bacillariophyceae. 1. Naviculaceae, In Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 876 pp.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1988. Bacillariophyceae. 2. Bacillariaceae, Epithemiaceae, Surirellaceae, In Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 596 pp.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991a. Bacillariophyceae 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae, In Ettl, H., J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 576 pp.
- Krammer, K. and H. Lange-Bertalot. 1991b. Bacillariophyceae. 4. Achnantheaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema, Gesamtliteraturverzeichnis, In Ettl, H., G. Gärtner, J. Gerloff, H. Heynig and D. Mollenhauer (eds.). Süßwasserflora von Mitteleuropa, 2, G. Fischer Verlag, Stuttgart, 437 pp.
- Krivtsov, V., E.G. Bellinger and D.C. Sigeo, 2000. Changes in the elemental composition of *Asterionella formosa* during the diatom spring bloom, *Journal of Plankton Research* **22**(1): 169-184.
- Lee, S.J., B.C. Lim, G.H. Lee, W.G. Jeong, B.N. Hur and I.R. Hur. 2016. Long term monitoring for the control of cyanobacterial blooms in Lake Uiam. *Journal of the Korean Society for Environmental Analysis* **19**(2): 109-118.
- Li, L., N. Wan, N.Q. Gan, B.D. Xia and L.R. Song. 2007. Annual dynamics and origins of the odorous compounds in the pilot experimental area of Lake Dianchi, China. *Water Science and Technology* **55**(5): 43-50.
- Lim, Y.S., W.S. Song, J.S. Cho, H.J. Lee and J.S. Heo. 2000. The effect of algae on coagulation and filtration of water treat-

- ment process. *Korean Journal of Environmental Agriculture* **19**(1): 13-19.
- Margalef, R. 1958. Information theory in ecology. *International Journal of General Systems* **3**: 36-71.
- Margalef, R. 1964. Correspondence between the classic types of lakes and the structural and dynamic properties of their populations. *Internationale Vereinigung für Theoretische und Angewandte Limnologie* **15**: 169-175.
- Mcnaughton, S.J. 1967. Relationships among functional properties of Californian grassland. *Nature* **216**: 168-169.
- Ministry of Environment (ME). 2014. Standard method for examination of water pollution. Ministry of Environment.
- Pan, G., M.M. Zhang, H. Chen, H. Zou and H. Yan. 2006. Removal of cyanobacterial blooms in Taihu Lake using local soils. I. Equilibrium and kinetic screening on the Flocculation of *Microcystis aeruginosa* using commercially available clays and minerals. *Environmental Pollution* **141**: 201-205.
- Paerl, H.W. 1988. Nuisance phytoplankton blooms in coastal, estuarine, and inland waters. *Limnology and Oceanography* **33**(4): 823-847.
- Park, H.K., W.H. Jheong, O.S. Kwon and J.K. Ryu. 2000. Seasonal succession of toxic cyanobacteria and microcystins concentration in Paldang reservoir. *Algae* **15**(1): 29-35.
- Park, H.K., U.H. Lee and D.I. Jung. Organic carbon budget during rainy and dry period in Paldang reservoir. 2004. *Korean Journal of Limnology* **37**(3): 272-281.
- Park, H.K., R.Y. Shin, H.J. Lee, K.L. Lee and S.U. Cheon. 2015. Spatio-temporal characteristics of cyanobacterial communities in the middle-downstream of Nakdong River and Lake Dukdong. *Journal of Korean Society on Water Environment* **31**(3): 286-294.
- Pielou, E. 1966. The measurement of diversity in different type of biological collections. *Journal of Theoretical Biology* **13**: 131-144.
- Qin, B., G. Zhu, G. Gao, Y. Zhang, W. Li and H.W. Paerl. 2010. A Drinking water crisis in Lake Taihu, China: linkage to climatic variability and lake management. *Environmental Management* **45**: 105-112.
- Reynolds, C.S. 1987. Cyanobacterial water-blooms. *Advances Botanical Research* **13**: 67-143.
- Reynolds, C.S. 1993. Scales of disturbance and their role in plankton ecology. *Hydrobiologia* **249**: 157-171.
- 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**(5): 417-428.
- Shannon, C.E. and W. Wiener. 1963. *The Mathematical Theory of Communication*. Urbana, IL: University of Illinois Press, 127 pp.
- Sommer, U. 1995. An experiment test of the intermediate disturbance hypothesis using cultures of marine phytoplankton. *Limnology and Oceanography* **40**(7): 1271-1277.
- Stirling, G. and B. Wilsey. 2001. Empirical relationships between species richness, evenness, and proportional diversity. *American Naturalist* **158**(3): 286-299.
- Vasconcelos, V.M. 1991. Species composition and dynamics of the phytoplankton in a recently commissioned reservoir (Azibo-Portugal). *Archiv für Hydrobiologie* **121**(1): 67-78.
- You, K.A., M.S. Byeon, S.J. Youn, S.J. Hwang and D.H. Rhew. 2013. Growth characteristics of blue-green algae (*Anabaena spiroides*) causing tastes and odors in the North-Han river, Korea. *Korean Journal of Ecology and Environment* **46**(1): 135-144.
- Youn, S.J., H.N. Kim, J.K. Im, Y.J. Kim, J.S. Baek, S.W. Lee, E.J. Lee and S.J. Yu. 2017. Effect of Environmental factors on phytoplankton communities and dominant species succession in Lake Cheongpyeong. *Journal of Environmental Science International* **26**(8): 913-925.